

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO**

**FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**

**CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**“DISEÑO DE UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE ALCOHOL  
ISOPROPÍLICO A PARTIR DE PROPILENO EN EL DEPARTAMENTO DE  
TARIJA”**

Por

**DIEGO FERNANDO SALAZAR VALDEZ**

Modalidad de Graduación Proyecto de Grado presentado a consideración de la  
“**Universidad Autónoma Juan Misael Saracho**” como requisito para optar al Grado  
Académico de Licenciatura en Ingeniería Química

**Junio de 2017**

**TARIJA, BOLIVIA**

V° B°

MSc Ing. Ernesto Álvarez Goncalvez

MSc. Ing. Silvana Paz

**DECANO**

**VICEDECANA**

**FACULTAD DE CIENCIAS  
Y TECNOLOGÍA**

**FACULTAD DE CIENCIAS  
Y TECNOLOGÍA**

**APROBADO POR**

**TRIBUNAL:**

---

Ing. Jacqueline Romero Soruco

---

Ing. Christian Echart Sossa

---

Ing. Ignacio Velásquez Soza

El Tribunal Calificador del presente trabajo no se solidariza con la forma, términos, modos y expresiones vertidos en el mismo, siendo ellos únicamente responsabilidad del autor.

### Agradecimientos

A mis padres por su constante apoyo, docentes en general por el conocimiento transmitido a lo largo de mi formación académica.

## ÍNDICE

**ADVERTENCIA**

**AGRADECIMIENTOS**

**RESUMEN**

### **CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN**

	PÁGINA
1.1 ANTECEDENTES .....	1
1.1.1 Situación de hidrocarburos en Bolivia .....	1
1.1.2 Gas Natural en Bolivia .....	1
1.1.3 La industria Petroquímica en el Mundo .....	3
1.1.4 La industria Petroquímica En Bolivia .....	5
1.1.5 Identificación del Problema-Solución.....	6
1.2 OBJETIVOS.....	8
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	8
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
1.3 JUSTIFICACIÓNDEL PROYECTO .....	10
1.3.1 Justificación Técnica:.....	10
1.3.2 Justificación Económica:.....	10
1.3.3 Justificación Social:.....	10
1.3.4 Justificación Ambiental:.....	10

### **CAPÍTULO II ESTUDIO DE MERCADO**

2.1 GENERALIDADES .....	11
Situación Mundial Del Alcohol Isopropílico .....	11
2.1.1 Situación del mercado de Alcohol Isopropílico en Latinoamérica por país .....	14
2.2 MERCADO POTENCIAL DE ALCOHOL ISOPROPÍLICO EN BOLIVIA .....	16

## **CAPÍTULO III**

### **TAMAÑO Y LOCALIZACIÓN DE LA PLANTA**

3.1.1 JUSTIFICACIÓN DEL TAMAÑO .....	22
3.2 LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO .....	29
Justificación de la Localización .....	29
3.2.1 Factores determinantes .....	29
3.3 Definición de Macro-Localización.....	30
3.4 Definición de Micro-Localización .....	32

## **CAPITULO IV**

### **INGENIERÍA DEL PROYECTO**

4.1.1 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE MATERIA PRIMA.....	38
4.1.2 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL PRODUCTO .....	39
4.2 DESCRIPCIÓN DE PROCESOS EXISTENTES EN LA PRODUCCIÓN DE ALCOHOL ISOPROPÍLICO.....	40
4.2.1 PROCESOS DE HIDRATACIÓN POR VÍA DIRECTA .....	40
VEBA CHEMIE.....	42
TOKUYAMA SODA.....	44
DEUTSCHE TEXACO.....	46
4.3 SELECCIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN.....	48
4.5 BALANCE DE MATERIA .....	53
4.5.1 En el mezclado previo a la entrada al reactor: .....	54
4.5.2 En el intercambiador de calor: .....	55
4.5.3 En el calentador (Heater1): .....	57
4.5.4 En el Reactor .....	58
4.5.5 En el sistema de enfriamiento (Cooler 1 y Cooler 2).....	59
4.5.6 En el Separador Flash.....	60
4.5.7 En el Scrubber .....	61
4.5.8 En la Columna de Ligeros .....	63
4.5.9 En la Columna de Azeótropo .....	64

