

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA



PROYECTO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL QUÍMICO

**“ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO
Y ECONÓMICA PARA LA PRODUCCIÓN DE
NITRATO DE CALCIO EN CHILE”**

FELIPE HEMMELMANN SAINT-JEAN

Profesor Guía:
Jaime Fernández C.

2012

Resumen

El objetivo del presente trabajo de título es determinar la factibilidad técnico-económica de una planta productora de nitrato de calcio tetra hidratado en estado sólido, producto que corresponde a un fertilizante de alta solubilidad y por ende es ideal su uso para fertirrigación.

Por consideraciones de disponibilidad y abastecimiento de materias primas, se escoge la localización de la planta en el complejo Prillex América[®] de Enaex, ubicado en Mejillones, Antofagasta.

La planta técnicamente elaborará 20.0000 [ton/año] de $\text{Ca}(\text{CO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ con un contenido aproximado de 15% de nitrógeno y 26% de calcio presente como CaO (valores equivalentes al producto comercial).

La inversión fija alcanza US\$ 4.064.048, siendo el gasto en capital fijo directo el costo más importante con US\$ 2.824.096. Los costos variables de producción corresponden a 302 [US\$/tonN.C]. El principal costo de producción es el del ácido nítrico, producido por Enaex, y corresponde a un 44% del costo total de producción.

Para realizar la evaluación económica el precio de venta del producto se estimó analizando las importaciones de nitrato de calcio de calidad similar al producido por la planta, obteniéndose un valor presente neto, VPN, de US\$ 6.209.880, a plazo de 10 años y la tasa interna de retorno, TIR, presenta un valor de 33.65%.

Los ingresos anuales son US\$ 1.992.009 y el flujo de caja presenta un EBITDA ("Earnings Before Interest, Taxes, Depreciation, and Amortization", Ingresos antes de Intereses, Impuestos, Depreciaciones y Amortizaciones) de US\$ 2.438.702.

Cabe señalar que con el objeto de realizar una investigación más acabada y determinar de manera efectiva la viabilidad técnico-económica de un posible proyecto industrial para la utilización de ácido nítrico en la producción de cristales de nitrato de calcio tetrahidratado a partir de carbonato de calcio, Enaex en forma conjunta con CORFO, desarrollaron una planta productora de nitrato de calcio a nivel piloto (capacidad máxima de producción de 0,5[ton/día]).

Tabla de contenido

1	Introducción	1
2	Objetivos.....	3
2.1	Objetivo General.....	3
2.2	Objetivos Específicos	3
3	Nitrato de Calcio	4
3.1	El Calcio en las plantas	4
3.2	Nitrógeno en las plantas	6
3.3	Descripción del producto $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	8
3.4	Especificaciones técnicas del nitrato de calcio comercial.....	11
3.5	Descripción de reactivos.....	12
3.5.1	Carbonato de calcio.....	12
3.5.2	Ácido nítrico.....	13
3.5.3	Nitrato de amonio	14
4	Estudio de Mercado.....	16
4.1	Tendencia mundial de los fertilizantes	16
4.2	Antecedentes generales	17
4.3	Clasificación de productos	18
4.4	Importaciones de Nitrato de Calcio	20
4.5	Análisis de precio para el nitrato de calcio	24
4.5.1	Precio de Venta (PV):	24
4.6	Actuales distribuidores de nitrato de calcio en Chile	26
	Gráfico 4.7. Empresa Comercializadoras de Nitrato de Calcio en Chile	26
4.7	Potenciales clientes	26
4.8	Actuales proveedores de nitrato de calcio:	27
4.9	Mercado potencial en Perú	28

4.10	Importaciones de Nitrato de Calcio a Perú.....	29
4.11	Objetivo y estructura de negocio.....	32
4.11.1	Oportunidades de la Estructura del Negocio.....	32
4.11.2	Amenazas de la Estructura del Negocio	32
4.11.3	Propuesta de valor para el cliente.....	33
5	Capacidad y Localización de la Planta.....	34
5.1	Determinación de la ubicación geográfica de la planta	34
5.2	Mercado de Consumo	35
5.3	Disponibilidad de materias primas	35
5.4	Insumos, repuestos y servicios	35
5.5	Mano de Obra.....	36
5.6	Demanda de Nitrato de Calcio	36
5.7	Proyección de la demanda de Nitrato de Calcio	38
5.7.1	Dimensionamiento del mercado peruano.....	41
5.8	Dimensionamiento de la Capacidad de Producción de la Planta	42
6	Tecnologías existentes y proceso seleccionado	44
6.1	Método de BASF	44
6.2	Método de fabricación estudiado por Fertilcol S.A.	46
6.3	Proceso de fabricación de N.C granulado realizado en pilotaje	48
6.4	Proceso de fabricación de nitrato de calcio seleccionado	51
6.5	Proceso Seleccionado	51
7	Medidas ambientales y análisis de riesgos	53
7.1	Identificación de aspectos ambientales.....	53
7.2	Medidas ambientales.....	54
7.2.1	Manejo de emisiones hacia la atmosfera	54
7.2.2	Manejo de desechos sólidos domésticos.....	54
7.2.3	Manejo de residuos sólidos industriales.....	55

7.2.4	Medidas de mitigación del recurso suelo	55
7.2.5	Medidas para el manejo de efluentes domésticos	55
7.2.6	Control de efluentes industriales.....	56
7.2.7	Protección del recurso biótico.....	56
7.2.8	Manejo paisajístico del proyecto.....	56
7.2.9	Gestión Social	56
7.2.10	Seguridad Ocupacional	56
7.2.11	Autoridad Ambiental	57
7.3	Análisis de riesgos.....	57
7.3.1	Riesgo del Personal.....	57
7.3.2	Proceso	58
8	Balances de Masa	59
8.1	Balance de masa global	59
8.2	Balance de masa al reactor:	60
8.3	Balance de masa al evaporador	61
8.4	Balance de masa al filtro prensa.....	62
8.5	Balance de masa al rodillo enfriador de cristales (escamador)	63
8.6	Balance de masa al molino.....	63
9	Balance de Energía	65
9.1	Balance de energía al reactor.....	65
9.2	Balance de energía al evaporador	67
9.3	Balance de energía al escamador	68
10	Dimensionamiento de equipos	70
10.1	Estanque de almacenamiento de solución de ácido nítrico.....	70
10.2	Reactor R-1	71
10.3	Evaporador (E-1).....	77
10.4	Filtro prensa (F-1).....	78

10.5	Enfriador Rotatorio (Escamador)	79
10.6	Molino.....	81
10.7	Tornillo Alimentador de Carbonato de Calcio:.....	83
10.8	Bomba dosificadora de solución de ácido nítrico BD-1	83
10.9	Bomba a Evaporador (E-1).....	87
10.10	Bomba filtro prensa (BD-3).....	89
10.11	Bomba limpiadora filtro prensa (BD-4).....	91
10.12	Correa transportadora de carbonato de calcio (C-1)	94
10.13	Correa transportadora de nitrato de calcio (C-2)	95
10.14	Correa transportadora de nitrato de calcio (C-3)	97
10.15	Planta Ensacadora.....	98
11	Costos.....	99
11.1	Capital Total de Inversión	99
11.1.1	Capital fijo:.....	99
11.2	Capital Fijo Indirecto	104
11.3	Costos Fijos Totales	105
11.4	Costo Total del Producto	106
11.4.1	Costo de Producción	106
➤	Costos Directos de Producción o Costos Variables	106
➤	Costos Indirectos de Producción	111
➤	Gastos Generales de Planta.....	112
11.5	Depreciación.....	113
12	Evaluación Económica	115
12.1	Análisis Preliminar de la Inversión	115
12.1.1	Introducción.....	115
12.1.2	Objetivos de la Evaluación Económica	115
12.1.3	Antecedentes de la Evaluación Económica	115

12.1.4	Ubicación.....	116
12.2	Visión General del Proceso	117
12.2.1	Resumen de la Inversión	118
12.2.2	Flowsheet del Proceso	120
12.3	Análisis para el precio de venta del nitrato de calcio.....	121
12.3.1	Precios de importación	121
12.3.2	Costos de fabricación	121
12.3.3	Preponderancia en los costos de producción:.....	123
12.4	Análisis al precio de venta del nitrato de calcio Incorporando aditivo al nitrato de calcio	124
12.4.1	Costos de fabricación	125
12.5	Relevancia del Amoniaco	128
12.6	Resumen Anterior al Flujo de Caja	129
12.7	Flujo de caja considerando la adición de nitrato de amonio.....	130
12.8	Flujo de caja sin la adición de nitrato de amonio.....	131
12.9	Análisis de sensibilidad.....	132
12.9.1	Evaluación económica usando nitrato de amonio como reductor de la higroscopicidad del nitrato de calcio.	132
12.9.2	Evaluación económica sin usar nitrato de amonio como reductor de la higroscopicidad del nitrato de calcio.	134
13	Conclusiones, Recomendaciones y Justificaciones.....	138
13.1	Conclusiones	138
13.2	Recomendaciones.....	139
13.2.1	Recomendaciones.....	139
13.3	Justificaciones	141
14	Bibliografía	142
15	Anexos.....	144
A.1	Antecedentes de la empresa	144

A.2 Generalidades	151
A.3: Balance de Masa.....	159
A.4: Balance de Energía	175
A.5: Pilotaje	180

1 Introducción

Desde los principios de los tiempos el hombre ha tenido que buscar diversas formas de alimentación para sobrevivir, en donde la aparición de la agricultura como fuente de suministro de insumos alimenticios fue de vital importancia.

A medida que la población aumentaba y los sitios aptos para ser usados como superficie de cultivo disminuyeron fue necesaria la aparición de fertilizantes que enriquecieran la tierra de nutrientes ya sea por exceso de cultivo en ella o por motivos externos, con el fin de satisfacer las necesidades humanas de alimentación.

Los fertilizantes son sustancias que contienen nutrientes esenciales para el crecimiento de la plantas. El uso de fertilizantes se conoce desde el año 500 antes de Cristo, manifestándose con la adición de tiza al suelo para mejorar su calidad. De una misma manera los griegos y romanos usaban estiércol animal para estimular el crecimiento de las plantas. Es claro señalar que el estudio de estas técnicas agrícolas se remonta a mediados del siglo XVII, cuando científicos alemanes publicaron un artículo mencionando que el crecimiento de las plantas estaba directamente relacionado con la adición de ciertas sustancias con propiedades fertilizantes.

Todo suelo contiene un número de elementos químicos que son necesarios para el crecimiento de las plantas, dentro de los elementos más importantes se encuentran el nitrógeno, potasio, calcio, fósforo, hierro, magnesio, cobre, zinc, azufre, manganeso y boro; sin tomar en cuenta los elementos constituyentes de mayor proporción que son el carbono, hidrógeno y oxígeno.

En 1830 se plantea que el uso del nitrógeno favorece el desarrollo vegetal y las funciones del calcio en las plantas se estudiaron de forma exhaustiva en 1984 por Kirkby, Hanson y Pilbeam.

En los últimos años el calcio ha suscitado gran interés en la fisiología vegetal y la biología molecular debido a su función como segundo mensajero en la conducción de señales entre factores ambientales y las respuestas de las plantas en torno a su crecimiento y desarrollo.

La presente tesis surge debido a la nueva mirada empresarial tomada por Enaex S.A., la cual consiste en una diversificación de funciones, en donde aparte de explosivos, pretende explorar la fabricación y comercialización de diversos productos químicos fabricados a base de amoníaco (NH_3), ácido nítrico (HNO_3) o nitrato de amonio.

Para la realización de la presente tesis y obtener datos concretos del proceso se realizó un pilotaje, de donde se obtuvieron diversos datos de operación y proceso.

2 Objetivos

2.1 Objetivo General

Determinar factibilidad técnica y económica de implementar una planta productora de nitrato de calcio en Chile.

2.2 Objetivos Específicos

- Fijar el lugar idóneo para la implementación de una planta productora de nitrato de calcio comercial en Chile.
- Dimensionar el mercado y precios del nitrato de calcio comercializado en Chile.
- Determinar un proceso adecuado para el funcionamiento de una planta de nitrato de calcio en Chile.
- Decretar riesgos y medidas ambientales requeridas en relación al proceso de fabricación de nitrato de calcio.

3 Nitrato de Calcio

3.1 El Calcio en las plantas

El calcio es un elemento químico que pertenece a los metales del tipo alcalino térreos, del grupo II A de la tabla periódica. En el cuerpo humano es el mineral más abundante (alrededor de 1[kg]¹) y uno de los que están presentes en mayor cantidad en la corteza terrestre (3,6%_{pp})².

El calcio en estado natural no se encuentra en forma libre, se puede encontrar en la piedra caliza, conchas y tizas como carbonato de calcio o calcita (CaCO₃).

Son múltiples los minerales que conforma el calcio, dentro de los más importantes encontramos la anortita (CaAl₂Si₂O₈) que posee entre un 7 y un 14% de Ca y los piroxenos del tipo CaMgSi₂O₆ teniendo entre 9 y 16% de Ca. El calcio también está presente en pequeñas cantidades en los borosilicatos.

En las regiones áridas y semiáridas son predominantes la calcita y la dolomita como las principales fuentes de Ca. En los suelos chernozem, desértico y marrón castaño, debido a la evaporación, el Ca precipita y se acumula como carbonato. Dentro de las primeras sales que precipitan cuando se produce la evaporación de las aguas salinas se encuentran la calcita y el aragonito.

El yeso o sulfato de calcio se presenta generalmente en suelos superficiales y subsuelos localizados en zonas áridas.

El calcio en las plantas se presenta en forma de oxalato y pectato cálcico, siendo un componente directamente relacionado con la elongación y división celular.

El calcio tiene influencia sobre el pH de las células, la estabilidad estructural de estas y la permeabilidad de las membranas celulares. También actúa como un ión regulador en la translocación de los carbohidratos ya que está directamente relacionado con las células y sus membranas, jugando un papel sumamente importante en la mitosis celular.

El calcio actúa como activador de ciertas enzimas produciéndose un efecto beneficioso en el vigor de las plantas, la rigidez del tallo y la formación de semillas.

¹ Marshall, W.J. 1995. Clinical Chemistry, 3° Ed. Mosby, London.

² Devlin, T. M. 2004. Bioquímica, 4ª edición. Reverté, Barcelona.

En ciertas ocasiones la planta puede estar en suelos abundantes en calcio y aún así presentar deficiencias, esto se debe a que el calcio es un elemento muy difícil de fijar y poco móvil en la mata, si el calcio en el suelo se encuentra inmovilizado o en presencia de otros cationes en donde se produzca competencia entre ellos, es difícil que la planta absorba este nutriente por vía pedicular. Por ende es fundamental promover una buena vascularización del fruto en el momento de su formación, pues éste sistema vascular será el que permita llegar al Calcio al fruto, en el momento de su desarrollo.

Los frutos absorben la mayor cantidad de Calcio entre los 20 a 60 días tras la floración, produciéndose un repunte de la absorción de Calcio poco antes de la cosecha. Durante este período de tiempo hay que hacer aportes periódicos de calcio asimilable por la planta y aplicaciones directas al fruto, en formas fácilmente asimilables y translocables dentro de la planta.

A medida que el fruto va aumentando de tamaño, la concentración de Ca en el mismo va disminuyendo de manera regular, lo que facilita la aparición de los síntomas de deficiencias en frutos y la invasión del fruto por diversos patógenos. Por esto es imprescindible la aplicación foliar de Ca de manera repetida durante el período de engrosamiento del fruto.

Los aportes muy tempranos de calcio favorecen la multiplicación y elongación celular, la activación metabólica y la correcta gestión del agua en la planta, contribuyendo a mantener un favorable balance hídrico en la misma. Además, una planta y frutos bien nutridos en calcio serán más resistentes a diversas situaciones de estrés biótico y abiótico.

Funciones del calcio en la planta³:

- Promueve el alargamiento celular
- Toma parte en la regulación estomática
- Participa procesos metabólicos de absorción de otros nutrientes
- Fortalece la estructura de la pared celular de la planta
- Participa procesos enzimáticos y hormonales
- Ayuda a proteger la planta cuando se presentan altas temperaturas
- Protege la planta de enfermedades, hongos y bacterias

³Horst Marschener. 2002. Mineral Nutrition of Higher Plants

- Aumenta la calidad de la fruta

La figura 3.1 muestra efectos que pueden provocar deficiencias de calcio en frutas y verduras.

“BitterPit” en Manzano

“Blossom end Rot” en Tomate

“Corazón Negro” en Lechuga



Figura 3.1. Principales Deficiencias de Calcio en Cultivos Agrícolas

3.2 Nitrógeno en las plantas

El nitrógeno es el elemento más abundante de la atmosfera terrestre, se presenta como un gas incoloro, inodoro e insípido. Corresponde a un elemento no metálico, pertenece al grupo V A de la tabla periódica y es componente de toda materia viva.

En estado natural lo podemos encontrar de forma combinada como nitrato de potasio (KNO_3) y nitrato de sodio (NaNO_3). En la atmosfera, suelo y guano se encuentra como sales de amonio y en el agua de mar existe como iones de amonio (NH_4^+), iones nitrito (NO_2^-) y nitrato (NO_3^-). En los organismos vivos el nitrógeno se presenta al formar complejos orgánicos como proteínas, ácidos nucleicos y clorofila.

Las plantas obtienen el nitrógeno mayoritariamente del suelo, el nitrógeno en la tierra se presenta de forma orgánica y de esta manera las plantas no lo pueden absorber directamente, sino que después de un proceso de mineralización catalizada por microorganismos del suelo.

En el suelo la cantidad de nitrógeno presente es pequeña, con valores cercanos al 0,5%, está cantidad disminuye con la profundidad.

El nitrógeno es esencial para el correcto desarrollo de las plantas, es primordial para la síntesis de la clorofila y a su vez, como parte de la molécula de clorofila, tiene un papel primordial en la fotosíntesis. En caso de que exista carencia de nitrógeno y clorofila el cultivo no podrá aprovechar la luz del sol como energía para realizar las funciones básicas de absorción de nutrientes. Además el nitrógeno es un componente de las vitaminas y sistemas de energía de la planta.

Las plantas que se encuentran con deficiencia de nitrógeno tienden a atrofiarse, estas crecerán de forma más lenta y producirán menos hijuelos que lo normal. También presentan un menor número de hojas y en ciertos cultivos como la papa y el algodón se puede evidenciar una madurez prematura comparada con otras que no presenten deficiencias de nitrógeno.

La figura 3.2 muestra algunos de los efectos de la deficiencia de nitrógeno en los cultivos agrícolas.

Menor crecimiento y clorosis en trigo

Clorosis generalizada en Maiz



Figura 3.2. Principales Deficiencias de Nitrógeno en Cultivos Agrícolas

3.3 Descripción del producto $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$

Corresponde a un fertilizante de alta solubilidad (1220 [g/l] a 20°C) por ende es ideal su uso para fertirrigación. Contiene aproximadamente un 15% de nitrógeno y un 26% de calcio como CaO, dependiendo de la fase en que se encuentre.

El nitrato de calcio generalmente se fabrica de forma sólida ya que su gran solubilidad permite disolver grandes cantidades de este en el agua y de esta manera ser aplicado en forma de fertirriego. También puede elaborarse de forma líquida (en solución), pero esto genera un mayor gasto en transporte.

El nitrato de calcio se elabora a través de la reacción de carbonato de calcio (CaCO_3) y ácido nítrico (HNO_3), presentándose el carbonato en forma sólida y el ácido en estado líquido. Como materia prima también puede emplearse hidróxido de calcio, pero debido a su pureza baja con respecto al carbonato de calcio y su poca factibilidad técnica debido a que se provoca una reacción sumamente exotérmica y la solución queda con grumos de sólido y lo complicado de filtrar se optó por usar CaCO_3 como materia prima.

El nitrato de calcio es blanco y cristalino y se disuelve en agua con gran facilidad. Según las condiciones de preparación, de una disolución saturada se pueden preparar cristales con diferentes cantidades de agua de cristalización. Se conocen los siguientes hidratos:

- $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, Nitrógeno:11.9%, Agua: 30,52%, Calcio: 16,95%
- $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, Nitrógeno:12.9%, Agua: 24,78%, Calcio:18,35%
- $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, Nitrógeno:14,0%, Agua: 18,00%, Calcio: 20,00%

Los cristales expuestos al aire absorben la humedad (son fuertemente higroscópicos), se disuelven en el agua absorbida y en su propia agua de cristalización. Por esta razón no se puede usar nitrato de calcio puro cuando se emplea en forma de polvo para dispersarlo como abono. El nitrato de calcio pierde su higroscopicidad al añadirle pequeñas cantidades de nitrato de amonio.

Al añadir una disolución concentrada de nitrato de calcio en relación molar 1 mol de nitrato amónico a 5 moles de nitrato de calcio, se forma una sal doble $5(\text{CaNO}_3)_2 \cdot$

$\text{NH}_4\text{NO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ que prácticamente ya no es higroscópica y, por lo tanto, no forma grumos, pudiéndose esparcir fácilmente.

El nitrato de calcio mayormente usado como fertilizante se emplea como nitrato de calcio tetra hidratado ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$).

La figura 3.3 muestra el diagrama de fases del nitrato de calcio, en donde el equilibrio está dado por las curvas A, B, C, D. Entre B y C se muestra que la solución se encuentra sobresaturada con respecto al trihidrato, entre C y D la solución se encuentra saturada con respecto al di- y el tetra hidratado. Cuando existen concentraciones superiores a la eutéctica de la fase sólida tetra-tri- hidratada, tenemos un estado meta estable.

En el proceso productivo la cristalización se debe hacer con temperaturas cercanas a los 42°C , a modo de obtener el tetrahidratado.

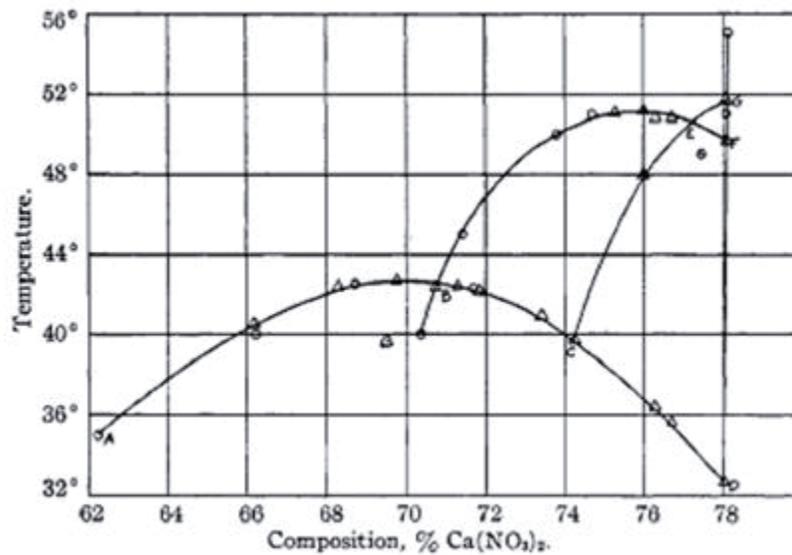


Figura 3.3. Diagrama de fases del nitrato de calcio

La Tabla 3.1 muestra las fases del nitrato de calcio según su temperatura de cristalización.

Tabla 3.1. Fases del Nitrato de Calcio⁴

TEMPERATURE-COMPOSITION RELATIONS		
Ca(NO ₃) ₂ %*	Temp., °C.	Solid phase
12.5	— 4.7	Ice
22.9	— 9.0	Ice
33.2	—16.1	Ice
46.2	—15.3	Tetrahydrate
52.0	+7.4	Tetrahydrate
59.9	30.2	Tetrahydrate
62.2	35.0	Tetrahydrate
66.2	40.5	Tetrahydrate
68.3	42.4	Tetrahydrate
69.5	42.7	α-Tetrahydrate (F. p. of compound)
69.5	39.7	β-Tetrahydrate (F. p. of compound)
69.8	42.7	Tetrahydrate
70.7	42.4	Tetrahydrate
Eutectic	42.6	Tetra-Trihydrate
71.3	42.5	Tetrahydrate
71.8	42.2	Tetrahydrate
73.4	40.9	Tetrahydrate
Eutectic	39.6	Tetra-Dihydrate
75.25	51.1	Trihydrate (F. p. of compound)
76.0	51.1	Trihydrate
76.0	48.1	Dihydrate
76.3	38.4	Tetrahydrate
76.3	50.8	Trihydrate
76.7	35.6	Tetrahydrate
76.7	49.8	Dihydrate
76.7	50.8	Trihydrate
Eutectic	50.8	Tri-Dihydrate
Transition	51.6	Di-Anhydride
Eutectic	32.7	Tetra-Anhydride
Eutectic	49.8	Tri-Anhydride

* % = g. Ca(NO₃)₂ per 100 g. of solution.

Otros usos para el nitrato de calcio son:

- Como explosivo en la fabricación de fuegos artificiales
- Como aditivo en la preparación de lodos de perforación
- En la producción de acero, como espumante de escorias
- Inhibidor de la corrosión en combustibles Diesel
- Como aditivo el hormigón
- En el tratamiento de aguas residuales

Las principales propiedades físico-químicas del nitrato de calcio tetra hidratado son mostradas en la tabla 3.2.

⁴Métodos de la Industria Química, tomo I. Fritz Tegeder.

Tabla 3.2. Propiedades físico-químicas del nitrato de calcio tetrahidratado

Fórmula molecular	$\text{Ca}(\text{CO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Peso molecular	236,14 [g/gmol]
Solubilidad	1.220 [g/l] (20°C)
Punto de descomposición	132°C
Punto de fusión	44°C
pH	4 – 7,5

3.4 Especificaciones técnicas del nitrato de calcio comercial

Las especificaciones técnicas del nitrato de calcio usado comercialmente como fertilizante se indican en la tabla 3.3.

Tabla 3.3: Especificaciones técnicas del nitrato de calcio comercial

Calcio soluble (CaO)	23-26,5%
Nitrógeno (N)	10-15,5%
Solubilidad (20°C)	2000-2500 [g/l]
pH	4,5-7

Los distribuidores de fertilizantes en Chile importan el nitrato de calcio desde Colombia (ABOCOL), Noruega (YARA) y China (MayChemis), siendo importados por Vitra el Nitrato de calcio de ABOCOL, Soquimich el nitrato de calcio YARA y como una opción de producto sustituto de menor calidad es importado el Nitrato de calcio MayChemis por diferentes distribuidores.

La tabla 3.4 da a conocer las principales empresas distribuidoras de nitrato de calcio en Chile y la calidad del producto importado.

Tabla 3.4: Principales empresas distribuidoras de nitrato de calcio en Chile.

Empresa	SQM	Vitra	May Chemis (Chino)
Nombre Producto	Ultrasol calcium	N.C y amonio decahidratado	Calcium nitrate
CaO (calcio soluble)	26,30%	26,0%	23,59%
N	15,50%	14,0%	11,77%
Solubilidad (20°C)	2100[g/l]	2500[g/l]	
pH	6	5 - 6	4,5 - 6,5

3.5 Descripción de reactivos

3.5.1 Carbonato de calcio

Es uno de los minerales más abundantes en la tierra, su elaboración es por molienda fina o micronización de calizas extremadamente puras, en general el carbonato de calcio obtenido posee un alto grado de pureza (98% de CaCO_3).

El carbonato de calcio es un polvo blanco microcristalino de granulometría muy fina y es estable en el medio ambiente. En el agua es casi insoluble, esto debido a que posee una estructura cristalina estable, las que pueden ser hexagonal (calcita) y romboédrica (argonita).

En la naturaleza se puede encontrar en forma de yeso, mármol, piedra caliza y limo calcáreo.

Las aplicaciones industriales del carbonato de calcio son múltiples, puede ser utilizado como carga para papel al ser un sustituto del caolín o como carga para plásticos, permitiendo una mejora en la velocidad de extracción y en las propiedades mecánicas del plástico. También es muy usado en la industria química, en las pinturas, adhesivos, en la fabricación de vidrio, cerámica, cosmética y en la industria farmacéutica.

El carbonato de calcio también se utiliza como alimento en la industria agropecuaria y para la refinación de azúcar.

Constantemente se abren los campos de aplicación para el carbonato de calcio, el cual compite ventajosamente con otros minerales de similares características utilizados para

cargas, esto debido a que tiene un precio más bajo que la sílice micronizada, el talco, el caolín, la wallostomita y la mica.

Las principales propiedades físico-químicas del carbonato de calcio se muestran en la tabla 3.5.

Tabla N° 3.5. Principales propiedades físico-químicas del carbonato de calcio

Formula química	CaCO ₃
Peso molecular	100,09 [g/gmol]
Densidad	2,7 [g/cm ³]
Punto de fusión	825°C

3.5.2 Ácido nítrico

Es un ácido muy fuerte y en solución acuosa se disocia en un ión nitrato y un protón hídrico, formando sales nitrato. El ácido nítrico se presenta como un líquido transparente al encontrarse en estado puro y a medida que presenta mayor cantidad de impurezas su color se torna amarillento. Es uno de los oxiácidos más comunes del nitrógeno y en solución acuosa se presenta como un fuerte oxidante, el cual ataca a todos los metales exceptuando al platino y al oro.

La preparación industrial del ácido nítrico se realiza a través de la oxidación catalítica del amoníaco (NH₃) a alta temperatura con un exceso de aire, proceso que data desde 1902 (proceso Ostwald).

Los usos del ácido nítrico son variados, se emplea en la preparación de explosivos, fertilizantes, colorantes y productos farmacéuticos. Puede emplearse también en la industria metalúrgica y para el procesamiento de combustibles nucleares no consumidos.

Las principales propiedades físico-químicas de ácido nítrico se muestran en la tabla 3.6.

Tabla 3.6: Principales propiedades físico-químicas del ácido nítrico

Formula química	HNO ₃
Peso molecular	63.01
Densidad (20°C, 60%p/p)	1.36 [g/cm ³]
Punto de ebullición (1 bar)	120°C
Presión de vapor (20°C)	0.009 [bar]
Punto de congelación	-20°C
Solubilidad	Completamente miscible

3.5.3 Nitrato de amonio

Es una sal formada por el anión nitrato y el catión amonio. Se presenta como un sólido blanco o incoloro.

En caso de estar expuesto a altas temperaturas o en ausencia de agua puede causar explosiones.

El nitrato de amonio se obtiene a partir de la neutralización de ácido nítrico con amoníaco. Esta debe ejecutarse bajo estrictos controles de seguridad, a fin de evitar explosiones, quemaduras y otros accidentes

Fundamentalmente se utiliza como fertilizante, debido a su importante aporte en nitrógeno, el cual es aportado por el anión nitrato y absorbido directamente por las plantas. En tanto el catión amonio es oxidado por las bacterias del suelo hacia nitrito o nitrato, de esta manera la tierra se fertiliza a largo plazo.

También es altamente usado como explosivo. Al combinar nitrato de amonio con algún derivado del petróleo se obtiene un explosivo llamada ANFO, el que es usado altamente por empresas mineras, de demoliciones e inclusive en ataques terroristas.

Las principales propiedades físico-químicas del nitrato de amonio se muestran en la tabla 3.7.

Tabla 3.7: Principales propiedades físico-químicas del nitrato de amonio

Formula química	NH ₄ NO ₃
Peso molecular	80
Densidad (20°C, 60%p/p)	1,73 [g/cm ³]
Punto de ebullición (1 bar)	210°C
Presión de fusión (20°C)	170°C
pH	4,0 – 6,0

4 Estudio de Mercado

El mercado de estudio se referirá al nacional, con posibilidad de ampliaciones al mercado peruano.

El nitrato de calcio hoy en día es de carácter importado y se utiliza generalmente en forma de fertirriego en la agricultura como abono vigorizante.

El estudio de mercado comprende los siguientes aspectos:

- Tendencia mundial de los fertilizantes
- Antecedentes generales
- Clasificación de productos
- Importaciones de nitrato de calcio
- Actuales distribuidores de nitrato de calcio en Chile
- Potenciales clientes
- Actuales proveedores de nitrato de calcio
- Mercado potencial en Perú
- Importaciones de nitrato de calcio a Perú
- Objetivo y estructura del negocio
- Oportunidades
- Amenazas
- Propuesta de valor para el cliente

4.1 Tendencia mundial de los fertilizantes

Según IFA (International Fertilizer Industry Association), entre el 2010 y el 2014 el consumo de fertilizantes en el mundo debiera crecer a razón de un 2.3% anual. Este crecimiento sostenido se debe principalmente al crecimiento de la población (1,13% anual = 90 millones por año), al redestino de cultivos de cereales y otros alimentos a la producción de biocombustibles y por último debido a que las superficies cultivables se reducen cada año por el efecto de la desertificación. Lo expuesto anteriormente han hecho escasos los alimentos y, por ende, la necesidad de aumentar la eficiencia del uso de fertilizantes.

4.2 Antecedentes generales

Chile se caracteriza mayormente por ser un importador de fertilizantes, en donde estas llegan aproximadamente a 1 millón de toneladas anuales.

El mercado interno se caracteriza por ser oligopólico, en donde existe un disminuido número de empresas participantes.

En Chile el costo de los fertilizantes puede llegar a ser de un 60% del costo de producción total en los cultivos, por lo cual es importante disponer de un fertilizante uniforme, el que no debe presentar distorsiones en su funcionamiento.

Las principales empresas presentes en el país comercializadoras de fertilizantes son Soquimich, Angra, AgrogestiónVitra, Mosaic y Iansa, las cuales concentran más del 75% de las importaciones totales de fertilizantes y más del 90% de las ventas de fertilizantes en Chile.

El 85% de los fertilizantes comercializados en Chile son importados y el resto corresponde a la producción nacional.

El Market Share del mercado de los fertilizantes en Chile se muestra en el gráfico 4.1.

Market Share 2010

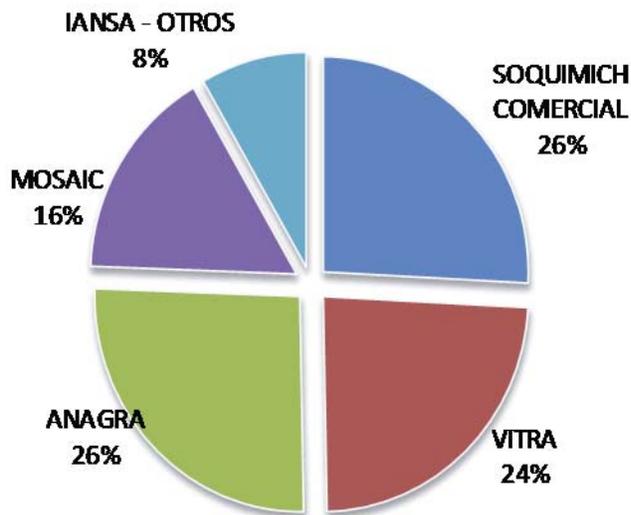


Gráfico 4.1: Principales Actores en el Mercado de Fertilizantes en Chile⁵

4.3 Clasificación de productos

Chile posee fertilizantes naturales nitrogenados y potásicos. Entre ellos destaca el salitre sódico, salitre potásico y depósitos de guano. De una misma manera se encuentran dentro de los fertilizantes fosforados, depósitos de roca fosfórica que corresponde a la materia prima requerida para la fabricación de fosfato normal y superfosfato triple, pero su baja ley impide su explotación comercial.

Principalmente en el mercado nacional se comercializan fertilizantes nitrogenados, fosforados y potásicos. La producción nacional de fertilizantes nitrogenados corresponde a salitre de sodio y salitre de potasio, en donde se importa la urea y fosfato diamónico. Las fuentes nacionales de productos fosforados se basan en Superfosfato Normal (SPN) y otros productos elaborados a base de guano y minerales, pero la mayor parte de los fertilizantes fosforados proviene de importaciones que corresponden a Superfosfato Triple (SFT) y también Superfosfato Normal (SPN).

Los fertilizantes se pueden clasificar en solubles y granulados. Los primeros corresponden a fertilizantes que se inyectan directamente al agua de riego, en donde se aprovecha la

⁵ Mercosur

buena solubilidad del producto para la aplicación del abono. Los granulados son dispuestos directamente en la tierra y su uso es orientado a fertilizar el terreno de forma uniforme y no directamente a la raíz de la planta, como es el caso del fertilizante soluble. Una vez que el cultivo comienza crecer es más complejo disponer en este el fertilizante de tipo granulado, ya que para eso es necesaria generalmente la penetración del terreno por medio de tractores, razón por la cual el fertilizante granulado (en la mayoría de los casos) no debe ser demasiado soluble, puesto que así perdurará el tiempo necesario en el terreno.

El macroelemento fertilizante primario de un abono se expresan como porcentaje en peso y este puede ser de Nitrógeno (N), Pentóxido de fósforo (P_2O_5) y/o Oxido de Potasio (K_2O).

Los elementos secundarios son Azufre (S), Calcio (Ca) y Magnesio (Mg).

Los fertilizantes solubles usados en Chile corresponden aproximadamente a un 10% de los fertilizantes granulados.

La tabla 4.1 indica los distintos usos que pueden tener tanto fertilizantes solubles como granulados.

Tabla 4.1: Usos de fertilizantes solubles y granulados⁶

	SOLUBLES	GRANULADOS
SUB Clasificación	Simple, Binarios, Mezclas, Líquidos	Simple, Binarios Mezclas, Monograno,
Categoría	Fertilizantes de Especialidad	Commodities
Aplicación	vía Riego Tecnificado, en múltiples momentos	Directo al suelo, en 2 ó 3 momentos
Zona Geográfica en Chile	Norte (I a V)	Centro - Sur (RM a X)
Cultivo Objetivo	Con Riego Tecnificado: Frutales exportación (Uva, Palta, Cítricos) Hortalizas industrial (Tomate invernadero, Alcachofa, Espárragos)	Con Riego Tradicional: Cereales extensivos (trigo, avena, cebada) Maíz grano Praderas mejoradas
	Alta Rentabilidad	Rentabilidad Media a Baja
	Intenso uso de insumos	Intensidad de uso de insumos depende la rentabilidad proyectada para la temporada
	Fertilización representa 8-10% de los costos totales por hectárea	Fertilización representa 30-40% de los costos totales por hectárea
Elasticidad Demanda	< 1 (moderadamente sensible)	> 1 (altamente sensible al precio)

⁶Manual de Fertilización (SQM)

4.4 Importaciones de Nitrato de Calcio

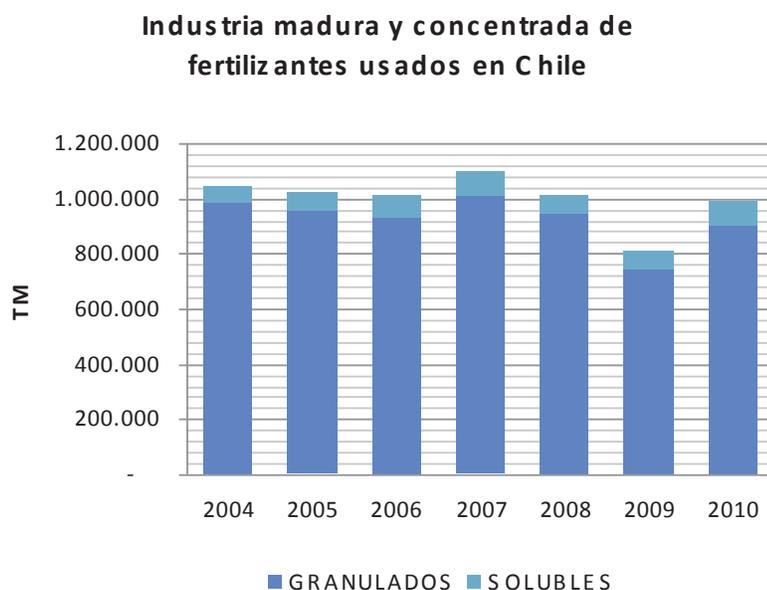


Gráfico 4.2: Total Importaciones de Fertilizantes⁷

En el gráfico 4.2 se muestra uniformidad en las importaciones de fertilizantes, exceptuando el año 2009. Esto se produce debido a la crisis económica que existió en el año 2008, razón por la cual los proveedores de fertilizantes quedaron con stock de fertilizantes en sus bodegas, esto debido al gran volumen de importación de fertilizantes que existe en Chile. Los agricultores, al ver amenazada la venta de sus productos acortaron el tiempo correspondiente a la fertilización de sus cultivos, lo cual se tradujo en un menor uso de fertilizantes. Para el año 2009 los distribuidores de fertilizantes ya contaban con un volumen de estos en bodega, de esta manera, las importaciones realizadas en dicho año para la demanda nacional fueron menores.

El nitrato de calcio corresponde a un fertilizante soluble, el cual, en la mayoría de los casos se usa como fertirriego.

Del total de fertilizantes solubles empleados en los cultivos nacionales, el 16% corresponde a nitrato de calcio.

⁷www.mercosuronline.com. Junio 2011

El gráfico 4.3 muestra la presencia de cada fertilizante soluble utilizado en el mercado nacional.

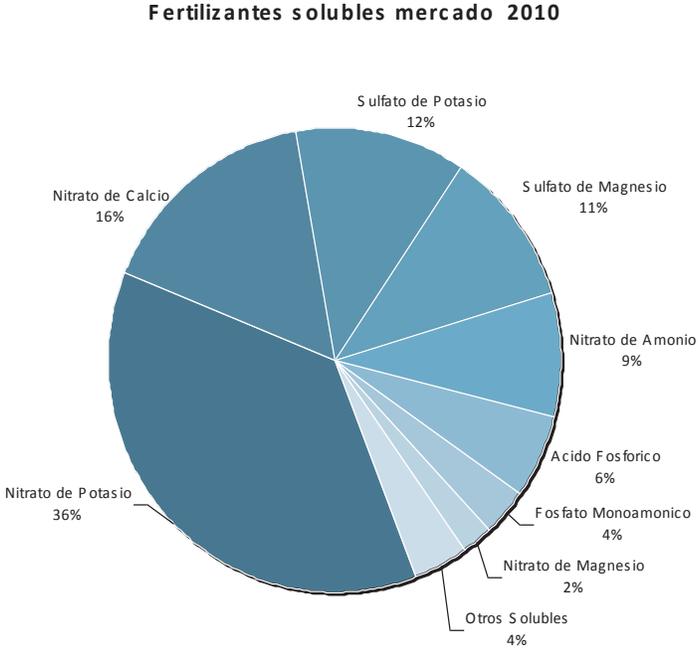


Gráfico 4.3. Mercado de Fertilizantes Solubles durante el 2010⁸

⁸www.mercosuronline.com. Junio 2011

La tabla 4.2 muestra el volumen de importación de nitrato de calcio y el total de fertilizantes solubles.

