



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

ANÁLISIS CICLO VIDA Y ECONÓMICO APLICADO A LA REUTILIZACIÓN Y
RECICLAJE DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

JUAN PABLO ROMERO CAMPOS

PROFESOR GUÍA:
WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
GUSTAVO DÍAZ FERRAN
MANUEL DIAZ ROMERO
RUBÉN FERNÁNDEZ URRUTIA

SANTIAGO DE CHILE
2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO
POR: JUAN PABLO ROMERO CAMPOS
FECHA: 2019
PROF. GUÍA: WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ

ANÁLISIS CICLO VIDA Y ECONÓMICO APLICADO A LA REUTILIZACIÓN Y RECICLAJE DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS

La industria de las energías renovables en Chile en el contexto de la descarbonización de la matriz energética debido al actual cambio climático que sufre nuestro planeta, ha alcanzado una gran relevancia en los últimos cinco años en Chile, siendo la energía solar fotovoltaica una de las que lidera en el mercado, con cerca del 50 % de la producción renovable.

Pese a que el uso de estas energías renovables tiene el fin de generar menos desechos y emisiones, estas no están libres de la generación de desechos, siendo una de las problemáticas tanto a nivel nacional como mundial, el manejo de los desechos que producen las plantas solares una vez que han alcanzado su vida útil de aproximadamente 30 años. En particular, los paneles solares fotovoltaicos poseen una obsolescencia de no más de 15 años en la práctica, y hasta el momento no existen en Chile plantas tan longevas. Pero se pronostica que en un par de años más, este sea un problema para la industria, pues para consolidarse definitivamente como una alternativa de largo plazo, esta tecnología debe ser sustentable.

Con el fin de contribuir a la discusión de esta problemática, se realiza un estudio de análisis de ciclo de vida y un análisis económico para determinar el tiempo de utilización de un panel solar en una planta, además de analizar distintas formas de reciclaje y reutilización.

Los resultados muestran que, en la actualidad chilena, las mejores opciones de implementación son los métodos de reciclaje térmicos y químicos, en contraste con el método mecánico. Se cuantifica el impacto medio ambiental de cada uno de estos procesos, mostrando una disminución significativa de las emisiones de CO_2 .

Por otro lado, se determina el momento en el cual las emisiones de CO_2 son mínimas para el reciclaje de paneles, se desarrolla un caso real, obteniendo un tiempo aproximado de 15 años. Por otro lado, desde un punto de vista económico, se obtiene que es preferible realizar esta operación de recambio a partir del año 18, por lo que se identifica un trade off entre el ambiente y la economía.

Finalmente, con el fin de proponer alternativas a la discusión sobre el reciclaje de paneles solares en Chile, se da una primera apreciación al modelo de negocio de una empresa que se dedique a reciclar y reutilizar paneles solares en Chile, proporcionando un análisis financiero simplificado.

Dedicado a Ivonne Campos, Adriana Salas y Victor Campos y a todas las personas que me han apoyado a lo largo de mi vida, a las que fueron, están y vendrán.

Agradecimientos

Es imposible agradecer a todo el mundo que me ha ayudado en momentos claves de la vida para que yo haya llegado hasta aquí. Aun así, estas líneas tratan de alguna manera de hacer justicia a algunas personas de las cuales estoy profundamente agradecido.

Le agradezco a todos los amigos que he hecho a lo largo de todo mi paso por la universidad, algunos de los cuales están presentes aquí. Gracias por tantos buenos momentos que han sido fundamentales para sobre llevar la carga académica, aun cuando en estos últimos momentos he estado distante con algunos, no ha sido apropiado, sino por querer termina esta tesis. Le agradezco de manera especial a María Ignacia Reveco Diaz, por ser una gran amiga, una compañera, una aliada y cómplice. Sin tu ayuda no habría podido lógralo.

Le agradezco a todos los buenos profesores que he tenido, en particular a Williams Calderón, le agradezco todo lo que ha hecho por mí, desde permitirme ser auxiliar, armar mi propio tema de memoria, darme trabajo, y darme mucha flexibilidad y confianza para innovar.

Le agradezco a toda mi familia, por siempre estar en las buenas y en las malas, muy malas. Les agradezco infinitamente a todos, por siempre apoyarme. Y sobre todo le agradezco a mi madre, y mis abuelos.

Gracias madre por no permitirme repetir en kínder, gracias por llevarme a clases de diferencial en la mañana y clases regulares en la tarde, gracias por mandarme a estudiar a Santiago cuando te lo pedí, gracias por las monedas que me das para pagar la micro y por esperarme con un plato de comida cuando vuelvo a las 12 de la noche, aun cuando te pido que no lo hagas. Contigo tengo una deuda muy grande, que probablemente no podre pagar en el resto de mi vida.

Muchas Gracias.

Tabla de Contenido

Introducción	1
1. Antecedentes generales	3
1.1. La energía fotovoltaica	3
1.1.1. Composición de una célula fotovoltaica y funcionamiento.	6
1.1.2. Efecto fotovoltaico	7
1.2. Fin da la vida útil de los paneles solares: Degradación de paneles solares . .	10
1.3. Reciclaje y reutilización	12
1.3.1. Reciclaje y reutilización de paneles solares fotovoltaicos	13
1.3.2. Métodos mecánicos	14
1.3.3. Métodos térmicos	14
1.3.4. Métodos químicos	15
1.3.5. Reciclaje de paneles solare fotovoltaicos en el mundo	15
1.4. Análisis de ciclo de vida	18
1.4.1. Ejemplo y aplicación del análisis de ciclo de vida	19
1.4.2. Revisión análisis de ciclo de vida	20
2. Metodología	21
2.1. Comparación de métodos de reciclaje	22
2.2. Momento óptimo medio ambiental para el reciclaje y la reutilización	24
2.2.1. Metodología para el momento óptimo medio ambiental para el reciclaje y la reutilización	25
2.3. Momento óptimo de reciclaje desde el punto de vista económico	27
2.3.1. Pasos que se deben seguir para calcular el punto de reemplazo óptimo privado	28
2.4. Modelo de negocios para la factibilidad técnica y financiera a de una empresa que se dedica a reciclar paneles solares fotovoltaicos.	29
2.4.1. Estudio de mercado	29
2.5. Evaluación Económica del Modelo de Negocios	29
2.5.1. Análisis de Sensibilidad	30
3. Comparativa de medios de reciclaje.	31
3.1. Estado del arte de reciclaje de paneles solares	31
3.2. Unidad funcional	33
3.3. Método mecánico	34
3.3.1. Límites	34

3.3.2.	Inventario de ciclo de vida	36
3.3.3.	Resultados y análisis de resultados	37
3.4.	Método térmico	41
3.4.1.	Límites	41
3.4.2.	Inventario de ciclo de vida	42
3.4.3.	Resultados y análisis de resultados	43
3.5.	Método termoquímico	46
3.5.1.	Límites	46
3.5.2.	Inventario de ciclo de vida	47
3.5.3.	Resultado y análisis de resultados	48
3.6.	Resumen global	52
4.	Tiempo óptimo de reciclaje de paneles solares según su impacto medio ambiental	53
4.1.	Definición de paneles y ubicación	53
4.1.1.	Generación de energía de 1000 Kg de Pv en el norte grande de Chile .	56
4.2.	Modelamiento de la producción energética con degradación a lo largo del tiempo	58
4.2.1.	Degradación lineal (Base rate)	58
4.2.2.	Degradación exponencial (Base rate)	59
4.2.3.	Degradación JPL (Base rate)	60
4.2.4.	Degradación lineal (rate aumentado)	61
4.2.5.	Degradación exponencial (rate aumentado)	62
4.2.6.	Degradación JPL (Typical rate)	63
4.2.7.	Resumen de la energía producida después de 30 años	64
4.3.	Modelamiento	65
4.3.1.	Límite mecánico	66
4.3.2.	Límite térmico	67
4.3.3.	Límite químico	68
4.4.	Resultados y discusión	69
5.	Tiempo óptimo de reemplazo de paneles solares según la economía	71
5.1.	Costo de ciclo de vida	72
5.1.1.	Costos de ciclo de vida resultados y discusión	73
5.2.	Resultados CAUE	75
5.2.1.	Análisis de sensibilidad y discusión	76
6.	Modelo de negocios para el reciclaje de paneles solares	77
6.1.	Propuesta de valor y descripción del modelo de negocios	78
6.1.1.	Demanda	80
6.1.2.	Relación con el cliente y segmento	81
6.1.3.	Fuente de ingresos	82
6.1.4.	Actividades claves	83
6.1.5.	Recursos claves y asociaciones claves	84
6.1.6.	Canales	85
6.2.	Análisis financiero	86
6.2.1.	Estimación de la demanda	86
6.2.2.	Inversión	86

6.2.3. Ingresos	90
6.3. Análisis de sensibilidad	96
Conclusión	97
6.4. Comparativa de medios de reciclaje	97
6.5. Tiempo óptimo de reciclaje de paneles solares según su impacto medio ambiental	98
6.6. Tiempo óptimo de reemplazo de paneles solares según la economía	99
6.7. Modelo de negocios para el reciclaje de paneles solares	100
bibliografía	100

Índice de Tablas

1.1. Plantas fotovoltaicas más importantes en Chile	4
3.1. Tabla resumen estado del arte reciclaje de paneles solares	32
3.2. Unidad funcional [23]	33
3.3. Inventario de flujos de entrada y salida, proceso mecánico.	36
3.4. Inventario de flujos de entrada y salida, proceso térmico	42
3.5. Inventario de flujos de entrada y salida, proceso térmico	47
3.6. Resumen global capítulo 3	52
4.1. Energía producida luego de 30 aplicando degradación	64
5.1. Resumen del estado valores económicos	72
5.2. Análisis de sensibilidad momento óptimo de reemplazo	76
6.1. Principales empresas con portafolio fotovoltaico en Chile.	80
6.2. Cuadro de inversión inicial	87
6.3. Préstamo con garantía Corfo	88
6.4. Costos Fijos	89
6.5. Costos Variables	89
6.6. Estructura de ingresos	90
6.7. Flujo de caja con 100 % de financiamiento propio parte 1	91
6.8. Flujo de caja con 100 % de financiamiento propio parte 2	92
6.9. Flujo de caja con financiamiento parte 1	94
6.10. Flujo de caja con financiamiento parte 2	95
6.11. Análisis de sensibilidad 100 % de patrimonio propio	96
6.12. Análisis de sensibilidad 50 % de patrimonio propio	96

Índice de Ilustraciones

1.1. Matriz energética de Chile mayo 2019 [3].	3
1.2. Ajuste de la curva exponencial de la proyección de la relación peso / potencia del panel fotovoltaico t/MW [46]	5
1.3. Esquema de un panel solar [8]	5
1.4. Esquema célula solar con sus componentes principales [15]	7
1.5. Esquema celula solar [8]	7
1.6. Circuito equivalente de una celda solar [26]	8
1.7. Curva intensidad vs Voltaje [26]	9
1.8. Esquema general del reciclaje de paneles solares (Propio).	13
1.9. Volúmenes anuales y acumulados de residuos del módulo fotovoltaico EOL de China en 2005-2034 [48].	16
1.10. Volúmenes anuales y acumulados de residuos del módulo fotovoltaico EOL de Estados Unidos en 2016-2050 [46].	16
1.11. Esquema fases del análisis ciclo vida [38]	18
1.12. Esquema del análisis de ciclo de vida de un automóvil [47]	19
2.1. Esquema general de la metodología para comparar distintos métodos de reciclaje.	23
2.2. Como manejar los desechos [46]	25
2.3. Esquema general de la metodología para determinar un momento óptimo de reemplazo	26
2.4. Esquema del costo de ciclo de vida básico de una planta solar fotovoltaica.	27
3.1. Esquema general de los límites y procesos para el análisis de ciclo de vida para la tecnología mecánica.	34
3.2. Kg de CO_2 equivalente generado por el proceso mecánico de reciclaje.	37
3.3. Kg SO_2 equivalente generado por el proceso mecánico de reciclaje.	38
3.4. Eutrofización del agua fresca en Kg de P (Fosforo) equivalente por el proceso mecánico.	39
3.5. Agotamiento de la capa de ozono en Kg de CFC (Cloruro Floro Carbono) equivalente para el proceso mecánico.	39
3.6. Agotamiento de energía fósil en Kg de Oil equivalente en el proceso mecánico.	40
3.7. 1,4DB Toxicidad humana en Kg de 1,4 dichlorobenzene para el proceso mecánico.	40
3.8. Esquema general de los límites y procesos para el análisis de ciclo de vida para la tecnología térmico.	41
3.9. Kg de CO_2 equivalente generado por el proceso térmico de reciclaje.	43
3.10. Kg SO_2 equivalente generado por el proceso térmico de reciclaje.	44

3.11. Eutrofización del agua fresca en Kg de P (Fosforo) equivalente por el proceso térmico.	44
3.12. Agotamiento de la capa de ozono en Kg de <i>CPC</i> (Cloruro Floro Carbono) equivalente para el proceso térmico.	45
3.13. 1,4 <i>DB</i> Toxicidad humana en Kg de 1,4 dichlorobenzene para el proceso térmico.	45
3.14. Esquema general de los límites y procesos para el análisis de ciclo de vida para la tecnología termo químico.	46
3.15. Kg de CO_2 equivalente generado por el proceso termo químico de reciclaje.	48
3.16. Kg SO_2 equivalente generado por el proceso térmico de reciclaje.	48
3.17. Eutrofización del agua fresca en Kg de P (Fosforo) equivalente por el proceso termo químico.	49
3.18. Agotamiento de la capa de ozono en Kg de <i>CPC</i> (Cloruro Floro Carbono) equivalente para el proceso termo químico.	50
3.19. Agotamiento de energía fósil en Kg de Oil equivalente en el proceso termo químico.	50
3.20. 1,4 <i>DB</i> Toxicidad humana en Kg de 1,4 dichlorobenzene para el proceso químico.	51
4.1. Información de módulos fotovoltaicos (Atamos).	54
4.2. Información de las dimensiones módulos fotovoltaicos.	55
4.3. Información de la garantía de los módulos fotovoltaicos.	55
4.4. Distribución año meteorológico típico.	56
4.5. Degradación lineal base rate.	58
4.6. Degradación exponencial base rate.	59
4.7. Degradación JPL base rate.	60
4.8. Degradación lineal rate aumentado.	61
4.9. Degradación exponencial rate aumentado.	62
4.10. Degradación JPL rate aumentado.	63
4.11. Curvas de degradación caso base.	64
4.12. Curvas de degradación caso aumentado.	65
4.13. Esquema general de los nuevos límites y procesos para el análisis de ciclo de vida para la tecnología mecánica.	66
4.14. Esquema general de los nuevos límites y procesos para el análisis de ciclo de vida para la tecnología térmico.	67
4.15. Esquema general de los nuevos límites y procesos para el análisis de ciclo de vida para la tecnología termo químico.	68
4.16. Tiempo óptimo de reemplazo JPL base.	69
4.17. Tiempo óptimo de reemplazo JPL típico.	70
5.1. Costo de ciclo de vida degradación base.	73
5.2. Costo de ciclo de vida degradación aumentada.	74
5.3. Tiempo óptimo de reemplazo económico degradación JPL Base.	75
5.4. Tiempo óptimo de reemplazo económico degradación JPL aumentada.	76
6.1. Representación gráfica en lienzo del modelo de negocios para el reciclaje de paneles solares en Chile.	79
6.2. Volúmenes estimados de residuos acumulados de paneles fotovoltaicos al final de su vida útil para Chile en toneladas [46].	80

Introducción

La industria energética renovable ha presentado una significativa alza en los últimos cinco años, motivada principalmente por la necesidad de disminuir las emisiones de carbono que contaminan nuestra atmósfera y producen el efecto invernadero. Dentro de las distintas alternativas de energía renovables que existen (eólica, geotérmica, biomasa, etc.) la que posee una mayor penetración en el mundo es la energía solar fotovoltaica. Solo en el caso particular de Chile existen cerca de 2000 MW instalados, lo que representa el 10 % de la capacidad instalada total de la matriz energética [1].

Pese a que la energía solar fotovoltaica es la más utilizada en el mundo, tiene dos grandes inconvenientes, el primero es que, si bien la energía irradiada por el sol equivale a 50 mil millones de KWh, esta es de muy baja densidad, por lo que se requiere una gran cantidad de superficie y por consiguiente una gran cantidad de paneles solares. El segundo inconveniente es que un panel solar, como todo dispositivo electrónico, posee obsolescencia, por tanto, al final de su vida útil se convertirá en basura.

Al combinar los dos inconvenientes anteriores se tiene un gran problema, pues se tendrá potencialmente miles de toneladas de paneles solares desechados que estarán contaminando [2]. Para que esta energía sea sustentable en el largo plazo es necesario contar con una industria que se dedique a reciclar y reutilizar paneles solares.

Con el propósito de disminuir el impacto medio ambiental que producen los paneles solares desechados en Chile, el presente trabajo de título tiene por finalidad estudiar qué tipo de métodos de reciclaje son mejores desde el punto de vista medio ambiental, identificar cuándo se debe reciclar un panel solar, e introducir un análisis financiero que permita tener una mirada integral de esta posible nueva industria.

Objetivos

Objetivo general

Realizar un análisis de ciclo de vida y económico que permita evaluar la factibilidad y el potencial del reciclaje y la reutilización de paneles solares en Chile.

Objetivos específicos

Esta memoria ha sido dividida en cuatro partes que se relacionan con cuatro objetivos específicos generales.

- Cuantificar el impacto medioambiental de distintas formas de reciclaje y reutilización de los paneles fotovoltaicos.
- Caracterizar la degradación de los paneles y determinar el momento óptimo de reemplazo desde el punto de vista medio ambiental.
- Determinar el momento óptimo de reemplazo desde el punto de vista económico.
- Realizar un análisis financiero simplificado mediante la metodología del modelo de negocios para una posible empresa que se dedica a reciclar y reutilizar paneles solares en Chile.

Alcances

Las plantas solares fotovoltaicas están compuestas por muchos elementos: estructuras, inversores, cableados, paneles, etc. Esta memoria solo se centra en la degradación y reciclaje de los paneles solares.

Junto con lo anterior, la degradación de los paneles solares es un tópico nuevo en el mundo y que, por lo tanto, no presenta una gran disponibilidad de información, por lo que su cuantificación se realiza solo con la información disponible, es decir, sin recurrir a experimentación, pues no se cuentan con los recursos para ello. Aun así, la metodología seguida tiene como propósito el dar flexibilidad para mejoras futuras en esa dirección.

Por último, con respecto a evaluar el momento óptimo para reciclar y o reutilizar paneles solares fotovoltaicos desde el punto de vista medio ambiental se utiliza únicamente el indicador de cambio climático Kg de CO_2 equivalente.

Capítulo 1

Antecedentes generales

1.1. La energía fotovoltaica

En la actualidad, Chile posee una matriz energética constituida principalmente por generación no renovable, tales como gas natural, carbón y derivados del petróleo que poseen un alto impacto medio ambiental y generan cerca de 8.700 toneladas de CO_2 equivalentes por año según el tercer informe bienal de actualización de Chile sobre cambio climático del 2018 [14]. Para disminuir las emisiones el país en la actualidad está promoviendo el uso de energías no convencionales y renovables, en especial la energía solar fotovoltaica que constituye para el año 2019 más del 10% de la matriz como se puede ver en la figura 1.1.

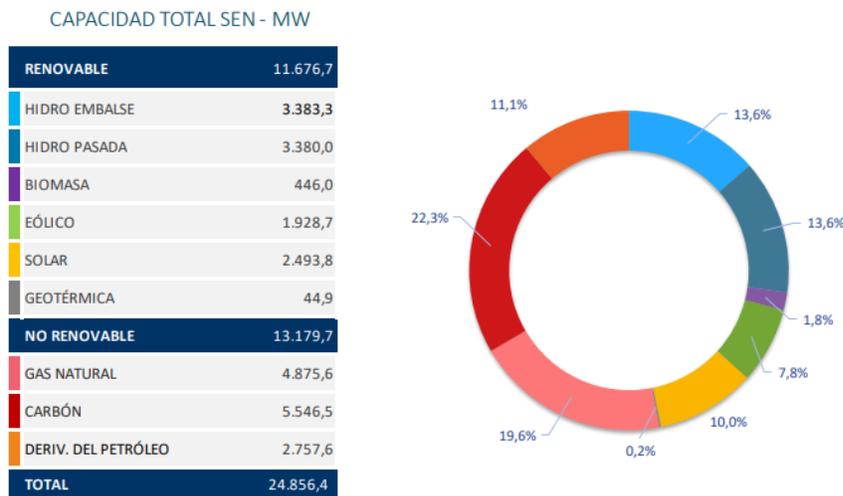


Figura 1.1: Matriz energética de Chile mayo 2019 [3].

Además, se prevé que siga aumentando exponencialmente el uso de energía renovable, y en particular la energía solar fotovoltaica, pues las políticas públicas, notando el gran potencial

que poseen estas últimas en el norte del país, apuntan a que el 70% de la matriz energética provenga de energías no convencionales para el año 2050 y que Chile se convierta exportador de tecnologías y servicios para la industria solar para el año 2035.

A continuación, se puede observar en la siguiente tabla 1.1 las 10 plantas generadoras más importantes del país.

Tabla 1.1: Plantas fotovoltaicas más importantes en Chile

Planta	Capacidad [MW]
El Romeral	196
Bolero	146,64
Luz del Norte	141
Finis Tarrae	138
Conejo Solar	104
Quilapilun	103,2
Amanecer CAP	101,02
El Pelicano	100,3
Carrera Pinto	73,5
Pampa Solar Norte	69,3

A partir de la tabla anterior, es posible notar que en total, la generación solar fotovoltaica asciende a más de 2.459 MW. Lo que equivale a cerca de 225.000 toneladas de paneles solares instalados en Chile, según la equivalencia entre MW y toneladas de paneles solares mostrada en la Figura 1.2 muestra la equivalencia entre MW y toneladas de paneles solares a lo largo del tiempo. A partir de esta Figura, es posible notar que en un posible corto plazo, estos paneles lleguen al fin de su vida útil, por lo que urge gestionar la gran cantidad de futuros residuos.

Un panel solar fotovoltaico consiste en un arreglo de entre 36 a 92 células fotovoltaicas puestas en serie y paralelo en un marco de aluminio. Estas se encuentran aisladas del exterior mediante un cristal que sirve para protegerlas de los agentes atmosféricos que les pueden afectar cuando están trabajando en la intemperie, y además le proporcionan rigidez mecánica y aislando eléctrico del exterior [8]. La figura 1.3 se muestra un esquema típico de un panel solar con sus respectivos componentes.

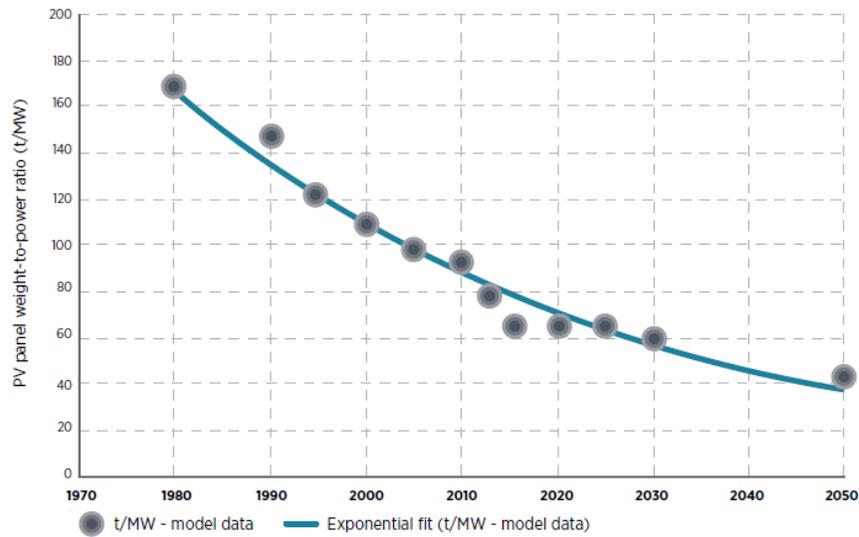


Figura 1.2: Ajuste de la curva exponencial de la proyección de la relación peso / potencia del panel fotovoltaico t/MW [46]

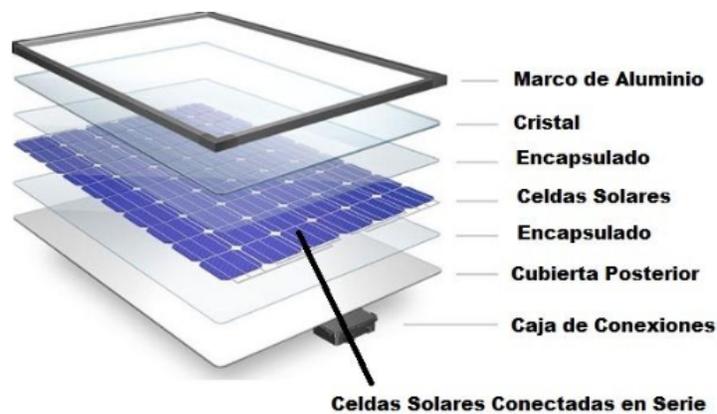


Figura 1.3: Esquema de un panel solar [8]

La inmensa mayoría de los los paneles solares actuales que se usan comercialmente para generación eléctrica son de silicio. Por lo que distinguimos dos tipos básicos de paneles, los mono cristalinos y los poli cristalinos [13].

- **Panel monocristalino:** Se fabrican con mono cristales de silicio lo cual los hace ser extremadamente puros. Una de las formas más sencillas para identificar un panel solar mono cristalino o poli cristalino, es que en el policristalino las celdas son perfectamente rectangulares y no tienen esquinas redondeadas. Son paneles con las mayores tasas de eficiencia, pues se fabrican con silicio de alta pureza. Poseen vidas útiles mas largas, ofreciendo garantías de hasta 25 años, lo que justifica su alto valor comercial. Si el panel es cubierto parcialmente por sombra, polvo o nieve, este puede dañarse.
- **Panel poli cristalino:** Se realizan por simple fundición y moldeo, por lo que se pierde mucho menos material y energía en la fabricación. Por esto último, estos paneles son más baratos que los paneles monocristalinos. Su eficiencias se encuentra dentro del 15 %. Sus principales inconvenientes son que requieren mucho más espacio, y poseen menor resistencia a los ciclos térmicos lo que acorta mucho más su vida útil.

En la siguiente subsección se desarrolla la teoría de cómo funciona un panel solar y una planta generadora fotovoltaica en general. Además, en la siguiente sección se profundiza sobre la problemática del fin de la vida útil de los paneles solares.