4.5.10 En la Columna de Deshidratación.....	66
4.6 BALANCE DE ENERGÍA.....	67
4.6.1 Energía del calentador.....	67
4.6.2 Energía requerida en la columna de ligeros.....	69
4.6.3 Energía requerida en la columna de azeótropo.....	70
4.6.4 Energía requerida en el compresor.....	70
4.6.5 Energía requerida en la bomba.....	71
4.7 DISEÑO PRELIMINAR DEL EQUIPO PRINCIPAL.....	72
4.9 DISTRIBUCIÓN EN PLANTA – LAYOUT.....	80
4.9.1 Servicios Auxiliares.....	80
4.9.2 Agua Potable e Industrial.....	80
4.9.4 Aire comprimido.....	81
4.9.5 Generación de Vapor.....	81
4.10 ORGANIZACIÓN DE LA EMPRESA.....	81

## **CAPÍTULO V**

### **ASPECTOS ECONÓMICOS DEL PROYECTO**

5.1 EVALUACIÓN DE CAPITAL FIJO INMOVILIZADO (CFI).....	83
5.2 INVERSIÓN TOTAL REALIZADA.....	87
5.3 COSTO TOTAL DE PRODUCCIÓN.....	90
5.4 EVALUACIÓN DE COSTO DE PRODUCCIÓN UNITARIA.....	97
5.4 EVALUACIÓN DEL PRECIO DE VENTA.....	97
5.5 ESTADO DE PÉRDIDAS Y GANANCIAS.....	98
5.6 FLUJO DE FONDOS.....	100

## **CAPÍTULO VI**

### **EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO**

6.1 DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE EQUILIBRIO.....	102
6.2 DETERMINACIÓN DE INDICADORES ECONÓMICOS.....	102
6.2.1 Determinación de VAN.....	102

6.2.2 Determinación de TIR.....	103
6.3 Período de recuperación de Capital.....	104
6.4 Análisis de Sensibilidad .....	104
6.4.1 En función al Precio FOB .....	104
6.4.2 En función al precio de la materia prima .....	105

## **CAPÍTULO VII**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

CONCLUSIONES .....	107
RECOMENDACIONES .....	108
BIBLIOGRAFÍA.....	109



## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA I-1 PRODUCCIÓN DE GAS NATURAL EN BOLIVIA EN MILLONES DE PIES CÚBICOS POR DÍA .....	2
TABLA I-2 COMPARACIÓN ENTRE LA EXPORTACIÓN DE GAS NATURAL ENTRE 2013 Y 2015 .....	2
TABLA I-3 COMPOSICIÓN DE GAS NATURAL EN BOLIVIA.....	6
TABLA II-1 EXPORTACIONES LATINOAMERICANAS DE ALCOHOL ISOPROPÍLICO, EN TONELADAS .....	15
TABLA II-2 IMPORTACIONES DE ALCOHOL ISOPROPÍLICO EN LATINOAMÉRICA, EN TONELADAS	
TABLA II-3 IMPORTACIONES DE ALCOHOL ISOPROPÍLICO DE PAÍSES VECINOS A BOLIVIA, EN TONELADAS.....	16
TABLA II-4 EVOLUCIÓN DE IMPORTACIONES 2006-2015 ARGENTINA, BRASIL, BOLIVIA, PERÚ Y PARAGUAY .....	17
TABLA II-5 PROYECCIÓN DE CRECIMIENTO DE DEMANDA DE 2-PROPANOL, PERÍODO 2015-2040.....	20
TABLA II-6 PRINCIPALES SECTORES CONSUMIDORES DE IPA DENTRO DE BOLIVIA.....	21
TABLA III-1 COMPOSICIÓN MOLAR PROMEDIO DEL GAS NATURAL EN BOLIVIA.....	22
TABLA III-2 COMPOSICIÓN MÁSCICA PROMEDIO DEL GAS NATURAL EN BOLIVIA.....	23
TABLA III-3 PROYECCIÓN DE PRODUCCIÓN DE GAS NATURAL EN BOLIVIA PARA EL PERÍODO 2015-2019 .....	23
TABLA III-4 PROYECCIÓN DE PRODUCCIÓN DE GAS NATURAL, PERIODO 2020-2040.....	25

