

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE VALPARAISO
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA



PROYECTO PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL
QUIMICO.

APLICACIÓN DE ENERGÍAS NO CONVENCIONALES.

DIVISIÓN RADOMIRO TOMIC, CODELCO.

Alfonso D. Bellenger Arancibia

Profesor Guía:
José Torres Titus

2012

Resumen.

El presente trabajo fue desarrollado en la planta hidrometalúrgica de la División Radomiro Tomic de la Corporación Nacional del Cobre (CODELCO), donde como principal objetivo tuvo el realizar un estudio de Perfil de Ingeniería para los proyectos de Energías Renovables no Convencionales (ERNC) de “Producción de Biodiesel a Partir de Aceite de Jatropha Curcas” y la Generación de Energía Eléctrica Mediante Microturbinas Hidráulicas”, pues la División, en los próximos años, se verá enfrentada a un agotamiento de los minerales oxidados y por esta razón a una menor producción de cátodos de cobre y la consiguiente disminución de los ingresos, por esta razón la División Radomiro Tomic está buscando disminuir los costos de producción y en especial los costos asociados al consumo de energías, donde los proyectos de energías renovables toman gran importancia para disminuir el consumo energético.

Este trabajo se constituyó de 3 etapas. La primera fue un diagnóstico, para identificar posibles implementaciones de Energías no Convencionales, además de conocer los recursos existentes en la División para la generación de energía, una vez en conocimiento de los antecedentes se plantean distintas alternativas de generación energética.

La segunda etapa consiste en la elección de 2 de los proyectos para realizar un proyecto de ingeniería para la implementación de estos en la División y la generación de energías limpias.

Finalmente, la tercera etapa consistió en la evaluación económica de los proyectos, considerando los costos inversionales, operacionales, de mantención e insumos, y considerando como beneficios económicos el ahorro en la utilización de energía y la venta de subproducto que estos proyectos pudiesen generar.

Los resultados obtenidos dan cuenta de proyectos que no tienen un beneficio económico importante, principalmente estos proyectos presentan beneficios ambientales, pero desde el punto de vista de negocio, en la actualidad, son no rentables y no tienen un beneficio económico aceptable que justifique la implementación de estos proyectos.

Índice.

I.	Introducción.....	1
1.1	Problema Abordado.....	3
1.2	Objetivo.....	4
	Objetivo General.....	4
	Objetivos específicos.....	4
1.3	Justificación.....	5
1.4	Metodología del Proyecto.....	6
1.5	Proceso Productivo División Radomiro Tomic.....	7
	Generalidades del Proceso DRT.....	7
	Chancado.....	9
	Lixiviación.....	9
	Extracción por solvente.....	13
	Electro obtención.....	16
II.	Tecnologías de Eficiencia Energética.....	21
2.1	Planteo de Alternativas.....	21
	Caldera Sumergida.....	21
	Biodiesel.....	21
	Micro Central Hidráulica.....	22
	Bombas de Calor.....	22
2.2	Elección de Alternativas.....	23
2.3	Proyectos para Estudio.....	24
III.	Alcance General de Producción de Biodiesel.....	25
3.1	Procesos de Negocio.....	26
	Alternativas.....	27

3.2	Biocombustibles.....	32
3.3	Bioetanol o Bioalcohol.....	36
3.4	Biodiesel.....	36
3.5	Matriz Energética Mundial.....	39
3.6	Bonos de Carbono.....	42
IV.	Producción de Biodiesel.....	46
4.1	Proceso Para La Producción de Biodiesel.....	47
	Descascaradora.....	47
	Extracción De Aceite.....	48
	Transesterificación.....	48
	Subproductos del Proceso.....	50
4.2	Balace de Masa para el proceso.....	52
4.3	Tecnología.....	53
	Descascaradora.....	54
	Planta Batch de Producción de Biodiesel.....	54
	Planta Continua de Producción de Biodiesel.....	57
4.4	Tabla comparativa de las tecnologías.....	58
4.5	Comentarios Finales de Las Tecnologías.....	59
4.6	Posibles Escenarios.....	60
	Producción para el consumo de DRT.....	61
	Producir 1200 litros por día.....	62
	Producir 2400 litros por día.....	62
	Producción de 960 litros día, planta continua.....	63
4.7	Preparación del Terreno.....	63
V.	Evaluación Económica de Producción de Biodiesel.....	64
	Supuestos para cálculo de beneficios.....	65

Supuestos para Cálculo del Costo de Inversión.....	65
Supuestos para Cálculo del Costo Operacional.....	66
Costos de Capital.....	66
Costos de Operación.....	67
Productos o Servicios.....	67
Flujo de Caja.....	68
Resumen.....	71
VI. Alcance General para Instalación de Microcentral Hidroeléctrica.....	72
6.1 Procesos de Negocio.....	73
Alternativas.....	73
Generación.....	73
Distribución.....	74
Riesgos Potenciales.....	75
Beneficios.....	76
Impacto del Proyecto.....	76
6.2 Micro Central Hidroeléctrica.....	77
Generador.....	78
Regulador.....	78
Tendido eléctrico.....	78
6.3 Micro turbinas.....	79
VII. Disponibilidad de Recursos en División Radomiro Tomic.....	81
7.1 Caudal Disponible.....	81
7.2 Altura.....	82
7.3 Levantamiento Eléctrico DRT.....	82
7.4 Potencia Generada.....	84
7.5 Diámetro de las Cañerías.....	84

7.6	Tendido Eléctrico.....	86
VIII.	Evaluación Económica.....	87
8.1	Costos de Inversión.....	87
8.2	Costos de Operación.....	88
8.3	Especificación.....	89
8.4	Proyección.....	89
8.5	Indicadores Económicos.....	89
8.6	Proyección según Potencia.....	90
	Suministro en Planta de Osmosis.....	90
	Suministro a Barrio Cívico.....	92
IX.	Plan de Ejecución de Proyectos.....	94
9.1	Definición del Proyecto.....	94
9.2	Entorno.....	94
9.3	Misión, premisas, objetivos.....	95
9.4	Estructura de Desglose de Trabajo.....	95
9.5	Cronograma.....	96
X.	Conclusiones.....	97
10.1	Producción de Biodiesel.....	97
	Etapa de Cultivo.....	97
	Etapa de Producción.....	98
10.2	Instalación de Microcentral Hidroeléctrica.....	99
XI.	Bibliografía.....	100
	Apéndice A: Jatropha Curcas.....	103
	Apéndice B: Cotizaciones.....	111
	Apéndice C: Micro Central Hidroeléctrica.....	122

Índice de Figuras.

Figura 1: Ubicación de Minera Radomiro Tomic – Codelco Norte.....	1
Figura 2: Producción de cobre estimada, Plan de Negocios y Desarrollo, PND.....	5
Figura 3: Esquema Plan de trabajo.....	6
Figura 4: Diagrama Proceso Hidrometalúrgico.....	7
Figura 5: Diagrama circuito de lixiviación.....	10
Figura 6: Foto satelital de lixiviación de ripios.....	11
Figura 7: Diagrama del proceso de extracción por solventes.....	15
Figura 8: Diagrama proceso de electro obtención.....	18
Figura 9: Proceso de lixiviación actual en Radomiro Tomic.....	21
Figura 10: diagrama de proceso comercial de producción de biodiesel.....	27
Figura 11: Ciclo del carbono en el proceso y consumo de biodiesel.....	33
Figura 12: Emisiones relativas de diesel y biodiesel.....	40
Figura 13: Matriz Energética Mundial, World Energy.....	42
Figura 14: Aumento de la demanda de biodiesel.....	44
Figura 15: Diagrama del proceso de producción de biodiesel.....	49
Figura 16: Mecanismo de reacción de transesterificación.....	51
Figura 17: Flow sheet proceso batch de producción de biodiesel.....	52
Figura 18: Balance de masa para producción de biodiesel.....	56
Figura 19: Planta Descascaradora.....	57
Figura 20: Equipamiento para producción de biodiesel,1200 l/dia.....	59
Figura 21: BIOAdd, unidad de expansión, aumenta la capacidad a 2400 l/dia.....	60
Figura 22: Presentación de costo de capital anual para los 12 escenarios.....	70
Figura 23: Presentación de los resultados operacionales anuales.....	71

Figura 24: Resultados de la evaluación económica para Central Biodiesel HTP.....	73
Figura 25: Resultados de la evaluación económica para Ingeniería Global Welt.....	74
Figura 26: Resumen de los resultados.....	74
Figura 27: diagrama de proceso de producción de biodiesel.....	77
Figura 28: Ejemplo de tendido aéreo.....	79
Figura 29. Ejemplo de tendido subterráneo.....	79
Figura 30: Diagrama Altura vs Caudal, para selección de turbinas hidráulicas.....	85
Figura 31: Estimación de la diferencia de altura para Aducción de San Pedro.....	87
Figura 32: Esquema del bypass para la instalación de la microcentral hidroeléctrica.....	90
Figura 33: Tendido eléctrico desde planta de osmosis hasta Barrio Cívico.....	91
Figura 34: Costo de capital para la instalación en la planta de osmosis.....	93
Figura 35: Costo de capital para la instalación abasteciendo parte del barrio cívico.....	93
Figura 36: Costo de operación para la instalación, la planta de osmosis.....	94
Figura 37. Costo de operación para la instalación, el Barrio Cívico.....	94
Figura 38: Variación del VAN según potencia generada, sin tendido eléctrico.....	96
Figura 39: Variación de la TIR según la potencia generada, sin tendido eléctrico.....	97
Figura 40. Variación del IVAN según la potencia generada, sin tendido eléctrico.....	97
Figura 41: Variación del VAN según potencia generada, con tendido eléctrico.....	98
Figura 42: Variación de la TIR según la potencia generada, con tendido eléctrico.....	98
Figura 43: Variación de la TIR según la potencia generada, con tendido eléctrico.....	99
Figura 44: Carta Gantt, implementación de planta de producción de biodiesel.....	102
Figura 45: Carta Gantt para instalación de microcentral hidroeléctrica.....	103
Figura 1-A: arbusto de Jatropha Curcas.....	1-A
Figura 2-A: fruto de Jatropha Curcas.....	2-A
Figura 1-C: Clasificación turbina.....	6-C
Figura 2-C: Rodete de una turbina Pelton.....	9-C

Figura 3-C: Entrada de agua turbina Crossflow.....	10-C
Figura 4-C: Turbina tipo Francis.....	15-C
Figura 5-C: Rodetes de turbinas Francis.....	16-C
Figura 6-C: Tubo de aspiración en una turbina Francis de eje vertical.....	17-C
<i>Figura 7-C: Rotor de una turbina Kaplan.....</i>	<i>18-C</i>

Índice de Tablas.

Tabla 1: Ley de Cobre Minerales Radomiro Tomic y Alterado Mina Sur.....	13
Tabla 2: Composición para clasificación catódica.....	19
Tabla3: Comparación de características químicas entre diesel y biodiesel.....	38
Tabla 4: principales países de Europa productores de Biodiesel en el año 2000.....	43
Tabla 5: Costos del ciclo del proyecto escala regular.....	47
Tabla 6: Comparación de las dos alternativas técnicas.....	62
Tabla 7. Posibles escenarios de producción de biodiesel.....	64
Tabla 8: Detalle de consumo de diesel por camionetas, 2010 DRT.....	65
Tabla 9: Hectáreas necesarias para producir 533 litros por día.....	65
Tabla 10: Hectáreas necesarias para producir 1200 litros por día.....	66
Tabla 11: Hectáreas necesarias para producir 2400 litros por día.....	66
Tabla 12: Hectáreas necesarias para producir 960 litros por día.....	67
Tabla 13: costo total de preparación de terreno por hectárea.....	67
Tabla 14: Resumen de la conveniencia económica por escenario.....	75
Tabla 15: Comparación de diferentes tipos de turbinas hidráulicas.....	84
Tabla 15: Caudales de Aducción de San Pedro, PI System.....	86
Tabla 16: Consumo eléctrico de RT Market y TICA.....	88
Tabla 17: Consumo eléctrico de Casino y Sector Gerencia.....	88
Tabla 18: Resumen indicadores económicos para las dos alternativas del proyecto.....	95

Tabla 19: Indicadores económicos con planta purificadora de glicerol, 2400 l/día.....	105
Tabla 1-A: incremento de producción de semillas Jatropha Curcas.....	5-A
Tabla 2-A: cuadro comparativo aceite de Jatropha y diesel normal.....	6-A
Tabla 1-B: Costos Planta Biodiesel, Ingeniería Welt.....	2-B
Tabla 2-B: Cotización para instalación de microturbina, Schwager Energy.....	10-B

I. Introducción.

Codelco es el primer productor de cobre del mundo y posee, además, cerca del veinte por ciento de las reservas mundiales del metal rojo.

El nombre Codelco representa a la Corporación Nacional del Cobre de Chile, una empresa autónoma, propiedad del Estado chileno, cuyo negocio principal es la exploración, desarrollo y explotación de recursos mineros de cobre y subproductos, su procesamiento hasta convertirlos en cobre refinado, y su posterior comercialización.

Posee activos propios por más de US\$16.039 millones y un patrimonio que en el 2009 ascendió a US\$ 5.309 millones. Codelco, en el 2009, produjo 1,78 millón de toneladas métricas de cobre refinado (incluida su participación en el yacimiento El Abra). Esta cifra equivale al 11% de la producción mundial. Su principal producto comercial es el cátodo de cobre grado A.

La compañía ejecuta sus operaciones a través de cinco divisiones mineras más la Fundición y Refinería Ventanas, que pertenece a Codelco desde mayo de 2005. Su estrategia corporativa es coordinada desde la Casa Matriz ubicada en Santiago de Chile.

La Corporación participa además en la propiedad de importantes empresas mineras, como Minera Gaby S.A., donde posee el 100% de la propiedad, y como El Abra, en la que posee el 49%; y otras asociaciones mineras orientadas a la explotación geológica, tanto en Chile como en el exterior.

La División Radomiro Tomic (DRT), de Codelco Chile, como se muestra en la figura 1, se encuentra ubicada en la II región en la provincia El Loa, a 40 km. al norte de Calama, y a 250 km. al noreste del Puerto de Antofagasta, a una altura de 3.000 m.s.n.m. La planta está diseñada para un nivel de producción anual de 305.000 toneladas de cátodos de cobre fino.

El yacimiento Radomiro Tomic corresponde a un Pórfido de Cobre, cuya característica principal, cuando comenzó sus faenas, fue poseer en la parte superior, 800 millones de toneladas de recursos geológicos de minerales oxidados de cobre, de principalmente atacamita, arcilla de cobre y crisocola, con una ley promedio de 0,59 % de cobre. Actualmente estos tipos de minerales oxidados han sido consumidos prácticamente en su totalidad dejando al descubierto una veta mineralizada de más de 6.000 millones de

toneladas de mineral sulfurado, de principalmente calcopirita y bornita con una ley promedio de 0,39% de cobre.

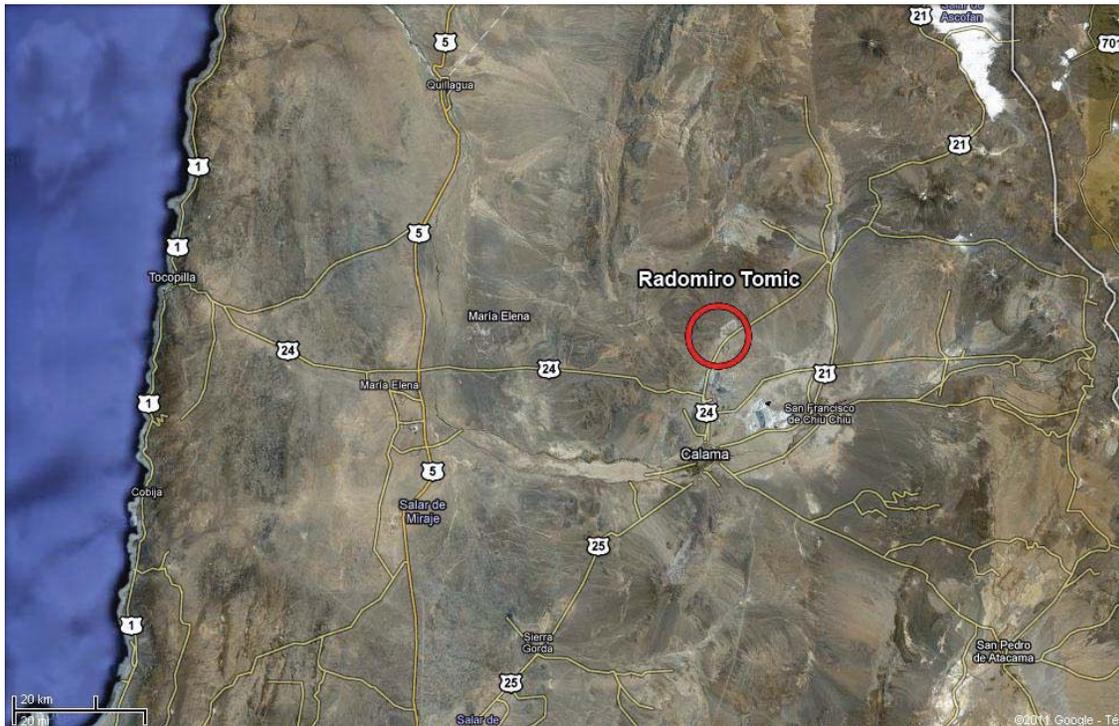


Figura 1: Ubicación de Minera Radomiro Tomic – Codelco Norte

Los Minerales Mixtos poseen la característica de estar compuestos tanto por especies mineralógicas de óxidos, como por especies sulfuradas, ello por encontrarse principalmente en la zona de interface entre óxidos y sulfuros. De acuerdo a los análisis geológicos, además de pruebas piloto y pruebas industriales de lixiviación llevadas a cabo con dichos minerales, han permitido establecer la factibilidad de lograr elevados niveles de extracción de cobre desde dichos minerales, lo que en definitiva permitió iniciar un proyecto cuyo objetivo era lograr en el corto plazo el beneficio metalúrgico de dichos recursos, ello a través del procesamiento en pilas permanentes, y un proceso de lixiviación química convencional.

Durante el año 2002 se desarrolló el proyecto denominado “lixiviación secundaria de ripios”, que aporta entre 23 y 28 mil toneladas de cobre fino anual, mediante el reprocesamiento de los botaderos de ripios. Este proceso consiste en la lixiviación de “parcelas” de 100 m x 100 m, recuperando un 50 % del cobre residual.

1.1. Problema Abordado.

El Plan Minero del PND de 2010 de la División Codelco Norte, considera la operación de Radomiro Tomic hasta el año 2034, período durante el cual se extenderá el actual negocio de óxidos y sulfuros. Los óxidos se procesan en Hidro Norte a un ritmo de 160 Kton/día hasta el año 2017 y los sulfuros a un ritmo de 60 Kton/día hasta el año 2020, y posteriormente 120 Kton/día hasta el año 2030. De esta forma, los óxidos (considerando la lixiviación primaria, secundaria y dumps autorizados) alcanzan una producción promedio de 300 Kton de Cu fino hasta el año 2012, luego 240 Kton de Cu fino el año 2013 para ir decreciendo hasta el año 2017 a 200 Kton de Cu fino.

Con objeto de cumplir las directrices ya descritas, el PND considera mantener el tratamiento de mineral oxidado en la actual planta Hidro Norte, sin la incorporación de nuevos equipos, por lo cual, durante los próximos años, esta planta seguirá teniendo un rol importante en la producción de cobre, siendo de vital importancia incorporar mejoras que busquen aumentar su eficiencia.

Debido a esta baja en la producción de cobre fino a partir de óxidos, es que la Superintendencia de Ingeniería de Procesos, está buscando alternativas para disminuir sus costos de operación, donde se presentan alternativas en el marco de eficiencia energética.

Por esta razón se planteara distintos proyectos de eficiencia energética los cuales apuntan a reducir el consumo energético en distintas áreas de la División Radomiro Tomic, ya sea en el proceso mismo, dependencias de uso administrativo o de equipos del personal de trabajo.

Una vez elegidos los proyectos se realizaran los estudios de Perfil de Ingeniería para la implementación de estos proyectos, donde, además de los beneficios energéticos y económicos, se contribuye con el desarrollo sustentable del negocio y pudiendo lograr una menor emisión de contaminantes al ambiente, con lo cual se abren las puertas al incipiente mercado de los bonos de carbono.

1.2. Objetivo.

A continuación se presentan los objetivos referentes a la aplicación de tecnologías de Eficiencia Energética en la División Radomiro Tomic

Objetivo General.

Estudiar diferentes alternativas de Eficiencia Energética, para reducir costos de la División en el consumo de energía y la generación de energías limpias.

Objetivos específicos.

- Identificar distintas alternativas para la aplicación de tecnologías de Eficiencia Energética.
- Realizar Ingeniería de Perfil del proyecto de Eficiencia Energética escogido.
- Efectuar evaluación económica sobre la Ingeniería de Perfil de Proyecto escogido.
- Entregar resultados e indicadores económicos de los proyectos evaluados y dar recomendaciones sobre estos.

1.3. Justificación.

Debido al agotamiento de los minerales oxidados de cobre, los cuales son procesados en Radomiro Tomic, la producción de cobre fino bajara considerablemente en los próximos años, como se muestra en la figura 2. Debido a esta disminución productiva es de vital importancia bajar los costos de producción en la planta.

Es en este marco que los proyectos de Eficiencia Energética tomar gran relevancia y proponen soluciones para un mejor uso de los recursos disponibles en la División, los cuales están siendo desaprovechados y buscan nuevas fuentes de energía limpia y cierta independencia del Sistema Interconectado Norte Grande (SING), la cual es mayoritariamente de origen termoeléctrico y tiene altas emisiones contaminantes.

Como indicadores de rentabilidad deberán considerarse:

- Ahorro de energía utilizada en las distintas áreas de la División.
- Venta de subproductos.
- Venta de Bonos de Carbono, por concertó de captura y menor emisión.

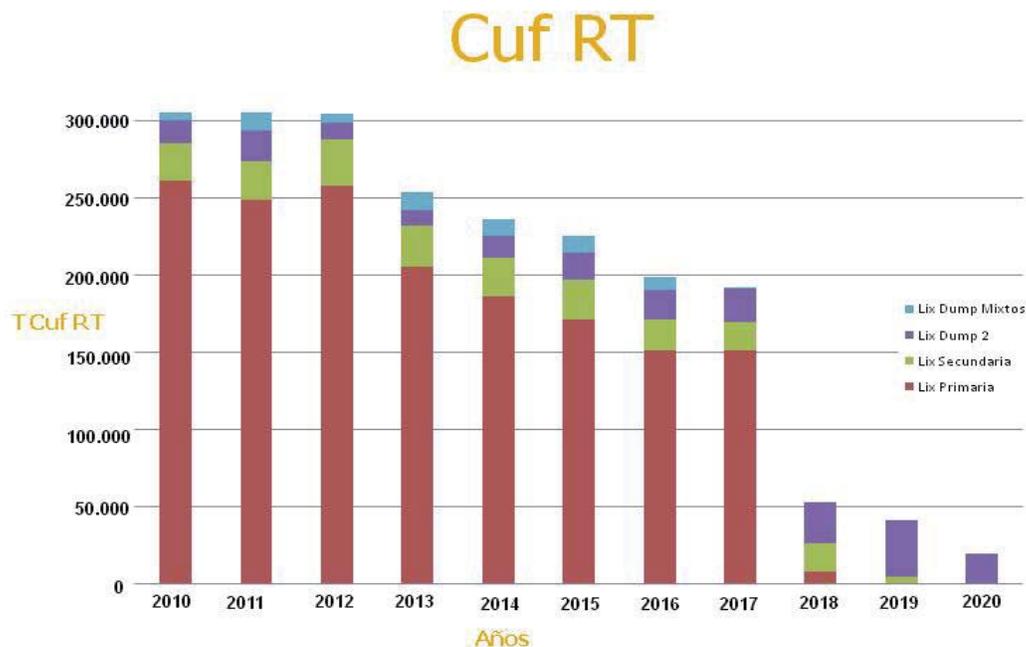


Figura 2: Producción de cobre estimada, Plan de Negocios y Desarrollo, PND[1]

1.4. Metodología del Proyecto.

Este proyecto implica un estudio para bajar los costos energéticos requeridos por la División Radomiro Tomic.

Para es esto, en primer lugar se realizara una evaluación de potenciales optimizaciones del proceso productivo identificando oportunidades de mejora, además de la búsqueda de recursos existentes en las instalaciones de la División Radomiro Tomic, los cuales tengan la potencialidad de ser utilizados en la generación de energías limpias.

La segunda etapa consiste en la propuesta de diferentes opciones para ayudar en la eficiencia energética de la división, para luego realizar la elección de estas alternativas en conjunto con el Superintendente de Ingeniería de Procesos de la División. Una vez escogido los proyectos, realizara la recolección de información referente a tecnologías disponibles para la ejecución del proyecto y se desarrollara una Ingeniería técnica sobre el proyecto, definiendo la envergadura del proyecto, la forma en que ayudara a la eficiencia de la División y las ganancias energéticas y posibles debilidades del proyecto; para esto se contactara con las empresas proveedoras de tecnología para aclara conceptos y tener una cotización de estas tecnologías.

La etapa final consistirá en la evaluación económica de proyecto, considerando los costos inversionales, de operación de cada tecnología, mantención e insumos necesarios y, por otro lado, considerando los beneficios económicos que esta trae, en el ahorro de la utilización de energía del Sistema Interconectado Norte Grande y la posible venta de subproducto que estos proyectos pudiesen generar.

También un punto importante a considerar es la utilización de energías limpias, las cuales traen beneficios ambientales, los cuales son no cuantificables.

La figura 3 muestra un esquema para las etapas del proyecto o plan de trabajo.



Figura 3: Esquema Plan de trabajo.

1.5. Proceso Productivo División Radomiro Tomic.

A continuación se detalla el proceso desarrollado en la División Radomiro Tomic, Codelco Chile, el cual contempla la extracción de minerales desde la mina, obtención de solución PLS desde lixiviación de minerales oxidados, el proceso de extracción por solventes y la obtención de cátodos de cobre a partir de electro obtención. La figura 4 esquematiza el proceso de la planta hidrometalúrgica de Radomiro Tomic.

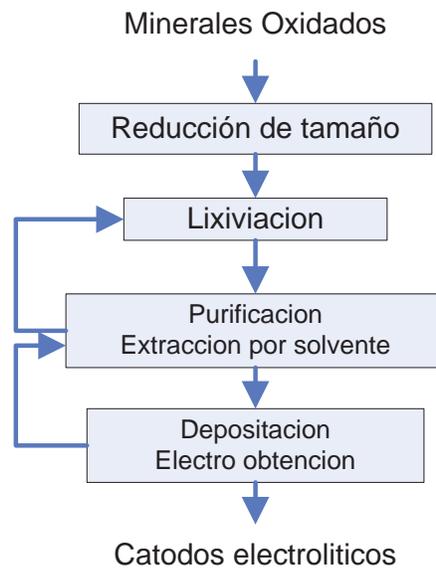


Figura 4: Diagrama Proceso Hidrometalúrgico.

Generalidades del Proceso DRT [2].

Es una mina a rajo abierto explotada a partir de 1995, donde se extraen minerales oxidados, los que se procesan en la Planta Hidrometalúrgica, con un movimiento del orden de 200 ton/día de mineral y 300 Kton de lastre. A futuro explotará minerales sulfurados y su vida se proyecta hasta el 2030.

La Planta Hidrometalúrgica de la División Radomiro Tomic, comenzó sus operaciones en Diciembre de 1997, con una producción nominal de 180.000 ton/año de cobre fino, actualmente la planta tiene una capacidad nominal de 320.000 ton/año de producción, y su producción programada para el año 2012 es de 305.000 ton/año, lo que la convierte en la planta de electro obtención más grande del mundo.

El proceso productivo de la División Radomiro Tomic, se inicia con la geología del yacimiento, cuyos datos son usados por planificación para diseñar y planificar la secuencia de explotación del yacimiento. Diariamente se extraen cerca de 580 mil toneladas, con una relación media de lastre/mineral de 2.7, utilizando métodos convencionales en perforación, tronadura, carguío y transporte.

La mina Radomiro Tomic puede abastecer hasta 220.000 toneladas de mineral por día, los cuales son principalmente Crisocola y Atacamita, este mineral, junto con un 2% de mineral alterado extraído de Mina Sur (AMS), es trasladado al área de chancado, donde es triturado por el chancado primario, que tiene por función reducir el tamaño del mineral a menos de 10 pulgadas, luego el mineral es llevado a chancado secundario para ser reducido a un tamaño inferior a cuatro pulgadas, donde se utilizan harneros vibratorios, que clasifican el mineral y alimentan la fracción gruesa a los chancadores de cono estándar. Para la etapa de chancado terciario se utiliza un Harnero Terciario tipo Banana y un Chancador Terciario tipo Swedala de cabeza corta.

Luego de esto, el mineral es curado con ácido sulfúrico concentrado y agua, directamente sobre cintas transportadoras y posteriormente es cargado en pilas de 9 a 10 metros de altura.

El proceso de lixiviación se realiza en pilas dinámicas, con sistema de desapilamiento de rípios lixivados a través de una rotopala, un sistema de correas transportadoras y un apilador móvil, el rípio es descargado y apilado en un botadero. La solución extraída (sulfato de cobre), también llamada PLS (Pregnant Leach Solution), es drenada a una canaleta la que alimenta unos pond desarenadores, desde donde la solución, por rebose, pasa a un pond de PLS, el cual alimenta, por medio de bombas, la planta de extracción por solvente.

La planta de extracción consta de cuatro trenes A, B, C y D, tres de ellos; A, B y C; con dos etapas de extracción, una etapa de reextracción y una de lavado, y el tren D con dos etapas de reextracción, dos de extracción y una de lavado. El electrolito rico (avance) que abandona la etapa de extracción por solvente pasa a la planta de electro obtención, donde se obtienen los cátodos de cobre con 99,99% de pureza.

El éxito de esta operación Hidrometalúrgica completa dependerá de los respectivos éxitos, parciales e integrales, de cada uno de los procesos unitarios. Por lo tanto, basta que uno de ellos presente problemas o ineficiencias e inmediatamente se resentirá el resultado del conjunto.

A continuación se presenta una descripción de cada uno de los procesos mencionados anteriormente, además de entregar para entender mejor el proceso.

Chancado.

Es la etapa posterior a la extracción de la mena mineral desde la mina, y prepara el material para la extracción de los metales valiosos.

Uno de los principales objetivos de la conminución es permitir la liberación o desprendimiento de los minerales valiosos para separarlos de los minerales de ganga asociados en el tamaño de partícula más grueso posible.

El grado de liberación se refiere al porcentaje de mineral que existe como partículas libres en la mena en relación al contenido total.

Chancador Primario.

Es una máquina donde se realiza la reducción de tamaño del mineral proveniente de la mina, de 1 a 1,5m, se reduce el tamaño del material hasta unos 10 a 20 cm, de modo de facilitar su transporte desde la mina misma, donde se realiza, hasta el lugar de proceso, donde se almacena y operan siempre en un circuito abierto, con o sin parrilla.

Chancador Secundario y Terciario.

El material que reciben estos equipos es normalmente menor a 15 cm de diámetro, por lo que se trata de equipos mucho más livianos que los anteriores.

También el material es más fácil de manejar y transportar y no se requiere de grandes sistemas para alimentarlo a los chancadores.

El chancado terciario se realiza en equipos del mismo diseño que el secundario y también en seco, el mineral que sale de esta etapa tiene un P_{80} de $\frac{3}{4}$ de pulgada.

Lixiviación.

La lixiviación en pilas es un proceso hidrometalúrgico que permite obtener cobre, contactando el mineral oxidado proveniente de chancado, con una solución con contenido de ácido, llamada refino, produciendo la disolución parcial o total del cobre, con el objetivo de recuperarlo.

Lixiviación en Pilas.

El mineral depositado en una de las dos pilas dinámicas, el cual es una mezcla de mineral de la Mina Radomiro Tomic con 2% de mineral alterado extraído de Mina Sur, esta previamente curado sobre la correa transportadora que carga el mineral desde chancado hacia la etapa de lixiviación.

La irrigación de las pilas se efectúa por goteo y aspersion con solución de refino, en un ciclo mínimo de 45 días, la cantidad de días de riego va a depender de la ley de cobre que tenga el mineral y de su calidad física, (granulometría, composición, etc.). Una vez finalizado el tiempo de riego, y tras percolar la solución a través de toda la pila, se recolecta la solución rica en cobre (sulfato de cobre), o PLS, y es retirada por un sistema de drenaje a través de canaletas protegidas por un material impermeable de alta densidad (HDPE).

El PLS desemboca en las piscinas desarenadoras, las cuales ayudan a eliminar los sólidos en suspensión, luego por rebose, la solución pasa a las piscinas de PLS desde donde, es impulsada por bombas a la planta de extracción por solvente.

La figura 5 muestra un diagrama para el proceso de lixiviación primaria en pilas dinámicas.

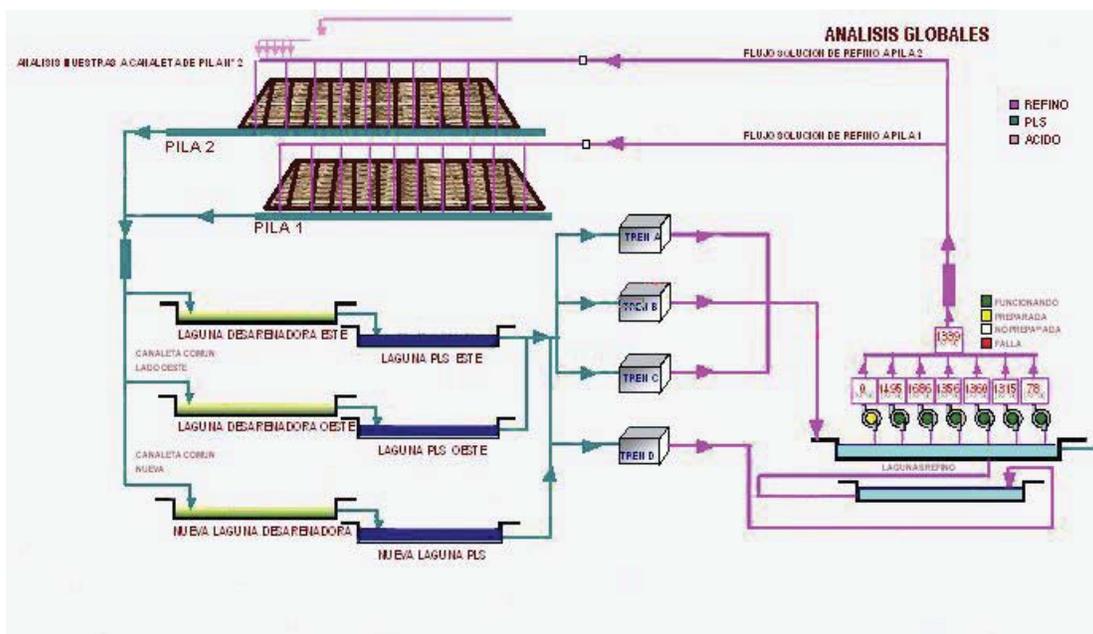


Figura 5: Diagrama circuito de lixiviación.

El mineral agotado de las pilas, que ya cumplió el ciclo de lixiviación, es extraído y acumulado en los botaderos de rípios.

Lixiviación Secundaria de Rípios.

Esta lixiviación se realiza en los botaderos de rípios, como se muestra en la figura 6, donde el mineral agotado provenientes de las pilas 1 y 2, se ubica sobre una carpeta HDPE y se riega con una solución proveniente de la piscina de refino II, donde se almacena el refino que sale del tren D en la planta de SX.

El ciclo de riego aproximado a los 300 días y la cantidad de cobre extraído es de 2.5 g/lit promedio con un porcentaje de recuperación del 40%.

La solución recuperada es drenada a canaletas radiales, perimetral y recolectada en cubiertas de HDPE, las que alimentan una piscina desarenadora, la cual rebalsa a la poza de Refino I.



Figura 6: Foto satelital de lixiviación de rípios.

Lixiviación de OBL.

El mineral de baja ley es extraído directamente de la mina, con granulometría ROM y es ubicado en botaderos por medio de camiones de alto tonelaje. El ciclo de lixiviación es de 300 días aproximadamente y el ciclo de riego de 200 días aproximados. El mineral es colocado en capas y regado mediante goteros y/o aspersores. La solución de refino es impulsada mediante bombas desde la poza de reimpulsión que riega los botaderos de rípios. El flujo medio es 340 m³/hr.

La cancha de acopio se divide en 45 módulos en el primer piso, 32 en el segundo y 11 en el tercer piso. Los módulos cargados son de 100 m largo, 80 m ancho y 20 m de alto con capacidad de 330.000 ton promedio cada uno.

Lixiviación de Minerales Mixtos.

En la mina también encontramos Minerales Mixtos, los cuales poseen la característica de estar compuestos tanto por especies mineralógicas de óxidos, como por especies sulfuradas, ello por encontrarse principalmente en la zona de interface entre óxidos y sulfuros. De acuerdo a los análisis geológicos, además de pruebas piloto y pruebas industriales de lixiviación llevadas a cabo con dichos minerales, han permitido establecer la factibilidad de lograr elevados niveles de extracción de cobre desde dichos minerales, lo que en definitiva permitió iniciar un proyecto cuyo objetivo era lograr en el corto plazo el beneficio metalúrgico de dichos recursos, ello a través del procesamiento en pilas permanentes, y un proceso de lixiviación química convencional.

