

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA



**ESTUDIO DE DISEÑO TÉCNICO DE PRE INVERSIÓN PARA
UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE ACRILONITRILO.**

Por:

ADRIÁN ISRAEL DELGADO TORREZ

**Modalidad de graduación (Estudio de Pre-factibilidad), presentado a
consideración de la “UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL
SARACHO”, como requisito para optar el grado académico de Licenciatura en
Ingeniería Química.**

Octubre de 2019

TARIJA - BOLIVIA

VºBº

Ing. Juan Pablo Herbas Barrancos
PROFESOR GUÍA

M.Sc. Ing. Ernesto R. Alvarez Gozalvéz
DECANO
FACULTAD DE CIENCIAS Y
TECNOLOGÍA

M.Sc. Lic. Elizabeth Castro Figueroa
VICEDECANA
FACULTAD DE CIENCIAS Y
TECNOLOGÍA

APROBADA POR:

TRIBUNALES

Ing. Christian Echart Sossa

Ing. M.Sc. Ignacio Velásquez Soza

Ing. Jacqueline G. Romero Soruco

ADVERTENCIA:

El tribunal calificador del presente trabajo, no se solidariza con la forma, términos, modos y expresiones vertidas en el mismo, siendo éstas responsabilidad del autor.

DEDICATORIA:

Este trabajo va dedicado a mis padres, quienes han sido las personas que siempre me han brindado su apoyo incondicional en todo momento.

AGRADECIMIENTO:

A Dios, por la vida, la fortaleza, la paciencia y voluntad para seguir adelante.

A todos aquellos docentes, compañeros y amigos por la confianza y apoyo en el proceso de mi formación académica.

A mis padres por el apoyo incondicional en todo sentido, y de manera muy especial.

PENSAMIENTO:

“Una voluntad heredada”, “los sueños de la humanidad”, “el destino de una era” ...

Siempre y cuando la gente siga persiguiendo el significado de la ansiada “libertad”, no habrá nada que pueda detenerles.

Anónimo.

ÍNDICE

CONTENIDO	PÁGINAS
ADVERTENCIA	i
AGRADECIMIENTO	iii
DEDICATORIA	ii
PENSAMIENTO	iv
RESUMEN.....	v

INTRODUCCIÓN

Antecedentes.....	1
El Acrilonitrilo.....	3
Objetivo general.....	7
Objetivos específicos.....	7
Justificación.....	8

CAPÍTULO I

1 ESTUDIO DE MERCADO.....	14
1.1 Generalidades.....	14
1.2 Exportadores e importadores de Acrilonitrilo.	15
1.2.1 Productores de Acrilonitrilo.....	15
1.2.2 Países importadores de Acrilonitrilo.	16
1.3 Estructura del mercado regional, nacional o internacional.....	17
1.3.1 América latina y el caribe como mercado potencial del Acrilonitrilo.	18
1.4 Análisis de la oferta y la demanda de materias primas y productos.	19
1.4.1 Exportaciones de Acrilonitrilo en América Latina y el Caribe.	20
1.4.2 Importaciones de Acrilonitrilo en América Latina y el Caribe.	21
1.4.3 Importación neta de Acrilonitrilo en América Latina y el Caribe	23
1.5 América del Sur Como mercado Potencial del Acrilonitrilo.....	25
1.6 Precios de materias primas y productos.	25
1.7 Situación nacional.	28

CAPÍTULO II

2 TAMAÑO Y LOCALIZACIÓN.....	31
2.1 Justificación del tamaño.	31
2.2 Localización del proyecto.....	34
2.2.1 Estudios realizados por la empresa Tecnimont.....	34
2.2.1.1 Macro Localización.....	36
2.2.1.2 Micro Localización.....	38
2.3 Descripción de la región.	40
2.3.1 Tipo de suelo.....	40

2.3.2	Clima	40
2.3.3	Precipitación	41
2.3.4	Biogeografía.....	41
2.4	Ubicación de la planta de producción de Acrilonitrilo.....	42

