

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

PROYECTO DE GRADO



**DISEÑO DE UNA PLANTA PILOTO PARA OBTENER DIÉSEL Y
GASOLINA A PARTIR DE RESIDUOS PLÁSTICOS**

Por:

YULENY VALDEZ MAIGUA

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

Diciembre de 2024

TARIJA-BOLIVIA

VºBº

M.Sc. Ing. Marcelo Segovia Cortez
DECANO DE LA FACULTAD DE
CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

M.Sc. Ing. Fernando E. Cortez Michel
VICEDECANO a.i DE LA FACULTAD
DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

APROBADA POR:

TRIBUNAL:

ING. RENE EMILIO MICHEL CORTES

ING. JUAN CARLOS VEGA KNEZ

ING. IGNACIO VELÁSQUEZ SOZA

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

Dedicado a mi padre Jose Miguel Valdez Cruz, a mi madre Francisca Maigua Cason, a mi hermano Olver Jimmy Valdez Maigua, darles las gracias por todo el apoyo brindado para elaboración de este proyecto de grado, gracias por creer en mí.

Agradecer a mis docentes por todo el conocimiento científico y ético que me compartieron, agradecer a mis tribunales de proyecto de grado por guiarme en el desarrollo de este proyecto de grado.

ÍNDICE

Advertencia	i
Dedicatoria	ii
Agradecimiento	iii
Resumen	iv

INTRODUCCIÓN

Antecedentes	1
Objetivos	10
Objetivo general	10
Objetivos específicos	10
Justificación del proyecto de grado	11
Justificación económica	11
Justificación tecnológica	11
Justificación social	11
Justificación ambiental	12
Justificación personal	12

CAPÍTULO I

ESTUDIO DE MERCADO

1	Estudio de mercado	13
1.1	Generalidades	13
1.2	Estructura del mercado del diésel y gasolina en Bolivia	13
1.2.1	Producción nacional	13
1.2.2	Importación de combustibles en Bolivia	15

1.2.2.1	Principales países de los que se importa Diésel y Gasolina a Bolivia	15
1.3	Descripción y especificaciones de materias primas y productos	17
1.3.1	Materias primas.....	17
1.3.1.1	Polietileno de Baja Densidad (PEBD)	19
1.3.1.2	Polietileno de Alta Densidad (PEAD)	19
1.3.1.3	Polipropileno (PP).....	21
1.3.1.4	Poliestireno (PS)	21
1.3.2	Productos	22
1.3.2.1	Gasolina	22
1.3.2.2	Kerosene	24
1.3.2.3	Diésel	25
1.4	Análisis de la oferta y la demanda	27
1.4.1	Análisis de la oferta y demanda de materias primas.....	27
1.4.2	Análisis de la oferta de diésel y gasolina.....	32
1.4.2.1	Producción de combustibles en Bolivia.....	32
1.4.2.2	Importaciones de combustibles en Bolivia	34
1.4.3	Análisis de la demanda de diésel y gasolina.....	36
1.4.3.1	Volúmenes comercializados de combustibles en Bolivia.....	36
1.5	Descripción geográfica del mercado y políticas de comercialización	38
1.5.1	Descripción de geográfica del mercado.....	38
1.5.2	Políticas de comercialización.....	38
1.6	Análisis de precios	40
1.6.1	Análisis de precios de materias primas	40

1.6.2	Análisis de precios de los combustibles	41
1.6.3	Subvención a la importación de combustibles.....	42
1.7	Proyecciones	44
1.7.1	Análisis de la materia prima	45
1.7.1.1	Análisis de la oferta de residuos plásticos en Tarija.....	45
1.7.1.2	Resultados.....	46
1.7.2	Análisis de los combustibles en Bolivia	47
1.7.2.1	Análisis de la demanda de combustibles en Bolivia.....	47
1.7.2.2	Análisis de la oferta de combustibles en Bolivia.....	48
1.7.2.3	Resultados.....	49

CAPÍTULO II

TAMAÑO Y LOCALIZACIÓN

2	Tamaño y localización	53
2.1	Justificación del tamaño.....	53
2.2	Localización de la planta	54
2.2.1	Macro localización.....	54
2.2.2	Micro localización	55
2.2.2.1	Factores de localización.....	55
2.2.2.2	Método cuantitativo por puntos	55