1.1.1. Composición de una célula fotovoltaica y funcionamiento.

Una célula solar fotovoltaica es un arreglo como el que se observa en la figura 1.6. Sus componentes principales son:

- Capa anti reflexiva (AR) diseñada para reducir lo máximo posible las pérdidas por reflexión en la superficie. Se diseñan de modo que la reflexión sea nula para el intervalo de frecuencias que permiten vencer la función potencial del semiconductor, generalmente Silicio. Además de esta capa algunas células presentan surcos y pirámides para aumentar aún más este efecto.
- Contactos metálicos. Estas metalizaciones se usan para captar los electrones y transferirlos desde o hacia el cable. Se distinguen dos tipos: malla de metalización, y contacto metálico posterior.
 - Malla de metalización que posee una forma de peine y que está sobre el semiconductor de tipo N y por tanto posee el problema de bloquear los rayos de luz que realizan el proceso fotovoltaico. Para evitar este problema esta metalización posee una forma de peine o rendija para permitir la entrada de rayos al semiconductor. Por lo tanto, los factores más importantes en su fabricación son el factor de sombra FS, que corresponde a la tasa de ocupación de área por parte del peine en relación con el área total y la resistencia eléctrica.
 - Contacto metálico posterior que tiene la misión de transferir los electrones al semiconductor de tipo P. Este no estar bloqueando los rayos solares, se realiza metalizado en toda toda la superficie.
- Semiconductor PN.

Estas células fotovoltaicas funcionan gracias al efecto fotovoltaico el cual permite transformar la energía lumínica en energía eléctrica. En la siguiente subsección se introduce este efecto

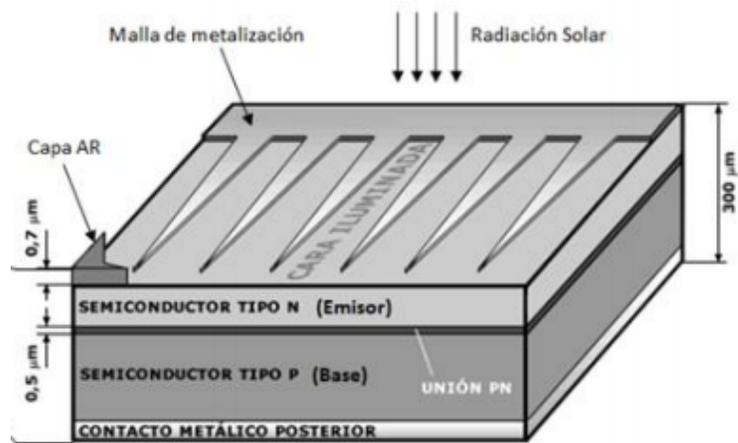


Figura 1.4: Esquema célula solar con sus componentes principales [15]

con el propósito de que el lector comprenda el funcionamiento de un panel solar fotovoltaico.

1.1.2. Efecto fotovoltaico

En la Figura 1.5 se representa una célula solar. En este esquema las placas PN se conectan mediante un cable, y un rayo de luz incide sobre la cubierta tipo N. Por el efecto fotoeléctrico este rayo le dará energía suficiente a un electrón para superare la función de trabajo del semiconductor y quedar libre. Al quedar fuera del material este electrón es conducido por el cable al semiconductor P produciéndose una corriente. Ahora el semiconductor P es más negativo y el semiconductor N es más positivo, estos nuevos electrones en la capa P empujan a los electrones que se encuentran en la frontera intermedia haciéndoles vencer el potencial de barrera. Este salto de electrones de P a N hace que este proceso sea cíclico, si se mantiene la zona N iluminada por radiación se volverá a arrancar un electrón y se generará una corriente continua en el cable. Este efecto es la base del funcionamiento de un panel solar fotovoltaico y fue reportado por primera vez por Edmund Bequerel en 1839 [30].

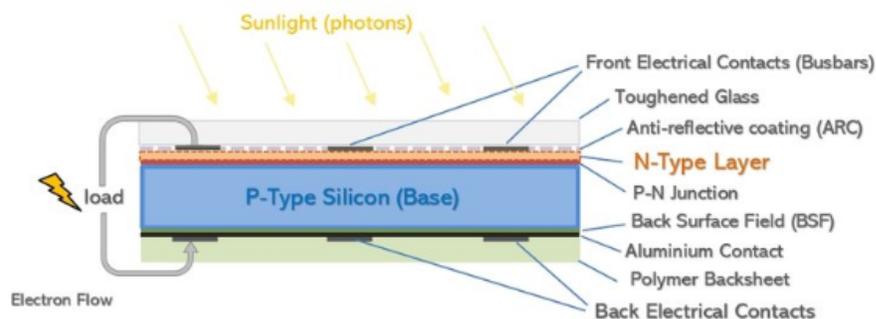


Figura 1.5: Esquema celula solar [8]

Idealmente una célula solar se caracteriza por el modelo de Shockley del Diodo que se puede observar representado en la ecuación 1.1. [25]:

$$I = I_L - I_D = I_L - I_0(e^{\frac{q_e V}{m k T}} - 1) \quad (1.1)$$

En donde:

- I: Corriente generada.
- I_L : Corriente foto generada.
- I_D : Corriente oscura.
- I_0 : Corriente de saturación.
- V: Potencial de barrera.
- m: Factor de fabricación.
- k: Constante de Boltzmann.
- T: Temperatura del semiconductor en Kelvin.
- q_e : Carga eléctrica del electrón.

A esta ecuación se le conoce como la ley exponencial de una célula solar, donde la célula solar es aproximada como el comportamiento de un diodo mediante su ecuación. El siguiente circuito de la figura representa una célula fotovoltaica con pérdidas.

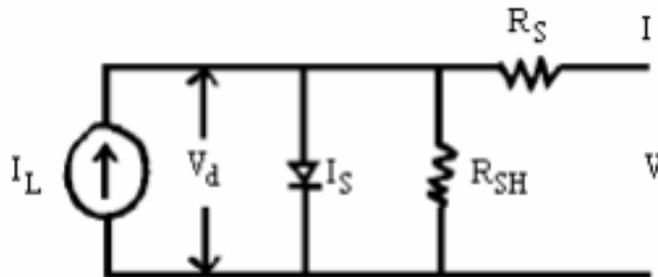


Figura 1.6: Circuito equivalente de una celda solar [26]

La ecuación 1.1 se ve modificada en la siguiente expresión 1.2

$$I = I_L - I_D = I_L - I_0(e^{\frac{q_e(V + IR_s)}{m k T}} - 1) - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (1.2)$$

En donde:

- R_p : Resistencia eléctrica presente en el material de la celda por el cual fluye la corriente.
- R_s : Resistencia que aparece debido a corrientes de fuga a través de la celda.

Idealmente se define la curva Intensidad vs voltaje que se puede ver en la Figura 1.7. Esta curva definen los siguientes conceptos para el estudio de la eficiencia de una célula solar.

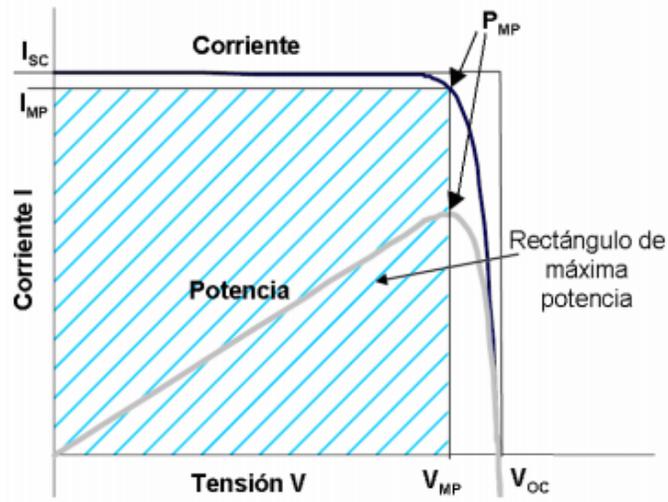


Figura 1.7: Curva intensidad vs Voltaje [26]

- Corriente de corto circuito I_{sc} : Máxima corriente posible suponiendo potencial de diodo cero.
- Potencial de circuito abierto V_{oc} : Es el potencial en el cual toda la corriente lumínica se usa para arrancar electrones, corresponde al potencial de barrera.
- Punto de máxima potencia P_m : Corresponde al máximo de la curva de potencia $P = IV$ vs voltaje.
- Factor de forma FF: Es la relación entre la potencia máxima sobre el voltaje de barrera por la intensidad de cortocircuito. Se usa para caracterizar la curva. En general FF es menor a 0.7 implican pérdidas significativas en el dispositivo.
- Eficiencia η : Se define como la potencia máxima sobre la potencia luminosa incidente ($\eta = \frac{P_m}{P_L}$).

1.2. Fin da la vida útil de los paneles solares: Degradación de paneles solares

Como se presentó en las secciones anteriores, existen en la actualidad una gran cantidad de toneladas de paneles solares instalados que llegaran al fin de su vida útil, pero esta afirmación no está completa. Esta sección se ocupa de la pregunta ¿Qué es el fin de la vida útil de un panel solar fotovoltaico? Para ello se introduce el concepto de degradación del panel solar.

Se define la degradación de un panel solar fotovoltaico como efectos físicos (o modos de falla), los cuales repercuten disminuyendo la potencia o energía entregada por este dispositivo.

Los modos de falla más usuales reportados en la literatura son [27]:

- **Hot Spot:** son áreas de temperatura elevada que afecta solo a una parte del panel solar. Son el resultado de una disminución localizada de la eficiencia, que se traduce en una menor potencia de salida y una aceleración de la degradación de los materiales en el área afectada [4].
- **Delaminación:** es un proceso mediante el cual ocurre la separación entre el vidrio y la célula, por desgaste de la EVA [27].
- **Falla humana:** Durante la manipulación en la instalación, y la operación es posible producir roturas en los paneles, esto termina con la vida del panel. En la actualidad es la razón principal de termino de vida de los paneles en Chile [37].
- **Yelloging:** Es un cambio de color en el material de blanco a amarillo y, a veces, de amarillo a marrón. Provoca un cambio en la transmitancia de la luz que llega a las células solares, y por lo tanto, una disminución en la potencia generada [32].
- **Crack:** Las microgrietas consisten en pequeñas grietas en las celdas que generalmente no son visibles a simple vista, y que pueden afectar ambos lados de la celda. Producen una pérdida en la consistencia celular y una posible ruta de recombinación del portador [27].

Estos efectos combinados terminan produciendo que el panel se degrade, y por tanto que se tenga que desechar. Por tanto, para una planta solar es muy importante poder cuantificar y predecir esta degradación.

De forma simple la degradación de un panel solar se denota con la letra D que representa el cociente en la potencia entregada y la potencia nominal.

Los principales modelos de degradación que se usan son:

- **Lineal:** La degradación es constante a lo largo del tiempo, y es de la forma $D = 1 - at$, donde a es el coeficiente de degradación y t el tiempo en años [18] .
- **Exponencial:** La degradación se modela con una forma exponencial, $D = e^{-bt}$, al ser constatado de manera experimental como más adecuado [29].
- **Modelo JPL** (Aeronautics and Space Administration Jet Propulsion Laboratory):
Corresponde a una variación del modelo exponencial $D = e^{-bt^c}$ [33].

Por lo general, para fines prácticos, se suele emplear la primera ecuación de degradación como una aproximación de primer orden, se suele observar siendo regularmente utilizada en garantía de productos. Por el otro lado la ecuación exponencial se suele usar en contextos donde se desea disminuir la incertidumbre, como por ejemplo en proyectos de plantas fotovoltaicas. Por último, el modelo JPL se emplea principalmente en laboratorios y para investigación dado su complejidad.

Estos modos de degradación son provocados principalmente por factores ambientales, de operación de la planta fotovoltaica y el tipo de material del panel.

Dentro de los factores ambientales podemos encontrar radiación solar, radiación ultravioleta, humedad, nieve, viento, etc.

Dado que los paneles solares se degradan y son desechados, se debe encontrar una manera de reciclar y o reutilizar estos. En la siguiente sección se presenta este tema.

1.3. Reciclaje y reutilización

El reciclaje se define como el proceso en el cual se transforman los desechos en materias primas o productos, con la finalidad de ser reutilizados en el mercado.

El reciclaje nació con la idea de reducir el consumo de nuevas materias primas, y por tanto hacer uso más eficiente de la energía para mitigar los cambios climáticos, y hacer más sustentable los procesos tecnológicos.

Las etapas en el reciclaje son:

- Recogida
- Plantas de transferencia
- Separación
- Planta de valoración

Los beneficios económicos del reciclaje son muy variados, ahorra costos, ahorra energía, como por ejemplo, en el caso del aluminio donde se requiere más del doble de la energía para su extracción que para su reciclaje. Además, entre más volumen de material se recicla, menos superficie se utiliza en el acopio de desechos, por lo que se pueden salvar hectáreas de terreno, que se pueden destinar a otros usos que generen mayor valor. El reciclaje genera empleo y nuevos negocios relacionados al rededor de esta industria, como por ejemplo transporte, proceso y ventas.

La reutilización es un proceso intermedio, en el cual se le da una segunda vida a un producto, el cual se ha degradado, mediante la reparación y o el reacondicionamiento. Posee en la cadena de residuos un puesto más elevado que el reciclaje, debido a que este mecanismo, de ser llevado a cabo con éxito, reduce casi completamente los desechos y es económicamente más rentable.

1.3.1. Reciclaje y reutilización de paneles solares fotovoltaicos

En general, es posible distinguir tres tipos distintos de formas de reciclaje. Métodos mecánicos, métodos térmicos y métodos termo químicos [17] [42].

La razón por la cual se les suele denominar de esta forma a los métodos de reciclaje es debido a la forma en cómo se realiza la etapa más compleja y relevante dentro del proceso completo de reciclaje, es decir, la delaminación de la EVA, la cual es simplemente, la separación del vidrio protector de la resina que lo une a las obleas de silicio. En los siguientes párrafos se explica de forma general como funcionan estos métodos.

En general el reciclaje de un panel solar degradado consta de 3 etapas una vez este se encuentra en el centro de tratamiento [42], como se puede observar en la figura 1.8:

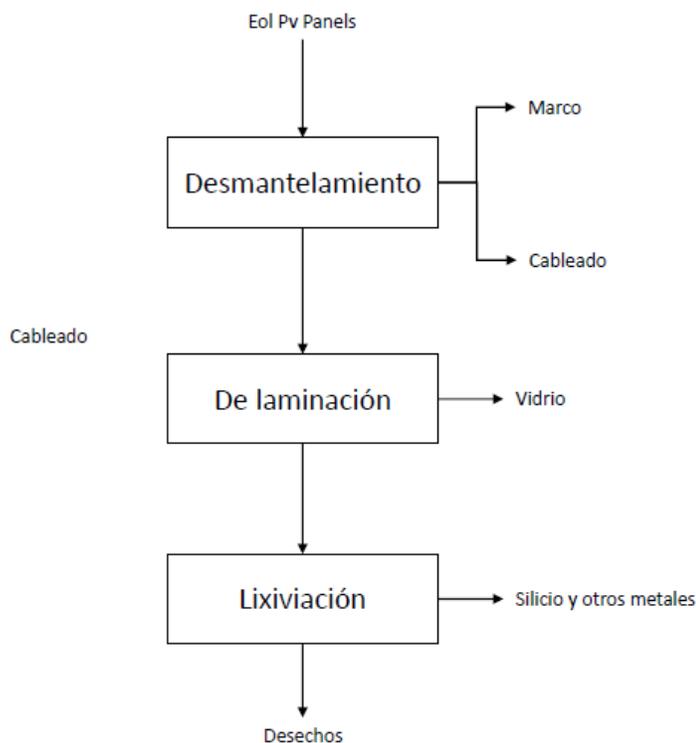


Figura 1.8: Esquema general del reciclaje de paneles solares (Propio).

- **Desmantelamiento:** corresponde a la acción de separar el marco (generalmente de aluminio) y el cableado externo del resto del panel. Generalmente se realiza de forma manual.
- **Delaminación:** corresponde a la acción de separar el vidrio protector de las células fotovoltaicas. Para realizar este procedimiento, se puede triturar el panel, calentar hasta la temperatura en la que la EVA se funde, o diluir la EVA y o el vidrio en algún agente químico. Este paso es fundamental pues determina en gran medida la tasa de

recuperación de los materiales.

- **Separación de materiales/extracción/purificación:** Corresponde a la acción de separar los distintos materiales que componen la célula solar, principalmente Silicio, cobre y plata. En general corresponde a un proceso de lixiviación.

1.3.2. Métodos mecánicos

Los procesos mecánicos o físicos de separación de la EVA se basan en moler el PV sandwich (Unión de silicio vidrio y EVA) hasta convertirlo en polvo lo que permite separar el vidrio de la EVA y del semiconductor (silicio en general) para posteriormente realizar un ataque químico para eliminar restos de la resina.

First solar es la principal empresa que en los últimos años ha estado utilizando este método [19].

Su proceso consta de las siguientes fases [23]:

- Recolección de paneles.
- Separación de cables, caja de conexiones y marco de aluminio.
- Desfibradora (Shredder).
- Molino de martillos (Hammermill)
- Remoción de semiconductores
- Separación del vidrio
- Recuperación de metales

1.3.3. Métodos térmicos

Los procesos térmicos se basan en separar el vidrio mediante corte por cuchillo o láser de la unión semiconductor-EVA, esta última es llevada a un horno en donde se incinera la EVA y se recolecta el semiconductor.

Este procedimiento fue creado por el organismo FRELP en Italia [23]

Su proceso consta de las siguientes fases [7]:

- Recolección de paneles.
- Separación de cables, caja de conexiones y marco de aluminio.
- Separación de vidrio mediante láser y corte
- Incineración

- Recuperación de metales

1.3.4. Métodos químicos

Sukmin Kang, Sungyeol Yoo, Jina Lee, Bonghyun Boo, Hojin Ryu en el año 2012 estudiaron un método de reciclaje de paneles solares en el cual la delaminación de la EVA se realiza mediante químicos orgánicos. Este es el único método que permite eliminar la resina EVA sin comprometer las obleas de semiconductor, por lo que se puede aplicar para la reutilización. [16].

El proceso consta de las siguientes fases [16]:

- Recolección de paneles.
- Separación de cables, caja de conexiones y marco de aluminio.
- Inmersión del panel en solvente orgánico.
- Tratamiento térmico.
- Recuperación de metales.

En los siguientes capítulos se presentan más aspectos de estos métodos de reciclaje.

1.3.5. Reciclaje de paneles solare fotovoltaicos en el mundo

En la actualidad, el reciclaje de paneles solares en el mundo está empezando a ser explorado, en Europa la primera generación de planas fotovoltaicas está llegando al final de su vida útil evidenciado por tanto la creciente problemática [46]. En el mundo los principales actores que producen desechos de paneles fotovoltaicos son China y Estados Unidos.

Con respecto a China, este país es el mayor productor de paneles solares fotovoltaicos como consecuencia del esfuerzo de su gobierno para frenar la contaminación de sus grandes ciudades.

De acuerdo con el pronóstico de residuos de paneles solares de la Asociación China de Energía Renovable, los residuos de paneles solares de China comenzaron a producirse en 2015, y la cantidad acumulada de residuos aumentará rápidamente a partir de 2020, y se volverá crítica alrededor de 2030 [48]. En la figura 1.9 se puede observar la proyección del crecimiento de paneles solares degradados en China.

En la actualidad no existen políticas de reciclaje de paneles solares en China, aun así, ya se están proponiendo incentivos para generar un mercado [48].

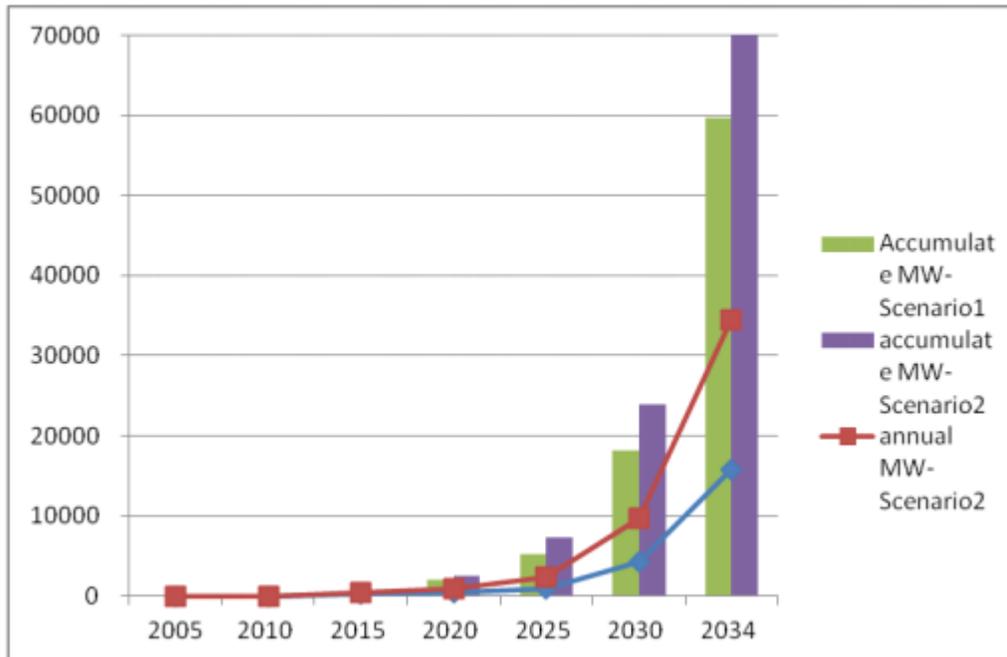


Figura 1.9: Volúmenes anuales y acumulados de residuos del módulo fotovoltaico EOL de China en 2005-2034 [48].

Con respecto a Estados Unidos la demanda es muy similar a la de China como se puede observar en la figura 1.10

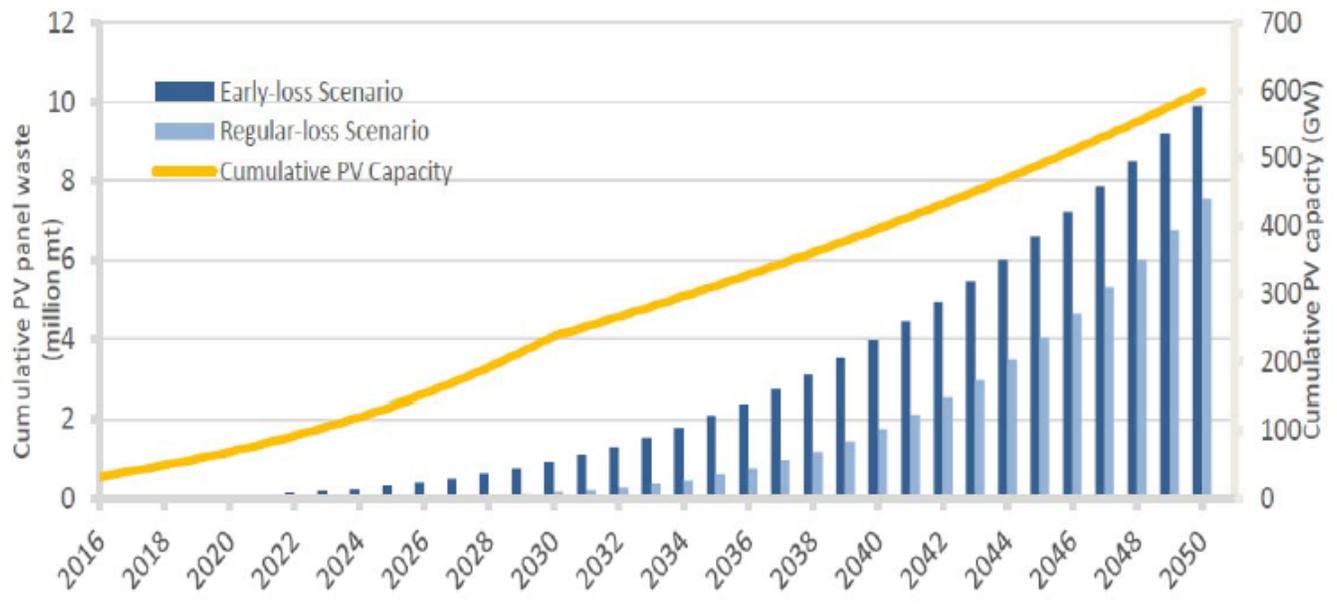


Figura 1.10: Volúmenes anuales y acumulados de residuos del módulo fotovoltaico EOL de Estados Unidos en 2016-2050 [46].

Estados Unidos ya posee algunas políticas de reciclaje de paneles. El proyecto de ley del Senado 489 de California clasifica los paneles fotovoltaicos al final de su vida útil como residuos universales, (facilitando su transporte); pendiente de aprobación de la EPA. Actualmente empresas como Sun power, Solar city, Sun run, First Solar, entre otras toman paneles para su desmantelamiento y reciclaje basándose en los principalmente en los tres procesos anteriormente descritos.

Para poder implementar estas tecnologías en Chile y además encontrar un momento apropiada para el reciclaje/reutilización, es necesario evaluar el impacto ambiental de estas. Es por ello que se usa en este trabajo la metodología del análisis de ciclo de vida. En la siguiente sección se presenta esta metodología.

1.4. Análisis de ciclo de vida

El análisis de ciclo de vida o LCA (por sus siglas en inglés) es una metodología de estudio que permite evaluar los impactos ambientales asociadas a un producto o servicio mediante la cuantificación de los flujos de materia y energía en los distintos procesos que constituyen la vida útil del activo. Las normas que regulan esta metodología son ISO 14040 (principios y marco de referencia) e ISO 14044 (requisitos y directrices).

Según la normativa ISO 14040, un proyecto de LCA puede dividirse en cuatro fases, Objetivos y alcances, análisis de inventario, análisis de impacto e interpretación. Como se puede ver en la Figura 1.11 estas fases no son independientes y secuenciales entre sí, sino que son mutuamente modificadas a lo largo de las iteraciones hasta llegar a un modelo fidedigno

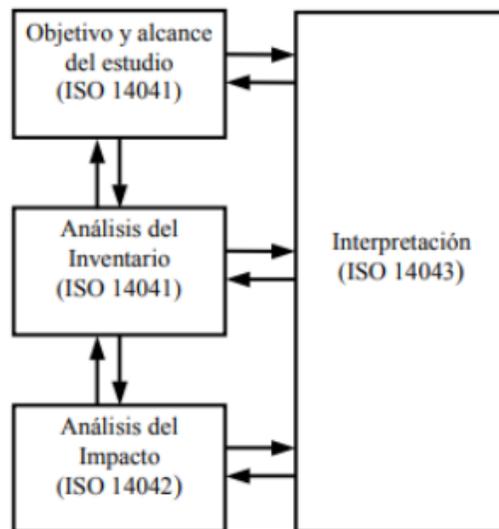


Figura 1.11: Esquema fases del análisis ciclo vida [38]

1.4.1. Ejemplo y aplicación del análisis de ciclo de vida

Para poder entender el funcionamiento y la forma de pensar y analizar los problemas desde el punta de vista del análisis de ciclo de vida, se introduce como ejemplo la producción de un automóvil convencional.