TABLA III-5 PROYECCIÓN DE PRODUCCIÓN DE GAS NATURAL EN KMOLES/HR .....	25
TABLA III-6 PROYECCIÓN DE PRODUCCIÓN DE PROPANO EN KTONELADAS/AÑO .....	26
TABLA III-6 VALORACIÓN DE ESCALA .....	30
TABLA III-7 MATRIZ DE SELECCIÓN DE MACRO-LOCALIZACIÓN.....	31
TABLA III-8 LONGITUDES DE LOS DUCTOS DE GLP DESDE LA PLANTA SEPARADORA DE LÍQUIDOS GRAN CHACO A LA ALTERNATIVA.....	32
TABLA III-9 LONGITUDES DE CARRETERAS DESDE LAS ALTERNATIVAS DE SELECCIÓN HACIA LAS FRONTERAS .....	33
TABLA III-10 LONGITUDES DE CARRETERAS DESDE LAS ALTERNATIVAS DE SELECCIÓN HACIA LAS CAPITALES DE DEPARTAMENTOS .....	34
TABLA III-11 LONGITUDES DEL ACUEDUCTO DESDE LAS ALTERNATIVAS SELECCIONADAS A LAS FUENTES DE AGUA MÁS IMPORTANTES.....	35
TABLA III-12 MATRIZ DE SELECCIÓN PARA MICROLOCALIZACIÓN.....	36
TABLA IV-1 CARACTERÍSTICAS DE LA MATERIA PRIMA – PROPILENO .	38
TABLA IV-2 CONDICIONES DE MATERIA PRIMA – PROPILENO .....	39
TABLA IV-3 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL ISOPROPANOL.....	39
TABLA IV-4 PRECIO DE VENTA DEL ISOPROPANOL COMERCIAL .....	40

TABLA IV-5 PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE ALCOHOL ISOPROPÍLICO POR VÍA DIRECTA .....	41
TABLA IV-6 SELECCIÓN DE PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN DE ALCOHOL ISOPROPÍLICO .....	49
TABLA IV-7 SIMBOLOGÍA DEL DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE ISOPROPANOL.....	52
TABLA IV-8 COMPOSICIÓN MÁSCICA EN EL PUNTO DE MEZCLA	55
TABLA IV-9 COMPOSICIÓN MÁSCICA EN EL INTERCAMBIADOR DE CALOR.....	56
TABLA IV-10 COMPOSICIÓN MÁSCICA EN EL CALENTADOR .....	57
TABLA IV-11 COMPOSICIÓN MÁSCICA EN EL REACTOR.....	59
TABLA IV-12 COMPOSICIÓN MÁSCICA EN EL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO.....	60
TABLA IV-13 COMPOSICIÓN MÁSCICA EN EL SEPARADOR.....	61
TABLA IV-14 COMPOSICIÓN MÁSCICA EN EL SCRUBBER.....	62
TABLA IV-15 COMPOSICIÓN MÁSCICA EN LA COLUMNA DE LIGEROS .....	64
TABLA IV-16 COMPOSICIÓN MÁSCICA EN LA COLUMNA DE AZEÓTROPO.....	65
TABLA IV-17 COMPOSICIÓN MÁSCICA EN LA COLUMNA DESHIDRATADORA .....	67
TABLA IV-18 RESULTADOS DE INTEGRACIÓN PARA APLICACIÓN DE MÉTODO SIMPSON .....	76