CAPÍTULO III

3	INGENIERÍA DEL PROYECTO.	44
3.1	Caracterización física y química de la Materia Prima.....	44
3.1.1	El Propileno.	44
3.1.1.1	Usos del Propileno.....	44
3.1.2	Amoniaco.....	45
3.1.2.1	Usos del Amoniaco.	46
3.1.3	Oxígeno.	46
3.1.3.1	Usos del Oxígeno.	47
3.2	Cuantificación de la materia prima.	48
3.2.1	Propileno.....	48
3.2.2	Amoniaco.....	48
3.3	Selección del proceso a diseñar.	49
3.3.1	Proceso Sohio.....	49
3.3.1.1	Reacción Principal.....	49
3.3.1.2	Reacción secundaria	49
3.3.2	Etapas del Proceso.....	50
3.3.2.1	Etapas de reacción.	50
3.3.2.2	Etapas de absorción para eliminación de productos no deseados	50
3.3.2.3	Etapas de purificación del producto final.....	51
3.4	Diagramas del Proceso.	52
3.4.1	Diagrama de bloque.	52
3.4.2	Diagrama de flujo.....	53
3.5	Balances de Materia y Energía.	54
3.5.1	Condiciónes generales del Proceso.....	54
3.5.2	Balances de Materia.....	58
3.5.2.1	Balances en el reactor.	59
3.5.2.2	Balances en Quench.....	60
3.5.2.3	Torre Absorbedora.	61
3.5.2.4	Torre Recuperadora.....	63
3.5.2.5	Torre Fraccionadora de Acetonitrilo.	65
3.5.2.6	Torre de Despunte.	67
3.5.2.7	Torre de Producto.....	70
3.6	Diseño del equipo principal.	72
3.6.1	Catalizadores.....	72
3.6.2	Mecanismo de amoxidación del Propileno.....	73
3.6.3	Caracterización y selección de las partículas del catalizador (Catalizador)...	74
3.6.3.1	Grupo A.	75

3.6.3.2	Diámetro de partícula.	76
3.6.3.3	Densidad del fluido.	77
3.6.3.4	Densidad de la partícula.	77
3.6.3.5	Porosidad en condiciones de un lecho compacto.	77
3.6.3.6	Conversion de Propileno a Acrilonitrilo.	77
3.6.3.7	Constante de la reacción.	77
3.6.3.8	Viscosidad del gas.	78
3.6.3.9	Difusividad del gas.	78
3.6.3.10	Esfericidad catalizador.	78
3.6.4	Modelo de burbujeo de Kunii-Levenspiel.	78
3.6.5	Diseño del reactor.	81
3.6.5.1	Alimentación del reactor.	81
3.6.5.2	Velocidad de fluidización.	81
3.6.5.3	Velocidad de mínima fluidización.	82
3.6.5.4	Velocidad terminal.	83
3.6.5.5	Velocidad de diseño.	84
3.6.5.6	Cálculo del diámetro del reactor.	84
3.6.5.7	Tamaño y velocidad de las burbujas en el lecho.	86
3.6.6	Determinación de la altura de lecho.	91
3.6.6.1	Determinación de la altura total del reactor.	98
3.6.6.1.1	Cálculo de H.	100
3.6.6.1.2	Cálculo de TDH.	101
3.6.6.2	Volumen del reactor.	101
3.6.7	Masa de Catalizador.	102
3.6.8	Placa distribuidora del gas.	103
3.6.9	Diseño del intercambiador de calor.	107
3.6.10	Iteración y recálculo de las variables de diseño.	113
3.6.10.1	Variables de diseño estimadas.	113
3.6.10.2	Dimensiones del reactor.	113
3.6.10.3	Masa del catalizador.	114
3.6.10.4	Dimensiones de la placa distribuidora.	114
3.6.10.5	Dimensiones del intercambiador de calor.	115
3.7	Distribución de planta.	115
3.7.1	Área de almacenamiento y recepción de materias prima.	116
3.7.2	Área de acondicionamiento.	117
3.7.3	Área de reacción.	117
3.7.4	Área de extracción.	117
3.7.5	Área de purificación.	117
3.7.6	Área de tratamiento de residuos.	118
3.7.7	Área de almacenamiento y despacho de productos terminado.	118
3.7.8	Áreas de mantenimiento y servicios.	119
3.7.9	Área de Bomberos, seguridad y laboratorios.	119
3.7.10	Áreas de gerencia y administración.	119
3.7.11	Áreas de estacionamiento y de recreación del personal.	119