Si el propósito de una compañía es producir automóviles con un menor impacto medio ambiental, (es decir una menor producción de CO_2 por ejemplo), es necesario estudiar todo su ciclo de vida, es decir desde que se extraen las materias primas para hacer el automóvil, hasta que se desecha o se reutiliza como se puede observar en la figura 1.12.

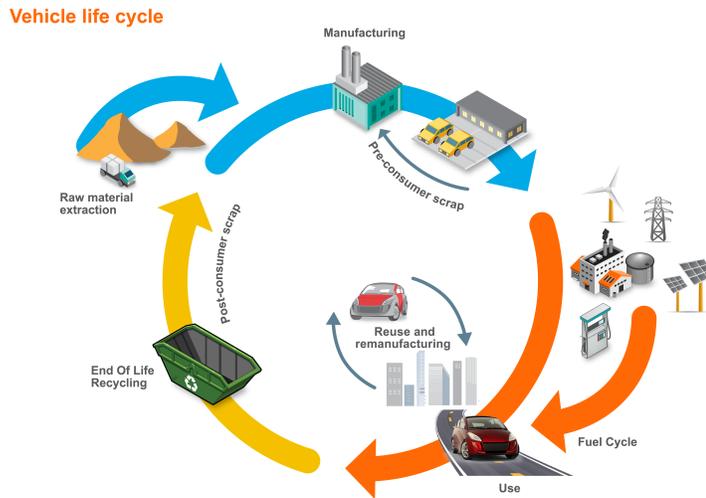


Figura 1.12: Esquema del análisis de ciclo de vida de un automóvil [47]

Al inicio del ciclo de vida de un automóvil, se debe extraer las materias primas para su manufactura, es decir, hierro, cobre, caucho, silicio, etc. La extracción requiere del uso no solo de las materias primas (flujos másicos) sino de energía (flujos energéticos) para el proceso de minería y traslado. El uso de energía viene asociada a la producción de CO_2 , dependiendo de la composición de la matriz energética de donde se extrae, si en esta predominan las fuentes fósiles (como termoelectricas por ejemplo) la generación de CO_2 sera mayor.

Posteriormente el automóvil debe ser construido, para ello tenemos que usar energía para mover las maquinas que lo manufacturan, y para trasladarlo hasta la concesionaria.

Posteriormente, en a la fase de utilización, como es sabido para hacer uso de un automóvil se debe usar derivados del petróleo, que al ser quemados en los pistones de su motor emiten CO_2 . Además, la mantención de los automóviles implica el uso de elementos como son baterías, limpiadores, etc. Cada uno de los cuales contribuye también en la generación de CO_2 .

Finalmente, el automóvil debe ser reciclado o desechado. Si se recicla, las materias primas reutilizadas ayudaran a mitigar el CO_2 producido por concepto de extracción, recordando claro que al reciclar se pasa por procesos que generan CO_2 , aunque obviamente para que

valga la pena y cumpla su función siempre será menor que la extracción.

Una vez realizado el análisis anterior y cuantificada la generación de CO_2 en cada etapa, se pueden realizar mejoras en el diseño del vehículo para poder minimizar por ejemplo esta huella de carbono. O por ejemplo se puede comparar esta huella de carbono con la de un automóvil eléctrico para determinar cuál es mejor desde el punto de vista medio ambiental.

1.4.2. Revisión análisis de ciclo de vida

A lo largo de los años las investigaciones sobre paneles solares se han centrado principalmente en la comparación de su impacto medio ambiental con otras tecnologías con el fin de cuantificar su aporte en la generación o disminución de gases de efecto invernadero. En una primera instancia dado la muy poca o nula información de paneles que hayan alcanzado el final de su vida útil es que esta parte se prendió del análisis [38].

Posteriormente los estudios se han preocupado de la gestión de los residuos que producen la energía solar desde una perspectiva de futuro. En particular se han centrado en el desarrollo de tecnologías capaces de producir delaminación de la EVA para separar el vidrio de las obleas de silicio [20].

A medida que pasaron los años se produjeron dos efectos. El primero una mayor cantidad de paneles que alcanzaron el final de su vida útil por lo que la cuestión dejó de ser un problema de futuro a uno inminente. El segundo un desarrollo mayor de las tecnologías de reciclaje de paneles. Estos dos puntos anteriores propiciaron el estudio de factibilidad ambiental de estos procesos [35].

Finalmente han aparecido estudios recientes que se centran en análisis financieros con el propósito de poner en práctica estas propuestas y convertir la energía solar en un mercado circular

En esta memoria se sigue esta metodología para comparar cuál de las tres formas de reciclaje de paneles solares en Chile posee un menor impacto medio ambiental, para ello no solo se estudia la generación de CO_2 , sino otros parámetros relevantes como son:

- Cambio climático medida en Kg de CO_2 equivalente.
- Eutrofización del agua fresca medida en Kg de P equivalente.
- Agotamiento de energía fósil Medida en Kg de Oil equivalente.
- Acidificación terrestre medida en SO_2 equivalente.
- Agotamiento de la capa de ozono medido en Kg CPC equivalente.
- Toxicidad humana medida en 1,4 DB (1,4-Diclorobenceno)- equivalente.

Y además en esta memoria se desea encontrar el momento adecuado para reciclar o reutilizar un panel solar teniendo como objetivo minimizar la generación de CO_2 .

Capítulo 2

Metodología

En este capítulo se presenta la metodología, la cual está dividida en cuatro partes por los cuatro objetivos específicos declarados anteriormente.

2.1. Comparación de métodos de reciclaje

Con el fin de realizar una comparación de los métodos de reciclaje y con ello poder determinar cual posee menor impacto medio ambiental, se propone el uso de la metodología del análisis de ciclo de vida o LCA.

Para poder de hacer uso del análisis de ciclo de vida, primero es necesario el levantamiento del estado del arte de los métodos de reciclaje de paneles solares fotovoltaicos, para ello se realiza una extensa revisión bibliográfica. Como se entiende, esta revisión es un resultado del análisis pues nos lleva directamente a los flujos de entradas y salidas de cada uno de los procesos de reciclaje de los paneles solares, por tanto, se presenta como parte de los resultados por medio de una tabla.

Un vez acabada la revisión bibliográfica, se consolida la información de los métodos de reciclaje y es posible aplicar el análisis de ciclo de vida a cada uno de estos métodos, con el fin de obtener las métricas de desempeño medio ambiental para cada uno y con ello finalmente comparar.

Los pasos que se siguen para realizar este análisis son:

- Inventarios de entrada y salida: Se definen los flujos másicos y energéticos en cada uno de los procesos por los cuales pasa un panel solar al ser tratado para ser reciclado.
- Definir una unidad funcional: La unidad funcional corresponde al objeto al cual se le aplicara el análisis, por ejemplo, 1MW de paneles solares o 1 tonelada de paneles solares.
- Definir el objetivo y los límites del alcance: El objetivo en esta sección corresponde a la comparación de los tres métodos. Con respecto a los límites, estos corresponden a desde que punto en el ciclo de vida del activo se va analizar, como se comparan los métodos de reciclaje, se toma el ciclo de vida de un panel solar desde que esta degradado y se ha dado de baja hasta que se recicla o se desecha.
- Hacer el análisis e interpretar los resultados: En la etapa final, se realizan las correlaciones entre los flujos másicos y energéticos por los que pasa la unidad funcional a lo largo de los alcances con las métricas medio ambientales y se interpretan los resultados.

Cada uno de estos pasos son iterativos y pueden verse representados gráficamente en la figura 2.1.

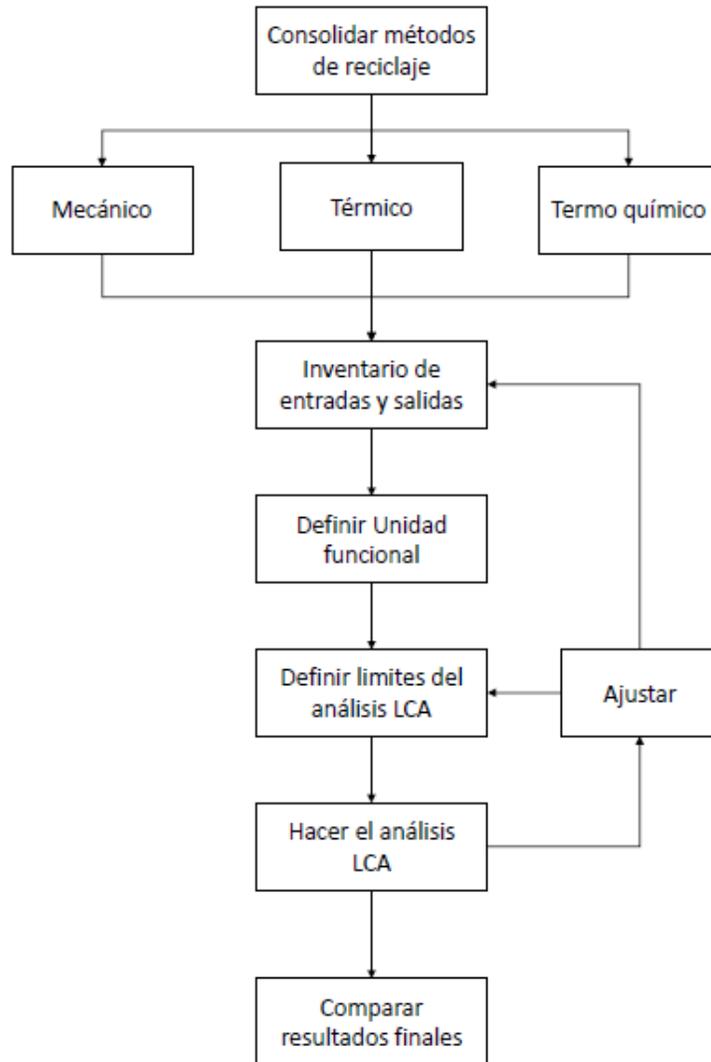


Figura 2.1: Esquema general de la metodología para comparar distintos métodos de reciclaje.

Una vez realizada la comparación de los métodos de reciclaje es posible discernir que método es el más adecuado para ser implementado en Chile para la nueva industria de reciclaje y reutilización de paneles solares. Pero además es necesarios saber cuándo se debe realizar esta reutilización y o reciclaje con el fin de minimizar el impacto medio ambiental. En la siguiente sección se presenta la metodología para contestar esta pregunta.

2.2. Momento óptimo medio ambiental para el reciclaje y la reutilización

Para poder encontrar un momento óptimo de reemplazo se procede estudiar como se ve afectada la generación de CO_2 al decidir reciclar y o reutilizar antes o después un panel solar, con una nueva perspectiva en conjunto con los profesores para sobrellevar la falta de procedimientos en publicaciones especializadas, principalmente dividido a la naturaleza compleja y multidisciplinaria de la pregunta ¿En qué momento es óptimo reciclar o reutilizar un panel solar fotovoltaico?

Lo que se pretende obtener para contestar esta pregunta desde el punto de vista medio ambiental es una curva que muestre como cambia la generación de CO_2 a lo largo del tiempo a medida que se recicla o no un panel solar fotovoltaico. Para poder realizar esto, es necesario hacer un análisis de ciclo de vida temporal.

Pero a medida que un panel solar fotovoltaico se degrada, este ya no puede ser tratado de la misma manera, es decir, un panel solar fotovoltaico puede ser reutilizado mediante un proceso químico, o puede ser reciclado mediante un proceso térmico o mecánico. Cada uno de estos procesos tiene una tasa de recuperación de material distinta y están pensados para un nivel de degradación distinta. En otras palabras, a medida que aumenta el tiempo y con ello la degradación del panel, menor sera la tasa de recuperación de este.

Como se puede observar propuesto por IRENA en la figura 2.2 existe un esquema prioritario en el manejo de residuos, es decir, de ser posible de realizar, se debe primero priorizar una reutilización, después un reciclaje y finalmente una contención de desechos.

El efecto de la degradación nos evita el poder reutilizar un módulo fotovoltaico si se llega una cierta cota máxima, en nuestro caso 0.9, pues no se puede en el mercado reutilizar células con ese nivel de degradación. Del mismo modo, un panel solar con una degradación mayor a 0.8 - 0.75 no posee suficiente valor para ser reciclado mediante un proceso térmico, puesto que este es muy costoso y está pensado para un alto rendimiento en la tasa de recuperación de metales, un panel solar con la degradación descrita anteriormente presenta fallas estructurales importantes y se suelen reciclar mediante procesos mecánicos que evitan que se deseché el módulo completo a la basura.

La combinación de este orden prioritario en la tecnología que se debe emplear en el tratamiento de residuos, y la degradación le confiere temporalidad al análisis de ciclo de vida. La pregunta inicial ahora es ¿Combine seguir produciendo más energía si al hacerlo, se degrada más el modulo y con ello se dificulta el reciclarlo y o reutilizarlo?

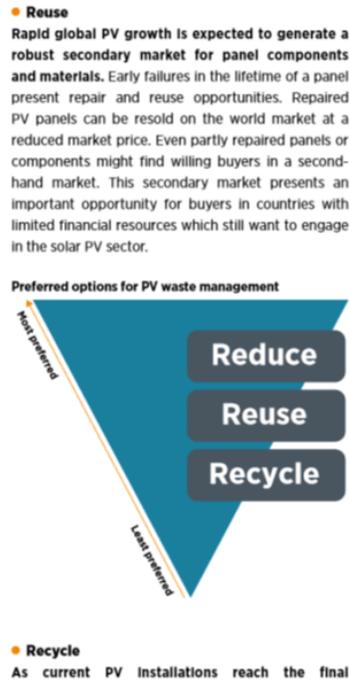


Figura 2.2: Como manejar los desechos [46]

Para dar de forma efectiva temporalidad al análisis de ciclo de vida se propone extender el alcance y considerar ahora la producción de energía. Dado que panel solar se degrada, cada vez produce menos energía, por lo que surge el trade off entre continuar produciendo un poco más energía, pero con ello aumentando el nivel de degradación y por consiguiente cayendo en el orden prioritario del manejo de residuos, lo que repercute en un mayor impacto medio ambiental en el reciclaje.

Para considerar la producción de energía, es necesario modelar el comportamiento de una planta solar fotovoltaica a lo largo de su vida útil. Y para poder realizar lo anterior de manera adecuada es necesario saber cómo se degrada.

2.2.1. Metodología para el momento óptimo medio ambiental para el reciclaje y la reutilización

Los pasos que se siguen para realizar este análisis son:

- Consolidar información sobre la degradación de los paneles solares: Mediante entrevistas con empresas como Laboratorio Solar comprender el estado del arte de la degradación de paneles solares en Chile.
- Consolidar el estado del arte de los paneles solares en Chile: Para poder aplicar esta metodología es necesario modelar la producción de una planta solar, para ello, con el

fin de que los resultados tengan un acercamiento directo con la industria en Chile, es que se hace necesario modelar con la marca y tipo de panel más ampliamente usado.

- Obtener las curvas de degradación: Con la información recolectada en los dos puntos anteriores se construyen las curvas de rendimiento del panel a lo largo de su vida útil.
- Ordenar los métodos de reciclaje y reutilización: En base al resultado de la parte uno de esta memoria (la comparación de los modelos de reciclaje) se ordena la secuencia u orden prioritario de reciclaje definida previamente.
- Realizar un análisis de ciclo de vida con temporalidad e interpretar los resultados: Se unen los resultados anteriores sobre producción de energía, y degradación, y son llevados al análisis de ciclo de vida.

Cada uno de estos pasos pueden verse representados gráficamente en la figura 2.1.

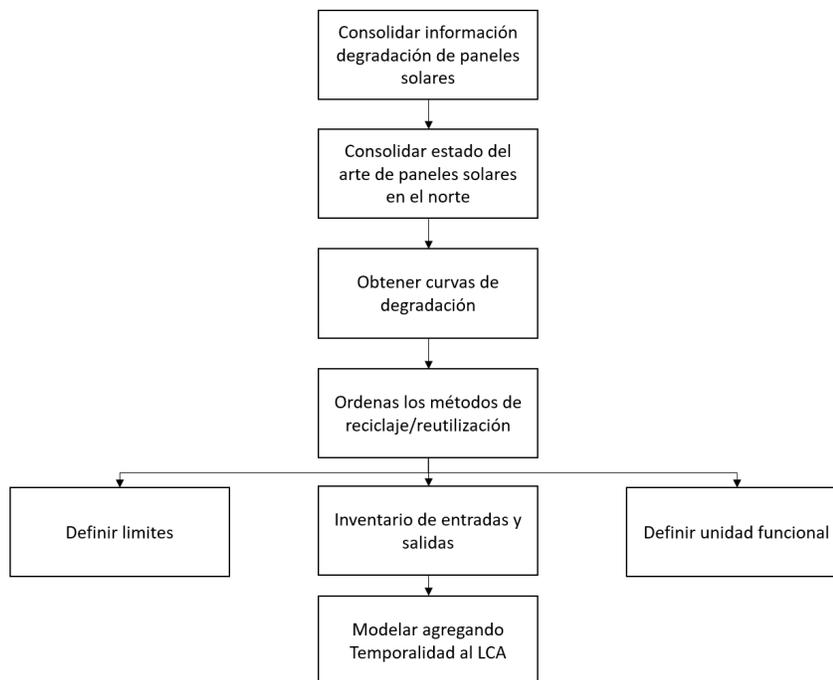


Figura 2.3: Esquema general de la metodología para determinar un momento óptimo de reemplazo

Una vez obtenido este resultado, es necesario compararlo con el momento óptimo de reemplazo desde el punto de vista económico privado. En la siguiente sección se describe la metodología para realizar esto.

2.3. Momento óptimo de reciclaje desde el punto de vista económico

Una vez encontrado el momento óptimo para reciclar un panel solar desde el punto de vista medio ambiental, es necesario encontrar el momento óptimo de reemplazo desde el punto de vista privado del productor de energía.

Para realizar esta tarea, se propone el uso del método del costo de ciclo de vida.

El costo de ciclo de vida es una metodología que busca cuantificar todos flujos de ingresos y costos por los que atraviesa un activo a lo largo de toda su vida útil, con el fin de tomar decisiones estratégicas tales como: Reducir costos, mejorar la cadena de valor, decisiones de inversión y en el caso de este trabajo, cuando realizar el reemplazo de un activo.

La figura 2.4 esquematiza de forma simplificada los flujos de ingresos y costos a los que se enfrenta una planta de solar fotovoltaica. En primer lugar, se disponen de costos de instalación y compra en el año de inicio del proyecto, y además en cada año que sigue se tienen costos de operación y mantenimiento de los equipos, por otro lado, la venta de la energía a lo largo de los años produce una fuente de ingresos, pero, se debe considerar que los paneles se degradan por lo que cada año producen menos energía y aumentan sus costos de operación y mantenimiento.

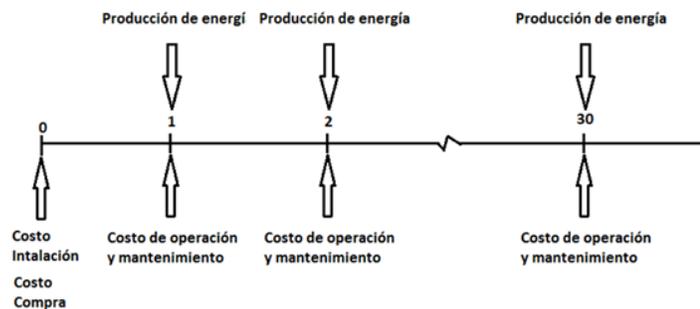


Figura 2.4: Esquema del costo de ciclo de vida básico de una planta solar fotovoltaica.

Para poder encontrar el momento de reemplazo del activo (en nuestro caso los paneles solares), es necesario utilizar el indicador económico llamado CAUE (costo anual uniforme equivalente) cuya formula es la siguiente 2.1

$$CAUE = VAN \frac{(1+i)^n i}{(1+i)^n - 1} \quad (2.1)$$

2.3.1. Pasos que se deben seguir para calcular el punto de reemplazo óptimo privado

Para calcular el momento de reemplazo de los paneles solares desde el punto de vista privado de la empresa que se dedica a generar energía y venderla se siguen los siguientes pasos:

- Definir una unidad funcional, (para mantener la coherencia se usa la misma que se emplea tanto en el objetivo específico 1 como 2).
- Para la unidad funcional definir los flujos de entrada y salida de capital (costos e ingresos). Este al ser un resultado del costo de ciclo de vida se muestra como parte de los resultados con una tabla.
- Construir la curva caue en tiempo.

2.4. Modelo de negocios para la factibilidad técnica y financiera a de una empresa que se dedica a reciclar paneles solares fotovoltaicos.

Una vez realizados los estudios anteriores se hace necesario para dar cierre a esta memoria realizar un acercamiento de como puede materializarse en Chile las primeras empresas que se dediquen a reciclar y reutilizar paneles solares fotovoltaicos.

En general el trabajo que se realiza para producir un modelo de negocios y en particular para el caso de la reutilización y el reciclaje de paneles solares consta de las siguientes partes:

- Realizar un estudio de mercado del negocio del reciclaje y reutilización de paneles solares tanto nacional como internacionalmente.
- Identificar los requisitos y condiciones necesarias para estructurar un modelo de negocios de reciclaje y reutilización de paneles solares.
- Determinar la rentabilidad del modelo de negocios propuesto.
- Identificar los factores críticos del modelo de negocios.
- Determinar las ventajas económicas y de valor en el uso del negocio desde la perspectiva del cliente.

2.4.1. Estudio de mercado

Se realiza una investigación y estudio de la situación del mercado del reciclaje en general, tanto nacional e internacional de los paneles solares especificando oferta y demanda. Para lo cual se realiza una exhaustiva búsqueda bibliográfica derivada de la información conseguida a través de entrevistas con actores reales del mercado chileno.

2.5. Evaluación Económica del Modelo de Negocios

- Se identifica los flujos relevantes, como lo son, la inversión necesaria y los costos e ingresos derivados del modelo.
- Posteriormente se procede a realizar el flujo de caja correspondiente.
- Seguido a lo anterior se realiza el cálculo de indicadores relevantes como el VAN Y TIR.

2.5.1. Análisis de Sensibilidad

- En primer lugar, se identifica las variables críticas.
- En segundo lugar, se fijan distintos escenarios probables para obtener resultados para cada uno de estos.

Capítulo 3

Comparativa de medios de reciclaje.

3.1. Estado del arte de reciclaje de paneles solares

En la siguiente Tabla 3.1 se procede a resumir el estado del arte de los tres principales métodos para reciclaje de paneles solares fotovoltaicos.

Tabla 3.1: Tabla resumen estado del arte reciclaje de paneles solares

Título	Resumen	Cita
Overview of First Solar's Module Collection and Recycling Program	Se describe un proceso de reciclaje mecánico desarrollado por la empresa First Solar.	[19]
A novel approach for the recycling of thin film photovoltaic modules	El documento presenta el desarrollo de dos estrategias para el reciclado fotovoltaico de película delgada basado en el procesamiento mecánico (húmedo) para módulos rotos, y métodos térmicos y mecánicos combinados para el final de la vida útil.	[5]
Experimental investigations for recycling of silicon and glass from waste photovoltaic modules	Este documento presenta un nuevo procedimiento para la recuperación de recursos de los módulos fotovoltaicos de desecho. El vidrio templado se recuperó utilizando disolventes orgánicos.	[16]
A method to recycle silicon wafer from end-of-life photovoltaic module and solar panels by using recycled silicon wafers	Este documento detalla un proceso de reciclaje innovador para recuperar la oblea de silicio de los paneles solares.	[39]
Recovery of valuable materials from end-of-life thin-film photovoltaic panels: environmental impact assessment of different management options	El presente estudio se ocupa de la gestión de los paneles de seleniuro de galio, indio, cobre (CIGS) y telururo de cadmio (CdTe), paneles fotovoltaicos (PV) de película delgada.	[35]
End-of-life PV: then what?	La energía solar se considera como una tecnología verde, pero ¿Qué sucede con los paneles solares una vez que alcanzan el fin de su vida? Kari Larsen de Energía renovable investiga métodos de reciclaje.	[21]
End-of-life management and recycling of PV modules	Este documento presenta un estudio de viabilidad para el reciclaje de células solares de capa delgada y residuos de fabricación, basados en la infraestructura de recolección / reciclaje actual.	[12]
Recycling of Materials from Silicon Base Solar Cell Module	En este estudio se utilizaron dos pasos de calentamiento en el tratamiento térmico. Durante el proceso térmico, el EVA podría quemarse y toda la placa de vidrio podría obtenerse sin romperse. El vidrio reciclado podría volver a utilizarse directamente como componente del módulo cuando la temperatura estaba bien controlada.	[45]
Experimental validation of crystalline silicon solar cells recycling by thermal and chemical methods	El artículo presenta un método químico para el reciclado de módulos y células dañados, y resultados de la validación experimental.	[17]
Experimental investigations for recycling of silicon and glass from waste photovoltaic modules	Este documento presenta un nuevo procedimiento para la recuperación de recursos de los módulos fotovoltaicos de desecho. El vidrio templado se recuperó utilizando disolventes orgánicos.	[16]
New approaches for component recycling of crystalline solar modules	En este artículo se tratarán diferentes enfoques para volver a extraer el vidrio frontal completo de los módulos cristalinos para aplicaciones de reutilización.	[31]
Review on feasible recycling pathways and technologies of solar photovoltaic modules	En este artículo, tres tipos de vías de reciclaje se pueden utilizar desde perspectivas del ciclo de vida del ciclo cerrado, que son la fabricación de reciclaje de residuos, la remanufactura de módulos desechados y reciclaje, se investigan. Para cada ruta, se presentan las tecnologías que se presentan y sus ventajas, y los inconvenientes descritos	[42]

3.2. Unidad funcional

En esta sección se presenta la unidad funcional que se usará a lo largo de todo el estudio medio ambiental llevado a cabo. Como se vio en el capítulo de Antecedentes, la unidad funcional es la referencia con la cual se realizan todos los cálculos y balances tanto energéticos como másicos y por tanto todos los resultados son referidos a esta.

A través de la revisión de la realidad en Chile se decidió por paneles solares policristalinos. En el siguiente capítulo se muestra de formalmente por qué se decide por esta tecnología.

Gracias a la revisión exhaustiva presentada en la Tabla 3.1 se identifican los componentes principales de un panel solar policristalino, en particular gracias al inventario recogido en la publicación [12]. Por último, para mantener la coherencia con los estudios que se han realizado, se decide por una unidad de funcional de 1.000 Kg de paneles solares degradados [23], la siguiente Tabla 3.2 nos muestra la composición de nuestra unidad funcional.