CAPÍTULO III

INGENIERÍA DEL PROYECTO

3	Ingeniería del proyecto.	59
3.1	Características técnicas de las materias primas y productos.....	59

3.1.1	Características técnicas de la materia prima	59
3.1.1.1	Polietileno de Alta Densidad	59
3.1.1.2	Polietileno de Baja Densidad.....	60
3.1.1.3	Polipropileno.....	61
3.1.1.4	Poliestireno	62
3.1.2	Productos del proceso de pirolisis	63
3.1.2.1	Propiedades del aceite producido por pirolisis de residuos plásticos	63
3.1.2.2	Propiedades del combustible líquido producido por pirólisis de residuos plásticos	64
3.2	Descripción de los procesos existentes para la elaboración del producto.	66
3.2.1	Gasificación	66
3.2.2	Hidro craqueo	67
3.2.3	Pirolisis	68
3.2.3.1	Pirolisis térmica	68
3.2.3.2	Pirolisis catalítica.....	68
3.2.4	Diferencias de los procesos para la producción de combustibles líquidos	70
3.2.5	Selección del proceso a diseñar	71
3.3	Mecanismo térmico de degradación	73
3.4	Factores importantes que afectan el proceso de pirólisis.....	76
3.4.1	Temperatura	76
3.4.2	Composición de la materia prima	77
3.4.3	Tiempo de residencia	77
3.4.4	Catalizador	77
3.4.5	Tamaño de la partícula.....	78

3.4.6	Tipo de reactor utilizado	78
3.4.7	Humedad	78
3.5	Reactores de pirólisis	78
3.5.1	Reactor tipo Batch	79
3.5.2	Reactor semi-batch o semi-continuo.....	79
3.5.3	Reactor de lecho fijo	80
3.5.4	Reactor de lecho fluidizado	81
3.5.5	Reactor de tornillo	81
3.5.6	Ventajas y desventajas de los reactores utilizados en pirólisis de desechos plásticos	82
3.6	Diagrama de Flujo	84
3.7	Balances de materia y energía	85
3.8	Diseño de los equipos principales.....	106
3.8.1	Diseño del reactor Batch.....	106
3.8.2	Diseño del condensador	111
3.8.3	Diseño del separador.....	119
3.8.4	Diseño del intercambiador de calor de enfriamiento del aceite de pirólisis	124
3.8.5	Diseño de la columna de destilación.....	131
3.8.6	Diseño de bombas	151
3.8.7	Dimensionamiento de los tanques de almacenamiento	183
3.8.8	Especificaciones técnicas de los equipos del proceso	184
3.9	Distribución general de la planta	188
3.10	Servicios auxiliares	191

3.10.1	Energía eléctrica	191
3.10.2	Consumo de agua.....	192
3.10.3	Consumo de Gas	193
3.11	Cronograma de ejecución, CPM y GANTT.	194
3.12	Organización de la empresa.....	196
3.12.1	Descripción de funciones y responsabilidades	196
3.13	Formulario de registro industrial	199

CAPÍTULO IV

ASPECTOS ECÓNICOS DEL PROYECTO

4.1	INVERSIÓN DEL PROYECTO.....	203
4.1.1	Estructura de la inversión	203
4.1.1.1	Inversión fija.....	203
4.1.1.2	Inversión diferida.....	206
4.1.1.3	Costo de operación.....	207
4.1.2	Costos de producción.....	211
4.1.3	Capital de trabajo	212
4.1.4	Costos fijos y variables	213
4.1.5	Costo unitario del producto.....	214
4.1.6	Estimación de ingresos y determinación de utilidades	215
4.2	FINANCIAMIENTO.....	218
4.2.1	Necesidad de capital	219
4.2.2	Fuentes de financiamiento	219
4.2.3	Amortizaciones	221

CAPÍTULO V

EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO

5	Evaluación económica del proyecto	223
5.1	Determinación del punto de equilibrio	223
5.2	Determinación de indicadores económicos	224
5.3	Fuentes y usos de fondos	224
5.4	Evaluación económica	227
5.4.1	Valor actual neto	227
5.4.2	Tasa interna de retorno	228
5.4.3	Relación Beneficio/Costo	229
5.5	Análisis de sensibilidad	230

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6	Conclusiones y recomendaciones	231
6.1	Conclusiones	231
6.2	Recomendaciones	232
BIBLIOGRAFÍA		233
ANEXOS		242