CAPÍTULO IV

4	ASPECTOS ECONÓMICOS DEL PROYECTO.....	121
4.1	Inversión del proyecto.....	121
4.1.1	Estructura de la inversión.....	121
4.1.2	Estimación de Costos.....	121
4.1.2.1	Capital total de inversión, CTI.....	121
4.1.2.1.1	Capital Fijo de Implantación (CFI).....	121
4.1.2.1.2	Capital de Trabajo (CT) y Puesta en Marcha (PM).....	125
4.1.2.2	Costos de producción.....	125
4.1.2.2.1	Costos de fabricación, CF.....	126
4.1.2.2.2	Costos generales, CG.....	127
4.1.3	Costo unitario del Acrilonitrilo.....	129
4.2	Financiamiento.....	129
4.2.1	Necesidad del capital.....	129
4.2.2	Fuentes de financiamiento.....	130
4.2.3	Amortizaciones.....	132
4.2.3.1	Forma de pago constante.....	132
4.2.3.2	Forma de pago variable.....	132

CAPÍTULO V

5	EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO.....	134
5.1	Estimación de ingresos.....	134
5.2	Subvención de materia prima.....	135
5.3	Determinación de utilidades.....	137
5.4	Punto de equilibrio.....	137
5.5	Fuentes y usos de fondos.....	138
5.6	Tiempo de retorno de la inversión.....	141
5.7	Análisis de sensibilidad.....	141
5.7.1	Alza de precio de la materia prima.....	141
5.7.2	Descenso de precio del producto terminado.....	142

CAPÍTULO VI

6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	144
6.1	Conclusiones.....	144
6.2	Recomendaciones.....	146

BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía.....	147
-------------------	-----

ÍNDICE DE TABLAS

CONTENIDO	PÁGINAS
Tabla A-1. Árbol petroquímico.	1
Tabla A-2. Áreas reservadas de interés hidrocarburíferas.	11
Tabla I-1. Principales exportadores de Acrilonitrilo.....	15
Tabla I-2. Principales países importadores de Acrilonitrilo.....	16
Tabla I-3. Países que importan Acrilonitrilo de Brasil en América Latina y el Caribe, (Toneladas).	23
Tabla I-4. Países que importan Acrilonitrilo de México en América Latina y el 23	23
Tabla I- 5. Mercados potenciales en América Latina y el Caribe para Acrilonitrilo, (Toneladas).	24
Tabla I-6. Importaciones de Acrilonitrilo en América del Sur, (Toneladas).	25
Tabla I-7. Precios del gas natural boliviano.....	29
Tabla II-1. Distribución general de la planta.....	32
Tabla II-2. Datos de composición de la alimentación.....	34
Tabla II-3. Matriz de Macro Localización (Condiciones favorables).....	36
Tabla II-4. Matriz de Macro Localización (Condiciones desfavorables).	37
Tabla II-5. Alternativas de ubicación de la planta de producción de Acrilonitrilo. ...	39
Tabla II-6. Matriz de Micro Localización.	39
Tabla III-1. Propiedades del Propileno.	44
Tabla III-2. Propiedades del amoniaco.	46
Tabla III-3. Propiedades del oxígeno.....	47
Tabla III-4. Especificación del Propileno (Composición típica Grado Polímero).	48
Tabla III-5. Conversión, rangos de operación normal.	57
Tabla III-6. Condiciones de diseño.....	58
Tabla III-7. Datos de composición de la alimentación.	58
Tabla III-8. Alimentación al reactor.	81
Tabla III-9. Diámetro de burbuja.....	87
Tabla III-10. Variaciones del diámetro de burbuja en función de la altura del lecho y el diámetro del orificio de la placa distribuidora.	88
Tabla III-11. Coeficiente de orificio en función del número de Reynolds 104	104
Tabla III-12. Relación entre diámetro de orificio y número de orificios por cm ²	105
Tabla III-13. Distribución de planta.....	116
Tabla IV-1. Factores de costos presentados por Baúman y asociados.	122
Tabla IV-2. Factores de capacidad para unidades de proceso.....	123
Tabla IV-3. Costo de maquinarias y equipos para el año de estimación.	124
Tabla IV-4. Costo de inversión para el año actual.....	124
Tabla IV-5. Capital fijo de implementación.....	124
Tabla IV-6. Factores de costos presentados por Bauman y Asociados.	125
Tabla IV-7. Costo de puesta en marcha y capital de trabajo.....	125
Tabla IV-8. Correlaciones para costos de fabricación.	126
Tabla IV-9. Costos de materias primas.	127