Tabla 3.2: Unidad funcional [23]

Componentes	cantidad	Unidad	Porcentaje (%)
Vidrio	700	Kg	70
Marco de aluminio	180	Kg	18
EVA	51	Kg	5,1
Células solares de Silicio	36,5	Kg	3,65
Capa de la contraportada (a base de fluoruro de polivinilo)	15	Kg	1,5
Cables (que contienen cobre y polímeros)	10	Kg	1
Conductor interno, aluminio	5,3	Kg	0,53
Conductor interno, cobre	1,14	Kg	0,11
Plata	0,53	Kg	0,053
Otros metales	0,53	Kg	0,053
Total	1000	Kg	100

3.3. Método mecánico

En esta sección se desarrolla el primero de los procesos de reciclaje de paneles solares expuestos en los capítulos anteriores, que consta de un proceso de delaminación de la EVA mecánico. Primero se exponen los límites del estudio, se presenta el inventario de estos procesos y finalmente, con la ayuda del software GaBi, se muestran los resultados del análisis de ciclo de vida.

3.3.1. Límites

Para poder cuantificar los efectos medio ambientales que se producen por el uso de esta tecnología en Chile, se procede a definir un sistema como el que aparece en la Figura 3.1 cuyos límites comprenden desde el transporte de los paneles degradados, hasta la reutilización de las materias primas y o su desecho en los vertederos, en particular según los datos de First Solar, este proceso tiene una tasa de recuperación del 85 – 90 % en masa.

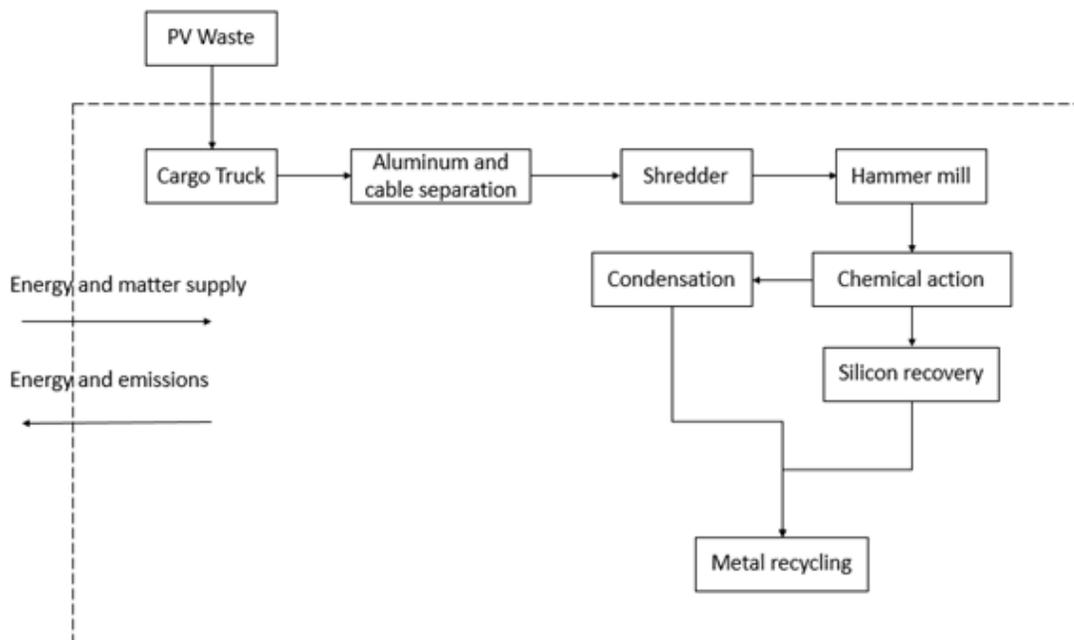


Figura 3.1: Esquema general de los límites y procesos para el análisis de ciclo de vida para la tecnología mecánica.

Como ya se ha mencionado anteriormente, se toma como unidad funcional 1.000 Kg de paneles solares fotovoltaicos degradados. Los cuales son transportados mediante camiones de carga, los cuales recorren una distancia de aproximadamente 200 km y que consumen petróleo diésel.

A su llegada al centro de reciclaje son llevados al desmantelamiento robótico, el cual consume aproximadamente 5.3 kWh [36] y se separa el marco de aluminio, los cables y la caja de conexión. El aluminio es enviado a una planta de reciclaje especializada, lo mismo en el caso de los cables y caja de conexión.

El resto del panel es conducido por medio de cintas transportadoras a una desfibradora, la cual tritura los paneles, este artefacto utiliza 440 kWh para la totalidad de los paneles [43], este dato se calculó con desfibradores de automóviles que es lo más cercano en el mercado aplicando los criterios señalados en los antecedentes del análisis de ciclo de vida. A continuación se redujo más el tamaño de la molienda por medio de un molino de bolas que utiliza 15 kWh dato que obtenido de la librería de GaBi.

El producto de la operación anterior es llevado por medio de un tornillo transportador el cual, mediante un separador, divide los pedazos de vidrio del resto de la molienda para ser posteriormente reciclado en una planta recicladora de vidrio.

En cuanto al resto de la molienda, esta es llevada a un tanque el cual separa el silicio por medio de la acción del hidróxido de calcio. Este es llevado a un proceso de lixiviación como silicato cálcico. Finalmente, en un segundo tanque usando ácido nítrico se decantan los demás metales. Tanto el silicio como los metales son destinados para reciclaje.

En la siguiente subsección se presenta el inventario de los flujos de materia y energía de entrada y salida. Estos datos fueron recavados gracias a el estado del arte levantado en la tabla 3.1, los artículos citados en los párrafos anteriores, así como también por la base de datos de GaBi.

3.3.2. Inventario de ciclo de vida

Para hacer más simple la visualización de los flujos de entrada y salida, se dividió en cuatro subprocesos este proceso de reciclaje, recogida, desmantelamiento, pulverización y acción química. Estos resultados pueden ser observados en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Inventario de flujos de entrada y salida, proceso mecánico.

	Unidad	Recogida	Desmantelamiento	Pulverización	Acción química
Process input					
Pv waste	Kg	1000	1000	-	-
Diesel	Kg	135	-	-	-
Electric power	MJ	-	19,1	7,03	-
Hidróxido de calcio	Kg	-	-	-	36,5
Ácido nítrico	Kg	-	-	-	7,08
Process output					
Greenhouse gas	Kg	1010	GaBi	GaBi	GaBi
Aluminio	Kg	-	185	-	-
Vidrio	Kg	-	-	680	-
Plástico (EVA)	Kg	-	-	1.6	-
Silicio	Kg	-	-	-	1,24
Otros metales	Kg	-	-	-	2

3.3.3. Resultados y análisis de resultados

Una vez se realiza el análisis ciclo de vida, cuantificando los flujos másicos y energéticos en cada uno de los procesos, y de iterar mediante el procedimiento presentado en los antecedentes con el fin de obtener resultados lo más cercanos a la realidad, se obtiene lo siguiente.

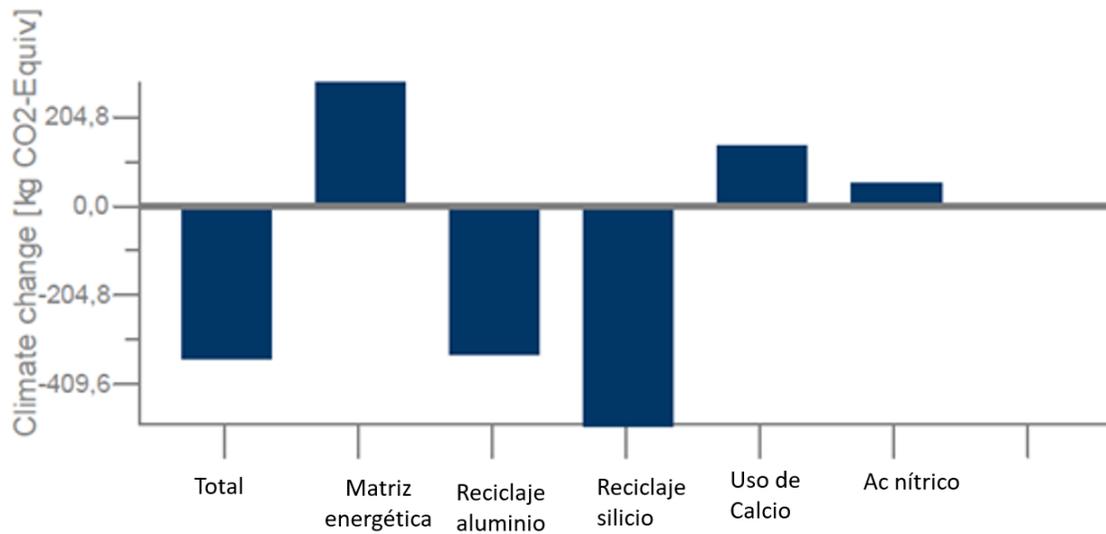


Figura 3.2: Kg de CO_2 equivalente generado por el proceso mecánico de reciclaje.

Como se puede ver en la Figura 3.2 utilizando esta técnica de reciclaje se produce una disminución en la generación equivalente de CO_2 . Al observar de forma desagregada la información se puede ver que la principal fuente de generación de CO_2 es debido al uso de energía eléctrica a lo largo de todos los procesos, en particular la molienda, este resultado tiene sentido puesto que la matriz energética de Chile es en general poco ecológica [28]. Por otro lado, la principal fuente de disminución de CO_2 para el ambiente se debe al proceso de reciclaje de las materias primas, en particular el silicio, esto tiene sentido pues según [34], el proceso de extracción y refinamiento del silicio para convertirlo en obleas para paneles es altamente demandante de energía.

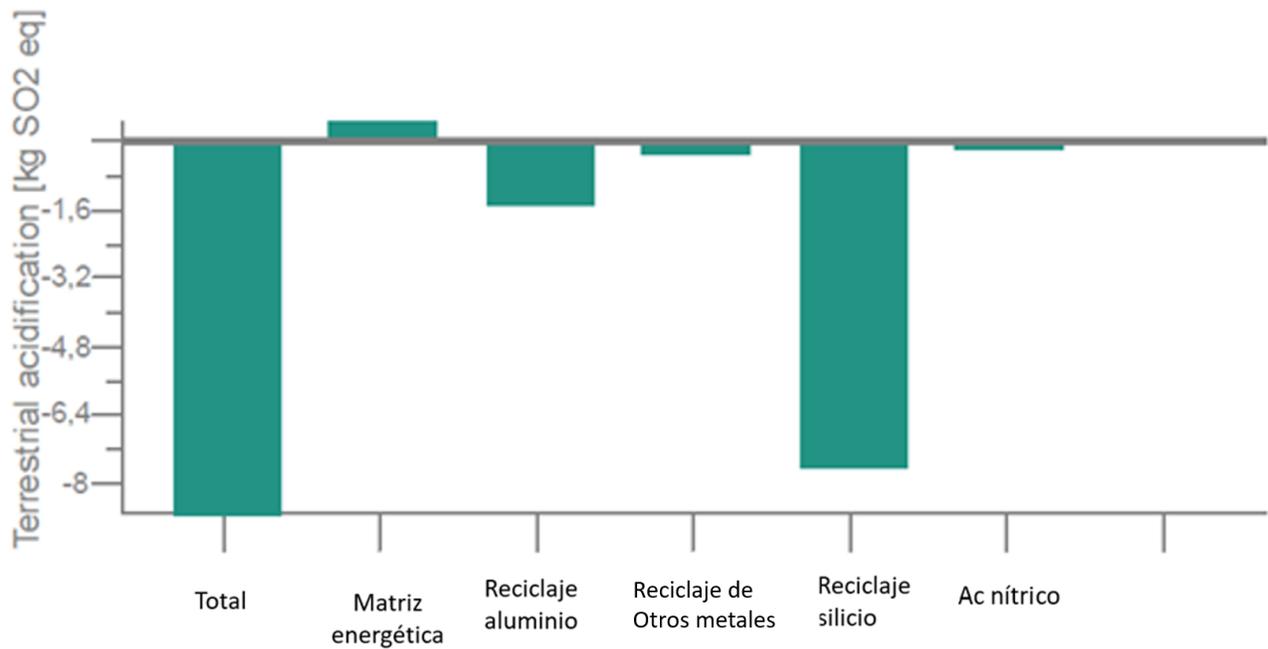


Figura 3.3: Kg SO_2 equivalente generado por el proceso mecánico de reciclaje.

Como se puede ver en la Figura 3.3 utilizando esta técnica de reciclaje se produce una disminución de la generación equivalente de SO_2 . Al observar de forma desagregada la información se puede ver que la principal fuente de generación de SO_2 es debido al uso de energía eléctrica a lo largo de todos los procesos, en particular la molienda, al igual que para la generación de CO_2 . Por el otro lado, la principal fuente de disminución de SO_2 para el ambiente se debe al proceso de reciclaje de las materias primas.

Se puede notar que en términos generales este método tiene un impacto positivo en el ecosistema, permitiendo de forma notable la disminución de la acidificación de la tierra.

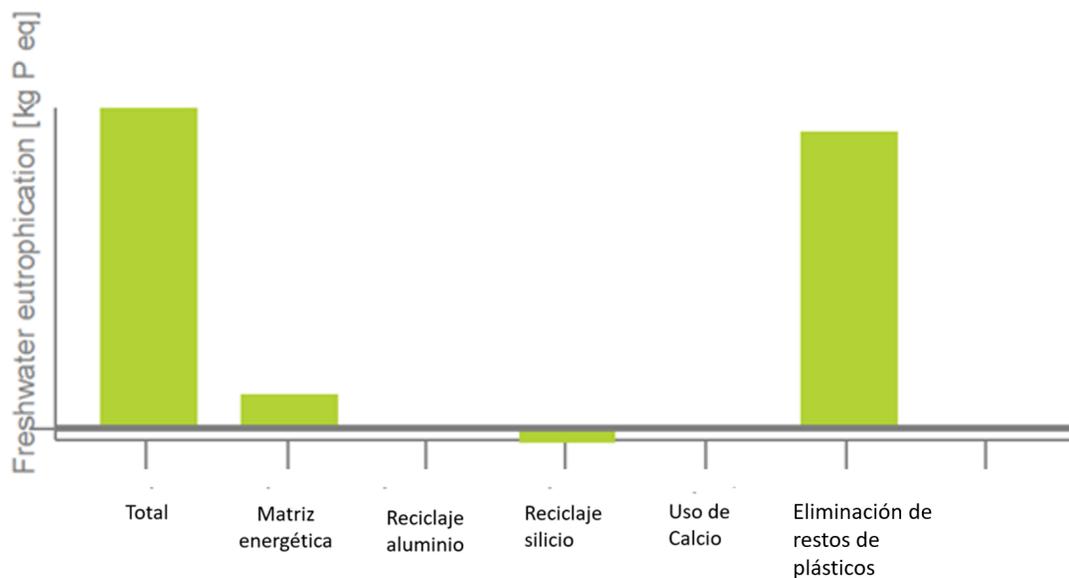


Figura 3.4: Eutrofización del agua fresca en Kg de P (Fosforo) equivalente por el proceso mecánico.

Como se puede ver en la Figura 3.4, se tiene una gran eutrofización de agua fresca. La principal fuente por la cual se tiene una mayor concentración de fósforo es debido al proceso de reciclaje de plástico del cableado que produce partículas que van a parar al ambiente

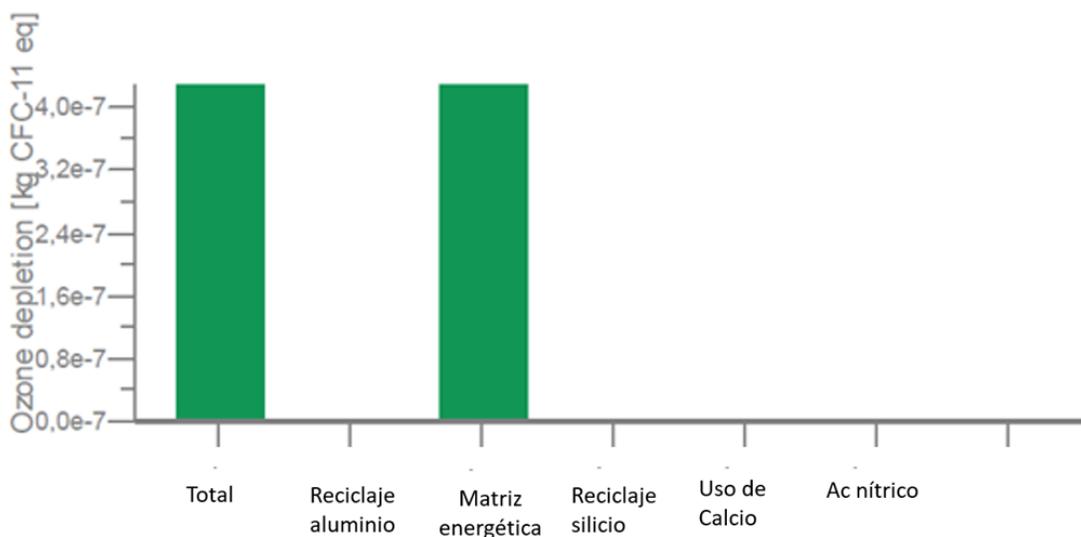


Figura 3.5: Agotamiento de la capa de ozono en Kg de *CPC* (Cloruro Floro Carbono) equivalente para el proceso mecánico.

Como se puede ver en la Figura 3.5 se tiene un fuerte impacto en la capa de ozono. Esto se debe principalmente al uso de energía eléctrica de la matriz energética [28].

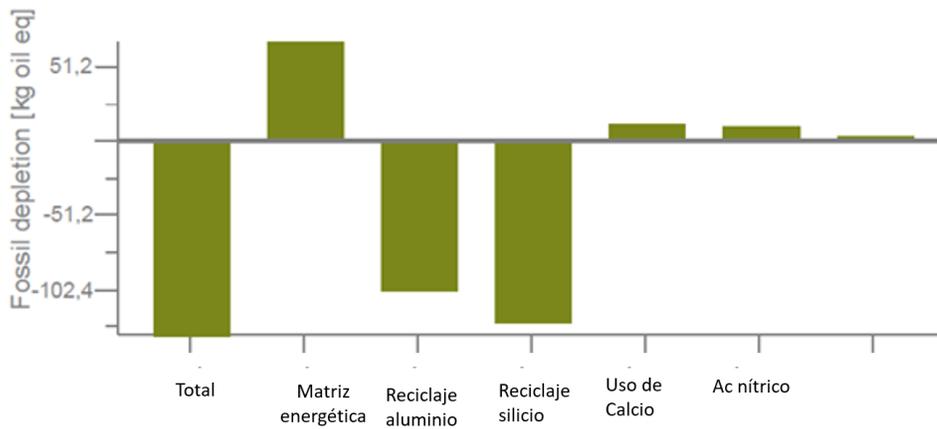


Figura 3.6: Agotamiento de energía fósil en Kg de Oil equivalente en el proceso mecánico.

Como se puede ver la Figura 3.6 este método permite ahorrar en el consumo de fuentes de energía de origen fósil. En particular la principal fuente de ahorro viene del proceso de reciclaje del silicio. Por el contrario, la principal fuente de consumo de energía fósil se debe al uso de energía eléctrica de la matriz energética.

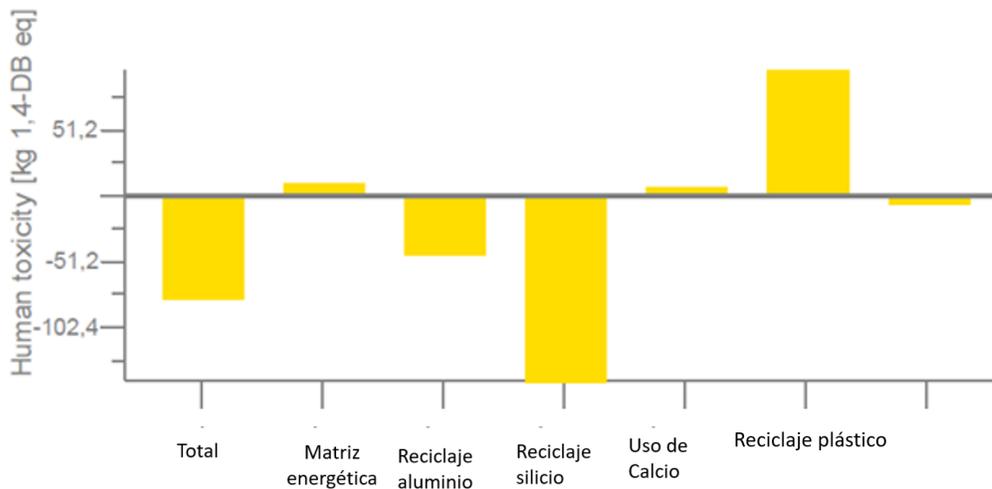


Figura 3.7: 1,4DB Toxicidad humana en Kg de 1,4 dichlorobenzene para el proceso mecánico.

Las evaluaciones de toxicidad se basan en concentraciones tolerables en aire, agua, pautas de calidad del aire, ingesta diaria tolerable e ingesta diaria aceptable para toxicidad humana. Como se puede ver en la Figura 3.7, este proceso produce una disminución en la toxicidad humana gracias al reciclaje de Silicio. La principal fuente de toxicidad proviene del proceso de reciclaje del cableado por las partículas de plástico incineradas en el ambiente.

3.4. Método térmico

Una vez se realiza el análisis ciclo de vida, cuantificando los flujos másicos y energéticos en cada uno de los procesos, y de iterar mediante el procedimiento presentado en los antecedentes con el fin de obtener resultados lo más cercanos a la realidad, se obtienen los siguientes resultados.

3.4.1. Límites

Para poder cuantificar los efectos medio ambientales que se producen por el uso de esta tecnología en Chile, se procede a definir un sistema como el que se puede ver en la figura 3.8 cuyos límites comprenden desde el transporte de los paneles degradados hasta la reutilización de las materias primas y o su desecho en los vertederos (En particular según los datos de FRELDP, este proceso tienen una tasa de recuperación del 95 % en masa del silicio).

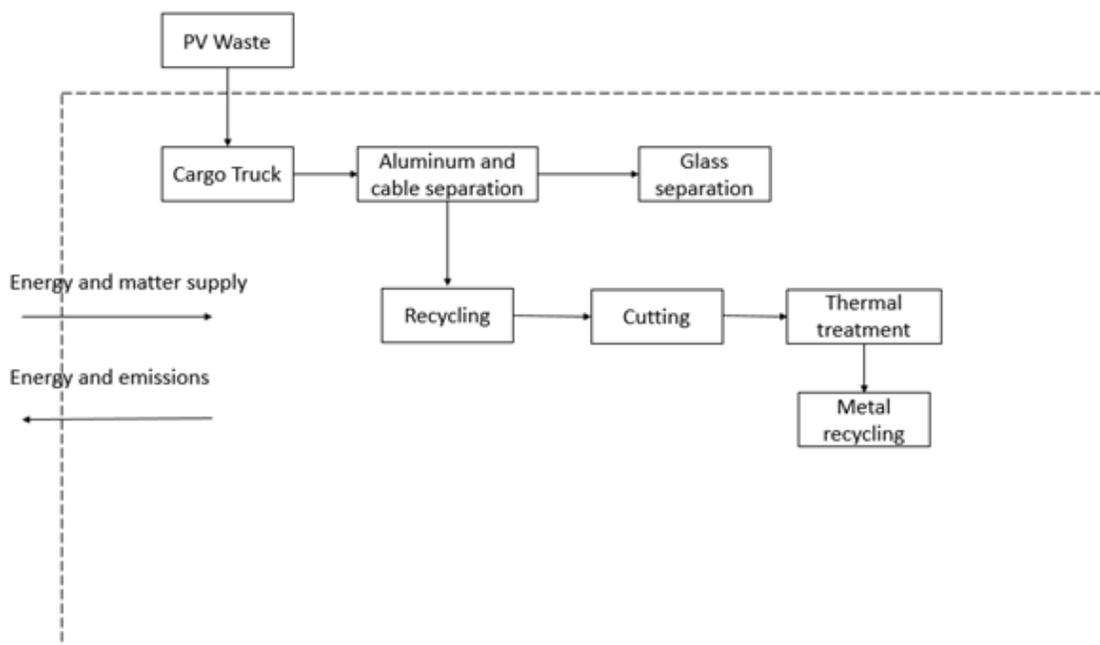


Figura 3.8: Esquema general de los límites y procesos para el análisis de ciclo de vida para la tecnología térmico.

En la siguiente subsección se presenta el inventario de los flujos de materia y energía de entrada y salida. Estos datos fueron recabados gracias a el estado del arte levantado en la tabla 3.1, los artículos citados en los párrafos anteriores, así como también por la base de datos de GaBi.

3.4.2. Inventario de ciclo de vida

Para hacer más simple la visualización de los flujos de entrada y salida se dividió en cuatro subprocesos esta metodología de reciclaje, primero recogida, segunda desmantelamiento, tercera incineración y cuarta acción química. Estos resultados pueden ser observados en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Inventario de flujos de entrada y salida, proceso térmico

	Unidad	Recogida	Desmantelamiento	Incineración	Acción química
Process input					
Pv waste	Kg	1000	1000	-	-
Diesel	Kg	135	-	-	-
Electric power	MJ	-	19,1	173	56,8
Hidróxido de calcio	Kg	-	-	-	36,5
Ácido nítrico					
Process output	Kg	-	-	-	7,08
Greenhouse gas	Kg	1010	GaBi	GaBi	GaBi
Aluminio	Kg	-	185	-	-
Vidrio	Kg	-	-	680	-
Plástico (EVA)	Kg	-	-	-	1,6
Silicio	Kg	-	-	-	1,24
Otros metales	Kg	-	-	-	2
Agua	Kg	-	-	-	310

3.4.3. Resultados y análisis de resultados

Una vez se realiza el análisis ciclo de vida para cada uno de los procesos y de iterar mediante el procedimiento presentado en los antecedentes, con el fin de obtener resultados lo más cercanos a la realidad, se obtiene lo siguiente.

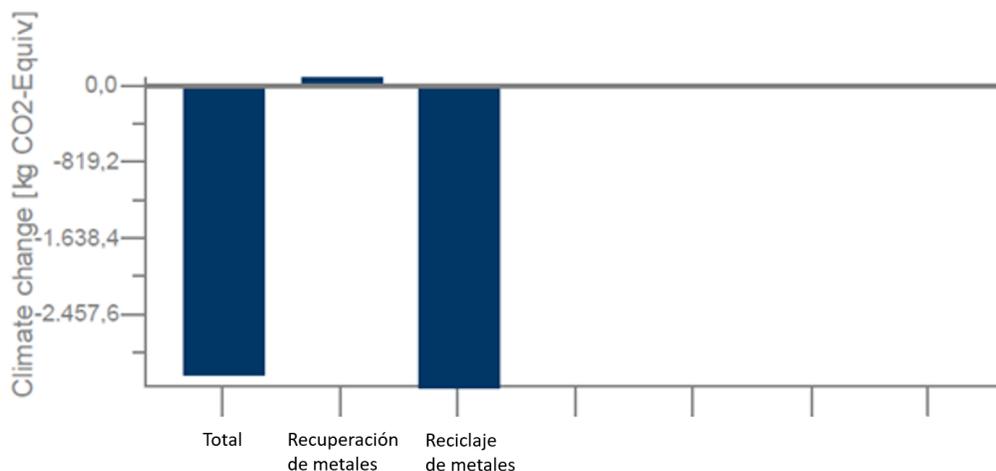


Figura 3.9: Kg de CO_2 equivalente generado por el proceso térmico de reciclaje.