Tabla 4.2: Volumen de las importaciones de Nitrato de Calcio⁹

Año	Nitrato de Calcio (ton)	Total Fert. Solubles (ton)
2000	3.745	25.922
2001	4.634	26.783
2002	6.560	30.501
2003	7.320	47.698
2004	8.821	59.887
2005	10.431	72.897
2006	12.063	83.239
2007	8.707	84.998
2008	11.483	64.522
2009	6.047	67.446
2010	12.173	80.680

⁹www.mercosuronline.com. Junio 2011

La comparación precio de importación y volumen se muestra en el siguiente gráfico:

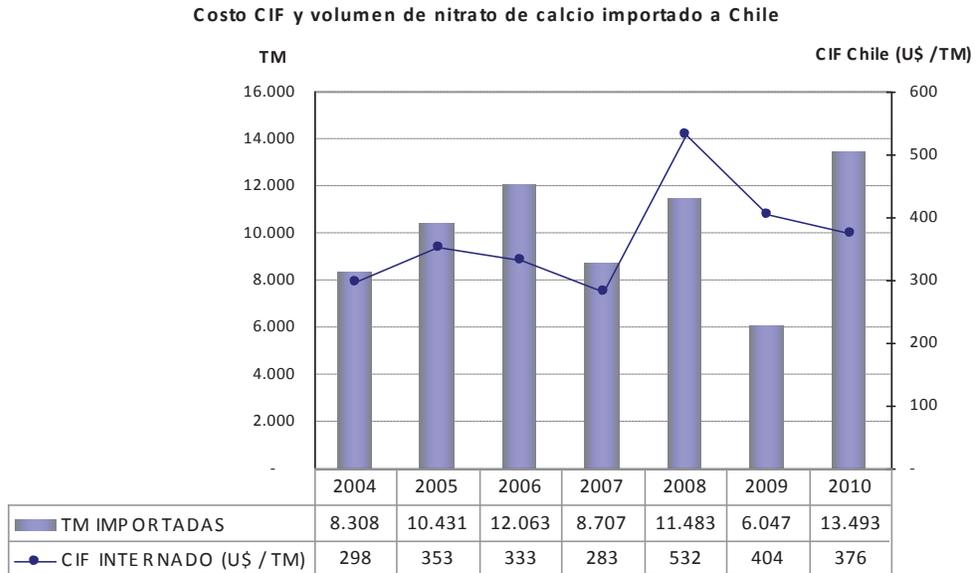


Gráfico 4.4. Volumen y Precio del Nitrato de Calcio Importado a Chile¹⁰

La procedencia del nitrato de calcio que es importado a Chile viene en su mayoría de Colombia, Noruega, Eslovaquia y China.

El gráfico 4.5 indica el origen del nitrato de calcio importado a Chile.

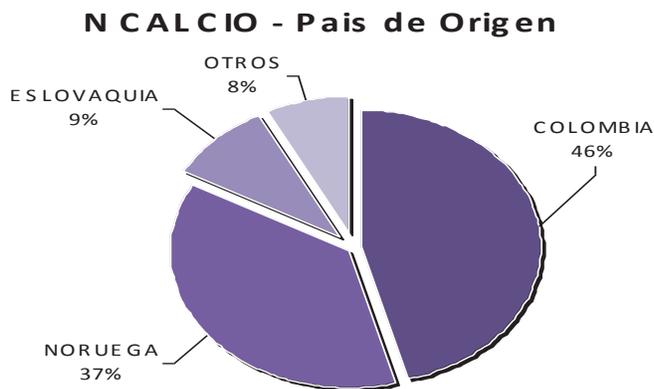


Gráfico 4.5. Procedencia del Nitrato de Calcio Importado a Chile

¹⁰www.mercosironline.com. Junio 2011

4.5 Análisis de precio para el nitrato de calcio

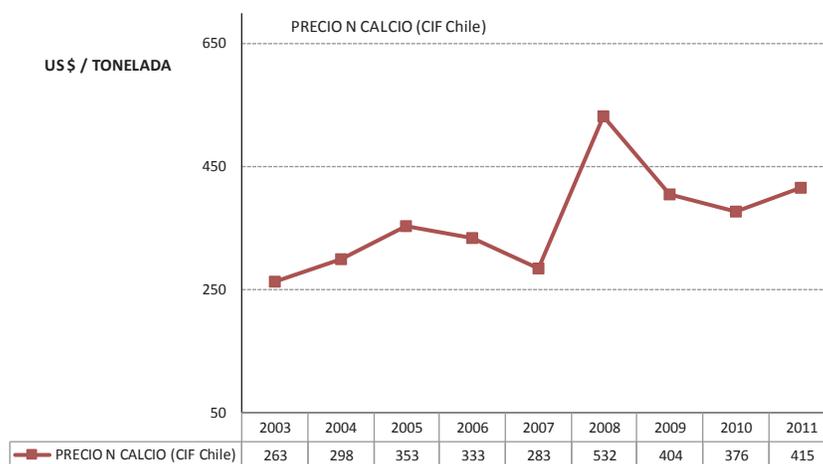


Gráfico 4.6. Evolución del Precio del Nitrato de Calcio¹¹

Del gráfico 4.6 se desprende que el precio del nitrato de calcio no mantiene una tendencia lineal y este se ve afectado por diversos factores entre los que se encuentran el precio de otros productos como el amoníaco, la demanda de fertilizante, etc.

Se decidió estimar el precio del nitrato basado en el año 2011, con lo cual se obtiene:

4.5.1 Precio de Venta (PV):

La tabla 3.3 muestra el precio CIF promedio del nitrato de calcio importado a Chile el año 2011.

La función principal de esta tabla es ser una guía con respecto al costo que les significa a los comercializadores de fertilizantes obtener el nitrato de calcio importado y fijar un precio de venta similar.

¹¹www.mercosuronline.com. Septiembre 2011

Tabla 4.3 Precio FOB nitrato de calcio en Planta Prillex de Enaex.¹²

Ítem	Costo(US\$/ton)
Precio N. Calcio (CIF Chile)	415
Desconsolidación	35
Flete a predio	30
Costo financiero (60 días_0,8%)	8
Costo internado en predio	488
Flete de Mejillones a predio	(50)
Precio FOB Mejillones	438

Analizando la tabla 4.3 se observa que para los distribuidores de fertilizantes en Chile el costo de obtener el nitrato de calcio bordea los 438[US\$/ton].

Este precio nos indica que el precio de venta máximo para el nitrato de calcio por parte de Enaex.

¹²Información interna Enaex.

4.6 Actuales distribuidores de nitrato de calcio en Chile

El mercado de los fertilizantes en Chile es bastante oligopólico, y el caso de los fertilizantes no es la excepción a la regla, ya que SQM y Vitra concentran en conjunto cerca del 80% de las ventas de nitrato de calcio, tal como se muestra en el gráfico 4.7.

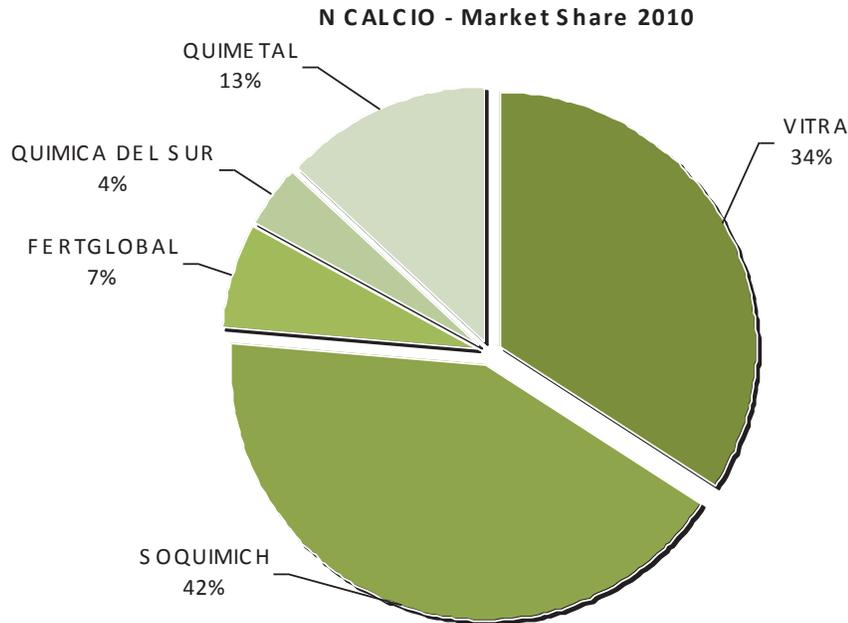


Gráfico 4.7. Empresa Comercializadoras de Nitrato de Calcio en Chile¹³

4.7 Potenciales clientes

El nicho de venta del nitrato de calcio no se enfocará directamente a los agricultores, si no que a los actuales proveedores de nitrato de calcio en Chile. Esto debido a que Enaex S.A. no tiene intenciones de competir directamente con los actuales distribuidores de nitrato de calcio, lo que Enaex S.A. pretende, es crear un fertilizante de origen nacional y así abastecer de nitrato de calcio a las empresas importadoras de fertilizantes, de esta manera Enaex S.A. no provoca daños en la relación comercial con dichas empresas y no participa en un mercado que no es el principal de Enaex S.A. (explosivos).

¹³ Información interna Enaex

Potenciales clientes:



Imich:

- Controla el 37% del mercado. Gran poder comprador
- Importa nitrato de calcio YARA: Producto muy costoso
- Posee buena situación financiera
- No posee capacidad de almacenaje suficiente



Vitra:

- Controla el 40% del mercado y hoy cuenta con nitrato de calcio ABOCOL
- No posee capacidad de almacenaje suficiente

Química del sur:

- No es controlador del mercado

Quimetal:

- No es controlador del mercado

Distribuidores agrícolas:

- Actualmente importan y compiten con sus proveedores

4.8 Actuales proveedores de nitrato de calcio:

La tabla 4.4 muestra que actualmente son tres los proveedores extranjeros de nitrato de calcio en Chile, los cuales presentan diversas características tanto en calidad, precio, volumen y composición.

Tabla 4.4: Principales proveedores de nitrato de calcio en Chile

Empresa	Fortalezas	Debilidades
ABOCOL	Asociado a Vitra Actualmente es proveedor líder de Chile y Perú Excelente calidad para fertirriego Posee una capacidad de producción de 120000[tonM/año]	Poco producto disponible Dificultad para abastecer un mayor mercado.
YARA	Posee un acuerdo comercial con SQM En su fabricación posee subproductos, lo que le da flexibilidad de precios Calidad para fertirriego aceptable Posee una capacidad de producción de 750000[tonM/año]	Precio muy por sobre el del mercado
Proveniente de China	Accesible a cualquier comprador Muy bajo precio	Calidad cuestionable

4.9 Mercado potencial en Perú

Debido a la posibilidad de ampliar el mercado, se estudio el mercado potencial que puede existir en Perú. Esto también sería una oportunidad de negocio en caso de presentar complicaciones en Chile.

Se escogió analizar la posibilidad de ampliación del mercado a Perú por las siguientes razones:

- Cercanía del lugar de fabricación de nitrato de calcio en Chile con Perú

- Actualmente la superficie agrícola de Perú es de 5.4 millones de hectáreas
- El “Proyecto de Modernización de la gestión de recursos hídricos” promueve la instalación de riego tecnificado en terrenos costeros, aumentando en 60 mil hectáreas los últimos años
- Principal exportador mundial de paprika (pimentón deshidratado)
- Segundo exportador mundial de espárragos
- Tercer exportador mundial de alcachofa
- Actualmente importa el 100% del nitrato de calcio que consume

El gráfico 4.8 muestra como ha sido la evolución de la superficie cosechada en Perú.

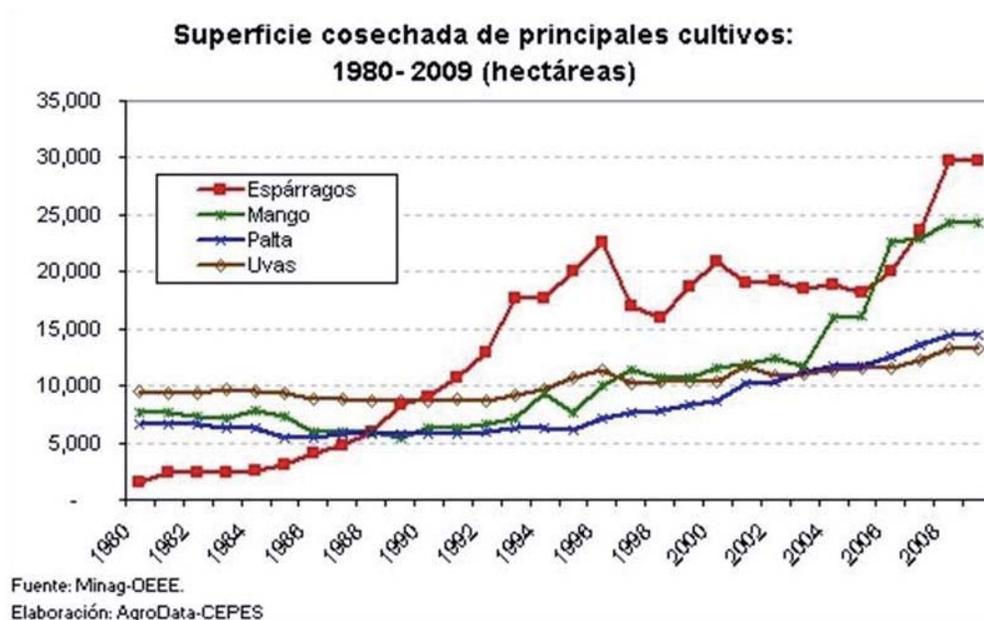


Gráfico 4.8. Evolución de Superficie Cosechada en Perú¹⁴

4.10 Importaciones de Nitrato de Calcio a Perú

En el año 2007 y 2008 se presentaron altos niveles de importaciones de nitrato de calcio, las cuales disminuyeron el 2009 y 2010. El motivo de esta baja es el stock con que se

¹⁴ Información Interna Enaex

habían quedado las empresas distribuidoras debido a la gran cantidad importada anteriormente. Además se produjeron ciertos quiebres comerciales entre empresas proveedoras y distribuidoras, lo cual hizo que exista menos comunicación entre ellas y se produzcan diferencias grandes entre el volumen del fertilizante importado y el volumen real del fertilizante a consumir por el sector agrícola.

En la tabla 4.5 se indica el costo y volumen de las importaciones de nitrato de calcio a Perú.

Tabla 4.5: Costo e Importaciones de Nitrato de Calcio a Perú¹⁵

N CALCIO	2007	2008	2009	2010
TONEELADAS	8.975	12.126	3.671	3.434
CIF Peru [US /ton]	337	497	543	372
Pais de Origen	NORUEGA (75%) COLOMBIA (19%) CHINA (5%) ECUADOR (1%)	NORUEGA (50%) COLOMBIA (29%) CHINA (20%) PORTUGAL (1%)	COLOMBIA (54%) NORUEGA (26%) CHINA (18%)	COLOMBIA (88%) NORUEGA (12%)

Al igual que en Chile, las importaciones de nitrato de calcio hechas a Perú provienen principalmente de Noruega, Colombia y China, tal como se muestra en el gráfico 4.9.

¹⁵www.mercosuronline.com. Junio 2011

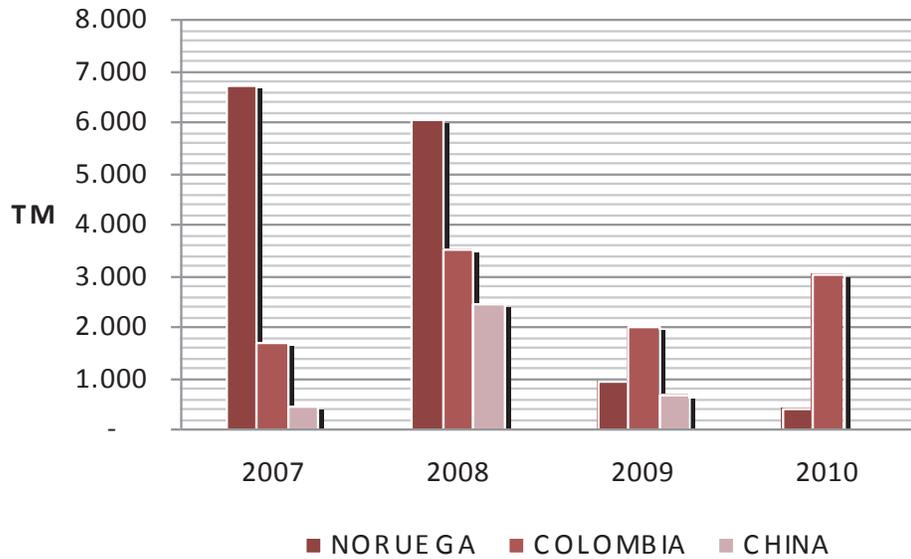


Gráfico 4.9. Volumen y Origen de Importaciones de Nitrato de Calcio a Perú¹⁶

El Market Share del mercado de los fertilizantes en Perú se muestra en el gráfico 4.10.

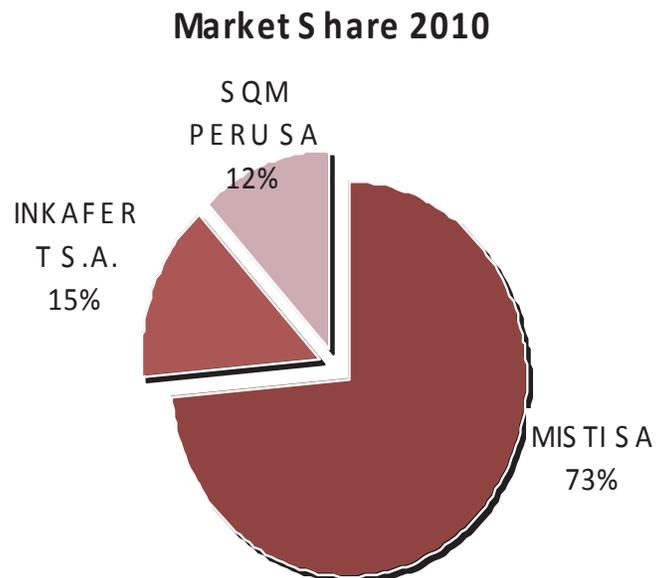


Gráfico 4.10. Market Share del Nitrato de Calcio en Perú

¹⁶ www.mercosuronline.com. Junio 2011

4.11 Objetivo y estructura de negocio

El objetivo del proyecto de fabricación nacional de nitrato de calcio para uso como fertilizante soluble es diversificar el portafolio del negocio químico de Enaex S.A. y por ende disminuir el riesgo asociado a la concentración de nitrato de amonio y explosivos.

Un mejor entendimiento del objetivo y estructura del negocio que Enaex podría desarrollar se muestra en el gráfico 4.11.



Gráfico 3.11: Cadena de comercialización

4.11.1 Oportunidades de la Estructura del Negocio

- Se maximizan los activos de la compañía y se diversifica el negocio
- La mayor demanda se concentra entre la I y la V región, por lo tanto existe una mediana cercanía con la ubicación del proyecto y de esta manera se minimizan los costos de transporte
- Bajo requerimiento de inversión
- Producto de margen de contribución atractivo
- A excepción de Colombia, ningún otro país en Latinoamérica fabrica nitrato de calcio
- Posibilidad de venta en mercados en crecimiento como Perú, Bolivia, Argentina y Ecuador
- No tiene sustitutos directos

4.11.2 Amenazas de la Estructura del Negocio

- Existe una permanente posibilidad de que ingrese producto importado
- El nitrato de calcio producido por Abocol posee una excelente calidad

4.11.3 Propuesta de valor para el cliente

- Disminución del capital de trabajo para operar
- Disminución de la capacidad de almacenaje
- Disminución del stock en bodegas, lo que podría traducirse en una mejora de la rotación de inventario
- Disminución del riesgo asociado al deterioro del producto
- Menor costo directo de empaçado (Maxibags reutilizables)
- Menor costo directo de transporte
- Capacidad de respuesta rápida en caso de cambios en la programación de ventas
- Productos de calidad y competitivos de acuerdo a las necesidades del mercado agrícola

5 Capacidad y Localización de la Planta

5.1 Determinación de la ubicación geográfica de la planta

La localización de la planta se orienta a obtener un mínimo de costo unitario. Es por eso que la planta productora de nitrato de calcio se anexará a la planta Prillex América de Enaex en Mejillones. Esto es debido a que la planta Prillex América de Enaex produce ácido nítrico a gran escala, el cual es el reactivos principal para la producción de nitrato de calcio, de esta manera se reducen considerablemente los costos por transporte.

La planta Prillex se encuentra ubicada en el barrio industrial de la comuna de Mejillones a unos 70[km] al noroeste de la ciudad de Antofagasta.

La principal vía de acceso, tanto dese Antofagasta como Tocopilla, es a través de la ruta 1 que conecta con la ruta B – 272 por el Sur y ruta B - 262 por el Norte.

La figura 5.1 muestra una fotografía aérea de la planta Prillex América de Enaex.

En resumen:

Planta Prillex América, ENAEX S.A.

- Avenida Costanera Norte N°300
- Mejillones
- Coordenadas GPS: -23.09690; -70.4325



Figura 5.1: Ubicación Planta Prillex América

5.2 Mercado de Consumo

La producción de nitrato de calcio se hará orientada al uso de este como fertilizante. Los mayores consumidores de fertilizantes se encuentran ubicados desde la primera hasta la sexta región, concentrándose el mayor consumo desde la primera a la cuarta región.

5.3 Disponibilidad de materias primas

El proceso seleccionado de fabricación de nitrato de calcio usa carbonato de calcio (CaCO_3) y ácido nítrico (HNO_3) como materias primas. El CaCO_3 puede ser adquirido dentro de la producción nacional o bien importado. La elección de este dependerá de la pureza disponible y el costo que tenga su adquisición.

5.4 Insumos, repuestos y servicios

Toda planta necesita de servicios para poder llevar a cabo la manufactura de un determinado producto, de manera especial es necesario contar con energía y agua. En la

mayoría de los casos es necesario comprar dichos suministros. Dado que la planta se anexará a otra de mayor tamaño y además se encuentra ubicada en un polo industrial, se contará con todos los servicios requeridos por la planta.

En cuanto a otros insumos y repuestos, en la región metropolitana y en Antofagasta se encuentra una gran variedad de proveedores que pueden satisfacer las necesidades de la planta.

5.5 Mano de Obra

Debido a que la planta se emplazará en una zona industrial (Mejillones) existe una alta oferta de mano de obra. El personal calificado puede ser obtenido tanto en la región de Antofagasta, ya que se encuentra relativamente cerca del proyecto.

5.6 Demanda de Nitrato de Calcio

Para dimensionar el volumen de producción de la planta se analizó la cantidad de nitrato de calcio importado a Chile desde el año 2000 al 2010, en donde a partir del año 2002 se nota una considerable alza en el volumen de importaciones, esto es debido al aumento de la superficie con riego tecnificado, que es donde se usa el nitrato de calcio como fertilizante.

La tabla 5.1 muestra las importaciones de nitrato de calcio desde el año 2000 hasta el 2010.

Tabla 5.1: Importaciones de Nitrato de Calcio

Año	Cantidad [ton]
2000	3.715
2001	4.634
2002	6.560
2003	7.320
2004	8.821
2005	10.431
2006	12.063
2007	8.707
2008	11.483
2009	6.047
2010	12.173

Para poder entender correctamente cuál es el consumo anual de nitrato de calcio es necesario “normalizar” la cantidad de producto importado mirando el comportamiento global de los últimos años. Es decir, el año 2006 se importaron cerca de 2000 [ton] extras, las cuales se guardaron y fueron consumidas en el año siguiente, razón por la cual el año 2007 presenta una menor demanda de nitrato de calcio.

En el año 2008 el volumen de fertilizante empleado por los agricultores bajó drásticamente, esto debido a la crisis económica que existió en dicho año, en donde el precio de los fertilizantes aumentó y los recursos de agricultores fueron escasos. Al no utilizarse todo el fertilizante importado en el año 2008, este se guardó y fue consumido el año 2009, traduciéndose en una menor cantidad de importaciones para el 2009.

Debido a las diversas fluctuaciones que presentan las importaciones resulta complicado generar una línea de tendencia en relación al volumen de nitrato de calcio requerido por la agricultura nacional, sin embargo al conocer los acontecimientos ocurridos y normalizar lo importado en base a eso, permite establecer que el mercado nacional de nitrato de calcio se encuentra entre 10,000 y 11,000 [ton] al año.

La tabla 5.2 muestra la información corregida, a partir de la cual es posible concluir que lo importado durante el año 2010 probablemente dejará un volumen de producto disponible para ser vendido durante el 2011.

Tabla 5.2: Importaciones normalizadas de Nitrato de Calcio

Año	Cantidad [ton]
2000	3.715
2001	4.634
2002	6.560
2003	7.320
2004	8.821
2005	10.431
2006	12.063 – 2.000 = 10.063
2007	8.707 + 2.000 = 10.707
2008	11.483 – 2.762 = 8.721
2009	6.047 + 2.762 = 8.809
2010	12.173

Adicionalmente se observa que los datos no siguen una tendencia uniforme y concreta, lo cual se traduce en un comportamiento heterogéneo de importaciones. Esta dispersión y poca uniformidad en el número de importaciones se debe diversos factores que han afectado a las importaciones en el tiempo, dentro de los cuales se encuentran la crisis económica del año 2008, exceso de importaciones del año anterior, diferentes condiciones climáticas, etc.

Con esta información y sin tener elementos que permitan normalizar de forma efectiva los datos, se proyectará la demanda usando distintas curvas de regresión, usando como criterio de elección el mejor coeficiente de correlación (r^2), con tal de conseguir la estimación más asertiva de la demanda futura.

5.7 Proyección de la demanda de Nitrato de Calcio

Las funciones propuestas para la proyección son del tipo lineal ($Y = m \cdot X + b$); potencial ($Y = m \cdot X^b$); exponencial ($Y = m \cdot b^X$) y cuadrática ($Y = m \cdot X^2 + b \cdot X + C$). Al aplicar dichos modelos sobre la tabla N° 6.2 se obtienen valores del coeficiente de correlación muy pequeños, lo que indica una existencia considerable de dispersión de los puntos en el modelo aplicado.

Debido a estos resultados se decidió proyectar la demanda nacional de acuerdo al crecimiento de la superficie terrestre de riego tecnificado.

Dicha información se muestra en la tabla 5.3.

Tabla 5.3: Evolución de la superficie de riego tecnificado

Año	Superficie [Ha]
2003	216.928
2004	226.246
2005	233.508
2006	238.853
2007	247.460
2008	251.639
2009	256.435
2010	258.971

El nitrato de calcio no puede usarse en exceso ya que el nitrógeno en exceso es perjudicial para las plantas, razón por la cual el consumo de nitrato de calcio está directamente relacionado con el área de superficie usada como riego tecnificado, ya que mientras mayor sea el área, mayor será el uso de nitrato de calcio porque se necesita fertilizar mayor superficie.

A través de los datos de la tabla 5.3 se proyectará por medio de una regresión lineal la superficie demandada de riego tecnificado hasta el año 2020.

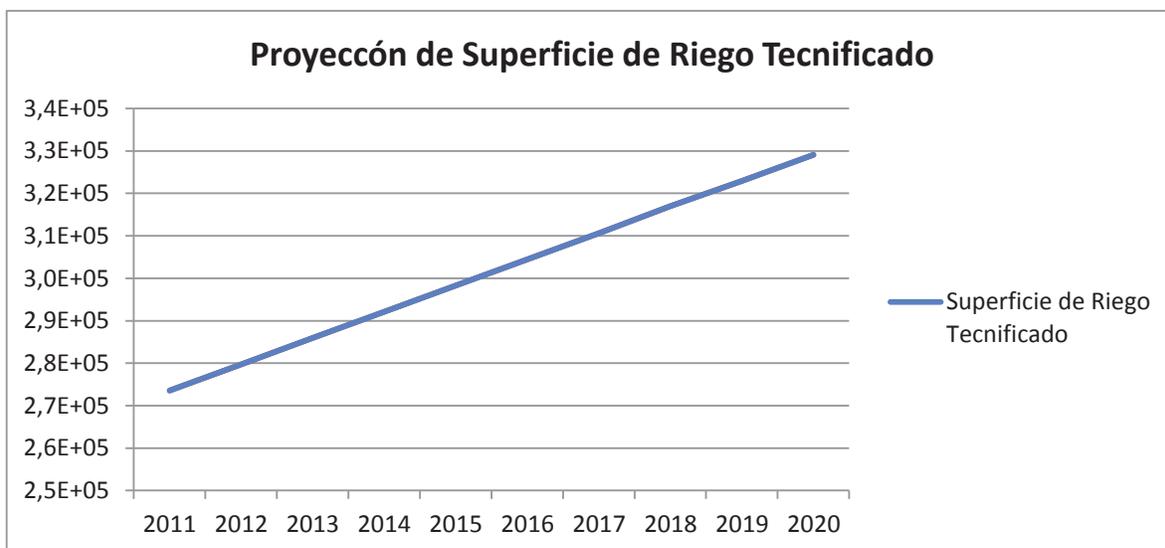


Gráfico 5.1: Tendencia del uso de superficie de riego tecnificado

En el gráfico 5.1 se muestra que la superficie de riego tecnificado tendrá un alza en el futuro, de lo cual se deduce que el volumen de nitrato de calcio requerido por los agricultores aumentará en forma gradual.

En promedio en el país se usan alrededor de 10.500 [ton] de nitrato de calcio cada 250.000 [Ha] de riego tecnificado existente.

Realizando la relación correspondiente podemos estimar el consumo futuro de nitrato de calcio en Chile, la que se muestra en la tabla 5.4.

Tabla 5.4: Proyección de consumo de nitrato de calcio

Año	Consumo de nitrato de calcio [ton]
2011	11.491
2012	11.750
2013	12.009
2014	12.268
2015	12.527
2016	12.786
2017	13.045
2018	13.304
2019	13.563
2020	13.822

5.7.1 Dimensionamiento del mercado peruano

Las importaciones en el mercado peruano son bastante inestables ya que debido a problemas internos entre distribuidores y agricultores se ha mantenido una cantidad importante de stock en bodegas. Esto hace compleja la cuantificación de la cantidad requerida de nitrato de calcio como fertilizante por parte de Perú.

La tabla 5.5 muestra el volumen de importaciones de nitrato de calcio a Perú.

Tabla 5.5: Importaciones de Nitrato de Calcio a Perú

Año	Cantidad [ton]
2007	8.795
2008	12.126
2009	3.671
2010	3.434

5.8 Dimensionamiento de la Capacidad de Producción de la Planta

Se pretende abarcar paulatinamente gran parte del mercado nacional y parte del mercado peruano y otros países.

La búsqueda objetiva del proyecto es dejar de importar nitrato de calcio al país y a la vez abrir las opciones de venta a otros países como Perú o Argentina.

En base al estudio de mercado y las importaciones actuales y futuras de nitrato de calcio, se establece que el tamaño máximo de la planta sería de 20.000 [ton/año] operando en tres turnos de ocho horas cada uno.

En un comienzo se producirá 1/3 de la producción máxima de la planta, posteriormente se incrementará paulatinamente el volumen de producción tomando en cuenta la posibilidad de exportar a otros mercados. Dado que al inicio de la producción la capacidad de esta será menor, solo se operará en un turno y a medida de ser necesario se incrementarán los turnos necesarios de operación.

En la práctica existen plantas de capacidad mayores y menores de producción, lo cual nos indica la posibilidad de instalación de una planta como la mencionada.

Se programa la producción de acuerdo a la tabla 5.6.

Tabla 5.6: Programación de la producción

Año	Producción de N.C [ton/año]
1	6.700
2	13.400
3	20.000
4	20.000
5	20.000
6	20.000
7	20.000
8	20.000
9	20.000
10	20.000

6 Tecnologías existentes y proceso seleccionado

6.1 Método de BASF

Uno de los métodos más usados para la fabricación de nitrato de calcio es el método desarrollado por la química alemana BASF.

- **Reacción de las materias primas**

Partiendo de trozos de caliza (1) y de polvo (2) del mismo material y de ácido nítrico del 50% (3) se prepara una disolución neutra y saturada (4) de nitrato de calcio. El residuo insoluble (6a) se separa por filtración a través de filtros prensa (6).

- **Concentración**

A la salida del filtro prensa y después de varios lavados con agua (con lo que la disolución se diluye, pero se evitan pérdidas de nitrógeno) se obtiene una disolución de aproximadamente 80%, la cual se evapora en evaporadores de multiefecto (7) hasta una concentración del 85%. La pasta se agita en un mezclador (8) a 100 °C con 5% de fundido de nitrato amónico del 95% (9) preparado por separado.

- **Desecación y trituración**

La mezcla caliente a 100°C se bombea a un desecador por pulverización (10) en donde una torre cilíndrica grande de hasta 20[m] de diámetro y otros 20[m] de altura, en la que por medio de toberas o platos giratorios el fundido que penetra por la parte superior de la torre se pulveriza a medida que se insufla por la parte inferior, el aire es obtenido por medio de ventiladores. El fundido cae al suelo en forma de polvo fino que se extrae continuamente.

La sal obtenida está compuesta por granos finos y otros mayores, y en un tamiz vibrador (11) se separa el polvo fino (menos de 6mm) del grueso. El polvo mayor a 6 [mm] se muele en un molino (12) hasta polvo fino. En un tambor refrigerado (13) se enfría la sal con aire hasta unos 30°C (para que no se conglomere después). Finalmente el nitrato de calcio se almacena en silos y es envuelto posteriormente en sacos de polipropileno.

- **El nitrato de calcio como fertilizante**

El nitrato de calcio producido por el método de la BASF contiene 15.5% de nitrógeno y 28% de calcio como CaO. Se disuelve muy fácilmente y por su contenido en cal es muy apreciado como abono, ya que la acción de la cal hace poroso el suelo e impide su acidificación.

La figura 6.1 muestra el proceso desarrollado por la química BASF en la obtención de nitrato de calcio.

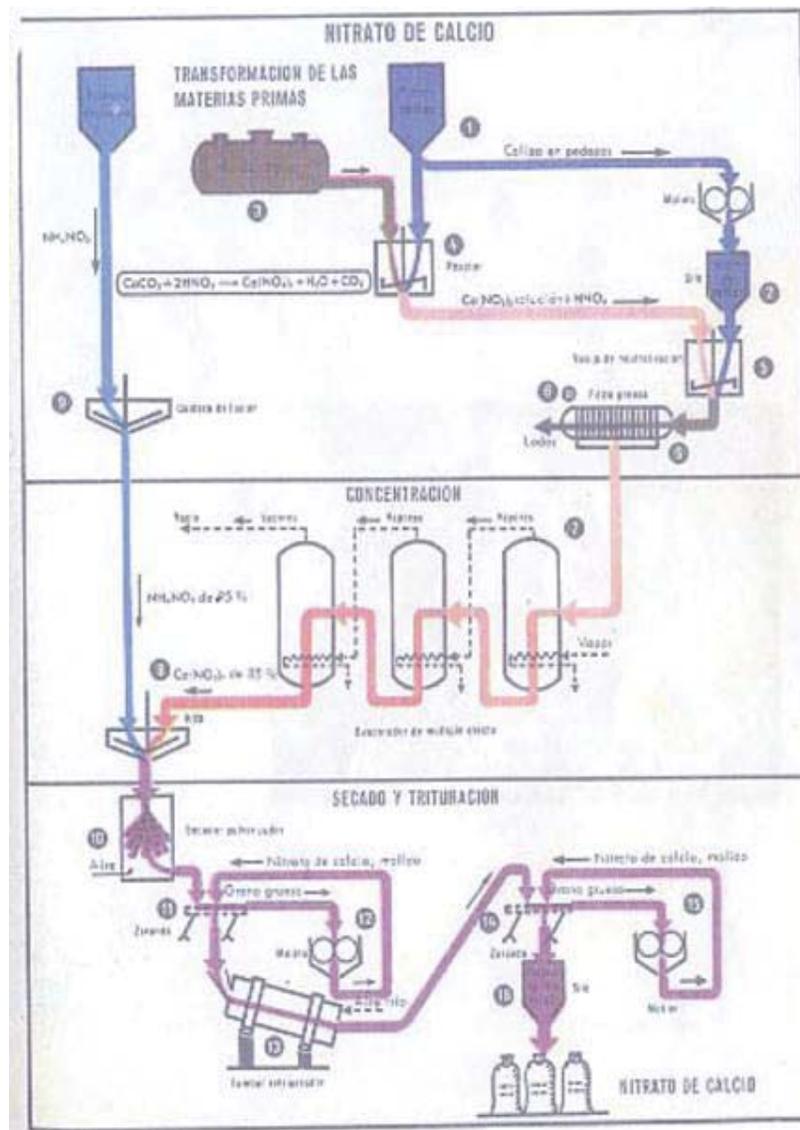


Figura 6.1: Flowsheet del Proceso desarrollado por BASF¹⁷

6.2 Método de fabricación estudiado por Ferticol S.A.

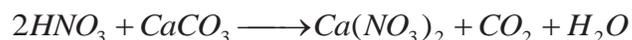
Ferticol S.A. es una empresa del sector petroquímico ubicada en Colombia.

Su función principal es distribuir y comercializar productos petroquímicos y especialmente abonos químicos y sus elementos.

Ferticol S.A. posee un proceso para fabricar nitrato de calcio líquido.

- **Explicación del proceso:**

La operación en la planta de nitrato de calcio es por lotes. En el reactor R-1 se inyectan los flujos de ácido nítrico (HNO₃ al 55%) y se carga el carbonato de calcio (CaCO₃ al 98% de concentración) produciéndose la siguiente reacción:



La reacción es exotérmica, por esto se realiza enfriamiento a través de la chaqueta que rodea al reactor, de esta forma la temperatura de la reacción se mantiene entre 58-60 °C.

El HNO₃ se recibe desde la planta de ácido nítrico U-200 de FERTICOL S.A. y es almacenado en el tanque SR-1, desde donde es enviado por la bomba PC-1 hacia el reactor R-1 para dar inicio al proceso.

El CaCO₃ es adquirido en sacos de 50 kg los cuales se encuentran ubicados en un área de 100 m² al interior de la planta y son cargados a una tolva, la cual dosifica sobre la banda transportadora ET-1 que lleva el carbonato de calcio hasta el reactor R-1.

Inicialmente se carga al reactor 100 kg de carbonato de calcio y a partir de este momento se arranca la bomba PC-1 a fin de suministrar el ácido nítrico, una vez se realice esta operación debe ponerse en marcha el motor del agitador, este paso es

¹⁷¹⁷ Métodos de la Industria Química, tomo I. Fritz Tegeder.

crítico ya que si se inicia la dosificación de ácido simultáneamente con el carbonato sin encenderse el agitador, la masa reaccionante se vuelve muy viscosa provocando sobreesfuerzos del motor del agitador cuando este se ponga en marcha.

Posterior a esto, continua dosificándose simultáneamente el ácido y el carbonato, este último se agota y se continua adicionando el ácido nítrico hasta completar el volumen de reacción de acuerdo a la carga. Una vez que se dosifican los reactivos, se adiciona el hidróxido de calcio en solución acuosa con el propósito de ajustar el pH en 7, se homogeniza la mezcla durante 15 minutos y se realiza el análisis de pH, si este es ácido (por debajo de 6.7) se adiciona más solución de hidróxido de calcio.

La preparación del hidróxido de calcio consiste en mezclar 15 Kg de hidróxido de calcio en 15 L de agua (relación 1:1 P/V), se homogeniza la mezcla y se vierte en el reactor.

La mezcla líquida obtenida como resultado de la reacción, es descargada por gravedad hacia el tanque pulmón SR-6.

Los vapores propios del proceso constituido por dióxido de carbono (CO₂), gases nitrosos y vapor de agua emitidos de la reacción son descargados a la atmósfera por medio del extractor de gases VV-1.

- **Condiciones de Operación en el Reactor**

Temperatura de reacción: 58 °C – 60 °C

Temperatura del agua de enfriamiento: 30 °C

Velocidad de dosificación del carbonato de calcio: 60 minutos

Para una producción de 6 TM de nitrato de calcio del 58% de concentración se requiere:

Carbonato de calcio del 98%: 2.55 TM

Ácido nítrico del 54% P/P: 5.95 TM (4.5 m³)

Hidróxido de calcio: 15 Kg

Densidad de la mezcla a la salida del reactor: 1.8 g/ml

La figura 6.2 muestra el proceso desarrollado por la empresa Ferticol S.A en la obtención de nitrato de calcio.

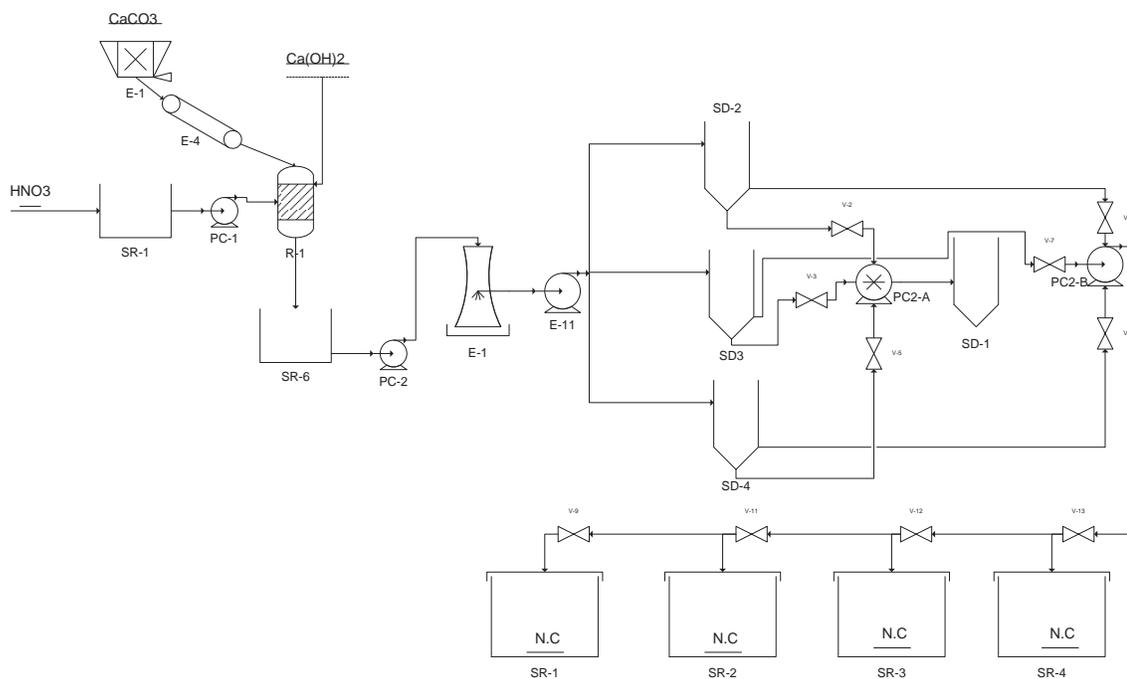


Figura 6.2: Flowsheet del Proceso en Ferticol S.A.