Tabla IV-10. Costos generales.	127
Tabla IV-11. Costo total de producción.	128
Tabla IV-12. Información sobre el interés que se paga por un préstamo.	130
Tabla IV-13. Características financieras del préstamo.	132
Tabla IV-14. Plan de pagos.	133
Tabla V-1. Precios de venta de los subproductos.	134
Tabla V-2. Beneficios e incentivos para la industrialización.	135
Tabla V-3. Variación del costo Unitario	136
Tabla V-4. Costo total de producción.	136
Tabla V-5. Flujo de fondos.	139
Tabla V-6. Indicadores financieros.	141

ÍNDICE DE FIGURAS

CONTENIDO	PÁGINAS
Figura A-1. Demanda del Acrilonitrilo por aplicación 2016.	7
Figura A-2. Producción nacional de gas natural Mm ³ /día de gas natural.	10
Figura 1-1. Consumo mundial del Acrilonitrilo.	15
Figura 1-2. Exportación e importación mundial del Acrilonitrilo.	17
Figura 1-3. Producción y demanda del Acrilonitrilo año 2008.	19
Figura 1-4. Estimación de Producción y demanda del Acrilonitrilo año 2018.	20
Figura 1-5. Exportación de Acrilonitrilo en América Latina y el Caribe.	21
Figura 1-6. Importación de Acrilonitrilo en América Latina y el Caribe.	22
Figura 1-7. Precios internacionales del Amoniaco, perspectiva.	26
Figura 1-8. Precios internacionales del Propileno.	26
Figura 1-9. Precios Internacionales del Acrilonitrilo.	27
Figura 1-10. Precio internacional del ácido sulfúrico.	28
Figura 1-11. Comparación de precio del gas natural boliviano con las regiones vecinas (\$us/MPC).	29
Figura 2- 1. Consumo global de Propileno.	31
Figura 2-2. Áreas de evaluación.	35
Figura 2-3. Área 4.	38
Figura 2-4. Ubicación de la Plata de producción Acrilonitrilo.	43
Figura 3-1. ELV del Acrilonitrilo-Agua.	52
Figura 3-2. Diagrama del Proceso de obtención de Acrilonitrilo.	52
Figura 3-3 Diagrama de flujo del proceso.	53
Figura 3-4. Conversión de Propileno (x), Acrilonitrilo (YAN), Óxidos de carbono (YCOX) y Ácido Cianhídrico (YHCN) frente a la temperatura.	54
Figura 3-5. Conversión de Acrilonitrilo (YAN) en diferentes valores de la relación molar de la mezcla Aire/Propileno.	55
Figura 3-6. Conversión del Propileno (x), Acrilonitrilo (YAN), Óxidos de carbono (YCOX) y Ácido Cianhídrico (YHCN) dependiendo de la relación molar de Amoniaco/Propileno.	56
Figura 3-7. Torre Absorbedora.	62
Figura 3-8. Torre Recuperadora.	63
Figura 3-9. Especificación de la torre Recuperadora.	64
Figura 3-10. Torre Fraccionadora.	65
Figura 3-11. Especificación de la Torre Fraccionadora.	66
Figura 3-12. Torre de Despunte.	67
Figura 3-13. Especificación de la Torre de Despunte.	68
Figura 3-14. Diagrama de flujo del proceso HYSYS.	71
Figura 3-15. Mecanismo de amoxidación del Propileno.	74
Figura 3-16. Modelo de Davidson.	80
Figura 3-17. Regímenes de flujo en fluidización.	82
Figura 3-18. Relación entre volumen de estela y de burbuja.	90