Mineral

- **Crisocola**

La crisocola es un gel con composición variable debido a las numerosas impurezas que le acompañan, tales como alúmina, sílice y óxidos de cobre y hierro. Soluble en ácido sulfúrico.

Formula química: $(Cu, Al)_4 H_4 (OH)_8 Si_4 O_{10} \cdot nH_2O$

- **Atacamita** (Oxicloruro de cobre hidratado)

Cristales prismáticos alargados con caras terminales brillantes o tabulares. En masas fibrosas, compactas o granulares. Mineral supergénico de la zona de oxidación de los depósitos de cobre en regiones de clima árido y ambiente salino.

Formula química: $Cu_2^{2+} Cl(OH)_3$

- **Alterado de Mina Sur**

Unidad Geológica de muy rica ley de cobre pero de mala calidad física, la cual no pudo ser procesada mediante lixiviación en bateas cuando fueron extraídos dado que presentaban serios problemas de percolabilidad, como consecuencia de su compleja

mineralogía y presencia significativa de arcillas. Con una ley media de 1,25% de Cobre total.

La mineralización está constituida principalmente por copper pitch, copper wad y en menor grado crisocola y atacamita. Los principales minerales de ganga lo constituyen las arcillas. La tabla 1 muestra las leyes de cabeza y cobre soluble promedio para mineral de Radomiro Tomic y Alterado Mina Sur.

Ley de Cabeza.

Mineral	CuT %	CuS%
RT	0,620	0,481
AMS	1,182	0,81

Tabla 1: Ley de Cobre Minerales Radomiro Tomic y Alterado Mina Sur

Curado.

El curado es una forma muy efectiva de aumentar la cinética de disolución, el cual consiste en un pre-tratamiento con ácido concentrado del mineral que se va a colocar en el lecho de minerales a lixiviar. Este ácido es uniformemente distribuido previo a su ubicación en las pilas, logrando con esto una dosificación.

Durante el curado, se produce una transformación de las especies de minerales de cobre que están más próximas a la superficie en otras de mayor solubilidad en medio ácido acuoso, normalmente sulfato de cobre [18]. Con este método se logra inhibir la disolución de algunas especies indeseables de la ganga como el aluminio y la sílice.

Las soluciones de lixiviación al inicio del ciclo de lixiviación encuentran toda la trayectoria del lecho de mineral toda acidulada y, en muchos, casos sin consumir una mayor cantidad de ácido se limitan a disolver el sulfato de cobre ya producido por el pre tratamiento ácido.

Para la distribución uniforme del ácido se dispone en la planta de sistema de regadores dispuestos sobre la correa transportadora que trae los minerales hacia la pila (curado en correas). En forma conjunta con el ácido, en las correas se adiciona agua para la aglomeración de las partículas finas en torno a las más gruesas, lo que permite a las fuerzas cohesivas de tensión superficial mantener a las partículas unidas entre si facilitando su transporte y agrupamiento. Este proceso de aglomeración se genera

durante los traspasos de una correa a otra antes de ser depositada en las pilas. La aglomeración le concede a la pila una mayor permeabilidad, homogenización y humedad.

Extracción por solvente.

La extracción por solventes aplicada a la Hidrometalurgia es una operación unitaria que consiste en la purificación y concentración de una amplia variedad de metales, poniendo en contacto una fase orgánica que contiene un extractante, con una fase acuosa que contiene el metal de interés. El extractante reacciona químicamente con el metal para formar un complejo órgano-metal el cual es soluble en la fase orgánica. Las impurezas por lo general no reaccionan con el extractante y se quedan en la fase acuosa. La fase orgánica que contiene el complejo órgano-metal es separada de la fase acuosa. El metal es recuperado y concentrado en otra fase acuosa por la reacción química inversa.

El proceso de extracción por solvente consiste fundamentalmente en su esencia de dos operaciones secuenciales:

- Extracción: en donde el reactivo orgánico captura el cobre del acuoso.
- Captura o reextracción: El electrolito pobre que viene de electro obtención captura el cobre, saliendo un acuoso limpio cargado o electrolito de avance.

Los objetivos principales de este proceso en la planta de extracción por solvente es separar cobre de otros contaminantes, concentrar este metal disuelto, disminuyendo así el volumen a procesar y simplificando su recuperación. De esta manera reducir los costos para el proceso siguiente.

En una primera etapa, la solución de lixiviación (PLS), que contiene los iones metálicos de cobre recuperado del mineral cargado en las pilas, se pone en contacto con la fase orgánica, que contiene un reactivo orgánico capaz de combinarse y captar el cobre en solución, es decir, la solución de lixiviación rica en cobre (PLS), luego del contacto con la fase orgánica, baja su contenido de cobre (refino), En esta etapa denominada extracción se produce la transferencia de los iones de cobre desde la fase acuosa a la fase orgánica.

En una segunda etapa la fase orgánica, que ahora contiene el cobre, es contactada con una nueva solución acuosa, (electrolito pobre o Spent), de propiedades distintas a la primera proveniente de la etapa de electroobtención con una concentración media de 39 g/lit de cobre y alto contenido de ácido sulfúrico de modo de lograr transferir el cobre

desde la fase orgánica a la fase acuosa (reextracción), resultando una solución rica en cobre y apta para electro deposición (electrolito avance). El orgánico se regenera, retornando a la etapa previa de extracción, operando en circuito cerrado permanente.

En la planta de Extracción por Solvente de DRT opera con un diseño Outo Kumpu con un flujo de diseño 1.750 m³/hr, el proceso se lleva a cabo en cuatro trenes, A, B, C, D. Los tres primeros trenes (A, B, C), con dos etapas de extracción, una de reextracción y un lavado, y el tren D con dos extracciones, dos reextracciones y un lavado. La figura 7 muestra un esquema de la planta de extracción por solvente.

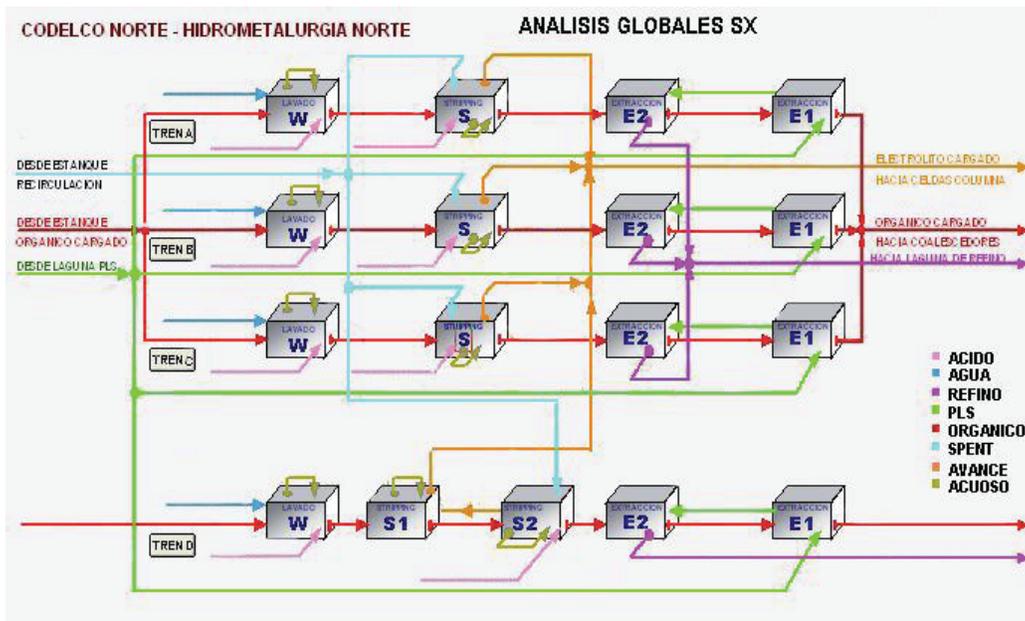


Figura 7: Diagrama del proceso de extracción por solventes.

Para el control de las impurezas del electrolito y de los arrastres de A/O se utilizan coalescedores para el orgánico cargado y una etapa posterior de lavado con agua desmineralizada, por otra parte, para la remoción del orgánico arrastrado por el electrolito rico, proveniente de SX, se emplean columnas de flotación Cominco y filtros de electrolitos Chuquicamata.

Todas las remociones van al sumidero, donde son posteriormente tratadas para su recuperación. El acuoso recuperado va a la poza de refino I, y el orgánico es recirculado a la etapa de SX.

La planta incluye además los estanques de orgánico cargado, de alimentación a filtros, de recirculación del electrolito, intercambiadores de calor, bombas, cañerías y sus correspondientes válvulas.

La fase orgánica esta compuesta por extractante y diluyente que tiene como objetivo recuperar el metal de la forma más selectiva posible, el extractante interactúa químicamente con el metal, para extraerlo desde una solución acuosa.

El reactivo utilizado por la planta es Acorga M5774 del tipo quelante, este extractante enlaza químicamente el ion metálico en al menos dos sitios de manera similar como se toma un objeto. Para lograr el enlace con el Ion metálico, la molécula orgánica entrega dos protones a cambio de un catión de cobre. La extracción es directamente afectada por el pH el que va variando a medida que se ejecuta la extracción y reextracción.

Como diluyente se utiliza Escaid 100, el cual sirve para reducir la excesiva concentración del extractante orgánico activo, reducir la viscosidad de la fase orgánica y así poder adecuar la concentración, generalmente es el componente mayoritario de la fase orgánica, con un 75% y 25% de extractante.

Los factores que influyen para lograr una más eficiente separación y/o purificación son:

- ◆ Acidez libre, expresada como pH.
- ◆ Composición química.
- ◆ Tensión superficial.
- ◆ Sólidos en suspensión.
- ◆ Potencial oxido-reducción.
- ◆ Concentración de aniones.
- ◆ Temperatura.

Todos estos factores afectan el equilibrio de la extracción, cinéticas de transferencia del metal, solubilidad de la especie extraída, separación de fases, perdidas por atrapamiento y arrastre.

Se utilizan columnas de flotación para remover el arrastre de orgánico en el electrolítico rico producido en la planta extracción por solvente, también se utilizan diez Filtros Chuquicamata con el objetivo de limpiar de todas las impurezas el electrolito proveniente de la flotación SX, para su posterior denostación en los cátodos.

De manera similar, existen coalescedores, los cuales son los encargados de remover el acuoso que se encuentra en el orgánico cargado que viene de la etapa de extracción con el objeto de limpiar el orgánico que entra a la etapa de lavado.

Electro obtención.

La electro depositación de cobre, es la recuperación del cobre como metal, a partir de una solución electrolítica, en una celda electroquímica, aplicado a soluciones ricas en cobre o soluciones de avance proveniente de extracción por solvente, para obtener el cobre en estado metálico.

El proceso en la planta de electro obtención de DRT, se realiza en celdas electrolíticas resistentes al ácido, cada celda contiene 60 cátodos, sobre los cuales se recuperará el cobre, y 61 ánodos.

La planta de electro obtencion, tiene 1000 celdas dispuestas en 6 Bancos, trabaja con tecnología Kidd Creek de cátodos permanentes, utilizando cuatro puentes grúa automáticos para el manejo de electrodos, que operan programados con las tres máquinas lavadoras y despegadoras de cátodos. Estas últimas con una capacidad promedio superior a las 800 toneladas diarias, lavan, despegan, pesan, corrugan, muestrean y forman paquetes de 26 piezas cada uno con un peso promedio de 2 a 2,5 toneladas de cátodos de cobre.

Cada banco es alimentado eléctricamente por transforectificadores, con corrientes promedios de 33 a 35 KA por cada equipo. Resultando una densidad de corriente entre 270 a 290 [A/m²].

Básicamente, en el cátodo se depositará el cobre metálico que hay en solución y en el ánodo, se produce la oxidación del agua, produciéndose gas de oxígeno. Razón por la cual en los ánodos se producen burbujas (O₂), las cuales al salir fuera del electrolito, forman una neblina ácida producto del arrastre del electrolito. El proceso del depósito de cobre se realiza por efecto de un campo eléctrico, en donde, en el cátodo se produce la reducción del cobre y en el ánodo la oxidación del agua, aparte de reacciones parásitas, motivo por lo cual, es imposible llegar a una eficiencia de corriente de un 100 %, el ciclo catódico es de 5 a 6 días. La modalidad de cosecha es a través de tercios de celdas, esto es levantar simultáneamente 20 placas de acero inoxidable por celda.

En las celdas se colocan esferas de polietileno y se les adiciona quillay, para controlar la emisión de neblina a la atmósfera, además la planta posee un sistema captador de aerosoles ácidos, que permite mantener un buen ambiente dentro de la nave, apto para los trabajadores así como para controlar la corrosión de las estructuras y equipos.

La figura 8 muestra el diagrama de la planta de electro obtención de la división Radomiro Tomic.

Estos cátodos de alta pureza, una vez disponible su análisis químico, son cargados en camiones y transportados al puerto de Antofagasta, donde son embarcados a distintos puntos del mundo, principalmente Francia y China.

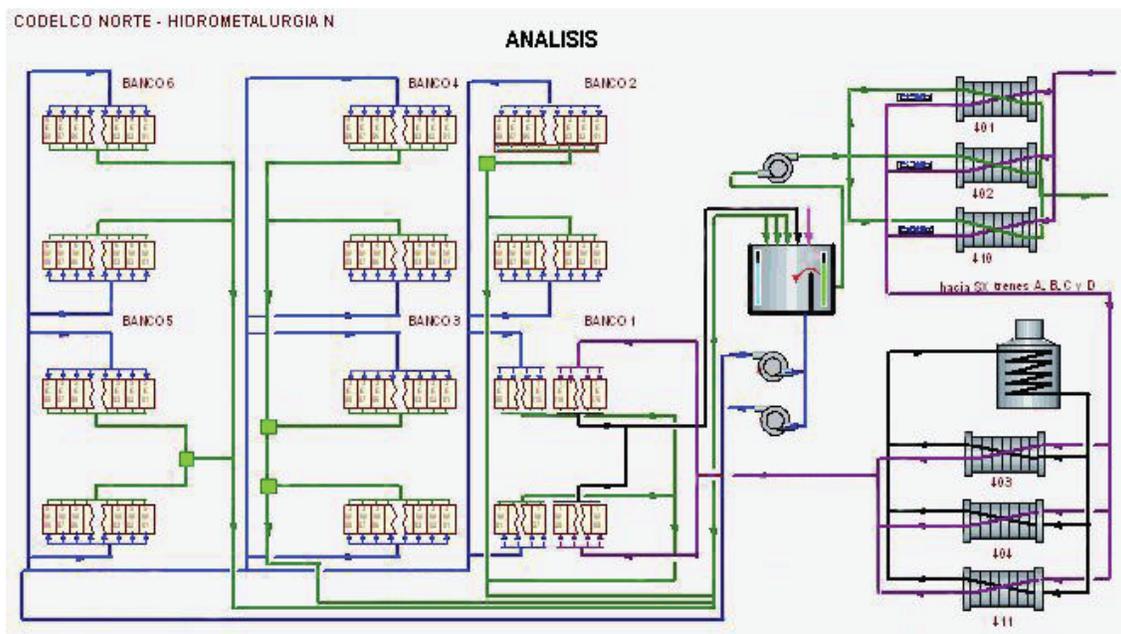


Figura 8: Diagrama proceso de electro obtención.

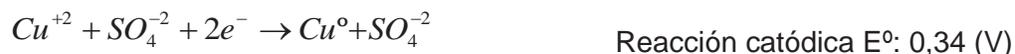
La energía suministrada a través de una fuente de poder externa es utilizada en realizar cambios químicos en una celda, estos cambios son inducidos eléctricamente en los conductores electrónicos y la conversión de una sustancia en otra ocurre en el electrolito. El nexo entre ambos conductores es la reacción electroquímica, la cual permite que los portadores de carga electrónicos se transformen en iónicos y el circuito se pueda cerrar a través de esa reacción.

El resultado para la celda de electrólisis es de dos reacciones, una de oxidación y una de reducción, las cuales mantienen la neutralidad eléctrica en el circuito global:

Reacción de Oxidación: Es la descomposición iónica del agua dando como producto hidrógeno y liberación de oxígeno al ambiente:



Reacción de Reducción: El cobre pasará de un estado iónico a estado metálico, depositándose en el cátodo:



La suma de las dos reacciones da como resultado cobre en el cátodo, generación de ácido sulfúrico y liberación de oxígeno de acuerdo a la siguiente ecuación:



La celda electrolítica está conectada a una fuente de potencial eléctrico, que será la responsable de que en los electrodos se produzcan las reacciones electroquímicas de interés para lograr la transformación irreversible de las sustancias.

Clasificación Catódica.

Partiendo de la base que el grado de pureza química de los cátodos condiciona su clasificación y su precio en el mercado internacional. La tabla 2 que muestra las especificaciones de cobre en impurezas para calidad de cátodos:

Composición	Grado A	Rechazo	Estándar
Cu (%)	>99,95	99.51 - 99.95	>99,51
Azufre (ppm)	0 - 8	8 - 15	15 - 100
Plomo (ppm)	0 - 3	3 - 5	5 - 100
Fierro (ppm)	0 - 5	5 - 7	7 - 50

Tabla 2: Composición para clasificación catódica.

Nave de Electro Obtención.

El edificio mide 512 m. de largo por 60 m. de ancho. La capacidad de diseño de la planta alcanza las 300.000 ton/año. Comprende tres circuitos hidráulicos y tres circuitos eléctricos, alcanzando los 36.000 K.A, la nave cuenta con 1000 celdas distribuidas en seis bancos, de las cuales 148 son de limpieza, ubicadas en el banco número 1. Cuatro bancos contienen dos grupos de 88 celdas y los otros 2 bancos contienen grupos de 77 celdas en forma contigua.

Actualmente se cuenta con 1000 celdas, donde por cada celda se ubican 61 ánodos y 60 cátodos, El ánodo es una placa de plomo Inppamet, sólida y rígida de forma rectangular de 0.936 m de largo por 1,18 m de ancho y 6 mm de espesor, con una barra de suspensión de cobre cubierta con aleaciones de plomo, no así en sus extremos y dos conos aisladores de PVC.

El cátodo es una placa sólida de acero inoxidable diseños falconbridge- ISA process AISI 316L, con barra de soporte rectangular de cobre y bandas aislantes laterales Scheibler, cuyas dimensiones son de 1,232 m de largo por 1,018 m de ancho y un espesor aproximado de 3,1 mm con un peso entre 75 a 80 Kg. Cada placa da origen a dos cátodos de cobre de 1 m por 1 m unidos en el extremo inferior, adquiriendo la forma de un libro. El peso promedio de cada libro es de 75 a 80 Kg.

Las celdas tienen un tamaño aproximado de 6,42 m de largo x 1,3 m ancho x 1,396 m de alto y están construidas de concreto, piso de madera revestido en resina y con recubrimiento interno de PVC de una sola pieza (paraliner). El paraline está a su vez protegido en los costados con láminas de PVC y en el piso con láminas corrugadas también de PVC. Con disposición Back to Back, la alimentación y el retorno del electrolito es por la misma pared frontal, la salida del electrolito es por rebose.

Las celdas se clasifican según su función en:

a) Celdas Scavenger o de limpieza

Estas celdas están ubicadas en el banco 1, se alimentan 2400 m³/h de electrolito rico, proveniente de la etapa de extracción por solvente, su concentración de cobre promedio es de 54 g/l. Estas celdas están destinadas a retener el orgánico producto del arrastre que pueda traer el electrolito. Se les denomina también celdas de sacrificio pues en ellas podría no producirse cobre de alta pureza. Hay un total de 148 celdas destinadas para este propósito.

b) Celdas comerciales

Son denominadas comerciales, porque el objetivo principal del proceso de EW está fijado en estas celdas, al obtener un producto de alta calidad comercial. La nave dispone de los bancos 2, 3, 4, 5 y 6 con un total de 852 celdas para este propósito.

Maquinas despegadoras.

Tres máquinas despegadoras de cátodos, tecnología Kidd Creek, procesan 500 placas por hora cada una. El Carrusel consta de ocho estaciones de trabajo, además de una estación de muestreo y enzunchado automático.

La determinación de la calidad física de los cátodos se realiza con un sistema de clasificación automática desarrollada en conjunto con IM2.

El muestreo de cátodos es automático y permite las opciones de programar la frecuencia de muestreo, malla de muestreo y el número de perforaciones en cada cátodo muestreado.

Los cátodos despegados pasan a una estación de corrugado, en donde son corrugados en secuencia alternada.

Los cátodos que no cumplen con las especificaciones son rechazados en la estación de rechazo y aquellos que no pueden ser despegados por la maquina pasan al patio de embarque donde se despegan manualmente, o simplemente se rechazan.

En la figura 9 se muestra el flow sheet del proceso realizado de la División Radomiro Tomic.

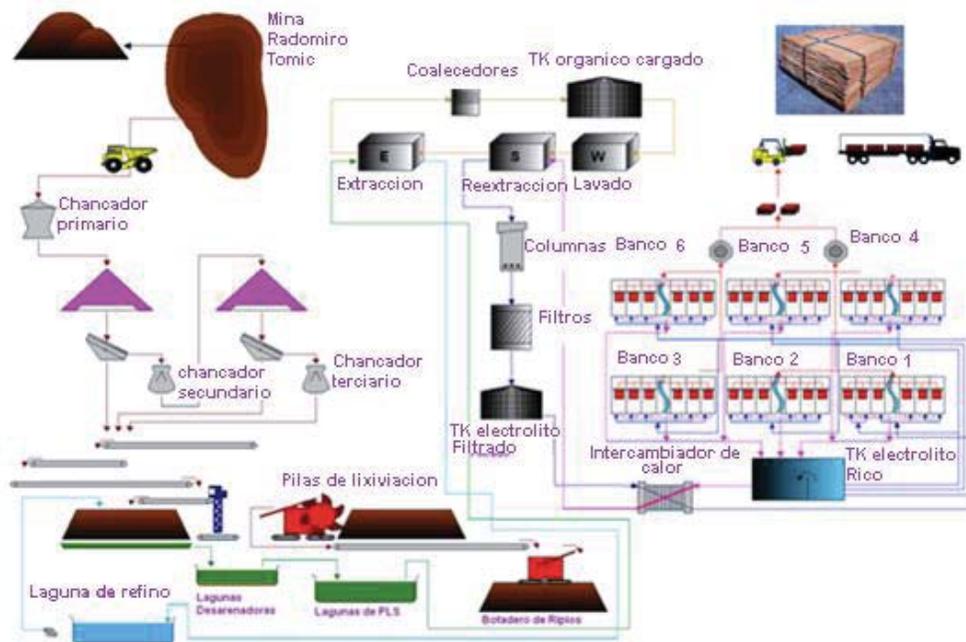


Figura 9: Proceso de lixiviación actual en Radomiro Tomic.

II. Tecnologías.

La Superintendencia de Ingeniería de Procesos de División Radomiro Tomic está buscando nuevas tecnologías que le entreguen un ahorro energético, ya sea en el proceso de obtención de cobre o en la utilización de energía en dependencia y equipos.

2.1 Planteo de Alternativas.

A continuación se describen algunas alternativas de eficiencia energética para ser aplicadas en La División.

Caldera Sumergida.

Esta es una maquina térmica que puede ser utilizada para calentar el electrolito rico que entra a la nave de electro obtención, actualmente el electrolito es calentado por vapor de agua producido en una caldera.

Esta maquinaria se instala directamente en el flujo de electrolito y se produce la combustión directamente en este, lo que se traduce en una mayor transferencia de calor, pues todo el calor generado de la reacción de combustión es absorbido por el fluido, minimizando las pérdidas y haciendo más eficiente el proceso.

El inconveniente que presenta esta tecnología es que los residuos de la combustión quedan en el electrolito, ensuciándolo; lo que trae problemas en la etapa de electro obtención, bajando la calidad catódica.

Biodiesel.

Este es un combustible producido a partir de organismos biológicos, donde, mediante una reacción de transesterificación de ácidos grasos con metanol, para producir esteres alquílicos.

Este combustible puede reemplazar o usarse en mezcla de diferentes concentraciones con el petróleo diesel, el cual sería cargado en los vehículos livianos de la División

Radomiro Tomic, desplazando total o parcialmente el uso de petróleo diesel en las camionetas.

Se debe evaluar el costo de la producción de biodiesel, considerando los costos de inversión, así como los costos de operación y de mantenimiento de los equipos de producción del combustible.

Micro Central Hidráulica.

En la división Radomiro Tomic existe un potencial hídrico el que actualmente no está siendo utilizado. El consumo de agua fresca proviene de 2 aducciones de ríos ubicado a una mayor altura de la planta de La División, recurso que puede ser utilizado para instalar una micro turbina y generar energía eléctrica para ser utilizada en dependencias cívicas de La División o en alguna etapa del proceso.

Se debe evaluar si recurso existente es suficiente para la generación de energía y los costos asociados a la compra e instalación de la micro turbina y al tendido eléctrico para conducir la energía al lugar de su utilización.

Bombas de Calor.

Las bombas de calor son máquinas térmicas con la capacidad de calentar un fluido a partir de otro que se encuentra a una temperatura menor. Está compuesta por dos intercambiadores de calor por los cuales circula un gas, este gas al entrar al intercambiador con el fluido frío, se expande hasta alcanzar una temperatura menor a la del fluido frío, de esta forma extrae el calor del fluido frío, luego, al salir del intercambiador, el gas se circula hasta el intercambiador donde se comprime hasta una temperatura mayor a la que se encuentra el fluido caliente, transmitiendo el calor absorbido del fluido frío.

En el proceso de la División Radomiro Tomic el refino que sale de la etapa de extracción por solvente se descarta a piscinas para luego regar las pilas, este refino lleva una temperatura promedio de 23°C, el cual al llegar a la piscina se enfría y esa energía es perdida, bajo este concepto, se puede recuperar esta energía desperdiciada, y mediante bombas de calor, calentar el electrolito rico que entra a la etapa de electro obtención, y de

esta manera conseguir ahorros en el consumo de petróleo usado en caldera para calentar en electrolito rico.

Se debe evaluar los beneficios económicos de esta recuperación de energía y factibilidad técnica para realizar el proyecto, pues los fluidos involucrados en el proceso tienen grandes concentraciones de ácido.

2.2 Elección de Alternativas.

Dentro de la superintendencia de Ingeniería de Procesos de la División Radomiro Tomic, existe gran interés y expectativas de probar y utilizar el biodiesel como sustituto del diesel cargado en los vehículos livianos de La División, por lo que se pide que se estudie la factibilidad técnico económica para la producción de este combustible a partir del aceite obtenido de un arbusto llamado *Jatropha Curcas*, el cual es conocido por resistir climas desérticos y por generar gran cantidad de aceite a partir de sus frutos.

La División posee gran cantidad de terrenos para hacer un cultivo de este arbusto y obtener el fruto para obtener el aceite que es la principal y más costosa materia prima para la producción de biodiesel.

La alternativa de instalar una caldera sumergida para calentamiento de electrolito tiene la gran limitante que al estar en contacto directo con este, se generan residuos que van quedando en el electrolito, ensuciándolo y afectando la calidad del depósito de cobre en la etapa de electro obtención, por lo que esta alternativa es descartada debido a que afecta las características físicas del depósito, generando pérdidas debido a cátodos de calidad inferior.

Las bombas de calor parecen ser una buena alternativa para calentar el electrolito pero es una tecnología que no ha sido lo suficientemente probada y además nos encontramos con complicaciones del material a usar, pues los fluidos de operación tienen grandes cantidades de ácido sulfúrico, lo que complica la construcción de los equipos debiendo buscar materiales que resistan pH bajos, lo que provoca un aumento del costo de inversión, pudiendo resultar en un proyecto no rentable.

Las micro turbinas hidráulicas son máquinas ampliamente probadas, con resultados satisfactorios y existe gran flexibilidad en cuanto a los recursos disponibles para la operación de estas. Dentro de los tipos de turbinas hidráulicas encontramos equipos que

pueden operar con grandes flujos de agua y una baja altura de presión, y también, las que generan electricidad con pequeños flujos y grandes alturas de presión de agua.

Debido a la mayor probabilidad de resultar exitoso este proyecto, se opta por realizar la ingeniería de perfil para la instalación de una micro central hidroeléctrica.

2.3 Proyectos para Estudio.

Debido a los antecedentes analizados, se decide realizar las evaluaciones técnico económicas de los proyectos de generación de biodiesel y la instalación de una micro central hidroeléctrica.

En División Radomiro Tomic, ya se ha tratado de generar un cultivo de *Jatropha Curcas*, para ver la adaptabilidad de la especie al clima y suelo del desierto de la segunda región del país, el mecanismo de sembrado no fue el adecuado, pues las semillas de *Jatropha* no germinaron.

Existe gran interés por parte de la Superintendencia de Ingeniería y Procesos en la utilización de biodiesel como combustible alternativo al petróleo diesel, convirtiendo a la división en una de las instituciones pioneras en Chile respecto al tema y los grandes beneficios energéticos y ambientales que esto traería.

Por otro lado, la existencia de un gran potencial hídrico hace casi evidente la necesidad de utilizar este recurso en generación de energía eléctrica para ser utilizada dentro de las instalaciones de Radomiro Tomic, lo que trae beneficios económicos y ambientales, pues se gana cierta autonomía respecto a la dependencia del Sistema Interconectado Norte grande, donde la generación de energía es mayormente de origen termoeléctrico.

III. Alcance General de Producción de Biodiesel.

Las experiencias de generación de Biodiesel son complicadas, principalmente por la materia prima, pues Chile no posee tierras para desarrollar cultivos a gran escala para estos fines, en especial el norte del país, la superficie de cultivo de maravilla es básica, y el cultivo del raps, que puede ser una alternativa, obtiene mejor precio como alimento para las salmoniculturas de exportación.

La opción más cierta es considerar como materia prima el aceite vegetal o la grasa animal. Para el caso específico de la División Radomiro Tomic (DRT), se ha evaluado que la materia prima a usar sea aceite vegetal de semillas de oleaginosas no comestibles, donde se presenta el árbol de *Jatropha Curcas*, la cual produce frutos con gran cantidad de aceite y no requiere de mayores cuidados ni consumo de agua.

En procesos de transesterificación y procesos termoquímicos, para la producción de biocombustibles sintéticos líquidos, estos productos son conocidos como combustibles de segunda generación.

Debe tomarse en cuenta que la instalación se realizaría en el Desierto de Atacama, el desierto más árido del mundo. Por tales motivos, se recomienda la instalación de un prototipo para analizar el escenario de producción del fruto a partir de las semillas, acompañado del análisis de las aguas con que se realizará el riego de ellas, pues no se conoce el rendimiento de aceite que se puede obtener por hectárea de cultivo de *Jatropha Curcas*, rendimiento que afecta directamente los costos asociados al cultivo y por lo tanto la rentabilidad del proyecto.

El biodiesel es el único combustible alternativo en cumplir con los requisitos de la Agencia de Protección Ambiental (EPA), además, el biodiesel puede usarse puro o mezclarse en cualquier proporción con el combustible diesel de petróleo. La mezcla más común es de 20% de biodiesel con 80% diesel de petróleo, denominado "B20".

Este biocombustible tiene una menor emisión de CO₂ que el diesel y al generar un cultivo el CO₂ es capturado y incorporado en la biomasa de la *Jatropha Curcas*.

3.1 Procesos de Negocio.

Para entender la producción de biodiesel, como negocio, se debe tener en cuenta el diagrama de procesos para la producción de la figura 10.



Figura 10: diagrama de proceso comercial de producción de biodiesel.

En la figura, se aprecia que el proceso de siembra agrícola tiene como entradas el agua, plantines y luz solar (de los cuales el agua y la luz solar no tienen costo). Como variable recursos, se debe contar con los recursos humanos. Por parte del control se tiene el período de riego y la medición de la calidad del fruto saliente del proceso.

Para la producción del biodiesel, como entradas se cuenta con el fruto (salida de la siembra), Metanol y NaOH (ambos son productos que se deben comprar). Como insumos se requiere de maquinarias (para la producción propiamente tal) y los recursos humanos. Para el control de las salidas se requiere de mantenimiento periódico y controles de calidad. Las salidas, que para este caso es el producto comercial, deben ser almacenadas en estanques que vayan de acuerdo a la demanda.

Los procesos de negocios afectados por la incorporación de tecnologías para producir biodiesel son:

- El aumento de la dotación de personal de apoyo: para la operación del proceso agrícola, operación para la obtención de biodiesel.
- Los residuos que deja el proceso son:

Glicerol: se utiliza en una variedad de productos, incluyendo alimentos, jabones, cosmetología, dinamita, industria química como producto bruto en síntesis de dendrímeros, poliéteres hiperramificados y poliésteres de gran área específica. También puede ser convertido en metanol, etanol, propanol y propanodiol por medio de hidrogenólisis, siendo buena materia prima para la preparación de otros disolventes. Investigadores han descubierto que puede convertirse en etanol con cepas de la bacteria *Escherichia Coli*, donde se han alcanzados buenos rendimientos.

Compost: debido a que no requiere tratamiento y por su alto contenido en nitrógeno, los desechos orgánicos pueden ser utilizados como biofertilizante luego de ser molidos. También puede ser utilizado como sustrato para producción de biogás, se ha utilizado en biodigestores de flujo vertical para obtención de metano.

Alternativas.

Puesto que el presente proyecto procede bajo la premisa de utilizar el fruto de *Jatropha curcas* para la obtención del aceite, el cual se utilizara como materia prima para producción de biodiesel, las alternativas existentes intervienen en la forma de procesar el fruto para generar biodiesel. Pues, existen plantas para procesar el aceite producto de forma batch y en forma continua. Sin embargo, las principales experiencias que se han tenido indican que se han logrado buenos resultados en procesos batch, a diferentes escalas de producción, mientras que en el caso de producción continua hay un número menor de plantas de biodiesel y algunas experiencias en plantas pilotos.

En el proceso de siembra y almacenaje, no se aprecian grandes variaciones como para proponer alternativas.

Por otro lado, una alternativa que podría resultar interesante es considerar la adquisición de una planta de refinación del subproducto Glicerol, el cual, de esta forma, tendría un precio comercial mayor.

Siembra Agrícola.

Se pretendería manejar por terceros el tema agrícola existente. Por lo que se deberá aumentar la dotación de personal.

Producción de Biodiesel.

Existen dos maneras de producir biodiesel, entre ellas:

- Producción tipo batch: Se utiliza una planta ofrecida por Central Biodiesel HTP (empresa de Argentina) cuya producción alcanza los 1200 litros por día.
- Producción continua: se utiliza una planta automática ofrecida por Welt (empresa de Concepción) con una producción de 960 litros por día.

Almacenaje.

Sólo se debe disponer de estanques acordes a los volúmenes involucrados a la producción, que por lo demás las incluyen los oferentes de las plantas de producción.

Mejoras.

Oferta de Innovatecs S.A.: propone la tecnología para ionizar el agua de riego de las plantas por inducción magnética, esto hace que la raíces de la plantas se expandan y tengan mayor accesibilidad a los nutrientes presentes en el suelo, haciendo que la planta crezca más y mejor, lo que haría aumentar el rendimiento del sembradío. Además esto ayuda a controlar la aparición de hongos y plagas en el sembradío.

Por otro lado, menciona que el cultivo de jatropha no es viable para la producción de biodiesel. Sin embargo existen especies vegetales que pueden prosperar en la zona agroclimática de interés (como el ricinus comunis), pero al igual que la Jatropha, su productividad no es comparable con la utilización de microalgas (de alto contenido de lípidos), las cuales tienen una capacidad productiva 100 veces mayor que las especies vegetales mencionadas. Ahora bien, cultivar microalgas en la zona de interés representa una serie de ventajas que pueden hacer rentable la producción de Biodiesel, y para lo cual ya existen antecedentes que avalan dicha posibilidad.

Agregar una planta de refinación: Welt incluye como alternativa hacer una inversión de US\$ 132.000 para refinar el subproducto glicerol. Pues, la venta de éste asciende a la suma de \$6.000 el litro o \$7.200 el Kg, en contraste con los US\$ 0,73 por litro del glicerol bruto.

Riesgos Potenciales.

Los riesgos potenciales están ligados con el carácter de innovación, asociado a:

- La instalación de un sector de siembra, tiene asociado los riesgos siguientes:
 - Que las semillas no logren germinar en un terreno donde la vegetación es escasa debido a la calidad de las tierras o la variabilidad de temperatura presente en la zona.
 - Que los costos de producción superen los valores estimados.
 - Que el rendimiento de aceite de la *jatropha curcas* no sea el esperado, bajando así la producción de biodiesel.
 - Que el agua disponible no cumpla con las características necesarias para que la semilla logre germinar y producir el fruto, a raíz de la característica de este recurso (proveniente de las aguas residuales del uso doméstico dentro del recinto).
 - Que el fruto o la semilla no logren sobrevivir a las adversidades del clima y las temperaturas variables durante el año.
- La instalación de una planta que produce biodiesel, tiene asociado el siguiente riesgo:
 - Que las variables nominales de las maquinarias no sean acordes a las condiciones del lugar. Por ejemplo, en RT las temperaturas ambientales son muy variables y dependen de la estación del año, lo que podría producir un congelamiento del combustible bajo los $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, esto puede ser solucionado utilizando mezclas con diesel o con el uso de aditivos.
 - En general, se está manipulando un combustible que es inflamable. Por lo tanto, el cuidado que debe haber es extremo. Para ello, se deben revisar los estándares de manipulación de combustibles en recintos industriales mineros.