6.3 Proceso de fabricación de N.C granulado realizado en pilotaje

El proceso realizado en el pilotaje corresponde a un proceso continuo en donde la alimentación de ácido nítrico y carbonato de calcio se realiza simultáneamente, esto para evitar una reacción demasiado violenta y favorecer una mezcla homogénea de la solución. Los reactivos deben añadirse al reactor sobre una lechada de solución previamente existente, la razón por la cual es necesario que se realice de esta manera es

para evitar el contacto directo del ácido nítrico con el reactor, puesto que a pesar de ser de acero inoxidable, este se encontraría en presencia de un ácido muy fuerte, lo cual a la larga corroería al reactor, ya que al ir adicionando el ácido y el carbonato de calcio sobre la solución neutralizada no se presentan grandes variaciones de pH.

Posteriormente la solución es llevada del reactor al filtro prensa, el cual posee una salida hacia el escamador y una recirculación directa hacia el reactor. El motivo de esta recirculación es formar una cama filtrante de CaCO_3 en el filtro y permitir obtener una solución cristalina, esta cama filtrante se forma gracias a un exceso de CaCO_3 que es añadido a la reacción y de kieselguhr, el cual es de suma importancia debido a que mejora notablemente la filtración. Una vez que en la línea de recirculación (dispuesta desde el filtro hacia el reactor) se comienza a observar que el color de la solución se torna transparente, se cierra el paso de de esta y se abre el paso de la otra línea del filtro prensa, la cual lleva la solución hacia el escamador en donde se formarían los cristales.

En el escamador la temperatura de la solución baja considerablemente y cuando esta llega cerca de los 48°C se produce la cristalización de la solución. Posteriormente estos cristales son triturados en el molino y dispuestos en sacos de 25[kg]. El proceso descrito se muestra en la figura 6.3.

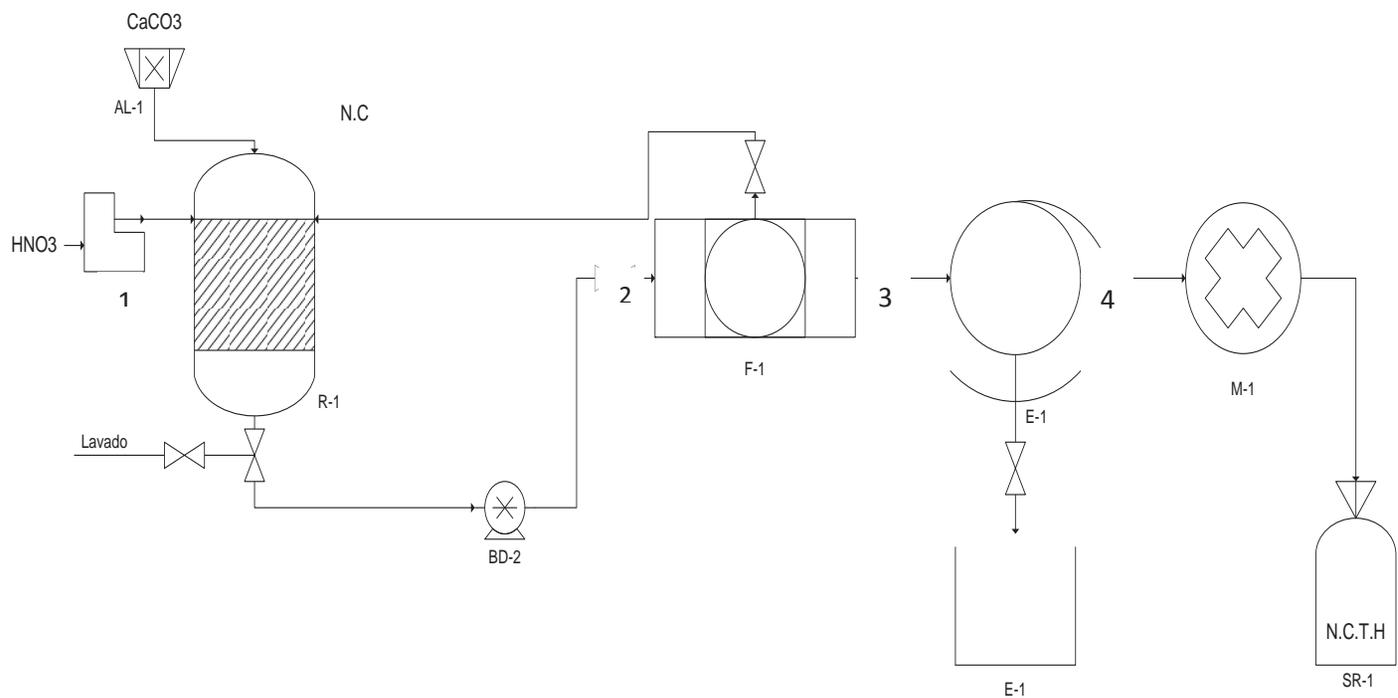


Figura 6.3. Flowsheetproceso propuesto

- 1 Reactor
- 2 Filtro prensa
- 3 Cristalizador de Nitratos
- 4 Molino

6.4 Proceso de fabricación de nitrato de calcio seleccionado

En un principio, como producción industrial se tenía considerado implementar la tecnología desarrollada en el pilotaje, pero debido a complicaciones en el proceso del pilotaje se decidió implementar un método distinto de fabricación de nitrato de calcio.

La complicación más importante ocurre en el reactor, ya que al evaporar el agua en exceso en el reactor, la reacción se produce a 100°C, lo cual produce pérdidas de nitrógeno. Se decidió por evaporar el agua en exceso por medio de un evaporador instalado posterior al reactor.

6.5 Proceso Seleccionado

El proceso seleccionado corresponde a un proceso continuo en donde la alimentación de ácido nítrico y carbonato de calcio se realiza simultáneamente, esto para evitar una reacción demasiado violenta y favorecer una mezcla homogénea de la solución. Los reactivos deben añadirse al reactor sobre una lechada de solución previamente existente, la razón por la cual es necesario que se realice de esta manera es para evitar el contacto directo del ácido nítrico con el reactor, puesto que, a pesar de ser de acero inoxidable, este se encontraría en presencia de un ácido muy fuerte, lo cual a la larga corroería al reactor, ya que al ir adicionando el ácido y el carbonato de calcio sobre la solución neutralizada no se presentan grandes variaciones de pH.

La reacción para producir nitrato de calcio requiere de agua, la cual se provee por medio del ácido nítrico que se encuentra en un 60% de concentración, lo cual entrega un volumen superior de agua presente en la reacción, debido a ello, la solución de nitrato de calcio fundida presente en el interior del reactor es pasada al evaporador, en donde se elimina el agua en exceso presente en la solución.

Posteriormente la solución pasada por el filtro prensa, el cual posee una salida hacia el escamador y una recirculación directa hacia el reactor. El motivo de esta recirculación es formar una cama filtrante de CaCO_3 en el filtro y permitir obtener una solución cristalina, esta cama filtrante se forma gracias a un exceso de CaCO_3 que es añadido a la reacción. Una vez que en la línea de recirculación (dispuesta desde el filtro hacia el reactor) se comienza a observar que el color de la solución se torna cristalina, se cierra el paso de

esta y se abre el paso de la otra línea del filtro prensa, la cual lleva la solución hacia el escamador en donde se formaran los cristales.

En el escamador la temperatura de la solución baja considerablemente y cuando esta llega cerca de los 42°C se produce la cristalización de la solución. Posteriormente estos cristales son triturados en el molino y dispuestos en sacos de 25[kg]. El proceso seleccionado para la construcción de una planta fabricadora de nitrato de calcio se muestra en la figura 6.4.

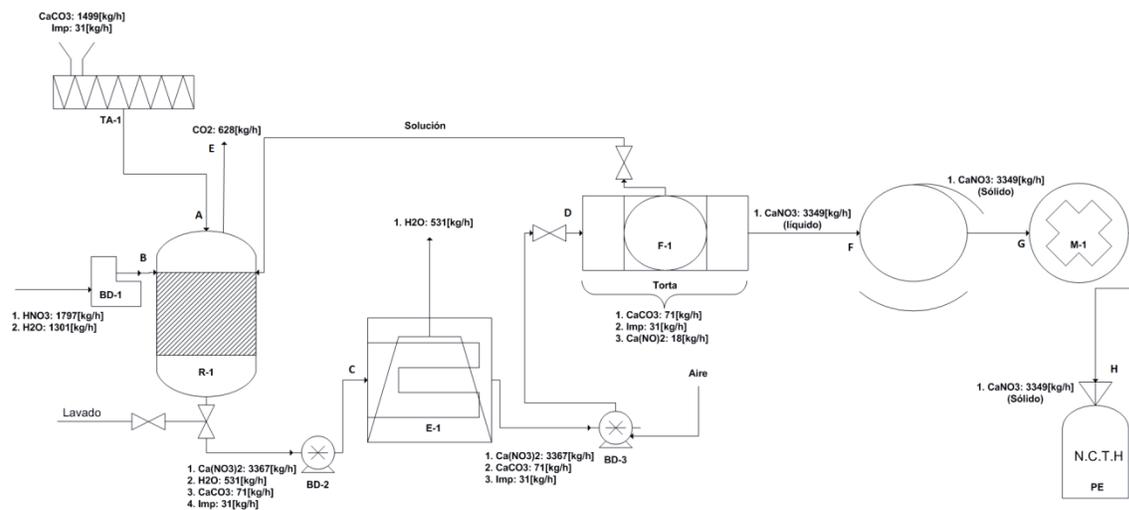


Figura 6.4. Proceso seleccionado.

7 Medidas ambientales y análisis de riesgos

El presente capítulo comprende una recopilación de información e identificación cualitativa de los posibles impactos al entorno. De una misma manera se realizó un diagnóstico de las emisiones gaseosas provenientes del reactor, de la cuantificación de residuos sólidos, la generación de ruidos, seguridad industrial y ocupacional.

7.1 Identificación de aspectos ambientales

A continuación se identifican los elementos de las actividades a realizar que pueden interactuar con el medio ambiente.

Es necesario mantener ciertos procedimientos para identificar los aspectos ambientales que tienen dichas actividades, esto para controlar los efectos negativos del proceso industrial.

Para buen cumplimiento ambiental es necesario tener en cuenta:

- Utilización de materias primas y materiales para la producción
- Utilización de equipos y maquinarias
- Uso y gestión de la energía
- Recursos humanos
- Relaciones comerciales
- Seguridad laboral e higiene
- Manejo de información
- Medición de emisiones
- Manejo y generación de residuos sólidos
- Emisión de ruidos
- Cumplimiento de la legislación vigente
- Tipo de productos o servicio
- Vida útil
- Almacenamiento, distribución y transporte

7.2 Medidas ambientales

Las medidas ambientales tomadas recomiendan como prevenir, corregir, controlar y mitigar los impactos negativos al medio. Dentro de las actividades a realizar, se consideran ciertas etapas que ocasionan impactos al medio ambiente. A partir estas evaluaciones se establecerán las medidas que son necesarias aplicar para el correcto desempeño de la planta.

7.2.1 Manejo de emisiones hacia la atmosfera

En la alimentación de reactivos se pueden producir emisiones de vapores de ácido nítrico y material particulado que proviene de la adición de carbonato de calcio.

El foco de contaminación también corresponde a vapores generados en el reactor, los cuales poseen contaminantes tales como vapores de ácido, CO₂ y material particulado. Los gases provenientes del proceso suponen una emisión peligrosa, dando un aspecto ambiental negativo, pero de bajo impacto.

Para la mitigación de dichos impactos se propone:

- Disponer de un reactor de mayor volumen y altura facilitando el escape de gases contaminantes hacia la atmosfera, esto con tal de evitar el contacto de vapores producto de la reacción con operadores de la planta
- Revisión permanente de la manguera que alimenta el ácido, esta debe estar siempre en buen estado
- Para evitar exceso de material particulado en el ambiente de trabajo, se realizará la alimentación de carbonato de calcio a través de un alimentador tornillo.

7.2.2 Manejo de desechos sólidos domésticos

Los desechos sólidos domésticos orgánicos como restos de basura, comida, etc., deben estar dispuestos correctamente en tanques almacenadores, para después ser enviados a rellenos sanitarios. Los tanques almacenadores deben ser tapados para prevenir la llegada de insectos y roedores. Los desechos deben ser ubicados en un solo lugar y clasificados según la constitución del desecho, pudiendo clasificarse como orgánicos, papeles, vidrio, etc. De esta manera se puede cuantificar el origen de los desechos producidos, lo cual dará una mayor información sobre cuales son las aéreas en donde es

necesario aplicar medidas de control, con el fin de minimizar los gastos innecesarios de material.

7.2.3 Manejo de residuos sólidos industriales

En el desarrollo de sus actividades, la planta genera residuos sólidos como maderas, plásticos, cartones, etc.; estos por sus características y constituyentes son considerados como no peligrosos y pueden ser dispuestos en vertederos.

Así mismo en el proceso se generan RISes, los cuales son generados en la etapa de filtración. Los RISes del proceso son considerados como no peligrosos, pero deben estar en constante análisis ya que puede que se presenten metales pesados en la constitución de estos, en caso de ser así deben ser dispuestos en un vertedero autorizado para residuos sólidos peligrosos.

7.2.4 Medidas de mitigación del recurso suelo

En ciertos casos el suelo puede presentar alteraciones químicas de importancia debido a su uso como actividad industrial. En ocasiones esto puede traducirse en alteraciones para la salud humana y el medio ambiente. Con motivo de mitigar dichos impactos, proteger el suelo, las aguas subterráneas y superficiales se propone:

- No verter en el suelo residuos como aceite quemado, trapos contaminados, sustancias ácidas, restos de fertilizante, etc.
- Comprobar periódicamente el correcto funcionamiento de las medidas de recolección de basura
- En caso de contaminación del suelo es necesario llevar a cabo una investigación para ver las condiciones en que dejó el lugar afectado
- En caso de infiltración del suelo, declarar inmediatamente a las autoridades correspondientes dicha situación

7.2.5 Medidas para el manejo de efluentes domésticos

El efluente residual domestico de una persona en planta es cercano a 120[l/día] que corresponde a duchas, baño, etc. Esto se traduce en un flujo de 25[m³/mes] de residuos líquidos domésticos generados en la planta. Este volumen se dispondrá directamente en el alcantarillado existente en Mejillones.

7.2.6 Control de efluentes industriales

En la fabricación de nitrato de calcio no se generan mayores RILes, en caso de generarse serán recirculados al sistema o puestos en una planta de tratamiento de residuos líquidos industriales, según sea el caso.

7.2.7 Protección del recurso biótico

Cualquier actividad relacionada o desarrollada en un área específica afecta a la flora y fauna del medio, esto debido a la directa dependencia que existe entre los seres vivos y el medio ambiente.

En los alrededores de la ubicación de la planta predomina completamente el uso de suelo de tipo industrial, esto debido al asentamiento de otras industrias en el sector, las cuales ya han intervenido en el recurso biótico terrestre, por ende la planta no tendrá mayores influencias en este.

7.2.8 Manejo paisajístico del proyecto

Se pretende reducir al máximo el impacto visual pueda afectar el funcionamiento de la planta. Es importante decir que el proyecto se emplazará en la zona industrial de Mejillones, en donde no existen recursos importantes de valor paisajístico.

Para no afectar considerablemente el paisaje se tomarán las siguientes medidas:

- Limpieza inmediata de los sitios de operación y de sus alrededores.
- Designación de lugares de específicos para la recepción de basura y escombros.

7.2.9 Gestión Social

La gestión social tiene por objeto informar a la sociedad y autoridades de las implicancias que puede tener el proyecto sobre el medio. También informa sobre los posibles beneficios que puede traer a la comunidad.

Se debe concertar con las autoridades y organizaciones sociales respectivas del sector una serie de actividades, esto con el fin de llegar a acuerdo mutuos con respecto al emplazamiento y operación de la planta.

7.2.10 Seguridad Ocupacional

Se deben establecer medidas de contingencia con tal de mitigar ruidos, gases, disposición de desechos industriales, accidentes, etc. Para esto es necesario aplicar procedimientos internos y externos.

- Procedimientos externos:
 - Establecer medios de trabajo seguros para los habitantes de la zona, mediante charlas de inducción para los trabajadores.
 - Se debe mantener una constante educación a los conductores de los transportes que ingresan a la planta
- Procedimientos internos:

En el desarrollo de las actividades internas de la empresa es necesario prever y poner en marcha un programa de salud ocupacional y seguridad industrial en los siguientes aspectos.

- Fomentar actitudes positivas en los trabajadores y capacitarlos en seguridad industrial.
- Proporcionar un ambiente de trabajo seguro, garantizando los elementos y medios necesarios para proporcionar seguridad laboral.
- Uso obligatorio de los electos de seguridad requeridos cuando se esté en la planta (zapatos de seguridad, casco, antiparras, guantes, etc.).

7.2.11 Autoridad Ambiental

Es necesario antes de llevar a cabo el emplazamiento del proyecto someterse al servicio de evaluación ambiental (SEIA). La autoridad ambiental decidirá si se debe llevar a cabo un estudio de impacto ambiental o una declaración de impacto ambiental. En caso de ser favorable el EIA o DIA se puede comenzar con la construcción de la planta.

El tiempo de dicho procedimiento generalmente tarda en promedio entre uno y dos años.

7.3 Análisis de riesgos

Es necesario identificar los posibles riesgos asociados a la seguridad de las personas que interactuarán con la planta.

7.3.1 Riesgo del Personal

Es necesario disponer de vestimentas adecuadas para la manipulación de plantas de ácido según las normas establecidas por la autoridad ambiental competente. Se incluyen sistemas de duchas especiales para el lavado en caso de derrames, líneas secas y húmedas para la prevención de incendios, disponer de medios para el traslado a servicios hospitalarios en caso de accidentes, etc. Esto forma parte de los procedimientos de

seguridad habituales de Enaex, por lo que para la implementación del proyecto se supervisará de la misma forma.

7.3.2 Proceso

Es necesario considerar materiales de equipos y accesorios adecuados para el proceso de la planta.

Se han especificado equipos en acero inoxidable 316L, bombas adecuadas para los ácidos y soluciones, uso de materiales plásticos y acero inoxidable 316 en válvulas, cañerías y fittings. Para la implementación del proyecto se considerarán normas vigentes para la instalación de este tipo de plantas químicas.

8 Balances de Masa

El cálculo de las materias primas necesarias y el volumen de producción requerido se realizará sobre la base de una hora de producción, la que se calcula a partir de los siguientes datos.

- Producción anual por turno: 6.667[ton]
- Días de operación: 330 [días/año]
- Horas de operación: 6 [h/día]

8.1 Balance de masa global

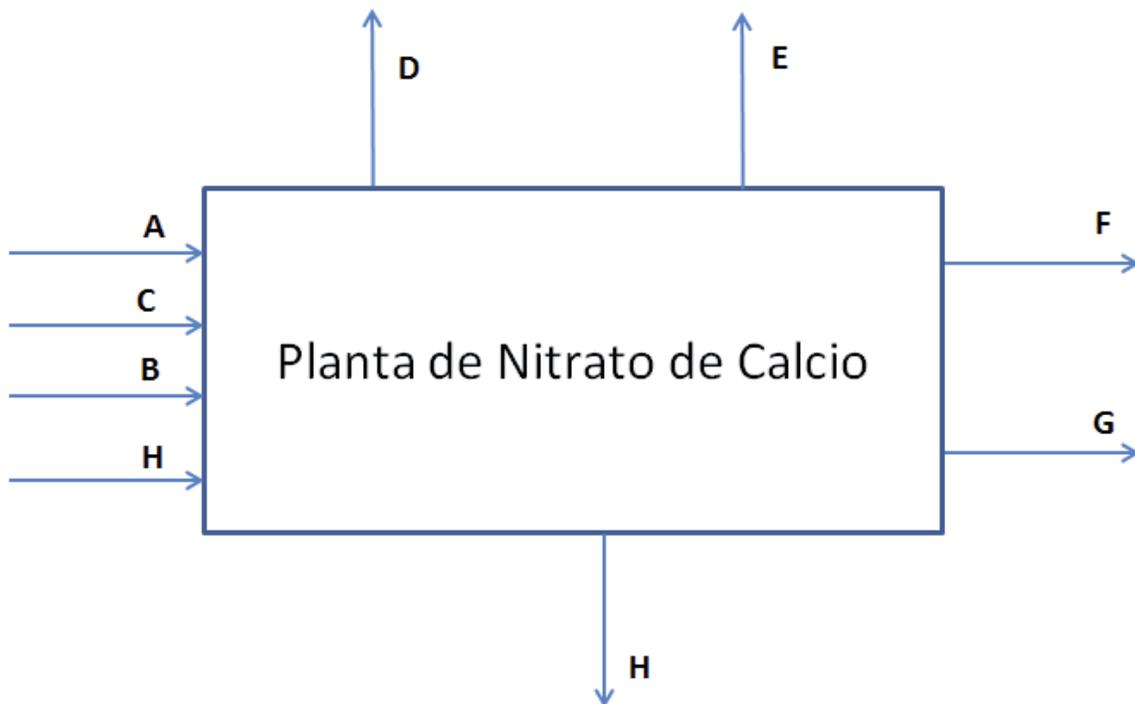


Figura 8.1: Balance de masa global del proceso

Reacción del proceso:



Tabla 8.1: Resumen balance de masa global

Corriente	Compuesto	Flujo másico [kg/día]
A (E)	HNO ₃ (líquido)	10.783
B (E)	CaCO ₃ (sólido)	8.993
C (E)	H ₂ O (líquida)	7.808
H (E)	Impurezas	184
D (S)	H ₂ O (evaporada)	3.187
E (S)	CO ₂ (gaseoso)	3.765
F (S)	Ca(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O (sólido)	20.203
G (S)	CaCO ₃ (sólido)	429
H (S)	Impurezas	184

8.2 Balance de masa al reactor:

Reacción del proceso:

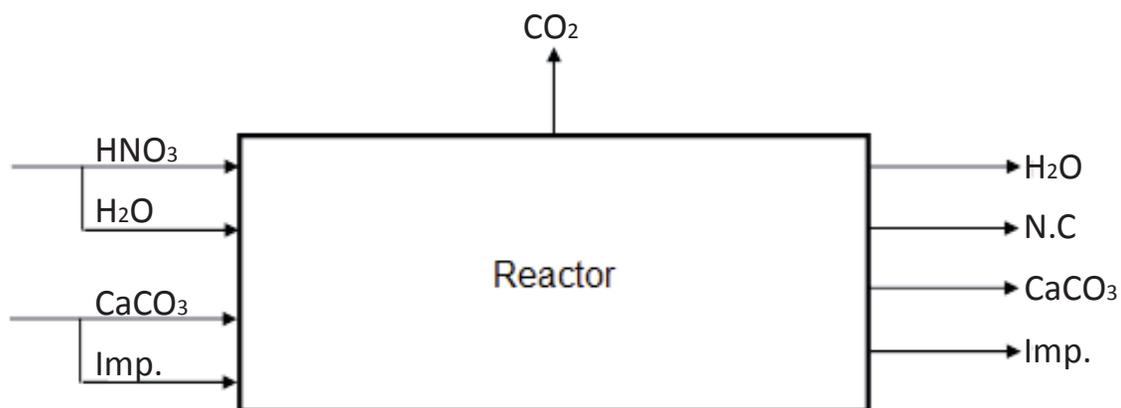


Figura 8.2: Balance al reactor

Tabla 8.2: Resumen balance al reactor

Compuesto	Entra [kg/h]	Sale [kg/h]
HNO ₃	1.797	---
CaCO ₃	1.499	71
H ₂ O	1301	531
Impurezas	31	31
(CaNO ₃)·4H ₂ O	---	3367
CO ₂	---	628
Total	4.628	4.628

8.3 Balance de masa al evaporador

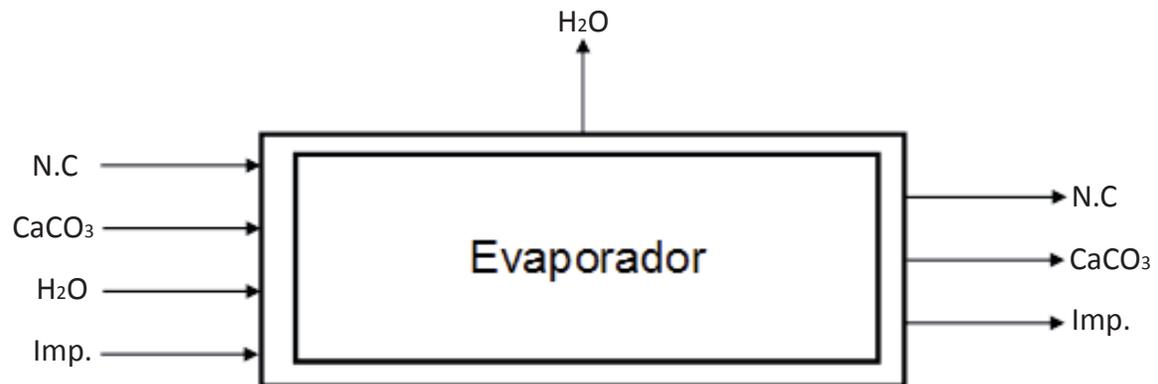


Figura 8.3: Balance al evaporador

Tabla 8.3: Resumen balance al E

Compuesto	Entra[kg/h]	Sale[kg/h]
CaCO ₃	71	71
H ₂ O	531 _(liquido)	531 _(vapor)
Impurezas	31	31
(CaNO ₃)-4H ₂ O	3.367	3.367
Total	4.000	4.000

8.4 Balance de masa al filtro prensa

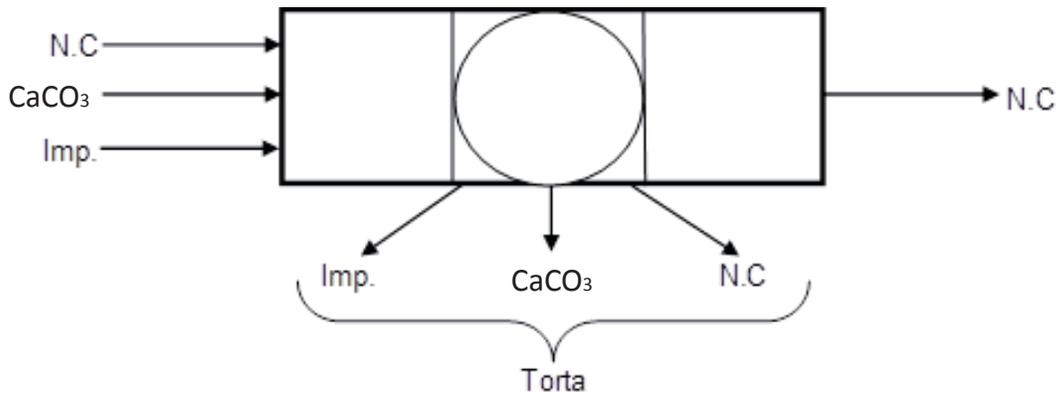


Figura 8.4: Balance al filtro prensa

Tabla 8.4: Resumen balance al filtro prensa

Compuesto	Entra[kg/h]	Torta[kg/h]	Sale[kg/h]	Salida total[kg/h]
CaCO ₃	71	71	0	71
Impurezas	31	31	0	31
(CaNO ₃)-4H ₂ O	3.367	18	3.349	3.367
Total	3.469	120	3.349	3.469

8.5 Balance de masa al rodillo enfriador de cristales (escamador)

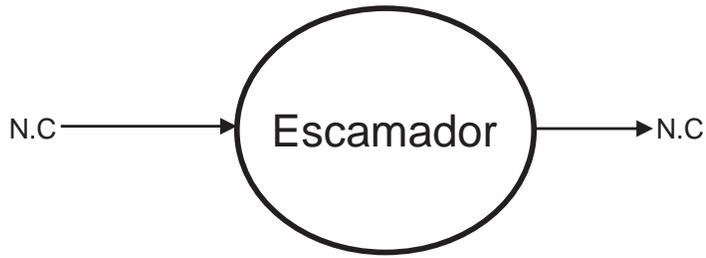


Figura 8.5: Balance al escamador

Tabla 8.5: resumen balance al escamador

Compuesto	Entra[kg/h]	Sale[kg/h]
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	3.349[kg/h] _(líquido)	3.349[kg/h] _(sólido)

8.6 Balance de masa al molino

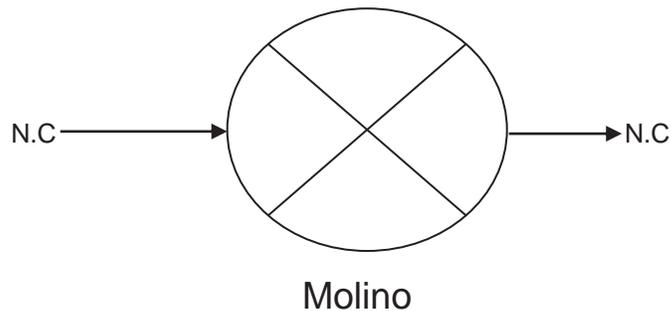


Figura 8.6: Balance al molino

Tabla 8.6: Resumen balance al molino

Compuesto	Entra[kg/h]	Sale[kg/h]
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	3.349[kg/h] _(sólido)	3.349[kg/h] _(sólido y disgregado)

En Resumen,

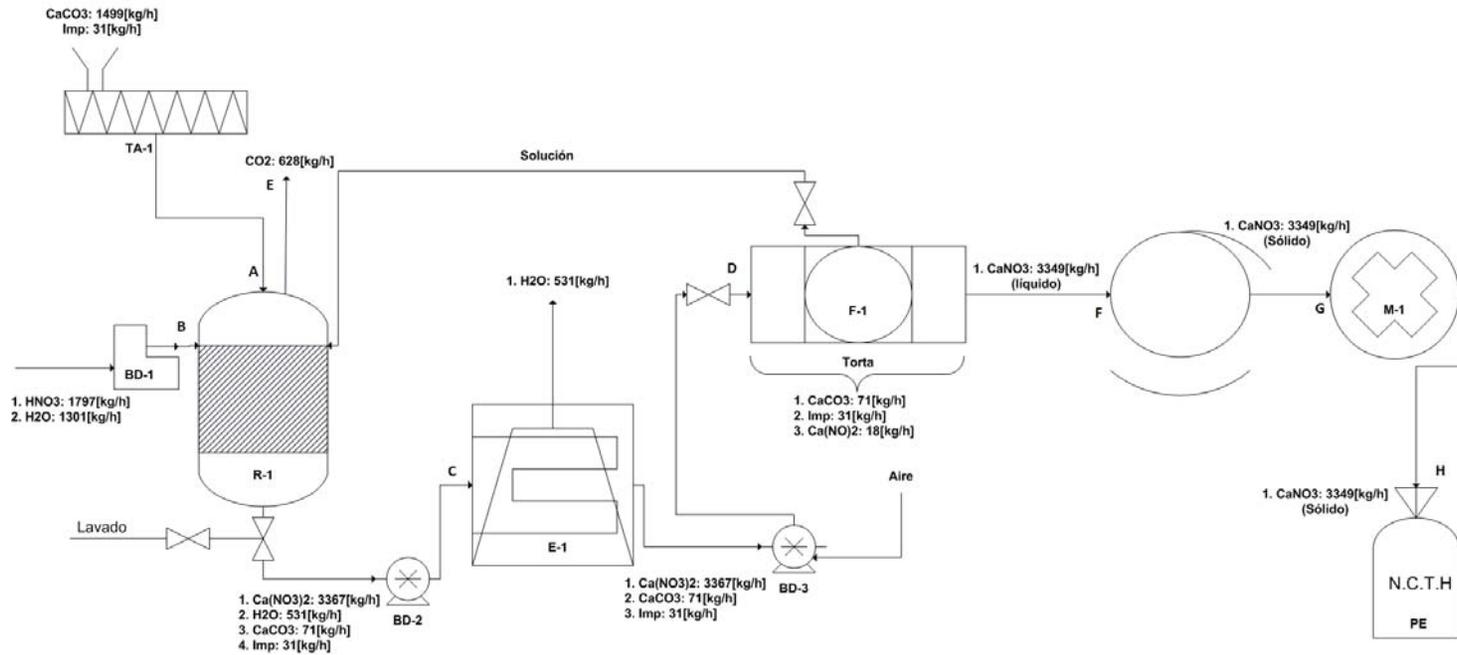


Figura 8.7: Resumen Balance de Masa y Flowsheet del Proceso

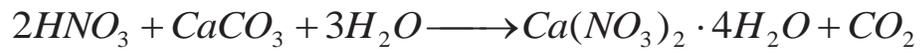
Tabla N° 8.7: Resumen Balance de Masa.

Componente \ Corriente (kg/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
HNO3	-	1.797	-	-	-	-	-	-
CaCO3	1.499	-	71	71	-	-	-	-
H2O	-	1.301	531	-	-	-	-	-
IMP.	31	-	31	31	-	-	-	-
CO2	-	-	-	-	628	-	-	-
Ca(NO3)2	-	-	3.367	3.367	-	3.349	3.349	3.349

9 Balance de Energía

9.1 Balance de energía al reactor

Reacción del proceso:



Esquemáticamente se puede representar como

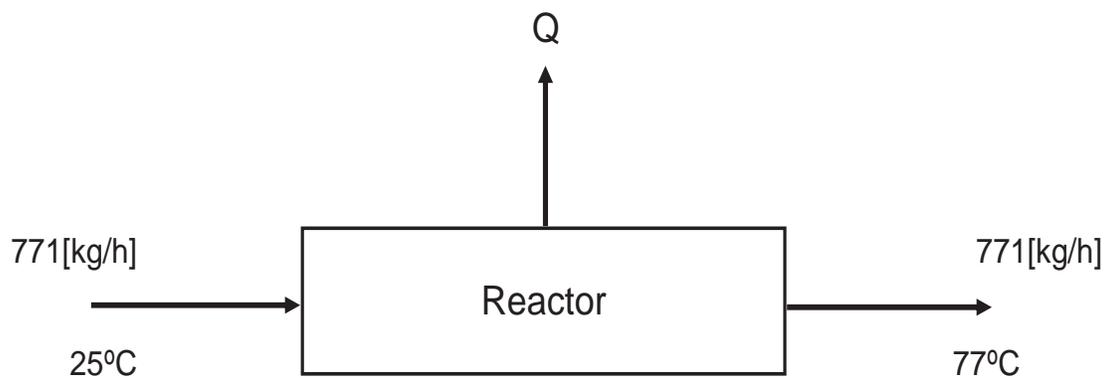


Figura 9.1: Esquema del balance de energía al reactor

- $C_p \text{ HNO}_3$: 0,455[kcal/kg°C]
- $C_p \text{ CaCO}_3$: 0,197[kcal/kg°C]
- $C_p \text{ H}_2\text{O}$: 1[kcal/kg°C]
- $C_p \text{ Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$: 0,555[kcal/kg°C]
- $C_p \text{ CO}_2$: 0,26[kcal/kg°C]

C_p Informados por Enaex S.A y proveedores de insumos

Fracción estequiométrica HNO₃:

$$\frac{\text{PM HNO}_3 \cdot \text{coeficiente estequiométrico}}{\text{PM (CaNO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}} = \frac{63 \cdot 2}{236,08} = 0,534$$

Fracción estequiométrica CaCO₃:

$$\frac{\text{PM CaCO}_3 \cdot \text{coeficiente estequiométrico}}{\text{PM (CaNO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}} = \frac{100,08 \cdot 1}{236,08} = 0,424$$

Fracción estequiométrica H₂O:

$$\frac{\text{PM H}_2\text{O} \cdot \text{coeficiente estequiométrico}}{\text{PM (CaNO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}} = \frac{18 \cdot 3}{236,08} = 0,229$$

$$\text{Cp ponderado: } 0,534 \cdot 0,455 + 0,424 \cdot 0,197 + 0,229 \cdot 1 = 0,555[\text{kcal} / \text{kg}^\circ \text{C}]$$

Calor de reacción¹⁸

$$\Delta H_f^\circ \text{ CaCO}_3: -289,5[\text{kcal/mol}]$$

$$\Delta H_f^\circ \text{ HNO}_3: -41,35[\text{kcal/mol}]$$

$$\Delta H_f^\circ \text{ H}_2\text{O}: -68,3[\text{kcal/mol}]$$

$$\Delta H_f^\circ \text{ CO}_2: -94,05[\text{kcal/mol}]$$

$$\Delta H_f^\circ (\text{CaNO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}: -507,43[\text{kcal/mol}]$$

¹⁸Informados por Enaex S.A

$\Delta H^\circ_{\text{rxn}}$:

$$(\Delta H^\circ_f \text{HNO}_3) \cdot 2 + (\Delta H^\circ_f \text{CaCO}_3) + (\Delta H^\circ_f \text{H}_2\text{O}) \cdot 3 - (\Delta H^\circ_f (\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}) - (\Delta H^\circ_f \text{CO}_2))$$

$\Delta H^\circ_{\text{rxn}}$:

$$-41,35 \cdot 2 - 289,5 - 68,3 \cdot 3 + 507,43 + 94,05 = 24,38[\text{kcal/mol}] = 103,305[\text{kcal/kg}]$$

9.2 Balance de energía al evaporador

$$Q = m \cdot Cp \cdot \Delta T$$

Calor necesario para evaporar el agua

Masa de H_2O a evaporar = 531[kg]

$$T_i = 77^\circ\text{C}^{19}$$

$$T_f = 100^\circ\text{C}$$

$$\lambda_{\text{vap}}^{100^\circ\text{C}} = 2258,9[\text{kJ/kg}] = 539,5[\text{kcal/kg}]$$

Calor necesario para evaporar el agua: $Q_{\text{H}_2\text{O}} = m \cdot Cp \cdot (T_f - T_i) + m \cdot \lambda_{\text{vap}}^{100^\circ\text{C}}$

$$Q_{\text{H}_2\text{O}} = 531 \cdot 1 \cdot (100 - 77) + 531 \cdot 539,5 = 298.688[\text{kcal/h}]$$

Calor necesario para calentar la solución fundida de nitrato de calcio.

Masa de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ a calentar = 3.367[kg]

$$T_i = 77^\circ\text{C}$$

¹⁹ Valor obtenido del Pilotaje realizado

$$T_f = 100^\circ\text{C}$$

Calor necesario para llevar el $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ a 100°C : $Q_{\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}} = m \cdot C_p \cdot (T_f - T_i)$

$$Q_{\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}} = 3.367 \cdot 0,555 \cdot (100 - 77) = 42.980 [\text{kcal} / \text{kg}]$$

Calor necesario para calentarel carbonato de cálcio enexceso CaCO_3

Masa de CaCO_3 a calentar (incluyendo impurezas) = 102[kg]

$$T_i = 77^\circ\text{C}$$

$$T_f = 100^\circ\text{C}$$

Calor necesario para llevar el CaCO_3 a 100°C : $Q_{\text{CaCO}_3} = m \cdot C_p \cdot (T_f - T_i)$

$$Q_{\text{CaCO}_3} = 102 \cdot 0,197 \cdot (100 - 77) = 462 [\text{kcal} / \text{kg}]$$

Calor necesario para llevar evaporar el agua en exceso y calentar la mezcla a 100°C =

$$Q_T = Q_{\text{H}_2\text{O}} + Q_{\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}} + Q_{\text{CaCO}_3} = 298.688 + 42.980 + 462 = 342.130 [\text{kcal} / \text{kg}]$$

Se ocupará vapor saturado a 160°C y 6.18[bar]

$$Q_T = Q_{\text{vap}} = m_{\text{vaopor}} \cdot \lambda_{\text{vap}}^{160^\circ\text{C}}$$

$$\lambda_{\text{vap}}^{160^\circ\text{C}} = 2.125,7 [\text{kJ}] = 507,715 [\text{kcal}]$$

$$m_{\text{vapor}} = \frac{Q_{\text{vap}}}{\lambda_{\text{vap}}^{160^\circ\text{C}}} = \frac{342.130}{507,715} = 674 [\text{kg} / \text{h}]$$

9.3 Balance de energía al escamador

$$\Delta H_{\text{fusión}}^{\circ} \text{N.C}; 42,7^\circ\text{C} = 21,68 [\text{kcal} / \text{kg}]$$

Ti de cristales: 100°C

Tf de cristales: 40°C

Masa de cristales fundidos a enfriar = 20.095[kg/dia] = 3.349[kg/h]²⁰

Calor a extraer: $Q_{\text{extr}} = m \cdot (\Delta H_f^\circ + C_{p_{\text{pond}}} \cdot (T_i - T_f))$

$$Q_{\text{extr}} = 3.349 \cdot (21,68 + 0,555 \cdot (100 - 40)) = 184.128[\text{kcal} / \text{h}]$$

²⁰ Se consideran seis horas de funcionamiento debido a que es necesario contar con una hora para preparar la operación y una hora para lavar el sistema una vez operado, esto con el fin de evitar taponeos por efectos de cristales de nitrato de calcio e impurezas en las líneas de producción.

10 Dimensionamiento de equipos

10.1 Estanque de almacenamiento de solución de ácido nítrico

Función: Almacenar el ácido nítrico para 3 días de autonomía de consumo

Volumen diario de solución ácida requerida: $V_1 = 2.286[l/h] = 54.864[l/dia]$

Volumen necesario para operar por 3 días: $V_3 = 165[m^3]$

Asumiendo que un 10% debe estar vacío y un factor de seguridad de otro 10%, el volumen del estanque corresponde a: $V = 200[m^3]$

Dado este volumen, se opta por utilizar 2 estanques de $100[m^3]$ c/u, con una razón aproximada altura/diámetro de 1,5

$$V = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot h}{4}$$

En donde:

A : Área del estanque

d : Diámetro del estanque

h : Altura del estanque

Por lo tanto:

$$100 = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot 1,5d}{4}$$

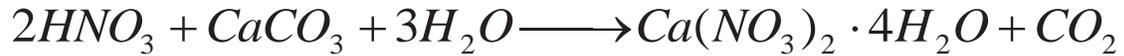
Resolviendo:

$$d = 4,4[m]$$

$$h = 6,6[m]$$

10.2 Reactor R-1

Función: Recipiente donde ocurre la reacción:



$$\text{Flujo volumétrico de solución ácida (Fva)} = 3.098[kg/h] / 1,355[kg/l] = 2.286[l/h]$$

$$\text{Flujo volumétrico de carbonato de calcio (Fvc)} = 1530[kg/h] / 2,701[kg/l] = 739[l/h]$$

$$\text{Flujo másico total (Fm)} = 3.098 + 1.530 = 4.628[kg/h]$$

$$\text{Flujo volumétrico mezcla total (Fv)} = 2.851[l/h]$$

$$\text{Densidad de La mezcla } (\rho) = 4.628 / 2.816 = 1,78[kg/l]$$

$$\text{Tiempo de residencia (tr): } 10[\text{min}]^{21}$$

$$\text{Volumen útil del reactor (Vu)} = Fv \cdot t_r = 2.851[l] \cdot 10[\text{min}] \cdot \frac{1[h]}{60[\text{min}]} = 476[l]$$

²¹ Dato obtenido de pruebas de laboratorio y pilotaje realizado

% de utilización del reactor (n): 25%

$$\text{Volumen total del reactor } (V_r) = \frac{Vu}{n/100} = \frac{476}{25/100} = 1.900[l] \approx 2[m^3]$$

Al reaccionar el carbonato de calcio con el ácido nítrico se libera una importante cantidad de CO₂, razón por la cual se produce gran cantidad de espuma en la reacción, al no tener un reactor considerablemente de mayor tamaño que el del volumen útil de la reacción, la espuma se rebalsaría por las mirillas y ducto de ventilación.