TABLA V-1 COSTOS DE MAQUINARIA.....	84
TABLA V-2 PORCENTAJE DE DISTRIBUCIÓN DEL CAPITAL DE IMPLEMENTACIÓN.....	85
TABLA V-3 CAPITAL FIJO O INMOVILIZADO EN USD.....	86
TABLA V-4CONDICIONES DE PRÉSTAMO FIJADO POR EL BCB A YPFB PARA EL PROYECTO DE PLANTA DE POLIPROPILENO .....	88
TABLA V-5 ESTRUCTURA DE FINANCIAMIENTO .....	88
TABLA V-6 PLAN DE PAGOS DEL FINANCIAMIENTO SOLICITADO AL BCB.....	89
TABLA V-7 DISTRIBUCIÓN DE PORCENTAJES EN LOS COSTOS DE PRODUCCIÓN.....	91
TABLA V-8 EVOLUCIÓN DE PRECIO DE PROPILENO .....	92
TABLA V-9 VARIACIÓN DEL PRECIO DE PROPILENO A PARTIR DEL MÉTODO DE TASA PROMEDIO .....	94
TABLA V-10 PORCENTAJE PROMEDIO DE DISTRIBUCIÓN DE ISOPROPANOL .....	95
TABLA V-11 COSTO DE COMERCIALIZACIÓN DE ISOPROPANOL	95
TABLA V-12 COSTOS DE PRODUCCIÓN.....	96
TABLA V-13 DETERMINACIÓN DE COSTO DE PRODUCCIÓN UNITARIO	97
TABLA V-14 ESTADO DE PÉRDIDAS Y GANANCIA.....	99
TABLA V-15 FLUJO DE FONDOS.....	101
TABLA VI-1 PUNTO DE EQUILIBRIO EN DÓLARES AMERICANOS.....	102

TABLA VI-II ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL PROYECTO EN FUNCIÓN AL PRECIO DE VENTA FOB.....	105
TABLA VI-III ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL PROYECTO EN FUNCIÓN AL PRECIO DE MATERIA PRIMA.....	106

## **NÓMINA DE ANEXOS**

**ANEXO A** DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA PRODUCCIÓN DE ISOPROPANOL USANDO ASPEN HYSYS

**ANEXO B** TABLAS DE BALANCES DE MATERIA OBTENIDOS EN SIMULACIÓN CON ASPEN HYSYS

**ANEXO C** COMPOSICIONES MÁSCAS EN BALANCES DE MATERIA POR SIMULACIÓN EN ASPEN HYSYS

**ANEXO D** HOJA DE DATOS DE CARACTERÍSTICAS DE EQUIPOS USADOS EN EL PROCESO

**ANEXO E** DISTRIBUCIÓN DE PLANTA DE PRODUCCIÓN DE ALCOHOL ISOPROPÍLICO – LAYOUT

**ANEXO F** DISTRIBUCIÓN DE CARGOS EN ORGANIZACIÓN DE LA EMPRESA DE ACUERDO A DEPARTAMENTOS

**ANEXO G** ORGANIGRAMA DE LA EMPRESA

**ANEXO H** MOVIMIENTO ECONÓMICO POR COMERCIO DE ALCOHOL ISOPROPÍLICO EN EL MUNDO

**ANEXO I** DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA EMPRESA PROVEEDORA DE PATENTE – HIDRATACIÓN DIRECTA EN FASE GASEOSA