Dado los riesgos potenciales, a partir de este estudio es que se recomienda aventurar este proyecto con un prototipo a modo de piloto y posteriormente evaluar si conviene extender las instalaciones y producción para DRT.

Beneficios.

Cómo beneficio general, se podrá contar con un combustible verde dispuesto para los procesos donde se requiera abastecimiento, tales como: Calderas, camiones, camionetas, etc.

Beneficios de rentabilidad.

- Ahorro por consumo de combustible.
- Venta del subproducto.
- Venta del subproducto Glicerol impuro.
- Venta de Bonos de Carbono, por concertó de captura y menor emisión.

Beneficios secundarios.

El biodiesel, utilizado como combustible líquido, presenta las siguientes ventajas:

Menor impacto ambiental:

- Combustible limpio, ciclo cerrado del carbono, se emite lo capturado en el crecimiento de la planta de Jatropha.
- Reducción de las emisiones contaminantes: SO₂, partículas, humos, visibles, hidrocarburos y compuestos aromáticos.
- Mejor calidad del aire.
- Efectos positivos para la salud, ya que reduce compuestos cancerígenos como PAH y PADH.

Reduce el calentamiento global

- Reduce emisiones de CO₂. Protocolo de Kyoto.
- Balance energético positivo (sin emisiones netas)
- Producto biodegradable: Se degrada el 85% en 28 días (en caso de derrames).

Se aprovechan los recursos de RT

Existe una cantidad considerable de aguas residuales debidamente tratadas, disponibles para el riego de las zonas donde se quiere instalar la zona de siembra.

Desechos Generados.

Los únicos desechos que el proyecto produce son los resultantes del proceso de producción de biodiesel, donde se encuentran los residuos orgánicos de la *Jatropha Curcas*, los cuales son la cáscara del fruto y la torta de molienda, estos residuos serán tratados y comercializados como fertilizante orgánico (compost).

El subproducto glicerol, resultante de la reacción de transesterificación, también será comercializado para la industria cosmética, alimenticia, para la producción de jabón y dinamita. El proyecto en sí no genera residuos contaminantes, pero todos los residuos que este produce son comercializados.

Impacto del Proyecto.

Impacto social, permitirá desarrollar bajo su alero una serie de programas productivos con agricultores, asociaciones vecinales y otros, permitiéndoles diversificar sus actuales cultivos, mejorar las condiciones de vida de su entorno, generar el desarrollo de nuevas Pymes, entre otros.

Impacto Económico, al diversificar la matriz energética, permite a la empresa tener una menor dependencia de las fluctuaciones económicas del diesel. Junto a lo anterior, la utilización de biodiesel, permite la aparición de un nuevo mercado, fomentando la actividad agrícola.

También al presentar mejores condiciones de lubricación, prolonga la vida útil del motor y bomba de inyección, sin tener que realizar modificaciones en estos al ser utilizados en mezcla.

Impacto medioambiental, La emisión de CO₂, se reduce al utilizar cultivos de semillas para la obtención del aceite vegetal, ya que estos absorben CO₂ mientras se desarrollan, por lo que en el balance no hay incremento en las emisiones.

Al ser de origen biológico, permite su degradación La emisión de sulfuro es mínima o nula La manipulación de biodiesel es segura, ya que no contiene ni benceno, ni otras sustancias aromáticas cancerígenas (Hidrocarburos aromáticos policíclicos), disminuyendo el riesgo de enfermedades respiratorias y alergias.

3.2 Biocombustibles.

Los Biocombustibles, son combustibles que se obtienen de la biomasa, es decir, organismos recientemente vivos como plantas o sus desechos metabólicos como estiércol. La materia prima para la elaboración de biocombustibles, es de origen biológico, y como tal, es susceptible de ser oxidada, obteniendo como resultado la liberación de energía.

Se debe entender que el principio de los biocombustibles, no es una menor emisión de gases, principalmente dióxido de carbono, sino que se libera el mismo volumen acumulado por los vegetales desde la atmósfera para realizar su proceso de fotosíntesis, es por ello, que se denominan como energías renovables al mantener un ciclo continuo de plantación y cosecha, como se esquematiza en la figura 11.



Figura 11: Ciclo del carbono en el proceso y consumo de biodiesel.

Los biocombustibles en muchas ocasiones son mezclados con otros combustibles en pequeñas proporciones, 5%, 10% o 20%, proporcionando, así, una reducción útil pero limitada de gases de efecto invernadero. En Europa y Estados Unidos, se ha implantado una legislación que exige a los proveedores mezclar biocombustibles hasta unos niveles determinados. Esta legislación ha sido repetida luego por muchos otros países que creen

que estos combustibles ayudarán al mejoramiento del planeta a través de la reducción de gases que producen el denominado 'Efecto Invernadero'.

Tipos de Biocombustibles.

La producción de biocombustibles está avanzando con tanta rapidez que últimamente se está hablando de generaciones de biocombustibles, es así, como ya se habla de biocombustibles de cuarta generación.

Estas generaciones se diferencian e identifican unas de otras por:

- Materia prima utilizada.
- Tecnología adoptada en el proceso de conversión.

1° Generación: Productos agrícolas de uso alimenticio como: Maíz, Caña de Azúcar, Usados en procesos de fermentación para etanol, transesterificación para biodiesel.

2° Generación: Productos vegetales sin uso alimenticio: Panicum virgatum, Semillas de oleaginosas no comestibles (Jatropha). Procesos de fermentación, Transesterificación, Procesos termoquímicos para la producción de biocombustibles sintéticos líquidos.

3° Generación: Biomasa en general, principalmente como: Árboles bajos en lignina, reduciendo costos de cultivo y mejorando la producción de etanol; Maíz, convertido en celulazas integradas. Métodos de producción similares en cultivos bioenergéticos específicamente diseñados o adaptados (técnicas de biología molecular)

4° Generación: Biomasa en general en procesos de captación y almacenamiento de carbono (CAC). Procesos termoquímicos, tecnologías de captación y almacenamiento de carbono, encauzando este en formaciones geológicas Ej.: Yacimientos petrolíferos agotados o a almacenamiento en minerales (carbonatos). Se cree que lo biocombustibles de cuarta generación contribuyen más a reducir las emisiones de GEI. [3]

Biocombustibles Líquidos.

Los biocombustibles líquidos, se denominan también biocarburantes, son productos que se utilizan como sustitutos o complemento de la gasolina y del diesel de vehículos.

Existen dos tipos de biocombustibles.

3.3 Bioetanol o Bioalcohol.

Es un alcohol producido por fermentación de productos azucarados como la remolacha y la caña de azúcar, o de granos de cereales como trigo, cebada y maíz, previa hidrólisis o transformación, en azúcares fermentables, del almidón contenido en ellos. Pueden utilizarse en su obtención otras materias primas menos conocidas como el sorgo dulce y la papa. Se utiliza en vehículos de combustión interna, como sustitutivo de la gasolina, solo o en mezclas.

- Mezclas: Por razones de miscibilidad entre ambos productos, no deben sobrepasar el 5 (E5) - 10% (E10) en volumen de etanol en climas fríos y templados, pudiendo llegar a un 20% (E20) en zonas más cálidas. No requiere de cambios significativos en vehículos, debiendo deshidratar el alcohol para evitar efectos indeseables en la mezcla producidos por el agua.
- Solo: Debe emplearse únicamente en motores específicamente diseñados para el biocombustible.

Un biocombustible derivado del bioetanol es el ETBE (etil ter-butyl eter) que se obtiene por síntesis del bioetanol con el isobutileno, subproducto de la destilación del petróleo, siendo menos volátil y más miscible con la gasolina que el propio etanol, utilizando mezcla con gasolina en proporciones del 10 - 15%. La adición de ETBE o etanol sirve para aumentar el octanaje de la gasolina, evitando la adición de sales de plomo. También se utilizan ambos productos como sustitutos del MTBE (metil ter-butyl eter) de origen fósil, que en la actualidad se está empleando como aditivo de la gasolina sin plomo.

3.4 Biodiesel.

Es un combustible líquido compuesto por una mezcla de ésteres alquílicos obtenidos mediante la reacción química de transesterificación o conversión de ácidos grasos a ésteres metílicos o ésteres etílicos, a partir de aceites vegetales, grasa animal o el aceite comestible usado” (CNE, 2007).

Este combustible puede utilizarse puro (“gasoil verde”), o en mezclas de diferentes concentraciones con el diesel de petróleo. Se utilizan notaciones abreviadas según el porcentaje por volumen de biodiesel en la mezcla: B100 en caso de utilizar sólo biodiesel, u otras notaciones como B5, B15, B30 o B50, donde la numeración indica el porcentaje por volumen de biodiesel en la mezcla, donde la mezcla más utilizada en nuestros días es al 20% (B20).

La ASTM (American Standards for Testing and Materials) lo define como “Ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos renovables tales como aceites vegetales y que se emplean en los motores de ignición de compresión (motores diesel) o en calderas de calefacción” [4].

Se obtienen por reacción con metanol, mediante reacción de transesterificación, que produce glicerina como producto secundario.

Los metilesteres de los aceites vegetales poseen muchas características físicas y físico-químicas muy parecidas al diesel con el que pueden mezclarse en cualquier proporción y utilizarse en los vehículos diesel convencionales sin necesidad de introducir modificaciones en el diseño básico del motor. Al utilizarlos como mezclas superiores al 5%, es necesario reemplazar los conductos de caucho del circuito de combustible, por otros materiales como viton, ya que el biodiesel degrada el caucho.

Las mezclas con biodiesel no modifican significativamente las propiedades físicas y fisicoquímicas del diesel, como su poder calorífico o el índice de cetano.

Como su punto de inflamación es superior, la manipulación y el almacenamiento son más seguros que en el caso del combustible diesel convencional.

El biodiesel es un combustible no contaminante y biodegradable, que se utiliza en el sector del transporte urbano, minero, agrícola y marino, así como en calderas de calefacción.

Actualmente es producido y utilizado en toda Europa y ha ido ganando popularidad mundial como energía renovable debido a sus muchas ventajas.

Para la obtención de biodiesel, se pueden emplear las siguientes materias primas:

- Aceites Vegetales: Aceites de semillas oleaginosas, Aceites de frutos oleaginosos, Aceites de semillas oleaginosas alternativas, Aceites de semillas oleaginosas modificadas genéticamente.
- Aceites de fritura usados.
- Grasas animales.

Los procesos industriales desarrollados por el humano, han requerido de combustibles principalmente de origen fósil, los cuales, han ido agotando sus reservas debido al gran crecimiento industrial y a el aumento de la población mundial, las Reservas Mundiales tienen tendencia de agotarse en los futuros 35 - 40 años, lo cual hace necesario realizar acciones cada vez más complejas para su obtención, aumentando, así, los costos y el valor de mercado.

Otro problema que se presenta, es la contaminación y residuos que estos generan, en perjuicio del medio ambiente, creando un desequilibrio, en que los gobiernos y empresas responsables han tomado conciencia, y han desarrollando estudios y acciones que apuntan a reducir el daño ocasionado, principalmente los producidos por la emanación de gases tóxicos a la atmósfera como resultante de la combustión de petróleo y otros.

Es en este contexto que los biocombustibles se presentan como una alternativa de generación de energía, de manera limpia.

Europa desde hace varios años está aumentando la producción de Biodiesel a base de aceite vegetal como sustituto del Diesel.

El ahorro de energía, ha adquirido importancia mundialmente a partir de la primera crisis petrolera en la década de los 70, debido al calentamiento del planeta ocasionado por el consumo de hidrocarburos en la generación de energía.

En la tabla 3 se muestra una comparación de las propiedades físico químicas del diesel y biodiesel.

Datos fisicoquímicos	Biodiesel	Diesel
	Ester metílico	Hidrocarburo
Composición combustible	C ₁₂ - C ₂₂	C ₁₀ - C ₂₁
Poder calorífico Kcal./Kg.	9.500	10.800
Viscosidad cinemática a 40º C	3.5 - 5.0	3.0 - 4.5
Peso específico (g/cm ³)	0.875 - 0.900	0.85
Azufre, (%)	0	0.2
Punto ebullición (ºC)	190 - 340	180 - 335
Punto inflamación (ºC)	120 - 170	60 - 80
Punto escurrimiento (ºC)	-15 / 16	-35 / -15
Número de cetanos	48 - 60	46
Relación estequiométrica	13.8	15

Tabla3: Comparación de características químicas entre diesel y biodiesel, fuente Eco2site, 2006 [5].

Reseña Histórica.

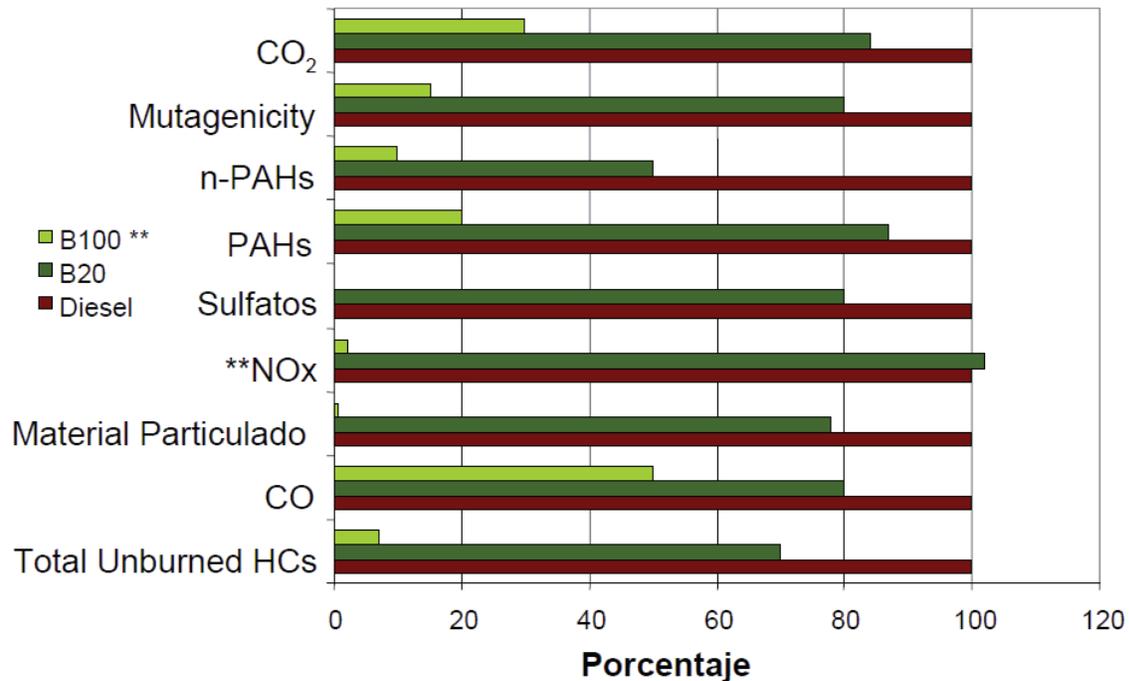
En el año 1900, se usó por primera vez aceites vegetales como combustibles, siendo pionero en esta materia Rudolph Diesel, quien utilizó diesel elaborado a partir de aceite de Maní, en su motor de ignición-combustión. Aceites vegetales fueron usados en motores diesel hasta los años 1920 cuando los motores comenzaron a usar el gasoil. Durante la segunda guerra mundial, periodo en que se produce una escasez de combustibles fósiles, los investigadores Otto y Vivacqua en Brasil, desarrollan la primera investigación en este sentido. En 1970, debido nuevamente a la escasez y alto costo de combustibles fósiles, se desarrolla una investigación apuntando a Biodiesel. En 1982, Austria y Alemania se realizaron las primeras pruebas técnicas con Biodiesel. En 1985, en Silberberg (Austria), se construye la primera planta piloto productora de RME (Rapaseed Methyl Ester).

Hoy en día países como Alemania, Austria, Canadá, Estados Unidos, Francia, Italia, España, Brasil, Malasia y Suecia, son pioneros en la producción, ensayo y uso de Biodiesel en Automóviles.

Ventajas del Biodiesel.

1. Es el único combustible alternativo en cumplir con los requisitos de la Agencia de Protección Ambiental (EPA), bajo la sección 211(b) del "Clean Air Act" [6].
2. El biodiesel funciona en cualquier motor diesel convencional, no requiere ninguna modificación. Puede almacenarse puro o en mezcla con diesel.
3. El biodiesel puede usarse puro o mezclarse en cualquier proporción con el combustible diesel de petróleo. La mezcla más común es de 20% de biodiesel con 80% diesel de petróleo, denominado "B20".
4. La combustión de biodiesel disminuye en 90% la cantidad de hidrocarburos totales no quemados, y entre 75 - 90% en los hidrocarburos aromáticos. Además proporciona significativas reducciones en la emanación de partículas y de monóxido de carbono. Proporciona un leve incremento en óxidos de nitrógeno dependiendo del tipo motor, como se muestra en la figura 12.
5. El biodiesel contiene 11% de oxígeno en peso y no contiene azufre, el uso de este puede extender la vida útil de motores porque posee mejores cualidades lubricantes que el combustible fósil, mientras el consumo, encendido, rendimiento del motor se mantienen prácticamente en sus valores normales.
6. En el balance final no hay aumento de emisiones de dióxido de carbono, ya que las reducidas emisiones, en comparación con el petrodiesel, se compensan con la absorción de CO₂ por parte de los cultivos oleaginosos.
7. El biodiesel es biodegradable en solución acuosa, el 95% desaparece en 28 días y tiene un punto de inflamación de 150°C que se compara muy favorablemente al diesel de petróleo cuyo valor es de 50° C.
8. El biodiesel es un combustible probado satisfactoriamente en más de 15 millones de Km. en los Estados Unidos y por más de 20 años en Europa.
9. Los olores desagradables de la combustión del diesel del petróleo, son reemplazados por el aroma de las palomitas de maíz o papas fritas que se producen con el biodiesel.

10. La Oficina del Presupuesto del Congreso y el Departamento de Defensa, el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, junto con otros organismos han determinado que el biodiesel es la opción más económica de combustible alternativo que reúne todos los requisitos del Acta de Política Energética.



** B100 (100% biodiesel) con convertidor catalítico en el vehículo

Figura 12: Emisiones relativas de diesel y biodiesel [7].

Desventajas del Biodiesel.

1. Alta dependencia del costo de las materias primas.
2. Generación del co-producto glicerina cuya purificación a grado técnico sólo es viable para grandes volúmenes.
3. Menor capacidad energética (5% menos), aunque esto, en la práctica, no es tan notorio debido al mayor índice cetano, lo que produce una combustión más completa con menor compresión

Principales Retos del Biodiesel.

Los procesos asociados a la cadena de producción del biodiesel son numerosos, lo que tiende a elevar su costo de producción. La solución es conseguir un precio competitivo optimizado y realizar el mayor número de procesos en una sola instalación, como pueden ser la extracción, trituración y purificación en un proceso integrado.

En general el biodiesel presenta buenas características como combustible y no tiene complicaciones para ser usados en motores de vehículos diesel ya que puede ser usado directamente en estos o en mezclas con diesel y presenta menos emisiones de dióxido de carbono al ambiente, además de ser un producto biodegradable, por lo que lo convierte en un combustible limpio.

De esta forma el biodiesel se perfila como un buen sustituto del diesel actualmente usado, el cual va agotando sus reservas y se prevé un déficit mundial y como el combustible alternativo de menor costo.

Para hacer de la producción de biodiesel un negocio rentable se debe obtener las materias primas a un costo rentable, donde el principal insumo y más costoso, es el aceite que dará origen al biocombustible, el cual requiere de un cultivo agrícola para la obtención de aceite de origen vegetal, el cual tiene altos costos asociados.

También se debe considerar la producción de biodiesel en grandes cantidades para minimizar los costos de producción y obtener los beneficios asociados a economías de escala donde el costo unitario del biodiesel decrece a medida que se aumenta la producción del mismo.

En conclusión el biodiesel se presenta una gran alternativa para sustituir el consumo de diesel, en conjunto con beneficios ambientales, pero debido a costos de sus materias primas se puede convertir en un negocio no rentable por el momento, para mitigar este efecto se debe considerar una producción a gran escala y así minimizar los costos de producción.

El biodiesel presenta grandes oportunidades a futuro, pues el diesel va agotándose paulatinamente y, consecuentemente, el precio del diesel aumentando.

3.5 Matriz Energética Mundial.

Al realizar un análisis simple de la matriz energética, se puede concluir que el Petróleo es el componente más importante, ver figura 13, con una demanda diaria de 85,29 millones de barriles.

Esta importancia se debe a la gran diversidad de usos que presenta este tipo de combustible fósil, dentro de los cuales se puede destacar:

- 55% Transporte
- 34,8% Industria
- 6,9% Uso Residencial
- 3,3% Comercio

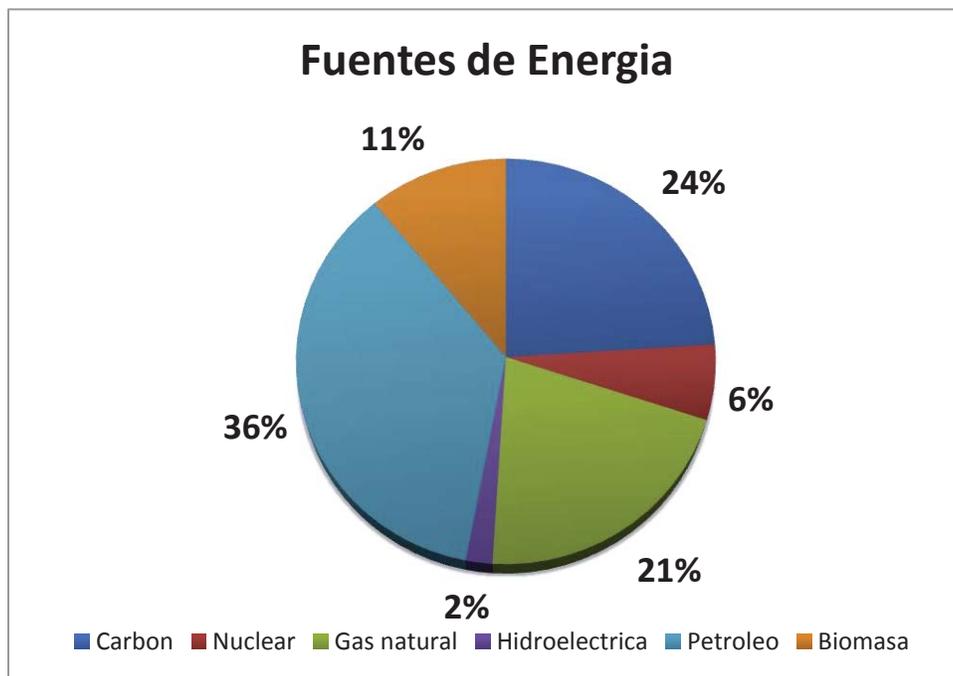


Figura 13: Matriz Energética Mundial, World Energy.

El consumo de Petróleo en el planeta alcanza alrededor de 30 mil millones de barriles por año, estimando las reservas actuales de este combustible en 1.000 mil millones de barriles (incluye nuevos descubrimientos). Según la EIA (Agencia Internacional de Energía), el consumo de petróleo aumentara de 85,29 millones de barriles/día a 118

millones de barriles/día en el año 2030, con un promedio anual de 1,6%, de donde el 65% de este aumento corresponde a países en desarrollo.

Sobre la base, del aumento significativo proyectado de consumo de petróleo, se debe tener en consideración el aumento directamente proporcional de gases contaminantes o de efecto invernadero como el CO₂.

Por los altos precios e inseguridad de abastecimiento, es que se hace imprescindible el desarrollo de alternativas al petróleo en la forma de biocombustibles.

Biodiesel en el Mundo.

Hoy en día países como Alemania, Austria, Canadá, Estados Unidos, Francia, Italia, Malasia y Suecia son pioneros en la producción, ensayo y utilización de biodiesel en automóviles, como se muestra en la tabla 4.

<i>País</i>	<i>Capacidad Instalada (ton/año)</i>	<i>Producción (ton/año)</i>	<i>% Producción</i>
Alemania	550.000	415.000	41,2%
Francia	290.000	286.000	28,4%
Italia	240.000	160.000	15,9%
Bélgica	110.000	86.000	8,5%
Inglaterra	2.000	2.000	0,2%
Austria	20.000	20.000	2,0%
Suecia	11.000	6.000	0,6%
Checoslovaquia	47.000	32.000	3,2%
TOTAL	1270000	1.007.000	100,0%

Tabla 4: principales países de Europa productores de Biodiesel en el año 2000, SAGPYA, en base a "Biodiesel: El pasado del futuro" por Eugenio F. Corradini.

En Europa, es producido principalmente a partir del aceite de la semilla de canola (también conocida como colza o rapeseed) y el metanol, denominado comercialmente como RME (Rapeseed Methyl Ester), el cual es utilizado en las máquinas diesel puro o

mezclado con aceite diesel, en proporciones que van desde un 5% hasta un 20%, generalmente. En Alemania y Austria se usa puro para máximo beneficio ambiental.

Además de la colza, en los últimos años se ha producido biodiesel a partir de soya, girasol y palma, siendo esta última la principal fuente vegetal utilizada en Malasia para la producción de biodiesel PME y PEE (Palm Methyl Ester y Palm Ethyl Ester)

Producción Mundial de Biodiesel

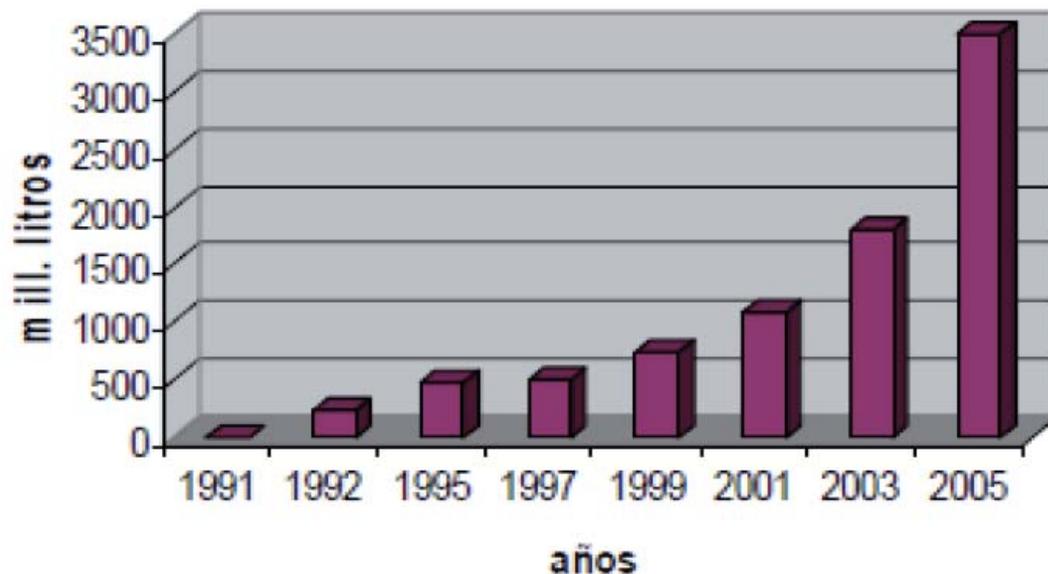


Figura 14: Aumento de la demanda de biodiesel.

En la figura 14 se observa el gran aumento del uso de biodiesel en el mundo, entre los años 2000 y 2005 hay un crecimiento anual del 30% en el uso de este combustible.

3.6 Bonos de Carbono.

Debido a la problemática de emisión desmesurada de gases de efecto invernadero a la atmósfera, es que el hombre ha decidido tomar acción respecto, a través de un protocolo internacional denominado el Protocolo de Kyoto. Para cumplir con dicho protocolo, se han implementado instrumentos como el Esquema de comercio de emisiones de Carbono de La Unión Europea, donde instalaciones de algunos sectores industriales establecen intercambios de bonos de carbono para contrarrestar sus emisiones.

El protocolo de Kyoto es un acuerdo internacional, donde los países industrializados se comprometen a reducir sus emisiones colectivas de GEI, por lo menos en un 5% respecto a las emisiones de 1990. Para lograr dicha meta, los diferentes países tendrán un período de tiempo determinado, comprendido entre el año 2008 al 2012, período denominado “primer período de compromiso” [8].

El mercado de bonos de carbono ha crecido enormemente, de hecho, su precio ha aumentado de 3.45 dólares en 1998 a 16 dólares en 2009 [9]

En dicho protocolo también se mencionan tres mecanismos, que permiten a los países participantes, lograr sus metas a través de medios para recortar las emisiones o incrementar los sumideros de carbono, a costos más bajos en otros países que en el propio. Estos mecanismos son:

- Ejecución o Implementación Conjunta.
- El Mecanismo de Desarrollo Limpio.
- El mecanismo de Comercio de Derechos de Emisión.

Al tratarse de un proyecto Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL), se puede obtener ingresos por concepto de bonos de carbono. Donde existen dos posibilidades.

Menor emisión de CO₂

Efectuado el cálculo de la rentabilidad del proceso de elaboración de biodiesel se determinó que el mismo no es rentable por sí solo debido al alto costo de la materia prima [7].

Por otra parte se consideraron las características del combustible obtenido y las ventajas que éste presenta con respecto del combustible obtenido a partir de derivados del petróleo, para ello se determinaron las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) generadas por m³ de ambos combustibles.

Para el cálculo de Emisiones de gases de efecto invernadero se utilizó la siguiente fórmula [10]:

$$E = Q * FE * PC$$

Donde:

FE_i: Factor de emisión del combustible en estudio

Q: Es el consumo de combustible

PC: Poder calorífico

Los datos obtenidos fueron los siguientes:

- Para el gasoil, considerando que:

$$Q = 1 \text{ m}^3 = 835 \text{ Kg de diesel}$$

$$FE = 73,52 \text{ Kg CO}_2/\text{GJ}$$

$$PC = 43,46 \text{ MJ/Kg}$$

$$E_1 = 2,643 \text{ Ton CO}_2$$

- Para el biodiesel, Considerando que:

$$Q = 1 \text{ m}^3 = 875 \text{ Kg de biodiesel}$$

$$FE \approx 55 - 60 \text{ (depende del origen del aceite utilizado)} \approx 57 \text{ Kg } \frac{\text{CO}_2}{\text{GJ}}$$

$$PC = 9.500 \text{ Kcal/Kg}$$

$$E_2 = 1.880 \text{ Ton CO}_2$$

Luego se compararon las Emisiones generadas por ambos combustibles y se calculó la diferencia entre ellos, lo que dio:

$$E_1 - E_2 = 0,763 \text{ Ton CO}_2/\text{m}^3$$

Esto demuestra que el biodiesel presenta adicionalidad en función al cálculo de emisiones de gases efecto invernadero, respecto al diesel.

Captura de CO₂.

Al establecer un cultivo de jatropha curcas, así como en otros tipos de plantaciones, se captura el carbono que la planta va incorporando a su organismo, quedando almacenado en troncos y ramas. La cantidad de carbono que el árbol captura, consiste sólo en el pequeño incremento anual que se presenta en la madera del árbol multiplicado por la

biomasa del árbol que contiene carbono. Entre 40% y 50% de la biomasa de un árbol es carbono. Es necesario conservar los árboles para evitar que el carbono contenido en ellos se emita a la atmósfera [11].

Se estima que la cantidad de CO₂ capturado es de 6 Kg por planta [11].

Costos.

La implementación de un proyecto de Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), conlleva un gasto en las distintas etapas del ciclo del proyecto, estas se detallan en la tabla 5 [12].

Etapas del Proyecto	Costos Asociados												
Diseño del Proyecto MDL	US\$ 20.000 a US\$ 30.000												
Aprobación Nacional	En Chile no existe costo de emisión por la Carta de Aprobación												
Validación	US\$ 15.000 a US\$ 50.000												
Registro	La Junta Ejecutiva del MDL fija el precio de registro de un proyecto de acuerdo al número de toneladas reducidas												
	<table border="1"> <thead> <tr> <th data-bbox="555 978 1161 1035">Promedio de Ton de CO₂ eq. reducidas por año.</th> <th data-bbox="1161 978 1356 1035">US\$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="555 1035 1161 1081">Menos de 15.000</td> <td data-bbox="1161 1035 1356 1081">5.000</td> </tr> <tr> <td data-bbox="555 1081 1161 1127">Entre 15.000 y 50.000</td> <td data-bbox="1161 1081 1356 1127">10.000</td> </tr> <tr> <td data-bbox="555 1127 1161 1173">Entre 50.000 y 100.000</td> <td data-bbox="1161 1127 1356 1173">15.000</td> </tr> <tr> <td data-bbox="555 1173 1161 1220">Entre 100.000 y 200.000</td> <td data-bbox="1161 1173 1356 1220">20.000</td> </tr> <tr> <td data-bbox="555 1220 1161 1266">Más de 200.000</td> <td data-bbox="1161 1220 1356 1266">30.000</td> </tr> </tbody> </table>	Promedio de Ton de CO ₂ eq. reducidas por año.	US\$	Menos de 15.000	5.000	Entre 15.000 y 50.000	10.000	Entre 50.000 y 100.000	15.000	Entre 100.000 y 200.000	20.000	Más de 200.000	30.000
	Promedio de Ton de CO ₂ eq. reducidas por año.	US\$											
	Menos de 15.000	5.000											
	Entre 15.000 y 50.000	10.000											
	Entre 50.000 y 100.000	15.000											
Entre 100.000 y 200.000	20.000												
Más de 200.000	30.000												
Verificación y Certificación	Monitoreo: 0,05 – 5% del valor del proyecto Verificación: US\$ 3.000 - US\$ 20.000 por visita de verificación												
Certificación y Emisión de CER´s	Existe un cargo por administración, y además un cargo para el Fondo de Adaptación en las Naciones Unidas que equivale al 2% de los CER´s generados anualmente.												

Tabla 5: Costos del ciclo del proyecto escala regular

IV. Producción de Biodiesel.

La producción del biodiesel es bien conocida y citada en la literatura y a través de diversos medios informativos. Básicamente se elabora mediante la reacción de transesterificación de grasas y aceites (triglicéridos) con alcohol metílico en ambiente básico. Los álcalis a emplear pueden ser NaOH, KOH o metilato sódico, en solución metanólica. El producto principal obtenido es una fase ester la cual es utilizada como sustituto del combustible en vehículos con motores diesel, otro producto resultante de esta reacción es una fase de glicerol, inmiscible con el ester producido, la cual puede ser comercializada para la industria cosmética, farmacéutica o para la fabricación de explosivos. La separación de estas fases se lleva a cabo por gravedad.

Para la obtención del aceite, el cual es la principal materia prima para la producción de biodiesel, se realizan cultivos destinados exclusivamente a la producción de combustible verde, donde los desechos orgánicos generados pueden ser comercializados como biofertilizantes. Debido a estos cultivos y al CO₂ capturado por la biomasa de estos y a la menor emisión del biodiesel, es que se abre el mercado de los bonos de carbono.

Se presentan mecanismos y plantas existentes en el mercado para la producción de biodiesel, donde se presentan dos tipos de tecnologías: una planta batch y una planta de proceso continuo que además cuenta con un purificador de glicerol, cada una de estas tecnologías con sus costos de inversión.

Para la producción de biodiesel se plantea un volumen de producción necesario para cubrir las necesidades de consumo en vehículos livianos de la División Radomiro Tomic, producción que es menor a la capacidad de las plantas, por lo que se plantean 2 nuevos volúmenes de producción considerando una utilización máxima de cada planta y una última producción considerando la posibilidad de duplicar la producción de la planta batch agregando un equipo a un costo de inversión mínimo.

Se plantean los costos asociados a la preparación del terreno que servirá para el cultivo de *Jatropha Curcas*.

4.1 Proceso Para La Producción de Biodiesel.

El proceso productivo se inicia con el cultivo y posterior cosecha del fruto de *Jatropha Curcas*, el cual pasa a lavado y seguido de esto entra a la unidad de pelado del fruto, donde se separa de la cascara. El fruto pelado entra a la trituradora de donde se obtiene el aceite y los residuos orgánicos (torta de molienda). La cascara y la torta de molienda se almacenan para ser comercializadas como biofertilizante o compost.

El aceite se junta en un mezclador con el metanol y el NaOH, se calientan y entran al reactor, durante una hora aproximadamente, donde se producirá la reacción de transesterificación, para obtener el biodiesel y el glicerol, estos se dejan decantar por 7 horas aproximadamente para que se separen las fases. Una vez obtenido el biodiesel, este pasa por un filtro para su purificación de elementos sólidos y el glicerol se almacena para ser comercializado. La figura 15 muestra el diagrama del proceso de producción de biodiesel.