El reactor corresponde a un estanque cilíndrico con agitador de paleta.

La agitación es de suma importancia, ya que permite un mejor mezclado y la agitación a alta velocidad (sobre 100 rpm) reduce considerablemente la espuma que se genera en el reactor.

Dimensiones del reactor

Volumen del reactor (V): 2[m³]

$$V = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot Z_v}{4}$$

El reactor debe ser de menor diámetro que altura, esto con el objeto de facilitar la incorporación del polvo a la pulpa con una agitación moderada.

$$Z_v = 1.5D$$

Remplazando obtenemos,

$$2 = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot 1,5D}{4}$$

$$D = 1,2[m]$$

$$Z_v = 1,8[m]$$

Además,

$$d = D/3 = 1,2/3 = 0,4[m]$$

$$H = 1,2D = 1,2 \cdot 1,2 = 1,44[m]$$

$$z = 0,99d = 0,99 \cdot 0,4 = 0,396[m]$$

$$W = 0,1D = 0,1 \cdot 1,2 = 0,12[m]$$

$$h = 0,25d = 0,25 \cdot 0,4 = 0,1[m]$$

$$N_p = 4$$

En donde,

V : Volumen real del reactor (m^3)

D : Diámetro del reactor (m)

Z_v : Altura efectiva del reactor (m)

H : Altura total del reactor (m)

z : Distancia desde el fondo del reactor hasta las paletas de agitación (m)

h : Ancho de paletas (m)

N_p Numero de paletas cortacorrientes

Agitador

Corresponde a un agitador de turbina con 4 paletas planas y cortacorrientes.

Su función es mezclar de manera efectiva los reactantes con tal de tener un producto totalmente puro.

Calculo de la potencia del agitador:

Evaluando en el número de Reynolds:

$$\text{Re} = \frac{N \cdot \rho \cdot d^2}{\mu}$$

$$N = 200[\text{rpm}] = 3,34[\text{s}^{-1}]$$

$$\rho = 1,64[\text{kg/l}] = 102,18[\text{lb/pie}^3]$$

$$\mu = 0,22[\text{g/cm} \cdot \text{s}] = 0,016[\text{lb/pie} \cdot \text{s}]$$

$$d = 0,4[\text{m}] = 40[\text{cm}] = 1,31[\text{pie}]$$

En donde:

N : Revoluciones por minuto

ρ : Densidad de la solución

μ : Viscosidad de la solución

d : Diámetro del agitador

Remplazando en la ecuación,

$$\text{Re} = \frac{3,34 \cdot 102,18 \cdot 1,31^2}{0,016} = 36.605$$

La potencia requerida se obtiene a través de la ecuación,

$$N_{po} = \frac{P \cdot g_c}{N^3 \cdot \rho \cdot d^5}$$

La gráfica para determinar el número de potencia (N_{po}) la obtenemos a través del libro “principios de operaciones unitarias”, Alan S. Foust / Leonard A. Wenzel / Curtis W. Clump / Louis Maus / L. Breyce Andersen.

$$N_{po} = 1,8$$

En donde:

P : Potencia al freno requerida

g_c Constante dimensional (32,2 [lbf·ft/lbf·s²])

Reemplazando,

$$P = \frac{N_{po} \cdot N^3 \cdot \rho \cdot d^5}{g_c} = \frac{1,8 \cdot 3,34^3 \cdot 102,18 \cdot 1,31^5}{32,2} = 821[\text{lbf} \cdot \text{ft} / \text{min}] = 1,5[\text{HP}]$$

Para el cálculo de la potencia del motor eléctrico se debe considerar que:

$$P_m = \frac{P}{n}$$

En donde,

P_m Potencia al freno del motor eléctrico

η : Eficiencia del motor eléctrico

La eficiencia generalmente se ubica entre un 80 y 95%. Se asume una eficiencia del 85%.

Por lo tanto,

$$P_m = \frac{1,5}{0,85} = 1,8[HP] = 1,34[kW]$$

Tabla 10.1: Hoja de especificaciones equipo R-1

Numero requerido	1
Tipo	Vertical, cerrado
Material a tratar	Ácido nítrico, carbonato de calcio, solución fundida de nitrato de calcio
Capacidad (nominal)	2.000[l]
Peso aproximado	1[ton]
Diámetro	1,2[m]
Altura	1,8[m]
Material de construcción	Acero SS-316
Espesor del manto	8[mm]
Espesor del fondo	12[mm]
Material de agitadores	SS-316
Diámetro del agitador	40[cm]
Tipo del agitador	De turbina, con 6 paletas
Altura respecto al fondo del reactor	396[mm]
Potencia del motor	2[hp]
Caja de regulación	Ajustable entre 100 y 299 [rpm]

Motor eléctrico	220-380[volts], 50[Hz], para su servicio continuo en planta
Fundación	Hormigón H30

10.3 Evaporador (E-1)

Función: Evaporar el agua en exceso (531[kg/H]) de la solución de nitrato de calcio fundido.

Ecuación de diseño:

$$m_v \cdot \lambda_s = A \cdot U \cdot \Delta T$$

En donde,

m_v : Flujo másico de vapor saturado de calentamiento [kg/h]

λ_s : Calor latente de vaporización [kcal/kg]

U : Coeficiente de transferencia de calor [kcal/h·m²·°C]

ΔT : Diferencia de temperatura entre la solución y el vapor de la cámara (°C)

Condiciones de operación:

Alimentación de solución: 4.000[kg/h]

Descarga de solución: 3.469[kg/h]

Flujo másico de vapor saturado de calentamiento: 674[kg/h]

Presión de saturación del vapor usado: 618[kpa]

Calor latente de vaporización: 507,715[kcal/kg]

Coeficiente de transferencia de calor: $3.420[\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}]$

Temperatura de saturación: 160°C

Temperatura de vaporización: 100°C

Reemplazando en la ecuación,

$$674 \cdot 507,715 = A \cdot 3.420 \cdot (100 - 77) = 4,35 \approx 4,5[m^2]$$

$$A = 4,5[m^2]$$

El evaporador será de tipo vertical (con tubos largos), con un sistema de calentamiento interno externo y flujo ascendente. Los tubos serán de acero revestido con grafito.

La selección se hace en función del área de transferencia y se adquiere el equipo con todos los accesorios correspondientes, tuberías de vapor, bombas y bases, eyectores, etc.

10.4 Filtro prensa (F-1)

Función: Retener las impurezas contenidas en la solución fundida de nitrato de calcio tetra hidratado.

La alimentación al filtro prensa posee un flujo de $3.469[\text{kg}/\text{h}]$, con un contenido de sólidos cercano al 3%.

Analizando el porcentaje de sólidos y el flujo de alimentación se determina que es recomendable usar un filtro prensa de $7[\text{bar}]$ de presión.

En estos equipos la velocidad de filtración fluctúa entre $0,01$ y $0,02[\text{gal}/\text{pie}^2 \cdot \text{min}]$.

Se asume una velocidad de filtración de $0,015[\text{gal}/\text{pie}^2 \cdot \text{min}]^{22}$

Densidad solución: $1,51[\text{kg}/\text{l}]$

²²Manual del Ingeniero químico, Perry, sexta edición. 1992

Flujo volumétrico de la solución: $\frac{3.469}{1,51} = 2.298[l/h]$

Lo cual nos da un área de:

$$A = \frac{2.298}{36,45} = 63[m^2]$$

Tomando un factor de seguridad de un 20%

$$A = 76[m^2]$$

Tabla 10.2: Hoja de especificaciones equipo F-1

Presión de operación	7[bar]
Presión de apriete	5.000[bar]
Material	Acero SS-316
Nº de placas	32 (+2 tapas)
Largo de placas	100[cm]
Ancho de placas	100[cm]
Espesor de placas	20[mm]

10.5 Enfriador Rotatorio (Escamador)

Función: Enfriar a través de contacto directo la solución de nitrato de calcio tetra hidratado hasta llegar a su punto de cristalización.

La solución fundida de nitrato de calcio tetra hidratado llega al escamador, el cual previamente se le ha hecho pasar agua de enfriamiento (20°C) para que una vez que escurra la solución a través de las paredes del escamador comience la cristalización del nitrato de calcio.

El escamador atrapa los cristales de nitrato de calcio por medio de una cuchilla que se encuentra ubicada a los 75° del cilindro escamador.

El calor transferido se evalúa a través de:

$$A = \frac{Q}{U \cdot \Delta T_{lmd}}$$

$$Q = 184.128[kcal/h]$$

$$U = 73,08[kcal/h \cdot m^2 \cdot ^\circ C]$$

$$T_1 = 95^\circ C$$

$$T_2 = 40^\circ C$$

$$t_1 = 20^\circ C$$

$$t_2 = 30^\circ C$$

$$\Delta T_{lmd} = 38^\circ C$$

$$A = \frac{186667}{73.08 \cdot 38} = 66[m^2]$$

Tomando un factor de seguridad de un 10%

$$A = 73[m^2]$$

$$A = \pi \cdot L \cdot d$$

En donde,

A : Área de transferencia de calor

Q : Calor transferido

U : Coeficiente de transferencia de calor

ΔT :Diferencia media logarítmica entre la temperatura de la solución a la entrada del enfriador rotatorio y la temperatura de cristalización

L : Largo del escamador

d : Diámetro del escamador

Se estima una relación largo diámetro de 1-3, por lo tanto:

$$73 = \pi \cdot L \cdot \frac{L}{3}$$

$$L = 8,3[m]$$

$$d = 2,8[m]$$

El tiempo de residencia del nitrato de calcio se estima entre $0,3[\text{min}]^{23}$, por ende para asegurar la cristalización el rodillo enfriador debe tener una velocidad de $0,5[\text{rpm}]$.

El enfriador rotatorio será de acero al inoxidable y se adquiere el equipo con todos los accesorios correspondientes, motor, correas, bandejas, etc.

10.6 Molino

Función: Moler el nitrato de calcio tetra hidratado que sale del enfriador rotatorio y dejarlo con una granulometría comercial.

Flujo de alimentación al molino = $3.349[\text{kg/h}] = 0,056[\text{ton/min}]$

Potencia del motor:

Para calcular la potencia requerida por el motor para la trituración y molienda, es aceptable usar la formula desarrollada por Bond.

$$\frac{P}{T} = 0,815 \cdot W_i \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{D_{PA}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{PB}}} \right]$$

²³ Dato obtenido de pilotaje realizado.

En donde,

P : Potencia al freno del motor

T : Flujo De alimentación (ton/min)

D_{PA} : Abertura de la malla de un tamiz, por el que pasa el 80% de la alimentación

D_{PB} : Abertura de la malla de un tamiz, por el que pasa el 80% del producto final

W_i : Índice de trabajo para molienda

De acuerdo con las especificaciones del nitrato de calcio tetra hidratado, es factible asumir que el 80% del producto debe pasar por una malla de 1[mm] de abertura y la alimentación deber pasar por una malla de 3[cm] de abertura.

El índice de trabajo para molienda en seco se estima en 13,5.

Por lo tanto,

$$D_{PA} = 1[mm] = 0,001[m]$$

$$D_{PB} = 3[cm] = 0,03[m]$$

$$W_i = 13,5$$

Resolviendo,

$$P = 15[HP]$$

Tomando una eficiencia del 85%

$$P_m = \frac{15}{0,85} = 18[HP]$$

10.7 Tornillo Alimentador de Carbonato de Calcio:

Función: Alimentar el carbonato de calcio necesario para completar la reacción.

$$\text{Flujo másico: } 9.177 \frac{\text{kg}}{\text{dia}} \cdot \frac{1 \text{ dia}}{6 \text{ h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} = 25,5 [\text{kg} / \text{min}]$$

Tabla 10.3: Hoja de especificaciones equipo T-1

Capacidad de la tolva	100[kg]
Capacidad de alimentación	1.800[kg/h]
Material	Acero inoxidable SS-316
Potencia del motor	1[HP]

10.8 Bomba dosificadora de solución de ácido nítrico BD-1

Función: Bomba para dosificar la solución de ácido nítrico al reactor.

$$\text{Flujo másico: } 18.591 [\text{kg} / \text{dia}] = 3.099 [\text{kg} / \text{h}] = 51,64 [\text{kg} / \text{min}]$$

Densidad solución ácida: 1,355[kg/l]

$$\text{Flujo volumétrico de alimentación: } \frac{18.591}{1,355} = 13.720 \frac{\text{l}}{\text{dia}} \cdot \frac{1 \text{ dia}}{6 \text{ h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} = 38 [\text{l} / \text{min}]$$

Altura del reactor: $h_r = 1,8 [\text{m}]$

Largo equivalente descarga: $LeqD = 9 [\text{m}]$

Largo equivalente descarga: $LeqD = 9,25 [\text{m}]$

Perdidas por fricción:

$$\Delta H = \Delta Z + \Delta h_f$$

$$\text{En donde } \Delta hf = hfD - hfS \left[\frac{lb-f*pie}{lb-m} \right]$$

De aquí en adelante se usará el termino D, para señalar la Descarga y S para señalar la Succión.

a) Pérdidas por Descarga.

$$\text{Sea } v = \frac{4*Q}{\pi*D^2}$$

Donde: v = Velocidad de una cañería.

Q = Caudal

D = Diámetro Interno

- Cambio de Unidades.

$$Q = 38 \left[\frac{Lt}{Min} \right] = 0,0224 \left[\frac{pie^3}{s} \right]$$

$$Dn = \frac{1''}{2} \rightarrow D = 0,05183' \text{ (Cañería Acero Comercial 40ST,40S)}$$

$$\rho = 1,355 \left[\frac{Kg}{Lt} \right] = 84,64 \left[\frac{Lb}{pie^3} \right]$$

$$\mu = 2 \text{ cp} = 1,344 * 10^{-3} \left[\frac{lb}{pie * s} \right]$$

Por lo Tanto:

$$v = \frac{4 * 0,0224}{\pi * 0,05183^2} = 10,6 \left[\frac{pie}{s} \right]$$

Sea Reynolds, expresado de la siguiente forma: $Re = \frac{D*v*\rho}{\mu}$

Remplazando se obtiene.

$$Re = \frac{0,05183 * 10,6 * 84,64}{1,344 * 10^{-3}} = 34588,28$$

Existe un rango, en el cual el valor de Reynolds, indica si dicho sistema es turbulento, transición o laminar.

$$2100(\text{Laminar}) < Re(\text{Transición}) < 10000(\text{Turbulento})$$

Por lo tanto, podemos decir con seguridad que Reynolds calculado pertenece a la zona de Turbulencia. En caso de ser Laminar, hay que utilizar diferentes formulas.

Sea la Rugosidad Relativa expresada como $\frac{\epsilon}{d}$. Se obtiene de resultado $2,8941 * 10^{-3}$.

El factor de fricción, perteneciente a la formula de pérdidas, es calculada a través de la figura 10.1, la cual se encuentra en función del Reynolds y la rugosidad relativa. Cabe señalar que la rugosidad relativa va a depender del material a utilizar en las cañerías. Como se mencionó anteriormente, se está utilizando Acero Comercial.

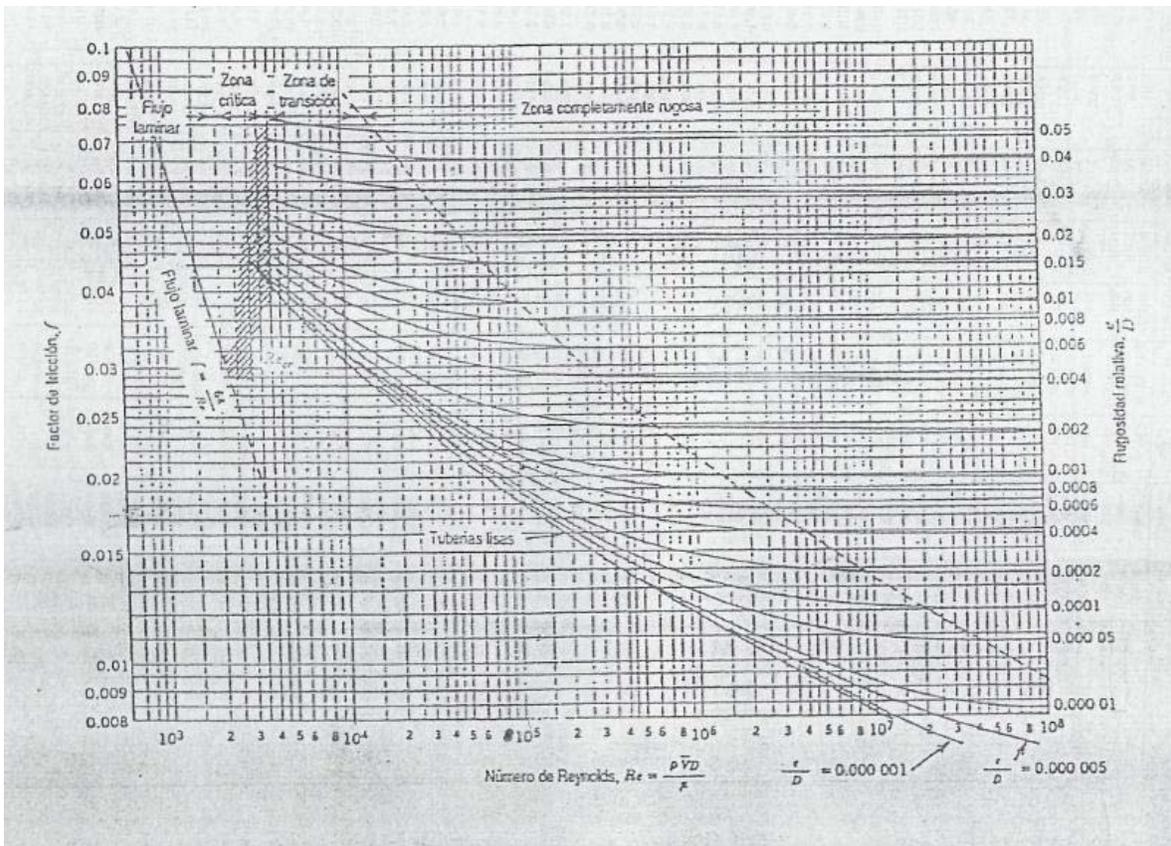


Figura 10.1. Factores de Fricción

De la figura 10.1 se obtiene un valor de $2,9424 * 10^{-2}$.

Finalmente se plantea la fórmula para las pérdidas.

$$hfD = fD * \frac{Leq}{D} * \frac{v^2}{2 * gc}$$

Remplazando obtenemos la primera ecuación.

$$(1)hfS = 2,9424 * 10^{-2} * \frac{29,53}{0,05183} * \frac{10,6^2}{64,4} = 29,25 \left[\frac{lb - f * pie}{lb - m} \right]$$

Del mismo modo anterior, se realizan los mismos pasos pero tomando a consideración los datos que podrían cambiar.

Finalmente obtenemos la ecuación dos.

$$(2)hfD = 2,9424 * 10^{-2} * \frac{30,35}{0,05183} * \frac{10,6^2}{64,4} = 30,24 \left[\frac{lb - f * pie}{lb - m} \right]$$

$$\Delta hf = 30,24 - 29,25 = 0,99 \left[\frac{lb - f * pie}{lb - m} \right]$$

Expresándolo en términos de longitud:

$$\Delta hf = 9,72[m]$$

$$\text{Altura total: } H = h_r + f_r = 1,8 + 9,72 \approx 11,52[m]$$

Tabla 10.4: Hoja de especificaciones equipo BD-1

Tipo	Dosificadora
Marca	Milton Roy
Modelo	Macroy D
Tipo de cabezal	Acero inox. 316SS
Diámetro de succión	½" NPTM
Diámetro de descarga	½" NPTM
Potencia motor	1/3[HP]
Voltaje	380[V]
Controlador	Automático de 4-20 m Nema 4, 115[V]
Válvula de contrapresión	GVB081 de ½" en 316 SS

10.9 Bomba a Evaporador (E-1)

Función: Alimentar la mezcla reaccionante al evaporador (E-1)

Flujo másico: $4.000[\text{kg}/\text{h}] = 66,7[\text{kg}/\text{min}]$

Densidad mezcla reaccionante: $1,536[\text{kg}/\text{l}]$

Flujo volumétrico de alimentación: $44[\text{l}/\text{min}]$

Altura del evaporador: $h_r = 3[\text{m}]$

Datos:

$$Q = 44 \left[\frac{\text{l}}{\text{min}} \right] = 0,0259 \left[\frac{\text{pie}^3}{\text{s}} \right]$$

$D = \text{Se mantiene.}$

$$\rho = 1,536 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{Lt}} \right] = 95,946 \left[\frac{\text{Lb}}{\text{pie}^3} \right]$$

$$\mu = 2,6 \text{ cp} = 0,001747 \left[\frac{\text{Lb}}{\text{pie} * \text{s}} \right]$$

a) Pérdidas por Descarga.

Se realizó de la siguiente manera: $\Delta H = \Delta Z + \Delta hf$

En donde $\Delta hf = hfD - hfS \left[\frac{\text{lb-f*pie}}{\text{lb-m}} \right]$

Por lo Tanto:

$$v = \frac{4 * 0,0259}{\pi * 0,05183^2} = 12,27 \left[\frac{\text{pie}}{\text{s}} \right]$$

Remplazando se obtiene.

$$Re = \frac{0,05183 * 12,27 * 95,946}{1,747 * 10^{-3}} = 34922,6$$

Por lo tanto, podemos decir con seguridad que Reynolds calculado pertenece a la zona de Turbulencia.

Sea la Rugosidad Relativa expresada como $\frac{\epsilon}{d}$. Se obtiene de resultado $2,8941 * 10^{-3}$.

De la figura 10.1 se obtiene un valor de $2,9396 * 10^{-2}$.

Remplazando obtenemos la primera ecuación.

$$(1)hfD = 2,9396 * 10^{-2} * \frac{24,68}{0,05183} * \frac{12,27^2}{64,4} = 32,7 \left[\frac{lb - f * pie}{lb - m} \right]$$

Del mismo modo anterior, se realizan los mismos pasos pero tomando a consideración los datos que podrían cambiar.

Finalmente obtenemos la ecuación dos.

$$(2)hfS = 2,9396 * 10^{-2} * \frac{24,28}{0,05183} * \frac{12,27^2}{64,4} = 32,2 \left[\frac{lb - f * pie}{lb - m} \right]$$

$$\Delta hf = 32,7 - 32,2 = 0,5 \left[\frac{lb - f * pie}{lb - m} \right]$$

Expresándolo en términos de longitud:

$$\Delta hf = 5[m]$$

$$\text{Altura total: } H = h_r + f_r = 1,8 + 5,2 = 6,8[m]$$

Para evaluar la potencia necesaria de la bomba utilizamos la ecuación:

$$P_B = \frac{G \cdot H}{4.560 \cdot \eta_B}$$

$$\text{Remplazando en la ecuación: } P_B = \frac{66,7 \cdot 6,8}{4.560 \cdot 0,65} = 0,153[HP]$$

Tabla 10.5: Hoja de especificaciones equipo BC-2

Tipo	Bomba centrifuga horizontal ANSI
Marca	GRISWOLD
Modelo	LF 1½ x1-8AA
Potencia	0.74[HP]
Voltaje	380[V]

10.10 Bomba filtro prensa (BD-3)

Función: Recircular hacia el reactor la solución que se pueda escapar a través de las placas del filtro prensa.

Flujo másico: $4.000[kg/h] = 66,7[kg/min]$

Densidad mezcla reaccionante: $1,536[kg/l]$

Flujo volumétrico de alimentación: $44[l/min]$

Altura de filtro prensa: $h_r = 2[m]$

Datos:

$$Q = 44 \left[\frac{l}{min} \right] = 0,0259 \left[\frac{pie^3}{s} \right]$$

$$Dn = 1'' \rightarrow D = 0,08742$$

$$\rho = 1,536 \left[\frac{Kg}{l} \right] = 95,946 \left[\frac{Lb}{pie^3} \right]$$

$$\mu = 2,1 \text{ cp} = 0,001411 \left[\frac{Lb}{pie * s} \right]$$

$$\text{En donde } \Delta hf = hfD - hfS \left[\frac{lb-f*pie}{lb-m} \right]$$

Por lo Tanto:

$$v = \frac{4 * 0,0259}{\pi * 0,08742^2} = 4,31 \left[\frac{pie}{s} \right]$$

Remplazando se obtiene.

$$Re = \frac{0,08742 * 4,31 * 95,946}{1,411 * 10^{-3}} = 25634,87$$

Por lo tanto, podemos decir con seguridad que Reynolds calculado pertenece a la zona de Turbulencia.

Sea la Rugosidad Relativa expresada como $\frac{\epsilon}{d}$. Se obtiene de resultado $1,7159 * 10^{-3}$.

De la figura 10.1 se obtiene un valor de $2,8239 * 10^{-2}$.

Remplazando obtenemos la primera ecuación.

$$(1) h_f S = 2,8239 * 10^{-2} * \frac{17}{0,08742} * \frac{4,31^2}{64,4} = 1,584 \left[\frac{lb - f * pie}{lb - m} \right]$$

Del mismo modo anterior, se realizan los mismos pasos pero tomando a consideración los datos que podrían cambiar.

Finalmente obtenemos la ecuación dos.

$$(2) h_f D = 2,8239 * 10^{-2} * \frac{22,45}{0,08742} * \frac{4,31^2}{64,4} = 2,09 \left[\frac{lb - f * pie}{lb - m} \right]$$

$$\Delta h_f = 2,09 - 1,584 = 0,506 \left[\frac{lb - f * pie}{lb - m} \right]$$

Expresándolo en términos de longitud:

$$\Delta h_f = 5[m]$$

$$\text{Presión de operación: } P_{op} = 7[bar] = 71,4[mH_2O]$$

$$\text{Altura total: } H = 2 + 5 + 71,4 = 78,4[m]$$

Para evaluar la potencia necesaria de la bomba utilizamos la ecuación:

$$P_B = \frac{G \cdot H}{4560 \cdot \eta_B}$$

Remplazando en la ecuación, $P_B = \frac{66,7 \cdot 78,4}{4.560 \cdot 0,65} = 1,76[HP]$

Tabla 10.6: Hoja de especificaciones equipo BD-3

Tipo	Bomba de diafragmas
Marca	Wilden
Modelo	H200/WWWAA/FWS/WF/MWF
Lubricación	No requiere
Material cuerpo	Fierro fundido
Material asiento	Fierro fundido
Material cámaras de aire	Aluminio
Material Bloque central	Aluminio
Material válvula	Aluminio
Conexión succión/descarga	Flanges 1" ANSI

10.11 Bomba limpiadora filtro prensa (BD-4)

Función: Remover la torta depositada en las placas resultante del proceso de filtración

Flujo másico de agua: $1.065[kg/dia] = 21,3[kg/min]$

Flujo volumetrico: $21,3[l/min]$

Altura de filtro prensa: $h_r = 2[m]$

Datos

$$Q = 21,3 \left[\frac{l}{min} \right] = 0,0125 \left[\frac{pie^3}{s} \right]$$

$$Dn = 1'' \rightarrow D = 0,08742$$

$$\rho = 62,4 \left[\frac{Lb}{pie^3} \right]$$

$$\mu = 6,72 * 10^{-4} \left[\frac{Lb}{pie * s} \right]$$

$$\text{En donde } \Delta hf = hfD - hfS \left[\frac{lb-f*pie}{lb-m} \right]$$

Por lo Tanto:

$$v = \frac{4 * 0,0125}{\pi * 0,08742^2} = 2,09 \left[\frac{pie}{s} \right]$$

Remplazando se obtiene.

$$Re = \frac{0,08742 * 2,09 * 62,4}{6,72 * 10^{-4}} = 16965,47$$

Por lo tanto, podemos decir con seguridad que Reynolds calculado pertenece a la zona de Turbulencia.

Sea la Rugosidad Relativa expresada como $\frac{\epsilon}{d}$. Se obtiene de resultado $1,7159 * 10^{-3}$.

De gráfica se obtiene un valor de $3,021 * 10^{-2}$.

Remplazando obtenemos la primera ecuación.

$$(1) hfD = 3,021 * 10^{-2} * \frac{12}{0,08742} * \frac{2,09^2}{64,4} = 0,28 \left[\frac{lb - f * pie}{lb - m} \right]$$

Del mismo modo anterior, se realizan los mismos pasos pero tomando a consideración los datos que podrían cambiar.

Finalmente obtenemos la ecuación dos.

$$(2)hfS = 3,021 * 10^{-2} * \frac{10}{0,08742} * \frac{2,09^2}{64,4} = 0,23 \left[\frac{lb - f * pie}{lb - m} \right]$$

$$\Delta hf = 0,28 - 0,23 = 0,05 \left[\frac{lb - f * pie}{lb - m} \right]$$

Expresándolo en términos de longitud:

$$\Delta hf = 0,5[m]$$

$$\text{Presión de operación: } P_{op} = 7[bar] = 71,4[mH_2O]$$

$$\text{Altura total: } H = 0,5 + 71,4 = 71,9[m]$$

Para evaluar la potencia necesaria de la bomba utilizamos la ecuación siguiente ecuación:

$$P_B = \frac{G \cdot H}{4.560 \cdot \eta_B}$$

$$\text{Remplazando en la ecuación: } P_B = \frac{66,7 \cdot 71,9}{4.560 \cdot 0,65} = 1,62[HP] = 1,8[HP]$$

Tabla 10.7: Hoja de especificaciones equipo BD-4

Tipo	Bomba DE DIAFRAGMAS
Marca	Wilden
Modelo	H200WWWAA/FWS/WF/MWF
Lubricación	No requiere
Material cuerpo	Fierro fundido
Material asiento	Fierro fundido
Material cámaras de aire	Aluminio
Material Bloque central	Aluminio

Material válvula	Aluminio
Conexión succión/descarga	Flanges 1" ANSI

10.12 Correa transportadora de carbonato de calcio (C-1)

Función: Transportar el carbonato de calcio desde La pila de acopio hasta el reactor R-1

Flujo másico = 1.499[kg/h]

La correa transportadora escogida es de 14" de ancho con rodillos desiguales inclinados en 20°.

Potencia del motor

Viene dada por la ec.

$$P = 0,17 \cdot \frac{H}{10} + 0,22 \cdot \frac{L}{100} + 1$$

En donde,

P : Potencia al motor eléctrico (HP)

H : Altura (pie)

L : Longitud de la correa

$$H = 2[m] = 6,56[pie]$$

$$L = 20[m] = 65,6[pie]$$

Remplazando los valores en la ecuación: $P = 0,17 \cdot \frac{6,56}{10} + 0,22 \cdot \frac{20}{100} + 1 = 1,156[HP]$

Tomando una eficiencia del 85%

$$P_m = \frac{1,156}{0,85} = 1,36 \approx 1,5[HP]$$

Tabla 10.8: Hoja de especificaciones correa transportadora C-1

Número requerido	1
Altura de elevación	3[m]
Ancho de cinta	35[cm]
Largo de correa	20[m]
Área transversal de carga	0.01[m ²]
Potencia motor eléctrico	1,5[HP]
Motor eléctrico	220-380[volts]. 50Hz, para servicio en planta

10.13 Correa transportadora de nitrato de calcio (C-2)

Función: Transportar el nitrato de calcio que sale del escamador hasta el molino.

Flujo másico = 3.349[kg/h]

La correa transportadora escogida es de 14" de ancho con rodillos desiguales inclinados en 20°.

Potencia del motor

Para el cálculo de la potencia del motor se puede tomar como referencia la tabla 7-7 del Perry, 6º edición

$$P = 0,17 \cdot \frac{H}{10} + 0,22 \cdot \frac{L}{100} + 1$$

En donde,

P : Potencia al motor eléctrico (HP)

H : Altura (pie)

L : Longitud de la correa

$$H = 1,8[m] = 6[pie]$$

$$L = 3[m] = 10[pie]$$

Reemplazando los valores en la ecuación: $P = 0,17 \cdot \frac{6}{10} + 0,22 \cdot \frac{10}{100} + 1 = 1,124[HP]$

Tomando una eficiencia del 85%

$$P_m = \frac{1,124}{0,85} = 1,32[HP] \approx 1,5[HP] = 1,12[kW]$$

Tabla 10.9: Hoja de especificaciones correa transportadora C-2

Número requerido	1
Altura de elevación	1,8[m]
Ancho de cinta	35[cm]
Largo de correa	3[m]
Área transversal de carga	0,01[m ²]
Potencia motor eléctrico	1,5[HP]
Motor eléctrico	220-380[volts]. 50Hz, para servicio en planta

10.14 Correa transportadora de nitrato de calcio (C-3)

Función: Transportar el nitrato de calcio que sale del molino hasta los sacos de recepción del producto.

Flujo másico = 3.349[kg/h]

La correa transportadora escogida es de 14" de ancho con rodillos desiguales inclinados en 20°.

Potencia del motor

Para el cálculo de la potencia del motor se puede tomar como referencia la tabla 7-7 del Perry, 6^o edición

$$P = 0,17 \cdot \frac{H}{10} + 0,22 \cdot \frac{L}{100} + 1$$

En donde,

P : Potencia al motor eléctrico (HP)

H : Altura (pie)

L : Longitud de la correa

$$H = 1,8[m] = 6[pie]$$

$$L = 3[m] = 10[pie]$$

Remplazando los valores en la ecuación: $P = 0,17 \cdot \frac{6}{10} + 0,22 \cdot \frac{10}{100} + 1 = 1,124[HP]$

Tomando una eficiencia del 85%

$$P_m = \frac{1,124}{0,85} = 1,32[HP] \approx 1,5[HP] = 1,12[kW]$$

Tabla 10.10: Hoja de especificaciones correa transportadora C-3

Número requerido	1
Altura de elevación	1.8[m]
Ancho de cinta	35[cm]
Largo de correa	3[m]
Área transversal de carga	0.01[m ²]
Potencia motor eléctrico	1.5[HP]
Motor eléctrico	220-380[volts]. 50Hz, para servicio en planta

10.15 Planta Ensacadora

Masa a ensacar: $3.349[kg/h] = 3,349[ton/h]$

Tamaño de los sacos: 25[kg]

Nº de sacos necesarios por hora: 134

11 Costos

11.1 Capital Total de Inversión

El capital total de inversión corresponde a todas las inversiones necesarias para dejar a la planta en condiciones óptimas para la operación.

El capital total de inversión se compone de capital fijo y el capital de trabajo.

11.1.1 Capital fijo:

El capital fijo incluye todos los gastos necesarios para dejar instalada la planta. Dentro de estos gastos se encuentran la adquisición de equipos, cañerías, instrumentos, fundaciones, estructuras, montaje, preparación del terreno, ingeniería, gastos de administración, etc.

➤ **Costos de equipos de proceso**

Tabla 11.1: Costo de inversión de los equipos de procesos

Equipo	Costo FOB (US\$)
Estanque de almacenamiento de ácido nítrico (E-1)	100.000
Estanque de almacenamiento de ácido nítrico (E-2)	100.000
Reactor CSTR (R-1)	19.106
Evaporador (E-1)	95.745
Filtro prensa (F-1)	90.000
Enfriador rotatorio (ER-1)	105.000
Molino (M-1)	95.745
Tolva y tornillo alimentador de carbonato de calcio (TA-1)	43.227
Bomba BD-1	6.679
Bomba a BC-2	6.736
Bomba filtro prensa (BD-3)	6.442
Bomba BD-4	6.442
Correa transportadora de carbonato de calcio C-1	17.121
Correa transportadora de nitrato de calcio C-2	16.383
Correa transportadora de nitrato de calcio C-3	16.383
Planta ensacadora (PE)	148.936
Bodegas y talleres	127.660
Total	1.001.655

Costo de equipos de proceso
1.001.655 [US\$]

➤ **Costo de equipos instalados**

El costo de los equipos instalados corresponde a un 40% del costo total de los equipos e incluye todos los gastos necesarios para dejarlos en condiciones de operación.

$$\begin{aligned} &\text{Costo de equipos instalados:} \\ &1.001.655 \cdot 1,4 = 1.402.317[\text{US\$}] \end{aligned}$$

➤ **Instrumentación y control**

Corresponde al 35% del costo de equipos instalados en planta.

$$\begin{aligned} &\text{Costo de instrumentación y control} \\ &1.402.317 \cdot 0,35 = 490.811[\text{US\$}] \end{aligned}$$

➤ **Cañerías de proceso**

Los costos de las cañerías de proceso corresponden a un 31% del costo total de los equipos instalados.

$$\begin{aligned} &\text{Costos cañerías de proceso:} \\ &1.402.317 \cdot 0,31 = 434.718[\text{US\$}] \end{aligned}$$

➤ **Instalación eléctrica**

Corresponde a un 12.5% del costo de los equipos de planta.

$$\begin{aligned} &\text{Costo instalación eléctrica} \\ &1.001.655 \cdot 0,125 = 125.207[\text{US\$}] \end{aligned}$$

➤ **Pintura y terminaciones**

Corresponde a un 2% del costo de equipos instalados

$$\begin{aligned} &\text{Costo pintura y terminaciones:} \\ &1.402.317 \cdot 0,02 = 28.046[\text{US\$}] \end{aligned}$$

➤ **Servicios de planta**

Para plantas de proceso continuo y de no gran tamaño, es recomendable usar como costo el 30% del costo de compra de los equipos.

$$\begin{aligned} &\text{Costo de servicios planta} \\ &1.001.655 \cdot 0,3 = 300.497[\text{US\$}] \end{aligned}$$

➤ **Terreno**

Como la planta se anexará a la planta ya existente en Enaex S.A, el costo del terreno es cero.

Preparación del terreno

Se incluye la nivelación, estabilización del terreno y reacondicionamiento de espacios.

Se cotiza en 17[US\$/m²]

$$\text{Costo preparación del terreno} \\ 2.500 \cdot 17 = 42.500[\text{US\$}]$$

Tabla 11.2: Resumen costo del capital fijo directo

Ítem	Costo [US\$]
Equipos instalados	1402317
Instrumentación y control	490811
Cañerías de proceso	434718
Instalación eléctrica	125207
Pintura y terminaciones	28046
Servicios planta	300497
Terreno	0
Preparación del terreno	42500
Total	2824096

Total Capital Fijo Directo

$$= 2.824.096[\text{US\$}]$$

11.2 Capital Fijo Indirecto

➤ Ingeniería y supervisión

Corresponde a un 15% del costo total de compra de los equipos, se incluyen los gastos de oficina, licencias de softweares, viajes y viáticos, comunicaciones, consultorías, etc.

Costo ingeniería y supervisión

$$1.001.655 \cdot 0,15 = 150.248[US\$]$$

➤ Gastos de construcción

Para plantas químicas corresponde a un 10% del costo directo de la planta (capital fijo directo)

Gastos de construcción

$$2.824.096 \cdot 0,1 = 282.410[US\$]$$

➤ Honorarios del contratista

Corresponde a un 5% del capital fijo directo de la inversión

Honorarios contratista

$$2.824.096 \cdot 0,05 = 141.205[US\$]$$

➤ **Gastos legales**

Corresponden a un 2% de la inversión en capital fijo

$$\text{Gastos legales: } 2.824.096 \cdot 0,02 = 56.482[\text{US\$}]$$

➤ **Contingencias**

Se estiman en un 15% de los costos fijos totales de la planta

Tabla 11.3: Resumen costo del capital fijo indirecto

Ítem	Costo [US\$]
Ingeniería y supervisión	150.248
Gastos de construcción	282.410
Honorarios contratista	141.205
Gastos legales	56.482
Contingencias	609.607
Total capital fijo indirecto	1.239.952

11.3 Costos Fijos Totales

Corresponden a la suma de costos fijos directos e indirectos

$$CF = 2.824.096 + 1.239.952 = 4.064.048[\text{US\$}]$$

11.4 Costo Total del Producto

Corresponden a los gastos y desembolsos que son necesarios una vez comenzada la operación de la planta. Estos gastos son tomados desde el comienzo de elaboración del producto hasta la puesta de este en el mercado.

El costo total del producto se subdivide en:

- Costo de producción
- Gasto generales de empresa

11.4.1 Costo de Producción

Corresponde a los gastos realizados en la producción y operación de la planta. Estos costos se subdividen en:

- Costos directos de producción o costos variables
- Costos indirectos de producción o costos fijos
- Costos generales de planta

➤ Costos Directos de Producción o Costos Variables

Los costos de producción incluyen los gastos relacionados con la de operación de la planta.

Entre dichos costos se encuentran gastos en materias primas, personal de planta, supervisión, servicios generales, mantenimiento y reparación, suministros de operación, gastos de laboratorio, patentes y royalties.

1. Materias Primas

La cantidad de materias primas requeridas se obtuvo del balance de masa. El costo de las materias primas incluye transporte y descarga.

Tabla 11.4: Costo de materias primas

Materia prima	Cantidad cargada (ton)	Costo (US\$/ton)	Costo (US\$/tonN.C)
Carbonato de calcio	0.44	200	88
Ácido nítrico	0.534	250	133.5

2. Personal de Planta

Tabla 11.5: Costo del personal de planta (20000[ton/año])

Posición	Costo mensual empresa [US\$]	Cantidad	Costo total anual [US\$]
Ingeniero de procesos	4.646	1	55.752
Jefe de planta	5.240	1	62.880
Operario	2.606	9	281.448
Técnico electromecánico	2.767	1	33.204
Total			433.284

Costo personal de planta

433.284[US\$ / año]

3. Servicios Generales

➤ Energía Eléctrica

Potencia consumida por equipo: $E = P \cdot t$

En donde.