Como se puede ver en la Figura 3.9 utilizando esta técnica de reciclaje se produce una disminución significativa de la generación equivalente de CO_2 . Al observar de forma desagregada la información se puede ver que la principal fuente de generación de CO_2 es debido al uso de energía eléctrica (casi no se ve en la escala) a lo largo de todos los procesos. En particular en la recuperación metálica (lixiviación más electrólisis) [6]. Por el contrario la principal fuente de disminución de CO_2 para el ambiente se debe al proceso de reciclaje de las materias primas, en particular el silicio, como se pudo ver en el método mecánico.

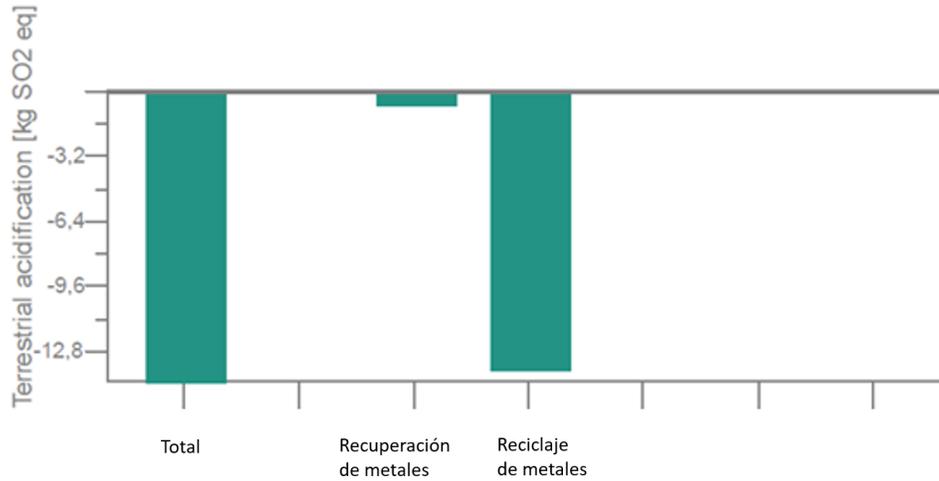


Figura 3.10: Kg SO_2 equivalente generado por el proceso térmico de reciclaje.

Como se puede ver en la Figura 3.10 utilizando esta técnica de reciclaje se produce una disminución en la generación equivalente de SO_2 . Al observar de forma desagregada la información se puede ver que prácticamente no existe generación de SO_2 . Por el otro lado, la principal fuente de disminución de SO_2 para el ambiente se debe al proceso de reciclaje de las materias primas.

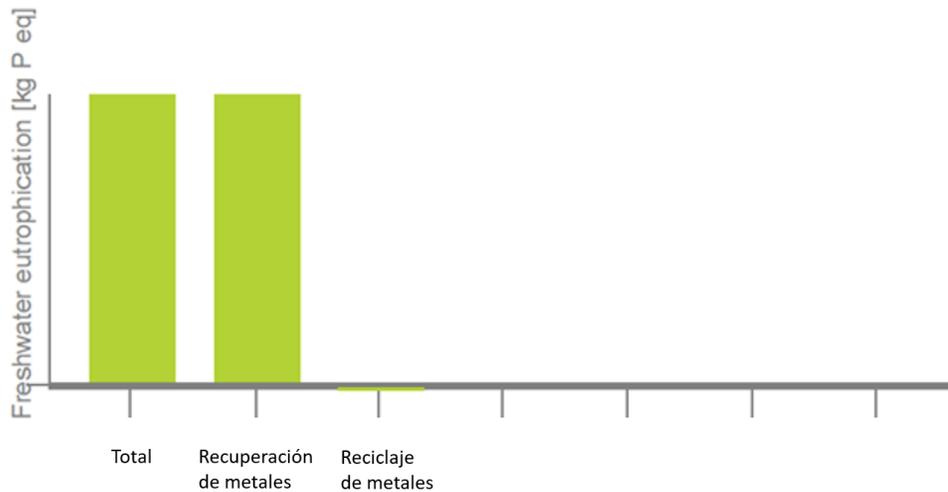


Figura 3.11: Eutrofización del agua fresca en Kg de P (Fosforo) equivalente por el proceso térmico.

Como se puede ver en la Figura 3.11 se tiene una gran eutrofización de agua fresca. La principal razón por la cual se tiene una mayor concentración de fósforo es debido al proceso de recuperación de metales [6].

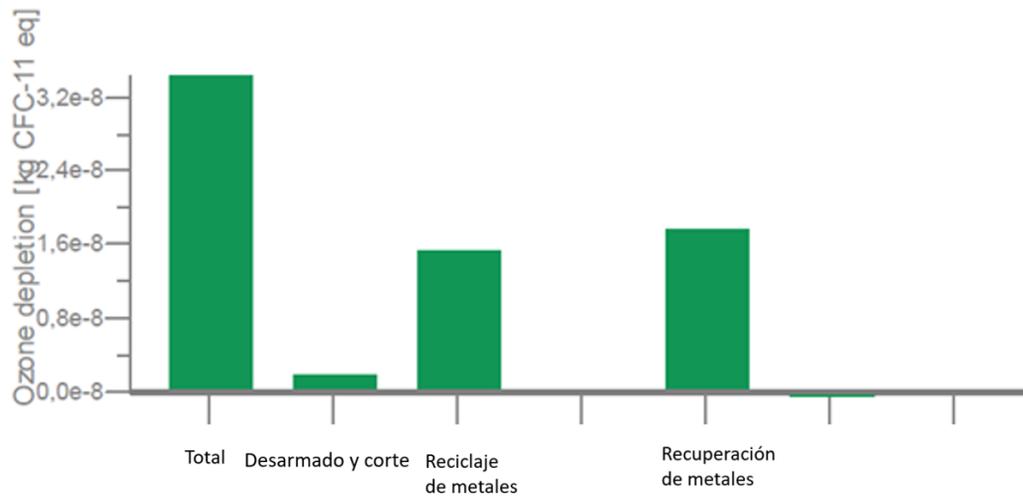


Figura 3.12: Agotamiento de la capa de ozono en Kg de *CPC* (Cloruro Floro Carbono) equivalente para el proceso térmico.

Como se puede ver en la Figura 3.12 se tiene un fuerte impacto en la capa de ozono. Esto se debe principalmente al uso de energía eléctrica de la matriz energética en combinación con el proceso de recuperación de metales.

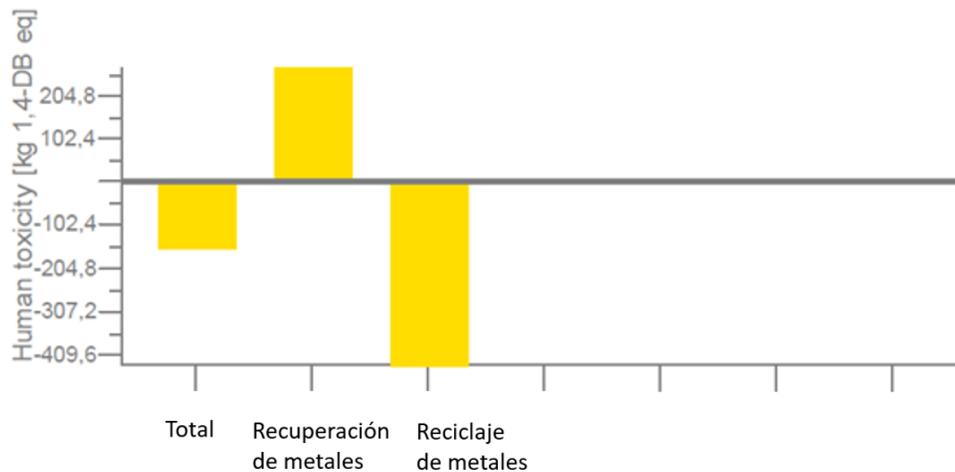


Figura 3.13: 1,4DB Toxicidad humana en Kg de 1,4 dichlorobenzene para el proceso térmico.

Como se puede ver en la Figura 3.13 este proceso produce una disminución en la toxicidad humana gracias al reciclaje de Silicio. Se puede destacar que la principal fuente de toxicidad para los humanos proviene del proceso recuperación de metales.

3.5. Método termoquímico

En esta sección se describe el último de los procesos de reciclaje de paneles solares expuestos en los capítulos anteriores, que consta de un proceso de delaminación de la EVA químico. Primero se describe cada uno de los procesos involucrados, se presenta el inventario de estos procesos y finalmente con la ayuda del software GaBi se muestran los resultados del análisis de ciclo de vida.

3.5.1. Límites

Para poder cuantificar los efectos medio ambientales que producen el uso de esta tecnología en Chile, se procede a definir un sistema como el que se puede ver en la Figura 3.14 cuyos límites comprenden desde el transporte de los paneles degradados hasta la reutilización de las materias primas y su desecho en los vertederos. Este proceso tiene una tasa de recuperación del 95 % en masa.

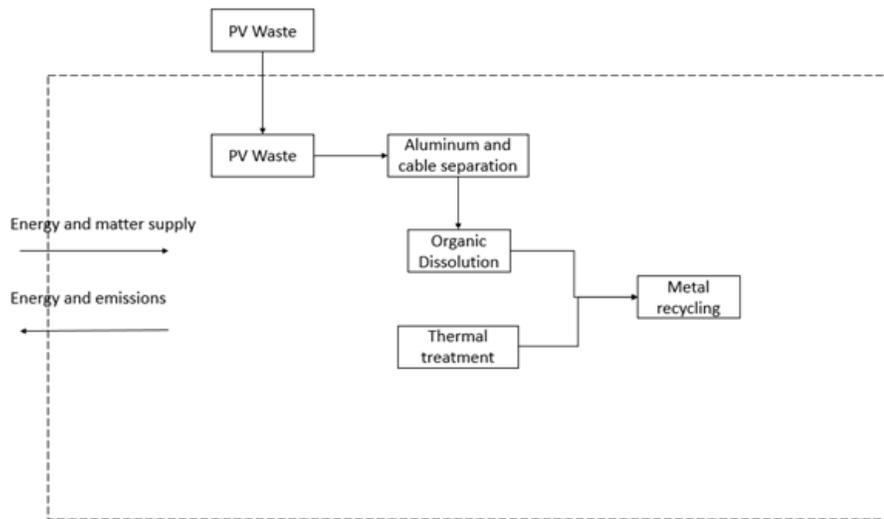


Figura 3.14: Esquema general de los límites y procesos para el análisis de ciclo de vida para la tecnología termoquímica.

3.5.2. Inventario de ciclo de vida

Para hacer más simple visualización de los flujos de entrada y salida de materia y energía, este método se dividió en cuatro subprocesos, primero recogida, segundo desmantelamiento, tercero disolución orgánica y cuarto acción química. Estos resultados pueden ser observados en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5: Inventario de flujos de entrada y salida, proceso térmico

	Unidad	Recogida	Desmantelamiento	Disolución orgánica	Acción térmica
Process input					
Pv waste	Kg	1000	1000	-	-
Diesel	Kg	135	-	-	-
Electric power	MJ	-	19,1	173	56,8
Hidróxido de calcio	Kg	-	-	-	36,5
Ácido nítrico					
Process output	Kg	-	-	-	7,08
Greenhouse gas	Kg	1010	GaBi	GaBi	GaBi
Aluminio	Kg	-	185	-	-
Vidrio	Kg	-	-	680	-
Plástico (EVA)	Kg	-	-	-	1,6
Silicio	Kg	-	-	-	1,24
Otros metales	Kg	-	-	-	2
Agua	Kg	-	-	-	310
Tolueno liquido	Kg	-	57	4000	-

3.5.3. Resultado y análisis de resultados

Una vez se realiza el análisis ciclo de vida para cada uno de los procesos y de iterar mediante el procedimiento presentado en los antecedentes, con el fin de obtener resultados lo más cercanos a la realidad, se obtiene lo siguiente.

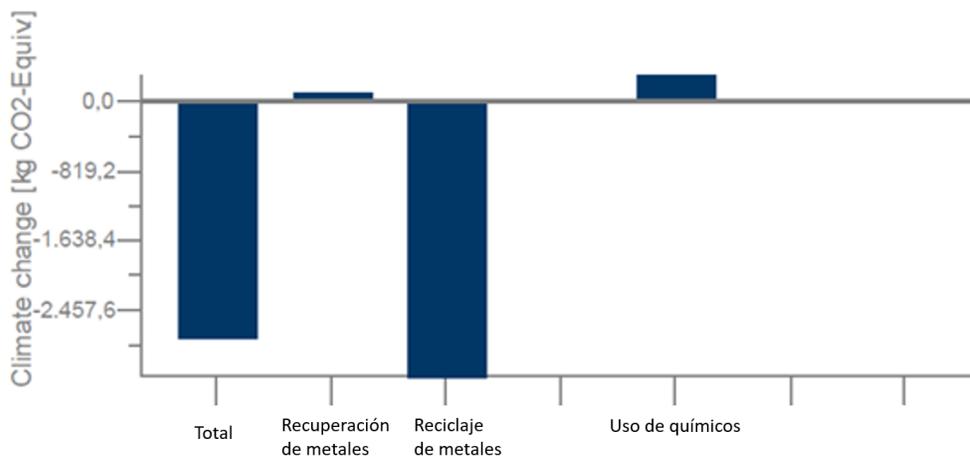


Figura 3.15: Kg de CO_2 equivalente generado por el proceso termo químico de reciclaje.

Como se puede ver en la Figura 3.15 utilizando esta técnica de reciclaje se produce una disminución significativa de la generación equivalente de CO_2 . Al observar de forma desagregada la información se puede ver que la principal fuente de generación de CO_2 corresponde al proceso de desechar el Tolueno. Por el contrario, la principal fuente de disminución de CO_2 para el ambiente se debe al proceso de reciclaje de las materias primas, en particular el silicio, como se pudo ver tanto en los métodos mecánico y térmico.

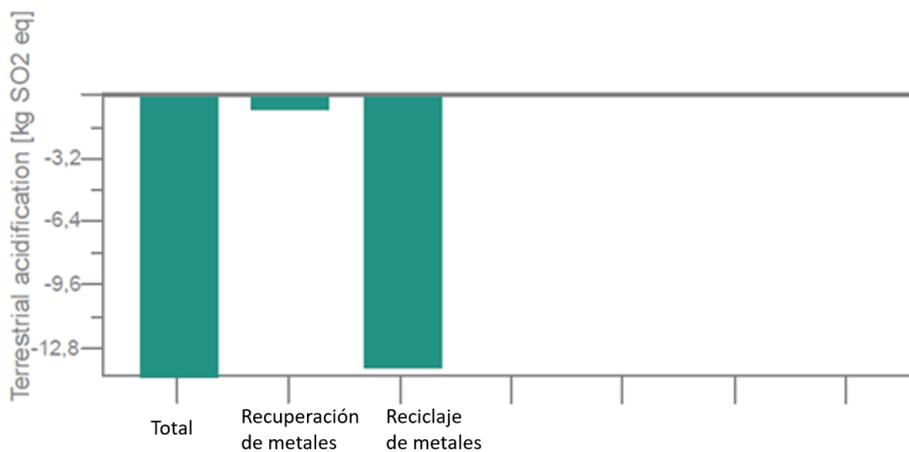


Figura 3.16: Kg SO_2 equivalente generado por el proceso térmico de reciclaje.

Como se puede ver en la Figura 3.16 utilizando esta técnica de reciclaje se produce una disminución en la generación equivalente de SO_2 . Al observar de forma desagregada la información se puede ver que prácticamente no existe generación de SO_2 . Por otro lado, la principal fuente de disminución de SO_2 para el ambiente se debe al proceso de reciclaje de las materias primas.

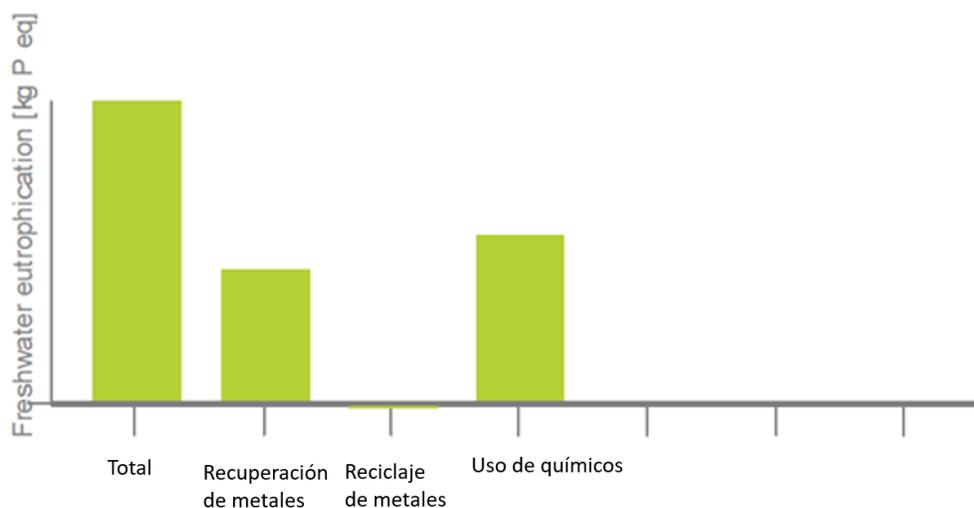


Figura 3.17: Eutrofización del agua fresca en Kg de P (Fosforo) equivalente por el proceso termo químico.

Como se puede ver en la Figura 3.17 se tiene una gran eutrofización de agua fresca. La principal razón por la cual se tiene una mayor concentración de fósforo es debido al proceso de desecho del Tolueno en el ambiente [24].

Como se puede ver en la Figura 3.18 se tiene un fuerte impacto en la capa de ozono. Esto se debe principalmente al uso de energía eléctrica de la matriz energética en combinación con el proceso de recuperación de metales.

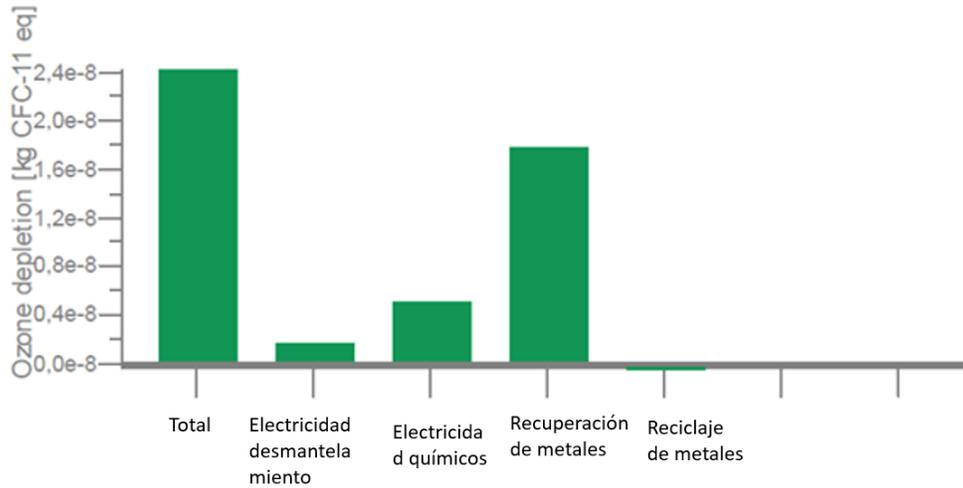


Figura 3.18: Agotamiento de la capa de ozono en Kg de *CPC* (Cloruro Floro Carbono) equivalente para el proceso termo químico.

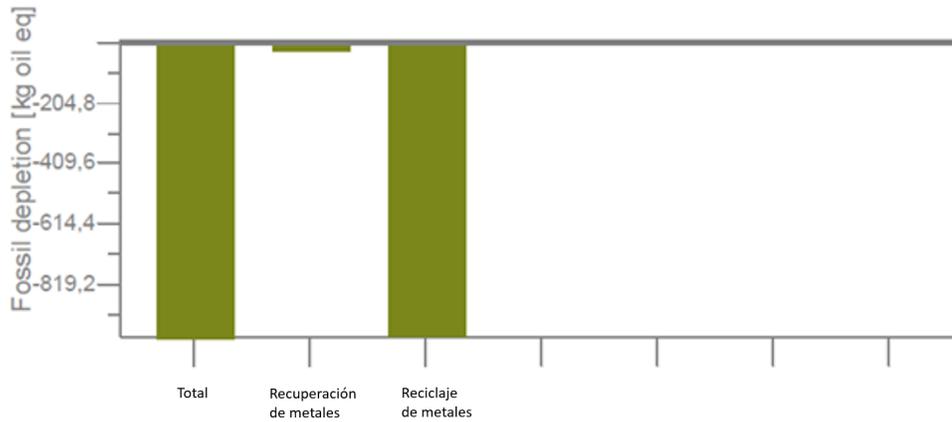


Figura 3.19: Agotamiento de energía fósil en Kg de Oil equivalente en el proceso termo químico.

Como se puede ver la Figura 3.19 este método permite ahorrar en el consumo de fuentes de energía fósil. En particular la principal fuente de ahorro viene del proceso de reciclaje del silicio.

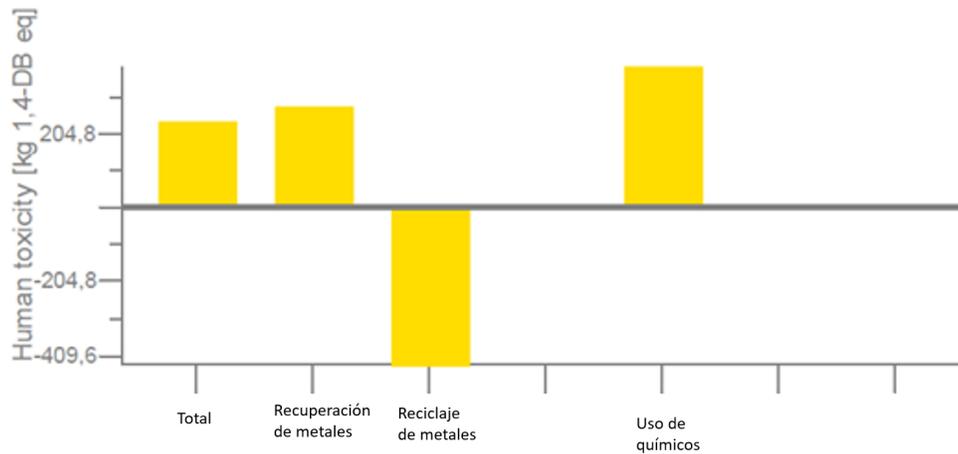


Figura 3.20: 1,4DB Toxicidad humana en Kg de 1,4 dichlorobenzene para el proceso químico.

Como se puede ver en la Figura 3.20 este proceso produce un aumento en la toxicidad humana que se debe principalmente al proceso de recuperación de metales y al uso de Tolueno [10].

En la siguiente sección se presenta un resumen de los gráficos anteriormente mostrados.

3.6. Resumen global

Tabla 3.6: Resumen global capítulo 3

Item	Método Mecánico	Método Térmico	Método Químico
Cambio climático [Kg CO ₂]	-361,44	-3145,7	-2798,43
Acidificación terrestre [Kg SO ₂]	-8,8	-14,1	-14,25
Agujero en la capa de ozono [CFC Kg]	4,10E-07	3,40E-08	3,44E-08
Agotamiento de energía fósil [Kg Oil]	-131,9	-1037,6	-997,75
Toxicidad humana [Kg 1,4DB]	-83,9	-149,6	230,9

Como resumen general, se puede ver que cada uno de estos modelos tiene ventajas e inconvenientes. Con respecto al método mecánico, su mayor dependencia a la red eléctrica lo hace ser más débil desde el punto de vista de la generación de CO_2 . Por otro lado, el método químico por su obvio uso de químicos, tiende a provocar una mayor toxicidad humana.

En términos generales se puede apreciar que el método térmico y el método químico son los que se comportan mejor para ser implementados en el contexto chileno.

Capítulo 4

Tiempo óptimo de reciclaje de paneles solares según su impacto medio ambiental

Con el propósito de responder a la pregunta ¿Cuándo es ambientalmente óptimo reciclar o reutilizar un panel solar? Se debe primero entender que, como ya se mencionó en los antecedentes, los paneles solares presentan obsolescencia y degradación. La clave por tanto de esta pregunta es hacer un análisis de ciclo de vida temporal.

4.1. Definición de paneles y ubicación

En esta sección se presentan el tipo de panel solar usado para el modelamiento y la zona geográfica considerada.

Para seleccionar el panel solar más representativo posible, se debe conocer el estado del arte de los paneles solares en el norte grande de Chile. Para tal propósito se le agradece al proyecto ATAMOS la información proporcionada.

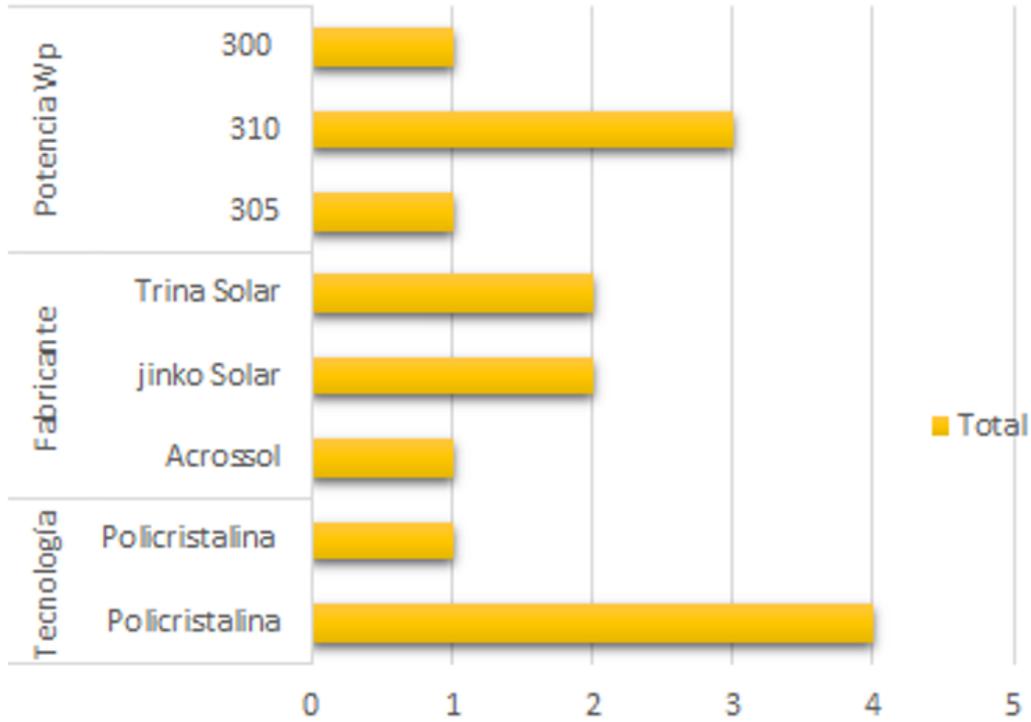


Figura 4.1: Información de módulos fotovoltaicos (Atamos).