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 0-1. Producción de combustibles por pirólisis en el mundo	5
Tabla 0-2. Producción de combustibles por pirólisis en América Latina	7
Tabla 0-3. Producción de combustibles de pirólisis en Bolivia	9
Tabla 1-1. Tipo de Plástico	17
Tabla 1-2. Adecuación de plásticos al proceso pirolítico	18
Tabla 1-3. Características técnicas de la gasolina	23
Tabla 1-4. Características técnicas del kerosene	24
Tabla 1-5. Características técnicas del diésel.....	26
Tabla 1-6. Generación de residuos sólidos en Tarija	27
Tabla 1-7. Residuos sólidos plásticos reciclados y no reciclados en la ciudad de Tarija	28
Tabla 1-8. Composición física de residuos plásticos en la ciudad de Tarija.....	29
Tabla 1-9. Generación de Polietileno de baja y alta Densidad, Polipropileno y Poliestireno en la ciudad de Tarija	30
Tabla 1-10. Reporte mensual de residuos reciclables del servicio de recolección diferenciada	31
Tabla 1-11. Volúmenes de producción de refinados de petróleo en Bolivia (Barriles)	33
Tabla 1-12. Importaciones de Diésel y Gasolina en Bolivia (Barriles)	35
Tabla 1-13. Volúmenes comercializados de combustibles en Bolivia (barriles)	36
Tabla 1-14. Precios de los residuos plásticos reciclables.....	40
Tabla 1-15. Precios de combustibles al mercado interno.....	41
Tabla 1-16. Precio internacional de los combustibles año 2023-2024.....	42

Tabla 1-17. Costo de la subvención a la gasolina y el diésel.....	43
Tabla 1-18. Análisis de la oferta de plásticos en Tarija	45
Tabla 1-19. Valores de las variables de la oferta de plásticos en Tarija	46
Tabla 1-20. Proyección de la generación de residuos plásticos en Tarija.....	46
Tabla 1-21. Análisis de la demanda de gasolina y diésel en Bolivia	47
Tabla 1-22. Valores de las variables de la demanda de gasolina y diésel en Bolivia .	47
Tabla 1-23. Análisis de la producción de gasolina y diésel en Bolivia.....	48
Tabla 1-24. Valores de las variables de la producción de gasolina y diésel en Bolivia	48
Tabla 1-25. Análisis de las importaciones de gasolina y diésel en Bolivia	48
Tabla 1-26. Valores de las variables de importaciones de gasolina y diésel en Bolivia	49
Tabla 1-27. Proyección de la oferta y demanda de gasolina (Barriles)	49
Tabla 1-28. Proyección de la oferta y demanda de diésel (Barriles)	50
Tabla 2-1. Tamaño del proyecto	54
Tabla 2-2. Aplicación del método cualitativo por puntos para la selección de la localización de la planta	56
Tabla 2-3. Tarifa del gas natural industrial en Tarija.....	57
Tabla 3-1. Propiedades del Polietileno de Alta Densidad.....	59
Tabla 3-2. Propiedades del Polietileno de Baja Densidad	60
Tabla 3-3. Propiedades del Polipropileno	61
Tabla 3-4. Propiedades del Poliestireno.....	62
Tabla 3-5. Análisis próximo y último de algunos plásticos comunes en los residuos sólidos	63

Tabla 3-6. Propiedades del aceite producido por pirolisis de residuos plásticos	63
Tabla 3-7. Calidad del Diésel.....	64
Tabla 3-8. Calidad de la Gasolina	65
Tabla 3-9. Calidad del Fuel Oil.....	65
Tabla 3-10. Diferencias de los procesos para la producción de combustibles líquidos	70
Tabla 3-11. Aplicación del método cualitativo por puntos para la selección de la tecnología	72
Tabla 3-12. Ventajas y desventajas de los reactores utilizados en pirólisis de desechos plásticos.....	82
Tabla 3-13. Resumen del balance de materia.....	92
Tabla 3-14. Propiedades físicas requeridas en el balance térmico.....	96
Tabla 3-15. Poder calorífico del gas natural y gas de recicló	97
Tabla 3-16. Balance de energía en la destilación	102
Tabla 3-17. Balance de materia en la columna de destilación	137
Tabla 3-18. Longitud de succión separador-bomba.....	154
Tabla 3-19. Longitud de descarga bomba-tanque de aceite de pirolisis	155
Tabla 3-20. Longitud de succión tanque de aceite de pirolisis-bomba	159
Tabla 3-21. Longitud de descarga bomba-columna de destilación.....	160
Tabla 3-22. Longitud de succión columna de destilación-bomba.....	164
Tabla 3-23. Longitud de descarga bomba-tanque de gasolina.....	166
Tabla 3-24. Longitud de succión columna de destilación-bomba kerosene	169
Tabla 3-25. Longitud de descarga bomba-tanque de kerosene	171
Tabla 3-26. Longitud de succión columna de destilación-bomba diésel	175