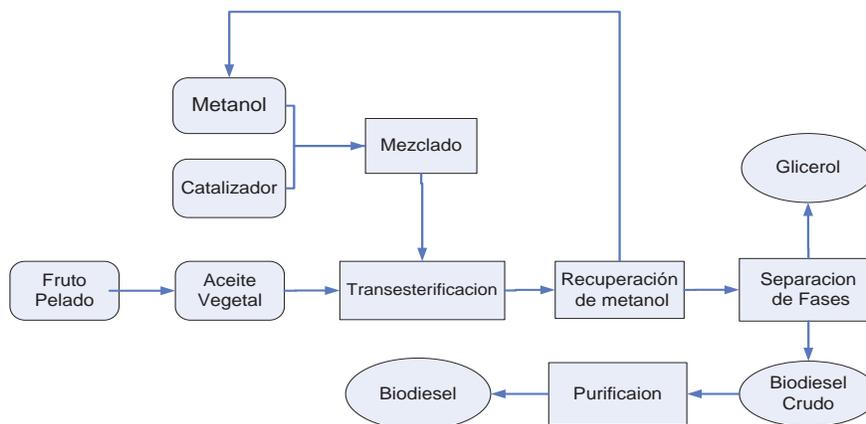


Figura 15: Diagrama del proceso de producción de biodiesel.

Descascaradora.

La primera etapa del proceso de producción de biodiesel, consiste en el pelado de la semilla de *Jatropha curcas*, para la obtención del fruto que será triturado, y así la obtención del aceite y torta de molienda.

La descascaradora está especialmente diseñada para su aplicación con productos provistos de una cáscara externa dura, tales como las almendras, las avellanas u otros de naturaleza similar, mediante la que se realiza la operación de descascarado y la

separación del fruto y de los residuos para aprovechamiento del primero y eliminación de los segundos, caracterizada porque el eje consiste en un eje cilíndrico metálico desde el que se proyectan una multiplicidad de dedos alineados según varias aristas del eje, y alternados entre sí para determinar un decalaje entre dedos sucesivos que garantice el barrido completo del espacio del receptáculo, consistiendo cada uno de dichos dedos en una varilla de longitud predeterminada, que se desarrolla con un tramo final curvo.

Extracción De Aceite.

La extracción de aceite de los diferentes cultivos, se puede realizar mecánicamente (compresión o simple trituración) o químicamente (solventes).

El primer método o extracción en frío se basa en someter a presión la semilla por medio de un tornillo prensa, obteniéndose así un aceite de grado comercial (el cual posteriormente debe ser filtrado) y un excedente. Para la extracción por solventes es necesario previamente triturar la semilla y adicionarle una sustancia que disuelva el aceite, para así separar éste posteriormente por calentamiento.

Para la producción de biodiesel, el método de extracción es el mecánico, ya que el aceite requerido es de grado comercial, además el aceite obtenido en frío no genera fosfolípidos, denominados goma, los cuales decantan al interior de los estanques, provocando la obturación de algunos componentes.

Transesterificación.

El proceso de obtención de biodiesel a partir de aceites vegetales, grasas animales y aceites de fritura usados, para su uso como combustible diesel, comprende la transesterificación del aceite o grasa con alcoholes ligeros en medio básico para generar ésteres de ácidos grasos (biodiesel).

La reacción de transesterificación es una reacción característica de los ésteres, y consecuentemente de los lípidos, en la cual el aceite o la grasa reacciona con ácidos grasos, alcoholes u otros ésteres con el intercambio de los grupos acilo (R-CO).

Mezclados los triglicéridos y el metanol, con hidróxido de sodio, hidróxido de potasio o metilato de sodio y después de agitar esta mezcla durante 40 - 60 minutos a una temperatura entre 30°C a 35°C, el biodiesel se separa de la fase glicerol que se forma. La

fase glicerólica se forma a partir de la glicerina, de los jabones, del NaOH y del metanol sobrante. El éster formado se lava con agua para eliminar remanentes del catalizador y de glicerina. El éster se somete a secado y el producto obtenido, biodiesel, se envía a tanques de almacenamiento como producto terminado [13].

La reacción general de producción de biodiesel desde triglicérido utilizando metanol en medio alcalino se muestra en la figura 16.

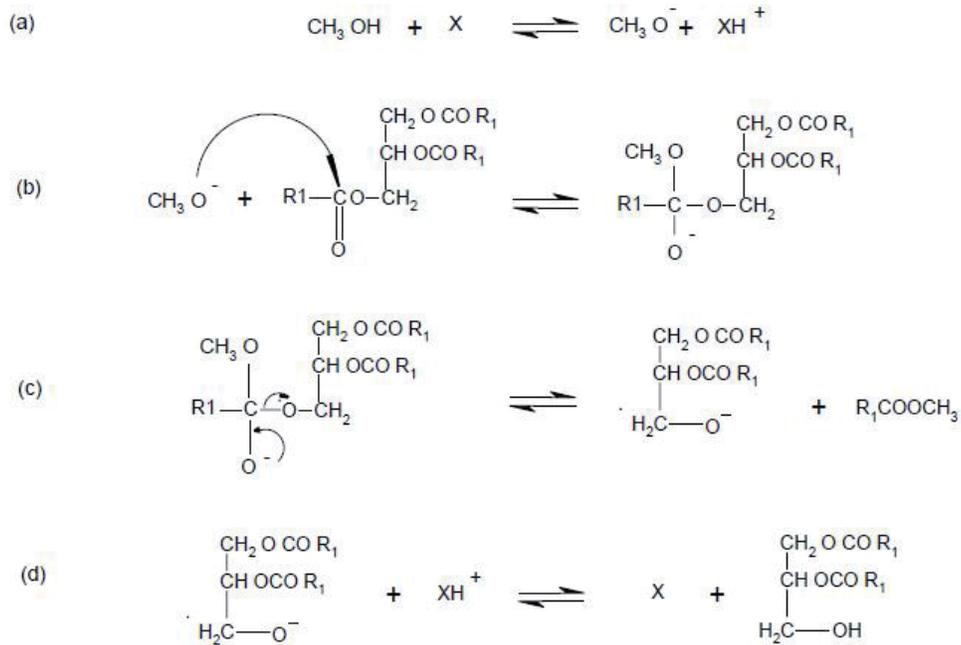


Figura 16: Mecanismo de reacción de transesterificación [14].

Donde:

R1: radicales alquilo

X: medio basico (NaOH, KOH)

En el paso (a) de la reacción el alcohol (CH_3OH) reacciona con el álcali. R1 es el grupo alquilo que forma parte de la cadena del ácido graso del triglicérido.

En el paso (b) el radical cargado negativamente (CH_3O^-) reacciona con el doble enlace del grupo carbonilo del triglicérido.

En el paso (c) se forma una molécula del ester alquílico (R1COO CH_3).

En el paso (d) se regenera el álcali, formándose un diglicérido.

Los pasos (a) al (d) se repiten hasta la desaparición del triglicérido con la formación del monoalquil ester y glicerina como productos finales.

Cada molécula de aceites y grasas de plantas y animales tienen la misma configuración y sólo difieren en la longitud de la cadena de carbono o en el número de dobles enlaces, lo cual produce diferentes puntos de fusión, estabilidad de oxidación, etc. El aceite debe ser limpio y presentar un máximo de 0.5% de ácidos grasos libres, después se mezcla el aceite con 10 - 15% de metanol o 43% de etanol en volumen y con 1 – 1,5 % de NaOH. El alcohol y el NaOH deben estar libres de agua y el aceite no debe tener más de 0,1 % de H₂O para evitar la formación de jabón. Con tal precaución la reacción se completa al menos en un 98%.

La figura 17 muestra el flow sheet del proceso general para la producción de biodiesel, considerando desde el cultivo y recolección de fruto para la obtención del aceite, hasta la obtención del biodiesel purificado, listo para ser utilizado.

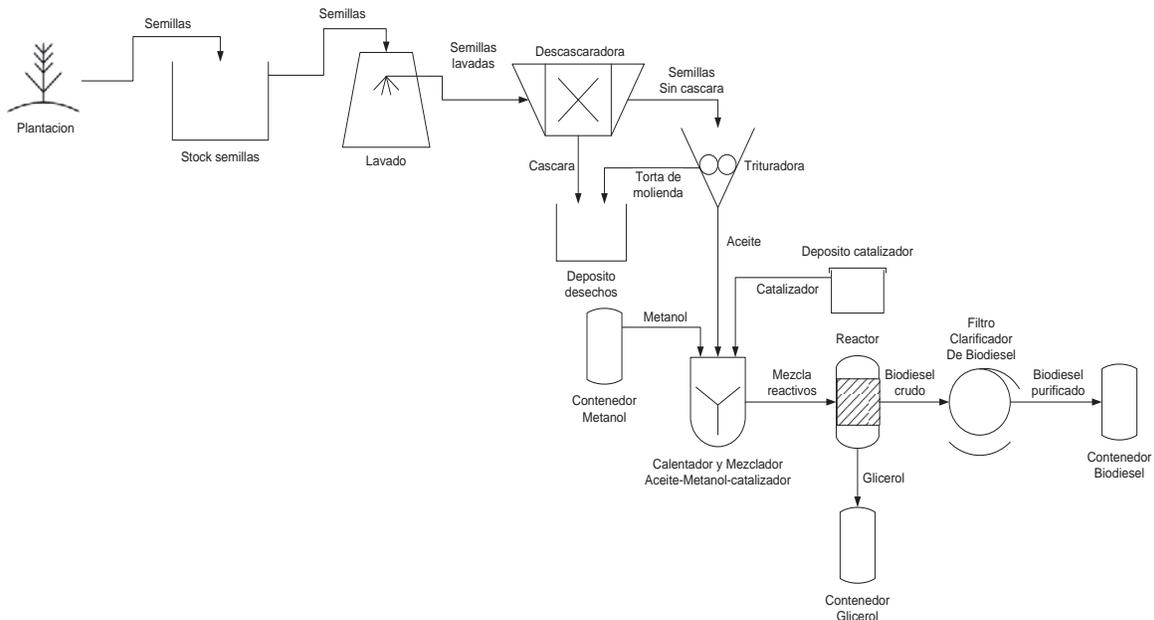


Figura 17: Flow sheet proceso batch de producción de biodiesel.

Subproductos del Proceso.

Dentro del proceso de producción de biodiesel encontramos diferentes subproductos, ya sea, en la etapa de procesamiento del fruto para la obtención del aceite, así como en el proceso industrial de producción de biodiesel. Cada uno de estos subproductos tiene un valor económico por lo que pueden ser comercializados para aumentar la rentabilidad del proyecto de generación de biodiesel.

Cascara.

Para obtener la semilla, primero, es preciso pelar o descascarar el fruto, usando una máquina descascaradora. Cerca del 37% en peso del fruto corresponde a la cascara. Esta por su alto contenido en nitrógeno, puede ser utilizada como biofertilizante, después de pasarse por un molino y convertirse en compost.

La producción promedio de cáscara del fruto es de 4.440 Kg por hectárea en el escenario optimista, 2.934 Kg por hectárea en el escenario medio y de 1.429 Kg por hectárea en el escenario pesimista. La cáscara tiene un valor calórico de aproximadamente 2.651 kcal/kg (15% de humedad), por lo que también puede ser empleada como combustible [15].

Torta de Molienda.

Entre el 40% y 50% del peso de las semillas peladas de *Jatropha Curcas* queda como pasta resultante de la extracción del aceite, conteniendo proteína, carbohidratos y compuestos tóxicos. Se requiere tratamiento posterior para alimentar a animales con esta pasta resultante de la extracción de aceite. Esta, también es un buen sustrato para la producción de biogás. Se ha utilizado en biodigestores de flujo vertical para obtener biogás con filtros en cada reactor para la obtención de metano [11].

La cantidad de torta de molienda obtenida en cada escenario es de 3.024 Kg por hectárea al año, en el optimista, 1.998 Kg por hectárea al año en el medio y de 973 Kg por hectárea al año en el pesimista. El uso más conveniente de esta torta es como compost, pues no requiere de tratamiento alguno.

Glicerol.

Se han encontrado las aplicaciones innovadoras para un subproducto de la producción del combustible biodiesel, el glicerol. Esto, alternadamente, podría ayudar a transformar la industria del biodiesel en algo que se asemeja más a la industria petrolera, donde el biodiesel es apenas uno de los muchos otros productos aprovechables, como las refinerías de petróleo que hacen más de un producto que son la materia prima para otras industrias. El glicerol se utiliza en una variedad de productos, incluyendo los alimentos, jabón y dinamita. Pero como se ha elevado la producción del biodiesel en todo el mundo, el mercado para el glicerol parece estar saturado.

El glicerol bruto obtenido, que se produce en una cantidad del orden del 10% en volumen del biodiesel elaborado, puede ser refinado para obtener glicerina, un producto con valor agregado, comercializable en los campos químico, farmacéutico y cosmético. Entre los empleos de la glicerina, los más importantes son: solvente, plastificante, edulcorante, suavizante, en la producción de nitroglicerina (ya sea para explosivos o para uso farmacéutico como vasodilatador), cosméticos, jabones, licores, lubricante, tintas, anticongelante, producción de resinas, esteres para los más variados empleos, humectante, emulsionantes (uso cosmético y alimentación). Se han listado 1.583 usos diversos de la glicerina [16].

La glicerina se produce a través de las siguientes vías:

- A partir de la escisión de grasas y por lo tanto ligada a la disponibilidad de dichos productos ya sea de origen animal o vegetal y al mercado del otro componente de las grasas, o sea el ácido graso o el relativo jabón.
- Por vía sintética a partir del propileno pasando por la clorhídrica (proceso en sí costoso).
- Como subproducto de la producción del biodiesel.

La planta para el tratamiento de la glicerina consiste en una instalación continua con una sección de pre tratamiento de la misma para eliminar los jabones y ácidos grasos libres que pudiera contener, seguida de una sección de destilación, constituida por una columna para separar las fracciones livianas (agua, metanol, metilester).

Dicha columna posee un reboiler, un condensador y un recipiente receptor de la fracción liviana. Esta columna funciona al vacío. El fondo de la columna se envía a un separador

de sales y de la fracción más pesada, que es servido de un reboiler. El producto pesado (sales, colas y otros) se descargan en el recipiente intermedio.

Por último una segunda columna de rectificación de la glicerina, alimentada en fase vapor, rectifica la glicerina.

El producto así obtenido es una glicerina con un elevado título (99% min.) siendo necesario para alcanzar la calidad farmacéutica proceder a la decoloración y desodorización. Esto último, se podría efectuar en una batería de columnas con carbón activo granular.

4.2 Balance de Masa para el proceso.

Se realizó el balance de masa para el proceso de producción de biodiesel, considerando la etapa del cultivo agrícola, obtención de aceite y el proceso de transesterificación.

Debido a que se desconocen datos reales del rendimiento del cultivo de *Jatropha Curcas* en el lugar, es que se realizaron tres balances de masa, que representan los 3 posibles escenarios de rendimiento de *Jatropha Curcas* por hectárea al año, ver figura 18.

Los supuestos para el balance de masa fueron:

- El 37% de fruto corresponde a la cascara.
- El 40% de fruto pelado corresponde a residuos orgánicos (torta de molienda).
- El volumen de biodiesel producido es igual al volumen de aceite que entra al proceso.
- El metanol corresponde al 17, 2% en masa respecto al aceite que entra.
- El catalizador corresponde al 0,76% en masa respecto del aceite que entra.
- La producción máxima se alcanza al sexto año.
- Para cálculos de cantidad de reactivos y productos se uso datos entregados por Central Biodiesel HTP, para operar su planta de producción de biodiesel.

OPTIMISTA												
Año	COSECHA	DESCASCARAR		MOLIENDA-MEZCLA-TRANSESTERIFICACION				PRODUCTO				
	Semillas	Cascara	fruto pelado	Torta molienda	Aceite		Metanol	NaOH	biodiesel		glicerol	
	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg	L	Kg	Kg	Kg	L	Kg	L
1	250	93	158	63	95	103	16,3	0,7	85	103	26,1	20,6
2	1000	370	630	252	378	411	65,2	2,9	342	411	104,5	82,3
3	2500	925	1575	630	945	1029	162,9	7,2	854	1029	261,3	205,7
4	5000	1850	3150	1260	1890	2057	325,8	14,4	1708	2057	522,5	411,5
5	7800	2886	4914	1966	2948	3210	508,3	22,5	2664	3210	815,1	641,9
6	12000	4440	7560	3024	4536	4938	782,0	34,6	4098	4938	1254,0	987,6

MEDIO												
Año	COSECHA	DESCASCARAR		MOLIENDA-MEZCLA-TRANSESTERIFICACION				PRODUCTO				
	Semillas	Cascara	fruto pelado	Torta molienda	Aceite		Metanol	NaOH	biodiesel		glicerol	
	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg	L	Kg	Kg	Kg	L	Kg	L
1	165	61	104	42	62	68	10,8	0,5	56	68	17,2	13,6
2	661	245	416	167	250	272	43,1	1,9	226	272	69,1	54,4
3	1652	611	1041	416	624	680	107,7	4,8	564	680	172,6	136,0
4	3304	1222	2082	833	1249	1360	215,3	9,5	1128	1360	345,3	271,9
5	5155	1907	3248	1299	1949	2121	335,9	14,8	1761	2121	538,7	424,3
6	7930	2934	4996	1998	2998	3263	516,8	22,8	2708	3263	828,7	652,6

PESIMISTA												
Año	COSECHA	DESCASCARAR		MOLIENDA-MEZCLA-TRANSESTERIFICACION				PRODUCTO				
	Semillas	Cascara	fruto pelado	Torta molienda	Aceite		Metanol	NaOH	biodiesel		glicerol	
	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg	L	Kg	Kg	Kg	L	Kg	L
1	80	30	50	20	30	33	5,2	0,2	27	33	8,4	6,6
2	322	119	203	81	122	133	21,0	0,9	110	133	33,7	26,5
3	805	298	507	203	304	331	52,5	2,3	275	331	84,1	66,3
4	1609	595	1014	405	608	662	104,8	4,6	550	662	168,1	132,4
5	2510	929	1581	633	949	1033	163,6	7,2	857	1033	262,3	206,6
6	3862	1429	2433	973	1460	1589	251,7	11,1	1319	1589	403,6	317,8

Figura 18: Balance de masa para producción de biodiesel, 3 escenarios según rendimiento de *Jatropha*.

4.3 Tecnología.

Las tecnologías, que probablemente serán empleadas en la implementación de la solución para el proyecto, serán enfocados a la producción del producto final, biodiesel. La empresa argentina Central Biodiesel HTP, ofrece una planta para la producción de biodiesel, utilizando un proceso batch, el protocolo de proceso de CentralBioDiesel, con índices de conversión consistentemente superiores al 98%, permite la elaboración de Biodiesel de alta calidad, sin la necesidad de lavado posterior. Con más de 12 años de experiencia y más de 400 plantas de biodiesel con tecnología BIO en 24 países. Las unidades BIO se han convertido en la norma para la producción de biodiesel de alta calidad a pequeña y mediana escala.

La empresa Chilena Ingeniería Global Welt, ofrece una planta automatizada, en un proceso continuo optimizado en cuanto al uso de recursos, para la producción de biodiesel e incluye una planta para purificación de glicerol; esta planta es a nivel de piloto y no cuenta con experiencia previa en producción de biodiesel (apéndice B).

Descascaradora.

La primera etapa del proceso de producción de biodiesel, consiste en el pelado de la semilla de *Jatropha Curcas*, para la obtención del fruto que será triturado, y así la obtención del aceite y torta de molienda. Se utilizara una descascaradora con una capacidad de 300 kg/hr. Si se utiliza el escenario optimista, donde el flujo de semillas es de 12.000 kg al año por hectárea, se tiene un tiempo de operación de 40 hr por hectárea, con un escenario medio con un flujo de 7.930 Kg de semillas por hectárea al año, se obtiene un tiempo de operación de 27 horas y con un escenario pesimista donde el flujo es de 3.862 Kg de semillas por hectárea al año, el tiempo de operación es de 13 horas por hectárea.

La figura 19 muestra un tipo de Descascaradora, con un costo de US\$ 10.000

Valor US\$ = 10.000



Figura 19: Planta descascaradora.

Planta Batch de Producción de Biodiesel.

La empresa argentina Central Biodiesel HTP, ofrece una planta de producción de biodiesel, la cual opera de forma batch, con una producción de 1.200 litros por día. La empresa tiene más de 12 años de experiencia en la producción de biodiesel.

La planta de producción consta de las siguientes partes:

Prensa.

Las unidades BIOPress 200 son prensas a tornillo, extremadamente robustas. Con una capacidad de hasta 200 Kilos por hora de procesamiento, las unidades BIOPress 200 son ideales para operaciones pequeñas y medianas. Una construcción simple y robusta hace de estas prensas el componente ideal para la producción de aceite, gracias a su bajo

mantenimiento y alta durabilidad. El tornillo de la BioPress200 cuenta con un núcleo variable, de esta manera, en la medida que el material avanza a lo largo del tronillo, se ve sometido a una presión axial generada por la restricción de salida y a la vez por una presión tangencial en la medida que el núcleo empuja el material contra las paredes de zona de prensado. Estas presiones generan a su vez temperatura, que ayuda a expulsar el aceite de los alvéolos en los que está contenido en la semilla, permitiendo que fluya libremente.

US\$ = 4.796

Reactor.

Estas unidades permiten batch de hasta 400 litros, utilizando el protocolo de alta temperatura, propietario a Central BioDiesel, para el proceso de la reacción de transesterificación

Los reactores BIO400 son además el componente primordial de todos los paquetes de mediana escala provistos por Central BioDiesel. Partiendo de una unidad BIO400 se puede incrementar capacidad hasta eventualmente llegar a 10.000 litros por día.

US\$ 10.647

Pre medición y Calentado Aceite.

Las unidades BIOHeat400 son unidades de pre-medición y calentamiento de aceite. Estas unidades están pre calibradas para medir la cantidad exacta necesaria para un batch a realizarse en el reactor BIO400.

A las unidades BIOHeat 400 permiten el agregado de una unidad BIOVac. Esto las convierte en excelentes secadoras de aceite

US\$ 4.717

Filtro para Biodiesel

Las unidades BIOClean permiten clarificar Biodiesel mediante una unidad centrífuga de circuito cerrado y un filtro de un micrón. La unidad centrífuga gira a 7.000 RPM lo cual separa, por diferencia de peso específico, trazas de glicerol, sales metálicas y otras

impurezas que existan en el Biodiesel. La unidad BIOClean cuenta con un circuito de filtrado inicial de 25 Micrones mediante un filtro de manga y un filtro de salida de un micrón. Esto asegura máxima pureza en el producto final. Adicionalmente la unidad BIOClean cuenta con un elemento calefactor, lo cual permite elevar la temperatura del Biodiesel y así facilitar aun más la extracción de elementos con diferencia de peso específico.

La figura 20 muestra los equipos de la planta de biodiesel de Central Biodiesel HTP.

US\$ 2.830



Figura 20: Equipamiento para producción de biodiesel, capacidad de 1200 l/día.

La oferta de la planta asciende al monto de **US\$ 52.000.**

Unidad de Expansión BIOAdd.

Las unidades BIOAdd, permiten expandir la capacidad de producción de los reactores BIO400. Por su construcción aislada y su capacidad de retener presión, las unidades BIOAdd permiten reducir tiempos de decantación y liberan al reactor para generar la próxima reacción, y lograr con esto un aumento de la producción de biodiesel.

Este equipo es mostrado en la figura 21.

US\$ 4.535



BIOAdd

Figura 21: BIOAdd, unidad de expansión, aumenta la capacidad a 2400 litros por día

Los equipos anteriores están contruidos en acero de bajo carbono A36 (SAE 1010), con soldadura TIG, pintura Epoxy, Cumple con EC 4/94 (ATEX), Circuitos independientes de Metanol y Aceite Vegetal y cuentan instrumentación debida

Ver Apéndice B, Central Biodiesel HTP.

Planta Continua de Producción de Biodiesel.

La empresa chilena Ingeniería Global Welt ofrece una planta de pequeña capacidad automatizada, la cual opera en un proceso continuo, económica, de fácil manipulación y capaz de obtener un biodiesel de la mejor calidad, diseñada para realizar un proceso optimizado en el uso de recursos.

Reactor principal.

Reactor donde se produce la reacción de transesterificación, es el principal componente de la planta.

El reactor tiene una capacidad de 40 litros por hora, con cono inferior de 45° para facilitar la decantación de la glicerina, contiene termocuplas para regulación de temperatura, control de pH con equipo Mettler para neutralización, calefacción eléctrica mediante resistencias blindadas anti deflagrantes con una potencia total de 2 KW, condensador: De tubos con 12 m² de superficie de intercambio, vertical, construcción en inoxidable refrigerado por agua de red, depósito de condensados para recogida de metanol o agua condensados procedente de la destilación al vacío, ademas cuenta con reactor para tratamiento de aceite usado y Sistema de lavado de biodiesel.

Extracción y Tratamiento de Aceite Nuevo.

Extrusora.

Prensa a tornillo para oleaginosas, tipo Mpex3, con partidor de semilla 5 HP, calefacción eléctrica 1.8kw, tornillo seccional asimétrico para estrujar 200-300 kg/h (5-7 T/día) de semilla en servicio continuo, repuestos para 3 años y manual de entrenamiento. Protecciones mecánicas, reengrase, tablero y motor de 20HP trifásico. Extrae aceite hasta el 90-92% del contenido graso de la semilla y el resto sólido sale como expeller rico trozado.

Desborrador Centrífugo.

De 2 HP para prensas tipo Mpex, filtro *FP1*, con bandeja inoxidable, bomba de trasvase 1 HP, calefacción eléctrica 2kw, filtro a cartucho de polipropileno 25 micrones, deposito final de 1.000 litros.

Planta de Glicerol.

Para purificar el glicerol y obtención de glicerina pura para ser comercializada, la cual tiene un considerable valor agregado.

El Reactor tratamiento principal esta construido en acero inoxidable AISI 316 y grosor de paredes con aros de refuerzo para trabajar en vacío, contiene sensores de temperatura para regulación de temperatura, transmisor indicador de temperatura, electroválvulas Solenoides, control de pH con equipo Mettler para neutralización, calefacción eléctrica mediante resistencias blindadas anti deflagrantes

La planta de glicerol además cuenta con:

- Reactor de tratamiento secundario.
- Sistema de lavado de Glicerol.
- Estanques de acopio del proceso.

Laboratorio para el Análisis en Tiempo Real.

Este laboratorio tiene como finalidad el análisis de los productos en el momento de la salida de cada línea de proceso, esto es necesario para hacer el correcto ingreso al área de almacenamiento de todos los productos finales. Se harán análisis de PH Final,

viscosidad, y todo lo necesario para cumplir con las especificaciones técnicas para la producción de biodiesel.

La oferta de la planta asciende al monto de **US\$ 538.273**.

Ver Apéndice B, Costos Ingeniería Global Welt.

4.4 Tabla comparativa de las tecnologías.

A continuación se muestra una tabla comparativa entre las tecnologías de Central biodiesel, planta de proceso batch, e Ingeniería Global Welt, planta con proceso continuo.

La tabla 6 muestra variables como la capacidad de producción, instalación, puesta en marcha y equipamiento, para hacer una comparación desde el punto de vista de costos, para cada planta.

Ítem	Welt	Central Biodiesel HTP
Descascaradora	No la incluye	La incluye
Instalación, montaje y puesta en marcha	US\$ 91.000	No la incluye Facil instalación y puesta en marcha
Planta	US\$ 179.091	US\$ 52.000 (1200 litros/día) US\$ 56.500 (2400 litros/día)
Producción	960 litros/día	1200 litros/día 2400 litros/día
Automatización	La incluye	No la incluye
Refinación de Glicerol	US\$ 132.000	No la incluye
Laboratorio en tiempo real	US\$ 27.273	No la incluye
Capacitación y servicios post-venta	US\$ 110.000	US\$ 1.000 por día

Tabla 6: Comparación de las dos alternativas técnicas.

4.5 Comentarios Finales de Las Tecnologías.

Ingeniería Global Welt, ofrece una planta de pequeña capacidad, económica, de fácil manipulación y capaz de obtener un biodiesel de la mejor calidad proceso esta mejorado con respecto a otros tipos producción de Biodiesel, la planta está totalmente automatizada y entrega el glicerol refinado, por lo que su valor comercial aumenta considerablemente, obtenemos un producto final con menos residuos, y eso da como resultado un mínimo de lavados para el biodiesel lo que hace bajar los costos del proceso.

En contraste Central Biodiesel HTP, ofrece una planta de proceso batch, no automatizada, la cual tiene una capacidad de producción superior y que, además, puede ser duplicada, agregando un decantador, con un precio mucho menor.

Cabe señalar que las experiencias existentes por Central Biodiesel HTP llegan a los 12 años, en comparación con Welt que sólo posee esta planta piloto automatizada.

4.6 Posibles Escenarios.

Se plantean tres posibles escenarios de producción de biodiesel, uno para cubrir los requerimientos de vehículos livianos en Radomiro Tomic, un segundo escenario en que la planta trabaje a capacidad máxima y el tercero, al cual se agrega un decantador para vaciar el reactor y así realizar una reacción de transesterificación adicional mientras decanta la anterior, con esto se duplica la capacidad de la planta, esto para la planta batch ofertada por Central Biodiesel HTP.

Por otro lado la empresa Ingeniería Global Welt ofrece una planta continua con una producción de 40 litros por hora o 960 litros por día, la cual también será evaluada, esta planta cuenta con un purificador de glicerol, por lo que el valor comercial de la glicerina aumenta considerablemente.

Además de esto, no se conoce el rendimiento real de frutos y aceite por hectárea al año que la *Jatropha Curcas* puede desarrollar bajo las condiciones climáticas del desierto de Atacama, es por esto que se presentan tres posibles escenarios de cosecha que impacta sobre la cantidad de hectáreas de plantación, un escenario optimista con 4.938 l/Ha al año, uno medio con 3.263 l/Ha al año y uno pesimista con 1.590 l/Ha al año, es por esto que se generaron doce evaluaciones económicas.

Bajo el punto de vista de producción de biodiesel, los tres escenarios son:

- Producción para el consumo de DRT
- Producir 1200 litros por día
- Producir 2400 litros por día
- Producir 960 litros por día

Para el punto de vista de los escenarios de cosecha, los tres escenarios son:

- Optimista
- Medio
- Pesimista

La explicación se resume en la tabla 7

Escenario de producción	Requerimientos DRT	1200 litros por día	2400 litros por día	960 litros por día
Escenario de Cosecha	Optimista	Optimista	Optimista	Optimista
	Medio	Medio	Medio	Medio
	Pesimista	Pesimista	Pesimista	Pesimista

Tabla 7. Posibles escenarios de producción de biodiesel.

Producción para el consumo de DRT.

Bajo la premisa de generar biodiesel para los requerimientos de movilización de RT, con un consumo de 533 litros por día, se considera la tabla 8:

Mes	Consumo diesel (L)	Costo, pesos
Enero	14.879	5.874.794
Febrero	14.410	5.092.707
Marzo	14.539	6.059.277
Abril	14.668	6.545.800
Mayo	14.271	7.525.482
Junio	15.725	6.677.424
Julio	18.458	7.199.796
Agosto	18.001	6.715.681

Tabla 8: Detalle de consumo de diesel por camionetas, 2010 DRT [17].

La tabla anterior entrega que el consumo anual, en vehículos livianos, proyectado es de 192.000 litros de combustible consumido, lo que en ahorro significa \$ 82.560.000. Entonces, para tener 192.000 litros producción la cantidad de hectáreas necesarias se detalla en la tabla 9:

Escenario de Cosecha	Hectáreas
Optimista	39
Medio	59
Pesimista	121

Tabla 9: Hectáreas necesarias para producir 533 litros por día.

Producir 1200 litros por día.

La capacidad máxima de la producción de la planta Central Biodiesel HTP, es generar 1200 litros por día, lo que significa producir una cantidad mayor a los requerimientos de DRT.

Por lo tanto, la cantidad de hectáreas necesarias para producir 1200 litros por día se detalla en la tabla 10:

Escenario de Cosecha	Hectáreas
Optimista	89
Medio	135
Pesimista	276

Tabla 10: Hectáreas necesarias para producir 1200 litros por día.

Dado que el biodiesel generado será mayor a la necesidad de DRT, para efectos de la evaluación económica se considera la utilización en otros vehículos o procesos de la División, o la venta de éste, por mismo precio promedio de diesel.

Producir 2400 litros por día.

La capacidad máxima de la producción de la planta es generar 1200 litros por día, pero invertir US\$ 4.500 más a la inversión inicial, para la implementación de un decantador y separador de fases de los productos de salida, implicará la liberación del reactor para generar un nuevo ciclo de transesterificación, lo cual se traduce en producir el doble, lo que también significa producir una cantidad mayor a los requerimientos de DRT.

La superficie necesaria para producir 2400 litros por día se detalla en la tabla 11:

Escenario de Cosecha	Hectáreas
Optimista	178
Medio	270
Pesimista	552

Tabla 11: Hectáreas necesarias para producir 2400 litros por día.

De igual forma que en el escenario anterior, se estima el valor del biodiesel excedente a las necesidades de DRT, al precio de \$ 430 por litro, para ser comercializador u ocupado en otros requerimientos de la planta, con el consecuente ahorro de diesel.

Producción de 960 litros día, planta continua.

La empresa Ingeniería Global Welt, tiene una planta piloto en un proceso continuo, la cual produce 40 litros de biodiesel, la tabla 12 muestra al área de cultivo necesaria.

Escenario de Cosecha	Hectáreas
Optimista	71
Medio	108
Pesimista	221

Tabla 12: Hectáreas necesarias para producir 960 litros por día.

Esta producción supera los requerimientos de la DRT, por lo que biodiesel excedente será evaluado a \$ 430.

4.7 Preparación del Terreno.

Se debe eliminar todo árbol y arbusto que se encuentren dentro y en las orillas del área a sembrar, ya que compiten con la *jatropha curcas* y hacen mucha sombra, lo cual influye negativamente en la planta. Se debe hacer una aplicación de herbicida sistémico en toda el área para eliminar las malezas. Se usa maquinaria para romper el terreno y luego se hacer dos rastreos para reducir el tamaño de los terrones de tierra. También se debe usar insecticidas en los 4 primeros meses de la planta. Los costos de preparación del terreno se detallan en la tabla 13.

	Costo por Ha, US\$
Rotura	72
Rastreo	188
Químicos	146
Fitosanitarios	209
Fertilizante N-P-K	1.000
Costo Total	1615

Tabla 13: costo total de preparación de terreno por hectárea.

V. Evaluación Económica de Producción de Biodiesel.

La producción de biodiesel, a partir de aceite obtenido del fruto de *Jatropha Curcas*, comienza con el cultivo del arbusto, para la obtención de sus frutos, como no se conoce el rendimiento de frutos y aceite que se lograra por hectárea de cultivo, se generan tres escenarios, según el rendimiento de frutos por hectárea, de acuerdo a los datos encontrados en bibliografía, para el escenario pesimista se obtuvo un rendimiento de 1590 litros por hectárea al año, para el escenario optimista se obtuvo un rendimiento de 4.938 litros por hectárea al año y para el medio se calculó un promedio entre ambos valores.

Por esta razón se deberá evaluar los tres escenarios de rendimiento de frutos de *Jatropha curcas*.

La evaluación, en los tres escenarios, para cubrir el consumo de los vehículos livianos de la División Radomiro Tomic, de 533 litros por día, es un negocio no rentable, por lo que se buscara aumentar la producción.

La tecnología propuesta por la empresa Argentina, Central Biodiesel HTP, tiene una capacidad de 1.200 litros por día, en un proceso batch. Con esta producción la evaluación económica mejora, pero sigue siendo no rentable.

El cuello de botella del proceso es la separación de fases entre el biodiesel y el glicerol, por esto al agregar un decantador al proceso batch, se deja libre el reactor para realizar un nuevo batch, lo que se traduce en un aumento de producción de biodiesel a 2.400 litros por día.

La evaluación económica con esta nueva producción, mejora pero en el escenario pesimista de rendimiento por hectárea de *jatropha Curcas*, sigue dando valores negativos.

La Empresa Ingeniería Global Welt, propone una planta automatizada en un proceso continua con una producción de 960 litros por día de biodiesel, la cual cuenta con un purificador de glicerol, lo cual le da un gran valor agregado a este, con lo cual la evaluación mejora, aunque la producción es inferior.

Supuestos para cálculo de beneficios.

Ahorro por consumo de combustible anual:

- Consumo promedio: 192.000 Litros (533 litros diarios)
- Costo promedio: \$ 82.560.000
- Valor de venta del biodiesel caso que sobre biodiesel: \$ 430/litro

Beneficio CER:

- Valor CER: US\$ 10 por tonelada de CO₂ equivalente
- Adiciona por menor emisión
- Adiciona por captación

Torta de Molienda y Cáscara:

- Venta como fertilizante: US\$ 15 por tonelada

Glicerol:

- Venta cuyo valor medio es US\$ 0,73 por litro.

Glicerina Purificada:

- Venta a un precio de US\$ 10.91 por litro.

Supuestos para Cálculo del Costo de Inversión.

Costo de siembra:

- Preparación del Terreno: US\$ 2.118 por hectárea: Rotura, Rastreo, Químicos, Fertilizantes, Fitosanitarios.
- Sembrado de Plantines: US\$ \$1.700 por hectárea para 3.333 plantas por hectárea, máxima densidad.

Bonos de Carbono:

- Implementación de MDL: US\$ 70.736

Semillas:

- Compra de semillas: US\$ 10.000 para 100 hectáreas

Infraestructura: Maquinarias para producir Biodiesel

- Planta Central Biodiesel HTP: US\$ 52.110
- Planta Ingeniería Global WELT: \$ 296.050.000

Obras civiles: emparejamiento de terrenos, cemento en las instalaciones, etc.

- 10% de monto de la infraestructura

Técnicos de operaciones:

- US\$ 1.500 por mes y por persona.