La Figura 4.1 corresponde al estado del arte de los paneles solares en el norte grande de Chile, en ella se puede observar que la gran mayoría de estos paneles son policristalinos, de 310 Wp de la marca Trina Solar o Jinko Solar. Para realizar el análisis se toma por tanto un panel de 310 Wp, modelo Ja solar que posee aproximadamente 26 Kg de peso. En las siguientes Figuras 4.2 4.3 se observan los datos técnicos relevantes del panel. En las siguientes subsecciones se procede a calcular las curvas de degradación de los paneles solares, estos cálculos se dividen en dos grupos, "base rate" que corresponden a la degradación según manual y "Aumentada" según lo reportado gracias a la empresa Laboratorio Solar.

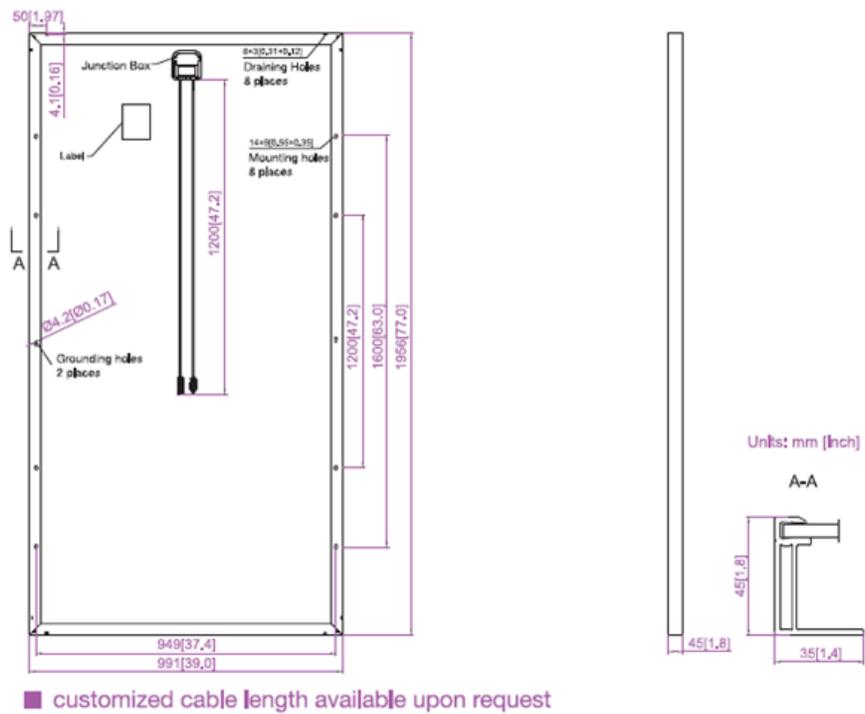


Figura 4.2: Información de las dimensiones módulos fotovoltaicos.

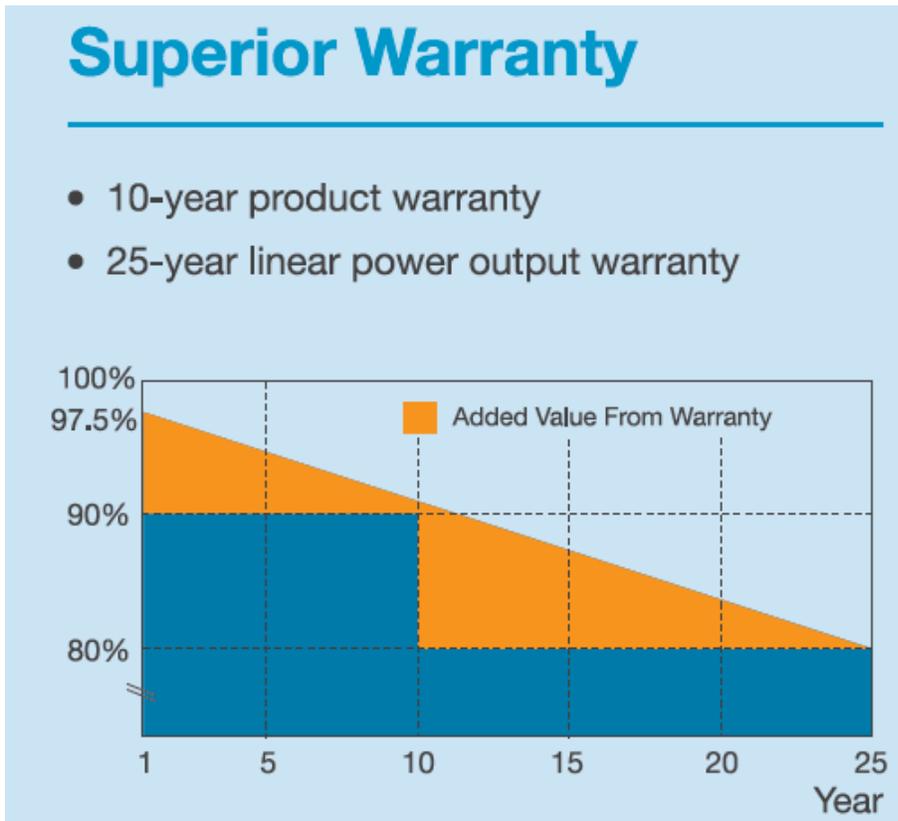


Figura 4.3: Información de la garantía de los módulos fotovoltaicos.

4.1.1. Generación de energía de 1000 Kg de Pv en el norte grande de Chile

Con el fin de simplificar el análisis, y para mantener la continuidad y coherencia en este trabajo, es que se decide por mantener la unidad funcional en 1000 Kg de paneles solares, en vez de cambiar a 1MW pico de energía solar, como es habitual en la literatura que se dedica a modelar plantas solares.

En segundo lugar se decide la ubicación en la cual está emplazada la supuesta planta de unidad funcional. En este estudio se decide por una localización real, la cual corresponde al emplazamiento de la planta el Romero cuyas coordenadas son -28,45 -70,78 [7].

Una vez se define la localización, mediante el uso del explorador solar [41] se obtiene el TMY (año meteorológico típico), el cual corresponde a una planilla con 8760 datos de radiación, los cuales corresponden a un año meteorológico típico de la zona seleccionada. Con ellos se confecciona la siguiente distribución 4.4

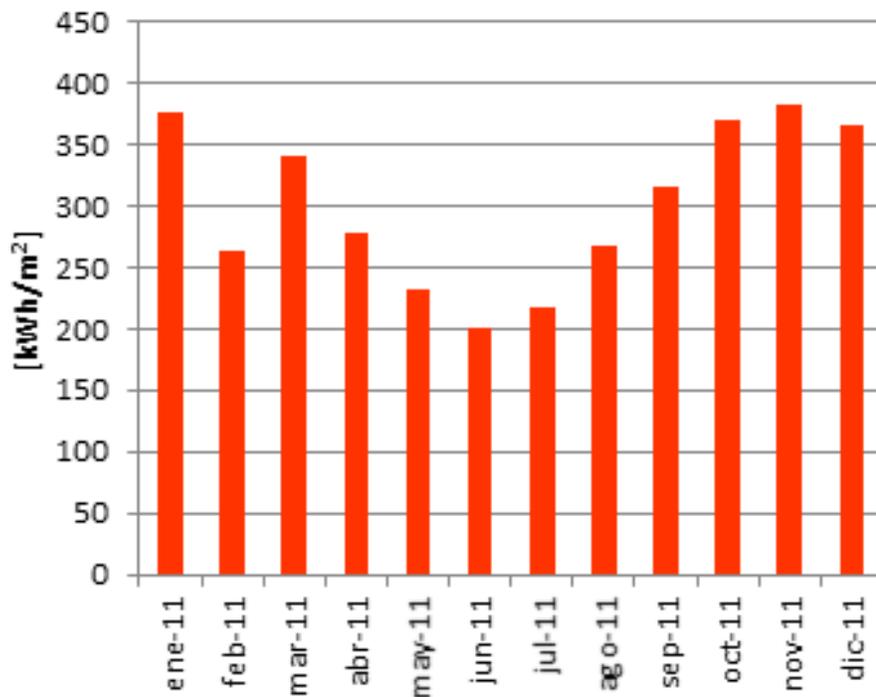


Figura 4.4: Distribución año meteorológico típico.

Paralelamente si se considera que cada panel es de 26 Kg, como se definió en la sección anterior y queremos solo 1000 Kg de paneles, y con el supuesto de que cada panel posee una potencia de 310 W pico, se obtiene por tanto como unidad funcional 39 paneles, con una potencia conjunta de 0,012 MWp. Como se puede observar en la subsección anterior el tamaño de las celdas solares es 156 mm x 156 mm por lo que el área ocupada por nuestra unidad funcional es de 0,00685 Ha.

Atreves del catálogo se observa ademas que la eficiencia del módulo es de 15,99 %, con un inversor recomendado de 500KW, con eficiencia del 97 %, y un performance ratio de 0,8 para la planta.

Con los datos anteriores se procede a calcular la energía generada en el año característico. Para ello, primero se calcula la declinación mediante la siguiente formula.

$$\delta = 23,75 \sin\left(\frac{360}{360,25}(N - 80)\right) \quad (4.1)$$

Se multiplica la radiación directa normal por el coseno de la declinación. Esta radiación se multiplica por el área efectiva calculada anteriormente, y por el rendimiento del módulo, del inversor y por coeficiente de performance de la planta. Se suman todos los resultados para cada hora del día de todo el año obteniendo que en un año típico la planta produce 21060,01 KWh/a.

4.2. Modelamiento de la producción energética con degradación a lo largo del tiempo

Dado que no se poseen todos los datos requeridos para implementar los modelos de degradación vistos en los antecedentes, y recopilados en la sección del estado del arte, se usa una novedosa aproximación que se puede ver en la publicación [18].

4.2.1. Degradación lineal (Base rate)

Para realizar esta estimación se usan los datos de la Figura 4.3, en ella se tiene una garantía de 25 años con un rendimiento del 80 %.

$$D = 1 - a * t \quad (4.2)$$

$$0,8 = 1 - a * 25 \quad (4.3)$$

$$a = 0,008 \quad (4.4)$$

La Figura 4.5 muestra la curva de degradación para este modelo.

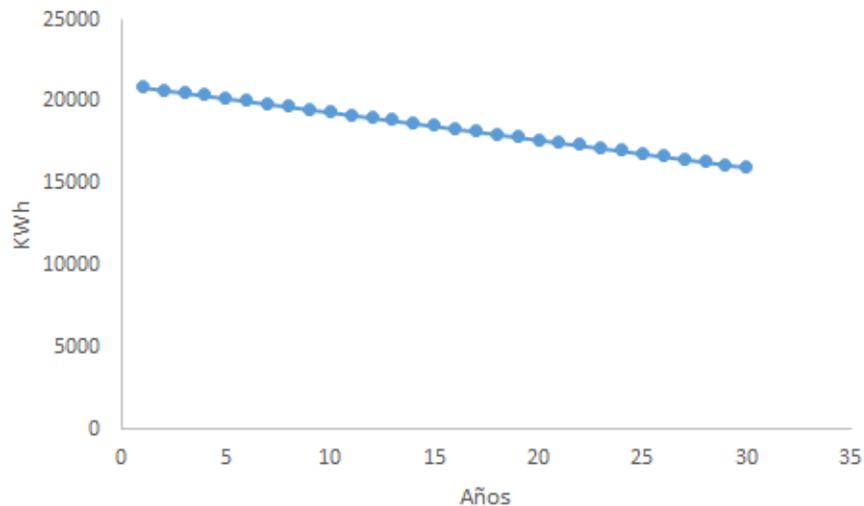


Figura 4.5: Degradación lineal base rate.

4.2.2. Degradación exponencial (Base rate)

Para realizar esta estimación se usan los datos que se pueden observar en las figuras anteriores, en la cual, se tiene una garantía de 25 años con un rendimiento del 80%.

$$D = e^{-b*t} \quad (4.5)$$

$$0,8 = e^{-b*25} \quad (4.6)$$

$$b = 0,008426 \quad (4.7)$$

La Figura 4.6 muestra la curva de degradación para este modelo.

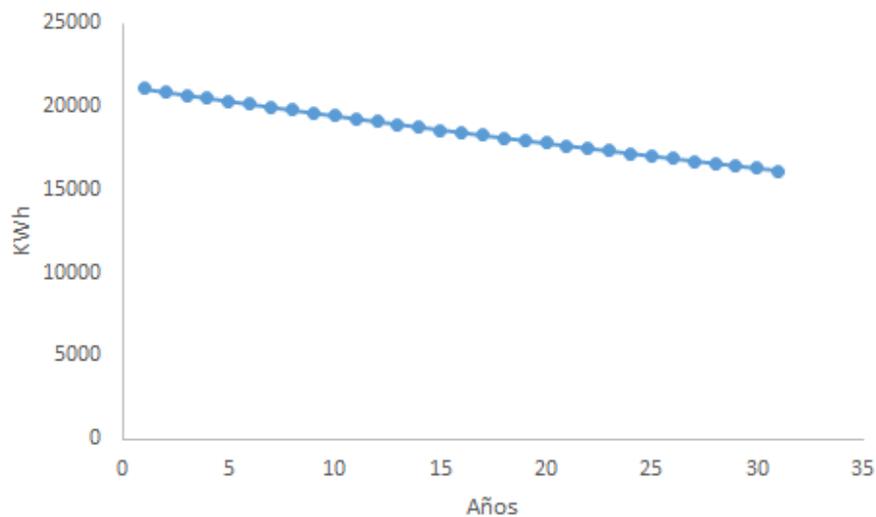


Figura 4.6: Degradación exponencial base rate.

4.2.3. Degradación JPL (Base rate)

Para realizar esta estimación se usan los datos que se pueden observar en las figuras anteriores, en la cual, se tiene una garantía de 25 años con un rendimiento del 80 % y primer año 2,5 % de degradación.

$$D = e^{-A*t^b} \quad (4.8)$$

$$0,975 = e^{-A} \quad (4.9)$$

$$0,975 = e^{-A} \quad (4.10)$$

$$0,8 = e^{-A*25^b} \quad (4.11)$$

$$A = 0,025318 \quad (4.12)$$

$$b = 0,676106 \quad (4.13)$$

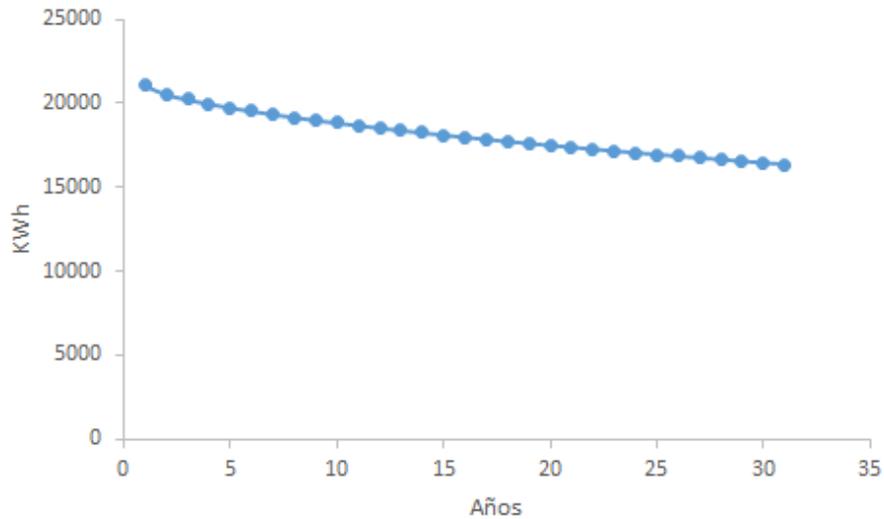


Figura 4.7: Degradación JPL base rate.

4.2.4. Degradación lineal (rate aumentado)

Para realizar esta estimación se usan los datos que se pueden observar en las figuras anteriores, en la cual, se tiene una garantía de 25 años con un rendimiento del 80%.

$$D = 1 - a * t \quad (4.14)$$

$$0,8 = 1 - a * 15 \quad (4.15)$$

$$a = 0,013333 \quad (4.16)$$

La figura 4.8 muestra la curva de degradación para este modelo.

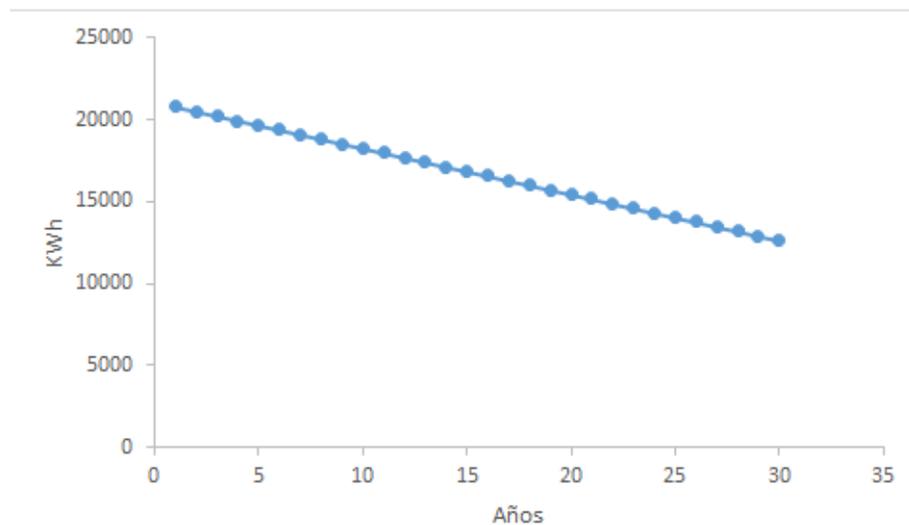


Figura 4.8: Degradación lineal rate aumentado.

4.2.5. Degradación exponencial (rate aumentado)

Para realizar esta estimación se usan los datos que se pueden ver en las figuras anteriores, en la cual, se tiene una garantía de 25 años con un rendimiento del 80 %.

$$D = e^{-b*t} \quad (4.17)$$

$$0,8 = e^{-b*15} \quad (4.18)$$

$$b = 0,014876 \quad (4.19)$$

La Figura 4.9 muestra la curva de degradación para este modelo.

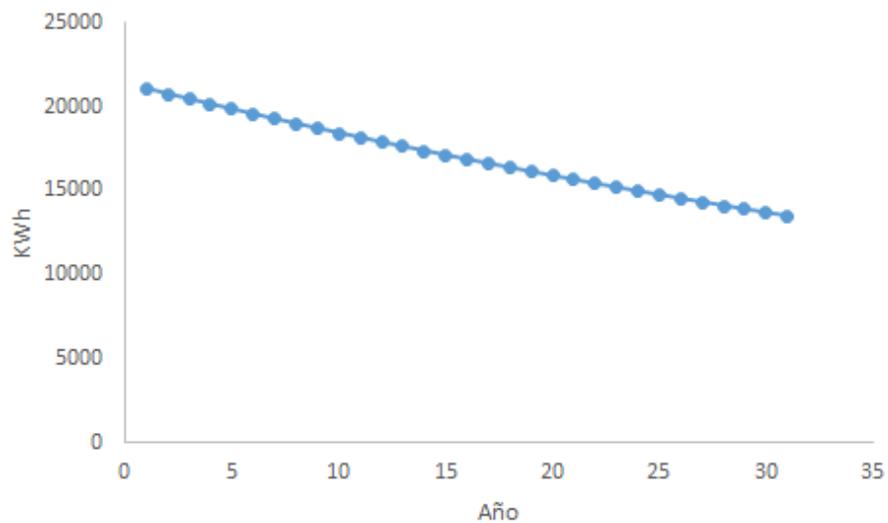


Figura 4.9: Degradación exponencial rate aumentado.

4.2.6. Degradación JPL (Typical rate)

Para realizar esta estimación se usan los datos que se pueden observar en las figuras anteriores, en la cual, se tiene una garantía de 25 años con un rendimiento del 80 % y primer año 2,5 % de degradación.

$$D = e^{-A*t^b} \quad (4.20)$$

$$0,975 = e^{-A} \quad (4.21)$$

$$0,975 = e^{-A} \quad (4.22)$$

$$0,8 = e^{-A*15^b} \quad (4.23)$$

$$A = 0,025318 \quad (4.24)$$

$$b = 0,8036344 \quad (4.25)$$

La Figura 4.10 muestra la curva de degradación para este modelo.

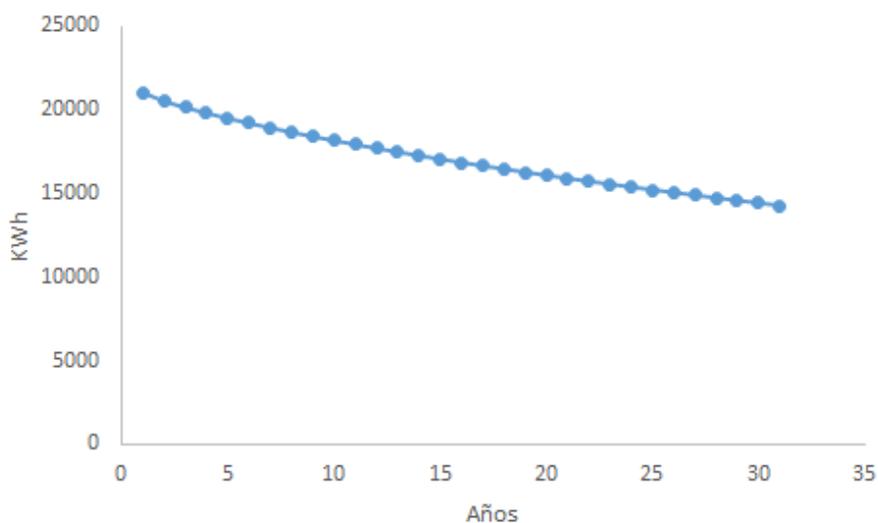


Figura 4.10: Degradación JPL rate aumentado.

En la siguiente subsección se presenta un resumen

4.2.7. Resumen de la energía producida después de 30 años

En la siguiente tabla 4.1 se muestra, a modo de resumen para entender como afecta la degradación, la producción de energía luego de 30 años, recordando que lo valioso para el estudio son las curvas de degradación encontradas.

Tabla 4.1: Energía producida luego de 30 aplicando degradación

Tipo de degradación	Energía producida MWh
después de 30 años	
Línea base	574,5
Línea base-exponencial	551,8
Línea base-JPL	542,4
Real-lineal	522,2
Real-exponencial	505,8
Real-JPL	508,7

En las siguientes figuras 4.11 y 4.12, se puede observar las curvas de producción de energía para el caso base, y el caso aumentado, con cada uno de los tres modelos de degradación utilizados.

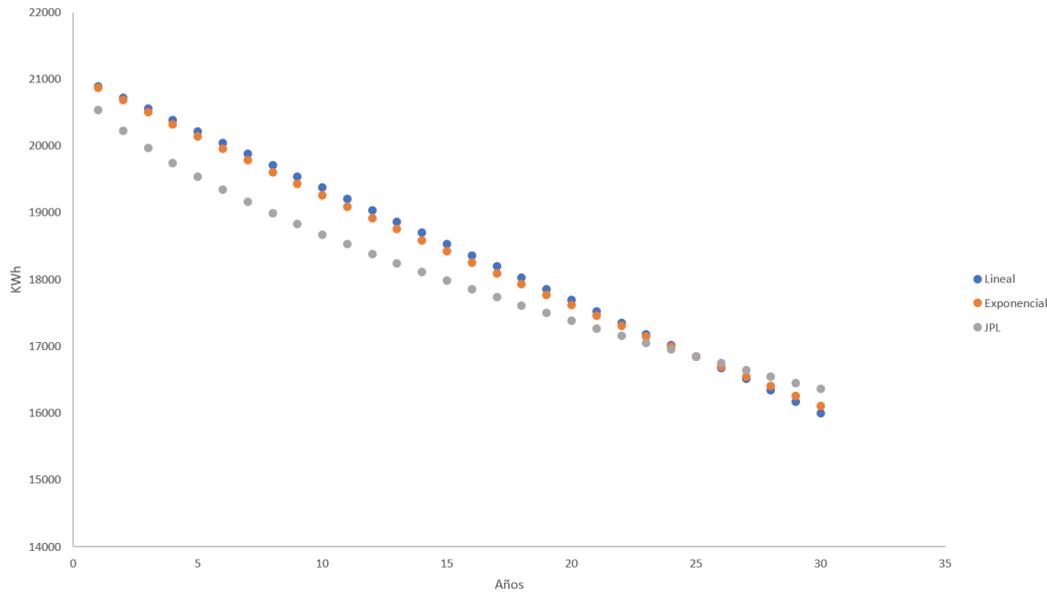


Figura 4.11: Curvas de degradación caso base.

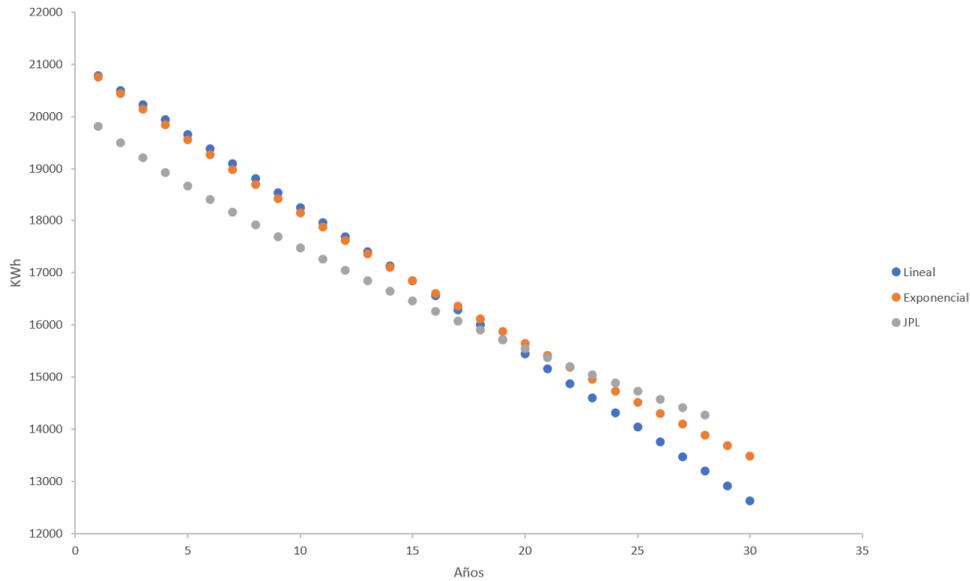


Figura 4.12: Curvas de degradación caso aumentado.