## Nomenclatura y Unidades

### Parte Técnica

°C: Grado centígrado	$m_{\text{vap}}$ : Masa de vapor
atm : Atmósfera (unidad de presión)	kmol/h: Kilomol por hora (flujo molar)
kW: Kilovatio	KJ/Kg: Kilojulio por kilogramo
T: Tonelada métrica	R: Relación de reflujo externa
$m^3$ : Metro cúbico (unidad de volumen)	D: Destilado
$\text{Kg}_f/\text{cm}^2$ : kilogramo fuerza por centímetro cuadrado (unidad de presión)	L: Líquido de retorno
$\text{Kg}/\text{h}$ : Kilogramo por hora (unidad de flujo másico)	$Q_{\text{reb}}$ : Calor requerido en el Reboiler
$x_i$ : Fracción másica del componente i	$Q_{\text{cond}}$ : Calor retirado en el condensador
$F_i$ : Flujo másico del componente i	$\eta$ : Eficiencia
% (p/p): Porcentaje peso/peso	k: Coeficiente politrópico
$\lambda_v$ : Calor latente de vaporización	$W_r$ : Trabajo ejercido por el compresor
$\lambda_{\text{cond}}$ : Calor latente de condensación	ha: Altura desarrollada por la bomba
Q: Calor total	Par: Potencia mecánica requerida por la bomba
$C_{p_v}$ : Capacidad calorífica del vapor	$\Delta P$ : Diferencia de presiones
$C_{p_L}$ : Capacidad calorífica del líquido	$P_m$ : Presión manométrica
$T_b$ : Temperatura de ebullición	kPa: kilopascal
$t_i$ : Temperatura de i	$\gamma$ : Peso específico
$\text{kJ}/\text{h}$ : Kilojulios por hora	$W_{\text{catalizador}}$ : Masa de catalizador
$n_i$ : moles de i	$\mu$ : Viscosidad de i
$\Delta T$ : Diferencia de temperaturas	$\rho_i$ : Densidad de i
	$\epsilon_i$ : Porosidad de i

$D_p$ : Diámetro de partícula de catalizador

$Q_T$ : Caudal de alimentación al reactor de lecho fijo

$D_B$ : Diámetro del lecho de reactor

$A_B$ : Área del lecho de reactor

$V_B$ : Volumen de lecho de reactor

### **Parte Económica y Financiera**

\$us: Dólares americanos

“A”: Amortización

“I”: Interés

CDP: Costos Directos de Producción

CGF: Costos Generales de Fabricación

“MO”: Costos de Mano de Obra

“M”: Costos de Mantenimiento

CF: Costos fijos

SO: Costos para Suministros de Operación

CFA: Costos de Fabricación

GG: Gastos Generales

CTP: Costo total de producción

QT: Cantidad Total (unidades de producto)

PV: Precio de Venta

CUP: Costo Unitario de Producción

h: Porcentaje de Ganancia

$L_B$ : Altura de lecho de reactor

$L_R$ : Altura de reactor

$-r_p$ : Velocidad de reacción

$X_i$ : Nivel de conversión del componente i

$K_p$ : Constante de equilibrio en fase gaseosa

TIR Tasa Interna de Retorno

VAN: Valor Actual Neto

PE: Punto de Equilibrio

FN: Flujo Neto

n: Vida útil del proyecto

i: Tasa de Interés de actualización



## Glosario Técnico

**Amortización:** Es un término económico y contable, referido al proceso de distribución de gasto en el tiempo de un valor duradero.

**Análisis de Sensibilidad:** Es un término financiero, consiste en calcular los nuevos flujos de caja y el VAN (en un proyecto, en un negocio, etc.), al cambiar una variable (la inversión inicial, la duración, los ingresos, la tasa de crecimiento de los ingresos, los costes, etc.) De este modo teniendo los nuevos flujos de caja y el nuevo VAN podremos calcular y mejorar nuestras estimaciones sobre el proyecto que vamos a comenzar en el caso de que esas variables cambiasen o existiesen errores de apreciación por nuestra parte en los datos iniciales.

**Azeótropo:** Un azeótropo (o mezcla azeotrópica) es una mezcla líquida de dos o más compuestos químicos que hierven a temperatura constante y que se comportan como si estuviesen formadas por un solo componente.

**Calor latente:** Es la energía requerida por una cantidad de sustancia para cambiar de fase, de sólido a líquido (calor de fusión) o de líquido a gaseoso (calor de vaporización).

**Calor sensible:** Es el calor que recibe un cuerpo o un objeto y hace que aumente su temperatura sin afectar su estructura molecular y por lo tanto su estado.

**Catalizador:** Sustancia que modifica la velocidad de una reacción química.

**Columna de Destilación:** Es un aparato que permite realizar una destilación fraccionada. Una destilación fraccionada es una técnica que permite realizar una serie completa de destilaciones simples en una sola operación sencilla y continua.