Supuestos para Cálculo del Costo Operacional.

Insumos: se adicionan de acuerdo a la cantidad de aceite de jatropha curcas producido

- Metanol: US\$ 2,5 por kilogramo. Insumo para transesterificación
- Catalizador: US\$ 1,26 por kilogramo. Catalizador de Reacción de Transesterificación

Mantenición:

- Evaluado como el 0,5% de la planta

Costos de Capital.

Los montos finales asociados por escenario y por año, se especifican en la figura 22:

Central Biodiesel HTP									Ingenieria Global Welt		
Produccion de 533 litros por dia			Produccion de 1200 litros por dia			Produccion de 2400 litros por dia			Produccion de 960 litros por dia		
Pesimista	Medio	Optimista	Pesimista	Medio	Optimista	Pesimista	Medio	Optimista	Pesimista	Medio	Optimista
1743935	933005	326549	1496197	740805	536739	2841057	1324773.4	927640.48	1752008.2	1176559	1024161

Figura 22: Presentación de costo de capital anual para los 12 escenarios.

Donde el año 2010 representa la inversión inicial. Entre los elementos que influyen sobre este resultado se tienen:

- Costo de siembra de plantines.
- Costo de semillas.
- Costo Planta de Biodiesel.
- Obras civiles.
- Patentes implementación Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), Bonos de Carbono.
- Personal para siembra de Jatropha Curcas.

Costos de Operación.

Entre los elementos que influyen sobre este resultado se tienen:

- Costo de insumos para reacción de transesterificación (metanol, y NaOH).
- Mantención Anual.
- Personal para mantener cultivo y operar planta de biodiesel.

En la figura 23, se muestran los resultados anuales para los 12 escenarios

	Central Biodiesel HTP									Ingenieria Global Welt		
	Produccion de 533 litros por dia			Produccion de 1200 litros por dia			Produccion de 2400 litros por dia			Produccion de 960 litros por dia		
	Pesimista	Medio	Optimista	Pesimista	Medio	Optimista	Pesimista	Medio	Optimista	Pesimista	Medio	Optimista
Año 2010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Año 2011	1181	1180	1183	2285	2302	2300	4285	4320	4315	4869	4881	4875
Año 2012	3785	3786	3796	8250	8282	8261	16215	16280	16238	9665	9665	9631
Año 2013	8994	8994	9020	20155	20230	20184	40026	40176	40083	19224	19224	19142
Año 2014	17675	17674	17728	39973	40148	40055	79662	80011	79826	35158	35158	34994
Año 2015	27398	27401	27480	62182	62465	62311	124080	124645	124337	53011	53011	52749
Año 2016	41983	41983	42109	95508	95922	95694	190731	191559	191104	79777	79777	79380
Año 2017	41983	41983	42109	95508	95922	95694	190731	191559	191104	79777	79777	79380
Año 2018	41983	41983	42109	95508	95922	95694	190731	191559	191104	79777	79777	79380
Año 2019	41983	41983	42109	95508	95922	95694	190731	191559	191104	79777	79777	79380
Año 2020	41983	41983	42109	95508	95922	95694	190731	191559	191104	79777	79777	79380
Año 2021	41983	41983	42109	95508	95922	95694	190731	191559	191104	79777	79777	79380
Año 2022	41983	41983	42109	95508	95922	95694	190731	191559	191104	79777	79777	79380
Año 2023	41983	41983	42109	95508	95922	95694	190731	191559	191104	79777	79777	79380

Evaluado en US\$

Figura 23: Presentación de los resultados operacionales anuales para los 9 escenarios.

Productos o Servicios.

De acuerdo al diagrama de procesos, las especificaciones vienen dadas por las etapas del proceso. Estos son:

Etapas agrícolas:

Siembra y cosecha del fruto *Jatropha Curcas*, se requiere contratar personal externo para prestar el servicio, de acuerdo a la cantidad de hectáreas necesarias o requeridas.

Etapas de producción:

Una vez que se tiene el fruto es necesario generar el biodiesel. Para ello se requiere de personal externo para la operación de la planta.

Etapas de almacenaje y distribución:

Generado el biodiesel se requiere de estanques de almacenaje y dispensadores para la distribución del combustible. Para ello se requiere de personal externo que preste el servicio.

Todas las etapas deben contar con certificaciones y asegurarse de cumplir con las normas requeridas para el éxito del proyecto (Mecanismo de Desarrollo limpio, manejo de combustibles, etc.)

Flujo de Caja.

Los resultados anuales para los distintos escenarios posibles de rendimiento de *Jatropha Curcas* y los 4 volúmenes de producción, incluyendo ambas plantas de producción, se especifican en la figura 24.

	Produccion de 533 litros por dia (RT)					
	Pesimista		Medio		Optimista	
	A.I.	D.I.	A.I.	D.I.	A.I.	D.I.
Año 2010	-1743935	-1743935	-933005	-933005	-326549	-326549
Año 2011	-164636	-164636	-92893	-92893	-50249	-50249
Año 2012	-154331	-154331	-83365	-83365	-40848	-40848
Año 2013	-133722	-133722	-64304	-64304	-22046	-22046
Año 2014	-99374	-99374	-32537	-32537	9290	7869
Año 2015	-60903	-60903	3038	2563	44386	36999
Año 2016	-3198	-3198	56408	46860	97031	80694
Año 2017	-3198	-3198	56408	46860	97031	80694
Año 2018	-3198	-3198	152408	126540	97031	80694
Año 2019	-3198	-3198	152408	126540	97031	80694
Año 2020	-3198	-3198	152408	126540	97031	80694
Año 2021	-3198	-3198	152408	126540	97031	80694
Año 2022	-3198	-3198	152408	126540	97031	80694
Año 2023	-3198	-3198	152408	126540	97031	80694
	Produccion de 1200 litros por dia					
	Pesimista		Medio		Optimista	
	A.I.	D.I.	A.I.	D.I.	A.I.	D.I.
Año 2010	-1496197	-1496197	-740805	-740805	-536739	-536739
Año 2011	-207438	-207438	-100042	-100042	-64231	-64231
Año 2012	-183651	-183651	-78032	-78032	-42778	-42778
Año 2013	-136053	-136053	-34000	-34000	128	128
Año 2014	-56701	-46903	39382	32845	71639	59618
Año 2015	32162	26853	121561	101054	151731	126095
Año 2016	165445	137477	244848	203382	271868	225809
Año 2017	165445	137477	244848	203382	271868	225809
Año 2018	165445	137477	244848	203382	271868	225809
Año 2019	165445	137477	244848	203382	271868	225809
Año 2020	165445	137477	244848	203382	271868	225809
Año 2021	165445	137477	244848	203382	271868	225809
Año 2022	165445	137477	244848	203382	271868	225809
Año 2023	165445	137477	244848	203382	271868	225809
	Produccion de 2400 litros por dia					
	Pesimista		Medio		Optimista	
	A.I.	D.I.	A.I.	D.I.	A.I.	D.I.
Año 2010	-2841057	-2841057	-1324773	-1324773	-927640	-927640
Año 2011	-397436	-397436	-182645	-182645	-111024	-111024
Año 2012	-349863	-349863	-138625	-138625	-68118	-68118
Año 2013	-254668	-211202	-50561	-50561	17695	14860
Año 2014	-95962	-79476	96203	80021	160716	133567
Año 2015	81763	68036	260562	216439	320900	266520
Año 2016	348328	289285	507134	421094	561176	465948
Año 2017	348328	289285	507134	421094	561176	465948
Año 2018	348328	289285	507134	421094	561176	465948
Año 2019	348328	289285	507134	421094	561176	465948
Año 2020	348328	289285	507134	421094	561176	465948
Año 2021	348328	289285	507134	421094	561176	465948
Año 2022	348328	289285	507134	421094	561176	465948
Año 2023	348328	289285	507134	421094	561176	465948

Central Biodiesel HTP

Figura 24: Resultados de la evaluación económica para Central Biodiesel HTP.

La figura 25 muestra el flujo de caja para la planta de Ingeniería Global Welt:

	Produccion de 960 litros por día					
	Pesimista		Medio		Optimista	
	A.I.	D.I.	A.I.	D.I.	A.I.	D.I.
Año 2010	-1799530	-1799530	-1197567	-1197567	-1036774	-1036774
Año 2011	-189060	-189060	-98947	-98947	-63158	-63158
Año 2012	-126694	-126694	-36491	-36491	-1423	-1423
Año 2013	-2126	-141	88332	74940	122047	102924
Año 2014	205285	172011	296401	247637	327831	273724
Año 2015	437682	364900	529504	441113	558308	465020
Año 2016	786390	654328	879028	731217	904025	751965
Año 2017	786390	654328	879028	731217	904025	751965
Año 2018	786390	654328	879028	731217	904025	751965
Año 2019	786390	654328	879028	731217	904025	751965
Año 2020	786390	654328	879028	731217	904025	751965
Año 2021	786390	654328	879028	731217	904025	751965
Año 2022	786390	654328	879028	731217	904025	751965
Año 2023	786390	654328	879028	731217	904025	751965

Figura 25: Resultados de la evaluación económica para Ingeniería Global Welt.

El resultado de la evaluación económica para los 12 escenarios se muestra en la figura 26:

	Antes de Impuesto			Despues de Impuesto		
	VAN (US\$)	TIR	IVAN	VAN (US\$)	TIR	IVAN
Produccion de 533 litros por día						
Optimista	-9067	8%	-0.03	-79035	5%	-0.24
Medio	-683818	-2%	-0.73	-765507	-4%	-0.82
Pesimista	-2261843	-	-1.30	-2261843	-	-1.30
Produccion de 1200 litros por día						
Optimista	586431	17%	1.09	380006	14%	0.71
Medio	141968	10%	0.19	-38970	7%	-0.05
Pesimista	-1326447	-5%	-0.89	-1432241	-7%	-0.96
Produccion de 2400 litros por día						
Optimista	1456533	20%	1.57	1024876	17%	1.10
Medio	578607	12%	0.44	200175	10%	0.15
Pesimista	-2363722	-4%	-0.83	-2557364	-5%	-0.90
Produccion de 960 litros por día						
Optimista	3157053	29%	3.05	2443894	26%	2.36
Medio	2765822	25%	2.31	2081093	22%	1.74
Pesimista	1439499	15%	0.80	850579	13%	0.47

Figura 26: Resumen de los resultados

Resumen.

Los resultados económicos para los distintos escenarios presentados por el proyecto, y la conveniencia de cada uno de ellos para ser llevados a ejecución, se muestra a partir de la Tabla 14:

	Consumo DRT		1200 litros por día		2400 litros por día		960 litros por día	
	Conviene	Hectáreas	Conviene	Hectáreas	Conviene	Hectáreas	Conviene	Hectáreas
Optimista	NO	39	SI	89	SI	178	SI	71
Medio	NO	59	NO	135	SI	270	SI	108
Pesimista	NO	121	NO	276	NO	552	NO	221

Tabla 14: Resumen de la conveniencia económica por escenario y muestra las hectáreas asociadas.

Se logra apreciar que la manera más conveniente de generar biodiesel (sin utilizar el subproducto glicerol refinado) es producir 2400 litros por día. De esta manera se logra mitigar el alto monto por concepto de inversión inicial.

Del escenario que incluye la purificación del glicerol, se desprende que es relativamente rentable la realización del proyecto, pues en los casos optimista y medio el proyecto arroja números positivos y en el peor de los casos, según el rendimiento de *Jatropha Curcas* por hectárea, el proyecto es no rentable, pero, debido al valor agregado de la glicerina purificada, el proyecto tiene mejores indicadores económicos, aunque la producción es menor que la del proceso batch.

VI. Alcance General para Instalación de Microcentral Hidroeléctrica.

El proyecto consiste en la instalación de microturbinas hidráulicas, para la generación de energía eléctrica, la distribución de esta y el abastecimiento de zonas de bajo consumo eléctrico dentro de las instalaciones de La División Radomiro Tomic, con el objeto de presentar una iniciativa ambiental sujeta a las políticas de gestión energética, conseguir los beneficios económicos asociados a la autogeneración y la independencia de suministro del Sistema Interconectado Norte Grande (SING). En la División Radomiro Tomic, existen diferentes instalaciones de uso civil las cuales operan las 24 horas del día y que pueden ser abastecidas con esta energía generada, como por ejemplo: Barrio Cívico, Casino, Sector GTICA, RT Market, para esto es necesario la instalación de un tendido eléctrico para suministrar la energía al destino . También se podría utilizar la energía en el mismo lugar donde se ubican las microturbinas, Planta de Osmosis, ahorrando así los costos del tendido eléctrico, la energía se podría utilizar para alimentar las bombas de impulsión que ahí se ubican.

A través de los datos que indican las disposiciones de los recursos en DRT, existen dos aducciones de agua, provenientes de ríos en los cerros de las cercanías, que alimentan la planta de osmosis, se estima que se puede llegar a generar 20 KW sin que interfiera el proceso y el caudal de agua necesaria a osmosis. Pero para mayores potencias, se requiere de un estudio más profundo, etapa de prefactibilidad, pues la caída de presión sería mayor, pudiendo afectar el flujo a osmosis.

6.1 Procesos de Negocio.

Para entender la producción energía eléctrica a partir de una microcentral hidroeléctrica, como negocio, se debe tener en cuenta el diagrama de procesos para la producción de la figura 27.

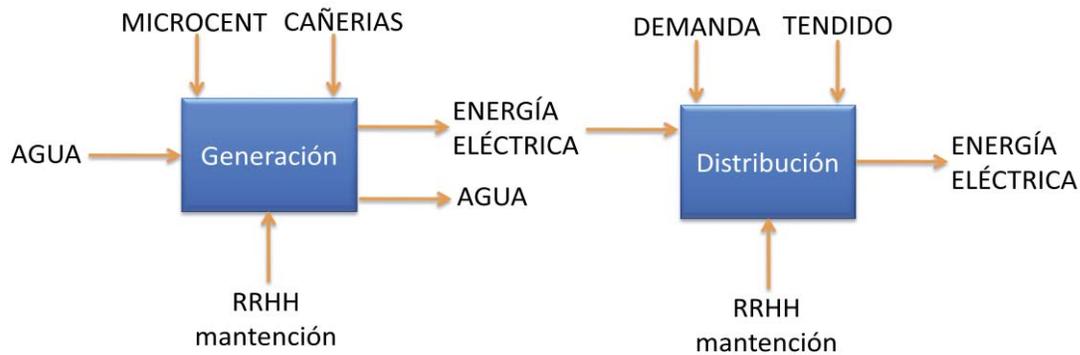


Figura 27: diagrama de proceso de producción de biodiesel.

En la figura 27, se aprecia que el proceso de generación de energía eléctrica tiene como entrada el agua con un caudal definido, el control lo conforman la microcentral y las cañerías de conducción de agua, de los cuales ya se encuentran disponibles el caudal de agua y gran parte de las cañerías. Como variable recursos, se debe contar con los recursos humanos bajo el servicio de mantención. Las salidas son la energía eléctrica y el mismo caudal de agua, el cual continúa su curso a la planta de osmosis.

Para la canalización y/o distribución de la energía generada, como entrada se cuenta la energía. Como insumos se requiere de los recursos humanos bajo el servicio de mantención. Para el control de las salidas se requiere de la demanda de energía eléctrica y el tendido eléctrico. La salida, que para este caso es el producto final, se debe distribuir a la zona donde se abastecerá de energía eléctrica.

Alternativas.

Existen dos etapas relevantes, en las cuales se muestran diferentes alternativas:

Generación.

Las alternativas existentes apuntan al diseño de la microturbina, pues existe una amplia variedad de microturbinas las cuales operan más eficientemente dependiendo de las variables: altura de presión del líquido (Δh) y caudal (Q). A modo de ejemplo, las microturbinas tipo Pelton, funcionan más eficientemente a grandes alturas de líquido y bajos caudales, a diferencia del microturbinas tipo Kaplan, donde se prefiere altos caudales y bajas alturas de líquido.

Otra alternativa posible de aplicar radica en la forma en que se puede utilizar o disponer de la energía que entregan las microturbinas, pues se puede alimentar directamente a los equipo o instalaciones que lo requieran o se puede inyectar al SING mediante un inversor el cual además mida la energía entregada al sistema y la energía utilizada, para luego estimar la energía neta entregada al sistema o consumida desde este, esto permitiría aliviar los costos por uso de energía o, si la energía generada es mayor a la utilizada, vender esa energía generada, este mecanismo requiere de una inversión extra.

Sin embargo, el requerimiento lo entrega la disponibilidad de recursos, principalmente el caudal y la altura, con estos datos se estudia la cantidad de energía a generar y por ende deberá existir un ahorro por consumo energético.

Distribución

Las alternativas existentes apuntan a la manera de distribuir y conducir la energía eléctrica a partir del cableado que comprende desde la zona de generación hasta la zona donde se abastecerá.

Las alternativas existentes son dos:

- **Cableado aéreo:** corresponde al tendido eléctrico que es trazado mediante postes, tal como se aprecia en la figura 28.



Figura 28: Ejemplo de tendido aéreo.

Cableado subterráneo: Corresponde al tendido eléctrico que es trazado bajo tierra a través de cañerías, figura 29.



Figura 29. Ejemplo de tendido subterráneo.

- Cabe la posibilidad de que este punto sea mínimo en comparación al tamaño del proyecto. Esto debido a que existe la posibilidad de generar energía en la planta de osmosis abasteciendo a la misma planta.

Riesgos Potenciales

Las tecnologías existentes son productos comerciales que no requieren de validación, por parte de Codelco.

Los riesgos potenciales se asocian a que el proyecto es una iniciativa en materia de eficiencia energética, la cual no está ampliamente estudiada. Las dos etapas del negocio son:

- La instalación de una microcentral hidroeléctrica tiene asociados los siguientes riesgos
 - Que los costos de inversión superen los esperados.
 - Que exista una gran influencia en la presión y flujo de agua que llega a planta de osmosis, al momento de instalar la turbina, de manera tal que afecte al proceso.
- La distribución de energía eléctrica tiene asociados los siguientes riesgos:
 - Que los costos por inversión superen los esperados.
 - Que tengan problemas por los fuertes vientos existentes en la zona y produzcan caídas de postes.
- En general:
 - Que el costo de producir la energía no sea conveniente respecto a la inversión y a el costo de comprar la energía.

Beneficios

El beneficio que entregará el proyecto, una vez concluida su etapa de ejecución, será la disposición de energía eléctrica en alguna de las zonas de DRT que lo requiera.

Como indicadores de rentabilidad solamente se considerará el ahorro por consumo de energía eléctrica. Sin embargo, existen beneficios asociados al impacto ambiental, pues hay una generación limpia que reduce las emisiones de CO₂, además se aprovechan los recursos de DRT que no están siendo utilizados.

Beneficios de rentabilidad

- Ahorro por de energía eléctrica (evaluado como US\$ 104.03 por MWh, costo de energía para División Radomiro Tomic [18])

Beneficios secundarios

El proyecto de instalación de una central hidroeléctrica presenta las siguientes ventajas no económicas:

- Generación limpia, sin huella de carbono, reduce emisiones de CO₂.
- Generación Propia, independencia de suministro del SING.
- Existe un potencial de energía disponible en la planta, referente a aducciones de agua y planta de osmosis, el cual es desaprovechado.

Impacto del Proyecto

Al realizar una generación propia La División Radomiro Tomic, podrá independizarse, en cierta medida, del Sistema interconectado Norte Grande y de la generación termoeléctrica que este provee, diversificando, así, la matriz energética de nuestro país y aumentando el uso de Energías Renovables No Convencionales (ERNC).

De esta forma se contribuye a la solución de una gran problemática a nivel nacional y mundial, que es la crisis energética y la obtención de energía mediante nuevos e innovadores mecanismos.

La generación del SING es casi totalmente termoeléctrica, en la cual, para su generación, se emite gran cantidad de CO₂ y otros gases contaminantes, de esta forma, además, se colabora con el ambiente y con el desarrollo sustentable.

Micro Central Hidroeléctrica.

Durante la revolución industrial, el incremento de la demanda energética de la industria encontró en las turbinas hidráulicas una solución, por lo cual a partir del siglo XIX empezaron a construirse en forma masiva hasta nuestros días.

El gran incremento en la construcción de estas máquinas acumuló una gran cantidad de experiencia, y la consecuente competencia de las compañías constructoras obligó a la optimización en los diseños de las turbinas, dando lugar, a la desaparición de las turbinas centrífugas y al establecimiento de las turbinas centrípetas. Así los modelos de turbinas hidráulicas que existen en la actualidad son el resultado de un largo proceso de selección

histórica, en el que ciertas turbinas con una particular geometría han resultado ser aquellas que optimizan el rendimiento para ciertas condiciones de operación.

La disponibilidad de manantiales, vertientes naturales o pozos con caudal reducido, de pocos litros por segundo, pero con buena altura, propia de las zonas montañosas, entre los 60 a 100 m, origina una buena fuente de energía hidráulica, ideal para el accionamiento continuo de microturbinas. La potencia teórica está dada por el producto de la altura y el caudal y si bien puede ser pequeña, el hecho de funcionar las 24 horas le permite acumular sobre un sistema de baterías y convertir esa pequeña potencia continua en otra instantánea capaz de absorber picos de 10 veces más potencia. Una microturbina de 0,5 HP, puede entregar mensualmente más de 250 KWh, suficiente para una familia tipo y esa potencia se puede lograr con un manantial de 1 litro por segundo y 80 metros de altura. En este caso se trata de una instalación de agua corriente, que a diferencia de las de embalse, no requieren obras civiles de importancia.

Otra fuente pueden ser arroyitos con caudal bastante mayor, pero poca diferencia de altura. Para el caso anterior deberá cumplirse que siempre el caudal por altura sea constante, es decir:

El generador eléctrico es del mismo tipo que en los Aerogeneradores o Usinas Térmicas, es decir un simple motor jaula de ardilla.

En cuanto se refiere a la Microturbina para los equipos chicos, usamos rueda Pelton o Turgo dependiendo de las características de altura /caudal. Dada la extensa variedad de combinaciones que pueden llegar a obtenerse, es necesario contar con los datos básicos de disponibilidad de recursos versus consumo energético previsto.

Los elementos necesarios para una central hidroeléctrica son [19]:

Generador

El generador es el componente que, tomando energía mecánica del eje de la turbina, entrega energía eléctrica para su utilización en la red. El principio general de funcionamiento de los generadores se encuentra en el movimiento relativo y la interacción de un lazo conductor y un campo magnético. Al ser máquinas rotativas, el movimiento entre ambas partes es circular. El elemento del generador que produce el campo magnético se denomina Inductor. El otro componente, en el cual se origina la energía eléctrica que será entregada a la red es el Inducido. El campo puede ser un juego de uno

o varios imanes permanentes adecuadamente montados en la máquina, o bobinados inductores, denominados Bobinado de Campo o Bobinado Inductor.

Regulador

La carga eléctrica de cualquier sistema demanda que las condiciones de la energía recibida, tanto en frecuencia como en voltaje, sean estables dentro de ciertos límites. Cuando la carga eléctrica de la red se incrementa o disminuye, origina en el eje de la turbina una variación en la velocidad. Si la carga aumenta, la velocidad tiende a disminuir y viceversa. Si estas variaciones de la velocidad no son controladas, entonces ni la tensión ni la frecuencia de la energía generada serán estables. Se apartarán fuera de los límites establecidos como aceptables por la red. Básicamente existen dos sistemas de control y algunas combinaciones de éstos. Pueden ser tan sencillos como un control manual de una válvula al ingreso de la turbina, o tan complejo como controles electrónicos accionando componentes electromecánicos de control del flujo de agua y de la tensión del sistema eléctrico [5].

Tendido eléctrico

Pertenece a la etapa en que se transmite la energía eléctrica hacia la zona donde se requiere abastecer de energía eléctrica a partir del lugar donde se instalan las centrales.

Para más detalles sobre centrales hidroeléctricas ver Apéndice C.

Micro turbinas

En las microcentrales hidráulicas deben distinguirse varios tipos, dependiendo de su lugar en el río y tipo de turbina. En el primer caso, existen las de alta montaña y las de curso bajo. Las primeras poseen un caudal pequeño pero un salto elevado, mientras que las de curso bajo o medio, al contrario, poseen un caudal alto con un salto pequeño. El tipo de turbina es otra de las características que se debe tomar en cuenta. Unas centrales usan la rueda Pelton para grandes saltos de agua o bien las Kaplan para las que poseen un caudal variable.

Las microcentrales hidráulicas producen una energía limpia, con el fin de causar el mínimo impacto ambiental, al construir la central, se debe tener en cuenta el estado del

lugar dónde se va a ubicar la micro central, cómo se va a realizar la obra civil, es decir, los accesos, las zanjas o tuberías para canalizar las aguas. Todos estos pasos sí que podrían provocar impactos en el medio ambiente.

Algo que no se debe olvidar es la finalización del uso de la central. Cuando ya no se necesite, el río debe seguir como antes de que estuviera levantada la microcentral.

Las microcentrales hidráulicas son instalaciones sencillas, respetuosas con el entorno y útiles para aplicaciones cercanas a la instalación y que no precisen valores importantes de energía. Su futuro es alentador, con inversiones moderadas, se puede asegurar que su crecimiento será continuo, aunque solo llegará a significar un porcentaje muy bajo en el conjunto general de la generación energética.

La tabla 15 muestra algunas características de cada tipo de turbina, diferenciando las de acción y reacción.

Características de la Turbina	Para Pequeños Aprovechamientos Hidráulicos	
	Ventajas.	Desventajas.
Acción en General.	Reducida posibilidad de cavitación. Buen rendimiento en cargas parciales.	Bajos picos de eficiencia comparada con las de reacción. Deben operar sobre el nivel de restitución.
Cross Flow.	Amplio margen de velocidad de diseño, solo variando el ancho.	Eficiencias de 70% y 80%, más bajas que las Pelton y Francis.
Pelton.	Los daños por erosión son fácilmente reparables.	Requiere múltiples inyectores para caudales grandes.
Turgo.	Rango de aplicación similar a las Pelton, con múltiple inyector.	Grandes cargas axiales sobre los cojinetes.
Reacción en General	Diseños más compactos para igual potencia nominal. Altos picos de rendimiento. el uso de tubo de aspiración permite mejor aprovechamiento del recurso.	Requiere diseño elaborado de sellos, mantenimiento más complicado y caro. Aplicación y operación más limitada por cavitación.
Francis	Fabricación estandarizada por varios fabricantes.	Eficiencia relativamente baja en cargas parciales.
Kaplan, Hélice, Axiales	Las axiales ofrecen ventajas cuando se aplican a presas existentes.	Altas velocidades de embalamiento.
Bombas como turbinas	Bajo costo y amplio stock.	Rendimiento bajo en cargas parciales. Faltan datos de aplicación.

Tabla 15: Comparación de diferentes tipos de turbinas hidráulicas.

Para establecer el tipo de turbina a utilizar, se debe conocer las variables que influyen en la capacidad de generación, altura (h) y Caudal (Q), conocidas estas variables se determina qué tipo de turbina opera de la forma más eficiente para las condiciones dadas.

La figura 30 muestra el grafico de diseño de turbinas, el cual sirve de guía para determinar qué tipo de turbina hidráulica usar, dependiendo de la altura disponible, caudal de líquido y de la potencia a generar.

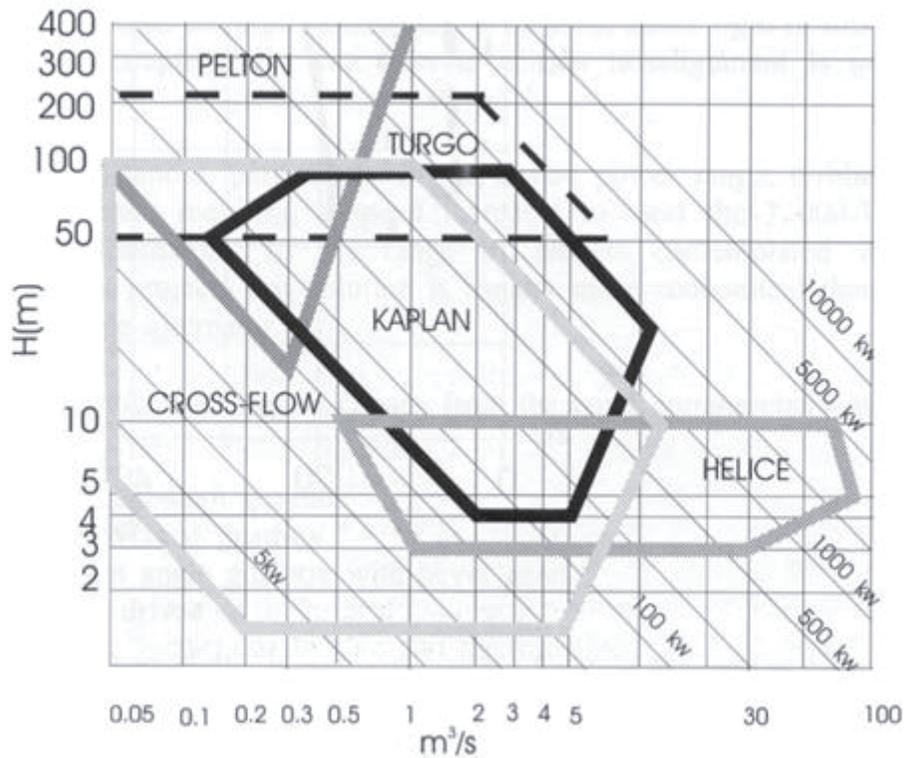


Figura 30: Diagrama Altura vs Caudal, para selección de turbinas hidráulicas.

Según la figura y las condiciones para generar 20 KW, se desprende que las posibles turbinas a instalar son del tipo Pelton o Crossflow.

VII. Disponibilidad de Recursos en División Radomiro Tomic.

Para conocer la disponibilidad de recursos en la División Radomiro Tomic, en cuanto a las variables que influyen en la potencia generada por una microturbina hidráulica, caudales de agua en aducciones que van a planta de osmosis y la altura efectiva que estas tienen, se realizaron visitas en terreno y se extrajo registro de de la plataforma de monitoreo de variables PI System y del Software de visión Satelital Google Earth, esto para conocer el potencial de generación de energía hidráulica y la factibilidad de instalar una microcentral hidroeléctrica en las aducciones de agua que van a planta de osmosis sin afectar el proceso que se realiza en esta.

7.1 Caudal Disponible.

Existen dos aducciones de agua que llegan a la planta de osmosis, San Pedro e Inacaliri, las cuales son las potenciales fuentes para generar energía eléctrica para autoabastecer algunas de las dependencias de uso del personal de la División Radomiro Tomic.

La aducción de San Pedro es agua cruda la cual entra a planta de osmosis para ser purificada en el proceso mediante membranas, mientras que el agua de Inacaliri, es un agua semipotable, que contiene una menor cantidad de minerales. Estos dos flujos de agua se mezclan a conveniencia para enviar el agua de proceso y para el uso del personal, donde parte del caudal de esta agua va a planta de potabilización de agua.

Los caudales promedio de la aducción de San Pedro se muestran en la tabla 15:

Caudales	M³/h
Nominal	670
Máximo	780
Mínimo	580

Tabla 15: Caudales de Aducción de San Pedro, PI System.

La aducción de Inacaliri presenta un flujo mucho menor, de 40 litros por segundo, por esta razón se decidió intervenir en el flujo de la aducción de San Pedro, para la instalación de la microcentral hidroeléctrica.

7.2 Altura.

Para estimar la altura máxima, de la aducción de San Pedro, hasta la planta de osmosis, se utilizó el software Google Earth, donde la altura total se aprecia en la figura 31.



Figura 31: Estimación de la diferencia de altura para Aducción de San Pedro.

Como se muestra en la figura, la diferencia de altura, para la aducción de San Pedro, es de 115 metros. El cálculo se potencia para la microturbina se realizara utilizando esta altura efectiva de columna de líquido.

7.3 Levantamiento Eléctrico DRT.

Se realizaron levantamientos sobre el consumo eléctrico, en distintas dependencias del Barrio Cívico, para conocer la cantidad de energía eléctrica a generar.

Dentro de este sector encontramos dos zonas con una potencia requerida similar:

La primera zona la componen el RT Market y el sector de TICA, mientras que la segunda zona la componen el Sector de Gerencia y el Casino.

Los detalles de consumo de RT Market y TICA se muestra en la tabla 16.

	KW	KWh/año	US\$/año
Consumo RT Market	9,68	42.568	\$ 4,428
Consumo TICA Computadores	2,85	540	\$ 56
Consumo Iluminación TICA	1,83	138	\$ 14
TOTAL	14,36	43.246	\$ 4,498

Tabla 16: Consumo eléctrico de RT Market y TICA.

La tabla 17 muestra los consumos energéticos para el Casino y Sector Gerencia:

	KW	KWh/año	US\$/año
Consumo Iluminación Sector Gerencia	10,72	92.621	\$ 9.635
Consumo Iluminación Sector Casino	3,84	33.178	\$ 3.451
TOTAL	14,56	125.799	\$ 13.086

Tabla 17: Consumo eléctrico de Casino y Sector Gerencia.

La diferencia en la energía consumida, a pesar de una potencia similar, se debe a que en la segunda zona, Sector Gerencia y Casino, el uso de iluminación es constante, pues esta funciona las 24 horas del día, a diferencia de la zona 1, donde en el sector de gerencia de la TICA, la cual la iluminación, los computadores y artefactos de uso de oficinas, solo funcionan durante la jornada de trabajo, aproximadamente 10 horas, en el RT Market, la iluminaria funciona durante todo el día, al igual que refrigeradores de bebidas y helados, pero algunos aparatos como hervidores y máquinas de café, solo son puestos en funcionamiento parte de la jornada, lo que se traduce es un menor consumo de energía respecto a la zona de Gerencia y Casino, a pesar de la similar potencia requerida.

Conocidos estos requerimientos, se estudiara la opción de instalar una microcentral hidroeléctrica de una potencia de 20 KW, suficiente para abastecer a cualquiera de las zonas anteriormente señaladas, o en su defecto alimentar otra dependencia de la División Radomiro Tomic, parte de algún proceso que lo requiera, o el uso directo de la energía en planta de osmosis, donde se instalara la microcentral hidroeléctrica.

7.4 Potencia Generada.

La expresión general para el potencial hidráulico disponible en un tramo de un curso de agua, es función de la altura efectiva de líquido, el caudal del cauce de agua, densidad, aceleración de gravedad y de la eficiencia del conjunto turbina – generador, la potencia generada puede expresarse como:

$$P = \rho * g * h * Q * \eta$$

Donde:

$$P = \text{Potencia generada}$$

$$\rho = \text{Densidad del liquido.}$$

$$g = \text{Aceleracion de gravedad.}$$

$$h = \text{Altura de liquido.}$$

$$Q = \text{Caudal del liquido.}$$

$$\eta = \text{Eficiencia del conjunto turbina – generador.}$$

Conocida la altura de líquido disponible y para una potencia demandada de 20 KW, obtenemos el caudal necesario de agua para cumplir con los requerimientos de potencia. Se usó un valor de 0.8 como promedio para las eficiencias del generador y la turbina hidráulica, con esto tenemos:

$$20000 \text{ W} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 115 \text{ m} * Q * 0.8$$

$$Q = 22,18 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

Entonces, es necesario un caudal de 22,18 litros por segundo, para generar 20 KW, dadas las condiciones existentes en la aducción de San Pedro de La División Radomiro Tomic.

7.5 Diámetro de las Cañerías.

La cañería de la aducción de San Pedro, tiene un diámetro de 18 pulgadas, por la cual viene un caudal promedio de 670 m³/h, con estos tenemos una velocidad lineal del flujo de agua de:

$$Q = A * V$$

Donde:

Q: Caudal de agua.

A: Area seccion de cañeria.

V: Velocidad lineal del agua.

Entonces la velocidad lineal es de:

$$V = \frac{0,1861 \text{ m}^3/\text{s}}{\frac{\pi}{4} * (18 * 0,0254)^2 \text{ m}^2}$$

$$V = 1,134 \text{ m/s.}$$

Para instalar la microcentral hidroeléctrica, se realizara un bypass, para desviar el flujo de agua necesario para realizar la generación de energía eléctrica, para este bypass, se utilizada una cañería de 4 pulgadas, el esquema se muestra en la figura 32.

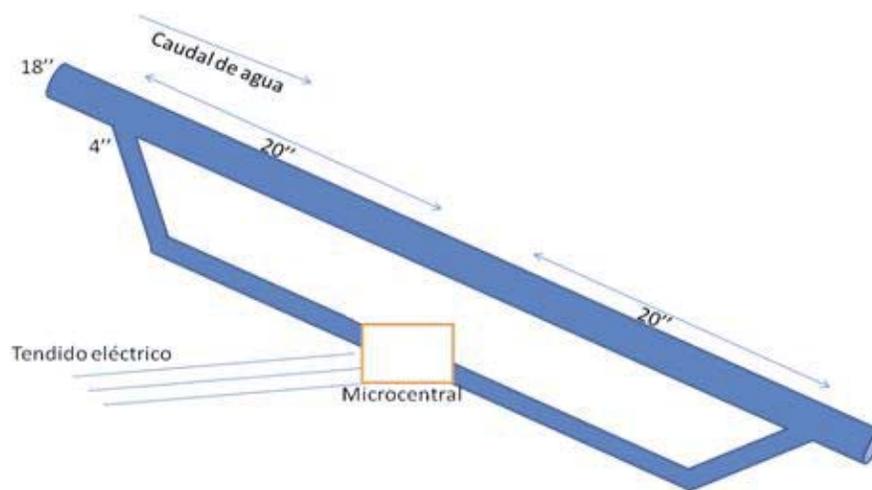


Figura 32: Esquema del bypass para la instalación de la microcentral hidroeléctrica.