4.3. Modelamiento

La idea principal que se aplica en este capítulo, como se menciona en los antecedentes, es que un panel se puede reutilizar, reciclar, o desechar, dependiendo del estado de degradación en la que se encuentre. En la actualidad uno de los servicios más demandados por las plantas solares es de hecho, el tener la capacidad de reconocer estos estados, información que fue obtenida gracias a las entrevistas con la empresa **Laboratorio Solar**.

Dado que las plantas solares se diseñan para tener un rendimiento cercano al 90 %, es que se tienen las siguientes recomendaciones generales. Cuando la degradación es tal que el performance del panel es menor a 80 % que se recomienda ser aplicado un proceso de reciclaje de los componentes, cuando es mayor a 80 % pero menor que el 90 % se recomienda el reciclaje de la celda solar y cuando es superior al 90 % se recomienda una reutilización.

Si seguimos la secuencia anterior estamos minimizando el daño ambiental, estas recomendaciones están representadas por medio del proceso mecánico, térmico y termo químico respectivamente que se estudiaron en el capítulo anterior. Luego la pregunta que contestaremos es, si cuantificamos el cambio climático producido por la energía que genera nuestra planta de 1000 Kg. ¿Nos conviene producir infinitamente? O existirá un momento en el cual este patrón nos da un mínimo.

Para realizar lo anterior, se redefinen los límites del análisis de ciclo de vida. Ahora se considera que los paneles producen energía (y ocupan espacio y recursos hídricos también) y que a lo largo del tiempo se van degradando siguiendo el modelo más preciso que se ha visto en la sección anterior, el JPL, aplicando para la situación base y la aumentada, definidas también en la sección anterior.

4.3.1. Límite mecánico

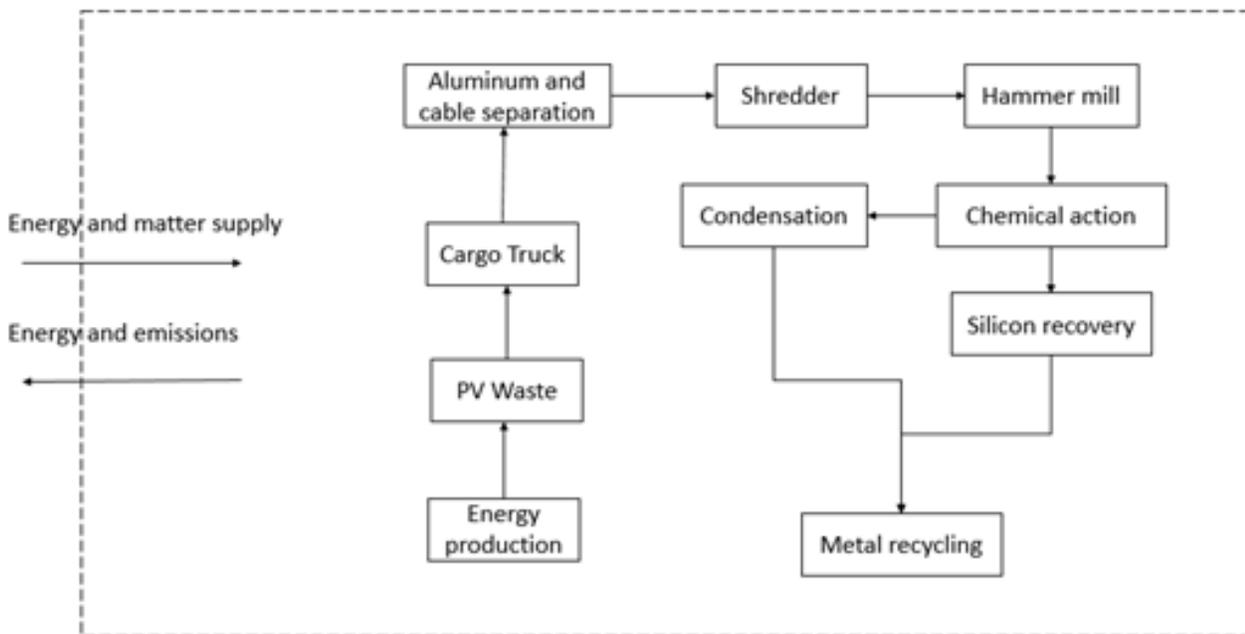


Figura 4.13: Esquema general de los nuevos límites y procesos para el análisis de ciclo de vida para la tecnología mecánica.

4.3.2. Límite térmico

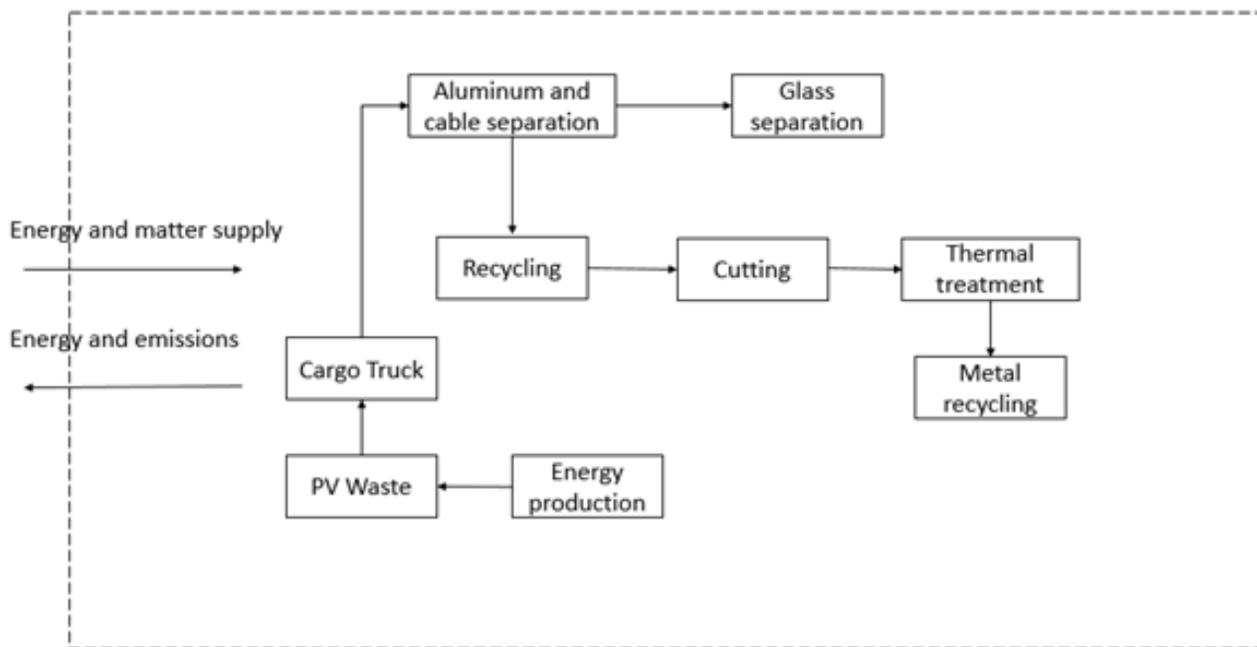


Figura 4.14: Esquema general de los nuevos límites y procesos para el análisis de ciclo de vida para la tecnología térmico.

4.3.3. Límite químico

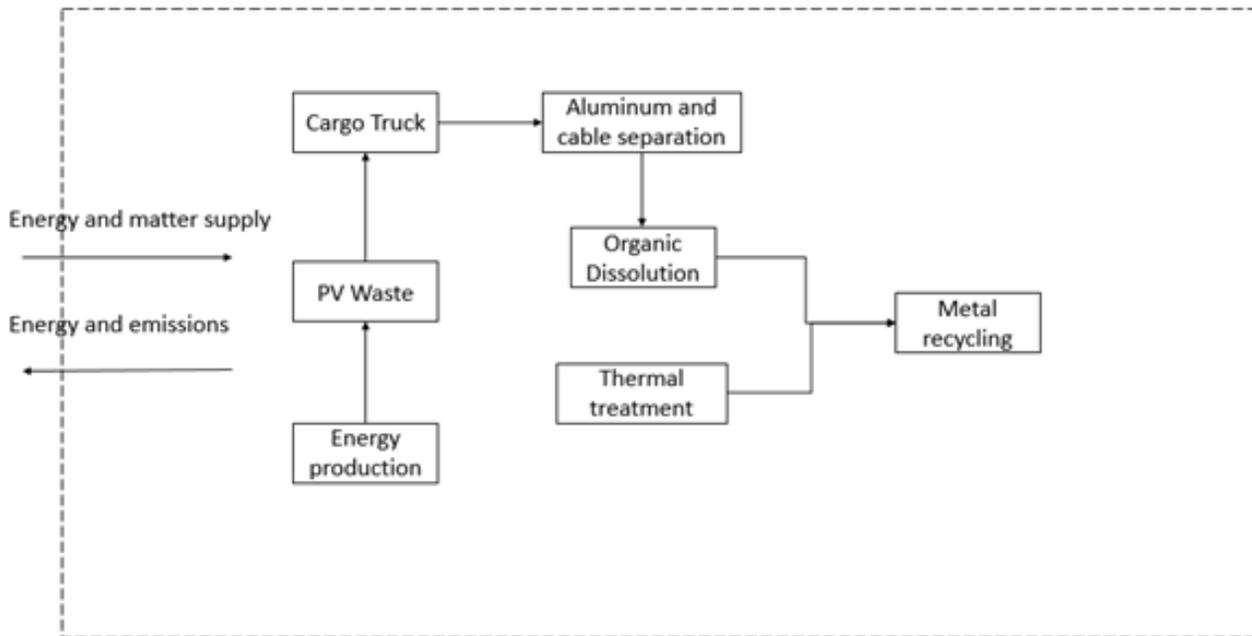


Figura 4.15: Esquema general de los nuevos límites y procesos para el análisis de ciclo de vida para la tecnología termo químico.

4.4. Resultados y discusión

Con los nuevos límites definidos y los inventarios que se mostraron en el capítulo anterior se procede a realizar un análisis de ciclo de vida temporal con saltos de tiempo de 5 años, (puede ser mas pequeño pero por razones de tiempo no se pudo hacer). Para cada inervarlo se calcula la energía producida por la planta hasta ese momento, y se procede a someterla a la secuencia de de reciclaje/reutilización descrita anterior, obteniendo el impacto medio ambiental producido en todo el proceso (generación mas reciclaje). Las siguientes Figuras 4.16 4.17 muestran los resultados obtenidos para el caso base y el aumentado de degradación.

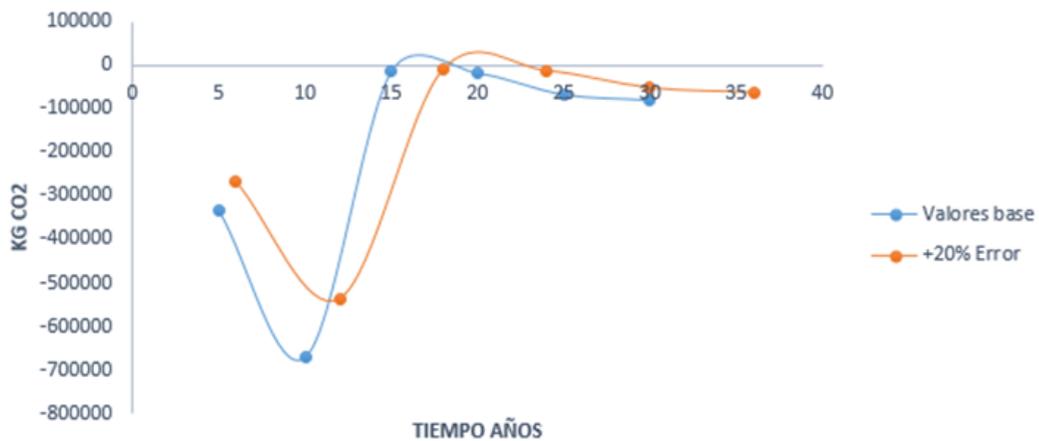


Figura 4.16: Tiempo óptimo de reemplazo JPL base.

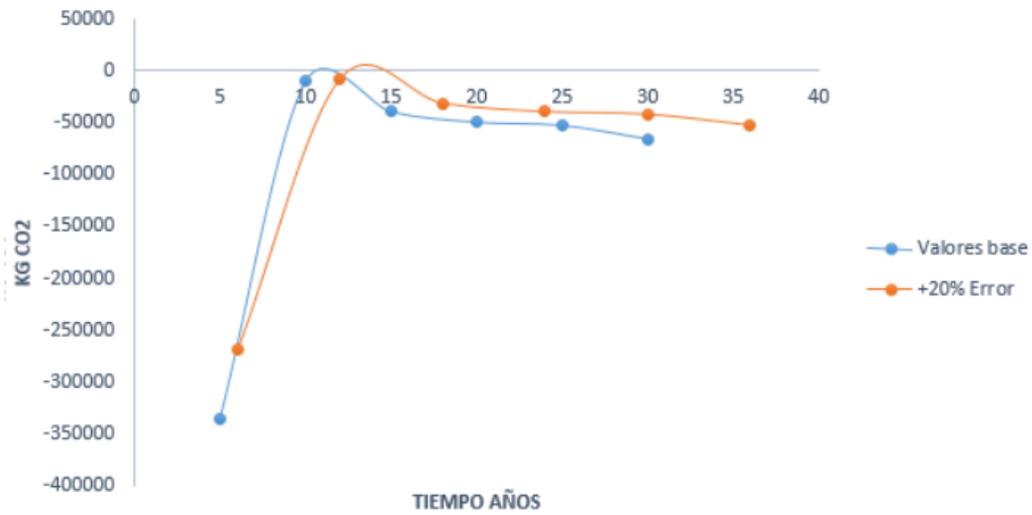


Figura 4.17: Tiempo óptimo de reemplazo JPL típico.

Como se puede observar en la Figura 4.16 el tiempo óptimo de reemplazo para minimizar el daño medio ambiental se encuentra entre los años 10 y 15, con error del 20 % [22], pues de mantener un panel solar durante mas años la producción de CO_2 que genera el realizar su reciclaje es mucho mayor que el de hacerlo durante aproximadamente en el año 15 y la energía extra generada no compensa esta diferencia.

Del mismo modo, para una degradación acelerada por las condiciones climáticas propias de nuestro territorio la figura 4.17 nos dice que el tiempo óptimo de reemplazo se encuentra entre 5 y 10 años.

Capítulo 5

Tiempo óptimo de reemplazo de paneles solares según la economía

En este capítulo se aborda la pregunta ¿Cuándo es conveniente realizar el reemplazo de un panel solar fotovoltaico desde el punto de vista privado? Para ello se utiliza la metodología del *Life cycle costing* o costos de ciclo de vida que es complementario al análisis de ciclo de vida.

El enfoque se divide en dos partes, la primera, el realizar un análisis de costo de ciclo de vida tradicional, recolectando la información necesaria para ello. La segunda es a partir de lo anterior, usando la metodología del *Equivalent Uniform Annualized Cost* para obtener el tiempo óptimo de reemplazo.

5.1. Costo de ciclo de vida

Para realizar el análisis de costo de ciclo de vida, primero se define la unidad funcional a la que se le aplica este procedimiento. Como es lógico, para mantener la coherencia de este trabajo, se decide por mantener la unidad funcional en 1.000 kg de panel solar. Dicho lo anterior, es importante hacer ver que es posible incurrir en el futuro en mejoras en este capítulo derivadas de los ahorros por economías de escala.

Una vez definido la unidad funcional, se procede a definir los costos y beneficios a los cuales incurre una planta generadora fotovoltaica a lo largo de toda su vida. La siguiente ecuación resume los costos y beneficios considerados [18].

$$LCC = Cost_{Comp} + Cost_{Inst} + Cost_{OM} + Cost_{Reple} - Residual_{PV} - Energy_{Sold} \quad (5.1)$$

En donde cada elemento representa el costo de compra de los activos (paneles, inversores, etc), el costo de instalación, el costo de operación y mantenimiento, el costo de reemplazo, el valor residual de los paneles y las ganancias por energía vendida a la red respectivamente

En la siguiente tabla 5.1 se observa un resumen del estado del arte de estos valores usados con sus respectivas citas, con respecto al precio de la energía, se utilizo el promedio del precio spot (costo marginal por inyectar un kWh). En la siguiente subsección se desarrolla mas la información del costo de ciclo de vida.

Tabla 5.1: Resumen del estado valores económicos

Item	Cantidad	Unidad	Referencias
Compra panel	6825	USD/UF	[2]
Compra inversor	300	USD/UF	[11]
Costos de intalacion	3600	USD/UF	[1]
Costo de mantenimiento y operación	25-35	USD/KWp-año	[44]
Reemplazo inversor	3,84	USD/KWp-año	[44]
Valor residual paneles	-	USD/UF	[18]
Precio de la energía	0,06	USD/KWh	-

5.1.1. Costos de ciclo de vida resultados y discusión

Recordando que, si se mantiene la unidad funcional, la cantidad de paneles a evaluar es 39. Por lo cual tenemos $39 * \$175 = \$7,605$ como el costo inicial de compra por los paneles solares, más \$300 por la compra del inversor. Además se ha decidido por un valor de tasa de descuento privada del 10 %, y una inflación del 2,5 %. Los resultados serán realizados con los dos principales modos de degradación que se discuten en este documento, JPL base y JPL real.

En la siguiente La figura 5.1 se puede observar un resumen del costo de ciclo de vida de esta configuración. Por otro lado, en la figura 5.2 se puede observar el costo de ciclo de vida para una degradación real acelerada.

Como se puede notar, los costos más altos son los derivados de la compra de los activos. Por otro lado, los costos de operación y mantenimiento a lo largo del tiempo no son despreciables, como se ha insinuado sobre todo si nos remontamos a los inicios del uso de esta tecnología.

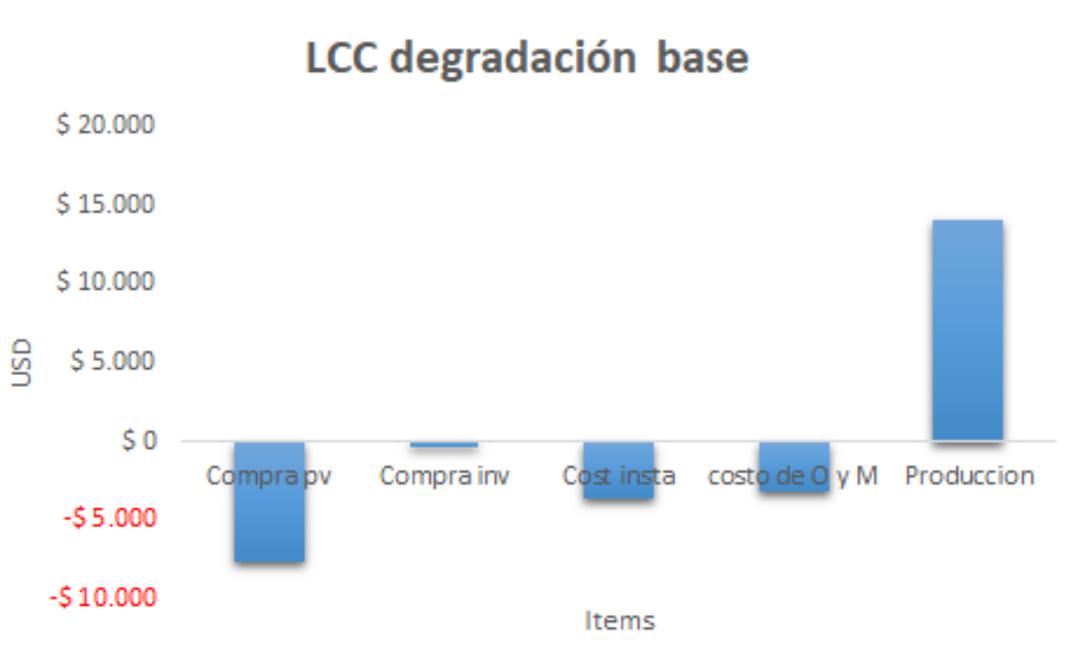


Figura 5.1: Costo de ciclo de vida degradación base.



Figura 5.2: Costo de ciclo de vida degradación aumentada.

5.2. Resultados CAUE

Una vez desarrollados los costos de ciclo de vida, se procede a utilizar la metodología los costos anuales uniformes equivalentes para encontrar un momento de reemplazo. Para poder por tanto realizar esto, se deben considerar ahora los siguientes costos: Salvamento de equipos y costos de reemplazo de paneles.

Los supuestos tomados en consideración son los siguientes: el valor de salvamento sigue la tendencia de la degradación del panel hasta que este llega al valor de rendimiento crítico 0.9, momento en el cual ya no tiene valor. Por otro lado, el costo de reemplazo es cero hasta el año 10 según lo informado en la garantía del equipo. Además, por lo revisado en [44], el costo de mantenimiento aumenta desde 25 USD/kWh-año en estado ideal hasta 35 USD/kWh-año y se toma como supuesto de esta memoria que esta fluctuación sigue la forma de la curva de degradación.

En el siguiente gráfico 5.3 se muestra el resultado obtenido para un modelo de degradación base. Como se puede observar, a partir del año 18 se recomienda en términos económicos, realizar el recambio de los paneles solares. Además en el gráfico 5.4 se puede observar el mismo análisis aplicado a la degradación JPL real, en este caso, el tiempo óptimo se ha corrido hacia la izquierda y es de 16 años.

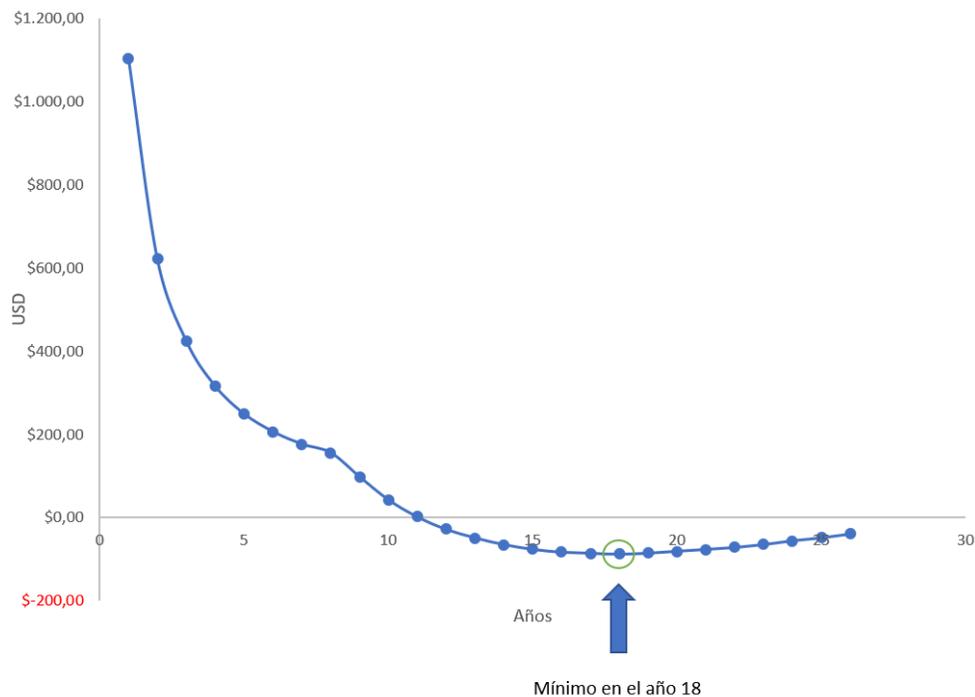


Figura 5.3: Tiempo óptimo de reemplazo económico degradación JPL Base.

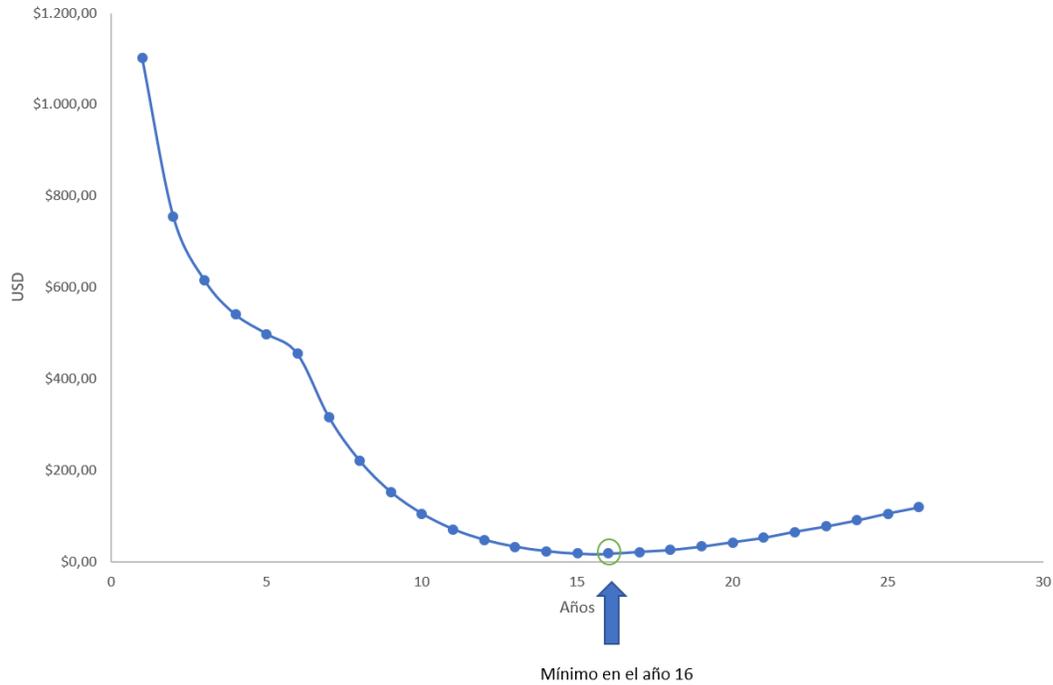


Figura 5.4: Tiempo óptimo de reemplazo económico degradación JPL aumentada.

5.2.1. Análisis de sensibilidad y discusión

En esta sección se presenta un análisis de sensibilidad sobre el tiempo óptimo de reemplazo de paneles solares según los costos de ciclo de vida. Se procede a variar en *Ceteris Paribus* en un 10 % las principales variables, obteniendo un rango de valores entre los cuales se mueve este momento de reemplazo. Los valores que se estudian son costo reemplazo inversor, precio de la energía, costo de mantenimiento y operación de los paneles, costo de compra de los paneles, y costo de compra inversores.