Tabla 3-27. Longitud de descarga bomba-tanque de diésel.....	176
Tabla 3-28. Longitud de succión columna de destilación-bomba de residuo	180
Tabla 3-29. Longitud de descarga bomba-tanque de residuo	181
Tabla 3-30. Resumen de requerimiento de tuberías, válvulas y accesorios.....	183
Tabla 3-31. Dimencionamiento de los tanques de almacenamiento	183
Tabla 3-32. Especificaciones de los equipos	184
Tabla 3-33. Precio de tuberías, accesorios y válvulas.....	187
Tabla 3-34. Energía requerida parra la producción.....	191
Tabla 3-35. Costo de energía eléctrica por año	191
Tabla 3-36. Consumo de agua por turno	192
Tabla 3-37. Costo de agua.....	192
Tabla 3-38. Gas requerido para la producción	193
Tabla 3-39. Cronograma de ejecución	194
Tabla 4-1. Costos de maquinarias y equipos.....	204
Tabla 4-2. Obras civiles	205
Tabla 4-3. Muebles y enceres.....	206
Tabla 4-4. Costo de transporte e instalación	207
Tabla 4-5. Costo de mano de obra del primer al tercer año	207
Tabla 4-6. Costo de mano de obra más beneficios sociales (1-3 año)	208
Tabla 4-7. Costo de mano de obra del cuarto al decimo año	208
Tabla 4-8. Costo de mano de obra más beneficios sociales (4-10 año)	208
Tabla 4-9. Costo de materia prima.....	209
Tabla 4-10. Costo de energía eléctrica y gas.....	209

Tabla 4-11. Depreciación	210
Tabla 4-12. Costo de producción (Bs)	211
Tabla 4-13. Capital de trabajo	212
Tabla 4-14. Costos fijos y variables (Bs.)	213
Tabla 4-15. Costo unitario de producción Bs/l	214
Tabla 4-16. Costo unitario del producto (Bs.).....	215
Tabla 4-17. Estado de pérdidas y ganancias (Bs.) (considerando el costo unitario los precios subvencionados)	216
Tabla 4-18. Estado de pérdidas y ganancias (Bs.) (considerando el costo unitario calculado en el proyecto para la venta)	217
Tabla 4-19. Financiamiento de inversión (Bs.)	218
Tabla 4-20. Información sobre el interés que se paga por un préstamo.....	219
Tabla 4-21. Plan de pago cuota variable (Bs.)	222
Tabla 5-1. Punto de equilibrio monetario (Bs.)	223
Tabla 5-2. Punto de equilibrio en volumen físico (l)	223
Tabla 5-3. Flujo de caja al precio de venta de los combustibles subvencionados (Bs.)	225
Tabla 5-4. Flujo de caja al precio unitario de venta calculado de los combustibles en el proyecto (Bs.)	226
Tabla 5-5. Flujo neto financiero	227
Tabla 5-6. Tasa interna de retorno	228
Tabla 5-7. Relación Beneficio/Costo	229
Tabla 5-8. Analisis de sensibilidad en el incremento del precio de residuos plásticos	230
Tabla 5-9. Análisis de sensibilidad en el precio de venta de los combustibles.....	230

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Principales países que exportan Diésel a Bolivia.....	16
Figura 1-2. Principales países que exportan Gasolina a Bolivia.....	16
Figura 1-3. Símbolo de reciclaje de Polietileno de Baja Densidad (PEBD).....	19
Figura 1-4. Símbolo de reciclaje de Polietileno de Alta Densidad (PEAD).....	20
Figura 1-5. Símbolo de reciclaje de Polipropileno (PP)	21
Figura 1-6. Símbolo de reciclaje de Poliestireno (PS).....	22
Figura 1-7. Material acopiado por MARMAT 2023 (t/mes)	31
Figura 1-8. Evolución de la producción de combustibles en Bolivia	34
Figura 1-9. Evolución de las importaciones de combustibles en Bolivia	35
Figura 1-10. Evolución de la demanda de combustibles en Bolivia.....	37
Figura 1-11. Balance entre la demanda y oferta de la gasolina	37
Figura 1-12. Balance entre la demanda y oferta del diésel	38
Figura 1-13. Proyección de la oferta y demanda de gasolina	51
Figura 1-14. Proyección de la oferta y demanda de diésel	51
Figura 2-1. Mapa de localización de la planta	58
Figura 3-1. Inicio de la rotura del polímero	73
Figura 3-2. Propagación.....	74
Figura 3-3. Transferencia intramolecular de hidrógeno.....	74
Figura 3-4. Rotura del enlace en posición β respecto al radical	74
Figura 3-5. Transferencia intermolecular de hidrógeno.....	75
Figura 3-6. Unión de dos radicales	76
Figura 3-7. Desproporción de los radicales primarios	76