Con el caudal necesario para la generación de los 20 KW, la velocidad lineal en el bypass es:

$$V_b = \frac{22,18 * 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}}{\frac{\pi}{4} * (4 * 0.0254)^2 \text{ m}^2}$$
$$V_b = 2,74 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

7.6 Tendido Eléctrico

Se debe instalar un tendido eléctrico para distribución de la energía eléctrica, desde su generación, planta de osmosis, hasta el lugar de uso de esta.

Existen dos opciones de uso de la energía eléctrica generada, la primera es el uso de la energía en el Barrio Cívico, donde, para esto, es necesaria la instalación de un tendido eléctrico desde la planta de osmosis hasta este y, así, la distribución de la energía al lugar de uso, donde se alimentara la iluminación de oficinas y dependencias cívicas. La figura 33 muestra el recorrido del tendido eléctrico a instalar.

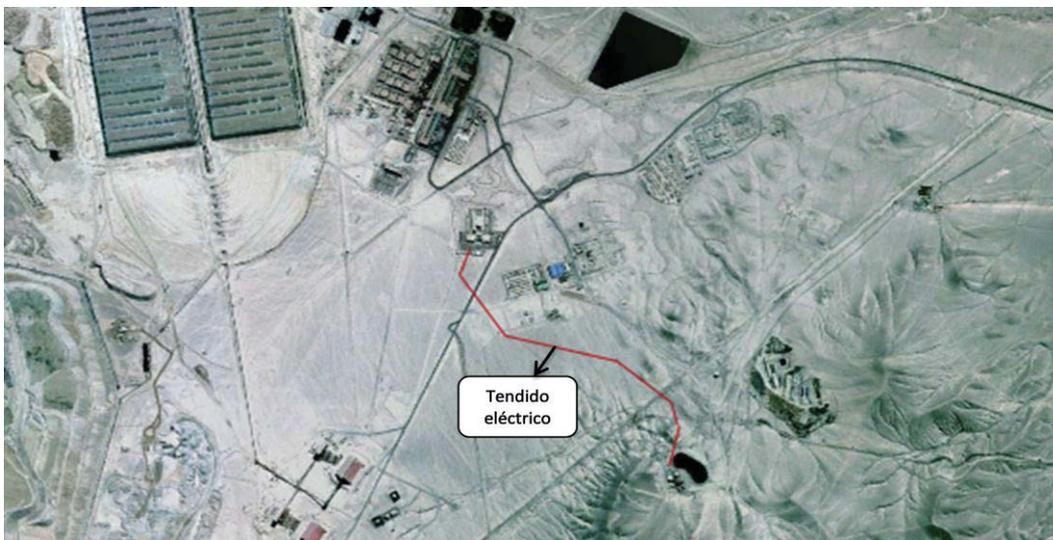


Figura 33: Tendido eléctrico desde planta de osmosis hasta Barrio Cívico.

La otra opción es el uso de la energía en el mismo lugar donde esta se genera, planta de osmosis, con lo cual se ahorraría o bajaría al mínimo los costos por concepto de tendido eléctrico.

VIII. Evaluación Económica de Microcentral.

Para realizar la evaluación económica del proyecto, se tomó un periodo de tiempo de 13 años, debido a la naturaleza del proyecto, pues, en este tipo de proyecto, de generación de energía, los costos de inversión son altos en comparación con los retornos recibidos, pero tienen algunos beneficios no cuantificables económicamente, como autonomía respecto a SING y beneficios ambientales.

Como existen dos posibilidades, respecto a la utilización de la energía generada por la microcentral hidroeléctrica, es que se realizaron dos evaluaciones económicas para una generación de 20 KW, una que considera el tendido eléctrico para distribuir la energía al Barrio Cívico, y la otra que no considera los costos del tendido eléctrico, pues se utilizará la energía generada en la misma planta de osmosis, ahorrando así, los costos de este.

Los indicadores económicos determinan que este proyecto no es rentable, debido a altos costos inversionales y bajo retorno, por esto se hace una proyección aumentando la potencia de la microturbina y su inversión, donde se puede ver que a medida que aumenta la potencia generada la rentabilidad del proyecto también crece, donde alrededor de una potencia generada de 60 kW, se puede duplicar la inversión al final del periodo.

8.1 Costos de Inversión.

Para evaluar los costos de inversión, se utilizó la cotización emitida por la empresa de energías renovables Schwager Energy S.A., además de consultas hechas a la empresa Eólicos del Sur, la cual ofrecen microturbinas hidráulicas.

La figura 34 muestra los costos de inversión para la utilización de la energía en planta de osmosis:

1. COSTOS DE CAPITAL	Perfil	USD
Rango de Precisión	+/-30 a 40%	
1.1 Costos de Administración		
Personal de Apoyo (supervisión)	Evaluado	17.500
Total		17.500
1.2 Costos de Infraestructura		
Turbina, protecciones, tablero, canalización, piping, etc	Factorizado	43.640
Obras Civiles (instalación+tendido eléctrico)	Evaluado	47.960
Total		91.600
1.3 Contingencias	Factorizado:	
Sobre la Inversión Total (10%)	5%	5.455
Total		5.455
COSTO TOTAL DE INVERSIÓN		114.555

Figura 34: Costo de capital para la instalación en la planta de osmosis.

La figura 35 muestra los costos inversionales para abastecer el Barrio Cívico de energía eléctrica:

1. COSTOS DE CAPITAL	Perfil	USD
Rango de Precisión	+/-30 a 40%	
1.1 Costos de Administración		
Personal de Apoyo (supervisión)	Evaluado	17.500
Total		17.500
1.2 Costos de Infraestructura		
Turbina, protecciones, tablero, canalización, piping, etc	Factorizado	43.640
Obras Civiles (instalación+tendido eléctrico)	Evaluado	66.620
Total		110.260
1.3 Contingencias	Factorizado:	
Sobre la Inversión Total (10%)	5%	6.388
Total		6.388
COSTO TOTAL DE INVERSIÓN (USD)		134.148

Figura 35: Costo de capital para la instalación abasteciendo parte del barrio cívico.

8.2 Costos de Operación.

En los costos de operación sólo se consideran los costos de mantención y corresponden al 0,05% del costo de inversión de infraestructura mensual.

La figura 36 muestra los costos de operación de la microcentral, para la utilización de la energía en planta de osmosis:

2. COSTOS DE OPERACIÓN	Perfil	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Precisión	+/- 25 a											
2.1. Costos Fijos												
Personal especializado	Evaluado,											
Gastos Generales Fijos y de Administración	Evaluado,											
Total		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.2. Costos Variables												
Materiales e Insumos	Evaluado											
Mantención (0,05% del costo del generador al mes)	Evaluado		550	550	550	550	550	550	550	550	550	550
Energía	Evaluado											
Otros Costos Variables	Evaluado											
Total		0	550	550	550	550	550	550	550	550	550	550
COSTO TOTAL DE OPERACIÓN (USD)		0	550	550	550	550	550	550	550	550	550	550

Figura 36: Costo de operación para la instalación abasteciendo la planta de osmosis.

La figura 37 muestra los costos de operación de la microcentral, para la utilización de la energía en Barrio Cívico:

2. COSTOS DE OPERACIÓN	Perfil	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Precisión	+/- 25 a											
2.1. Costos Fijos												
Personal especializado	Evaluado											
Gastos Generales Fijos y de Administración	Evaluado											
Total		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.2. Costos Variables												
Materiales e Insumos	Evaluado											
Mantención (0,05% del costo del generador al mes)	Evaluado		662	662	662	662	662	662	662	662	662	662
Energía	Evaluado											
Otros Costos Variables	Evaluado											
Total		0	662	662	662	662	662	662	662	662	662	662
COSTO TOTAL DE OPERACIÓN (USD)		0	662	662	662	662	662	662	662	662	662	662

Figura 37. Costo de operación para la instalación abasteciendo el Barrio Cívico.

8.3 Especificación

Con este proyecto se contara con energía limpia disponible para ser utilizada, lo que significara un ahorro de energía eléctrica y una independencia del SING, lo que apoya directamente las políticas de eficiencia energética de Codelco.

Para la utilización de esta energía disponible existen dos alternativas, la utilización directa cercana a la instalación de la microcentral hidroeléctrica (planta de osmosis), donde podría alimentar bombas de impulsión utilizadas en la planta de osmosis; o realizar un tendido eléctrico para distribuir la energía eléctrica al Barrio Cívico, donde se podría utilizar para iluminaria del Sector Gerencia y Casino (de acuerdo al levantamiento presentado en el informe técnico), entre otros.

8.4 Proyección

Con este proyecto se marca un hito en el uso de microturbinas hidráulicas para la generación de energía eléctrica en la División Radomiro Tomic, lo que dará una iniciativa para seguir utilizando este tipo de generación a mayor escala, lo que traerá consigo mayores ahorros al tratarse de centrales de mayor potencia.

8.5 Indicadores Económicos.

El proyecto fue evaluado en un horizonte de tiempo de 13 años, para una generación de 20 KW, considerando las dos opciones de abastecimiento. Los resultados se observan en la tabla 18:

		Antes de Impuesto	Después de Impuesto
Atendiendo requerimientos de la planta de osmosis.	VAN	45.950	22.535
	TIR	17%	14%
	IVAN	0,40	0,20
Atendiendo requerimientos del Barrio Cívico.	VAN	26.727	3.461
	TIR	11%	8%
	IVAN	0,20	0,03

Tabla 18: Resumen indicadores económicos para las dos alternativas del proyecto.

Cabe mencionar que se debe decidir qué potencia generar, qué lugar, qué abastecer, etc., temas que deben verse en la etapa de prefactibilidad. Pero, si se considera generar menos de 20 KW evaluados en 13 años, el proyecto no será rentable.

8.6 Proyección según Potencia.

Para ver como varía la rentabilidad del proyecto de generación de energía eléctrica, se hace una proyección de variación de los indicadores económicos según la potencia generada.

Esto se aprecia en los siguientes gráficos que ilustran los dos escenarios, al variar la generación de energía eléctrica.

Suministro en Planta de Osmosis:

La figura 38 muestra, como proyección, la variación del VAN en función de la potencia generada:

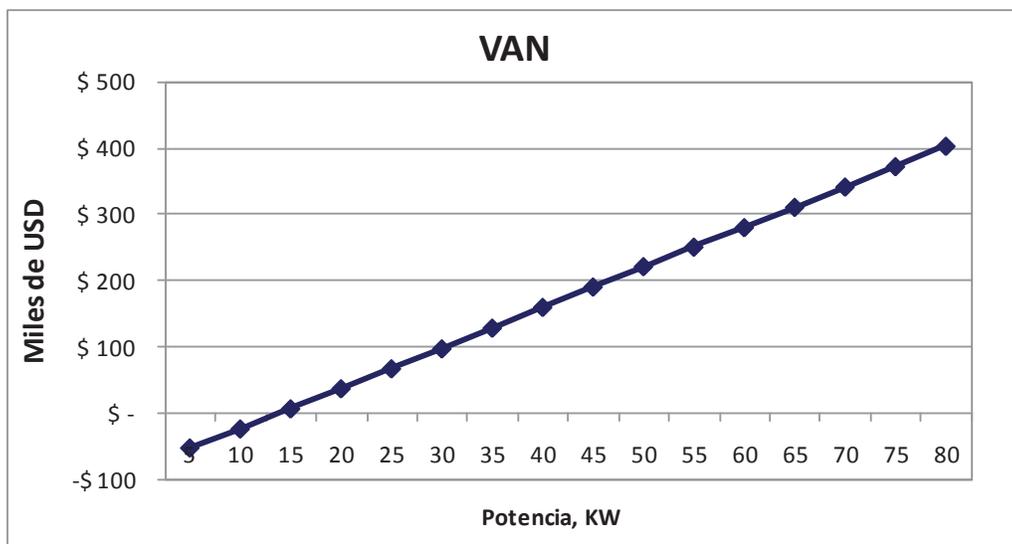


Figura 38: Variación del VAN según potencia generada, sin tendido eléctrico.

La figura 39 muestra la variación de la TIR, según se incrementa la potencia generada por la microturbina:

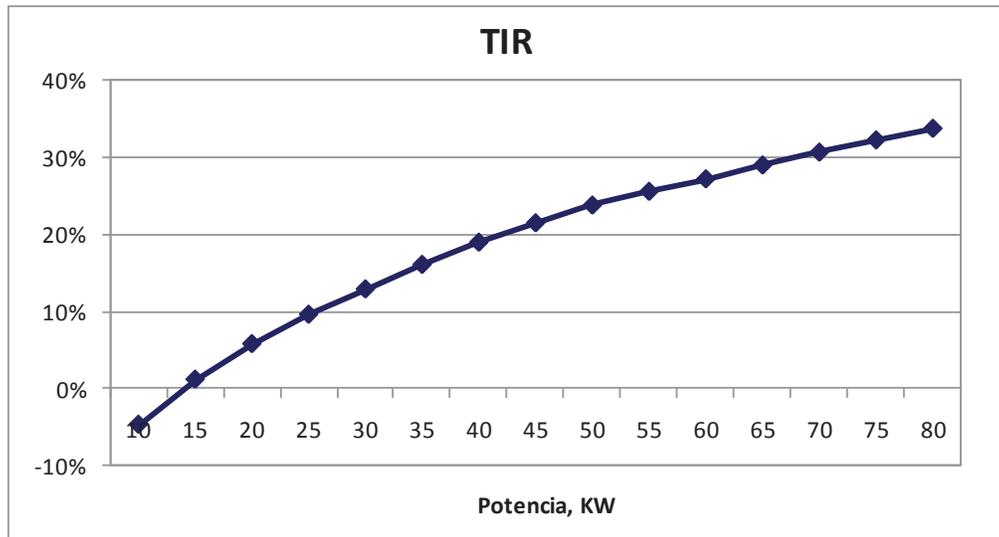


Figura 39: Variación de la TIR según la potencia generada, sin tendido eléctrico.

La figura 40 muestra la variación del IVAN para cada potencia generada por la microturbina:

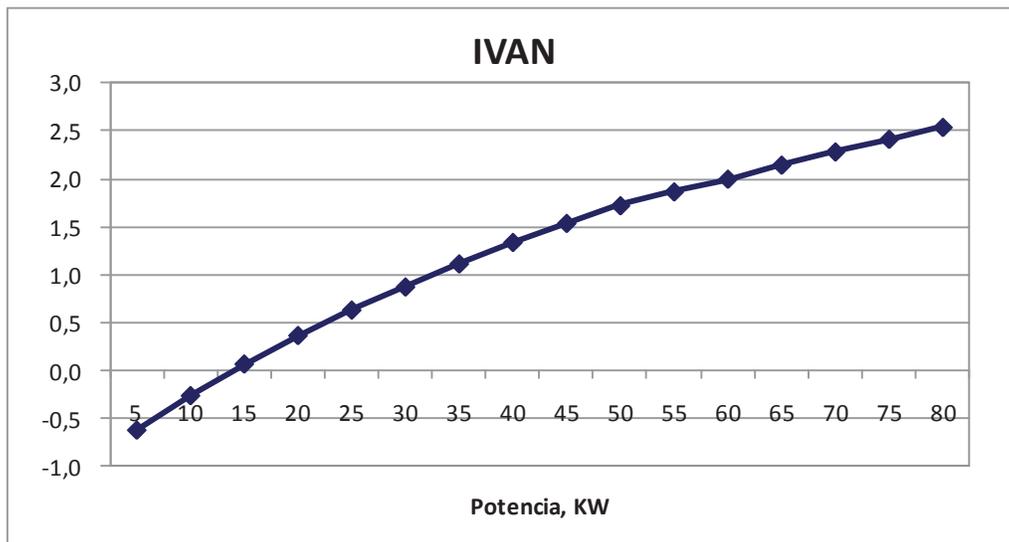


Figura 40. Variación del IVAN según la potencia generada, sin tendido eléctrico.

Suministro a Barrio Cívico.

La figura 41 muestra la variación del VAN al aumentar la potencia generada por la microturbina:

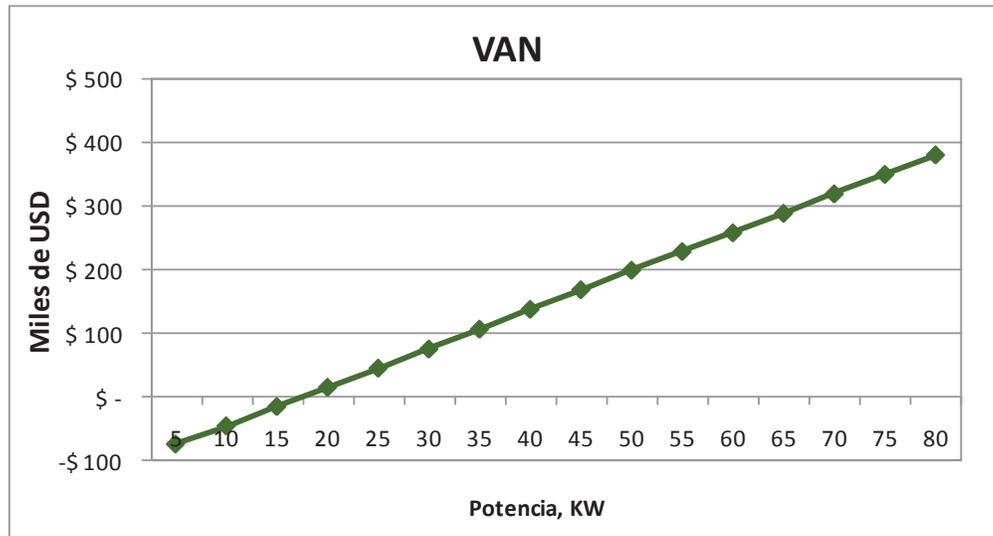


Figura 41: Variación del VAN según potencia generada, con tendido eléctrico.

La figura 42 muestra la variación de la TIR según la potencia generada en el escenario con tendido eléctrico:

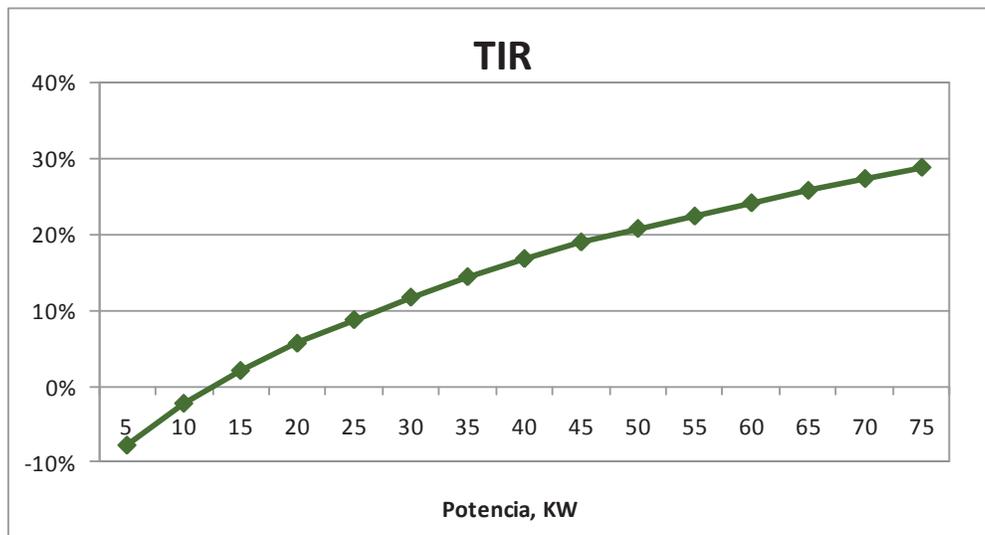


Figura 42: Variación de la TIR según la potencia generada, con tendido eléctrico.

En la figura 43 se puede apreciar la variación de IVAN en función de la potencia generada:

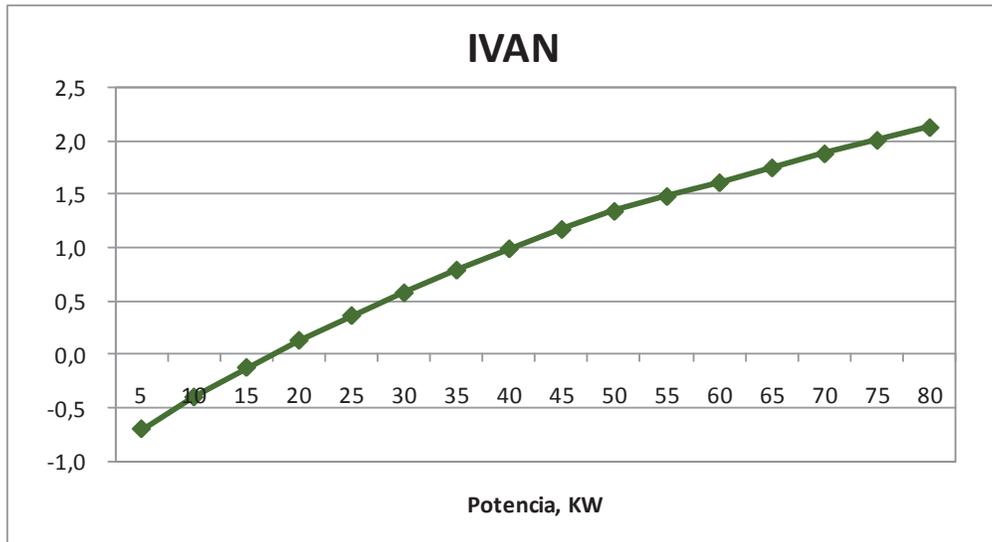


Figura 43: Variación de la TIR según la potencia generada, con tendido eléctrico.

IX. Plan de Ejecución de Proyectos.

9.1 Definición del Proyecto.

El propósito del proyecto es hacer de la División Radomiro Tomic una empresa pionera en Chile en la aplicación de tecnologías de eficiencia energética, específicamente en la producción de biodiesel, desde la producción de las materias primas, la instalación de la planta de procesos y la producción misma del combustible y el aprovechamiento del caudal de agua entrante a planta de osmosis de DRT para generar energía eléctrica.

Los beneficios están asociados a:

- Ahorro producto de un menor consumo de diesel en los vehículos livianos de la división Radomiro Tomic.
- Ahorrar en consumo de energía eléctrica del SING, independencia energética.
- Ahorro por concepto de venta de subproductos del proceso, Glicerol y Compost.
- Venta de bonos de carbono, CER.
- Bajar emisiones contaminantes.

9.2 Entorno.

La División Radomiro Tomic tiene como misión la responsabilidad de administrar el proceso de extracción y de mantención de minerales oxidados, de acuerdo al modelo vigente. También es responsable del desarrollo, optimizando las mezclas de minerales y de las sinergias operativas, para alimentar los respectivos procesos de la Hidro-Norte.

Es objetivo de esta área dar estricto cumplimiento a los planes mineros y metas de producción en cantidad, calidad, oportunidad y leyes establecidas en los contratos firmados con la Gerencia Recursos Mineros y Desarrollo (GRMD), maximizando el retorno sobre los activos productivos. Asimismo coordinar y controlar los procesos productivos de las Minas de Óxidos actuales y futuras. Apoyar también a la GRMD en la definición de los proyectos de desarrollo de la gerencia a su cargo. Por último, es también responsable de la mantención de los equipos de la Mina Radomiro Tomic.

Es por esto, conceptualizando la optimización de recursos, que nace la necesidad de realizar proyectos de energías limpias.

9.3 Misión, premisas, objetivos.

La misión de este proyecto es optimizar los recursos de la División Radomiro Tomic, bajo el concepto de eficiencia energética, utilizando nuevas tecnologías para obtener beneficios económicos a partir de esta mayor eficiencia en los procesos, idea que cada día toma más fuerza dentro de las industrias productivas.

Al hacer operar la planta de una forma más eficiente, se ocuparan menos recursos energéticos en el proceso, donde, actualmente, la problemática energética esta en boga de todos, esto hará reducir costos de operación, así los procesos podrán ser más eficientes y se lograra una independencia energética de los combustibles fósiles, ya sea en su uso directo en vehículos o para la generación de energía eléctrica.

Finalmente los objetivos son:

- Sustituir el combustible diesel por biodiesel, para ser usado en vehículos de Radomiro Tomic.
- Abastecer de energía eléctrica una pequeña parte de las instalaciones existentes.
- Independizarse de combustible fósil y aumentar la eficiencia en la planta RT
- Disminuir emisiones contaminantes

9.4 Estructura de Desglose de Trabajo.

Las Tareas e Hitos de la etapa de ejecución del Proyecto, son los siguientes:

- Reunión de Inicio y Planificación de Actividades
- Ingeniería de Detalles: Desarrollo de Planos de Diseño e Integración y Documentos
- Adquisición de:
 - Equipos para generación de energía eléctrica
 - Equipos para distribución de la energía eléctrica

- Instalación y Montaje de equipos
- Pruebas de aceptación de equipos instalados.
- Obras Civiles
- Marcha Blanca
- Recepción de instalaciones
- Elaboración Planos As Built
- Capacitación: A usuarios y a Mantenedores

9.5 Cronograma.

La figura 44 muestra la Carta Gantt para la implementación del proyecto de producción de biodiesel:

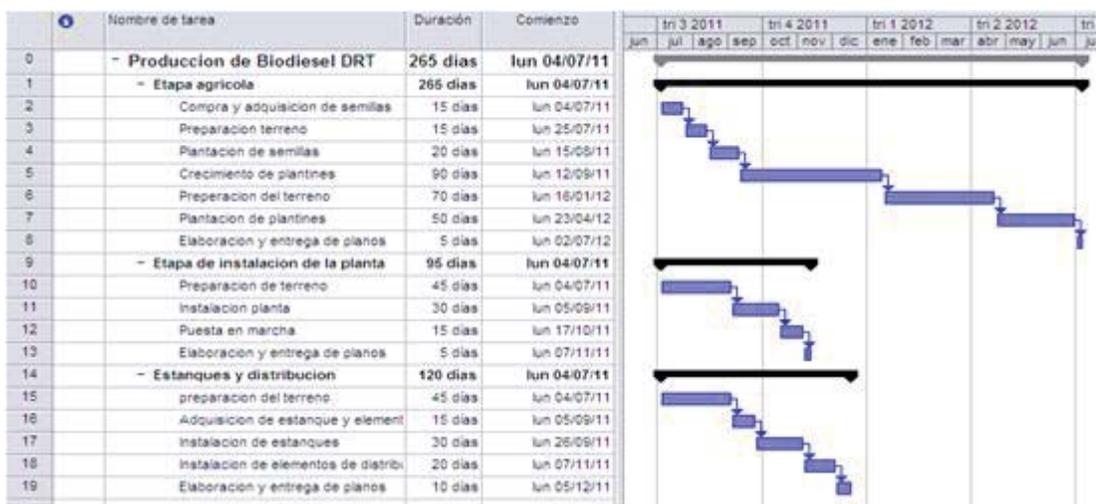


Figura 44: Carta Gantt para implementación de planta de producción de biodiesel.

La Carta Gantt para la instalación de una microcentral hidroeléctrica se muestra en la figura 45:

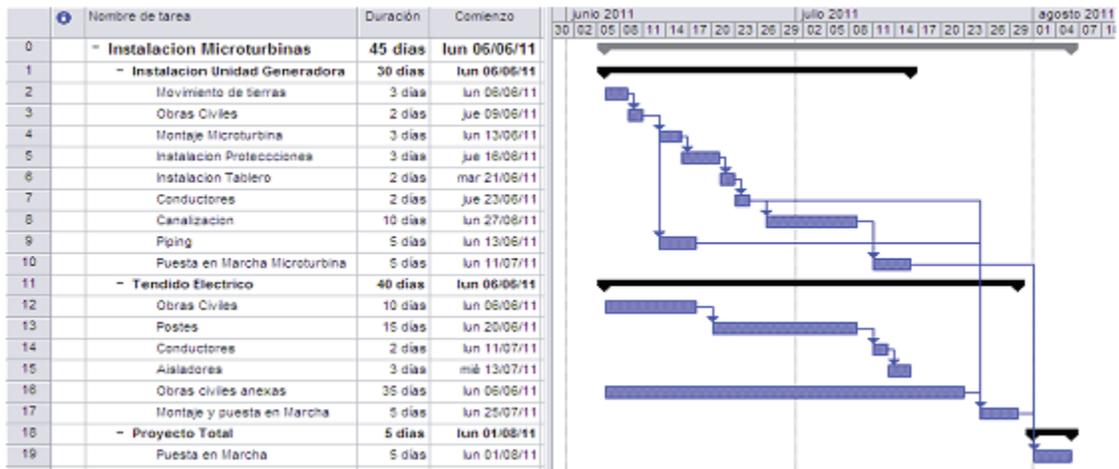


Figura 45: Carta Gantt para instalación de microcentral hidroeléctrica.

X. Conclusiones

10.1 Producción de Biodiesel.

Etapa de Cultivo.

No se tienen datos concretos sobre el rendimiento de *Jatropha Curcas* por hectárea de cultivo, ni de la real posibilidad de que la especie germine, desarrolle y adapte a las condiciones climáticas del Desierto de Atacama, lugar donde se desea realizar el cultivo y de la calidad del agua disponible para el regadío del cultivo, el rendimiento de aceite podría variar entre 1590 y 4938 litros por hectárea al año.

El problema existente en este punto es que aunque el arbusto se adapta de buena forma a las altas temperaturas y largos periodos de sequía, hechos característicos del desierto, pero en las estaciones del año de invierno y otoño, las temperaturas en la noche pueden llegar hasta los 5°C bajo cero, lo cual es perjudicial para la especie vegetal en cuestión, pudiendo afectar el crecimiento de esta, la concentración de aceite en el fruto, o incluso, llegar a matar el arbusto, lo cual haría fracasar el proyecto.

Es necesario realizar estudios sobre las condiciones actuales de los recursos disponibles en la División Radomiro Tomic, específicamente en el Centro Ecológico, estudios que se refieren a evaluar la calidad del suelo, condiciones climáticas, calidad del agua disponible para realizar el cultivo, con esto se tendrá una visión más clara de las posibilidades de que la especie se desarrolle y del rendimiento que podría llegar a tener

Para esto se propone y hace indispensable la implementación de un cultivo a escala piloto, en el Centro Ecológico, donde se plantea dividir el piloto en secciones en las cuales se variara las condiciones de cultivo, como: agua de regadío, uso de fertilizantes, además de incorporar la propuesta de Innovatecs S.A., la cual plantea ionizar el agua de regadío, mediante inducción magnética, para mejorar las condiciones de crecimiento de la planta, y la calidad de los frutos, lo que haría aumentar el rendimiento de *jatropha Curcas* por hectárea y la rentabilidad del proceso.

Etapa de Producción.

El mayor riesgo asociado a la producción de biodiesel, se debe a que el biodiesel tiene un punto congelación cercano a los -5°C , temperatura que se alcanza en la estación de invierno en la División Radomiro Tomic, por lo cual debiese mezclarse con diesel, o usar aditivos para evitar el congelamiento.

Respecto a la rentabilidad del proyecto de producción de biodiesel, puede concluirse, que dependiendo del rendimiento de aceite alcanzado por la *Jatropha Curcas*, que la producción en sí de biodiesel no es rentable a bajar producciones, si se aumenta la producción los indicadores económicos mejoran pero no demasiado como para lograr que el proyecto sea económicamente beneficiosos para la empresa.

Se destaca el incluir al proyecto de producción de biodiesel, una planta para la purificación del glicerol que se obtiene como subproducto, el cual al venderlo como glicerina tiene un valor comercial muy superior, con lo cual se hace el proyecto más rentable.

Dada las alternativas anteriormente estudiadas, se recomienda incorporar una planta para la purificación del glicerol a la planta 2400 litros por día de capacidad, ofertada por Central Biodiesel HTP.

Si se lograra esta configuración, se obtendrían los resultados mostrados en la tabla 19:

	Antes de Impuesto			Despues de Impuesto		
	VAN (US\$)	TIR	IVAN	VAN (US\$)	TIR	IVAN
HTP 2400 litros por día + purificador						
Optimista	\$ 9.797.915	44%	7.19	\$ 7.909.716	40%	5.81
Medio	\$ 8.919.894	37%	5.07	\$ 7.134.642	33%	4.05
Pesimista	\$ 5.977.738	22%	1.82	\$ 4.327.542	19%	1.32

Tabla 19: Indicadores económicos al incorporar planta purificadora de glicerol a una producción de 2400 litro por día.

Esta evaluación económica se realizó en base a la evaluación de Central Biodiesel HTP, con capacidad de 2400 litros por día, y agregando una planta de purificación de glicerol con la capacidad para tratar esta cantidad de glicerol.

Parte de la razón de que no se alcanzan buenos resultados económicos en este proyecto, radica en que la inversión, debido a los costos de producir el aceite sembrando la

Jatropha Curcas, es demasiado alta y no se conoce el rendimiento de aceite que se alcanzara.

También cabe notar, que la producción máxima de frutos de Jatropha Curcas se logra al sexto año, lo cual hace del proyecto menos rentable en el análisis económico.

Puede ser relevante para un proyecto de estas características, buscar un aceite diferente, para ser utilizado como materia prima para la producción de biodiesel, con el cual se pueda suplir la falta de producción de aceite de los primeros años de cultivo de Jatropha Curcas, o en definitiva, sustituirlo. Se puede obtener buenos rendimientos con aceite de palma, plata y a partir de micro algas.

10.2 Instalación de Microcentral Hidroeléctrica.

Como pudo observarse en la evaluación económica, la instalación de una microcentral hidroeléctrica de una potencia instalada de 20 KW, es un proyecto que entrega resultados económicos positivos, evaluados a 13 años, pero no es lo suficientemente rentable como para ser atractivo para invertir en un proyecto como este.

Los indicadores económicos muestran que la alternativa de alimentar parte de la planta de osmosis es más rentable que distribuir la energía al Barrio Cívico, debido a que existe un ahorro en tendido eléctrico, lo cual se demuestra al comparar el VAN de US\$ 45.950 antes de impuesto para la alimentación en planta de osmosis y el de US\$ 26.726 antes de impuesto para la distribución al Barrio Cívico.

En las proyecciones hechas, de los distintos indicadores económicos, al variar la potencia generada por la microcentral, se observa un aumento de la rentabilidad del proyecto a medida que se aumenta la potencia generada, donde se aprecia que al generar una potencia de 80 KW, los indicadores son bastantes buenos, alcanzando un VAN antes de impuesto de US\$ 402,980 para la alimentación en planta de osmosis y de US\$ \$ 381,570 incluyendo tendido eléctrico para abastecer el Barrio Cívico.

XI. Bibliografía.

- [1] CODELCO; 2010; Plan de Negocios Desarrollo (PND), Radomiro Tomic, Producción de cobre estimada.
- [2] SUPERINTENDENCIA LX-SX-EW, 2001, Apuntes proceso Radomiro Tomic.
- [3] ECORAIN; 2009; Estudio de Perfil “Producción de Biocombustible Para La Industria Minera”; Superintendencia de Ingeniería de Procesos, Gerencia de Extracción y Lixiviación Norte, División Codelco Norte.
- [4] DIEGO LIZANA R., Ingeniero Forestal, Máster en Energías Renovables; Antecedentes Generales Sobre Biodiesel; disponible en: [http://www.ecodesarrollo.cl/descargas/Antecedentes Biodiesel D.pdf](http://www.ecodesarrollo.cl/descargas/Antecedentes_Biodiesel_D.pdf); visitado 18 enero 2011.
- [5] OSCAR FÉLIX DE MARZO PEÑA, 2007, Análisis de Rentabilidad de Producción de Biodiesel en la Planta Piloto de Zamorano a Partir de Aceites de Palma Africana, Zamorano, Honduras, disponible en: http://zamo-oti-02.zamorano.edu/tesis_infolib/2007/T2395.pdf, visitada 25 enero 2011
- [6] JOSÉ STRATTA, Ingeniero Agrónomo; 2000; Biocombustibles: los aceites vegetales como constituyentes principales del biodiesel; Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd52/biocom.pdf>; visitado 18 enero 2011.
- [7] DOMINK RUTZ, RAINER JANSSEN; 2007; Biofuel Technology Handbook;
- [8] LAURA MILENA CARDENAS ARDILA, Estudiante de Maestría en Ingeniería-Sistemas, Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín; CARLOS JAIME FRANCO CARDONA, Profesor Asociado Universidad Nacional de Colombia- Sede Medellín. Modelado Del Mercado Del Carbono. Colombia 2009. Disponible en: http://simon.uis.edu.co/encuentrosds2009/pag_memoria/articulos/ECOLOGIA%20Y%20AMBIENTE/22.pdf. Visitado 28 Septiembre 2010.
- [9] [NATALIA PIZARRO](#); [CO2, Energía y Recursos](#). [Bonos de carbono: ¿Permiso excesivo para contaminar o un equilibrio aceptable?](#). Enero 2010. Disponible en:

- <http://www.veoverde.com/2010/01/bonos-de-carbono-%C2%BFpermiso-excesivo-para-contaminar-o-un-equilibrio-aceptable/>. Visitado 28 Septiembre 2010.
- [10] UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE, Facultad de Agroindustrias, Claudia Díaz Yanevich, Daniel Brachna. Walter López, Omar Judis. Chaco, Argentina. Ingreso adicional por bonos de carbono para una planta de biodiesel. 2005. Disponible en: <http://www.unne.edu.ar/Web/cyt/com2005/7-Tecnologia/T-074.pdf> Visitada el 28 de Septiembre 2010.
- [11] JORGE ALEJANDRO DELAVEGA LOZANO, Consultor Independiente, México Agro-Proyectos y Agro-Energía. *Jatropha Curcas L. Agro-Energía*. Disponible en: <http://www.3wmexico.com/images/JatrophaResumen.pdf>, visitado 29 septiembre 2010
- [12] Mecanismo de Desarrollo limpio, Conceptos Basicos; Secretaría de Recursos naturales y Ambiente, SERNA, Honduras; Capitulo 5, pag 38; http://www.snvworld.org/sites/www.snvworld.org/files/publications/estudio_mdl-web.pdf. visitada el 12 de Diciembre 2010
- [13] CORPODIB, Corporación Para El Desarrollo Industrial De La Biotecnología Y Producción Limpia, Estado del Arte de Las Tecnologías de Producción de Biodiesel. Bogotá, Colombia. Disponible en: <http://www.si3ea.gov.co/si3ea/documentos/documentacion/Biodiesel/Capitulo%207.pdf>. Visitado el 23 de septiembre 2010.
- [14] SCHUCHARDT, U., SERCHELI, R. & VARGAS, R.M., (1998). Transesterification of Vegetable Oils . J. Braz. Chem Soc. Vol. 9 N° 1
- [15] JOSÉ ANGEL SOTOLONGO PÉREZ, DR. PEDRO A. BEATÓN DELGADO, ING. ARMANDO DÍAZ, SOFÍA MONTES DE OCA LÓPEZ, YADIRIS DEL VALLE ATALA, ING. SORAYA GARCÍA PAVÓN. 2003. Potencialidades energéticas y medioambientales del árbol *Jatropha curcas* L en las condiciones edafoclimáticas de la región semiárida de la provincia de Guantánamo, disponible en: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar18/HTML/articulo04.htm>. visitada el 17 de Diciembre 2010.
- [16] LEFFINGWELL Y LESSER, 1955, Glycerin, Brooklyn.