Figura 3-19. Modelos y símbolos utilizados para describir el modelo K-L en BFB..	92
Figura 3-20. Elemento diferencial de altura en el lecho.	94
Figura 3-21. Resistencia total.	96
Figura 3-22. Reactor de lecho fluidizado.	99
Figura 3-23. Constante de desagregación de las partículas catalíticas.	100
Figura 3-24. Disposición triangular de los orificios	106
Figura 3-25. Calor liberado en el reactor.	110
Figura 3-26. Disposición de los orificios en la sección del reactor.	114
Figura 3-27. Distribución de planta.	120
Figura 5-1. Análisis de sensibilidad de la materia prima.	142
Figura 5-2. Análisis de sensibilidad del producto terminado.	143

ÍNDICE DE CUADROS

CONTENIDO	PÁGINAS
Cuadro II-1. Propileno alimentado al reactor.....	33
Cuadro III-1. Efecto de la presión en la actividad catalítica para la amoxidación del Propileno.	57
Cuadro III-2. Alimentación al reactor.....	59
Cuadro III-3. Efluentes del reactor.	60
Cuadro III-4. Flujos molares de entrada y salida del Quench.	61
Cuadro III-5. Flujos molares de entrada y salida a la Torre Absorbedora.....	62
Cuadro III-6. Flujos molares de entrada y salida a la Torre Recuperadora.	64
Cuadro III-7. Destilado de acetonitrilo.....	66
Cuadro III-8. Agua libre de productos Orgánicos.....	67
Cuadro III-9. Destilado de HCN.	69
Cuadro III-10. Corriente de Fondo.	69
Cuadro III-11. Acrilonitrilo a Almacenamiento.....	70
Cuadro III-12. Patentes con tecnologías para aumentar la producción de Acrilonitrilo.	73
Cuadro III-13. Clasificación de Geldart atendiendo al comportamiento de las partículas.	75
Cuadro III-14. Clasificación de Geldart de los lechos fluidizado.	76
Cuadro III-15. Flujo volumétrico de alimentación al reactor.....	85
Cuadro III-16. Correlaciones de tamaño de burbuja en lechos fluidizado.....	86
Cuadro III-17. Características del catalizador.	102
Cuadro III-18. Consumo de agua del intercambiador de calor.	115
ANEXOS	
Anexos	149

NOMENCLATURA EMPLEADA

ALCA	América latina y el caribe
PPQ	Pemex petroquímica
CPQ	Complejos petroquímicos
MTA	Miles de toneladas anuales
PCPPP	Plantas de Propileno y Polipropileno
PM	Peso molecular de una sustancia
K-mol	Kilomol
Kg	Kilogramo
h	Hora
YPFB	Yacimiento Petrolífero Fiscales Boliviano
GLP	Gas licuado de petróleo
Km	Kilómetro
m.s.n.m.	Metros sobre el nivel del mar
mm	Milímetros
ρ	Densidad
ABS	Acrilonitrilo. Butadieno-Estireno
SAN	Estireno-Acrilonitrilo
T	Temperatura absoluta (K)
ELV	Equilibrio líquido-vapor
Y_{AN}	Rendimiento del Acrilonitrilo
Y_{CO_x}	Rendimiento de los gases de carbono
Y_{HCN}	Rendimiento del cianuro de hidrógeno
X	Conversión del Acrilonitrilo
atm	Unidad de presión atmosférica
Agua rica	Productos orgánicos
ρ_f	Densidad promedio de los gases
ρ_p	Densidad de las partículas
ϵ_m	Porosidad del lecho compacto
μ_g	Viscosidad del gas
K_R	Constante de reacción
D	Difusividad del gas
Ψ	Esfericidad del gas
μ_{mf}	Velocidad mínima de fluidización
g	Gravedad terrestre
ϵ_{mf}	Porosidad mínima de fluidización
Re	Número de Reynolds
Re_t	Numero de Reynolds a la velocidad terminal
v_t	Velocidad terminal
v_o	Velocidad de diseño
S	Diámetro del reactor
D_r	Diametro del reactor