**Depreciación:** En el ámbito de la contabilidad y economía, el término depreciación se refiere a una disminución periódica del valor de un bien material o inmaterial.

**DIPE:** Es un éter secundario que se utiliza como disolvente. Es un líquido incoloro que es ligeramente soluble en agua pero miscible con disolventes orgánicos.

**Estado Estacionario:** Es el estado en que las variables que definen el comportamiento de un proceso o sistema (las llamadas variables de estado), respecto del tiempo, permanecen *invariantes*.

**GLP:** El gas licuado del petróleo (GLP) es la mezcla de gases licuados presentes en el gas natural o disueltos en el petróleo, compuesta principalmente por propano ( $C_3H_8$ ) y butano ( $C_4H_{10}$ ). Si bien hay otros hidrocarburos presentes en él, están en un menor porcentaje.

**Inversión Diferida:** Es la inversión conformada por Trabajos de investigación y estudios, gastos de organización y supervisión, gastos de puesta en marcha de la planta, gastos de administración, intereses, gastos de asistencia técnica y capacitación de personal, imprevistos, gastos en patentes y licencias, etc.

**Inversión Fija:** Inversión fija en economía se refiere a la inversión en capital fijo o a la sustitución de depreciado capital fijo. Así, la inversión fija es la inversión en activos físicos tales como maquinaria, terrenos, edificios, instalaciones, vehículos o tecnología. Normalmente, un balance de la empresa indicará tanto la cantidad de gasto en activos fijos durante el trimestre o año y el valor total del stock de activos fijos de propiedad.

**IPA:** El 2-propanol, también llamado alcohol isopropílico, Propan-2-ol o IPA (de sus siglas en inglés Isopropyl Alcohol) en la nomenclatura IUPAC, es un alcohol incoloro, inflamable, con un olor intenso y muy miscible con el agua. Es un isómero del 1-propanol y el ejemplo más sencillo de alcohol secundario, donde el carbono del grupo alcohol está unido a otros dos carbonos.

**Layout de Planta:** Es la disposición de las máquinas, los departamentos, las estaciones de trabajo, las áreas de almacenamiento, los pasillos y los espacios comunes dentro de una instalación productiva propuesta o existente.

**Período de Gracia:** El período de gracia consiste en aplazar el pago de la primera cuota del dividendo hipotecario de acuerdo a los que establezcan las partes.

**Precio FOB:** Es una cláusula de comercio internacional que se utiliza para operaciones de compraventa en las que el transporte de la mercancía se realiza por barco, ya sea marítimo o fluvial.

**Punto de Equilibrio:** En términos de contabilidad de costos, es aquel punto de actividad (volumen de ventas) en donde los ingresos son iguales a los costos, es decir, es el punto de actividad en donde no existe utilidad ni pérdida.

**Reactor de Lecho Fijo:** Los reactores de lecho fijo consisten en uno o más tubos empacados con partículas de catalizador, que operan en posición vertical. Las partículas catalíticas pueden variar de tamaño y forma: granulares, cilíndricas, esféricas, etc. El lecho está constituido por un conjunto de capas de este material.

**Rendimiento de Reacción:** cantidad de producto que se obtiene en una reacción química a partir de una cantidad definida de reactivos.

**Scrubber:** Sistema de depuración de la contaminación del aire dispositivos de control que se puede utilizar para eliminar algunas partículas y / o gases de escape de las corrientes de la industria mediante la absorción del componente no deseado con el uso de un solvente.

**Selectividad de Reacción:** es el cociente de los moles obtenidos del producto deseado entre los moles del producto no deseado obtenido en un conjunto de reacciones.

**TIR:** La tasa interna de retorno o tasa interna de rentabilidad (TIR) de una inversión es la media geométrica de los rendimientos futuros esperados de dicha inversión, y que implica por cierto el supuesto de una oportunidad para "reinvertir".

**VAN:** Es un procedimiento que permite calcular el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros, originados por una inversión.