- [17] CODELCO NORTE, DIVISION RADOMIRO TOMIC; 2010; Estadística de Consumo de Combustible, Enero a Agosto 2010.
- [18] CODELCO, RADOMIRO TOMIC, Estadística de consumo energetico, Precio Monomico, Energia y Potencia, 2010.
- [19] <http://www.monografias.com/trabajos-pdf/microcentral-hidroelectrica-cachimbiro/microcentral-hidroelectrica-cachimbiro.pdf>. Visitada el 25 de Diciembre 2011.
- [20] INVERSIONES SAN MARTÍN; Federico Mejia, Presidente. 2006. Cultivo de jatropha curcas y construcción de una planta de biodiesel en san esteban, olancho, honduras. Disponible en:
www.sica.int/busqueda/busqueda_archivo.aspx?Archivo=odoc_9537_1_22062006.pdf. Visitado 23 Septiembre 2010.
- [21] PEDRO SANTANA, REPÚBLICA DOMINICANA; Octubre 2006. El “Sistema Jatropha”: Seminario de Promoción y Demostración, Técnicas de Siembra. Disponible en: http://www.jatropha.de/Dominican%20Republic/documents/FT_es-Siembra-hm.pdf. Visitado el 29 de Septiembre 2010.
- [22] WALTER GONZALEZ, regulador electrónico para Microturbinas Hidráulicas, <http://www.electrosector.com/wp-content/ftp/revista45/regulador.pdf>. Visitada el 05 de Enero 2011.
- [23] CINK, Hidro Energy; Turbina hidráulica, Flujo cruzado, Ossberger, disponible en: <http://www.cink-hydro-energy.com/sp/turbina-ossberger>. visitada el 19 de Enero 2011.
- [24] PEDRO FERNÁNDEZ DÍEZ, Turbinas Hidraulicas, disponible en: http://usuarios.multimania.es/jrcuenca/Spanish/Turbinas/turbinas_hidraulicas.htm. Visitada el 27 de Enero 2011.

Apéndice A: *Jatropha Curcas*.

La planta *Jatropha Curcas* es un arbusto de 2 a 6 m de altura con corteza blanco-grisácea, que exuda un látex translúcido, puede implementarse como una planta productivamente rápida en situaciones adversas, tierras degradadas, clima seco, tierras marginales y al mismo tiempo ser parte de un sistema agrosilvicultural. Puede plantarse en las tierras que estén en período de barbecho y a lo largo de los límites de pastizales porque no crece demasiado alto, así como también es apropiada en los terrenos sin aprovechar junto a las vías férreas, carreteras y canales de irrigación. La cosecha se realiza en dos o tres ocasiones durante al año, debido a que no todos los frutos maduran al mismo tiempo.

Las principales bondades de la planta *Jatropha curcas* son:

- Crecimiento en cualquier tipo de tierra.
- No tiene ningún insecto, enfermedad o predador (ganado u oveja) que representen una amenaza total.
- Puede sobrevivir períodos largos de sequedad.
- Puede producirse en áreas con baja lluvia (200 mm por año).
- La propagación es fácil.
- Produce frutos después del primer año, su producción se estabiliza al quinto año y continúa durante 30 - 40 años produciendo frutos de buena calidad.
- Produce muchos productos y subproductos que pueden ser aprovechables.

El arbusto *Jatropha Curcas* es mostrado en la figura 46:



Figura 1-A: arbusto de Jatropha Curcas.

Frutos.

Los frutos son cápsulas drupáceas y ovoides, después de la polinización, se forma una fruta trilobular de forma elipsoidal. Las frutas son cápsulas inicialmente verde pero volviéndose a café oscuro o negro en el futuro. Las cápsulas de los frutos son de 2,5 a 4 centímetros de largo por 2 centímetro de ancho, elipsoidales y lisas.

La fruta produce tres almendras negras, cada una aproximadamente de 2 centímetro de largo y 1 centímetro en el diámetro.

La semilla es de forma elíptica. La masa promedio de la semilla seca es de 0,69 a 0,86 gramos. La relación promedio de peso de la semilla es 62,7 y cascarilla es de: 37,3, contiene aproximadamente 50-60% de aceite, 30-32% de proteína y 60-66% de lípidos. Su producción anual promedio es de 5 toneladas por hectárea. La semilla contiene minerales como fósforo, calcio, sodio, potasio y magnesio.

La planta empieza dando la semilla en un período máximo de dos años después de plantar, luego de un ensayo al final del primer año. El volumen de aceite es 35-40% en las semillas y 50-60% en el grano. El aceite contiene 21% de ácidos grasos saturados y 79% ácidos insaturados. Las semillas deben ser cosechadas manualmente, pues la *Jatropha Curcas* es frágil [20].

La figura 47 muestra los frutos de *Jatropha Curcas*:

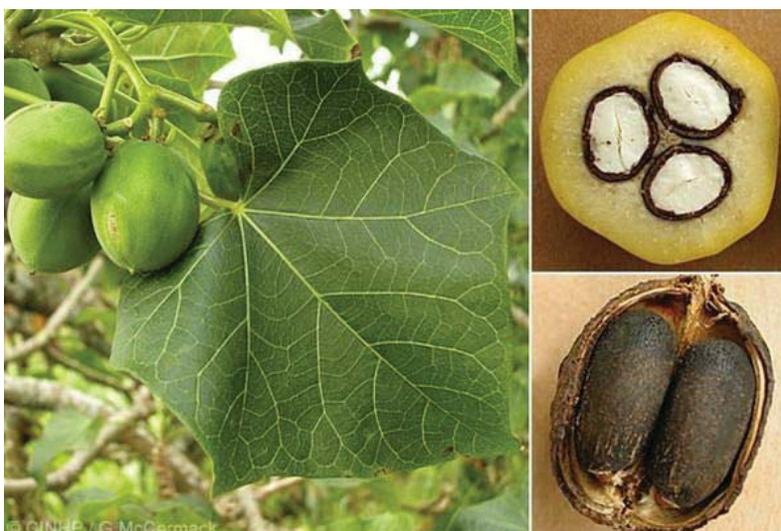


Figura 2-A: fruto de *Jatropha Curcas*.

Siembra.

Se puede plantar en todo el año, prefiriendo periodos de temperaturas y humedad media en año normal. Se pueden determinar densidades de plantación desde 1.111 a 3.333 plantas/Ha, con marcos de plantación desde 3 x 3 m a 1,5 x 2 m, es recomendable plantar con un distanciamiento de 2 x 2 m respectivamente, resultando una densidad de 2.500 plantas/Ha. Una vez que el plantin alcanza los 30 a 40cm de altura, adquiere condiciones repelentes de insectos, por lo tanto, esta altura asegura una menor perdida porcentual de establecimiento.

Reproducción y Establecimiento.

Las semillas para siembra deben ser obtenidas de plantas que han mostrado altas producciones. El almacenamiento de las semillas no deberá exceder de 10 a 15 meses, supervisando la calidad en las semillas durante este tiempo, considerando su contenido de aceite [11]. Con una buena humedad la germinación toma 10 días. Se abre la cáscara de la semilla, sale la radícula y se forman 4 raíces periféricas pequeñas. Poco después la primera hoja desarrolla los cotiledones, se marchitan y se caen, luego crece el simpodial. Dependiendo de las condiciones de propagación y lluvia el primer rendimiento de la semilla es en los primeros seis meses y puede producir durante 50 años.

La *Jatropha* se puede propagar por semillas o vegetativamente, asegurando una cosecha más temprana. Para la obtención de ejemplares vigorosos, que permitan asegurar un buen porcentaje de establecimiento en huerto o campo, se recomienda preparar las plantas bajo vivero, protegiendo la planta en sus etapas iniciales. El aspecto a considerar más importante en el establecimiento de todo cultivo, es la calidad de la semilla, la cual debe estar libre de plagas y enfermedades.

Métodos de Siembra.

La posición de la semilla debe ser con la cicatriz hacia abajo, para permitir el crecimiento erecto y reducir el tiempo de emergencia de la panicula. La semilla se debe sembrar de 2 a 2,5 cm. de profundidad, colocando 2 semillas por postura, con poblaciones de más de 50% de poder germinativo, esto nos da el siguiente escenario:

- a) Germina una sola semilla.
- b) Germinan 2 semillas
- c) No germinan ninguna.

En casos probados, solo en el 4% se dio el escenario c), la solución fue, trasplantar los plantines sobrantes del caso b).

- **Siembra de semilla directa al campo:** El mejor momento para el sembrado directo es durante el inicio de la temporada de las lluvias. Después de 2 años o 3 temporadas lluviosas, la planta *Jatropha* produce nuevas semillas.
- **Siembra de semilla en bolsa (vivero):** aquí se utiliza semilla con un porcentaje de germinación de 85%, que ya es aceptable, se debe colocar una o dos semillas por bolsa y mantenerlas hasta alcanzar la altura necesaria para ser trasplantada.

Trasplantación de Las Plantas Jóvenes.

Se llenan pequeñas fundas de plástico del substrato compuesto de

- 1/3 de suelo fértil
- 1/3 de abono orgánico
- 1/3 de arena

Aproximadamente 3 meses antes del inicio de la temporada lluviosa, se siembra una semilla en cada saco. Si se riegan bien diariamente, las semillas empiezan a germinar a los 10 días. Después de 3 meses, al principio de la estación lluviosa, se pueden sembrar las matas de 30 a 40 cm de alto. Estas matas pueden producir semillas solamente después de dos temporadas lluviosas.

Para sembrar una valla, la distancia entre las semillas debe ser por lo menos 20 cm. Para una siembra de valla realmente espesa, dos filas de 20 cm aparte con semillas 5 cm aparte.

Multiplicación vegetativa (esquejes).

El *Jatropha* es muy fácil propagarse por esquejes que se colocan aproximadamente a 20 cm en el suelo. Los esquejes deben tener más de 1 año. El mejor momento de siembra es de 1 a 2 meses antes del inicio de la temporada lluviosa [21].

Rendimiento de *Jatropha Curcas*.

La *Jatropha curcas* presenta un alto grado de aceite, pudiendo obtener un rendimiento de:

- 2 toneladas de aceite por hectárea al año, llevando de tres a cuatro años para comenzar la edad productiva, que se puede extender por 40 años.
- El rendimiento de frutos, es de 4 a 5 Kg. de frutos por planta

El incremento en la producción de semillas y aceite se estima según la tabla 20 [3]:

Año	Semillas, Kg	Aceite, Kg
1	250	120
2	1.000	480
4	5.000	2.400
6	12.000	5.760

*Tabla 1-A: incremento de producción de semillas *Jatropha Curcas*.*

Se debe considerar los rendimientos en base a experiencias desarrolladas por otras empresas o naciones con similares condiciones [3].

$$\text{Rendimiento } Jatropha \text{ Curcas} = 1590 \frac{L}{Ha * \text{año}}$$

Productos Obtenidos del Cultivo de *Jatropha*.

- **Aceite Vegetal:** El aceite obtenido del prensado de las semillas es de uso directo para más de 400 productos en la industria química, teniendo un mayor impacto en la industria de Biodiesel.

La tabla 21 muestra la comparación entre el aceite de *Jatropha Curcas* y el diesel:

Detalle	Aceite <i>Jatropha</i>	Diesel
Gravedad Especifica	0,9186	0,82 / 0,84
Punto de ignición	240 / 110 °C	50 °C
Punto de Destilación	295°C	350 °C
Viscosidad cinemática	50,73cs	2,7 a 3,6cs
Sulfuro	0,13 %	< 1,2 %
Poder Calorífico	9,470Kcal/kg	10,170Kcal/kg
Punto de Ebullición	8 °C	10 °C

*Tabla 2-A: cuadro comparativo aceite de *Jatropha* y diesel normal [3].*

El aceite de *Jatropha* es de color amarillo claro, inoloro y con sabor ligero a nuez.

- **Torta de molienda:** Es una mezcla de carbohidratos, fibra, proteína y aceite que no se pudo extraer, la cual contiene algunos componentes tóxicos; aún así es muy útil como biofertilizante por su alto contenido en nitrógeno. Después de eliminados los elementos tóxicos se podría transformar en un excelente alimento balanceado para el ganado, con un contenido proteínico superior a 50% y también puede usarse como combustible, ya que tiene un valor calórico de 2.651 Kcal/Kg (3% de humedad). La variedad mexicana no es tóxica (contenidos de ácido forbólico y curcina muy bajos), por lo que sus semillas producen una torta de mayor calidad para usos económicos. Investigaciones en Nicaragua ya han demostrado que este material es un buen sustrato para la producción de biogás en reactores UASB [17].

- **Glicerol:** La capa de glicerina no es solo glicerina, sino una mezcla de glicerina, jabones, metanol sobrante y catalizador. Ésta se puede destilar para convertirla en glicerina farmacéutica con un alto valor añadido como materia prima industrial o como combustible en la producción de biogás. Luego del proceso de transterificación, se obtiene un 10 % de glicerol

Pruebas de *Jatropha Curcas* en Chile.

Un año de aprendizaje en terreno, para nada exento de dificultades, acumula ya el proyecto Evaluación agronómica de *Jatropha Curcas* L. como materia prima para producir biodiesel bajo condiciones edafoclimáticas de Chile semiárido, que busca establecer parámetros técnicos para la producción local de esta planta y realizar una ponderación económica del mismo.

La importancia de establecer cultivos de *jatropha*, reviste la importancia de que, al ser este arbusto una de las especies vegetales conocidas con más altos rendimientos en la producción de biocombustibles, sólo superada por la palma y la caña de azúcar, eventualmente se podría crear un polo productor de esta clase de sustancias, ayudando a reducir la dependencia energética del país.

Es necesario conocer que tan bien puede adaptarse esta especie al clima semiárido, al suelo pobre en materia orgánica y al agua con alto contenido de sales, muy diferente a las zonas tropicales y semiáridas de América Central, en donde se origino la planta.

Sensible al calor.

Para realizar la evaluación, durante el verano de 2009 se establecieron cultivos de ensayo en predios ubicados en Pan de Azúcar, comuna de Coquimbo; Quebrada Seca, comuna de Ovalle, y Cuz Cuz, comuna de Illapel. En septiembre se plantaron dos ensayos más, uno en Vicuña, en donde se efectuó el día de campo, y otro en Vallenar.

Según el director del proyecto, el investigador de INIA Intihuasi, Carlos Sierra, las principales conclusiones que se puede obtener hasta la fecha se refieren a que "en los lugares de valles interiores como Vicuña e Illapel, se ha observado un buen crecimiento de las plantas desde noviembre a febrero, es decir en primavera y verano. Sin embargo,

el inconveniente en estas localidades es la ocurrencia de heladas, siendo ese riesgo mayor en Illapel".

A diferencia de lo anterior, en las zonas bajo influencia climática costera, como Pan de Azúcar y Quebrada Seca, "el riesgo de heladas es menor, pero el crecimiento en primavera y verano también lo es, debido a que las temperaturas son más bajas que en el interior".

Para Carlos Sierra, las plantas de jatropha resultaron ser altamente sensibles a la temperatura, creciendo rápidamente durante las épocas de calor y sufriendo deterioros importantes en los períodos fríos. De hecho, su tolerancia a heladas es tan baja que en el campo de Cuz Cuz casi todas las plantas murieron y debieron ser arrancadas durante el invierno de 2009, siendo reemplazadas a la primavera siguiente.

Tolerante a suelos pobres.

La investigación de INIA Intihuasi también ha determinado que las principales plagas que atacan a la jatropha en la Región de Coquimbo son dos ácaros, conocidos como arañita bimaculada y arañita carmín. También parece estar adaptando la mosquita blanca del fresno.

En cuanto a la nutrición, la planta muestra tolerancia a la salinidad de las aguas de riego de la zona, sin que hasta ahora se haya reportado daños por este efecto. También posee capacidad para proliferar en suelos con bajo contenido de nutrientes y materia orgánica, aunque para lograr un crecimiento acelerado y sano se precisa abono y la entrega artificial de minerales, generalmente a través del riego, tal como se hace con todos los cultivos agrícolas en el Norte Chico.

Previo a la plantación de los especímenes experimentales, los técnicos de INIA Intihuasi debieron diseñar una técnica propia para lograr la germinación de las semillas, dado que no respondieron satisfactoriamente a la conducta prevista según la literatura especializada disponible [16].

Apéndice B: Cotizaciones

Planta Central Biodiesel.

BIO1m7

Planta de producción de Biodiesel, permite batches de hasta 400 litros, utilizando el protocolo de alta temperatura.

BIO400m7:

- Construido en acero de bajo carbono A36 (SAE 1010)
- Soldadura TIG
- Pintura Epoxy
- Cumple con EC 4/94 (ATEX)
- Circuitos independientes de Metanol y Aceite Vegetal
- Manómetro análogo de 4"
- Válvula de Seguridad Recalibrada
- Venteo dedicado
- Control Visual de Volumen
- Alarma de Emergencia
- Filtro 20 Micrones
- Válvulas de Bronce 90° con esfera cromada & sellos de Nylon 6
- Sellos de Vitón en Bombas
- Protección individual de circuitos

BIOHEAT400m7:

- Construido en acero de bajo carbono A36 (SAE 1010)
- Soldadura TIG
- Pintura Epoxy
- Cumple con EC 4/94 (ATEX)
- Circuitos independientes de Metanol y Aceite Vegetal
- Termostato Digital
- Termómetro Digital
- Bomba dedicada
- Control Visual de Volumen
- Alarma de Emergencia
- Válvulas de Bronce 90° con esfera cromada & sellos de Nylon 6
- Sellos de Vitón en Bombas
- Protección individual de circuitos

BIOCLEANm2:

- Construido A36 (SAE 1010)
- Soldadura TIG
- Pintura Epoxy
- Capacidad de almacenaje 55 Litros
- Centrifuga cerrada de 7,000 RPM
- Filtro de 1 micrón
- Elemento calefactor controlado mediante termostato
- Bomba industrial de desplazamiento positivo
- Inversor de Frecuencia de estado sólido
- Válvulas de Bronce 90° con esfera cromada y sellos de Nylon 6
- Sellos de Vitón
- Portátil. Ruedas con Goma
- Manómetro con Glicerina de 2"
- Termómetro
- Protección individual de circuitos

Paquete BIO1 - Información General:

Capacidad (300 Galones) cada 24 horas	Consumo eléctrico por litro	1,200 Litros	40-60 watts
Capacidad Instalada Requerida		18kW	Tiempo promedio por batch
			50' Personal Necesario
Temperatura de Reacción		90°C(194F)	
Presión Recomendada		1 Atm	
Tiempo de Decantación Promedio		6 - 8 horas	Reactor BioAlky
Volts/Ciclos Disponibles	(TresFases)	3x200/240/380/440AC	50/60Hz
BioClean		220-240 AC	0/60Hz

Cotización de Planta de Biodiesel: Ingeniería Global Welt.



Concepción, 27 de Septiembre de 2010

Sr. Alfonso Bellenger Arancibia
Presente.

Ref: Cotización proyecto planta prototipo Biodiesel.

De nuestra consideración:

Junto con saludarle nos complace presentarle la siguiente cotización cumpliendo estrictamente con los patrones que requiere para desarrollar el proyecto de producción y comercialización de Biodiesel

A continuación se presenta la estructura de costos:

ITEM	VALOR UNITARIO
PLANTA AUTOMATIZADA PARA PRODUCCIÓN BIODIESEL Y GRICEROL 40 LTR/H	\$ 78.500.000
LINEA COMPLETA PARA EXTRACCION DE ACEITE	\$ 20.000.000
LABORATORIO PARA EL ANALISIS EN TIEMPO REAL	\$ 15.000.000
PLANTA AUTOMATIZADA DE TRATAMIENTO DE GLICEROL	\$ 72.550.000
MONTAJE Y PUESTA EN MARCHA	\$ 50.000.000
CAPACITACION Y SERVICIO POST VENTA	\$ 60.000.000
TOTAL	\$ 296.050.00

Tabla 1-B: Costos Planta Biodiesel, Ingeniería Welt

La estructura de pago para los proyectos viene definida de la siguiente manera:

50 % al momento de la firma del contrato de trabajo con la empresa.

50 % al momento de la entrega.

Le agradecemos al considerar a WELT Ingeniería Global, ya que, evaluamos cada proyecto detenidamente y proponemos las soluciones más adecuadas para alcanzar sus metas.

PEDRO SILVA GOMEZ
Gerente Desarrollo
WELT INGENIERIA GLOBAL

WELT INGENIERIA GLOBAL
 Proyectos, Gestión, Consultoría, Capacitación, Diseño, Energías Alternativas, Automatización, Derrames de petróleo, Huella de Carbono. Concepción, Chile. Fono: 82656264.

Cotización Schwager Energy: Instalación Microturbina.

	ASESORIA EN EFICIENCIA ENERGÉTICA			SCHWAGER ENERGY	
	Nº Documento: SCH-110107-PTC-EE				
Propuesta Técnico Comercial	Propuesta	Tipo	Rev.	Validez	Página
	110107	Propuesta	0	Enero 2011	1 de 9

MICROTURBINAS

CODELCO - RADOMIRO TOMIC

SCHWAGER ENERGY S.A.

SCH-110107-PTC-EE

(31-01-2011)

REALIZADO POR :		REVISADO POR :		APROBADO POR :	
Responsables	Ingenieros de Proyecto	Responsable	Jefe de Proyecto	Responsable	Gerente Área
Nombres	Carlos Román O. Israel Tessini R.	Nombre	Matías Chacón	Nombre	Carlos Rodríguez
Fecha	31-01-2011	Fecha	31-01-2011	Fecha	31-01-2011
Firmas		Firma		Firma	

	ASESORIA EN EFICIENCIA ENERGÉTICA			SCHWAGER ENERGY	
	Nº Documento: SCH-110107-PTC-EE				
Propuesta Técnico Comercial	Propuesta	Tipo	Rev.	Validez	Página
	110107	Propuesta	0	Enero 2011	2 de 9

Resumen Ejecutivo

El presente documento contiene una descripción de la evaluación de oportunidades de ahorro energético realizado por Schwager Energy S.A. para la optimización energética a Codelco en la minera de Radomiro Tomic y que tiene por objetivo mostrar las posibilidades de mejora en la Generación eléctrica mediante hidro-turbinas.

Todas estas oportunidades fueron levantadas durante una visita técnica realizada durante el mes de enero del presente año. En las distintas evaluaciones se utilizaron datos obtenidos durante la visita e información proporcionada mediante comunicación electrónica con el cliente.

	ASESORIA EN EFICIENCIA ENERGÉTICA			SCHWAGER ENERGY	
	Nº Documento: SCH-110107-PTC-EE				
Propuesta Técnico Comercial	Propuesta	Tipo	Rev.	Validez	Página
	110107	Propuesta	0	Enero 2011	3 de 9

1. PRESENTACIÓN DE SCHWAGER ENERGY S.A.

Schwager Energy S.A. es una compañía chilena y sociedad anónima abierta que cotiza en la bolsa de valores, que cuenta con más de 140 años de experiencia en la extracción y procesamiento del carbón en Chile. Hoy, Schwager Energy S.A. se ha reenfocado en sus capacidades de ingeniería con el objetivo de proveer un soporte a los procesos y la optimización de los mismos, en diversos tipos de industrias, tanto en Chile como el extranjero. Schwager Energy S.A. es una empresa orientada a entregar soluciones integrales y económicamente rentables, con visión de futuro, a través del desarrollo de soluciones tecnológicas en las áreas de ingeniería, metalurgia, electrónica, electricidad de poder, mecánica, química, ambiental, de procesos y de tratamientos, con una gestión de proyecto integrada. Además Schwager entrega soluciones innovadoras a sus clientes en las áreas de energía, residuos y procesos.

El alto nivel de competencia de sus profesionales y un mejoramiento continuo de sus procesos, permiten desarrollar tecnologías que son una alternativa real a los requerimientos y necesidades de sus clientes, ofreciendo soluciones sólidas y duraderas a sus proyectos.

Cuenta con el soporte de prestigiosas universidades con las que conforma un equipo interdisciplinario, con doctores ingenieros con mucha experiencia en investigación-desarrollo e innovación en empresas.

“Entidad inscrita en el Registro de Centros para la Realización de Actividades de Investigación o Desarrollo para fines de la Ley de Incentivo Tributario a la Inversión Privada en Investigación y Desarrollo” de acuerdo a la Ley 20.241 de CORFO.

	ASESORIA EN EFICIENCIA ENERGÉTICA			SCHWAGER ENERGY	
	Nº Documento: SCH-110107-PTC-EE				
Propuesta Técnico Comercial	Propuesta	Tipo	Rev.	Validez	Página
	110107	Propuesta	0	Enero 2011	4 de 9

INTRODUCCIÓN

El consumo energético de una sociedad es proporcional a su nivel de desarrollo. Actualmente nos encontramos en un creciente nivel de desarrollo, con la consecuente escasez de recursos energéticos que esto conlleva. Por lo tanto, se hace cada vez más necesario incentivar la búsqueda y desarrollo de alternativas que suplan esta carencia.

De lo anterior nace el concepto de eficiencia energética, el cual conduce una serie de beneficios, los que se pueden agrupar según su área de incidencia como se indica a continuación:

- **Estratégicos:** reducción de la vulnerabilidad generada por las variaciones en los precios de los combustibles.
- **Económicos:** reducción del costo de la energía a través de los ahorros generados por un consumo eficiente.
- **Ambientales:** reducción en la explotación de los recursos naturales, generados a través de la disminución de consumos energéticos manteniendo el nivel de productividad.
- **Responsabilidad social:** ilustrar a la comunidad en el cuidado del entorno haciendo un uso responsable y sustentable de los recursos naturales.

	ASESORIA EN EFICIENCIA ENERGÉTICA			SCHWAGER ENERGY	
	Nº Documento: SCH-110107-PTC-EE				
Propuesta Técnico Comercial	Propuesta	Tipo	Rev.	Validez	Página
	110107	Propuesta	0	Enero 2011	5 de 9

ANTECEDENTES

La visita realizada contempló la inspección visual de las instalaciones, de la cual se rescató el máximo de información visual y documentada disponible por el cliente. También se realizaron consultas y solicitud relevante de información técnica de consumos y procesos, todo esto con el objetivo de conocer y evaluar información relevante para el desarrollo de esta asesoría, la cual

- consideró los siguientes aspectos:
- Consumos de energía eléctrica en luminarias.
- Identificación de procesos relevantes en el uso de la energía.
- Posibles fuentes hídricas con potencial energético disponible.
- Cuantificación de uso de combustibles involucrados en procesos especificados por el cliente.

OBJETIVOS

El presente informe tiene como objetivo mostrar las posibles mejoras en eficiencia energética de la minera Radomiro Tomic, específicamente en lo referido a la utilización de fuente hídricas.

Objetivo de la Asesoría

Colaborar con la optimización energética de la minera, a partir de lo visualizado y de la información entregada en la visita realizada y en las reuniones y comunicaciones posteriores.

A partir de lo mencionado anteriormente, se realizará un informe de evaluación energética y propuesta de soluciones para las áreas antes mencionadas, además de una evaluación técnica económica de las oportunidades y alternativas de optimización energéticas y asociadas a la pre-evaluación realizada.

	ASESORIA EN EFICIENCIA ENERGÉTICA			SCHWAGER ENERGY	
	Nº Documento: SCH-110107-PTC-EE				
Propuesta Técnico Comercial	Propuesta	Tipo	Rev.	Validez	Página
	110107	Propuesta	0	Enero 2011	6 de 9

PRE-DIAGNÓSTICO MINERA RADOMIRO TOMIC

A continuación se presentan las posibilidades de ahorro solicitadas en la visita de pre-evaluación realizada a la minera.

Instalación de Hidro-Turbina

En las mineras existe un gran consumo eléctrico en diferentes etapas del proceso como también en las instalaciones disponibles para oficinas, centros de mandos, vestuarios, casinos, etc. Todas estas instalaciones requieren de iluminación en forma parcial o total durante una jornada normal de trabajo, por tanto, una de las alternativas evaluadas en conjunto con los representantes de la minera es la inclusión de una turbina de flujo cruzado en un cauce de agua disponible en la vecindad de la minera para alimentar estos consumos.

Según la información, existe un flujo promedio de 280 [l/s] y se encuentra a una altura vertical de 10 [m] (por confirmar de parte del cliente), por lo que tiene un potencial energético de 15 [kW]. Lo anteriormente señalado considera un factor de potencia de 0,8 y una eficiencia total del sistema del 70%. Este potencial energético sólo queda sujeto a la eficiencia más precisa del sistema y a la disponibilidad de turbinas en el mercado según tipo y procedencia.

La información necesaria para establecer de forma ajustada la potencialidad del sistema generador es:

Caudal disponible por cada mes, considerando el mínimo y el promedio en cada uno de ellos. Forma en que se transporta el agua desde el punto de acumulación hasta el punto de generación, teniendo en cuenta si es en canal abierto, por lo que se debe conocer el largo, ancho y profundidad más la pendiente del mismo.

Ahora, si es a través de ducto, se debe conocer el diámetro y la altura vertical total, el material de los ductos por el efecto de rugosidad y pérdida de carga que éste implica.

AVDA. DEL PARQUE 4680-A, CIUDAD EMPRESARIAL, HUECHURABA, SANTIAGO, CHILE FONO: (56-2) 365 1801

	ASESORIA EN EFICIENCIA ENERGÉTICA			SCHWAGER ENERGY	
	Nº Documento: SCH-110107-PTC-EE				
Propuesta Técnico Comercial	Propuesta	Tipo	Rev.	Validez	Página
	110107	Propuesta	0	Enero 2011	7 de 9

También es necesario conocer la altura respecto del nivel del mar a la que se encontrará la central de generación.

Es importante conocer la calidad del agua a utilizar y valores anexos, tales como el PH, salinidad, etc.

En el caso de que la potencia generada por la mini central sea utilizada de forma constante, tanto en luminarias como en otros equipos, y considerando un uso de 7884 horas (90% de las horas totales del año), se podría obtener un ahorro cercano a los MM\$ 6 por año, lo cual representa menos del 1% del consumo actual.

Si la inversión es aproximadamente de MM\$ 14 (considerando sólo costos de equipos, armado y conexión a la red interna), el retorno es menor a los 2,5 años. Si esta energía generada no es aprovechada en su totalidad, el retorno será a más largo plazo.

Importante: la evaluación de la implementación de la mini central está condicionada a evaluaciones más profundas de disponibilidad de recursos en distintos periodos del año y mediciones más precisas de alturas de aguas disponibles en el sector dispuesto para la implementación del proyecto.

AVDA. DEL PARQUE 4680-A, CIUDAD EMPRESARIAL, HUECHURABA, SANTIAGO, CHILE FONO: (56-2) 365 1801

	ASESORIA EN EFICIENCIA ENERGÉTICA			SCHWAGER ENERGY	
	Nº Documento: SCH-110107-PTC-EE				
Propuesta Técnico Comercial	Propuesta	Tipo	Rev.	Validez	Página
	110107	Propuesta	0	Enero 2011	8 de 9

COSTOS

El detalle de los costos inversionales para la instalación de microturbina de 20 kW del tipo flujo cruzado, se muestran en la Tabla 1.

Valores proyecto instalación de microturbina 20 kW.

Equipo/Insumo	Unidad	Cantidad	Valor Unitario, US\$	Valor total, US\$	Observaciones
Turbina Hidráulica	gl	1	59.400	59.400	Turbina Flujo cruzado 20 kW
Protecciones Eléctricas	gl	1	200	200	Termo magnético
Tablero	gl	1	330	330	Tablero metálico
Conductores	m	60	3,0	180	Multiconductor XLPE 1x4cx12 AWG
Canalización	m	60	3,0	180	Canalización galvanizada 1/2"
Piping	m	15	50	750	Cañería bypass alimentación
Movimiento de Tierra	gl	1	2.600	2.600	Movimiento de Tierra
Obras Civiles	gl	1	5.200	5.200	Fundaciones , anclaje y caseta metálica
Montaje y Puesta en Marcha	gl	1	13.200	13.200	Montaje y Puesta en Marcha
Unidad Generadora				82.040	
Conductores	m	1.700	12	20.400	1/0 AWG Cable desnudo CU clase A
Postes	#	68	120	8.160	Poste de madera 6" a 8", 8 m altura
Aisladores	#	204	15	3.060	Aisladores cerámicos de baja tensión
Obras Civiles	gl	1	700	1.000	Fundaciones de hormigón
Montaje y Puesta en Marcha	gl	1	20.000	20.000	Montaje y Puesta en Marcha
Rendimiento del terreno	gl	1	14.000	14.000	
Tendido Eléctrico opción 2				66.620	
Ingeniería, Supervisión				17.500	
Precio de Venta				166.160	

Tabla 2-B: Cotización para instalación de microturbina, Schwager Energy.

La mano de obra y condiciones de implementación del proyecto están incluidas dentro de las inversiones mencionadas para cada uno, pero tomando real consideración en las notas o susceptibilidades de obtención de ahorro en ellos, lo cual está sujeto a mediciones a largo plazo y en profundidad de cada una de las variables.

	ASESORIA EN EFICIENCIA ENERGÉTICA			SCHWAGER ENERGY	
	Nº Documento: SCH-110107-PTC-EE				
Propuesta Técnico Comercial	Propuesta	Tipo	Rev.	Validez	Página
	110107	Propuesta	0	Enero 2011	9 de 9

CONCLUSIONES

Existe la posibilidad de desarrollar un proyecto de generación mediante el uso de fuentes fluviales hídricas, por medio de una mini central eléctrica la cual podría sustentar parcialmente los requerimientos eléctricos de la minera.

En resumen, existen oportunidades de eficiencia energética factibles de ser abordadas en el estudio que puedan ser sustentables o económicamente rentables al corto, mediano y largo plazo.

PROPUESTA COMERCIAL

No se consideró la presencia de un Prevencionista de Riesgos, el cual deberá proveer el cliente en caso de ser requerido.

Los gastos de alojamiento, traslado aéreo y terrestre se consideran como gastos reembolsables por el cliente.

Formas de Pago

50% Contra OC del cliente o carta de aceptación.

50% Contra entrega de los Informes de cada Proyecto (3).

Aceptación

Se requiere formalizar la aceptación por medio de una Orden de Compra (OC) o una carta de aceptación con el monto especificado en pesos chilenos.

Cabe destacar que Schwager Energy se compromete a manejar toda información en forma estrictamente confidencial. No obstante, se puede suscribir un acuerdo de confidencialidad si el mandante así lo requiriera.

La oferta económica presentada corresponde a valores netos y tiene una vigencia de 30 días hábiles a contar de su fecha de emisión.

Apéndice C: Micro Central Hidroeléctrica.

Durante la revolución industrial, el incremento de la demanda energética de la industria encontró en las turbinas hidráulicas una solución, por lo cual a partir del siglo XIX empezaron a construirse en forma masiva hasta nuestros días.

El gran incremento en la construcción de estas máquinas acumuló una gran cantidad de experiencia, y la consecuente competencia de las compañías constructoras obligó a la optimización en los diseños de las turbinas, dando lugar, a la desaparición de las turbinas centrífugas y al establecimiento de las turbinas centrípetas. Así los modelos de turbinas hidráulicas que existen en la actualidad son el resultado de un largo proceso de selección histórica, en el que ciertas turbinas con una particular geometría han resultado ser aquellas que optimizan el rendimiento para ciertas condiciones de operación.