E : Energía

P : Potencia

t : Tiempo

Se tiene,

- Potencia motor del reactor R-1: 1,34[kW]
- Potencia motor enfriador rotatorio ER-1: 3[kW]

- Potencia motor del molino: 13,42[kW]
- Potencia motor ventilador de torre de enfriamiento: 0,75[kW]
- Potencia motos del tornillo alimentador de nitrato de calcio: 0,75[Kw]
- Potencia de la bomba dosificadora BD-1:0,25[kW]
- Potencia de la bomba BC-2: 0,55[kW]
- Potencia de la correa transportadora: C-1: 1,12[kW]
- Potencia de la correa transportadora: C-2: 1,12[kW]
- Potencia de la correa transportadora: C-2: 1,12[kW]
- Potencia estimada de planta ensacadora: 3,73[kW]

Sumando las potencias de todos los equipos de la planta se obtiene:

$$P = 27,15[kW]$$

Tomando un factor de seguridad de un 35% (compensación por perdidas de línea, alumbrado, calefacción, etc).

$$P_T = 27,15 \cdot 1,35 = 36,7[kW]$$

Tiempo máximo de equipos encendidos: 1980[h/año]

Energía requerida: $36,7kW \cdot 1.980h = 72.666[kWh] = 72,666[MWh/año]$

Energía requerida por tonelada de N.C producido:

$$72,666 \frac{MWh}{año} \cdot \frac{1año}{6.667tonN.C} = 0,0109[MWh/tonN.C]$$

Precio de energía en Mejillones: 225[US\$/MWh]

<p>Costo energético</p> $0,0109 \frac{MWh}{tonN.C} \cdot 225 \frac{US\$}{MWh} = 2,45[US\$/tonN.C]$
--

➤ **Agua**

Se requieren de 1[m³] de agua por tonelada de nitrato de calcio producido.

$$\text{Agua requerida: } 1 \left[\frac{m^3}{\text{ton}_{N.C}} \right] \cdot 6.667 \left[\frac{\text{ton}_{N.C}}{\text{año}} \right] = 6.667 [m^3 / \text{año}]$$

Costo agua: 0,03[US\$/m³]

Costo de agua

$$0,03 \frac{US\$}{m^3} \cdot 1 \frac{m^3}{\text{ton}_{N.C}} = 0,03 [US\$ / \text{ton}_{N.C}]$$

➤ **Vapor**

Se requieren 0,674[ton/h] de vapor

Costo del vapor: 74,3[US\$/ton]

Vapor utilizado: 1.335[ton/año]

$$\text{Cantidad de vapor por producción: } 1.335 \frac{\text{ton}_{\text{vapor}}}{\text{año}} \cdot \frac{1 \text{año}}{6.667 \text{ton}_{N.C}} = 0,2 \left[\frac{\text{ton}_{\text{vapor}}}{\text{ton}_{N.C}} \right]$$

Costo del vapor por producción

$$0,2 \frac{\text{ton}_{\text{vap}}}{\text{ton}_{N.C}} \cdot 74,3 \frac{US\$}{\text{ton}_{\text{vap}}} = 14,86 [US\$ / \text{ton}_{N.C}]$$

➤ **Disposición de RISEs**

El costo de disposición corresponde a: $0,227 \frac{UF}{ton}$

Precio UF: 22.000\$

Precio US\$: \$470

Masa de RISEs a disponer = 238[ton/año]

RIS generado: $0,0357 \left[\frac{tonRIS}{tonN.C} \right]$

Costo de disposición:

$$0,0357 \frac{tonRIS}{tonN.C} \cdot 10,63 \frac{US\$}{tonRIS} = 0,38 [US\$ / tonN.C]$$

4. Mantenimiento y reparación

El costo de este ítem corresponde a un 3,5% del costo físico de la planta. Dicho valor se debe a que en la planta no se presentan equipos de alto costo ni extremadamente delicados.

Mantenimiento y reparación:

$$4.064.048 \cdot 0,035 = 142.242 [US\$ / año]$$

5. Suministros de operación

En las operaciones de producción generalmente es necesario el uso de variados suministros, tales como lubricantes y solventes, set de análisis químicos, catalizadores, etc.

El costo de dichos suministros corresponde a un 15% del costo total de mantenimiento y reparación.

Costos de suministros de operación: $142.242 \cdot 0,15 = 21.336$ [US\$/ año]

6. Gastos de laboratorio

Es necesario cargar al costo directo de producción los gastos de laboratorio relacionados con la operación y el control de calidad del producto.

Se realizarán diversos análisis al producto de tal manera de verificar periódicamente la calidad del producto obtenido. De una misma manera es necesario realizar análisis al residuo generado en la etapa de operación, esto con el fin de garantizar a la autoridad ambiental la no peligrosidad del residuo generado.

Los gastos de laboratorio corresponden al 15% del gasto de mano de obra

<p>Gastos de Laboratorio</p> $433.284 \cdot 0,15 = 64.993$ [US\$/ año]
--

➤ Costos Indirectos de Producción

Corresponden a todos los gastos presentes en la planta, independientemente de que se encuentre en funcionamiento.

Dentro de los costos indirectos de producción se encuentran la depreciación, contribuciones e impuestos, seguros, arriendos, intereses por financiamiento, etc.

1. Seguros

Las instalaciones como equipos y edificaciones deben ser aseguradas contra incendios, accidentes, terremotos, tsunamis u otros siniestros que puedan provocar pérdidas en la planta.

Debido a que se trabaja con productos inflamables y peligrosos se estiman los seguros en un 1% del bien asegurado.

Se aseguran todos los equipos de la planta.

$$\begin{array}{c} \text{Gastos en seguros:} \\ 1.001.655 \cdot 0,01 = 10.017[\text{US\$ / año}] \end{array}$$

➤ **Gastos Generales de Planta**

Este ítem incluye todos los gastos de la planta, excluyendo a la operación, necesarios para llevar el producto al mercado. Se incluyen gastos generales de administración, gastos de distribución y ventas, y gastos de investigación y desarrollo.

1. Gastos de administración y ventas

Incluyen gastos generales de la oficina central, entre los que se encuentran sueldos de ejecutivos y personal administrativo, servicios de ingeniería y legales, gastos de oficina, gastos comunicacionales, viajes, transporte, etc.

El costo de este ítem en Enaex corresponde a un 6% de las ventas.

$$\begin{array}{c} \text{Gastos de administración:} \\ 9.198.000 \cdot 0,06 = 551.880[\text{US\$}] \end{array}$$

Resumiendo, el costo total del producto (20000[ton/año]):

Tabla 11.6: Costo Total del Producto

Ítem	Costo[US\$/año]
Ácido nítrico	2.817.542
Carbonato de calcio	1.853.814
Vapor	312.060
Electricidad	51.503
Agua de proceso	630
Disposición de RISEs	7.969
Administración y ventas	551.880
Mano de obra	433.284
Mantenimiento	142.242
Gastos en análisis de muestras	64.993
Suministros de operación	21.336
Seguros	10.017
Total	6.267.270

11.5 Depreciación

Se considera una depreciación lineal y una vida útil del proyecto de 10 años, en donde la depreciación viene dada por:

$$DEP = \frac{M_d}{n}$$

En donde,

DEP: Depreciación en cada año.

M_d : Monto depreciable.

n : Número de años que dura el proyecto.

Monto depreciable:

Ítem	Monto[US\$]
Costo de equipos	1001655
Instrumentación y control	490811
Cañerías de proceso	434718
Instalación eléctrica	125207
Total	2052391

$$DEP = \frac{2.052.391}{10} = 205.239[US\$/año]$$

12 Evaluación Económica

12.1 Análisis Preliminar de la Inversión

12.1.1 Introducción

Enaex, como productor de ácido nítrico, está analizando la posibilidad de producir nitrato de calcio fertilizante, cuya materia prima principal es el ácido nítrico.

El proceso requiere de ácido nítrico (producido por Enaex), carbonato de calcio y agua (que se encuentra presente en el ácido nítrico en un 40%) como materias primas.

A nivel nacional Enaex posee una que puede producir nitrato de calcio, ya que el alto costo del ácido nítrico haría imposible la factibilidad económica de la planta para un tercero.

12.1.2 Objetivos de la Evaluación Económica

➤ General:

Evaluar la factibilidad técnica-económica de fabricación de Nitrato de calcio en el complejo Prillex América de Mejillones

➤ Objetivos específicos:

- Desarrollar una estimación +/- 20% del proyecto Fabricación de N.C en el Complejo Prillex América
- Cálculo TIR del proyecto
- Cálculo VAN del proyecto

12.1.3 Antecedentes de la Evaluación Económica

Demanda nacional: 13000[ton/año]

Capacidad de planta: 20000[ton/año]

Funcionamiento: Se pretende funcionar en tres turnos de 8 horas. En el comienzo operativo de la planta se pretende funcionar solo con un turno, ya que el volumen de producción por turno abarca la mitad del consumo de nitrato de calcio en Chile. Posteriormente se pretende ir aumentando los turnos de producción, esto en vista de que se pretende exportar el nitrato de calcio a otros países de Latinoamérica como Perú o Argentina.

12.1.4 Ubicación

La planta productora de ácido nítrico se ubicará en el complejo Prillex América de Enaex (Mejillones), específicamente en Panna 1.

12.2 Visión General del Proceso

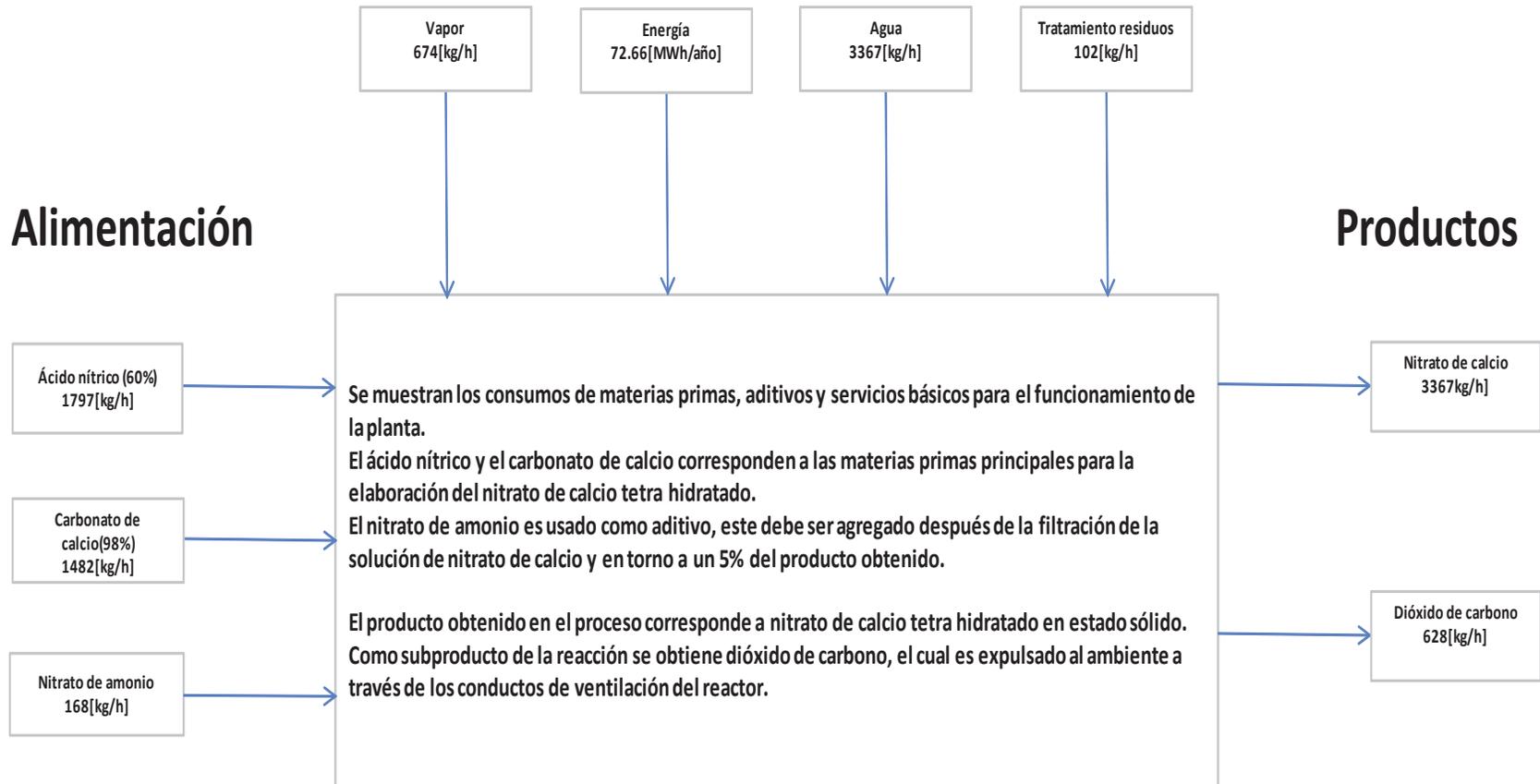


Figura 11.1. Visión General del Proceso

12.2.1 Resumen de la Inversión

➤ Costos de implementación del proceso

Tabla 12.1: Costos de equipamiento del proceso

Equipo	Costo
Estanque de almacenamiento de ácido nítrico (E-1)	100.000
Estanque de almacenamiento de ácido nítrico (E-2)	100.000
Reactor SCRT (R-1)	19.106
Evaporador (E-1)	95.745
Filtro prensa (F-1)	90.000
Enfriador rotatorio (ER-1)	105.000
Torre de enfriamiento	63.831
Molino (M-1)	95.745
Tolva y tornillo alimentador de carbonato	22.000
Bomba BD-1	6.679
Bomba BC-2	6.736
Bomba filtro prensa (BD-3)	6.442
Bomba BD-4	6.442
Correa transportadora carbonato de calcio (C-1)	17.121
Correa transportadora de nitrato de calcio (C-2)	16.383
Correa transportadora de nitrato de calcio (C-3)	16.383
Planta ensacadora	127.659
Bodegas y talleres	106.383
Total	1.001.655

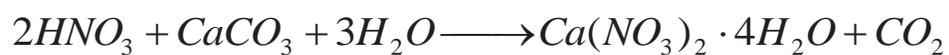
Tabla 12.2: Costos de implementación del proceso

Capital fijo directo		
Costos de equipos	US\$	1.001.655
Costos de equipos instalados	US\$	1.402.317
Instrumentación y control	US\$	490.811
Cañerías de proceso	US\$	434.718
Instalación eléctrica	US\$	125.207
Pintura y terminaciones	US\$	28.046
Servicios planta	US\$	300.497
Terreno	US\$	-
Preparación del terreno	US\$	42.553
Total capital fijo directo	US\$	2.824.149
Capital fijo indirecto		
Ingeniería y supervisión	US\$	150.248
Gastos de construcción	US\$	282.415
Honorarios contratista	US\$	141.207
Gastos legales	US\$	56.483
Contingencias	US\$	609.618
Total capital fijo indirecto	US\$	1.239.972
Total	US\$	4.064.121

La tabla 12.2 muestra que el costo de implementar el proceso en la Planta Prillex América de Enaex, ubicada en Mejillones corresponde a US\$ 4.064.121

- Costos involucrados en el proceso

Reacción de proceso



Base de cálculo: 1000[kg]

Tabla 12.3: Cálculo de reactivos para producir 1[ton] de nitrato de calcio.

REACTIVOS			
Compuesto Químico	PM(kg/kgmol)	Moles(kgmol)	Masa(kg)
HNO ₃	63	8,5	533,9
CaCO ₃	100	4,2	423,7
H ₂ O	18	12,7	228,3
PRODUCTOS			
Compuesto Químico	PM(kg/kgmol)	Moles(kgmol)	Masa(kg)
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	236	4,2	1.000
CO ₂	44	4,2	186,4
H ₂ O (exceso)	18	8,8	157,8

Tabla 12.4: Costo en materias primas y aditivos para producir 1 ton de producto

COSTOS MATERIAS PRIMAS			
	ton	US\$ / ton	US\$ / ton $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Acido Nítrico (100%)	0,534	\$ 251,30	\$ 134
Carbonato de Calcio	0,441	\$ 200,00	\$ 88
Nitrato de amonio	0,050	\$ 468,60	\$ 23
Total		\$	246

La tabla 12.4 muestra el costo por cada tonelada de nitrato de calcio producido, en donde el ácido nítrico resulta ser la materia prima de mayor costo, dado que se usa en mayor cantidad y el costo por tonelada es mayor que el del carbonato de calcio.

Se observa que el costo por tonelada de producto del aditivo usado para disminuir la higroscopicidad del nitrato de calcio (nitrato de amonio) es el más elevado, pero dado su bajo volumen de aplicación (5%) no es influyente en gran medida con respecto al ácido nítrico y el carbonato de calcio.

12.2.2 Flowsheet del Proceso

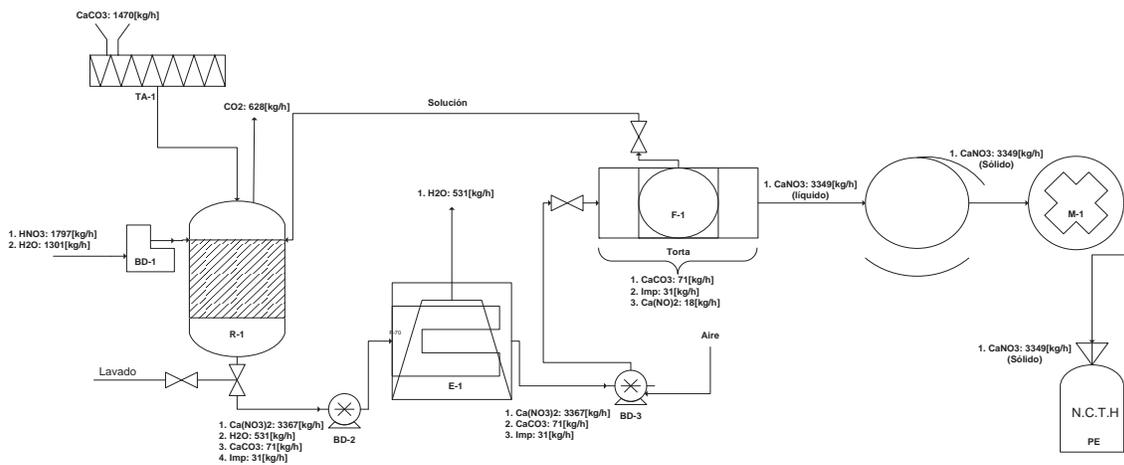


Figura 12.2. Flowsheet del Proceso

12.3 Análisis para el precio de venta del nitrato de calcio

12.3.1 Precios de importación

Tabla 12.5: Precios de importación y venta del nitrato de calcio y amoniaco

PRECIOS DE IMPORTACION Y VENTA										Promedio
	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	
TM	7.300	8.800	10.400	10.100	10.700	8.500	7.200	13.500		
PRECIO AMONIACO (CFR TAMPA)	222	278	311	319	331	594	272	406	540	364
PRECIO N CALCIO (CIF Chile)	263	298	353	333	283	532	404	376	415	362
Desconsolidación	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
Flete a predio	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Costo Financiero (60 días_0.8%)	5	6	7	6	6	10	8	7	8	7
Costo Internado en Predio	333	369	424	404	353	607	476	448	488	433
Flete de Mejillones a Predio	(50)	(50)	(50)	(50)	(50)	(50)	(50)	(50)	(50)	(50)
PRECIO FOB MEJILLONES	283	319	374	354	303	557	426	398	438	383

La tabla 12.5 muestra el precio CIF promedio del nitrato de calcio importado a Chile desde el año 2003 al año 2011.

La función principal de esta tabla es ser una guía con respecto a el costo que les significa a los comercializadores de fertilizantes obtener el nitrato de calcio desde las comercializadoras que importan el fertilizante, para luego compararlo con la tabla 13.6 que representa el costo que les significaría a los comercializadores de fertilizantes obtener el nitrato de calcio producido por Enaex S.A.

12.3.2 Costos de fabricación

Año base: 2011

La tabla 12.6 muestra el costo para Enaex de fabricación del nitrato de calcio. Con dicho costo se obtendrá una comparación entre el costo de tener nitrato de calcio importado y el costo de tener nitrato de calcio fabricado por Enaex S.A.

Tabla 12.6: Costo de producción

Costos de producción (por ton de N.C)	
Materias primas	
Ácido nítrico	134,2
carbonato de calcio	88,3
Total	222,4
Utilities	
Vapor	14,9
Electricidad	2,5
Agua	0,03
DisposicionRISes	0,4
Total utilities	17,7
Depreciación	5,9
Costos fijos	56,0
Costo total	302

Tabla 12.7 Precio FOB nitrato de calcio en Planta Prillex de Enaex

Ítem	Costo[US\$]
Precio Nitrato de Calcio	415
Desconsolidación	35
Flete a Predio	30
Costo Financiero (60 días_0,8%)	8
Costo Internado a Predio	488
Flete de Mejillones a Predio	-50
Precio FOB Mejillones	438

La tabla 12.7 muestra el precio CIF promedio del nitrato de calcio importado a Chile el año 2011.

La función principal de esta tabla es ser una guía con respecto al costo que les significa a los comercializadores de fertilizantes obtener el nitrato de calcio importado y fijar un precio de venta similar.

12.3.3 Preponderancia en los costos de producción:

En el gráfico 12.1 se muestra el porcentaje de incidencia de cada ítem en los costos de producción:

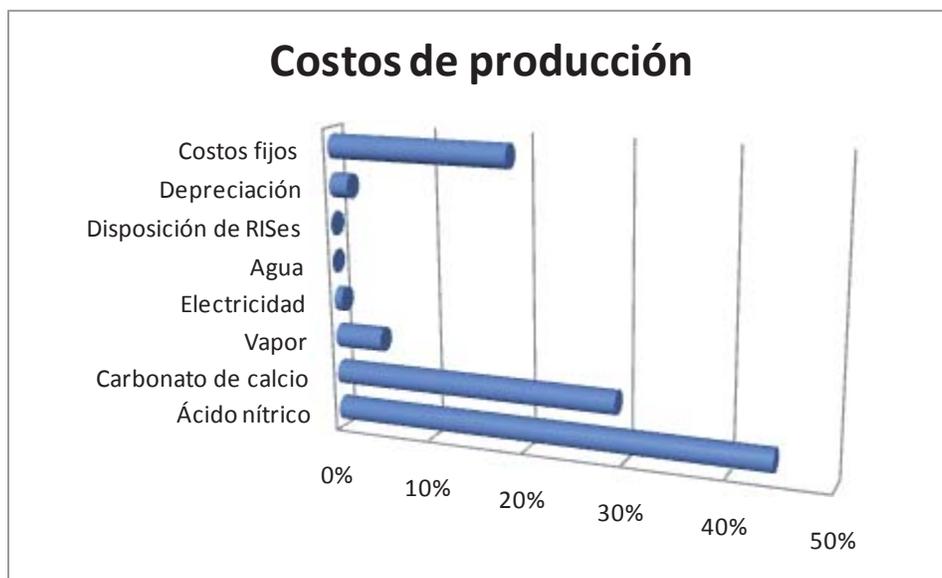


Gráfico 12.1: Costos de producción

Tabla 12.8: Costos de producción

Ácido nítrico	44%
Carbonato de calcio	29%
Vapor	5%
Electricidad	1%
Agua	0,01%
Disposición de RISes	0,126%
Depreciación	2%
Costos fijos	19%
Total	100%

Tomando en cuenta los porcentajes mostrados en la tabla 12.8 se realiza un polinomio de costos representados en la siguiente ecuación:

$$CT = C_{ac} \cdot 0.543 + C_c \cdot 0.441 + C_{n.a} \cdot 0.05 + C_{ut} + DEP + CF$$

En donde,

CT : Costo total de producción de nitrato de calcio.

C_{ac} : Costo del ácido nítrico.

C_c : Costo carbonato de calcio.

$C_{n.a}$: Costo nitrato de amonio.

C_{ut} : Costo utilities.

DEP : Depreciación.

CF : Costos fijos.

Remplazando los valores en la ecuación de costos de fabricación se obtiene:

$$CT = 251.3 \cdot 0.543 + 200 \cdot 0.441 + 17.7 + 5.9 + 54.7 = 302[\text{US\$} / \text{tonN.C}]$$

12.4 Análisis al precio de venta del nitrato de calcio Incorporando aditivo al nitrato de calcio

El nitrato de calcio tetra hidratado presenta una alta hidrogrospicidad, lo cual implica que cuando se encuentra almacenado a temperatura ambiente comienza a licuarse. Debido a esto el bodegaje de este fertilizante se torna dificultoso.

Una forma de disminuir el punto de fusión es agregar alrededor de un 5% de aditivo (nitrato de amonio al producto)²⁴. Este debe ser agregado después de haber evaporado el

²⁴ Método desarrollado por las química alemana BASF

agua en exceso y cuando la solución de nitrato de calcio se encuentre fundida, esto con el fin de asegurar una mezcla homogénea entre el nitrato de amonio y el nitrato de calcio.

Cabe señalar que la presente investigación tiene como objeto definir parámetros tanto técnicos como económicos de la producción de nitrato de calcio tetra hidratado y no cuenta con el análisis técnico detallado de la aplicación de aditivos para la mejora de la calidad del producto, pero asimismo es de importancia tener en cuenta las implicancias económicas que pueda tener la aplicación de este aditivo al proceso.

Por las razones mencionadas anteriormente se analizaron las implicancias económicas de adicionar nitrato de amonio al proceso, teniendo en cuenta además que el principal producto fabricado por Enaex S.A es el nitrato de amonio, razones que implican una ventaja considerable.

12.4.1 Costos de fabricación

La tabla 12.9 muestra el costo para Enaex de fabricación del nitrato de calcio agregando aditivo para disminuir el punto de fusión. Con dicho costo se obtendrá una comparación entre el costo de tener nitrato de calcio importado y el costo de tener nitrato de calcio fabricado por Enaex S.A.

Año base: 2011

Tabla 12.9: Costo de fabricación de nitrato de calcio incorporando aditivo.

Costos de producción (por ton de N.C)	
Materias primas	
Ácido nítrico	134,2
carbonato de calcio	88,3
Nitrato de amonio	23,4
Total	245,9
Utilities	
Vapor	14,9
Electricidad	2,5
Agua	0,03
Disposicion de RISEs	0,4
Total utilities	17,7
Depreciación	5,9
Costos fijos	56,0
Costo total	325

Preponderancia en los costos de producción:

En el gráfico 12.2 se muestra el porcentaje de incidencia de cada ítem en los costos de producción:

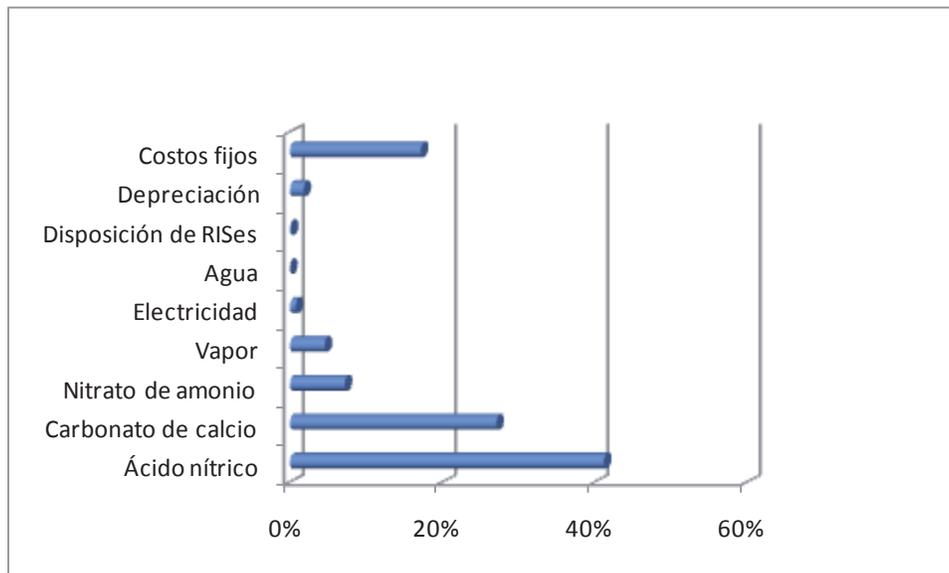


Gráfico 12.2: Costos de producción incorporando aditivo al proceso

Tabla 12.10: Costos de producción incorporando aditivo al proceso

Ácido nítrico	41%
Carbonato de calcio	27%
Nitrato de amonio	7%
Vapor	5%
Electricidad	1%
Agua	0,01%
Disposición de RISEs	0,117%
Depreciación	2%
Costos fijos	17%
Total	100%

Tomando en cuenta los porcentajes mostrados en la tabla 11.10 se realiza un polinomio de costos representados en la siguiente ecuación

$$CT = C_{ac} \cdot 0.543 + C_c \cdot 0.441 + C_{n.a} \cdot 0.05 + C_{ut} + DEP + CF$$

En donde,

CT : Costo total de producción de nitrato de calcio.

C_{ac} : Costo del ácido nítrico.

C_c : Costo carbonato de calcio.

$C_{n.a}$: Costo nitrato de amonio.

C_{ut} : Costo utilities.

DEP : Depreciación.

CF : Costos fijos.

Remplazando los valores en la ecuación de costos de fabricación se obtiene:

$$CT = 251.3 \cdot 0.534 + 200 \cdot 0.441 + 468.6 \cdot 0.05 + 17.7 + 5.9 + 54.7 = 325[\text{US}\$/\text{tonN.C}]$$

12.5 Relevancia del Amoniaco

Un parámetro de importancia notable es el precio de importación del amoniaco, el cual a mediados del 2011 correspondía a 540[US\$/ton], dicho valor incide directamente en el costo de fabricación del ácido nítrico (materia prima principal para la fabricación de nitrato de calcio) y el nitrato de amonio (aditivo).

Para el costo de fabricación del nitrato de calcio calculado en la ecuación anterior se tomaron valores del amoniaco correspondientes al año 2011.

En el año 2011 los precios de importación del amoniaco han resultado ser extremadamente altos, razón por la cual el costo de fabricación del ácido nítrico resulta ser mayor de lo habitual.

En el gráfico 12.3 se muestra la relación que tiene el precio del amoniaco con el costo del nitrato de calcio importado y el nitrato de calcio producido en Enaex.

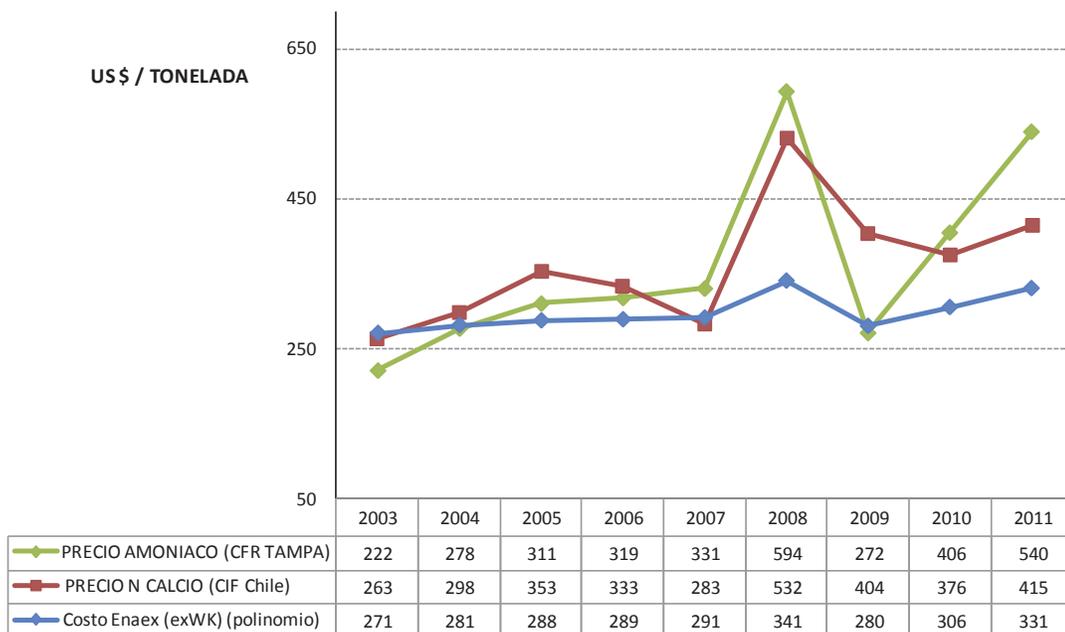


Gráfico 12.3: Relación Amoniaco – Costo Producción

El grafico 12.3 muestra que a medida que aumenta el precio de importación del amoniaco, el costo de fabricación del nitrato de calcio también aumenta, esto se debe a que la materia prima principal de la fabricación del nitrato de calcio es el ácido nítrico, en cuyo valor incide directamente el precio del amoniaco.

12.6 Resumen Anterior al Flujo de Caja

PROYECTO: "PLANTA PRODUCTORA DE NITRATO DE CALCIO EN PLANTA PRILLEX AMÉRICA"

1. OBJETIVOS					
Diseñar y evaluar la factibilidad de instalar una planta de Nitrato de Calcio en la planta Prillex de la empresa Enaex S.A.					
2. TIPO DE PROYECTO					
Producción de un bien de consumo agrícola (fertilizante soluble) para el uso en la fertilización con la técnica de fertirriego					
3. MERCADO O UNIVERSO DEL PROYECTO.					
Producto	Nitrato de calcio tetra hidratado ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) sólido				
Capacidad	20.000 (Ton/Año)				
Horas año Operación	5.940 Horas	Max			
Descripción	Producción de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$				
Cobertura y Destino	Chile, Perú y otros países de Latinoamérica				
Demanda Anual Total	20.000 (Ton/Año)	Max			
Compradores Principales	Empresas distribuidoras de fertilizantes				
Precio de Venta est.	400	(US\$/ton NaCN)			
4. ABASTECIMIENTO Y FUENTES DE MATERIAS PRIMAS E INSUMOS.					
Materias Primas e Insumos	Cantidad necesaria	Precio	Precio (US\$/Ton N.C)	Consumos por año	
Acido nítrico	0,534 (Ton HNO3/Ton N.C)	\$ 251,30 USD/Ton HNO3	\$ 134	18400 ton HNO3/año	
Carbonato de calcio	0,441 (Ton NH3/Ton N.C)	\$ 200,00 USD/Ton CaCO3	\$ 88	8903 ton CaCO3/año	
Vapor	0,2 (Ton vapor/Ton N.C)	74,3 US\$/ton VAP	\$ 14,9		
Electricidad	0,0109 MW-h/ton N.C	225 US\$/KW-Hr	\$ 2,5	218 MW-h	
Agua de Proceso	1 (m3/Ton N.C)	0,03 USD/m3	\$ 0,03	20000 m3/año	
Disposición de RISes	0,036 (tonRIS/tonN.C)	10,63 (US\$/tonRIS)	\$ 0,4		
COSTO TOTAL POR TON DE PRODUCTO				\$ 240	
COSTO TOTAL POR PRODUCIR 20000 TON N.C				\$ 4.803.349	
5. ASPECTOS TECNICOS DEL PROYECTO.					
Localización	Mejillones, Antofagasta				
Distancia a los Consumidores	III y IV Regiones. (650-995[km] aprox).				
Capacidad Instalada	20000 (Ton/Año)				
Capacidad de operación	1,2,3,4:33.3% ; 5,6:66,7% ; 7-20:100%				
Periodo de Operación	20 Años				
Descripción del Proceso	Producción de nitrato de calcio tetra hidratado, usando como reactivos principales ácido nítrico producido por Enaex y carbonato de calcio importado				
6. NECESIDADES DE EQUIPOS, MAQUINARIAS Y OBRAS CIVILES.					
Construcciones					
Equipos					
7. OTRAS NECESIDADES.					
Mano de Obra					
Servicios e infraestructura					
Mantenimiento y calibración de equipos					
Tiempo de Construcción y Ejecución					
8. NOTAS					
Precio dólar usado	470 \$				

12.7 Flujo de caja considerando la adición de nitrato de amonio

EVALUACION ECONOMICA PLANTA DE NITRATO DE CALCIO- ENAEX S.A.

Nº	Ítems	Año														
			Unidad	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1.-	INCOMES															
	Producción (%)	(%)	0%	33%	67%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Producción de N.C	(Ton/año)		6.930	14.070	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000
	Costo de fabricación	(US\$/Ton N.C)		335	335	335	335	335	335	335	335	335	335	335	335	335
	Utilidad	US\$		103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103
	Precio de venta	US\$		438	438	438	438	438	438	438	438	438	438	438	438	438
	Ingresos por ventas	US\$		3.035.340	6.162.660	9.198.000	9.198.000	9.198.000	9.198.000	9.198.000	9.198.000	9.198.000	9.198.000	9.198.000	9.198.000	9.198.000
	Otros ingresos	US\$		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Total ingresos	US\$		3.035.340	6.162.660	9.198.000										
2.-	Costos variables de producción															
2.1.-	Materias primas/Utilities	US\$														
	Amoniaco	US\$/ton		\$ 540,00	\$ 540,00	\$ 540,00	\$ 540,00	\$ 540,00	\$ 540,00	\$ 540,00	\$ 540,00	\$ 540,00	\$ 540,00	\$ 540,00	\$ 540,00	\$ 540,00
	Acido nítrico	US\$		929.789	1.887.753	2.817.542	2.817.542	2.817.542	2.817.542	2.817.542	2.817.542	2.817.542	2.817.542	2.817.542	2.817.542	2.817.542
	Carbonato de calcio	US\$		611.758	1.242.055	1.853.814	1.853.814	1.853.814	1.853.814	1.853.814	1.853.814	1.853.814	1.853.814	1.853.814	1.853.814	1.853.814
		US\$														
	Vapor	US\$		102.980	209.080	312.060	312.060	312.060	312.060	312.060	312.060	312.060	312.060	312.060	312.060	312.060
	Electricidad	US\$		16.996	34.507	51.503	51.503	51.503	51.503	51.503	51.503	51.503	51.503	51.503	51.503	51.503
	Agua de proceso	US\$		208	422	630	630	630	630	630	630	630	630	630	630	630
	Disposición de RIses	US\$		2.630	5.339	7.969	7.969	7.969	7.969	7.969	7.969	7.969	7.969	7.969	7.969	7.969
	Total utilities	US\$		122.813	249.348	372.162	372.162	372.162	372.162	372.162	372.162	372.162	372.162	372.162	372.162	372.162
	Otras energías	US\$		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Otros quimicos:															
	Nitrato de amonio	US\$		162.370	329.660	492.030	492.030	492.030	492.030	492.030	492.030	492.030	492.030	492.030	492.030	492.030
	Kesealwood	US\$		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		US\$														
	Total costos variables			1.826.730	3.708.816	5.535.547										
3.-	Contribución marginal	(US\$/y)		1.208.610	2.453.844	3.662.453										
4.-	Costos fijos															
4.1.-	Administración y ventas	0,06	Ventas	182.120	369.760	551.880	551.880	551.880	551.880	551.880	551.880	551.880	551.880	551.880	551.880	551.880
4.2.-	Mano de obra	US\$		245.652	339.468	433.284	433.284	433.284	433.284	433.284	433.284	433.284	433.284	433.284	433.284	433.284
4.3.-	Mantenimiento	4%	de Inv	142.242	142.242	142.242	142.242	142.242	142.242	142.242	142.242	142.242	142.242	142.242	142.242	142.242
	Suministros de operación	15%	de mant.	21.336	21.336	21.336	21.336	21.336	21.336	21.336	21.336	21.336	21.336	21.336	21.336	21.336
4.4.-	Gasto de laboratorio	15%	de mano de obra	36.848	50.920	64.993	64.993	64.993	64.993	64.993	64.993	64.993	64.993	64.993	64.993	64.993
4.6.-	Seguros	0,01	Costo equipos	10.017	10.017	10.017	10.017	10.017	10.017	10.017	10.017	10.017	10.017	10.017	10.017	10.017
	Total costos fijos			638.215	933.742	1.223.751										
5.-	Costo total anual sin depreciación			2.464.945	4.642.559	6.759.298										
6.-	EBITDA			570.395	1.520.101	2.438.702										
7.-	Depreciación			205.239	205.239	205.239	205.239	205.239	205.239	205.239	205.239	205.239	205.239	205.239	205.239	205.239
8.-	Utilidades antes de impuesto			365.156	1.314.862	2.233.463	2.233.463	2.233.463	2.233.463	2.233.463	2.233.463	2.233.463	2.233.463	2.233.463	2.233.463	2.233.463
9.-	Impuesto	20%		73.031	262.972	446.693	446.693	446.693	446.693	446.693	446.693	446.693	446.693	446.693	446.693	446.693
10.-	Utilidades después de impuesto			292.125	1.051.890	1.786.770	1.786.770	1.786.770	1.786.770	1.786.770	1.786.770	1.786.770	1.786.770	1.786.770	1.786.770	1.786.770
11.-	Depreciación			205.239	205.239	205.239	205.239	205.239	205.239	205.239	205.239	205.239	205.239	205.239	205.239	205.239
12.-	Inversión total			4.064.048												
13.-	Valor de desecho	5%	Inv													
	Flujo de caja			-4.064.048	497.364	1.257.129	1.992.009									
	TIR															33,65%
	VAN															\$ 6.209.880

12.8 Flujo de caja sin la adición de nitrato de amonio

EVALUACION ECONOMICA PLANTA DE NITRATO DE CALCIO- ENAEX S.A.

N°	Ítems	Año												
			Unidad	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.-	INCOMES													
	Producción (%)	(%)	0%	33%	67%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Producción de N.C	(Ton/año)		6.930	14.070	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000
	Costo de fabricación	(US\$/Ton N.C)		335	335	335	335	335	335	335	335	335	335	335
	Utilidad	US\$		103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103
	Precio de venta	US\$		438	438	438	438	438	438	438	438	438	438	438
	Ingresos por ventas	US\$		3.035.340	6.162.660	9.198.000	9.198.000	9.198.000	9.198.000	9.198.000	9.198.000	9.198.000	9.198.000	9.198.000
	Otros ingresos	US\$		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Total ingresos	US\$		3.035.340	6.162.660	9.198.000								
2.-	Costos variables de producción													
2.1.-	Materias primas/Utilities	US\$												
	Amoníaco	US\$/ton		\$ 540,00	\$ 540,00	\$ 540,00	\$ 540,00	\$ 540,00	\$ 540,00	\$ 540,00	\$ 540,00	\$ 540,00	\$ 540,00	\$ 540,00
	Acido nítrico	US\$		929.789	1.887.753	2.817.542	2.817.542	2.817.542	2.817.542	2.817.542	2.817.542	2.817.542	2.817.542	2.817.542
	Carbonato de calcio	US\$		611.758	1.242.055	1.853.814	1.853.814	1.853.814	1.853.814	1.853.814	1.853.814	1.853.814	1.853.814	1.853.814
		US\$												
	Vapor	US\$		102.980	209.080	312.060	312.060	312.060	312.060	312.060	312.060	312.060	312.060	312.060
	Electricidad	US\$		16.996	34.507	51.503	51.503	51.503	51.503	51.503	51.503	51.503	51.503	51.503
	Agua de proceso	US\$		208	422	630	630	630	630	630	630	630	630	630
	Disposición de RISes	US\$		2.630	5.339	7.969	7.969	7.969	7.969	7.969	7.969	7.969	7.969	7.969
	Total utilities	US\$		122.813	249.348	372.162	372.162	372.162	372.162	372.162	372.162	372.162	372.162	372.162
	Otras energías	US\$		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Otros químicos:													
	Nitrato de amonio	US\$		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Kesealwood	US\$		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Total costos variables			1.664.361	3.379.156	5.043.517								
3.-	Contribución marginal	(US\$/y)		1.370.979	2.783.504	4.154.483								
4.-	Costos fijos													
4.1.-	Administración y ventas	0,06	Ventas	182.120	369.760	551.880	551.880	551.880	551.880	551.880	551.880	551.880	551.880	551.880
4.2.-	Mano de obra	US\$		245.652	339.468	433.284	433.284	433.284	433.284	433.284	433.284	433.284	433.284	433.284
4.3.-	Mantenimiento	4%	de Inv	142.242	142.242	142.242	142.242	142.242	142.242	142.242	142.242	142.242	142.242	142.242
	Suministros de operación	15%	de mant.	21.336	21.336	21.336	21.336	21.336	21.336	21.336	21.336	21.336	21.336	21.336
4.4-	Gasto de laboratorio	15%	de mano de obra	36.848	50.920	64.993	64.993	64.993	64.993	64.993	64.993	64.993	64.993	64.993
4.6.-	Seguros	0,01	Costo equipos	10.017	10.017	10.017	10.017	10.017	10.017	10.017	10.017	10.017	10.017	10.017
	Total costos fijos			638.215	933.742	1.223.751								
5.-	Costo total anual sin depreciación			2.302.575	4.312.899	6.267.268								
6.-	EBITDA			732.765	1.849.761	2.930.732								
7.-	Depreciación			205.239	205.239	205.239	205.239	205.239	205.239	205.239	205.239	205.239	205.239	205.239
8.-	Utilidades antes de impuesto			527.526	1.644.522	2.725.493	2.725.493	2.725.493	2.725.493	2.725.493	2.725.493	2.725.493	2.725.493	2.725.493
9.-	Impuesto	20%		105.505	328.904	545.099	545.099	545.099	545.099	545.099	545.099	545.099	545.099	545.099
10.-	Utilidades después de impuesto			422.021	1.315.618	2.180.394	2.180.394	2.180.394	2.180.394	2.180.394	2.180.394	2.180.394	2.180.394	2.180.394
11.-	Depreciación			205.239	205.239	205.239	205.239	205.239	205.239	205.239	205.239	205.239	205.239	205.239
12.-	Inversión total			4.064.048										
13.-	Valor de desecho	5%	Inv											
	Flujo de caja			-4.064.048	627.260	1.520.857	2.385.633							

TIR	39,97%
VAN	\$ 8.281.424

12.9 Análisis de sensibilidad

Debido a que en el análisis económico se encuentran involucradas cantidades futuras, las cuales probablemente pueden presentar algún grado de error y desviaciones que pueden ser sustanciales y eventualmente cambiar la decisión económica.