d_{bo}	Es el tamaño de la burbuja formada en el distribuidor
A_o	Área del orificio
h_l	Altura del lecho fluidizado
d_b	Diámetro de burbuja
v_{br}	Velocidad de la burbuja en el lecho
v_b	Velocidad de ascenso de la burbuja
δ	Fracción del lecho ocupado por las burbujas sin contar las estelas
α	Volumen de estela por volumen de burbuja
v_s	Velocidad de subidad del gas de emulsión
v_e	Velocidad de descenso del gas de emulsión
γ_c	El volumen de sólidos respecto al volumen de burbuja en la fase estela y nubes
γ_b	Fracción de sólidos presente en la fase burbuja
γ_e	Fracción de sólidos presente en la fase emulsión
ϵ_f	Porosidad del lecho fluidizado
K_{bc}	Coefficiente de materia burbuja nube
K_{ce}	Coefficiente de materia nube-emulsión
W	Masa de catalizador
k'	Constante de velocidad por kilogramo de catalizador
$-r_A$	Velocidad de reacción
K_R	El coeficiente global de transporte
R_o	Resistencia total
C_{Ao}	Concentración inicial del compuesto A (Propileno).
H	Altura de la sección de lecho entre la superficie de la fase emulsión y la salida de los productos gaseosos
a	Constante de desagregación de las partículas catalíticas
TDH	Altura necesaria para que las partículas de catalizador caigan de nuevo al lecho
H_r	Altura total del reactor
V_r	Volumen de reactor
h_c	Altura del lecho compacto
CTI	Capital total de inversión
CFI	Capital Fijo de Implantación
$CEPCI$	Chemical Engineering Plant Cost Index
ME	Maquinarias y equipos
CTP	Costo total de producción
IT	Tasa de interés
IVA	Impuesto al valor agregado
PE_m	Punto de equilibrio mínimo de producción "\$ "
PE_F	Punto de equilibrio mínimo de producción "ton"
VAN	Valor neto agregado
TIR	Tasa interna de retorno
T_R	Tiempo de retorno

ICIS	Independet Chemical Information Service
BTU	Unidad térmica británica
NBR	Nitrile-Butadiene Rubber
MTBE	Metil Tert-Butil Eter
MDI	Diisocianato de difenilmetano
TDI	Diisocianato de Tolueno
PTA	Ácido Tereftálico
DMT	Dimetil Tereftalato
PET	Poliésteres de Tereftalato de Polietileno
PEBD	Polietileno de baja densidad
PEAD	Polietileno de alta densidad
PEBDL	Polietileno de baja densidad lineal
VCM	Monómero de cloruro de vinilo
EG	Etilen glicol
PVC	Poli cloruro de vinilo
PP	Polipropileno
IPA	Alcohol Isopropílico
MMA	Metacrilato de Metilo
SBR	Caucho Estireno-Butadieno
BR	Cauchos de Butadieno
CCI	Commodity Chanel Index
UN COMTRADE	The United Commodity Trade Statistics Database
PPQ	Pemex Petroquímica
CPQ	Complejos Petroquímicos
CFI	Capital fijo de implementación
ME	Maquinaria y equipos
IEC	Instalación de equipos comprados
IC	Instrumentación y control
ITB	Instalación de tubería y bombas
IE	Instalaciones eléctricas
OC	Obras civiles
MT	Mejoras del terreno
IDS	Instalaciones de servicios
T	Terreno
IS	Ingeniería y supervisión
EC	Expensas de construcción
HC	Honorarios del contratista
GC	Gastos de contingencia
CT	Capital de trabajo
CFC	Costos de fabricación
CF	Costos fijos
DME	Depreciación de equipos y maquinarias
IP	Impuestos de Propiedad
CDP	Costos directos de producción

MP	Materias primas
CTP	Costo total de producción
TO	Trabajos operativos
SD	Supervisión directa
MR	Mantenimiento y reparación
SO	Suministros de operación
PD	Patentes y derechos
CA	Costos de administración
DM	Costos de distribución y marketing
ID	Investigación y desarrollo