La disponibilidad de manantiales, vertientes naturales o pozos con caudal reducido, pero con buena altura, propia de las zonas montañosas, origina una buena fuente de energía hidráulica, ideal para el accionamiento continuo de microturbinas.

La potencia teórica está dada por el producto de la altura y el caudal y si bien puede ser pequeña, el hecho de funcionar las 24 horas le permite acumular sobre un sistema de baterías y convertir esa pequeña potencia continua en otra instantánea capaz de absorber picos de 10 veces más potencia. Una microturbina de 0,5 HP, puede entregar mensualmente más de 250 KWh, suficiente para una familia tipo y esa potencia se puede lograr con un manantial de 1 litro por segundo y 80 metros de altura.

En este caso se trata de una instalación de agua corriente, que a diferencia de las de embalse, no requieren obras civiles de importancia.

Otra fuente pueden ser arroyitos con caudal bastante mayor, pero poca diferencia de altura. Para el caso anterior deberá cumplirse que siempre el caudal por altura sea constante, es decir:

El generador eléctrico es del mismo tipo que en los Aerogeneradores, un simple motor jaula de ardilla.

En cuanto se refiere a la Microturbina para los equipos chicos, usamos rueda Pelton o Turgo dependiendo de las características de altura /caudal. Dada la extensa variedad de

combinaciones que pueden llegar a obtenerse, es necesario contar con los datos básicos de disponibilidad de recursos versus consumo energético previsto.

Los elementos necesarios para una central hidroeléctrica son [19]:

Generador

El generador es el componente que, tomando energía mecánica del eje de la turbina, entrega energía eléctrica para su utilización en la red. El principio general de funcionamiento de los generadores se encuentra en el movimiento relativo y la interacción de un lazo conductor y un campo magnético. Al ser máquinas rotativas, el movimiento entre ambas partes es circular. El elemento del generador que produce el campo magnético se denomina Inductor. El otro componente, en el cual se origina la energía eléctrica que será entregada a la red es el Inducido. El campo puede ser un juego de uno o varios imanes permanentes adecuadamente montados en la máquina, o bobinados inductores, denominados Bobinado de Campo o Bobinado Inductor.

Regulador

La carga eléctrica de cualquier sistema demanda que las condiciones de la energía recibida, tanto en frecuencia como en voltaje, sean estables dentro de ciertos límites. Cuando la carga eléctrica de la red se incrementa o disminuye, origina en el eje de la turbina una variación en la velocidad. Si la carga aumenta, la velocidad tiende a disminuir y viceversa. Si estas variaciones de la velocidad no son controladas, entonces ni la tensión ni la frecuencia de la energía generada serán estables. Se apartarán fuera de los límites establecidos como aceptables por la red. Básicamente existen dos sistemas de control y algunas combinaciones de éstos. Pueden ser tan sencillos como un control manual de una válvula al ingreso de la turbina, o tan complejo como controles electrónicos accionando componentes electromecánicos de control del flujo de agua y de la tensión del sistema eléctrico [22].

Tendido eléctrico

Pertenece a la etapa en que se transmite la energía eléctrica hacia la zona donde se requiere abastecer de energía eléctrica a partir del lugar donde se instalan las centrales.

Turbinas Hidráulicas.

La turbina es uno de los elementos de una Central Hidroeléctrica de los cuales depende en mayor parte el rendimiento y el buen servicio de la misma. Es un mecanismo encargado de transmitir la energía mecánica del agua a los generadores que la transformarán en energía eléctrica. Para la selección de la turbina es necesario tener en cuenta la altura de líquido, el caudal y el tipo de microturbina.

Las turbinas tienen generalmente elementos fijos y de regulación que dirigen el agua hacia una rueda móvil cuya potencia mecánica se transmite a un eje motor, en el generador, el cual transforma la energía.

Una turbina hidráulica es una turbomáquina motora hidráulica, que aprovecha la energía de un fluido que pasa a través de ella para producir un movimiento de rotación que, transferido mediante un eje, mueve directamente una máquina o bien un generador que transforma la energía mecánica en eléctrica así son el órgano fundamental de una central hidroeléctrica.

Las turbinas hidráulicas, junto con los molinos de viento, son las turbomáquinas más antiguas que existen. Se puede explicar su antigüedad por la gran disponibilidad geográfica de las cuencas hidrológicas.

La energía hidráulica aprovecha el paso del agua continuo de un río para generar energía eléctrica. Se consigue por la diferencia de altura del agua que existe entre dos puntos diferentes.

La energía hidráulica es renovable e inagotable ya que proviene de la energía que llega a nuestro planeta Tierra de forma continua desde el Sol. Es una energía de tipo solar. El calor del Sol calienta y evapora el agua de los mares y ríos. El vapor producido forma las nubes que, en parte, descargan agua sobre la tierra. Agua que provocará los ríos de los que se aprovechará su energía potencial con la energía hidráulica. El Sol tiene mucho que ver en el ciclo del agua.

Producir electricidad con energía hidráulica proporciona mayor cantidad de kilowatts que los sistemas convencionales. Sin embargo produce gran impacto en el medio ambiente ya que un embalse tiene que construirse en la vega del río. Esto conlleva el cambio de hábitat, la pérdida de tierra y la más que segura emigración de los habitantes de esa cuenca. No obstante la energía microhidráulica permite un desarrollo sostenible sin

demasiados efectos negativos a tener en cuenta. En comparación con las demás, la energía minihidráulica ocasiona impacto ambiental menor.

La energía microhidráulica se genera a partir de una instalación de una pequeña presa, que no siempre es necesaria.

Normalmente son instalaciones pequeñas que empezaron a construirse a principios del siglo XX y que proporcionaban luz a poblaciones pequeñas.

Clasificación.

Por ser turbomáquinas siguen la misma clasificación de estas, y pertenecen, obviamente, al subgrupo de las turbomáquinas hidráulicas y al subgrupo de las turbomáquinas motoras. En el lenguaje común de las turbinas hidráulicas se suele hablar en función de las siguientes clasificaciones:

Tamaño de Central.

Las centrales de turbinas hidráulicas se pueden clasificar según el tamaño de la central y de la potencia generada por estas, se clasifican en:

Central Hidráulica:

Son grandes centrales de generación eléctrica, las cuales necesitan la construcción de una presa. La potencia de generación va desde los 10 MW, llegando incluso hasta los 14.000 MW como en Paraguay y Brasil donde se encuentra la segunda mayor central hidroeléctrica del mundo.

Central Minihidráulica:

La instalación de una minicentral hidroeléctrica, puede ser con la construcción de una presa, o bien de aguas pasantes, es decir, se genera electricidad con el paso continuo del agua, sin necesidad de construir una presa, la potencia que estas pueden llegar a desempeñar, varía entre los 100 KW hasta los 10 MW.

Central Microhidráulica:

No necesita construir una presa. Esta es la opción más viable para las economías domésticas por ser la más barata y para todos los bolsillos. Y además la más respetuosa con su entorno natural y el medioambiente. Puede incluso instalarse sin que exista un río

caudaloso. Únicamente se necesita un pequeño cauce de agua. Las microturbinas alcanzan una potencia de hasta los 100 KW.

Entrada de Agua Respecto al Eje

Turbinas Radiales.

Son las turbinas en que el agua que inciden sobre los álabes del rodete, fluye de forma radial, respecto al eje.

Conviene hacer la observación de que tal proyección, puede ser centrípeta o centrífuga, según que los chorros de agua se acerquen o se alejen del eje de la turbina.

A esta clasificación pertenecen determinados tipos de turbinas Francis de velocidad específica muy lenta, o instaladas con el eje en posición horizontal. Siempre que se trata de turbinas Francis, la proyección es centrípeta.

Turbinas Axiales.

Son las turbinas en que la dirección de la proyección de los chorros de agua, sobre los álabes del rodete es paralela al eje de rotación. En esta clasificación se incluyen las turbinas de hélice y Kaplan.

Turbinas radiales-axiales.

Reciben esta denominación, las turbinas en las que la incidencia de las masas de agua, hacia el rodete, se inicia en dirección radial, cambiando, posteriormente, a una dirección paralela al eje, como resultado del desplazamiento del fluido a través de los álabes de aquel. También son conocidas como turbinas mixtas.

Un ejemplo claro, perteneciente a esta clasificación, lo constituyen la mayoría de las turbinas Francis de eje vertical.

Turbinas tangenciales.

Se pueden considerar como una variante de las turbinas radiales de modo que la proyección del chorro de agua, contra el rodete, es tangencial o casi tangencial sobre la periferia del mismo. Las turbinas Pelton, son un ejemplo patente de turbinas tangenciales.

La figura 1-C, muestra un esquema del rodete y entrada de agua:

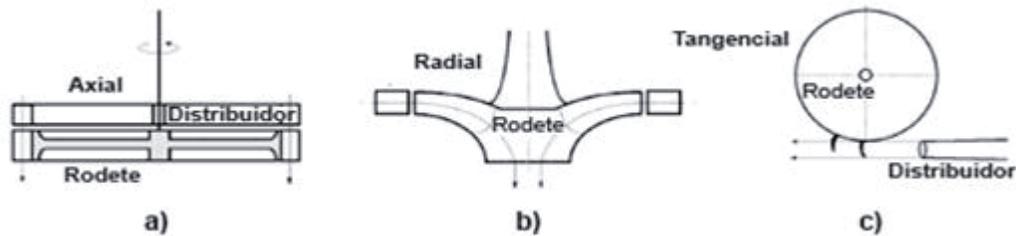


Figura 1-C: Clasificación turbinas: a) Turbina axial, b) Turbina radial, c) Turbina tangencial.

Cambio de Presión en el Rodete.

Según el cambio de presión en el rodete de la turbina y el análisis de fuerzas, tenemos turbinas del tipo:

Turbinas de acción.

Se entiende como turbinas de acción, a las turbinas en las que el sentido de la proyección del chorro de agua y el sentido de giro del rodete coinciden, en el punto de empuje o choque del agua sobre los álabes del mismo.

En el rodete, la velocidad de salida del agua es prácticamente igual a la de entrada, por lo que, al no ser apreciables las pérdidas de carga, la potencia transmitida a éste es función exclusivamente de la energía potencial o, lo que es lo mismo, del salto existente. Por consiguiente, se deduce que la energía cinética, originada por el desplazamiento del agua, es cedida íntegramente al rodete.

Estas fueron las primeras turbinas que se utilizaron, sin embargo el desarrollo y el empleo de estas turbinas no empieza hasta la mitad del siglo XIX, primero se empleó la denominada rueda tangencial introducida por el ingeniero suizo Zuppinger en 1846, que bajo las formas modificadas de hoy se conoce como rueda Pelton, es importante anotar que son muy eficientes, el rendimiento de las ruedas tangenciales ha llegado hasta 95%.

En la turbina Pelton, el agua tiene una presión muy alta. La válvula de aguja, que se usa para controlar el flujo de agua, deja pasar un chorro de agua que choca con los álabes de la turbina transfiriéndole su energía y haciendo girar la turbina. Esta, a su vez, hace girar un generador que está acoplado al eje de la turbina para producir energía eléctrica, como medida de seguridad se usa una válvula esférica.

Turbinas de Reacción

En ellas la entrada a la turbina ocurre simultáneamente por múltiples compuertas de admisión dispuestas alrededor de la rueda de álabes, la presión es más baja, y el trabajo se ejerce sobre todos los álabes simultáneamente para hacer girar la turbina y el generador.

En las turbinas de reacción cada una de las láminas de fluido que se forman, después de pasar el agua a través de las palas fijas y directrices, no se proyectan hacia los álabes del rodete de manera frontal, sino que, más bien, se trata de un deslizamiento sobre los mismos, de tal modo que el sentido de giro del rodete no coincide con la dirección de entrada y salida del agua.

El agua, en su recorrido entre los álabes del rodete cambia de dirección, velocidad y presión. Todo ello, provoca una reacción en el rodete, dando origen a la potencia producida en la turbina, cuyo valor, paradójicamente está en función de la carga perdida por el líquido en su desplazamiento. Como ejemplos de turbinas de reacción, están las Francis y Kaplan.

Tratándose de turbinas grandes, las de reacción suelen ser de mayor rendimiento que las de acción, ocurriendo lo contrario en el caso de turbinas pequeñas. Ahora bien, estableciendo la comparación para una misma potencia e igual altura de salto, una turbina de reacción puede girar a mayor velocidad específica que una de acción, proporcionando mayor rendimiento la primera.

La clasificación de turbinas de acción y de reacción, se sigue manteniendo dada su amplia divulgación a lo largo del tiempo. Podemos identificar a las primeras, como turbinas en las que, cada chorro de agua, tiene su superficie libre sometida a la presión atmosférica en su trayecto hacia el rodete, mientras que, en las segundas, el agua llena por completo los conductos que forman los álabes, originándose variaciones de presión, de tal modo que esta, a la entrada del rodete, es mayor que la presión atmosférica, ocurriendo lo contrario a la salida, debido a la actuación del tubo de aspiración en el que, en su recorrido final, el agua alcanza el valor de la presión atmosférica. Razón de los nombres de turbinas de presión y de sobrepresión.

Para clasificar a una turbina dentro de esta categoría se requiere calcular el grado de reacción de la misma. Las turbinas de acción aprovechan únicamente la velocidad del

flujo de agua, mientras que las de reacción aprovechan además la pérdida de presión que se produce en su interior

De acuerdo al diseño del rodete

Esta clasificación es la más determinista, ya que entre las distintas de cada género las diferencias sólo pueden ser de tamaño, ángulo de los àlabes o cangilones, o de otras partes de la turbomáquina distinta al rodete. Los tipos más importantes son:

Turbinas Pelton.

Las turbinas Pelton, se conocen como turbinas de presión, por ser ésta constante en la zona del rodete, de chorro libre, de impulsión, o de admisión parcial por ser atacada por el agua sólo una parte de la periferia del rodete. Directamente de la evolución de los antiguos molinos de agua Así mismo entran en la clasificación de turbinas tangenciales y turbinas de acción.

Su utilización es idónea en saltos de gran altura y caudales relativamente pequeños.

Por razones hidroneumáticas, y por sencillez de construcción, son de buen rendimiento para amplios márgenes de caudal, entre 30 % y 100 % del caudal máximo. Por ello se colocan pocas unidades en cada central que requiere turbinas de estas características. Pueden ser instaladas con el eje en posición vertical u horizontal.

Distribuidor de una turbina Pelton.

Está constituido por uno o varios equipos de inyección de agua, tiene como misión dirigir, convenientemente, un chorro de agua, cilíndrico y de sección uniforme, que se proyecta sobre el rodete, así como también, regular el caudal preciso que ha de fluir hacia dicho rodete, llegando a cortarlo totalmente cuando proceda .

El número de equipos de inyección, colocados circunferencialmente alrededor de un rodete, depende de la potencia y características del grupo, según las condiciones del salto de agua. Así mismo, se puede disponer de más de un rodete en el mismo eje, cada uno de ellos dotado del distribuidor apropiado.

Hasta seis suelen ser los equipos que proyectan chorros de agua sobre un mismo rodete, derivando todos y cada uno de ellos de la tubería forzada. Dicho número de equipos de inyección, se instala en turbinas Pelton con eje vertical, siendo, normalmente, uno o dos inyectoros los instalados cuando la disposición del eje es horizontal.

Para mejor comprensión, a continuación se describen los elementos que forman un solo equipo de inyección, mediante el cual se obtiene un chorro de agua. Estos elementos son:

Rodete de una turbina Pelton.

Es la pieza clave donde se transforma la energía hidráulica del agua, en su forma cinética, en trabajo según la forma de movimiento de rotación. Está unido rígidamente al eje, montado en el mismo por medio de chavetas y anclajes adecuados. Su periferia está mecanizada apropiadamente para ser soporte de los denominados cangilones.

La figura 2-C, muestra un rodete de una turbina tipo Pelton



Figura 2-C: Rodete de una turbina Pelton.

Principio de funcionamiento de las turbinas Pelton.

La energía potencial gravitatoria del agua embalsada, o energía de presión hasta los orificios de las toberas, se convierte, prácticamente sin pérdidas, en energía cinética, al salir el agua a través de dichos orificios en forma de chorros libres, a una velocidad que corresponde a toda la altura del salto útil, estando referida ésta, para el caso concreto de las turbinas Pelton, al centro de los chorros considerados.

Se dispone de la máxima energía cinética en el momento en que el agua incide tangencialmente sobre el rodete, empujando a los cangilones que lo forman, obteniéndose el trabajo mecánico deseado.

Las formas cóncavas de los cangilones hacen cambiar la dirección del chorro de agua, saliendo éste, ya sin energía apreciable, por los bordes laterales, sin ninguna incidencia posterior sobre los cangilones sucesivos. De este modo, el chorro de agua transmite su energía cinética al rodete, donde queda transformada instantáneamente en energía mecánica.

La válvula de aguja, gobernada por el regulador de velocidad, cierra más o menos el orificio de salida de la tobera, consiguiendo modificar el caudal de agua que fluye por ésta, al objeto de mantener constante la velocidad del rodete, evitándose el embalamiento o reducción del número de revoluciones del mismo, por disminución o aumento respectivamente de la carga solicitada al generador.

La arista que divide a cada cangilón en dos partes simétricas, corta al chorro de agua, seccionándolo en dos láminas de fluido, teóricamente del mismo caudal, precipitándose cada una hacia la concavidad correspondiente. Tal disposición permite contrarrestar mutuamente los empujes axiales que se originan en el rodete, equilibrando presiones sobre el mismo, al conseguir cambiar, simétrica y opuestamente, los sentidos de ambas láminas de agua.

Turbina Crossflow

La turbina Crossflow es una turbina radial de acción y con admisión de flujo parcial. El agua entra a través de la tubería de carga, dividiéndose el flujo en dos cámaras espirales para su posterior entrada al rodete, lo que sirve para regular el caudal de entrada y conseguir un rendimiento óptimo para caudales variables. El flujo incide tangencialmente sobre los álabes del rodete, cambiando su dirección radial al paso del mismo y cayendo posteriormente al tubo de aspiración por gravedad. Este tipo de turbinas son de eje horizontal y según su velocidad específica se clasifican como turbinas de “rotación lenta”. La figura 3-C muestra un esquema de la entrada de agua de una turbina Crossflow.

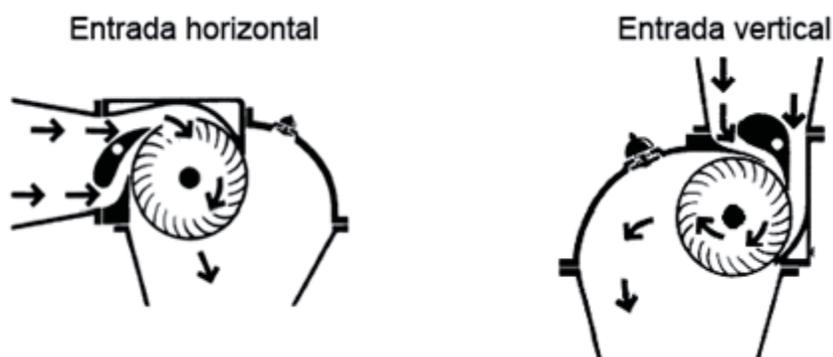


Figura 3-C: Entrada de agua turbina Crossflow.

Si el caudal es variable se equipa la turbina Crossflow con dos cámaras de tamaño diferentes. Normalmente se divide el flujo en la proporción 1:2, la cámara de menor

diámetro trabaja con caudales pequeños, y la más grande con caudales medianos. Las dos juntas trabajan con el caudal máximo para el que se dimensionó la turbina. Con este reparto se consigue un aprovechamiento y rendimiento óptimo para caudales variables, desde el caudal máximo hasta una sexta parte de este. De esta manera las turbinas Crossflow obtienen una mayor eficacia en aprovechamientos con caudales muy fluctuantes, consiguiendo rendimientos muy elevados, por encima incluso del 85%.

En la práctica este tipo de flujo de agua tiene un efecto autolimpiador en el rodete. La suciedad que ha entrado con el agua, se extrae por si sola una vez que el rodete ha dado un giro de 180°, por fuerza centrífuga y es arrastrada por la corriente hacia fuera y devuelta al río.

El rendimiento general de turbinas Crossflow es de un 84% en potencias y saltos pequeños en todo el margen de caudales y de hasta un 87% tanto en saltos grandes, como en potencias y saltos medianos o grandes.

Turbinas con rendimientos muy altos durante épocas de carga máxima y rendimientos muy bajos con caudales escasos, reducen la producción anual considerablemente en ubicaciones donde los caudales son variables. Sin embargo, la turbina Crossflow, obtiene un mayor rendimiento debido a su curva más plana, en la que el rendimiento es constante hasta aproximadamente el 16% del caudal nominal [23].

Sistema de alabes guía

En la turbina Crossflow se regula la entrada de agua al final de cada cámara con dos válvulas perfiladas que reparten y equilibran el chorro de agua para que incida con la dirección óptima en los álabes de la turbina. Las dos válvulas giratorias están integradas con precisión en la carcasa de la turbina.

Las dos válvulas de regulación están equipadas independientemente con un brazo conectado a un dispositivo de regulación automático o manual. Están colocadas sobre unas cápsulas autoengrasantes y no requieren ningún mantenimiento. Estos brazos disponen de unos contrapesos que al dejarse caer por gravedad, provocan un cierre de emergencia en el caso de necesidad de parada.

El Rodete

Se trata de la pieza más significativa de esta turbina. Está equipado con una serie de álabes de acero perfectamente pulido. Estos están anclados a unos discos finales que a

su vez están soldados al propio rodete mediante un proceso especial. Dependiendo de su tamaño, el rodete puede tener hasta 37 álabes. El perfil curvado de estos álabes, hace que se produzca una fuerza axial limitada, de forma que se puede prescindir de un eje axial reforzado, con su complicada fijación y el engrase necesario.

En rodetes anchos los álabes son reforzados con varios discos. Antes del montaje final se equilibran los rodetes cuidadosamente y se realiza un control defectoscópico.

El Eje.

Las turbinas Crossflow están equipadas con un eje horizontal anclado bilateralmente a dos cojinetes de empuje que absorben todos los esfuerzos axiales derivados de la turbina, para posteriormente transmitirlos a la cimentación. Estos cojinetes son basculantes y tienen un sistema de equilibrado que brinda unas ventajas importantes. Destaca sobre todo una resistencia a la rotación del eje mínima y un mantenimiento fácil. Los cojinetes están formados por patines lijados manualmente para conseguir una superficie totalmente lisa que facilite el funcionamiento del equipo. Estos patines están inmersos en una fina capa de aceite a presión que sirve para engrasar el mecanismo y que además es la que transmite los esfuerzos desde la parte móvil, eje, a la fija, cojinete.

Entre los patines hay una serie de juntas por las que circula agua como sistema de refrigeración, ya que se llegan a alcanzar elevadas temperaturas debido a los efectos de fricción. La construcción de la carcasa del cojinete evita la entrada del agua y su contacto con las sustancias de engrase, lo que es imprescindible para el buen funcionamiento de este.

Al mismo tiempo el rodete está centrado en el eje, y por tanto, entre ambos cojinetes. Además está integrado en la carcasa de la turbina, lo que permite la extracción del rodete sin necesidad de desmontar la turbina entera.

Tubo de Aspiración

Estas turbinas también son denominadas turbinas de “chorro libre”. Debido a que a la salida del rodete, el agua todavía tiene energía aprovechable, en saltos pequeños y medianos no podemos prescindir de un tubo de aspiración, que sirve para evitar inundaciones en la sala de máquinas y para la obtención del máximo aprovechamiento de la altura de salto.

En una turbina de chorro libre con un rango de caudales amplio, la columna de agua que llega al tubo de aspiración, debe ser regulable. Esto se consigue a través de una válvula de ventilación que influye en la depresión dentro de la carcasa de la turbina. Esta ventilación resulta imprescindible, ya que al pasar del rodete al tubo de aspiración, el flujo de agua disipa parte de su energía de presión, y si esta llega a ser menor que la presión de vapor de agua se produce la cavitación donde forman burbujas de aire que al llegar a tramos en el que la presión es más elevada implosionan produciéndose turbulencias muy desfavorables para las conducciones del fluido.

De esta manera se pueden aprovechar de forma óptima turbinas con alturas de aspiración de entre 1 y 3 metros sin el peligro de que aparezca cavitación. La construcción de un tubo de aspiración en forma de un conducto guía en acero reduce de forma importante los costes de construcción de la base en centrales de poco salto y puede convertir en rentable un proyecto económicamente problemático.

Características de funcionamiento

Las turbinas Crossflow no producen cavitación. Con ello se evita la construcción de un rodete por debajo del nivel de agua con sus desventajas constructivas, económicas y de funcionamiento.

Para saltos de hasta 90 m se utiliza acero al carbono para su construcción. Para saltos de entre 90 m y 120 m se fabrica el rodete de acero inoxidable. Para saltos superiores a 120 m toda la turbina se construye de acero inoxidable.

Las revoluciones de trabajo de las turbinas Crossflow suelen ser un 2,3 de las revoluciones nominales. Esto permite la utilización de generadores de fabricación en serie.

Turbinas Francis.

Son conocidas como turbinas de sobrepresión por ser variable la presión en las zonas del rodete, o de admisión total ya que éste se encuentra sometido a la influencia directa del agua en toda su periferia. También se conocen como turbinas radiales y turbinas de reacción.

El campo de aplicación es muy extenso, dado el avance tecnológico conseguido en la construcción de este tipo de turbinas. Pueden emplearse en saltos de distintas alturas dentro de una amplia gama de caudales.

Consideraremos la siguiente clasificación, en función de la velocidad específica del rodete, cuyo número de revoluciones por minuto depende de las características del salto [24].

Rodetes normales: Se caracterizan porque el diámetro del rodete es ligeramente superior al del tubo de aspiración. El agua entra en el rodete radialmente y sale de él axialmente, entrando así en el tubo de aspiración. El valor del ángulo de entrada es del orden de 90° , y se alcanzan entre 125 y 200 rpm.

Rodetes lentos: Se utilizan en los grandes saltos, sobre 200 m, con ellos se tiende a reducir el número de revoluciones, lo cual supone un aumento del diámetro del rodete respecto al del tubo de aspiración. El ángulo a la entrada de agua y su número de revoluciones específico está comprendido entre 50 y 100. En estas turbinas se obtienen velocidades tangenciales reducidas. Los álabes tienen forma especial, aumentando su espesor a fin de que su cara posterior guíe mejor el chorro que atraviesa el rodete deslizándose en contacto con las paredes de los álabes, ya que de no ser así el chorro se despegaría de la cara posterior de los mismos, originando remolinos.

Rodetes rápidos: Permiten obtener elevadas velocidades de rotación para valores comprendidos entre 225 y 500 rpm. El diámetro del rodete es menor que el del tubo de aspiración y el cambio de dirección del agua se efectúa más bruscamente que en las turbinas normales, se usa para alturas inferiores a 20 m.

Las turbinas Francis, son de rendimiento óptimo, pero solamente entre unos determinados márgenes, para 60 % y 100 % del caudal máximo, siendo una de las razones por la que se disponen varias unidades en cada central, al objeto de que ninguna trabaje, individualmente, por debajo de valores del 60 % de la carga total.

Al igual que las turbinas Pelton, las turbinas Francis pueden ser instaladas con el eje en posición horizontal o vertical, siendo esta última disposición la más generalizada por estar ampliamente experimentada, especialmente en el caso de unidades de gran potencia.

La figura 4-C muestra un esquema de turbina tipo Francis.

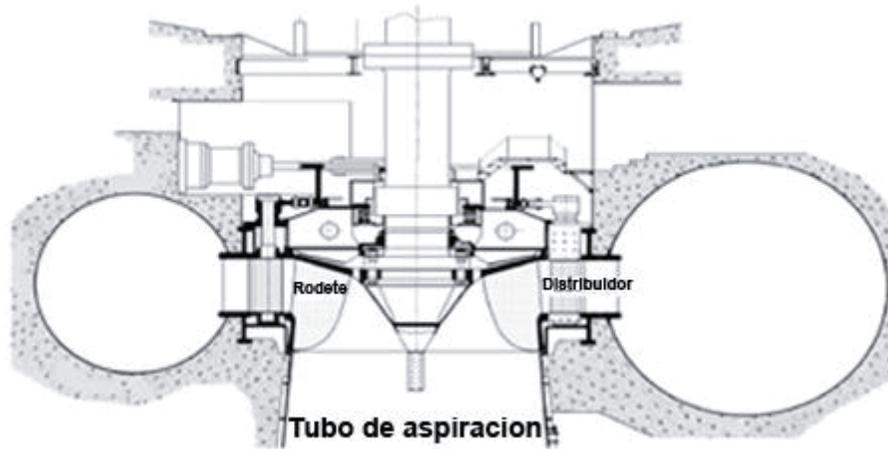


Figura 4-C: Turbina tipo Francis

Los componentes fundamentales para una turbina tipo Francis, considerando como referencia el sentido de circulación del agua por la turbina, tenemos:

Cámara espiral de una turbina Francis.

Aunque existen varios diseños de cámaras, las cámaras espirales son las de instalación más frecuente.

Está constituida por la unión sucesiva de una serie de argollas tronco-cónicas, cuyos ejes respectivos forman una espiral. Desde el acoplamiento con la tubería forzada, donde el diámetro interior de la virola correspondiente alcanza su valor máximo. La sección interior, circular en la mayoría de los casos, va decreciendo paulatinamente hasta la virola que realiza el cierre de la cámara sobre sí misma, cuyo diámetro interior se reduce considerablemente. Esta disposición se conoce como el caracol de la turbina, en el que, debido a su diseño, se consigue que el agua circule con velocidad aparentemente constante y sin formar torbellinos, evitándose pérdidas de carga.

En la zona periférica interna, totalmente concéntrica con el eje de la turbina, y siguiendo planos paralelos, perpendiculares a dicho eje, se encuentra una abertura circular, formando un anillo, cuyos extremos están enlazados perpendicularmente por una sucesión de palas fijas, situadas equidistantemente unas de otras, a lo largo del contorno de la circunferencia descrita por dicho anillo, a través del cual, y por toda su periferia, fluirá el agua, cubriendo la totalidad de los orificios así formados. La zona mencionada, se suele denominar ante distribuidor o anillo traviesa.

Dada la curvatura y orientación de las palas fijas, se consigue que la proyección del agua salga dirigida casi radialmente, hacia el centro del espacio circular limitado por el anillo mencionado.

Rodete de una turbina Francis.

Este está unido rígidamente a la parte inferior del eje de la turbina, en situación perfectamente concéntrica con el distribuidor, ocupando el espacio circular que éste delimita.

Consta de un núcleo central, alrededor del cual se encuentra dispuesto un número determinado de palas de superficie alabeada, aproximadamente entre 12 y 21, equidistantemente repartidas, formando una pieza única en bloque por fundición o soldadura. Las patas están unidas entre sí, por su parte externa inferior, mediante una llanta o banda que hace cuerpo con las mismas. Unos anillos de acero, colocados a presión sobre el núcleo y la llanta, perfectamente centrados, realizan el cierre hidráulico al girar muy próximos a los escudos superior e inferior respectivamente.

En la figura 5-C se muestra un rodete de turbina Francis.



Figura 5-C: Rodetes de turbinas Francis.

Estas palas, construidas de bronce o de aleaciones especiales de acero, para evitar corrosiones y cavitaciones, reciben el nombre de álabes del rodete, cuya longitud y mayor o menor inclinación, respecto al eje de la turbina, depende del caudal, de la altura del salto y, en consecuencia por diseño, de la velocidad específica.

Tubo de aspiración de una turbina Francis.

Consiste en una conducción, normalmente acodada, que une la turbina propiamente dicha con el canal de desagüe. Tiene como misión recuperar al máximo la energía cinética del

agua a la salida del rodete o, dicho de otra forma, aprovechar el salto existente entre la superficie libre del agua y la salida del rodete.

Un esquema de la aspiración de agua se muestra en la figura 6-C.

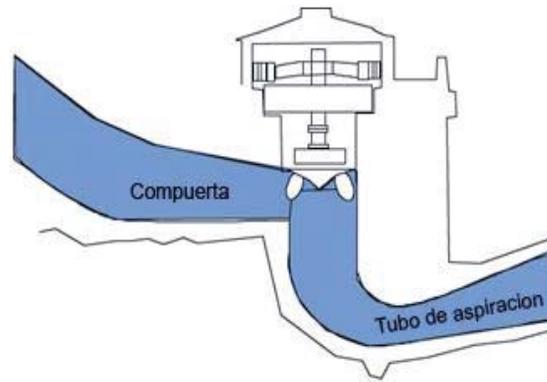


Figura 6-C: Tubo de aspiración en una turbina Francis de eje vertical.

En su inicio, partiendo de la unión circular con la turbina, se trata de un conducto metálico que, en la mayoría de los casos, va aumentando gradualmente de diámetro, tomando forma tronco-cónica, tramo conocido como cono de aspiración.

Sigue a continuación la zona acodada de la conducción, metálica o de hormigón, la cual, una vez rebasado el ángulo correspondiente, continúa con sección circular o puede hacer una transición a sección rectangular, en cuyo caso, la conducción es de hormigón hasta el final de la misma. En la parte inferior del codo, se dispone de colectores con rejillas para vaciado del tubo de aspiración.

En algunas turbinas, para conseguir un equilibrio de presiones, entre la parte inferior y superior del rodete, se establece una comunicación, entre ambas zonas, por medio de un conducto que, partiendo del cono de aspiración, permite el paso de agua. En dicho conducto se suele colocar una válvula conocida como válvula de compensación.

Turbinas Kaplan.

Al igual que las turbinas Francis, las de tipo Kaplan, son turbinas de admisión total, incluidas así mismo en la clasificación de turbinas de reacción. Las características constructivas y de funcionamiento, son muy similares entre ambos tipos.

Se emplean en saltos de pequeña altura, alrededor de 50 m. y menores, con caudales medios y grandes, aproximadamente de 15 m³/s en adelante.

Debido a su singular diseño, permiten desarrollar elevadas velocidades específicas, obteniéndose buenos rendimientos, incluso dentro de extensos límites de variación de caudal. A igualdad de potencia, las turbinas Kaplan son menos voluminosas que las turbinas Francis [24].

Normalmente se instalan con el eje en posición vertical, aunque se pueden ser colocadas de forma horizontal o inclinada.

Un montaje característico de este tipo de turbinas, conjuntamente con el alternador, constituye los llamados grupos bulbo, propios de las centrales mareomotrices; o los grupos pozo, utilizados para el máximo aprovechamiento de las corrientes de agua con muy poco salto. En ambas disposiciones, la cámara y el tubo de aspiración constituyen un solo conducto, pudiendo estar situado el eje del grupo en posición horizontal o inclinada.

Rodete

Se asemeja a la hélice de un barco, al estar formado por un número determinado de palas, de 2 a 4 para saltos de pequeña altura y de 5 e 9 cuando los saltos son mayores, dentro del campo de aplicación de las turbinas Kaplan.

La figura 7-C, muestra un diagrama del rodete de una turbina Kaplan.



Figura: Rotor de una turbina Kaplan.

Cuando las palas mencionadas mantienen una inclinación fija, por estar rígidamente unidas al núcleo del rodete, formando pieza única en un mismo bloque, por fundición, soldadura o acoplamiento mecánico, la turbina recibe el nombre de turbina de hélice, cuya instalación es recomendable en centrales que funcionan con salto y caudal casi constante y las cargas no sufren grandes variaciones.

Se recurre al procedimiento de acoplamiento mecánico, cuando las palas han de colocarse con la inclinación correcta en función de las pruebas hidráulicas que se realicen

durante el montaje, o por preverse su posible adaptación a nuevas condiciones de salto, caudales, etc.

Solamente se denominan turbinas Kaplan, cuando todas y cada una de las palas del rodete están dotadas de libertad de movimiento, pudiendo orientarse, dentro de ciertos límites, girando al uniformemente sobre sus asientos respectivos situados en el núcleo, llamado también cubo del rodete, según ejes radiales del eje de turbina, adoptando posiciones de mayor o menor inclinación respecto a este último, según órdenes recibidas del regulador de velocidad.

Tanto los rodetes de hélice como los Kaplan, se construyen a base de aleaciones especiales, tendiéndose, en la actualidad, al empleo del acero inoxidable, pues si bien su precio inicial puede ser elevado, queda amortizado, a lo largo del tiempo, al disminuir las reparaciones del deterioro ocasionado por los efectos nocivos de cavitación, etc, por tales razones, para la mayoría de los rodetes de cualquier tipo, hoy día se usa el acero inoxidable.

Las turbinas Kaplan se conocen también como turbinas de doble regulación, por intervenir el proceso, tanto sobre las palas del distribuidor, como sobre las del rodete, en base a una correspondencia o ley de conjugación entre posiciones de palas del rodete respecto de las del distribuidor, dependiendo de las condiciones de carga y del salto existente. Con este procedimiento se consiguen elevados rendimientos, incluso para cargas bajas y variables, así como en el caso de fluctuaciones importantes del caudal.

Las palas directrices del distribuidor, se gobiernan de forma análoga a como se realiza en las turbinas Francis. En algunos tipos muy avanzados de turbinas Kaplan, se ha llegado a prescindir del distribuidor, actuando la regulación solamente sobre las palas del rodete.