La finalidad de este análisis de sensibilidad será mostrar los efectos sobre la rentabilidad que tendría una variación o cambio en el valor del precio de venta del producto, y, a la vez, mostrar la holgura con que se cuenta ante eventuales cambios en variables del mercado que puedan interferir el precio de venta del producto.

Es necesario ver cómo se comporta el flujo de caja ante las variaciones del precio de venta, ya que parte del mercado objetivo es internacional, y para lo cual no se cuenta con estudios previos que demuestren objetivamente el posible precio de venta ante las fluctuaciones en el mercado.

12.9.1 Evaluación económica usando nitrato de amonio como reductor de la higroscopicidad del nitrato de calcio.

La variación de la tasa interna de retorno (TIR) y el valor anual neto (VAN) se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 12.11: Variación de la TIR y el VAN con respecto al precio de venta del producto

Precio de venta	TIR %	VAN[US\$]
340	1,22	- 1.934.835
360	8,63	- 272.648
380	16,31	1.389.539
400	22,88	3.051.725
420	28,76	4.713.912
440	34,18	6.376.099
460	39,25	8.038.285
480	44,06	9.700.472
500	48,67	11.362.658

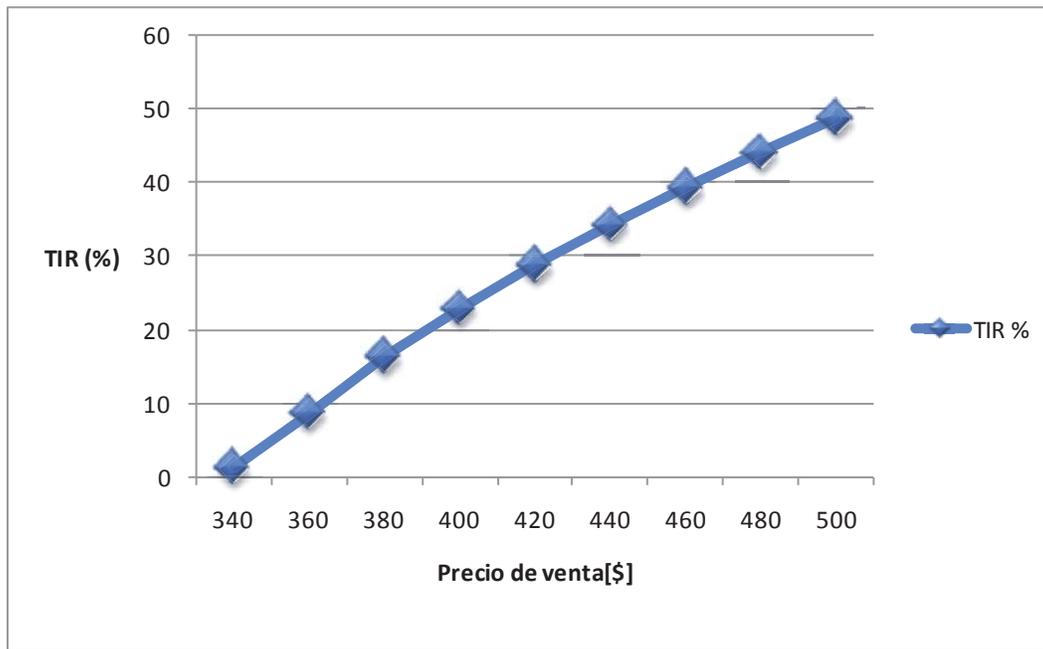


Gráfico 12.4: Variación de la TIR con respecto al precio de venta del producto

El gráfico 12.4 muestra la variación de la Tasa Interna de Retorno con respecto a variaciones del precio de venta del producto. Si bien el proyecto es rentable usando el precio de venta calculado a través del análisis de mercado, también muestra que desde valores tan solo ligeramente mayores, el proyecto se torna altamente atractivo desde el punto de vista económico, llegando a tener rentabilidades cercanas al 50% si el precio de venta aumenta solamente en un 14%.

En caso de tener un precio de venta ligeramente menor al proyectado en el flujo de caja, la evaluación presenta valores negativos económicamente de forma casi inmediata, si el precio de venta disminuye en un 17%, la factibilidad económica se torna poco atractiva, llegando a tener valores de TIR cercanos al 8%.

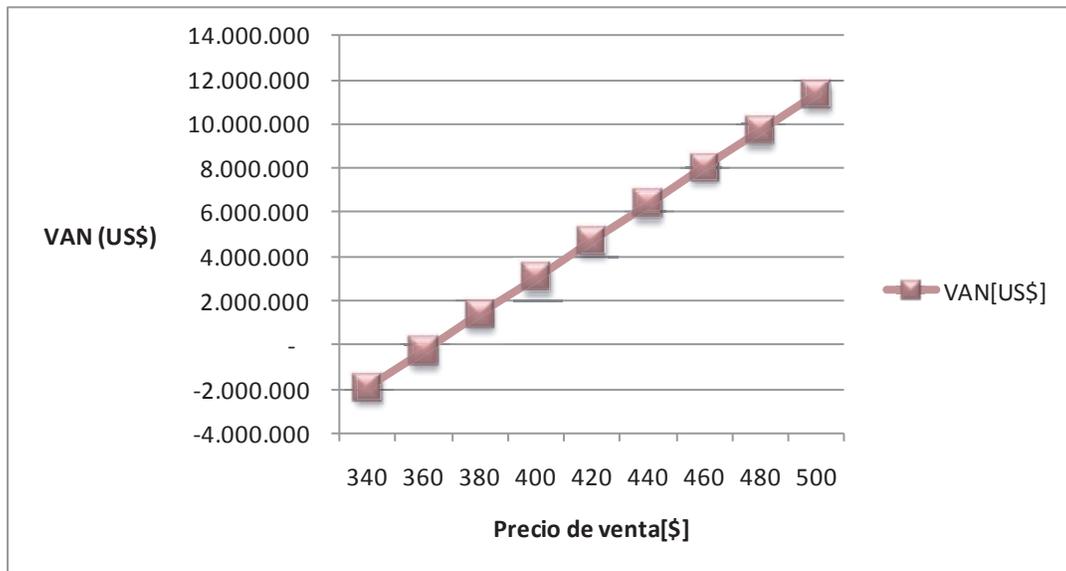


Gráfico 12.5: Variación del VAN con respecto al precio de venta del producto

El gráfico 12.5 muestra los diferentes valores que se obtienen del indicador económico VAN al modificar el precio de venta del producto.

Si se toman valores ligeramente mayores al expuesto en el flujo de caja, el proyecto se torna positivo, pudiendo llegar a valores anuales netos de US\$11.000.000, en caso de aumentar el precio de venta en un 14%.

En caso de existir valores sutilmente menores a lo desarrollado en el flujo de caja, el proyecto presenta valores anuales netos negativos para la evaluación económica del proyecto, un valor menor de un 16% del precio de venta del producto hace que se tenga un VAN de prácticamente cero.

12.9.2 Evaluación económica sin usar nitrato de amonio como reductor de la higroscopicidad del nitrato de calcio.

La variación de la tasa interna de retorno (TIR) y el valor anual neto (VAN) se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 12.12: Variación de la TIR y el VAN con respecto al precio de venta del producto

Precio de Venta	TIR%	VAN[US\$]
340	10,67	136.710
360	18,01	1.798.896
380	24,38	3.461.083
400	30,13	5.123.270
420	35,46	6.785.456
440	40,46	8.447.643
460	45,21	10.109.829
480	49,77	11.772.016
500	54,17	13.434.203

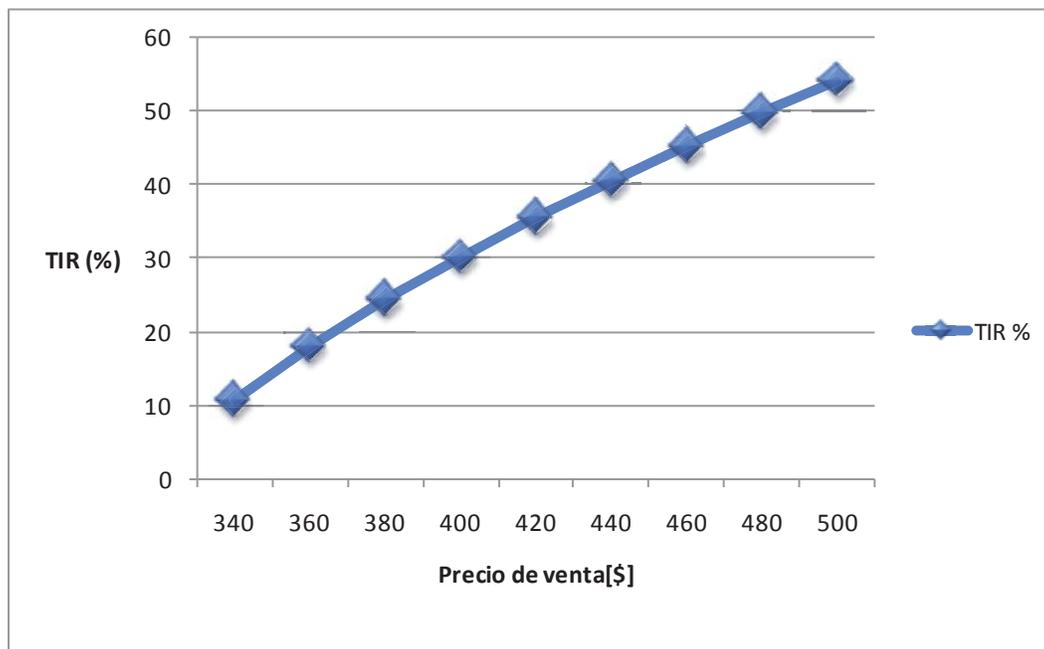


Gráfico 12.6: Variación de la TIR con respecto al precio de venta del producto

El gráfico 12.6 muestra la variación de la Tasa Interna de Retorno con respecto a variaciones del precio de venta del producto. Si bien el proyecto es rentable usando el precio de venta calculado a través del análisis de mercado, también muestra que desde valores tan solo ligeramente mayores, el proyecto se torna altamente atractivo desde el punto de vista económico, llegando a tener rentabilidades cercanas al 55% si el precio de venta aumenta solamente en un 14%.

En caso de tener un precio de venta ligeramente menor al proyectado en el flujo de caja, la evaluación presenta valores negativos económicamente de forma casi inmediata, si el precio de venta disminuye en un 22%, la factibilidad económica se torna poco atractiva, llegando a tener valores de TIR cercanos al 10%.

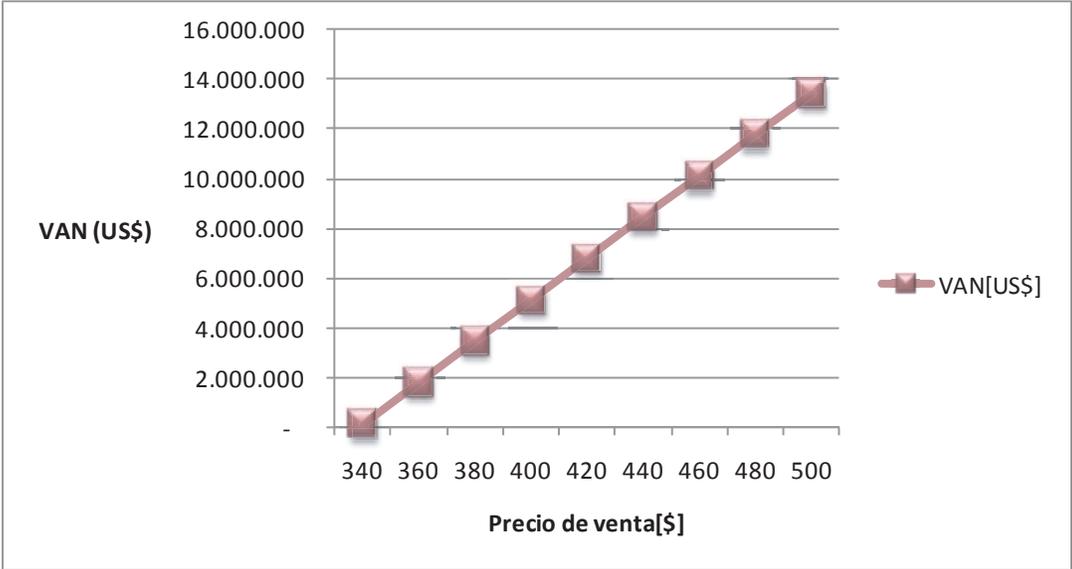


Gráfico 12.7: Variación del VAN con respecto al precio de venta del producto

El gráfico número 12.7 muestra los diferentes valores que se obtienen del indicador económico VAN al modificar el precio de venta del producto.

Si se toman valores ligeramente mayores al expuesto en el flujo de caja, el proyecto se torna positivo, pudiendo llegar a valores anuales netos de US\$13.000.000, en caso de aumentar el precio de venta en un 14%.

En caso de existir valores sutilmente menores a lo desarrollado en el flujo de caja, el proyecto presenta valores anuales netos negativos para la evaluación económica del proyecto, un valor menor de un 22% del precio de venta del producto hace que se tenga un VAN de prácticamente cero.

13 Conclusiones, Recomendaciones y Justificaciones

13.1 Conclusiones

Del estudio de factibilidad técnica y económica se desprenden las siguientes conclusiones:

- Se obtiene y cumple el objetivo fijar el lugar ideal para para instalar una planta productora de nitrato de calcio en Chile, el cual corresponde a Mejillones (Región de Antofagasta), esto dada la cercanía y fácil abastecimiento de materias primas y proximidad a los lugares de consumo del fertilizante.
- Se cumple con el objetivo de determinar el proceso idóneo para la implementación de una planta de nitrato de calcio en Chile. El proceso adecuado para la producción de nitrato de calcio corresponde a un proceso intermedio entre el desarrollado por la química alemana BASF y el realizado en el pilotaje presentado a CORFO.
- Se consigue y cumple el objetivo de dimensionar el mercado y precios del nitrato de calcio en Chile. El volumen de nitrato de calcio comercializado en Chile hace posible la edificación de una planta productora de nitrato de calcio y considerando el precio de venta de paridad de importación, se obtiene un proyecto económicamente rentable.
- El proyecto presenta pequeños riesgos ambientales, los cuales deben ser abordados y presentados en forma de “Estudio de Impacto Ambiental” o “Declaración de Impacto Ambiental”; según la autoridad sanitaria lo disponga.
- Teniendo en cuenta el precio actual del nitrato de calcio el proyecto es positivo en cualquiera de los dos casos analizados en la evaluación económica, teniendo una mayor conveniencia económica no añadir nitrato de amonio para disminuir la higroscopicidad del producto.
- En caso de adicionar nitrato de amonio se obtiene un producto de mejor calidad ya que no se licua tan fácilmente como el nitrato de calcio sin aditivo. La desventaja de agregar nitrato de amonio, es que se incurre en mayores costos variables (en torno al 9%), lo cual puede traducirse en una menor rentabilidad del proyecto.

- Es motivo de análisis tener en cuenta la adición del aditivo (nitrato de amonio), ya que es probable que en la comercialización a nivel nacional no sea estrictamente necesario su uso, debido a que no se tendría el producto por un tiempo prolongado en bodega, aunque es necesario tener presente la estacionalidad del producto.
- En caso de exportar lo más probable es que la adición de nitrato de amonio sea vital, ya que al transportar el producto a lugares lejanos, el tiempo de guardado es mayor y el fertilizante comienza a licuarse.
- Se presentará un bajo rendimiento en la reacción del proceso y exceso de material en el filtro prensa en caso de existir grandes impurezas en el carbonato de calcio.
- Al usar como materia prima carbonato de calcio con una granulometría muy gruesa, puede dificultar la reacción haciéndola más lenta.
- Se presenta un bajo rendimiento en caso de existir una proporción elevada de Ca insoluble en el carbonato de calcio.
- La elección del lugar de instalación posee la desventaja de que el equipamiento de la planta debe ser, en su gran mayoría, de acero inoxidable, esto debido a que se encuentra aledaña al mar y además conjunta a la planta de ácido nítrico; lo cual forma un ambiente sumamente corrosivo, aumentando los costos de inversión considerablemente.
- La cristalización corresponde al proceso de mayor complicación técnica de la operación, esto debido a que se debe realizar a la temperatura a la cual se forma el tetrahidrato, para obtener el producto con las especificaciones comerciales.

13.2 Recomendaciones

13.2.1 Recomendaciones

- La operación en el reactor debe hacerse a temperaturas inferiores a los 110°C, ya que podrían producirse pérdidas de nitrógeno en la reacción²⁵.
- En caso de usar una granulometría más fina de carbonato de calcio (menor a 400 mallas), es necesaria la adición de un kieselguhr²⁶ durante el proceso.

²⁵ Métodos de la Industria Química, tomo I. Fritz Teheder.

- Para reducir la higroscopicidad del nitrato de calcio es necesaria la adición de nitrato de amonio²³ durante el proceso.
- Es ideal usar un reactor de menor diámetro que altura (mínimo 1,5 veces mayor), con el objeto de facilitar la incorporación de polvo a la pulpa. Con esto se evita que la generación de espuma en el reactor sea un inconveniente crítico.
- La evaporación del agua corresponde al proceso más lento y costoso de la operación, esto indica la conveniencia de usar ácido nítrico de mayor concentración, debido a que se disminuiría la cantidad de agua a evaporar.
Es importante aclarar que el costo de obtener ácido nítrico de concentraciones mayores que el 60% es mucho más elevado, esto debido a que por métodos tradicionales de fabricación, el ácido nítrico se obtienen como máximo a una concentración del 60%, y en caso de requerir ácido con menor porcentaje de agua, el proceso de obtención se realiza en plantas especiales concentradoras de ácido nítrico, el cual es altamente demandado.
- En caso de adicionar nitrato de amonio, este debe ser agregado a la masa de cristal fundido y seco (con el agua en exceso retirada).²⁷
- La cristalización se puede realizar tanto en un escamador (rodillo enfriador), una torre de prilado, un enfriador de banda o un cristalizador.
- Cuando el pH de la solución reaccionante alcanza un valor cercano a 6,5 el carbonato de calcio no tiene la suficiente fuerza para reaccionar con el poco ácido presente en la solución. En caso de requerir una reacción más completa y alcanzar a tener un pH de 7, se debe agregar hidróxido de calcio en proporciones muy pequeñas (cercanas al 0,5%).²⁸

²⁶ Información obtenida del pilotaje realizado.

²⁷ Métodos de la Industria Química, tomo I. Fritz Tegeder.

²⁸ Información obtenida del pilotaje realizado.

13.3 Justificaciones

- Hoy en día Chile no cuenta con normas ambientales relacionadas con el efecto invernadero y emisiones de CO₂, pero no se descarta que en el largo plazo sí cuente con ello.

El proyecto contempla emitir 1.200[tonCO₂/año]; lo cual favorece el efecto invernadero y por ende el calentamiento global. Este es un número pequeño de emisión de CO₂, razón por la cual la huella de carbono de Enaex no sufrirá grandes cambios y por lo tanto no presentará problemas ambientales relacionados con la emisión de gases de efecto invernadero.

Enaex, dentro de su proceso de producción de nitrato de amonio, reduce alrededor de 1.600.000[tonCO₂/año]²⁹, de las cuales 1.000.000[tonCO₂/año] son vendidas como bonos de carbonos a empresas ubicadas en países desarrollados y pertenecientes al Protocolo de Kyoto.

Pese a lo anterior, no se descarta la posibilidad de atrapar el CO₂ y venderlo en un futuro, con tal de aminorar las emisiones de gases que contribuyen al efecto invernadero.

- La evaluación económica no toma en consideración el Capital de Trabajo necesario para el funcionamiento de la planta. Esto se debe a que la Planta de Nitrato de Calcio corresponde a una planta anexa al complejo Prillex de Enaex S.A, razón por la cual el monto asociado al Capital de Trabajo lo asumirá íntegramente Enaex S.A.
- No se considera un valor residual para la Planta de Nitrato de Calcio, ya que es prácticamente imposible determinar qué valor puede tomar ésta en diez años más (sobre todo si se considera el ambiente altamente corrosivo existente en el complejo Prillex de Enaex S.A). En muchas ocasiones los equipos de este tipo de plantas son rematados como chatarra. Por disposiciones internas de Enaex S.A. se considera el peor de los escenarios, el cual corresponde a un valor residual de cero.

²⁹Información obtenida a fines del 2011

14 Bibliografía

- James G. Speight. 2002. Chemical and Process Design Handbook. Estados Unidos de Norteamérica. Editorial McGraw-Hill.
- Stanley M. Walas. 1990. Chemical Process Equipment. Estados Unidos de Norteamérica. Howard Brenner Massachusetts Institute of Technology.
- E J. Henley, J. D. Seader. Operaciones de Separación por Etapas de Equilibrio en Ingeniería Química. 2000. España. Editorial Reverté.
- Warren L. McCabe, Julian C. Smith, Peter Harriott. 1991. Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. España. Editorial McGraw-Hill.
- Max S. Peters, Klaus D. Timmerhaus. 1991. Plant Design and Economics for Chemical Engineers. Estados Unidos de Norteamérica. Editorial McGraw-Hill.
- Lelan T. Blank, Anthony Tarquin. 1999. Ingeniería Económica. Estados Unidos de Norteamérica. Editorial McGraw-Hill.
- Ralph S. Polimeni. 1994. Contabilidad de Costos. México. Editorial McGraw-Hill.
- James C. Van Horne. 1994. Fundamentos de Administración Financiera. México. Editorial Prentice Hall.
- David M. Himmelblau. 1997. Principios Básicos y Cálculos en Ingeniería Química. México. Editorial Prentice Hall.
- C. J. Geankoplis. 1998. Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias. México. Editorial Continental.
- O. Levenspiel. 1993. Flijo de Fluidos e Intercambio de Calor. España. Editorial Reverté.
- Donald Q. Kern. 1999. Procesos de Transferencia de Calor. México. Editorial Continental.
- Robert H. Perry. 2001. Manual del Ingeniero Químico. México. Editorial McGraw-Hill.
- J. M Smith, H. C Van Ness, M. M Abbott. 1996. Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química. Editorial McGraw-Hill.
- J.P Holman. 1998. Transferencia de Calor. España. Editorial Continental
- R. B. Bird, W. E Stewart, E. N Lightfoot. 1992. Fenomenos de Transporte. México. Editorial Repla.

- Horst Marschener. 2002. Mineral Nutrition of Higher Plants. Inglaterra. Editorial Academic Press.

15 Anexos

A.1 Antecedentes de la empresa

Estructura de la propiedad

A fines de 1990 Enaex ingresó a la propiedad de la compañía SigdoKoopers S.A., el cual tiene el control de la sociedad desde 1993. El grupo SK participa entre otras actividades en el sector servicios, a través de Ingeniería y Construcción SigdoKoopers S.A., SK Ecología, Puerto Ventanas S.A y FEPASA S.A.; en el sector industrial a través de Enaex S.A., Somela S.A y SigdoPack S.A.; en el sector automotriz a través de SK Automotriz; y en la importación, venta y arriendo de maquinaria pesada, equipos agrícolas, de transporte, para la construcción e insumos a través de SK Comercial S.A.

En la actualidad, la estructura de propiedad de Enaex S.A está formada por SigdoKoopers S.A.; Inversiones Austin Powder Chile Ltda., diversos inversionistas institucionales y personas naturales.

Historia de la compañía

- 1920: El 9 de noviembre se funda la “Compañía de explosivos de Chile”.
- 1923: Se inicia la fabricación de explosivos en la planta Río Loa. Se cambia la razón social a “Compañía Sudamericana de Explosivos”.
- 1972: El estado Chile a través de CORFO, adquiere el control absoluto de la compañía con el nombre de “Empresa Nacional de Explosivos”.
- 1983: Se inicia la producción de ácido nítrico y nitrato de amonio en la planta de Mejillones, lo que permitió el autoabastecimiento de la principal materia prima en los explosivos.
- 1987: La empresa pasa al sector privado, siendo adquirida por inversionistas locales, FAMAE, y la compañía estadounidense Austin PowderCompany.
- 1989: Cambia a razón social “Enaex S.A.”.

- 1990: La compañía SigdoKoopers adquiere el 33% de Enaex S.A.
- 1991: Enaex se constituye como sociedad anónima abierta.
- 1992: Se inicia la construcción de una nueva planta de nitrato de amonio en los terrenos de la compañía en Mejillones.
- 1993: SigdoKoopers alcanza el 50.01% de la participación de Enaex. Se aumenta la capacidad de producción de la planta de ácido nítrico y nitrato de amonio.
- 1994: Enaex S.A y Austin Powder Co. crean la compañía Enaex S.A en Perú la que posteriormente pasa a llamarse Samex S.A.
- 1997: Comienza la ejecución del proyecto nitrato de amonio, para ampliar su capacidad productiva con una nueva planta de 350.000 toneladas anuales, alcanzando una capacidad total de 450.000 toneladas.
- 1999: Se inicia la producción de nitrato de amonio en la nueva planta de Mejillones, con una inversión de USD130 millones.
- 2000: La compañía adquiere el 56.55% de Samex (Perú) dando un renovado impulso al crecimiento de dicha sociedad y al desarrollo internacional de Enaex.
- 2001: Enaex obtiene el premio Nacional a la Calidad en la Categoría Gran Empresa.
- 2003: EnaexDyno Nobel ASA fusionan sus filiales en Perú, creando una nueva compañía denominada Dyno Nobel Samex S.A., la que abastece el servicio integral de voladura peruano.
- 2005: Se decide construir una nueva planta de nitrato de amonio en los terrenos de Prillex América, con lo que se ampliará la capacidad de producción a 800.000 toneladas anuales.
- 2006: Se realiza con éxito un aumento de capital por USD68 millones, y se contratan dos créditos con BNP Paribas por 125USD millones, para financiar la nueva planta de nitrato de amonio de Mejillones.
- 2006: Se decide desarrollar el proyecto Bonos de Carbono en Mejillones.

- 2007: Se crea la filial Enaex Argentina SRL con el objetivo de atender el creciente mercado argentino.
- 2007: Se inicia la construcción del proyecto de ampliación de la planta de nitrato de amonio y el proyecto Bonos de Carbono.
- 2008: Se pone en marcha la reducción certificada de emisiones asociada al proyecto Bonos de Carbono.
- 2008: Se crea la filial Enaex Servicios S.A. y la empresa pasa a organizarse divisionalmente.
- 2008: Enaex vende a Orica toda su participación en la coligada peruana Dyno Nobel Samex.
- 2008: Enaex acuerda con el grupo Brescia en Perú, desarrollar un proyecto de amoníaco y nitrato de amonio en ese país.
- 2009: Se obtienen acuerdos con la Sudafricana AfricanExplosives para el suministro y compra de una planta de detonadores y con la empresa peruana Exsa se acuerda el desarrollo en conjunto de nuevos negocios.
- 2009: El proyecto Bonos de Carbono fue validado bajo el protocolo de Kyoto y Naciones Unidas emitió en forma oficial los primeros certificados de reducción de emisiones permitiendo a Enaex Obtener los primeros ingresos por parte de Mitsubishi.
- 2010: En mayo de 2010, se pone en marcha la Planta de Nitrato de Amonio Panna 4, permitiendo alcanzar una producción de nitrato de amonio de grado explosivo a nivel mundial.
- 2010: Con fecha 8 de febrero de 2010, Enaex Servicios S.A., filial de Enaex S.A., suscribió a EXSA S.A., sociedad peruana, un acuerdo Marco de Asociación, cuyo plazo de vigencia oficial es de dos años desde su firma, con el objeto de abordar en conjunto el mercado regional, y luego el mercado mundial de distribución de explosivos, accesorios y prestación de servicios de voladura para la minería y obras civiles.

Antecedentes de la compañía

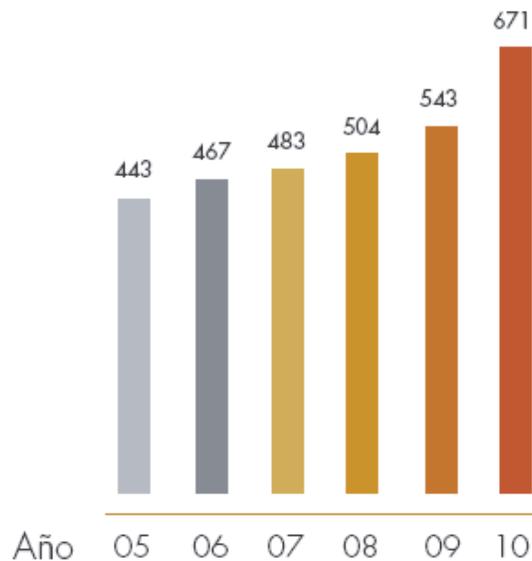
Enaex S.A lleva 91 años en el mercado consolidándose como la empresa productora de nitrato de amonio, explosivos para la minería y prestadora de servicios integrales de fragmentación de roca más importante de Chile y Latinoamérica, manteniendo en forma directa o a través del suministro de sus productos a terceros, una amplia cartera de contratos con las principales mineras a rajo abierto y subterráneas que operan en Chile, Argentina y Perú.

En los últimos años, debido al auge que la actividad minera ha tenido a nivel mundial, Enaex ha incrementado fuertemente su presencia internacional, creando filiales y exportando nitrato de amonio, boosters, dinamitas, emulsiones y otros explosivos. En la actualidad Enaex está presente con sus productos en más de 28 países, destacando Argentina, Bolivia, Ecuador, Perú, Colombia, Australia, Nueva Zelanda, Japón e Indonesia entre otros.

Durante el 2010, Enaex vendió 671.066 toneladas de explosivos, nitrato de amonio y químicos en general. El gráfico N°1 muestra la evolución de las ventas de Enaex desde el año 2005 hasta el 2010.

Evolución Ventas Físicas Enaex (Miles de Toneladas)¹

(1) Explosivos, Nitrato de Amonio y Químicos



Ventas anuales de Enaex S.A.

Productos y servicios

Enaex produce y comercializa una amplia gama de explosivos y agentes de voladura para satisfacer las necesidades de la minería en general, obras civiles, prospección sísmica y aplicaciones específicas.

Enaex es el mayor productor de nitrato de amonio de grado explosivo en America Latina pudiendo este ser comercializado directamente al cliente final, o bien ser usado como materia prima para la fabricación de agentes de voladura, como ANFO y altos explosivos.

Durante el 2010 entró en operación la nueva planta de nitrato de amonio en Mejillones, lo que permitirá una disponibilidad al mercado de 800 mil toneladas al año, constituyendo el mayor complejo mundial de este producto.

Adicionalmente, con el fin de ofrecer una línea completa de productos, durante el 2011 Enaex pondrá en marcha su propia planta ensambladora de detonadores no eléctricos.

Por otra parte, Enaex cuenta con importantes productos para atender las necesidades de la industria química y refrigeración industrial, como también una línea de fertilizantes.

Dentro de la línea de productos de Enaex encontramos:

- Materias primas y explosivos:
 - Nitrato de amonio de baja densidad
 - Nitrato de amonio con recubrimiento
- Agentes de voladura:
 - ANFO
 - ANFO Aluminizado
 - ANFO Pesado
 - ANFO Liviano
 - Emulsiones Bombeables
- Altos explosivos:
 - Emulsiones encartuchadas
 - Dinamitas gelatinosas
 - Dinamitas semi gelatinosas
 - Control de sobrequebre
 - Dinamitas permisibles para el carbón
 - Exploración sísmica
 - Rompedores cónicos de Pentolita
 - Boosters
- Sistema de iniciación:
 - Detonador corriente
 - Detonadores no eléctricos
 - Detonadores eléctricos
 - Detonadores electrónicos
 - Boosters
 - Cordón detonante
 - Mecha para minas

- Otros productos complementarios:
 - Bolsas autoninflablesKoolkap
 - Retenedores Taponex
 - Lanzador Quikdraw
 - Rockracker
 - Cemento de expansión
 - Accesorios para voladura de rocas

- Servicios de voladura:

Enaex provee en sus plantas de servicio localizadas en faena del cliente un servicio completo de voladura. Este servicio incluye el chequeo de las perforaciones, colocación de iniciadores, tapado de pozos, amarre superficial, disparo de voladura y administración de polvorines.

Clientes

Enaex abastece con sus productos, presta servicios y asiste técnicamente a las compañías mineras más importantes presentes en Chile y Sudamérica como CODELCO, BHP Biliton, Anglo American, Antofagasta Minerals, Barrick, Gold Corp, entre otras.

La capacidad de producir a gran escala y la creciente globalización de los clientes, han hecho que Enaex aborde mercados fuera de Chile, ya sea a través de exportaciones de productos o bien abriendo filiales en los países de destino.

A.2 Generalidades

Fertilizantes

Se define como fertilizante a un producto generalmente inorgánico, el cual aporta nutrientes a las plantas. Químicamente se presenta como una sal inerte sin carga y al estar en solución o en contacto con el agua del suelo se disocia y deja los nutrientes en forma iónica.

Actualmente la fertilización es un factor fundamental cuando es necesario reponer los nutrientes que a través de los años se pierden a causa del uso constante del suelo en los sistemas agrícolas de producción intensiva. En estos casos para cumplir con los requerimientos nutritivos de las plantas es necesario llevar a cabo un programa de fertilización completa y balanceada, asegurando que al cultivo se le suministren la cantidad y forma apropiada de nutrientes.

Nutrientes

Es toda sustancia integrante normal de los alimentos, cada uno de ellos con características químicas específicas. También se define como toda sustancia integrante de la planta, cuya ausencia en el metabolismo o su disminución por debajo de un límite mínimo ocasiona después de un tiempo variable una enfermedad por carencia.

Las raíces de los vegetales tienen la capacidad de absorber diversos elementos minerales del medio ambiente. En el medio solo trece son los elementos indispensables como nutrientes, los cuales se clasifican en macronutrientes y micronutrientes.

Macro nutrientes.

Corresponden a los nutrientes que las plantas deben absorberlos en grandes cantidades para su correcto funcionamiento, a su vez estos macronutrientes se clasifican en dos grupos.

- Nutrientes primarios. Son los macro nutrientes que las plantas utilizan de forma más abundante. De una misma manera son los nutrientes que primero comienzan a escasear en el suelo.

Las plantas dentro de su composición química poseen una proporción elevada de estos elementos ya que los nutrientes primarios corresponden a $\frac{3}{4}$ partes de los nutrientes minerales que necesitan los vegetales, por ende al carecer la tierra de estos nutrientes, las plantas se ven directamente afectadas. El nitrógeno (N), el potasio (K) y el fósforo (P) son los macro nutrientes primarios.

- Nutrientes secundarios: Habitualmente en la tierra no se presentan grandes carencias de estos nutrientes, pero de igual manera son de importancia para el desarrollo de los vegetales. Los nutrientes secundarios son el calcio (Ca), el magnesio (Mg) y el azufre (S).

Micro nutrientes:

Son llamados micronutrientes debido a que las plantas solamente necesitan absorberlos en pequeñas cantidades. También son llamados nutrientes trazas, ya que cuando se realizan los análisis químicos a la planta, estos aparecen en forma de trazas o cantidades muy pequeñas. Corresponden a micronutrientes el hierro (Fe), el cobre (Cu), el zinc (Zn), el cloro (Cl), el manganeso (Mn), el molibdeno (Mo) y el boro (B).

En la tabla A.1 se muestran los principales nutrientes de las plantas, clasificados como nutrientes no minerales y nutrientes minerales primarios, secundarios y micronutrientes.

Principales nutrientes en las plantas

Nutrientes no minerales	Nutrientes minerales		
	Macronutrientes primarios	Macronutrientes secundarios	Micronutrientes
Carbono (C) (40 - 50%)	Nitrógeno (N) (1 - 3%)	Calcio (Ca) (0,5 - 3,5%)	Cloro (Cl) (0,25 - 0,5%)
Oxígeno (O) (42 - 44%)	Potasio (K) (0,3 - 3%)	Azufre (S) (0,1 - 0,5%)	Hierro (Fe) (trazas)
Hidrogeno (H) (6 - 7%)	Fósforo (P) (0,05 - 1%)	Magnesio (0,03 - 0,08)%	Manganeso (Mn) (trazas)
			Cobre (Cu) (trazas)
			Zinc (Zn) (trazas)
			Boro (B) (trazas)
			Molibdeno (Mo) (trazas)

Fertilización del suelo

Se realiza con el fin de reponer los nutrientes extraídos por la planta, y esta debe tomar del suelo los elementos que le son indispensables en proporciones adecuadas para lograr su normal desarrollo. En caso de faltar algún nutriente o existir en forma deficiente en el suelo, la producción se verá disminuida. La escasez de algún elemento en muchos casos es corregida adicionando al suelo compuestos ricos en el elemento faltante (adición de fertilizante).

En la fertilización de suelo es fundamental realizar un estudio previo del suelo por medio de análisis, con el resultado de los análisis se obtienen informaciones más precisas de las condiciones reales del suelo, tanto en lo referente a la disponibilidad de nutrientes como a las condiciones químicas que favorecen dicha disponibilidad.

Fertilización foliar

Es una técnica de nutrición instantánea en donde se aportan elementos esenciales para los cultivos a través de la pulverización de soluciones diluidas aplicadas directamente a las hojas.

Este tipo de fertilización soluciona problemas en forma instantánea de deficiencia de nutrientes. Es usada generalmente en los momentos críticos, cuando los requerimientos de nutrientes por parte del cultivo son superiores su capacidad de absorción del suelo.

Es importante aclarar que la fertilización foliar es complementaria a la fertilización de suelo y es utilizada en altos cultivos, en los momentos críticos, en instancias en donde la absorción no cubre los requerimientos del cultivo y en ocasiones en que las condiciones climáticas no permiten la descomposición del fertilizante de suelo en forma asimilable.

Fertilizantes solubles

Corresponden a un mineral cristalizado de origen natural o sintetizado industrialmente. Está compuesto por uno o dos nutrientes esenciales para los cultivos. En la mayoría de los casos corresponden a una sal o molécula compuesta por un catión y un anión. Ejemplos de fertilizantes solubles son el nitrato de calcio, el nitrato de magnesio, el nitrato de potasio, el sulfato de amonio, la urea, el sulfato de magnesio.

Clasificación de los fertilizantes solubles según su estado físico

- **Sólidos**

Son fertilizantes formulados en polvo o en finos cristales y al estar en contacto con el agua se solubilizan completamente.

- **Líquidos**

Los fertilizantes líquidos se encuentran solubilizados y listos para ser inyectados en los sistemas de aplicación. Existen fertilizantes líquidos de alta concentración, los cuales deben ser diluidos antes de su aplicación; y fertilizantes líquidos de baja concentración (menores a 16%), que se inyectan de forma inmediata.

- **Simples**

Aportan un solo nutriente Ej.: Nitrato de Amonio, Sulfato de Amonio

- **Binarios**

Aportan dos nutrientes Ej.: Fosfato Monoamónico, Nitrato de calcio

- **Completo**

Aportan más de dos nutrientes Ej: Nitrato de amonio cálcico-magnésico

Forma en que los nutrientes se expresan en los fertilizantes

Los nutrientes en los fertilizantes se encuentran formando moléculas inertes, simples o complejas; dependiendo de la naturaleza mineralógica de donde provengan.

La siguiente tabla muestra las distintas formas de expresión de los nutrientes en los fertilizantes.

Forma de expresión de los nutrientes en los fertilizantes

Nutriente	Forma de expresión
Nitrógeno	N
Fósforo	P ₂ O ₅
Potasio	K ₂ O
Calcio	CaO
Magnesio	MgO
Azufre	S
Fierro	Fe
Manganeso	Mn
Zinc	Zn
Cobre	Cu
Boro	B
Molibdeno	Mo
Cloro	Cl

Variables de los fertilizantes

- **Solubilidad**

En los fertilizantes sólidos cristalizados la solubilidad se relaciona directamente con la composición química y física de la molécula, lo cual incide en la velocidad de disolución. Los fertilizantes solubles generalmente corresponden a electrolitos fuertes, por lo que se solubilizan al 100% (siempre que no contengan impurezas insolubles en agua). Las impurezas insolubles en los fertilizantes no debe ser

superior al 0.01%. Esta información es de vital importancia y debe ser conocida por el usuario del fertilizante.

- **Grado fertilizante:**

Corresponde a la concentración de nutrientes en cada fertilizante.

- **Pureza de la sal o fertilizante soluble**

Los fertilizantes pueden ser obtenidos de procesos industriales o de extracciones mineras; y dependiendo de la precisión de estos, se pueden obtener sales de distinta pureza, esto permite tener diferencias entre la calidad del producto y la variedad de sus posibles usos. A medida que el proceso se hace más preciso, la pureza aumenta y por ende la calidad del producto. Esto se traduce a que una sal puede tener distintos grados de pureza, lo cual está asociado a los distintos costos de obtención del producto final.

- **Impurezas en los fertilizantes solubles**

Estas se miden tomando en cuenta la sumatoria de impurezas solubles (generalmente sales solubles distintas a la sal fertilizante) y impurezas insolubles (silicatos, apatitas).

Dentro de las impurezas solubles se encuentran sulfatos, fosfatos, cloruros, nitratos, metales pesados y distintos contaminantes procedentes de los procesos de producción.

- **Temperatura**

Es sabido que en la mayoría de los casos la solubilidad varía con la temperatura. Al preparar las soluciones madres para la fertilización de suelos, los productos sólidos son diluidos en agua y se pueden presentar cambios en la temperatura de la solución y verse afectada la solubilidad de la mezcla. La mayoría de los fertilizantes reaccionan de forma endotérmica al solubilizarse en agua, lo que es sumamente importante cuando se trabaja con aguas frías o en invierno, por lo tanto bajo dichas circunstancias es necesario usar un termómetro para dimensionar el potencial de disolución que posee el agua utilizada.