Figura 3-8. Diagrama de flujo del proceso de pirolisis.....	84
Figura 3-9. Corrientes de entradas y salidas en los equipos de la planta	91
Figura 3-10. Diagrama de flujo de la columna de destilación	135
Figura 3-11. Sub-diagrama de flujo de la columna de destilación.....	136
Figura 3-12. Diagrama bomba de aceite de pirólisis	151
Figura 3-13. Diagrama bomba aceite pirolisis-horno	157
Figura 3-14. Diagrama bomba de gasolina	162
Figura 3-15. Diagrama bomba kerosene	167
Figura 3-16. Diagrama bomba diésel	173
Figura 3-17. Diagrama bomba residuo	178
Figura 3-18. Distribución general de la planta.....	188
Figura 3-19. Plano en planta de los equipos	189
Figura 3-20. Plano en planta de los equipos vista isométrico	190
Figura 3-21. Diagrama GANTT.....	195
Figura 3-22. Organigrama de la empresa.....	196

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Estructura tarifaria base SETAR-Tarija	242
Anexo 2. Humedad en residuos plásticos	243
Anexo 3. Carta psicrométrica online.....	244
Anexo 4. Carta psicrométrica online.....	244
Anexo 5. Carta psicrométrica online.....	245
Anexo 6. Porcentajes de Polietileno de Alta Densidad, Polietileno de Baja Densidad, Polipropileno y Poliestireno usados para obtener petróleo sintético de pirólisis.....	245
Anexo 7. Pruebas Experimentales de Mezcla de Plásticos	246
Anexo 8. Mezcla de Plásticos a Velocidad de Calentamiento Mayor a 5°C/min	247
Anexo 9. Mezcla de Plásticos con Velocidad de Calentamiento Menor a 5°C/min	247
Anexo 10. Pruebas Experimentales de Destilación de Petróleo de Pirólisis de Plásticos	248
Anexo 11. Fracciones calculadas en la simulación Aspen Hysys.....	248
Anexo 12. Datos experimentales de Destilación Engler obtenidos por Destilación ASTM D86 para petróleo sintético	249
Anexo 13. Destilación del Petróleo Generado a Velocidades de Calentamiento Mayores a 5°C/min.....	249
Anexo 14. Destilación del Petróleo Generado a Velocidades de Calentamiento Menores a 5°C/min.....	250
Anexo 15. Valores Promedio y Porcentajes de Destilación.....	250
Anexo 16. Rendimientos del proceso de Pirolisis y porcentaje de componentes obtenidos a escala de laboratorio, experimental	250
Anexo 17. Características del Petróleo Sintético	251
Anexo 18. Calores específicos de hidrocarburos	252

Anexo 19. Ábacos de entalpia para la fase vapor y liquida	253
Anexo 20. Fórmulas de diseño para recipientes de presión	254
Anexo 21. Características del acero inoxidable SA-240-304	255
Anexo 22. Conexiones para intercambiadores doble tubo.....	256
Anexo 23. Áreas de flujo y diámetros equivalentes en intercambiadores dobles tubo	256
Anexo 24. Coeficiente de Sauders Brown	256
Anexo 25. Tiempos de retención en el separador	257
Anexo 26. Número de platos de una torre de destilación	257
Anexo 27. Espacio entre platos.....	257
Anexo 28. Curva de destilación de gasolina por el método TBP y D86.....	258
Anexo 29. Curva de destilación de keroseno por el método TBP y D86.....	258
Anexo 30. Curva de destilación de diésel por el método TBP y D86.....	259
Anexo 31. Propiedades del aceite de pirólisis.....	260
Anexo 32. Propiedades de la gasolina.....	261
Anexo 33. Propiedades del querosén	262
Anexo 34. Propiedades del diésel	263
Anexo 35. Composición promedio del gas en Bolivia.....	264
Anexo 36. Selección del diámetro de tubería	265
Anexo 37. Longitud equivalente de accesorios.....	266
Anexo 38. Cotización traasporte Iquique-Tarija.....	267
Anexo 39. Porcentajes de depreciación de activos fijos	268