- **Conductividad eléctrica de los fertilizantes solubles**

La conductividad eléctrica mide directamente la concentración de sales en un medio líquido o sólido. A medida que se tenga una mayor concentración de sales, mayor será la conductividad eléctrica. Los fertilizantes solubles poseen distintas conductividades eléctricas. En los fertilizantes la conductividad eléctrica se usa para conocer la salinidad que puede generar un fertilizante en comparación con otros, de esta manera se pueden elegir productos más adecuados, dependiendo de las características requeridas. Las unidades más usadas son los [ds/m] y los [milimhos/cm] en donde es medida la concentración de 1[g] de fertilizante por litro a 20°C. Generalmente cuando se está en presencia de suelos y aguas salinas se trata de usar fertilizantes de baja concentración electrolítica y en caso contrario cuando se tiene baja salinidad en suelos y agua, lo que se busca es el uso de fertilizantes con mayor conductividad eléctrica.

Otro ítem a analizar es el estado fonológico del cultivo, ya que a final del ciclo de este, se busca aumentar la C.E.

En la agronomía, cuando se mide la C.E de un agua de riego o de una solución nutritiva, se determina la conductividad específica (k) de tal disolución, para lo cual se usa la unidad Siemens (S), que es equivalente a los mmhos.

La C.E varía con la temperatura, por ende, la medición de la C.E siempre debe ir acompañada con la temperatura a la cual se realizó.

- **pH de los fertilizantes**

El pH es clave en la elección de un fertilizante soluble, en ciertos casos es necesario añadir un fertilizante en solución de característica acida, neutra o alcalina, dependiendo del ambiente suelo-agua-planta con que se esté trabajando. El pH en los fertilizantes solubles es medido en soluciones de 1[g/l] a 20°C.

- **Higroscopicidad**

En un fertilizante la higroscopicidad generalmente se expresa en términos de su humedad relativa crítica (HRC), esta corresponde a la humedad relativa de la

atmosfera por encima de la cual el fertilizante comienza a absorber la humedad atmosférica, es decir, comienza a humedecerse.

- **Compatibilidad química e iónica**

Se refiere a la compatibilidad que tienen mezclas cristalizadas de fertilizantes solubles asociados a su composición iónica. Cabe destacar que entre los distintos iones de los fertilizantes existen sinergismos e incompatibilidades.

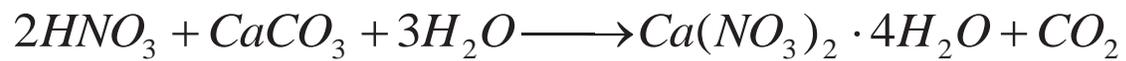
- **Compatibilidad química en el estanque**

Existen variados fertilizantes que son incompatibles en seco, ya que la mezcla de estos hace que se apelmacen, endurezcan y se humedezcan. Los tiempos en que se manifiesten las incompatibilidades en los fertilizantes es variado, razón por la cual en muchas ocasiones cuando el tiempo de mezcla en el estanque es breve, la pronta aplicación de estos elimina la incompatibilidad.

A.3: Balance de Masa

Balance de masa global

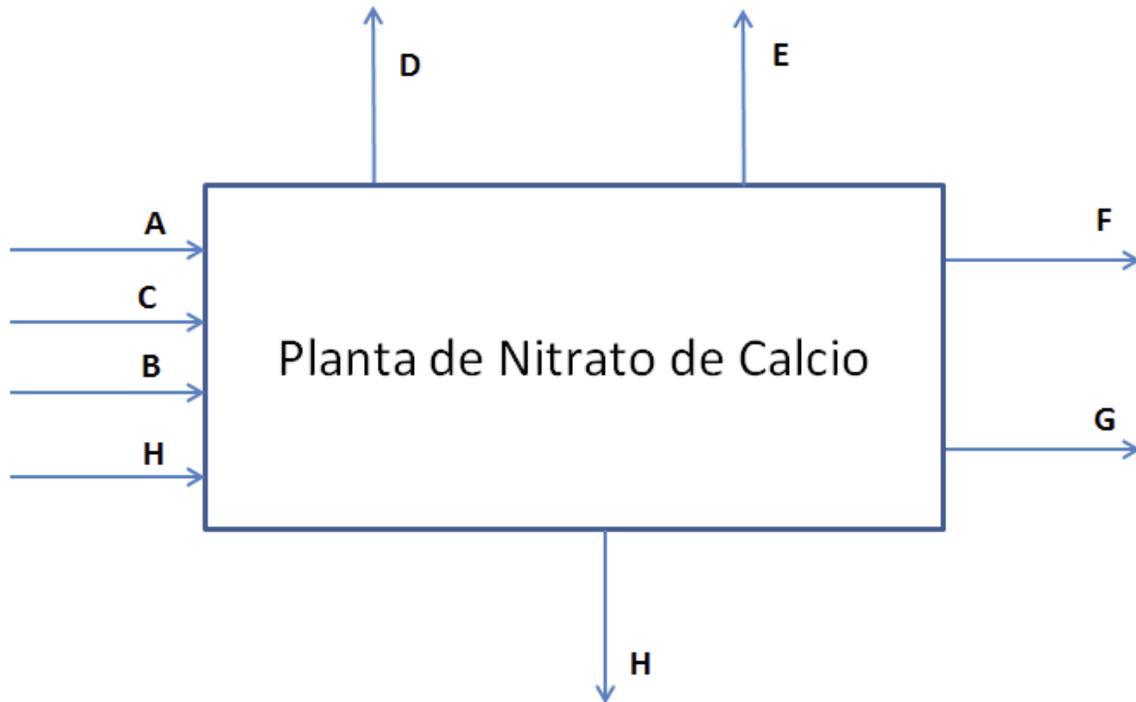
Reacción del proceso:



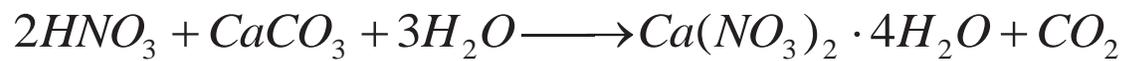
- Masa de nitrato de calcio a producir: 6667[ton/año]
- Días de operación al año: 330[días/año]
- Horas de operación: 6 [h/día]

La producción por hora será de 6667 [ton/año]. Se tomará como base de cálculo un día producción.

Balance de masa global



Reacción del proceso:



Corriente	Compuesto	Flujo másico [kg/día]
A (E)	HNO ₃ (líquido)	10.783
B (E)	CaCO ₃ (sólido)	8.993
C (E)	H ₂ O (líquida)	7.808
H (E)	Impurezas	184
D (S)	H ₂ O (evaporada)	3.187
E (S)	CO ₂ (gaseoso)	3.765
F (S)	Ca(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O (sólido)	20.203
G (S)	CaCO ₃ (sólido)	429
H (S)	Impurezas	184

Balance de masa al reactor:

Reacción del proceso:



- Masa de nitrato de calcio a producir: 6667[ton/año]
- Días de operación al año: 330[días/año]
- Horas de operación: 6 [h/día]

La producción por hora será de 6667 [ton/año]. Se tomará como base de cálculo un día producción.

Flujo másico de nitrato de calcio a producir: $6667[\text{ton} / \text{año}] = 2003[\text{kg} / \text{día}]$

Peso molecular HNO₃: 63[kg / kgmol]

Peso molecular CaCO₃: 100.08[kg / kgmol]

Peso molecular H₂O: 18[kg/kgmol]

Peso molecular Ca(NO₃)₂·4H₂O: 236.08[kg/kgmol]

Peso molecular CO₂: 44[kg/kgmol]

$$\text{Moles de nitrato de calcio a producir} = \frac{20203}{236.08} = 85.5769[\text{kgmol}]$$

Base de cálculo: 1 día de operación

En base a pruebas realizadas en laboratorio y pilotaje, se deduce que es necesario agregar un 5% de exceso de carbonato de calcio, esto debido a que genera un lecho filtrante en el filtro prensa y se obtiene un nitrato de calcio fundido más cristalino en el filtrado.

$$2\text{HNO}_3 + \text{CaCO}_3 + 3\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$$

Entra	171,154	89,8557	433,787	0	0
Reacciona	171,154	85,55769	256,731	0	0
Sale	0	4,2788	177,056	85,5769	86,5769

Adición de reactivos

1. Solución ácida de HNO₃

%_{P/P} de HNO₃: 58

%_{P/P} de H₂O: 42

Masa de HNO₃ necesaria: 171.154 · 63 = 10782.7[kg]

Masa de H₂O necesaria: 256.731 · 18 = 4621.16[kg]

Masa de H₂O presenta en la solución acida = 7808.16[kg]

Masa de H₂O en exceso = 7808.16 – 4621.16 = 3187[kg]

Masa de solución acida = 10782.7 + 7808.16 = 18590.9[kg]

2. Carbonato de calcio

%_{p/p} Pureza = 98

Masa de CaCO₃ = 85.5769 · 1.05 · 100.08 = 8992.76[kg]

Masa de CaCO₃ incluyendo impurezas = 9176.29[kg]

Masa de CaCO₃ estequiométrico = 85.5769 · 100.08 = 8564.54[kg]

Masa de CaCO₃ estequiométrico incluyendo impurezas = 8739.32[kg]

Masa de CaCO₃ en exceso = 8992.76 – 8564.54 = 428.22[kg]

Masa de CaCO₃ en exceso incluyendo impurezas = 436.959[kg]

Masa de impurezas = $m_{CaCO_3} \cdot 0.02 = 9176.29 \cdot 0.02 = 183.52$ [kg]

Producto Obtenido

Masa de Ca(NO₃)₂ · 4H₂O obtenido = 20203[kg]

Masa de CO₂ obtenido = 85.5769 · 44 = 3765.38[kg]

Propiedades de los reactantes

Acido nítrico (HNO₃)

Pureza: 58%

Peso molecular: 63[kg/kgmol]

Coeficiente estequiométrico: 2

Moles adicionados: 171.154[kgmol]

Masa adicionada: 10783[kg]

Masa solución ácida adicionada: 18560[kg]

Densidad: 1.355[kg/l]

Volumen adicionado: $\frac{18591}{1.355} = 17320[l]$

Temperatura de operación: 25°C

Cp especie: 0.45[cal/g°C]

Fracción estequiométrica: $\frac{(PM_{HNO_3}) \cdot Coef.esteq.}{PM_{Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O}} = \frac{63 \cdot 2}{236.08} = 0.534$

Fracción real: $\frac{Masa\ solución\ HNO_3}{Masa\ total} = \frac{18560}{27768} = 0.67$

Cp reactivo: 0.64[cal/g°C]

Carbonato de calcio (CaCO₃)

Pureza: 98%

Peso molecular: 40.08[kg/kgmol]

Coeficiente estequiométrico: 1

Moles adicionados: 89.557[kgmol]

Masa estequiométrica adicionada: 8565[kg]

Masa real adicionada (incluyendo impurezas y exceso): 9176[kg]

Densidad: 2.71[kg/l]

Volumen adicionado: $\frac{9176}{2.71} = 3386[l]$

Temperatura de operación: 25°C

Cp especie: 0.197[cal/g°C]

Fracción estequiométrica: $\frac{(PM_{CaCO_3}) \cdot Coef.esteq.}{PM_{Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O}} = \frac{100.08 \cdot 1}{236.08} = 0.424$

Fracción real: $\frac{Masa\ solución\ CaCO_3}{Masa\ total} = \frac{18560}{27768} = 0.67$

Cp reactivo: 0.64[cal/g°C]

Agua (H₂O):

Pureza: 100%_{p/p}

PM: 18[kg/kgmol]

Coeficiente estequiométrico: 3

Moles: 47.55[kgmol]

Cantidad estequiométrica adicionada: 4621[kg]

Cantidad real adicionada (incluyendo exceso): 7808[kg]

Densidad: 1 [kg/l]

$$\text{Volumen: } \frac{1301}{1} = 1301[l]$$

Temperatura: 298[K]

Fracción estequiométrica: $(\text{PM H}_2\text{O} \cdot \text{coeficiente estequiométrico}) / (\text{PM (CaNO}_3)_4\text{H}_2\text{O}) = (18 \cdot 3) / 236.08 = 0.23$

Cp especie: 1[cal/°C]

Propiedades de los productos

Nitrato de calcio ((CaNO₃)·4H₂O)

Pureza: 100%_{p/p}

PM: 236.08[kg/kgmol]

Coeficiente estequiométrico: 1

Moles: 85.5769[kg/kgmol]

Masa: 27768[kg]

Densidad: 1.82[kg/l]

Cp ponderado: $0.197 \cdot 0.424 + 0.45 \cdot 0.534 + 1 \cdot 0.23 = 0.55[\text{cal} / \text{g}^\circ\text{C}]$

Dióxido de carbono (CO₂)

Pureza: 100%_{p/p}

PM: 44[kg/kgmol]

Coeficiente estequiométrico: 1

Moles: 85.5769[kg/kgmol]

Masa: 3765[kg]

Composición química del producto:

- $H_2O: \frac{pmH_2O \cdot 4}{pmCa(NO_3)_2 \cdot 4H_2O} \cdot 100 = \frac{18 \cdot 4}{236.08} = 30.5\%$
- $N_2: \frac{pmN_2 \cdot 2}{pmCa(NO_3)_2 \cdot 4H_2O} \cdot 100 = \frac{14 \cdot 2}{236.08} = 11.86\%$
- $Ca: \frac{pmCa}{pmCa(NO_3)_2 \cdot 4H_2O} \cdot 100 = \frac{40.08}{236.08} = 17\%$
- $CaO: \frac{pmCaO}{pmCa(NO_3)_2 \cdot 4H_2O} \cdot 100 = \frac{56.08}{236.08} = 23.75\%$

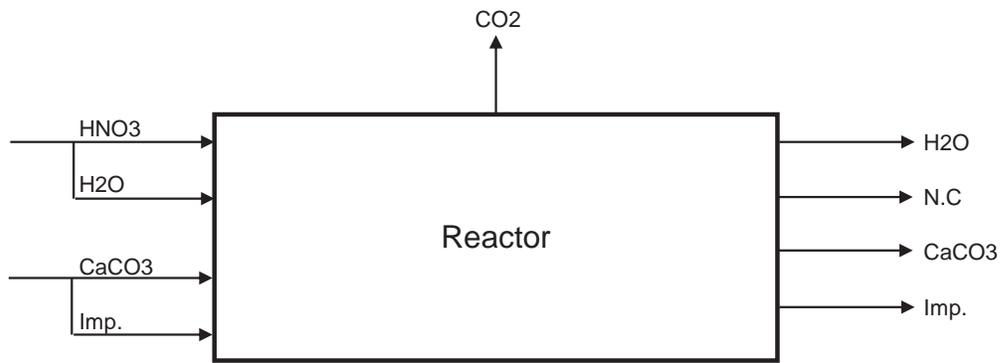
Resumiendo:

Reacción:



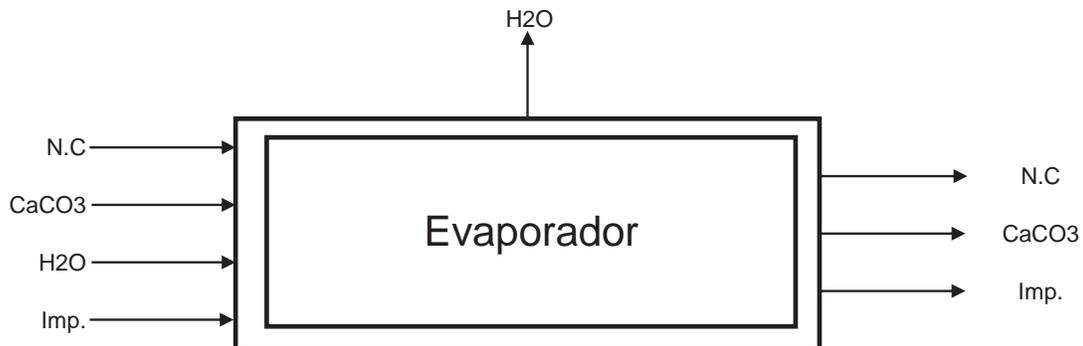
Balance:

(Masa HNO_3) + masa $CaCO_3$ + masa $H_2O_{(entrada)}$ + masa impurezas = masa $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ + masa $CaCO_3_{(exceso)}$ + $H_2O_{(salida)}$ + masa impurezas:



Compuesto	Entra[kg/h]	Sale[kg/h]
HNO ₃	1797	---
CaCO ₃	1499	71
H ₂ O	1301	531
Impurezas	31	31
(CaNO ₃)·4H ₂ O	---	3367
CO ₂	---	628
Total	4628	4628

Balance de masa al evaporador



Masa entrada de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} = 3367[\text{kg/h}]$

Masa salida de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} = 3367[\text{kg/h}]$

Masa entrada de $\text{CaCO}_3 = 71[\text{kg/h}]$

Masa salida de $\text{CaCO}_3 = 71[\text{kg/h}]$

Masa entrada impurezas = $31[\text{kg/h}]$

Masa salida impurezas = $31[\text{kg/h}]$

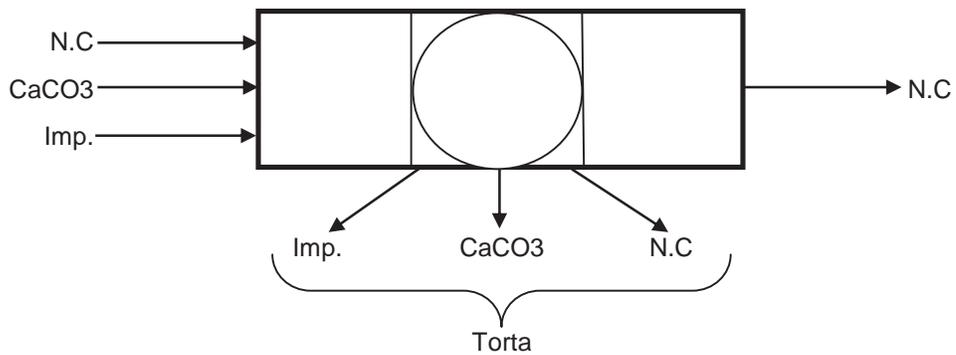
Masa entrada $\text{H}_2\text{O}_{(\text{liquida})} = 531[\text{kg/l}]$

Masa salida $\text{H}_2\text{O}_{(\text{vapor})} = 531[\text{kg/l}]$

Resumiendo

Compuesto	Entra[kg/h]	Sale[kg/h]
CaCO ₃	71	71
H ₂ O	531 _(liquido)	531 _(vapor)
Impurezas	31	31
(CaNO ₃)·4H ₂ O	3367	3367
Total	4000	4000

Balance de masa al filtro prensa



Torta seca

Masa torta seca = masa CaCO₃ agregado - masa CaCO₃ estequiométrico + impurezas

$$\text{Masa torta seca} = 8993 - 8565 + 184 = 612[\text{kg} / \text{dia}]$$

Densidad torta seca: 2.35[kg/l]

$$\text{Volumen torta seca} = \frac{612}{2.35} = 260[\text{kg}/\text{l}]$$

Torta Húmeda

Humedad de la torta: 15% (la humedad de la torta corresponde al porcentaje de cristales fundidos que quedan atrapados en la torta)

$$\text{Masa torta húmeda} = \frac{\text{masa torta seca}}{1 - \% \text{humedad}/100} = \frac{612}{1 - 15/100} = 720[\text{kg}/\text{dia}]$$

Densidad torta húmeda: 2.03[kg/l]

$$\text{Volumen torta húmeda} = \frac{720}{2.03} = 355[\text{l}/\text{dia}]$$

Masa de cristales fundidos que quedan dentro del filtro prensa = $720 - 612 = 108[\text{kg}/\text{dia}]$

Filtrado

Masa de filtrado = masa nitrato de calcio – masa de cristales fundidos que quedan dentro del filtro prensa

$$\text{Masa de filtrado} = 20203 - 108 = 20095[\text{kg}/\text{dia}]$$

Densidad filtrado: 1.51[kg/l]

$$\text{Volumen filtrado} = \frac{20095}{1.51} = 13308[\text{l}/\text{dia}] = 37[\text{l}/\text{min}]$$

Agua de lavado

Volumen de agua de lavado del filtro prensa = Volumen torta húmeda · 3

Volumen de agua de lavado = $355 \cdot 3 = 1065$ [kg/ dia]

Flujo de agua de lavado = $1065 \frac{kg}{dia} \cdot \frac{1 dia}{50 min} = 21.3$ [l/ min]

Resumiendo:

Masa entrada de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} = 3367$ [kg/h]

Masa que se queda en torta de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} = 108$ [kg/dia] = 18[kg/h]

Masa salida de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} = 20095$ [kg/h] = 3349[kg/h]

Masa entrada de $\text{CaCO}_3 = 71$ [kg/h]

Masa que se queda en torta de $\text{CaCO}_3 = 71$ [kg/h]

Masa salida de $\text{CaCO}_3 = 0$ [kg/h]

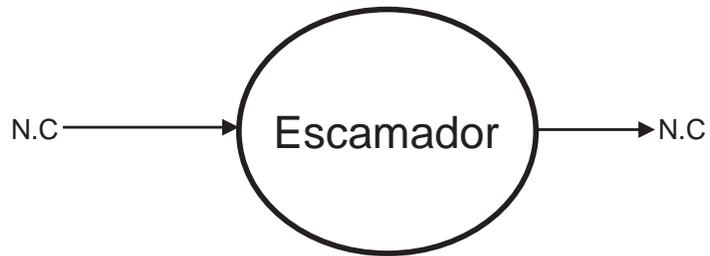
Masa entrada impurezas = 31[kg/h]

Masa que se queda en torta de impurezas = 31

Masa salida impurezas = 0[kg/h]

Compuesto	Entra[kg/h]	Torta[kg/h]	Sale[kg/h]	Salida total[kg/h]
CaCO_3	71	71	0	71
Impurezas	31	31	0	31
$(\text{CaNO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	3367	18	3349	3367
Total	3469	120	3349	3469

Balance de masa al rodillo enfriador de cristales (escamador)

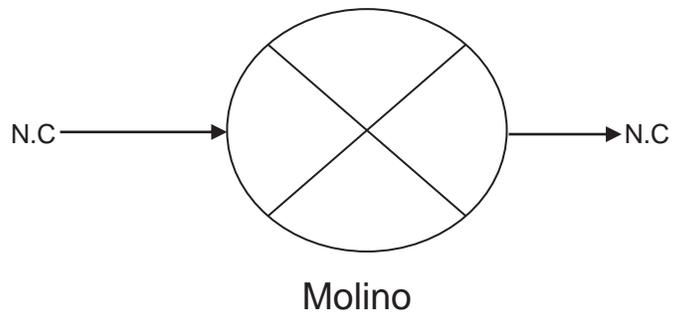


Masa entrada de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} = 3349[\text{kg/h}]_{(\text{líquido})}$

Masa salida de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} = 3349[\text{kg/h}]_{(\text{sólido})}$

Compuesto	Entra[kg/h]	Sale[kg/h]
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	$3349[\text{kg/h}]_{(\text{líquido})}$	$3349[\text{kg/h}]_{(\text{sólido})}$

Balance de masa al molino



Masa entrada de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} = 3349[\text{kg/h}]_{(\text{sólido})}$

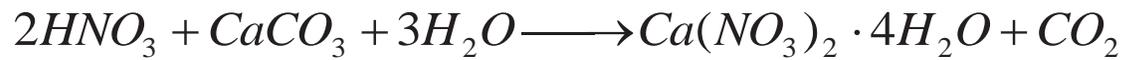
Masa salida de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} = 3349[\text{kg/h}]_{(\text{sólido y disgregado})}$

Compuesto	Entra[kg/h]	Sale[kg/h]
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	3349[kg/h] _(sólido)	3349[kg/h] _(sólido y disgregado)

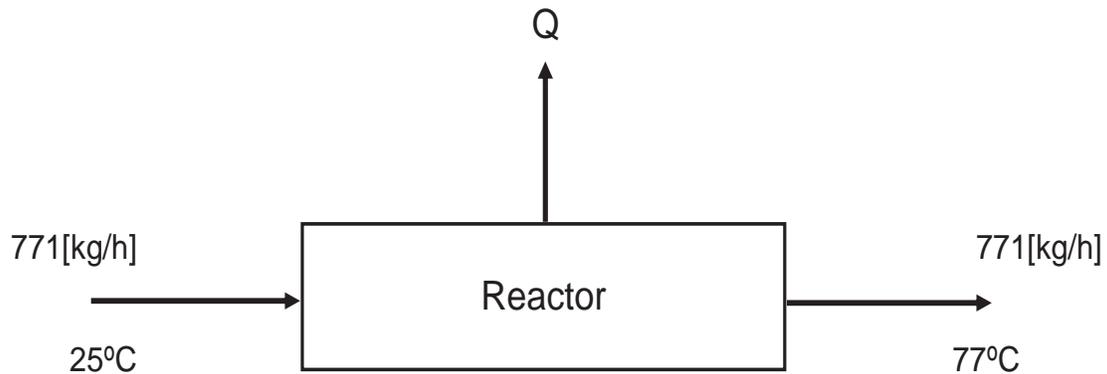
A.4: Balance de Energía

Balance de energía al reactor

Reacción del proceso:



Esquemáticamente se puede representar como:



$C_p \text{ HNO}_3$: 0.455[kcal/kg°C]

$C_p \text{ CaCO}_3$: 0.197[kcal/kg°C]

$C_p \text{ H}_2\text{O}$: 1[kcal/kg°C]

$C_p \text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}: 0.555[\text{kcal}/\text{kg}^\circ\text{C}]$

$C_p \text{CO}_2: 0.26[\text{kcal}/\text{kg}^\circ\text{C}]$

Fracción estequiometrica HNO_3 :

$$\frac{\text{PM } \text{HNO}_3 \cdot \text{coeficiente estequiometrico}}{\text{PM } (\text{CaNO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}} = \frac{63 \cdot 2}{236.08} = 0.534$$

Fracción estequiometrica CaCO_3 :

$$\frac{\text{PM } \text{CaCO}_3 \cdot \text{coeficiente estequiometrico}}{\text{PM } (\text{CaNO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}} = \frac{100.08 \cdot 1}{236.08} = 0.424$$

Fracción estequiometrica H_2O :

$$\frac{\text{PM } \text{H}_2\text{O} \cdot \text{coeficiente estequiometrico}}{\text{PM } (\text{CaNO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}} = \frac{18 \cdot 3}{236.08} = 0.229$$

C_p ponderado: $0.534 \cdot 0.455 + 0.424 \cdot 0.197 + 0.229 \cdot 1 = 0.555[\text{kcal} / \text{kg}^\circ\text{C}]$

Calor de reacción

$\Delta H_f^\circ \text{CaCO}_3: -289.5[\text{kcal}/\text{mol}]$

$$\Delta H_f^\circ \text{HNO}_3: -41.35[\text{kcal/mol}]$$

$$\Delta H_f^\circ \text{H}_2\text{O}: -68.3[\text{kcal/mol}]$$

$$\Delta H_f^\circ \text{CO}_2: -94.05[\text{kcal/mol}]$$

$$\Delta H_f^\circ (\text{CaNO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}: -507.43[\text{kcal/mol}]$$

$$\Delta H_{\text{rxn}}^\circ:$$

$$(\Delta H_f^\circ \text{HNO}_3) \cdot 2 + (\Delta H_f^\circ \text{CaCO}_3) + (\Delta H_f^\circ \text{H}_2\text{O}) \cdot 3 - (\Delta H_f^\circ (\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}) - (\Delta H_f^\circ \text{CO}_2))$$

$$\Delta H_{\text{rxn}}^\circ = 41.35 \cdot 2 - 289.5 - 68.3 \cdot 3 + 507.43 + 94.05 = 24.38[\text{kcal/mol}] = 103.305[\text{kcal/kg}]$$

Balance de energía al evaporador

$$Q = m \cdot Cp \cdot \Delta T$$

H₂O

$$\text{Masa de H}_2\text{O a evaporar} = 531[\text{kg}]$$

$$T_i = 77^\circ\text{C}$$

$$T_f = 100^\circ\text{C}$$

$$\lambda_{\text{vap}}^{100^\circ\text{C}} = 2258.9[\text{kJ/kg}] = 539.5[\text{kcal/kg}]$$

$$\text{Calor necesario para evaporar el agua: } Q_{\text{H}_2\text{O}} = m \cdot Cp \cdot (T_f - T_i) + m \cdot \lambda_{\text{vap}}^{100^\circ\text{C}}$$

$$Q_{\text{H}_2\text{O}} = 531 \cdot 1 \cdot (100 - 77) + 531 \cdot 539.5 = 298688[\text{kcal/h}]$$

Ca(NO₃)₂·4H₂O

Masa de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ a calentar = 3367[kg]

$$T_i = 77^\circ\text{C}$$

$$T_f = 100^\circ\text{C}$$

Calor necesario para llevar el $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ a 100°C : $Q_{\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}} = m \cdot C_p \cdot (T_f - T_i)$

$$Q_{\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}} = 3367 \cdot 0.555 \cdot (100 - 77) = 42980[\text{kcal} / \text{kg}]$$

CaCO₃

Masa de CaCO_3 a calentar (incluyendo impurezas) = 102[kg]

$$T_i = 77^\circ\text{C}$$

$$T_f = 100^\circ\text{C}$$

Calor necesario para llevar el CaCO_3 a 100°C : $Q_{\text{CaCO}_3} = m \cdot C_p \cdot (T_f - T_i)$

$$Q_{\text{CaCO}_3} = 102 \cdot 0.197 \cdot (100 - 77) = 462[\text{kcal} / \text{kg}]$$

Calor necesario para llevar evaporar el agua en exceso y calentar la mezcla a 100°C =

$$Q_T = Q_{\text{H}_2\text{O}} + Q_{\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}} + Q_{\text{CaCO}_3} = 298688 + 42980 + 462 = 342130[\text{kcal} / \text{kg}]$$

Se ocupará vapor saturado a 160°C y 6.18[bar]

$$Q_T = Q_{\text{vap}} = m_{\text{vapor}} \cdot \lambda_{\text{vap}}^{160^\circ\text{C}}$$

$$\lambda_{\text{vap}}^{160^\circ\text{C}} = 2125.7[\text{kJ}] = 507.715[\text{kcal}]$$

$$m_{\text{vapor}} = \frac{Q_{\text{vap}}}{\lambda_{\text{vap}}^{160^\circ\text{C}}} = \frac{342130}{507.715} = 674[\text{kg} / \text{h}]$$

Balance de energía al escamador

$$\Delta H_{\text{fusión}}^{\circ} N.C, 42.7^{\circ} C = 21.68[kcal / kg]$$

Ti de cristales: 100°C

Tf de cristales: 40°C

Masa de cristales fundidos a enfriar = 20095[kg/dia] = 3349[kg/h]

$$\text{Calor a extraer: } Q_{\text{extr}} = m \cdot (\Delta H_f^{\circ} + C_{p_{\text{pond}}} \cdot (T_i - T_f))$$

$$Q_{\text{extr}} = 3349 \cdot (21.68 + 0.555 \cdot (100 - 40)) = 184.128[kcal / h]$$

A.5: Pilotaje

Introducción

Pilotaje para ENAEX SA en una planta que se instaló en dependencias del Departamento de Ingeniería Química (DIQ) de la Universidad de Santiago de Chile (USACH), con el objeto de determinar la viabilidad técnica y económica de un posible proyecto industrial para la utilización de ácido nítrico en la producción de cristales de Nitrato de Calcio Tetrahidratado (NCT) a partir de carbonato de calcio.

La planta incluye las operaciones de reacción, filtración, cristalización, disgregación, centrifugación y secado, para producir los cristales y una ganga sólida inerte.

La planta cuenta con algunos equipos del Departamento de Ingeniería Química (DIQ) de la Universidad de Santiago (USACH), adaptados para el efecto, más otros aportados por ENAEX, y tiene una capacidad de producción continua de 62,5 kg/h de cristales, de forma de permitir una producción de 0,5 ton de cristales de NCT en ocho horas de trabajo.

Investigación de laboratorio.

Su objeto fue estudiar la obtención de nitrato de calcio tetrahidratado de acuerdo al diagrama de flujo de la Figura B-1, y las estequiometrias propuestas, con el objeto de proponer la Ingeniería Conceptual del proceso para la obtención de cristales:

Estudio de las condiciones de operación de fases de Reacción, Cristalización y Secado. En la reacción: cinética (orden, si no fuese instantánea) y rendimiento de la reacción, temperatura, tiempo de retención, agitación (de ser necesaria, ¿cuántas rpm?), grado de molienda del CaCO_3 , razón sólido líquido, forma de separación. En la Cristalización: tipo de proceso (evaporación o enfriamiento), agitación, forma de separación. Secado: tipo y condiciones.

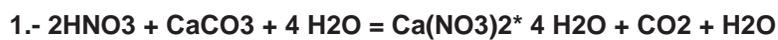
Balances de masa y energía

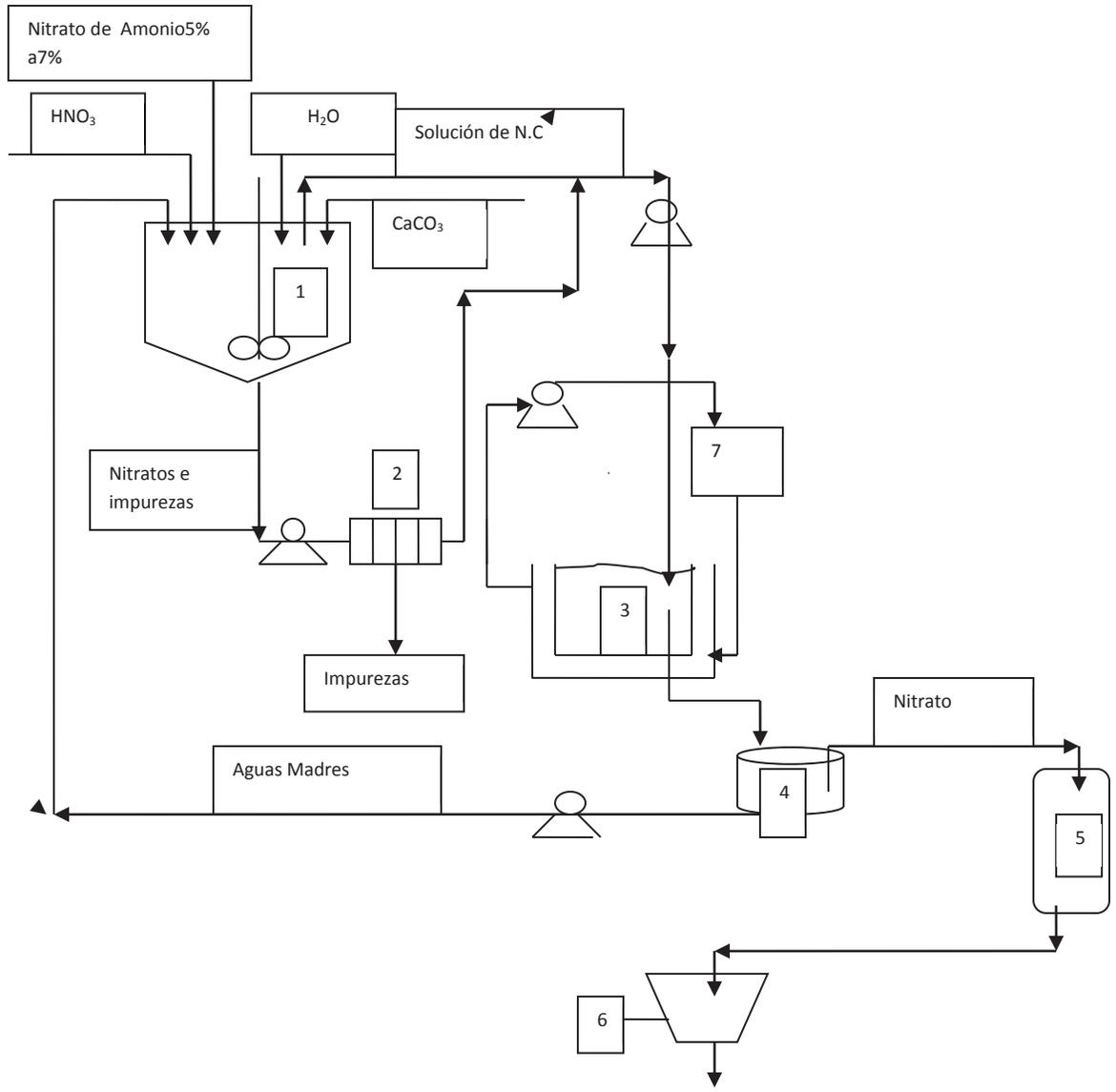
Definición de equipos a nivel industrial (reactor, decantación, cristizador, filtro, centrifugación, otros). Materiales de construcción.

Análisis de materias primas.

Características de los materiales requeridos en la construcción de equipos para una planta piloto de 0,5 ton/día de capacidad, tanto de nitrato de calcio.

Producción de Nitrato de Calcio Tetra Hidratado





- 1 Reactor
- 2 Filtro prensa
- 3 Cristalizador de Nitratos
- 4 Centrífuga
- 5 Secador de bandeja
- 6 Molino
- 7 Torre de enfriamiento de agua

Resultados Preliminares de Laboratorio

Las principales conclusiones que se desprenden de esta primera fase del estudio son las siguientes:

- A. El orden de mezcla más adecuado para la producción de nitrato de calcio es agregar el polvo sobre el ácido. La reacción es prácticamente instantánea y muy exotérmica, al punto que una adición muy rápida del polvo provoca fuerte efervescencia y eventuales proyecciones, lo que hace impracticable e inoficioso determinar la cinética de las reacciones.

Esto apunta a la conveniencia de realizar cada reacción en forma continua, de modo que los flujos de reactivos sean siempre bajos y de esta manera se pueda controlar en mejor forma la temperatura y la seguridad de la operación. Incluso, hace posible la dilución del polvo en pulpa reaccionada para su ingreso al reactor, puesto que ésta no debiera contener ácido libre (y si lo hubiera, esta operación permite neutralizarlo y a la vez que darle un mayor tiempo de residencia a la reacción). Por otro lado, dado el bajo tiempo de reacción requerido, el volumen del reactor debiera ser reducido. Otra conveniencia es que dado que el reactor opera continuamente a pH aproximadamente neutro, su material de construcción no necesita poseer una resistencia especial.

- B. El uso de cantidades de agua superiores a la estequiométrica para obtener las sales hidratadas, si bien facilita la filtración de la pulpa reaccionada (para separar la ganga), como también la de los cristales, entorpece la generación de éstos al hacer muy lenta la cristalización, y produce aguas madres relativamente concentradas, cuyo manejo es engorroso, requiriéndose más equipamiento y de mayor tamaño, evaporación y eventualmente disposición de residuos líquidos.

Esto hace recomendable usar la menor cantidad de agua posible, preferiblemente no agregar agua por sobre la cantidad estequiométrica. Esto hace necesario operar tanto el reactor como el filtro a una temperatura superior a la de fusión del nitrato puro, para evitar la cristalización de éste en su interior.

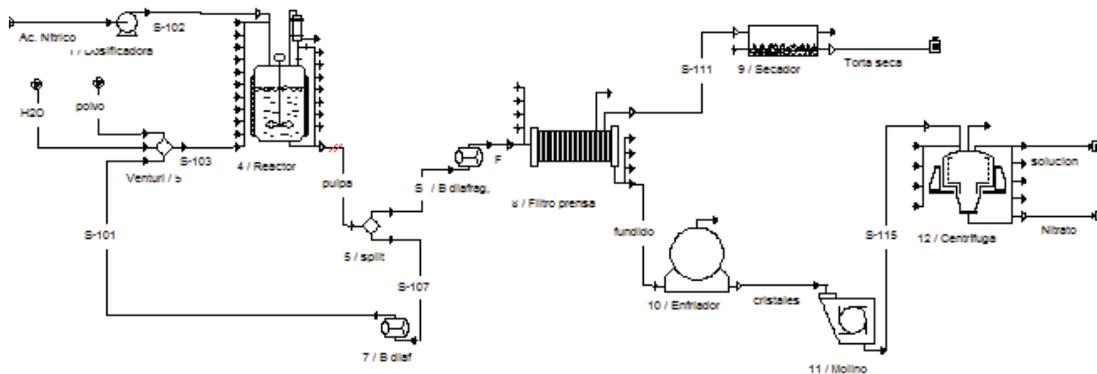
- C. La filtración en caliente de la solución fundida de los nitratos es factible, pero debiera efectuarse por presión y no por vacío por cuanto éste último provoca evaporación, enfriamiento y eventualmente cristalización de los nitratos.

Esto permitiría que la pulpa reaccionada fuese filtrada en forma económica, en caliente, a una temperatura superior a la de fusión de los cristales, por ejemplo en un filtro prensa, usando presión. En esta operación se podría aprovechar el calor generado en la reacción.

Diseño conceptual propuesto.

El análisis de las experiencias preliminares permitió proponer un diseño conceptual que se materializa en el proceso que se explicita en el diagrama de flujo de la Figura B-2.

Figura B-2: Diseño Conceptual Propuesto para el Pilotaje.



Diseño Conceptual para la Producción de Nitrato de Calcio Tetrahidratado.

A un reactor agitado, conteniendo una cantidad dada de pulpa reaccionada a una temperatura de 100°C, se agrega, continuamente, carbonato de calcio de 98% de pureza o superior, con una granulometría de 100 a 200 μm , suspendido en pulpa reaccionada recirculada desde el mismo reactor, en una proporción de 5 a 20%. La temperatura se mantiene removiendo calor de la pulpa reaccionante por evaporación en el reactor. Simultáneamente, al reactor se alimenta un caudal de ácido nítrico diluido al 58% o superior para producir el tetrahidrato por reacción con el caudal de calcita que está siendo alimentada. El tiempo de residencia medio queda fijo por la razón entre el volumen de la pulpa reaccionada que se mantiene en el reactor y el flujo volumétrico total a través del reactor. Una bomba de diafragma saca un caudal de pulpa del reactor, parte de la cual se recircula para agregarle la calcita y el resto se pasa a un filtro prensa, a 90-100 psig, el cual es mantenido a una temperatura superior a 70°C. Dado el bajo contenido de impurezas de las materias primas, la cantidad de torta a obtener será reducida, con lo que el tamaño del filtro también será reducido, y debiera ser especificado para un tiempo de operación extenso, de forma de reducir al máximo la frecuencia de su limpieza. El retrolavado de la torta se hará por cargas de agua pura o de agua del lavado diluida, recirculada. La reducida cantidad torta determina que la cantidad de agua del lavado requerida también sea mínima. La torta lavada se seca y se dispone en vertedero. El filtrado, constituido por la sal fundida, es directamente el producto final, cristalizándose tan pronto su temperatura se reduce por debajo del punto de fusión cuando se esparce en un rodillo refrigerado, por ejemplo a 40°C, procediéndose al ensacado del producto. Eventualmente, si los cristales salen secos y en escamas, podría ser necesario un molino para disgregarlos. Asimismo, si en la reacción se usara una cantidad de agua levemente superior a la estequiométrica (por ejemplo, un 5%), se requeriría también una centrífuga, para rebajar su contenido de agua a 2%.

Equipamiento

La planta piloto se construyó para una capacidad de 0,5 toneladas en 8 horas de producción continua.

El listado de equipos se detalla en la siguiente figura.

Listado de Equipos de la Planta Piloto.

Equipo	Especificación
Reactor	SS 316, 58 L, 58 cm de altura y 35,7 cm ϕ interno, tapa plana y fondo combado, con patas de 70 cm desde el fondo. Tapa con tres entradas de 3/4" ϕ con válvulas, un tubo de salida de vapor de 4" ϕ , 1m largo. Agitador de 3 paletas c/u en 45° y motor con variador de frecuencia (0-300 rpm), enchaquetado (para calefacción o enfriamiento por evaporación, con entrada de 3/4" ϕ y salida de 80 cm ²), 4 deflectores, mirilla. Salida de fondo de 2" ϕ con válvula de fondo de estanque.
Bombas dosificadora HNO ₃	0-2 L/min, Teflón, 1 bar
Bomba dosificadora de agua	0-3 L/min, 1 bar
Bomba de diafragma a filtro	0-2,5 L/min, Teflón, 7 bar
Bomba de diafragma recirculac.	0-4,7 L/min, Teflón, 1 bar
Tolva alimentación de polvo	5L, fondo cónico 60°, plástico.
Tornillo alimentador de polvo	0-1,1 kg/min, plástico
Venturi	Flujo de recirculación, que pasa por el venturi: 4 L/min de un líquido a 60-90°C (ge. 1.5 aprox.). Debe arrastrar 1 kg/min de carbonato de Ca.
Filtro prensa	7 bar operación, 5000 bar de apriete, 7 placas (+2 tapas) de 0,572 L de cámara, placas de 15 cm de lado, SS 316.
Secador de torta	2,5 kg/h de agua de lavado embebida a evaporar. Cancha con serpentín.
Rodillo enfriador de cristales	Retira 4000 kcal/h desde 132 kg/h de cristales fundidos a 100°C (para quedar a 75°C), con serpentín o camisa para 50 L/h de agua de enfriamiento a 20°C (que se calienta hasta 70°C), SS 316

Molino de martillo	200 kg/h, SS 316
Centrífuga	200 rpm, 200 kg/h, SS 316
Sistema de control	<p>Sistema de control tipo PLC. Un PC de control con Ethernet. El reactor debe ser provisto de:</p> <p>Sensor de pH 6,5, enlazado con la bomba dosificadora de ácido.</p> <p>Sensor de temperatura enlazado con la alimentación de agua a evaporar.</p> <p>Sensor de nivel enlazado con alarma y energía de las bombas de alimentación y descarga.</p>

En general, se ha considerado una holgura de 20% respecto de los requerimientos teóricos.

Puesta en Marcha de la Planta Piloto

Luego de instalada la planta y efectuada la marcha blanca, se fue probando cada equipo para la producción de NCT, detectándose una serie de problemas, cuyas correcciones condujeron a modificaciones tanto al diseño conceptual como también al equipamiento, las que dieron origen al diagrama de la Figura B-1 y se detallan a continuación.

Los principales problemas fueron los siguientes:

- 1) El venturi, diseñado para arrastrar 1 kg/min de carbonato de Ca con un flujo de 4 L/min de recirculación de cristales fundidos, tuvo un comportamiento errático, llegando a taparse en varias ocasiones, por lo que fue eliminado y sustituido por alimentación directa del carbonato a través de una entrada en la tapa del reactor.
- 2) Se eliminaron las mirillas del reactor y se operó abierto.
- 3) Los equipamientos de control de pH y de nivel no fueron necesarios, dado que se logró estabilizar la operación utilizando sólo la temperatura. Para el nivel no se contó con una superficie de líquido quieta para su operación estable. El pH requiere una instalación accesoria, que enfríe y diluya una pequeña porción de la mezcla, por lo menos al 25% en agua.
- 4) Con alimentación continua, a máxima capacidad, se formó espuma en el reactor, lo que hizo que eventualmente la mezcla reaccionante rebalsara fuera de él. Esto se

debe a que la reacción produce burbujas de CO_2 (g) que, unidas a las del agua evaporada, forman espuma, sobre la cual cae el polvo fino de calcita, impidiéndole su incorporación a la pulpa, lo arrastra hacia arriba y, eventualmente, rebalsa del reactor. Esto se solucionó reduciendo los flujos e incrementando la velocidad del agitador, de 60 a 180 rpm, y usando un volumen útil del reactor reducido (50%).

- 5) La ganga no reaccionada, suspendida en la masa reaccionante, dada su fina granulometría (calcita de 400 mallas), logró pasar por la tela filtrante, impidiendo clarificar el filtrado. Esto se logró solucionar formando una precapa de kieselguhr en el filtro e introduciendo una línea de retorno al reactor. Esto permitiría incluso operar con carbonato más fino, para facilitar la reacción.

Diseño Conceptual Corregido para la Producción de Nitrato de Calcio Tetrahidratado

A un reactor agitado, conteniendo una cantidad dada de pulpa reaccionada, a una temperatura de 100°C , se alimenta, simultánea y continuamente, carbonato de calcio de 98% de pureza nominal, de una granulometría de 350-400 mallas, y un caudal de ácido nítrico diluido al 60%, dosificados estequiométricamente para producir el caudal del tetrahidrato requerido. La temperatura de la pulpa reaccionante se mantiene en 120°C , mediante calefacción indirecta con vapor entre 20-40 psig en la chaqueta del reactor, lo que permite que el agua en exceso contenida en el ácido nítrico (en relación al agua de constitución del NCT) sea removida continuamente en el mismo reactor, por evaporación al aire. El tiempo de residencia medio en el reactor queda fijo por la razón entre el volumen de pulpa reaccionada que se mantiene en su interior y el flujo volumétrico total a través del mismo. Una bomba de diafragma saca un caudal de NCT fundido del reactor que se pasa a un filtro prensa, a 90-100 psig, el cual se mantiene siempre a una temperatura superior a 60°C (lo mismo que todas las cañerías). Si el contenido de impurezas de las materias primas es bajo, la cantidad de torta a obtener será reducida, por lo que el tamaño del filtro también será reducido, y será especificado para un tiempo de operación extenso, de forma de reducir la frecuencia de su limpieza. Al momento de efectuar esta última, el retrolavado de la torta se hace con cargas de agua hirviendo, ya sea pura o de lavado reciclada. Una reducida cantidad de torta determina que la cantidad de agua del lavado requerida también sea mínima, y será motivo de un balance económico el lavar la torta para recuperar los cristales (en cuyo caso éstos se reemplazan por agua, lo que pudiera obligar a secar la torta para su disposición). La torta fragua al aire, o se seca en caso de lavarla, y se dispone en vertedero. El

filtrado, constituido por la sal fundida de NCT, es directamente el producto final, que se cristaliza tan pronto su temperatura se reduce por debajo del punto de fusión cuando se esparce en un rodillo enfriado, cuando alcanza la temperatura de cristalización (48°C). Se dispondrá de un molino para disgregar los cristales secos que, eventualmente, pudieran salir en forma de escamas, procediéndose finalmente a su ensacado.

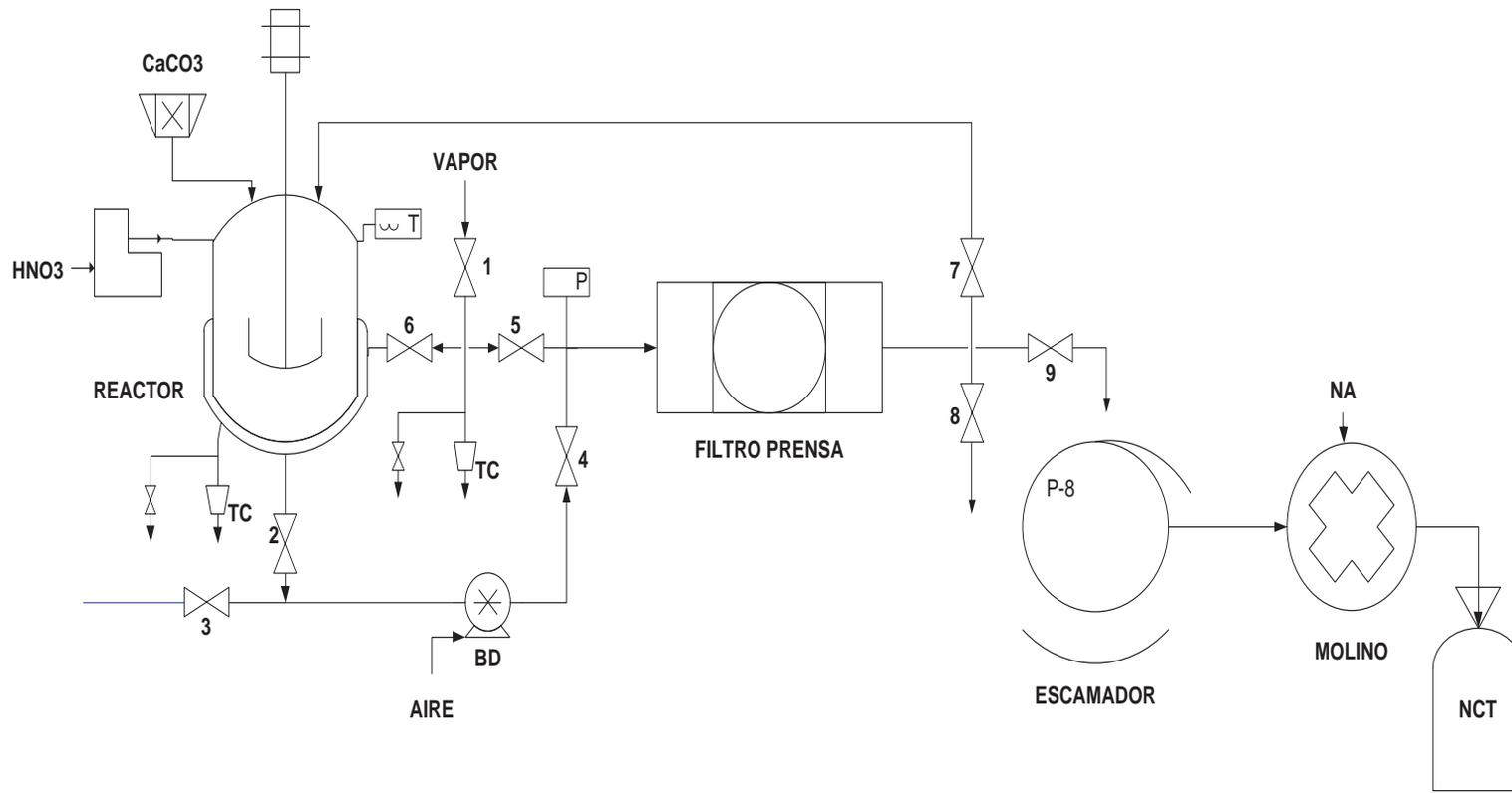


Diagrama Corregido de la Planta Piloto.

Protocolo de Operación Continua de la Planta Piloto

- a) Alimentar el reactor con 15 L de mezcla reaccionante recién preparada externamente, o cristales fundidos.
- b) Previa purga de todas las líneas de vapor, regular la temperatura de la pulpa reaccionante en 120°C mediante la presión del vapor en la chaqueta del reactor (>20 psig).
- c) Alimentar continua y simultáneamente el carbonato de calcio con el molino de tornillo y el ácido con la bomba dosificadora, calibrados ambos previamente para los caudales deseados.
- d) Alimentar agua de refrigeración al escamador.
- e) Operar la bomba al filtro con un flujo similar al de alimentación al reactor (menos el caudal de agua evaporada), manteniendo abierto el circuito de recirculación mientras se clarifica el filtrado.
- f) Una vez clarificado el filtrado, cerrar el circuito de recirculación y abrir el circuito hacia el escamador, temperando previamente la línea con vapor.
- g) Ensacar directamente el producto que sale del escamador si sale regularmente disgregado. En caso contrario, pasarlo previamente por el molino. En esta operación se puede dosificar el nitrato de amonio al NCT, al 7% p/p.
- h) Cuando la operación del filtro se vuelva lenta debido a que se ha colmatado, se deberá cortar la alimentación de reactivos al reactor, cerrar la válvula 2, y alimentar un volumen de agua caliente (equivalente a tres veces el volumen de torta) desde la válvula 3 para lavar la torta y arrastrar la solución de cristales hacia el reactor por la línea de retorno al mismo. Luego, se detiene la bomba, se abre el filtro, se retira la torta, se lava platos y marcos, y se rearma el filtro.
- i) La operación del filtro y la alimentación de reactivos al reactor se reinician simultáneamente, una vez que se ha evaporado el agua de lavado agregada al reactor. La torta se deja secar al ambiente (fragua) y se transporta para disponerla en vertedero.

Operación Realizada en Pilotaje, Balances de Masa y Energía.

La planta piloto se operó en dos formas con el objeto de obtener los coeficientes técnicos de materia y energía:

Operación Semicontinua de Obtención de Nitrato de Calcio.

A una cantidad dada de producto seco y fundido en el reactor se agregó, en forma continua, sin retirar producto, un total de 52,13 kg de ácido nítrico y 31,89 kg de calcita, para producir 58,6 kilos de NCT en un período de medición de parámetros de 2,45 h.

Se observó que, en lugar de 21,87 kg de calcita de 96% de pureza que habrían sido necesarios para neutralizar a los 52,13 kg de ácido, fueron necesarios 31,89 kg. Esta proporción de ácido a calcita, de 1,6343 p/p, fue corroborada en laboratorio, incluso diluyendo la mezcla al final de la reacción, con el objeto de descartar un efecto de restricción a la transferencia de masa por limitación de cantidad de solvente (vehículo para la reacción). Así, estimando que el fenómeno se produce por Ca insoluble en la calcita, para efectos del proyecto su pureza real se considera de 77,87% p/p.

La planilla a continuación muestra el balance y la correspondiente reconciliación de datos.

Reconciliación de datos teóricos a técnicos.

Reactantes	% Pureza	PM,g/molg	coef esteq	Molkg	Especie esteq a agregar, kg	Reactivo a agregar kg	g.e	Volumen, L	especie tpu esteq	cp especie cal/g°C
CaCO ₃ *	77.87	100.09	1	0	25	31.89	2.711	11.76	0.424	0.197
HNO ₃	60	63.02	2	0	31	52.13	1.363	38.24	0.534	0.455
H ₂ O	100	18.016	3	1	13	-7.44	1	-7.44	0.229	1
Nitrato de amonio	95	80.05				3.67	1.725	2.13		0.40
* pureza nominal 98%					pulpa rx sin agua exceso	87.69	1.682	52.14		0.543
					pulpa rx con agua exceso	95.13	1.536	61.94		
Producto	% Pureza	PM,g/molg	coef estq	Molkg		Masa kg	g.e	Volumen, L		cp
Ca (NO ₃) ₂ *4 H ₂ O	100	236.16	1	0		58.60	1.82	32.20		0.555
CO ₂	100	44.01	1	0		10.92				0.259
					Formulado	57.87	1.81	31.97		0.55

El valor de -7,44 kg para el agua indica que es la cantidad que debe evaporarse para dejar "seco" al NCT, es decir libre de agua de exceso. Las velocidades de alimentación

utilizadas, de 220 g/min de calcita y de 250 g/min de ácido, permitieron que el producto terminara seco, habiéndose producido 6,17 kg de condensado en el período de prueba, lo que significa un consumo de energía de 1357 kcal/h. Esto se concilia con el balance de energía estequiométrico que se muestra a continuación, que requiere 1273 kcal/h, bajo una temperatura de salida de la masa fundida, de 124°C, que corresponde a la temperatura más baja a la cual ya no se observa desprendimiento de vapores.

Balance de energía estequiométrico

$\Delta H^{\circ}r$ práctico, 25°C, kcal/kg NCT	111.5						
Temperatura alim. reactivos, °C	25	Temp. opn., °C		124			
Agua a evaporar kg/h	3.0		velocidad del vapor, L/s	1.5		Dia. ducto, cm	2.5
Q por agua evaporada, kcal/h	1901		Q mezcla rx que sale, kcal/h	1924		Q CO ₂ , Kcal/h	114
Q rx, kcal/h	2667		Q total sale, kcal/h	3939		Q exptl/Q req	1.066
Vapor total en u, kg	6.17					Q exptl, kcal/h	1357
						Vapor, kg/h	2.52

A continuación, se usó un filtro de placas y marcos cuyas características muestra la tabla B-4, para filtrar parte de la pulpa de reacción y así separar la ganga de los cristales.

Característica filtro de placas.

No. cámaras	7					Presión trabajo	5.6 bar
Nº de placas	6 + 2 tapas					Presión apriete	5000 bar
Vol. Cámara	0.5723	L	Area filtración	450.7	cm ² /cámara		
Espesor Torta	2.54	cm					
Espesor Placa	6	cm	ancho y alto placa, cm		15.0		
Largo filtro	0.52	m					

Por experiencia previa, se había logrado establecer una proporción de 80 gramos de kieselguhr para siete cámaras, el cual se bombea al filtro suspendido en agua caliente al 10-15%. El filtro se colmató con 7,79 kg de torta, de los cuales, 2,96 corresponden a cristales embebidos (es decir, un 7,5% p/p del total de producto producido), lo que fue determinado lavando una muestra de la torta. En esta ocasión, los cristales embebidos en la torta no fueron recuperados. El ciclo completo de operación del filtro fue de 35 min. De este período se obtuvo 36,47 L de filtrado, y la filtración de toda la pulpa (que se completó durante una segunda operación del filtro) produjo 54,2 kg de filtrado, al que se agregó 3,67 kg de nitrato de amonio, y luego de disueltos éstos se cristalizó el producto en el escamador, obteniéndose 57,87 kg de producto formulado.

Balance de la operación de filtrado.

Balance durante la operación del filtro									
	kg	L		g.e.	%p/v cristales embebidos				
Kieselguhr	0.081								
ganga+kieselguhr	4.83	2.38		2.03					
ganga+kieselguhr+cristales embebidos	7.79	4.01		1.94	25.2			cristales en torta, kg:	2.96
Filtrado	36.47	20.04		1.820				tpu del total producido p/p	0.075
agua de lavado	12.02								

Operación Continua de Obtención de Nitrato de Calcio.

En esta ocasión, se calculó la masa de pulpa a filtrar de modo que aproximadamente colmatara el filtro, y de este modo, el periodo de operación de éste no interfiriera en los cálculos.

A una cantidad dada de producto seco y fundido en el reactor se agregó, en forma continua, un total de 25,42 kg de calcita y 41,54 kg de ácido nítrico, retirándose simultáneamente producto, para producir 46,7 kg de NCT en un período de medición de parámetros de 1,26 h. La planilla a continuación muestra el balance y la correspondiente reconciliación de datos.

Reconciliación de datos teóricos a técnicos.

Reactantes	% Pureza	PM,g/molg	coef esteq	Molkg	Especie esteq a agregar, kg	Reactivo a agregar kg	g.e	Volumen, L	especie tpu esteq	cp especie cal/g°C
CaCO3*	77.87	100.09	1	0	20	25.42	2.711	9.38	0.424	0.197
HNO3	60	63.02	2	0	25	41.54	1.363	30.48	0.534	0.455
H2O	100	18.016	3	1	11	-5.93	1	-5.93	0.229	1
Nitrato de amonio	95	80.05				3.02	1.725	1.75		0.40
* pureza nominal 98%					pulpa rx sin agua exceso	69.98	1.682	41.61		0.542
					pulpa rx con agua exceso	75.91	1.536	49.42		
Producto	% Pureza	PM,g/molg	coef estq	Molkg		Masa kg	g.e	Volumen, L		cp
Ca (NO3)2*4 H2O	100	236.16	1	0		46.70	1.82	25.66		0.555
CO2	100	44.01	1	0		8.70				0.259
					Formulado	47.56	1.81	26.28		0.55

A los flujos de 340 g/min de calcita y de 400 g/min de ácido (mayores que en el caso anterior) todavía se obtiene producto seco, produciéndose 6,33 kg de condensado en el período de prueba, lo que significa un consumo de energía de 2158 kcal/h. Esto se concilia con el balance de energía estequiométrico que se muestra a continuación, que requiere 1972 kcal/h, equivalente a un consumo de vapor de 4 kg/h.

Balance de energía estequiométrico

Temperatura alim. reactivos, °C	25	Temp. opn., °C		124		
Agua a evaporar kg/h	4.7		velocidad del vapor, L/s	2.4	Dia. ducto, cm	3.2
Q por agua evaporada, kcal/h	2945		Q mezcla rx que sale, kcal/h	2982	Q CO2, Kcal/h	177
Q rx, kcal/h	4133	Q total sale, kcal/h	6105	Q req, kcal/h	1972	
Vapor total en u, kg	5.04		Qexptl, kcal/h	2158	Vapor, kg/h	4.00

El filtro se operó bajo las condiciones de la tabla adjunta, y dio los resultados de la tabla subsiguiente.

Característica filtro de placas.

No. cámaras	7					Presión trabajo	7 bar
Nº de placas	6 + 2 tapas					Presión apriete	5000 bar
Vol. Cámara	0.5723	L	Area filtración	450.7	cm2/cámara		
Espesor Torta	2.54	cm					
Espesor Placa	6	cm	ancho y alto placa, cm		15.0		
Largo filtro	0.52	m					

Balance de la operación de filtrado.

Balance durante la operación del filtro						
	kg/u	L/u		%p/v cristales embebidos		
Kieselguhr	0.095			g.e.		
ganga+kieselguhr	5.72	2.82		2.03		
ganga+kieselguhr+cristales embebidos	7.88	4.01		1.97	17.2	cristales en torta, kg: 2.16
Filtrado	44.54	24.47		1.820		tpu del total producido p/p 0.046
agua de lavado	12.02					

En este caso se observa una menor cantidad de cristales embebidos en la torta, probablemente debido a la mayor presión de trabajo, 7 bar en lugar de 5,6 en el caso anterior. Se obtuvo 44,54 kg de filtrado, lo que sumado a los 2,16 kg embebidos en la

torta, totalizan 46,70 kg de NCT. Nuevamente, no se recuperó los cristales de la torta, por lo que el agregado de 3,02 kg de NA, da 47,56 kg de producto formulado.

Si bien es cierto la operación continua es posible, su estabilidad en el diseño actual de la planta piloto es precaria, dada la dificultad de mantener un flujo estable y preciso con la bomba de diafragma, más aun considerando la reducción del flujo en el tiempo, en la medida que el filtro se va colmatando.

Producción de Nitrato de Calcio Tetrahidratado

Usando la operación semi continua detallada más arriba, se produjeron aproximadamente 1200 kg de NCT. Primero, se produjeron 1750 kg de pulpa, en cargas de aprox. 50 L que se filtraban inmediatamente. El filtrado se acumuló para luego ser secado por evaporación del agua de exceso y finalmente se dejó enfriar para cristalizar.

Las condiciones de la reacción fueron las siguientes:

El reactor se carga inicialmente con aprox. 15 L (hasta nivel de la termocupla) de pulpa filtrada de cristales (con agua de exceso), operación que se realizó sólo en el primer batch. Luego, se alimenta ácido con bomba dosificadora calibrada a 1,0 L/min, y 0,85 kg/min de calcita de 350 mallas con el molinillo, hasta un volumen aprox. de 55 L en media hora, al cabo de los cuales, 40 L de pulpa eran extraídos y filtrados, dejando 15 L de pulpa en el reactor para que sirvieran de base para la carga siguiente. El vapor de calefacción se mantiene en 20 psig, purgando periódicamente.

Las condiciones de la evaporación fueron las siguientes:

Al reactor, conteniendo 15 L de cristales secos fundidos, a 220 rpm, a 125°C, se alimenta continuamente filtrado a razón de 1 L/min, a temperatura ambiente, hasta que la temperatura del reactor disminuye a 120°C. Una vez alcanzada esta temperatura, se deja de alimentar filtrado y se cronometra el tiempo que le toma al reactor volver a los 125°C. Este último tiempo es registrado en las tablas a continuación junto al volumen alimentado, V, tablas que constituyen ejemplos de la dinámica del reactor. El procedimiento es

repetido varias veces, al cabo de las cuales se retira filtrado evaporado hasta alcanzar el nivel de la carga inicial (termocupla), el cual se deja cristalizar por enfriamiento al aire.

V alim, L	trecup, min)	t recup/t ret
1.03	2.25	2.18
1.00	2.38	2.38
1.22	2.77	2.27
1.72	1.98	1.16
5.83		
13.00	*	
23.80		

V alim, L	tiempo, min	t recup/t ret
1.3	2.50	1.88
1.9	2.17	1.17
2.2	2.02	0.90
3.0	1.95	0.65
11.0	0.83*	0.08
19.4		

V alim, L	trecup, min)	t recup/t ret
1.25	7.00	5.60
1.03	4.27	4.13
1.65	1.83	1.11
3.50	1.70	0.49
4.25	2.13	0.50
4.00	2.63	0.66
5.00	2*	0.40
20.68		

V alim, L	trecup, min)	t recup/t ret
13.50	1.72	0.13
5.00	*	
18.50		

V alim, L	trecup, min)	t recup/t ret
1.50	6.67	4.44
1.13	4.38	3.87
1.15	5.23	4.55
1.57	3.40	2.17
2.25	1.83	0.81
5.00	1.93	0.39
4.67	2.32*	0.50
17.27		

V alim, L	trecup, min)	t recup/t ret
1.02	3.03	2.98
1.30	1.75	1.35
2.08	1.32	0.63
2.23	1.45	0.65
1.97	1.48	0.75
2.07	1.57	0.76
2.07	1.77	0.85
2.00	2*	1.00
14.73		

V alir	V alim, L	trecup, min)	t recup/t ret
1.1			
1.7	0.45	1.52	3.37
1.8	0.55	1.90	3.45
3.6	0.67	1.88	2.83
3.5	0.68	1.38	2.02
3.5	1.12	0.97	0.87
4.3	2.02	0.88	0.44
19.6	3.30	0.90	0.27
	3.85	1.07	0.28
	3.42	1.28	0.38
	6.00	0.73	0.12
	5.00	*	
	27.05		
			197
	*Descarga		

Dado que el flujo de alimentación utilizado en todos los casos fue de 1 L/min, V representa el tiempo de retención promedio del volumen agregado, y cuando éste sea igual al tiempo de recuperación del reactor se tendrá justo las condiciones para que los cristales salgan secos, es decir, el volumen a agregar (a razón de 1 L/min) cuando la temperatura del reactor se mantiene a 125°C (dada una carga inicial en el reactor de 15 L a esa temperatura).

Principales Observaciones

Las tablas muestran que, dado el volumen inicial de reacción del orden de 15 L, la razón entre el tiempo de recuperación del reactor y el de retención promedio del volumen alimentado disminuye con el agregado secuencial de volúmenes de solución concentrada de NCT (Valim, básicamente cristales en el agua de exceso del HNO_3). De estos datos se desprende (por interpolación entre la primera y la última columna de las tablas a continuación) que la razón señalada toma valor 1 para un valor promedio (estimado \pm desviación estándar) de V de $1,9 \pm 0,4$ min, lo que permite regular el flujo de filtrado entre 1,1 y 2,7 L/min para asegurar cristales secos en un régimen de evaporación continuo.

Observaciones y Recomendaciones al Proceso Modificado

- 1) El bajo rendimiento observado en las experiencias (92.5%) puede tener varias causas posibles:
 - a) Pérdida de nitrógeno por efectuar la reacción a alta temperatura (superior a 120°C), la que se necesita para evaporar el agua libre de los cristales y así secar

el NCT. No fue posible cuantificar esta pérdida, pero se encontró una referencia (Tegeder y Mayer) que la documenta como la razón para efectuar la reacción a no más de 100°C.

- b) Proporción elevada de Ca insoluble presente en la calcita. Esto se probó en laboratorio agregando carbonato (supuestamente de 98% p/p) a ácido nítrico de 60%, hasta neutralidad. Cuando la pulpa alcanzó una relación ácido/calcita de 1,6343, llegó a pH de 6,2, y permaneció prácticamente inalterado ante la adición de más calcita, pero se neutralizó totalmente mediante el agregado subsecuente de cal apagada de 93% de pureza en una proporción de cal a calcita de 0,0014:1 p/p.
 - c) Granulometría muy gruesa del carbonato, lo que dificultaría la reacción, haciéndola más lenta, de forma que al tiempo de retención establecido no se logra completar la reacción. Este parece ser el caso cuando se usa calcita de 350 mallas, pero cuando se usó de 400 mallas tampoco mejora sustantivamente, con el agravante que no se logró clarificar la solución. Sin embargo, el agregado de kieselguhr facilita la filtración por lo que es recomendable su uso en todo caso, especialmente si se usa calcita más fina. El kieselguhr se suspendió al 10-15% p/p en agua caliente y se bombeó al filtro para depositarlo en los marcos, previo a la filtración de la pulpa.
- 2) La incorporación de nitrato de amonio a los cristales fundidos, para reducir su higroscopicidad, en una proporción NA/NCT de 0,0678 p/p, se efectuó antes de su secado para facilitar su homogenización y evitar efectuar esta operación en un equipo adicional. Esto provocó un aumento del punto de ebullición de la masa fundida a temperaturas superiores a 135°C, dificultándose considerablemente la evaporación.
 - 3) La evaporación continua en el reactor se logró pero con flujos reducidos, del orden de 50 L/min, es decir menos de la mitad de la capacidad de diseño, puesto que a flujos superiores los cristales salieron húmedos.

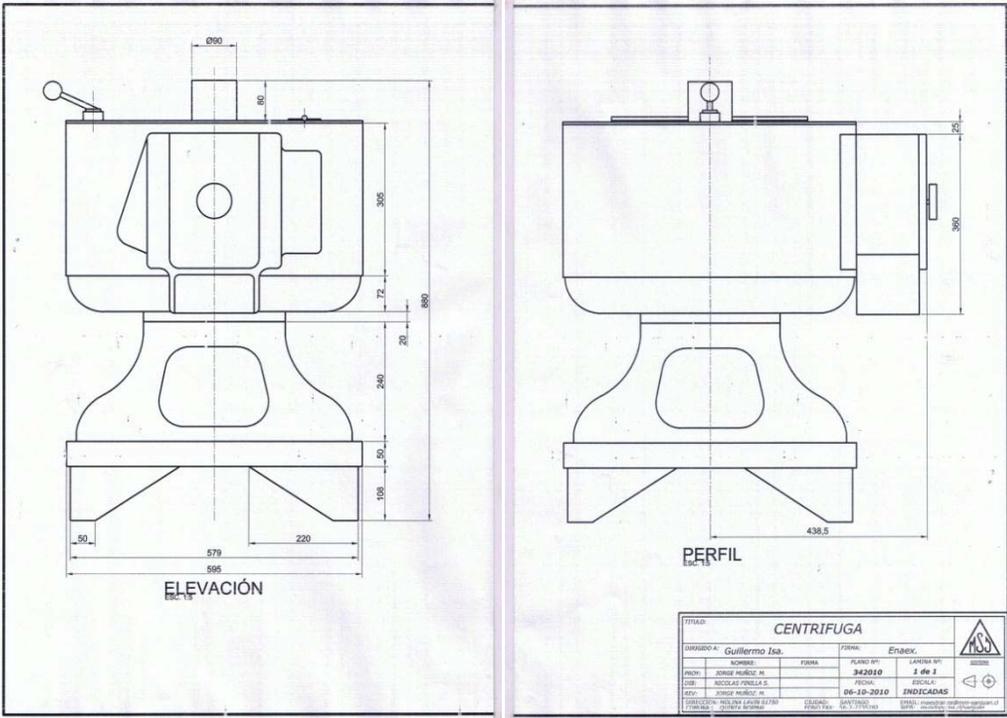
Estas observaciones se utilizaron para sugerir las siguientes modificaciones al proceso y equipamiento:

Principales Recomendaciones

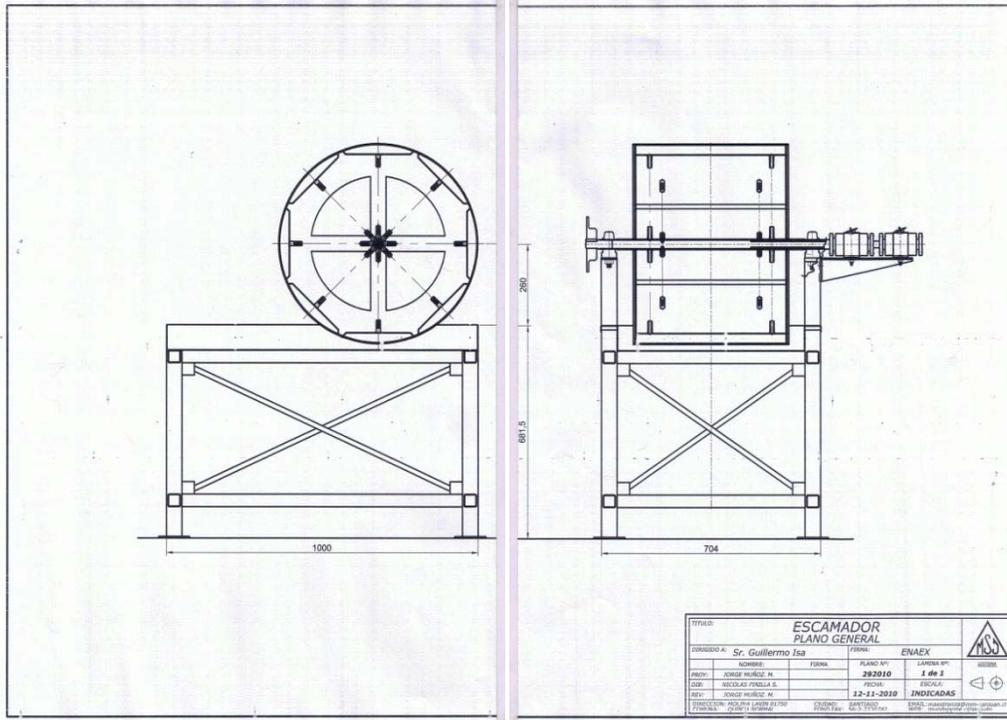
- a) Operar en continuo, por rebalse, controlando sólo la temperatura. También es posible controlar el nivel (en el interior de la media caña) y el pH en un dispositivo que enfríe y diluya la pulpa, enlazado con la alimentación de ácido.
- b) El reactor debe ser de menor diámetro que altura, con el objeto de facilitar la incorporación del polvo a la pulpa con una agitación moderada, preferentemente el polvo debiera suspenderse en pulpa para alimentarlo al reactor, lo que requiere de un par de mezcladores externos que operarían en forma semi continua y alternada, mezclando una cantidad dada de polvo con una cantidad dada de pulpa extraída del reactor, la que se dosificaría al reactor simultáneamente con el ácido en cantidades estequiométricas. La cal debe agregarse junto con el carbonato.
- c) El filtro se diseña para operar a lo más un par de veces por turno. Esto indica la conveniencia de tener un estanque pulmón a la salida del reactor, para independizarlo de la operación del filtro, lo que además permitiría un mayor tiempo de retención para la evaporación previa a la filtración, aprovechando al máximo el calor de reacción.
- d) La evaporación del agua de exceso es el fenómeno más lento de los que se verifican en el reactor, lo que induce a recomendar ya sea el uso de ácido de mayor concentración o un evaporador para completar el secado de los cristales posteriormente a su filtración. En este último caso, además se facilitaría la filtración puesto que se efectuaría sobre la pulpa parcialmente seca que sale del reactor, conteniendo alrededor de 7,5% p/p de sólidos suspendidos. La mejor alternativa depende de un balance económico.
- e) El nitrato de amonio debe agregarse a la masa de cristal fundido y seco, o sea después de la evaporación del agua de exceso y previo a su cristalización ya sea en una torre de prillado o en un enfriador de banda o de rodillo. El prillado tiene la ventaja de no requerir molino.

Planos Constructivos de los Equipos Principales

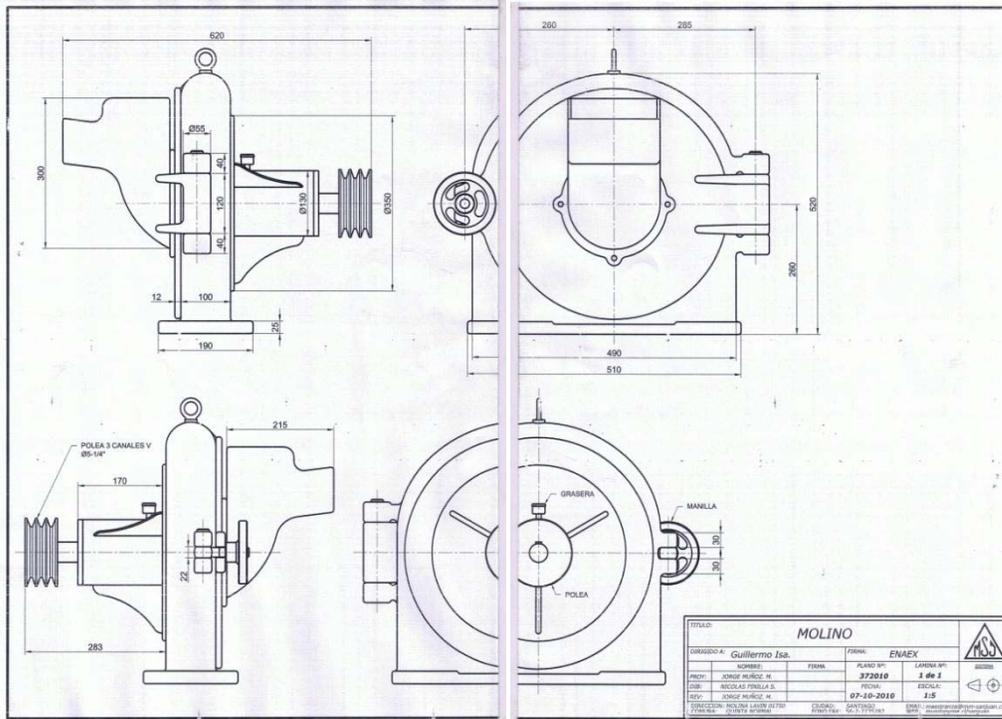
1. Centrífuga



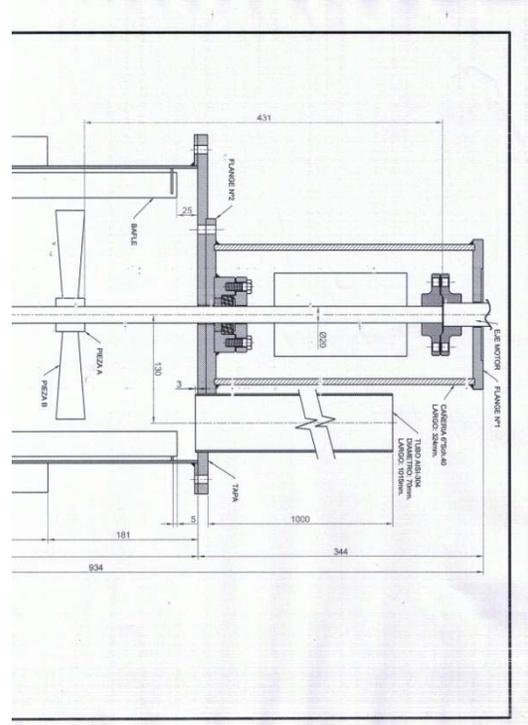
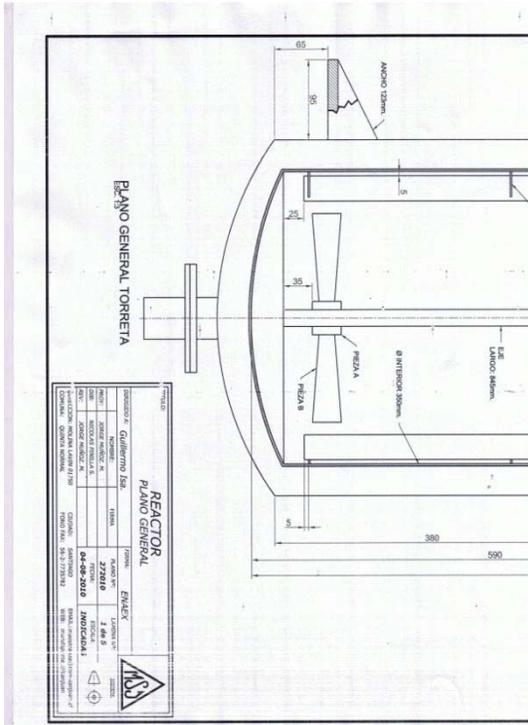
2. Escamador



3. Molino

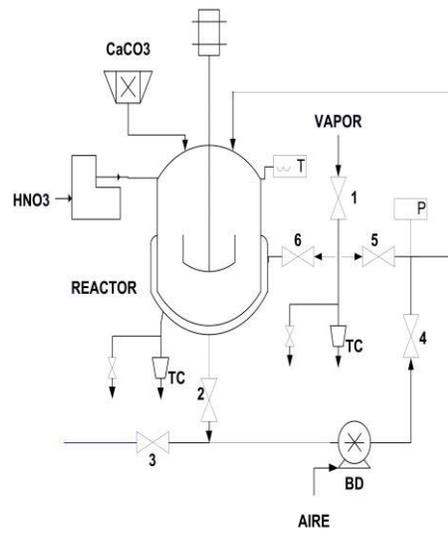


4. Reactor

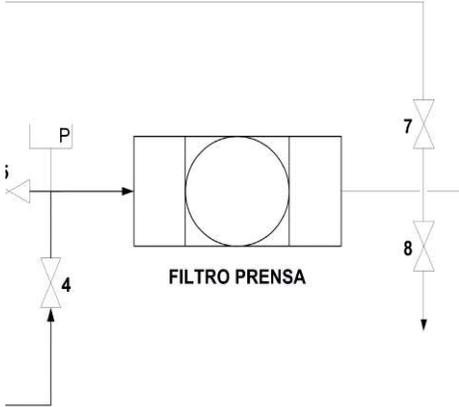


Fotografías Planta Piloto.

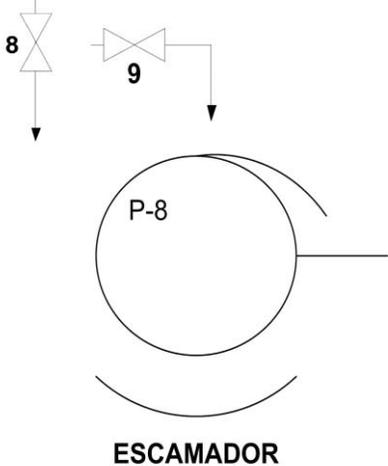
Reactor:



Filtro Prensa:



Escamador:



Planta Piloto.