Tabla 5.2: Análisis de sensibilidad momento óptimo de reemplazo

Ítem	Tiempo años
Costo reemplazo inversor	18-18
Precio de la energía	16-19
Costo de M y O	17-19
Costo compra panel	19-16
Costo compra inversor	18-18

Como se puede observar en la tabla 5.2, los valores que más afectan este resultado son el precio de venta de la energía, y los costos de mantenimiento y operación, por lo que la degradación en los paneles puede llegar a ser crítico en la toma de este tipo de decisiones. Por otra parte, este resultado muestra una diferencia de al menos 3 años con respecto al momento óptimo de reciclaje desde el punto de vista medio ambiental.

Capítulo 6

Modelo de negocios para el reciclaje de paneles solares

En este capítulo se resume de manera simplificada la noción para realizar un modelo de negocios cuyo objetivo sea el reciclaje y la reutilización de paneles solares.

Para cumplir con el objetivo anterior, este capítulo se divide en diferentes secciones, las cuales ayudan a tener una visión lo más completa posible del modelo de negocios, partiendo desde lo más general hasta lo más detallado con los flujos de caja propuestos.

6.1. Propuesta de valor y descripción del modelo de negocios

En la actualidad, las plantas solares fotovoltaicas están tomando conciencia de su rol en la sociedad como un agente de cambio hacia una industria más verde, es por ello por lo que la gestión de sus residuos toma cada vez mayor protagonismo. La ley Rep 20.920 clasifica a los paneles solares como desechos electrónicos que deben ser reciclados. Con el fin de cumplir con la legislación, en la actualidad se valora mucho tener la capacidad de detectar cuando un panel debe ser limpiado, reparado, reutilizado o reciclado, es por ello por lo que se presenta el siguiente esquema para un modelo de negocios.

La propuesta de valor consiste en un enfoque personalizado al cliente para gestionar el estado de salud de sus paneles solares, con el propósito de identificar políticas con el fin de optimizar el proceso de limpieza, reutilización, reparación y reciclaje.

En resumen se plantea un modelo de negocios en el cual se realice un contrato con las plantas fotovoltaicas para proveer los siguientes servicios:

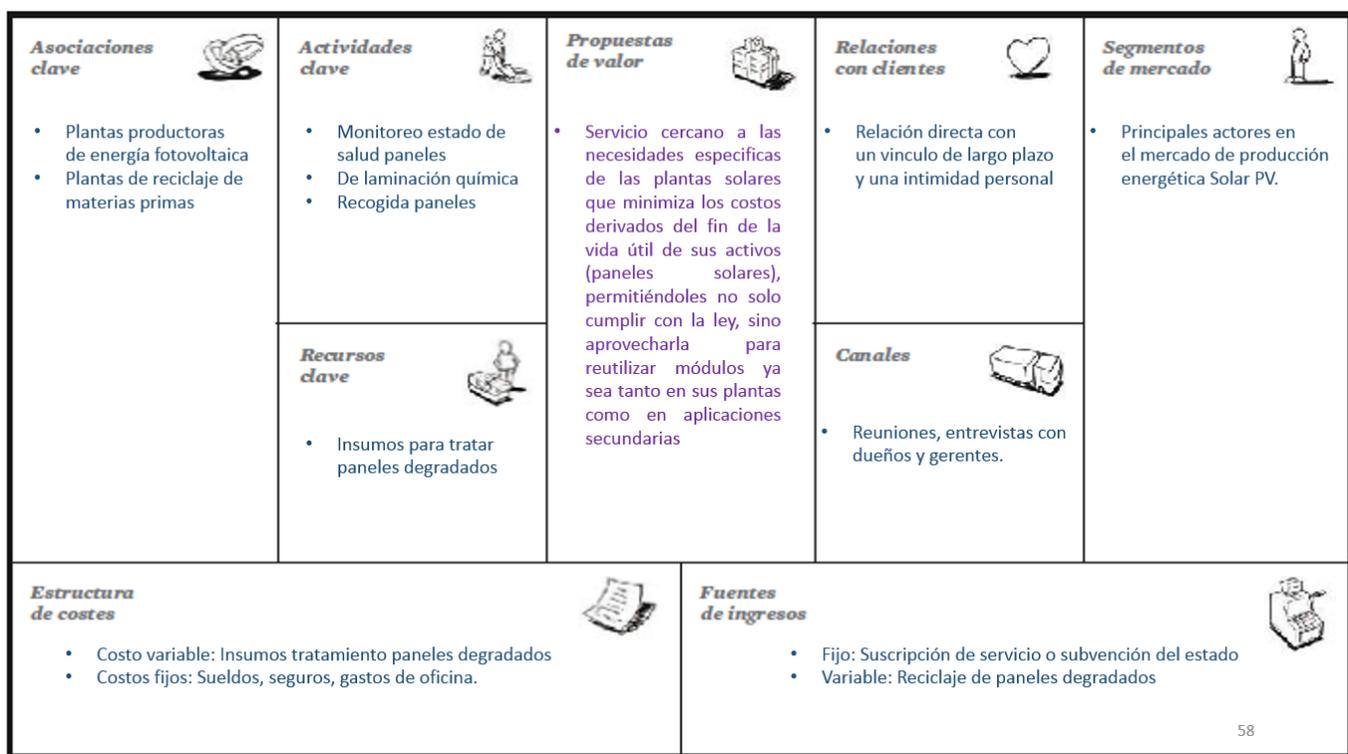
- Control del inventario de paneles solares degradados en la planta.
- Control de salud de los paneles.
- Recogida de paneles, con compromiso de reparar si es posible y reincorporar a la planta o reciclar si es necesario.

Con respecto al corazón de este modelo de negocio, el reciclaje y la reutilización, una vez que se identifican paneles que no están en condiciones para seguir operando en la planta fotovoltaica, se procede a enviarlos a una planta separadora, previo examen mediante la curva IV en terreno estos paneles son separados en dos clases, reparar y reciclar. Los módulos seleccionados para reparar son etiquetados y separados para examinar su caso de manera particular. Estos casos son: cambio de caja de conexiones, o cambio de marco y vidrio. Para el primero solo se realiza un cambio en la caja de conexiones, en cambio en el segundo se debe realizar un proceso termoquímico para separar la EVA del vidrio.

Los que son seleccionados para reciclaje son llevados a un proceso termoquímico en el cual se separa el vidrio y los metales. Al final del proceso los metales y vidrio son vendidos a empresas de reciclaje mayores.

En la siguiente pagina se presenta de forma resumida y gráfica el esquema de modelo de negocios para el reciclaje y reutilización de paneles solares fotovoltaicos que se describe.

En la figura 6.1 se observar ver el esquema representativo del modelo de negocios propuesto. En las siguientes líneas se procede a explicar en detalla cada uno de los puntos expuestos y finalizar con análisis financiero.



58

Figura 6.1: Representación gráfica en lienzo del modelo de negocios para el reciclaje de paneles solares en Chile.

6.1.1. Demanda

En la actualidad, como se puede observar en la figura 6.2 en Chile se tiene una demanda que a partir de 2030 crecerá de manera exponencial [46]. La principal zona geográfica donde se encuentran emplazadas las plantas productoras es en el norte grande, como se especificó en el capítulo de antecedentes, siendo por tanto crítica esta zona. Actualmente no existe ninguna empresa que se dedique al reciclaje de paneles solares en Chile. La reciente ley rep 20.920 establece la obligatoriedad de reciclar y tratar como desechos electrónicos peligrosos los paneles solares fotovoltaicos, por tanto ya se comienza a ver un emergente mercado para el manejo de estos desechos.

Year	2016		2020		2030		2040		2050	
Scenario (regular-loss/early-loss)	regular loss	early loss	regular loss	early loss	regular loss	early loss	regular loss	early loss	regular loss	early loss
Latin America and Caribbean										
Brazil	10	10	40	100	2,500	8,500	18,000	160,000	300,000	750,000
Chile	150	200	250	1,500	4,000	40,000	70,000	200,000	400,000	500,000
Ecuador	10	15	15	100	250	3,000	5,000	13,000	25,000	35,000
Total World	43,500	250,000	100,000	850,000	1,700,000	8,000,000	15,000,000	32,000,000	60,000,000	78,000,000
Sum of Leading Countries	28,060	187,255	72,160	668,500	1,352,850	6,442,500	12,252,000	26,105,000	48,685,000	67,975,000
Rest of the World	15,440	62,745	27,840	181,500	347,150	1,557,500	2,748,000	5,895,000	11,315,000	10,025,000

Figura 6.2: Volúmenes estimados de residuos acumulados de paneles fotovoltaicos al final de su vida útil para Chile en toneladas [46].

Las principales empresas que se dedican a producir energía usando plantas solares fotovoltaicas se presenta en la tabla 6.1.

Tabla 6.1: Principales empresas con portafolio fotovoltaico en Chile.

Empresa	Capacidad MW	Toneladas
Enel	459	41310
EDF	261	23490
AME	115	10350
Cerro Dominador	100	9000
AES Gener	22	1980
Prime Energie	9	810
Engie	8	720

6.1.2. Relación con el cliente y segmento

La relación con el cliente es la manera en la cual esta supuesta compañía pretende diferenciarse de su posible competencia. En la actualidad, las compañías europeas y norteamericanas cuyo objetivo es reciclar paneles solares montan una recicladora y recolectan paneles solares degradados de diferentes plantas. Este modelo de negociases es rentable siempre cuando exista un gran mercado, pues tiene barreras de entrada bajas que solo dependen de la inversión inicial.

En el modelo de negocios que se propone en estas paginas, se identifica primeramente que Chile es un mercado muy pequeños, solo basta comparar la población de este país con Norteamérica. Además se identifican otros "dolores" que son conexos al reciclaje y reutilización de paneles solares. La pregunta que una planta se hace en este momento es ¿Cuándo debo reciclar, reparar o reutilizar mis activos?

Ante lo que se expone en el párrafo anterior, es que la idea de atacar a todo el segmento de plantas solares en Chile para el reciclaje de sus activos no tiene sentido. Lo que si posee sentido es formar alianzas con Enel, EDF o AME entre otras (ver tablas 6.1) y ofrecer una relación con una intimidad personal, para manejar sus datos de operación con el fin de monitorear el estado de salud de sus paneles y con ello dar soporte fundamental para la toma de decisiones de operación. Y por último, debe ser una relación de largo plazo para beneficiarse cuando cambie la tendencia, y el volumen de paneles en desuso sea significativo, y con ello al identificar un panel que debe ser reciclado, reciclarlo y dar el servicio completo a la planta fotovoltaica para que cumpla con la ley rep.

6.1.3. Fuente de ingresos

Una vez que se ha definido la relación con el cliente y la propuesta de valor, es ahora posible hablar sobre la fuente de ingresos.

La fuente de ingresos se dividen en dos actividades claves, primero:

Gestión del estado de salud de los activos de la planta solar. Este es un servicio constante que requiere monitorear los paneles 24x7 mediante una aplicación conectada a la planta que lee las condiciones ambientales y de producción.

Lo descrito en el párrafo anterior tiene muchas similitudes a modelos como Netflix tanto en tecnología (IA y aprendizaje profundo) como en aplicación y forma de ejecutarse, por lo que se propone un flujo de ingresos constante a modo de pago por suscripción a este servicio. Es decir, una empresa, por ejemplo Enel, paga una cuota anual por la implementación y el uso de este servicio que se brinda.

La segunda fuente de ingresos corresponde al proceso mismo de reciclaje y reutilización de paneles solares. Una vez se detecta un panel solar que se encuentra en malas condiciones de operación y debe ser reparado o reciclado, se procede a realizar un proceso químico de reciclaje (o reutilización), con el fin de reparar y dar una segunda vida al activo (si es posible), vendiéndolo de vuelta a la planta solar, o reciclar y vendiendo las materias primas obtenidas de este proceso. Las principales materias primas obtenidas son vidrio, silicio (silicio grado electrónico) y aluminio.

En la siguiente subsección se presentan las actividades claves que permiten generar valor.

6.1.4. Actividades claves

Toda empresa debe identificar las actividades claves que le generan valor, y que sin ellas la empresa como tal no existe. Como ejemplo en el caso de Mcdonald, aunque sea una cadena de venta de hamburguesas, la principal fuente de ingresos de la compañía proviene de la compra y venta de bienes raíces (Los locales de comida rápida), por lo que su actividad principal no es hacer hamburguesas, sino comprar, construir, arrendar y vender sus franquicias.

En el caso del modelo de negocios propuesto, aunque el gancho para poder iniciar negocios es el monitoreo del estado de salud de los paneles solares ,y fundamental es la eficacia de este. Su mayor fuente de ingresos debe venir del proceso de reciclaje y reutilización de los paneles solares.

Para poder reciclar un panel solar es fundamental el transporte y el proceso de reciclaje en si mismo.

En resumen, las principales actividades de la empresa son:

- Monitoreo del estado de salud de los paneles solares: Pues es el gancho de entrada para ofrecer otros servicios.
- El transporte de paneles solares a través del norte de Chile: Pues es una fuerte barrera de entrada a otros competidores y si es mal ejecutado implica la quiebra inmediata.
- Reciclaje y reutilización de paneles solares: Pues corresponde potencialmente a la mayor fuente de ingresos.

Los recursos claves para este modelo de negocios son: los materiales necesarios para procesar termoquímicamente los paneles, los camiones que son necesarios para proveer transporte, las herramientas analíticas necesarias para poder examinar la curva IV de los módulos y con ello dar una recomendación del estado de salud de los paneles.

Con respecto a las actividades claves, estas son dos, la principal que es el reciclaje y reparación de paneles y la secundaria el monitoreo de los paneles en las plantas.

6.1.5. Recursos claves y asociaciones claves

Una vez que se han observado las actividades claves, es muy simple identificar los recursos claves.

En primer lugar, con el fin de hacer el monitoreo del estado de salud de los paneles solares, es necesario contar con el adecuado desarrollo de software. Para lo cual se propone el uso de la librerías tales como Tensorflow o Keras de Python la cual es gratuita. Además, se necesita hardware, tales como tarjetas gráficas de la marca nvidia, camaras termograficas, discos duros externos, y drones de ser necesarios.

Con respecto al proceso de reciclaje propiamente tal de los paneles solares, es indispensable como se comentó en la subsección anterior tener resuelto el problema de transporte de estos, por lo que contar con el transporte es fundamental. Además, para reciclar paneles solares es necesario contar con los químicos necesarios y las medidas de protección adecuadas.

Por ultimo lo más importante es el recurso humano, personas capacitadas para poder llevar a cabo cada una de las tareas mencionadas con anterioridad.

Con respecto a las asociaciones claves, es de vital importancia la búsqueda de alianzas con las distintas empresas que compran componentes reciclados, para poder obtener un flujo de dinero por la venta de estos.

Las principales empresas que potencialmente pueden estar interesadas en comprar los productos del reciclaje de paneles solares MetaLum, Entaena, Cristalería Chile, Cristalería Toro, CopoSur.

En la siguiente subsección se presenta el mecanismo por el cual se pretende hacer llegar la propuesta de valor a los clientes.

6.1.6. Canales

Los canales de comunicación que se proponen para este modelo de negocios son principalmente las entrevistas con los gerentes y encargados de las plantas generadoras, en especial, las de Enel, EDF y AME con el fin de escuchar y ver sus "dolores" dar solución mediante la empresa a estos. Además en la subsección anterior, la relación con el cliente se propone como cercana con una proximidad en primera persona, via mail o llamadas para entender de forma personalizada las inquietudes y dudas, y así tener la capacidad u oportunidad para mejorar la experiencia.

En la siguiente sección se presenta la estructura de costos e ingresos y se realizar el análisis financiero.

6.2. Análisis financiero

En esta sección se presenta una evaluación financiera para ver la factibilidad del modelo de negocios propuesto que se dedica a reciclar paneles solares en Chile. Por razones de simplificación del problema, no se abordara en una primera instancia la ganancia por suscripción o abonado a servicio de monitorización, pues se requiere mayor información para desarrollarla a plenitud.

6.2.1. Estimación de la demanda

Para poder estimar la demanda anual en toneladas, se procede a utilizar la información proporcionada por la agencia internacional de energías renovables, IRENA como se puede observar en la figura 6.2. Como en la tabla se presentan datos desde el año 2016, con saltos temporales de 10 años hasta el 2050, se calcula la ecuación que mejor represente la posible tendencia para interpolar los años de en medio.

6.2.2. Inversión

Compra de activos

Como se puede intuir dentro de los componentes de la inversión el grueso del monto lo ocupan tanto el centro de acopio como los camiones $3/4$. Desde el punto de vista práctico se ha seguido el ejemplo de las empresas ya existentes que se dedican al reciclaje en Chile, en particular de [40]

Además, es necesario una bañera-reactor que permita la manipulación de los paneles con los químicos que se utilizan. Y por último, implementos de seguridad para el personal.

La siguiente tabla 6.2 se observan los ítems que corresponden a la inversión inicial.

Tabla 6.2: Cuadro de inversión inicial

Item	Valoración CLP
Centro de acopio	\$80.000.000
Camion 3/4	\$12.500.000
Respiradores	\$1.500.000
Gafas	\$20.000
Guantes	\$20.000
Buso	\$40.000
Bañera_Reactor	\$5.000.000

Financiamiento

En general, al financiar un proyecto se busca encontrar el punto que minimice el riesgo y aumente el valor de la empresa, entre financiar con capital propio o mediante apalancamiento. El primero tiende a disminuir el valor de la empresa y a exigir mayores tasas de retorno, mientras el segundo genera un mayor riesgo de default. Por otro lado, es posible tener un financiamiento compartido con Corfo gracias al valor social que posee este proyecto.

Se decide realizar dos flujos de caja, uno para una alternativa de financiamiento totalmente propio, y otro con un financiamiento compartido con 50 % de crédito y otro 50 % de patrimonio propio.

En la siguiente tabla 6.3 se observa el valor del posible préstamo, cuya tasa de interés anual que compone anualmente es de 10,93 % el cual fue obtenido del Informe Público de Garantías Corfo del 28 de febrero de 2019.

Tabla 6.3: Préstamo con garantía Corfo

	año 0	año 1	año 2	año 3	año 4	año 5
Amortización		\$9.975.661,61	\$11.066.001,43	\$12.275.515,38	\$13.617.229,21	\$15.105.592,37
Interés		\$6.780.972,00	\$5.690.632,19	\$4.481.118,23	\$3.139.404,40	\$1.651.041,25
Cuota	\$16.756.633,61	\$16.756.633,61	\$16.756.633,61	\$16.756.633,61	\$16.756.633,61	\$16.756.633,61
Saldo inicial	\$62.040.000	\$52.064.338	\$40.998.337	\$28.722.822	\$15.105.592	\$0

Costos fijos

Los costos fijos que se consideran son administrativos y de empleados. Al año se consideran 840.000 CLP para gastos de oficina, 900.000 CLP para un contador, además se contrata un seguro contra incendios cuyo valor es de aproximadamente 500.000 CLP anual. y por último se incluye el sueldo de un mánager y de los trabajadores.

En la siguiente tabla 6.4 se resume la estructura de costos fijos.

Tabla 6.4: Costos Fijos

Ítems	Costos Anuales
Gastos de oficina	\$840.000
Mánager	\$10.000.000
Contador	\$900.000
Seguro	\$500.000
Trabajadores	\$20.000.000
Total	\$32.240.000

Costos Variables

Los costos variables tienen que ver con el uso de materiales para poder hacer el reciclaje y reutilización de paneles solares, en este sentido, se propone la siguiente 6.5 estructura de costos con los distintos insumo necesarios, que ya se han explicado en capítulos anteriores.

Tabla 6.5: Costos Variables

Insumos	CLP/t
HF	\$69.619
HNO ₃	\$17.404,75
H ₂ S ₀ 4	\$20.885,70
CH ₃ COOH	\$41.771,40
Tolueno	\$90.504,70
Gasolina	\$20.000
Total	\$260.186

6.2.3. Ingresos

Con respecto a los ingresos, se utilizan los datos de precios spot de la compra de vidrio, aluminio y silicio según recomienda [9]. La siguiente la tabla 6.6 muestra los valores venta por tonelada.

Tabla 6.6: Estructura de ingresos

Material	CLP/t
Silicio	\$626.859
Aluminio	\$1.044.315,00
Vidrio	\$208.948,50

Flujo de caja con financiamiento 100 % propio

En esta sección se presenta el flujo de caja con un 100 % de financiamiento propio 6.7 y 6.8, se toma como tasa de descuento inicial un 10 % por ser la tasa usada en proyectos de generación eléctrica en Chile.

Tabla 6.7: Flujo de caja con 100 % de financiamiento propio parte 1

Año	2019	2020	2021	2022	2023
Ingresos	\$0,00	\$34.249.460,85	\$159.259.992,95	\$284.270.525,06	\$409.281.057,16
Egresos	\$0,00	\$-58.258.555	\$-153.226.281	\$-248.194.007	\$-343.161.732
Ganancias/Pérdidas de Capital	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Pago de Intereses por Créditos	\$0,00	\$-6.780.972	\$-5.690.632	\$-4.481.118	\$-3.139.404
Depreciaciones Legales	\$0,00	\$-5.357.142,86	\$-5.357.142,86	\$-5.357.142,86	\$-5.357.142,86
Pérdidas del Ejercicio Anterior	\$0,00	\$0,00	\$-40.765.727,76	\$-10.722.921,41	\$0,00
Utilidad Antes de Impuesto	\$0,00	\$-36.147.209,01	\$-45.779.790,60	\$15.515.336,06	\$57.622.777,65
Impuesto de Primera Categoría	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$-2.637.607,13	\$-9.795.872,20
Utilidad Después de Impuestos	\$0,00	\$-36.147.209,01	\$-45.779.790,60	\$12.877.728,93	\$47.826.905,45
Depreciaciones Legales	\$0,00	\$5.357.142,86	\$5.357.142,86	\$5.357.142,86	\$5.357.142,86
Pérdidas del Ejercicio Anterior	\$0,00	\$0,00	\$40.765.727,76	\$10.722.921,41	\$0,00
Ganancias/Pérdidas de Capital	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Flujo de Caja Operacional	\$0,00	\$-30.790.066,15	\$343.080,02	\$28.957.793,20	\$53.184.048,31
Inversión Fija	\$-124.080.000	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Valor Residual de los Activos	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Capital de Trabajo	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Recuperación del Capital de Trabajo	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Préstamos	\$0	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Amortizaciones	\$0,00	\$-9.975.661,61	\$-11.066.001,43	\$-12.275.515,38	\$-13.617.229,21
Flujo de Capitales	\$-124.080.000	\$-40.765.727,76	\$-10.722.921,41	\$16.682.277,81	\$39.566.819,09
Tasa	10 %				
VAN	\$35.642.425				
TIR	13,98 %				

Tabla 6.8: Flujo de caja con 100 % de financiamiento propio parte 2

5	6	7
2024	2025	2026
\$534.291.589,26	\$659.302.121,36	\$784.312.653,47
\$-438.129.458	\$-533.097.184	\$-628.064.910
\$0,00	\$0,00	\$0,00
\$-1.651.041	\$0,00	\$0,00
\$-5.357.142,86	\$-5.357.142,86	\$0,00
\$0,00	\$0,00	\$0,00
\$89.153.947,16	\$120.847.794,76	\$156.247.743,97
\$-15.156.171,02	\$-20.544.125,11	\$-26.562.116,47
\$73.997.776,14	\$100.303.669,65	\$129.685.627,49
\$5.357.142,86	\$5.357.142,86	\$0,00
\$0,00	\$0,00	\$0,00
\$0,00	\$0,00	\$0,00
\$79.354.919,00	\$105.660.812,50	\$129.685.627,49
\$0,00	\$0,00	\$0,00
\$0,00	\$0,00	\$0,00
\$0,00	\$0,00	\$0,00
\$0,00	\$0,00	\$0,00
\$0,00	\$0,00	\$0,00
\$-15.105.592,37	\$0,00	\$0,00
\$64.249.326,63	\$105.660.812,50	\$129.685.627,49

Flujo de caja con financiamiento 50 % propio y 50 % con préstamo con garantía Corfo

En esta sección se presenta el flujo de caja con un 50 % de financiamiento propio 6.9 y 6.10, al igual que el flujo de caja anterior, se utiliza un 10 % como tasa de descuento.

Tabla 6.9: Flujo de caja con financiamiento parte 1

Años	2019	2020	2021	2022	2023
Ingresos	\$0,00	\$34.249.460,85	\$159.259.992,95	\$284.270.525,06	\$409.281.057,16
Egresos	\$0,00	\$-58.258.555	\$-153.226.281	\$-248.194.007	\$-343.161.732
Ganancias/Pérdidas de Capital	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Pago de Intereses por Créditos	\$0,00	\$-6.780.972	\$-5.690.632	\$-4.481.118	\$-3.139.404
Depreciaciones Legales	\$0,00	\$-5.357.142,86	\$-5.357.142,86	\$-5.357.142,86	\$-5.357.142,86
Pérdidas del Ejercicio Anterior	\$0,00	\$0,00	\$-40.765.727,76	\$-10.722.921,41	\$0,00
Utilidad Antes de Impuesto	\$0,00	\$-36.147.209,01	\$-45.779.790,60	\$15.515.336,06	\$57.622.777,65
Impuesto de Primera Categoría	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$-2.637.607,13	\$-9.795.872,20
Utilidad Después de Impuestos	\$0,00	\$-36.147.209,01	\$-45.779.790,60	\$12.877.728,93	\$47.826.905,45
Depreciaciones Legales	\$0,00	\$5.357.142,86	\$5.357.142,86	\$5.357.142,86	\$5.357.142,86
Pérdidas del Ejercicio Anterior	\$0,00	\$0,00	\$40.765.727,76	\$10.722.921,41	\$0,00
Ganancias/Pérdidas de Capital	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Flujo de Caja Operacional	\$0,00	\$-30.790.066,15	\$343.080,02	\$28.957.793,20	\$53.184.048,31
Inversión Fija	\$-124.080.000	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Valor Residual de los Activos	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Capital de Trabajo	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Recuperación del Capital de Trabajo	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Préstamos	\$62.040.000	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Amortizaciones	\$0,00	\$-9.975.661,61	\$-11.066.001,43	\$-12.275.515,38	\$-13.617.229,21
Flujo de Capitales	\$-62.040.000	\$-40.765.727,76	\$-10.722.921,41	\$16.682.277,81	\$39.566.819,09
Tasa	10 %				
VAN	\$97.682.425				
TIR	25 %				

Tabla 6.10: Flujo de caja con financiamiento parte 2

2024	2025	2026
\$534.291.589,26	\$659.302.121,36	\$784.312.653,47
\$-438.129.458	\$-533.097.184	\$-628.064.910
\$0,00	\$0,00	\$0,00
\$-1.651.041	\$0,00	\$0,00
\$-5.357.142,86	\$-5.357.142,86	\$0,00
\$0,00	\$0,00	\$0,00
\$89.153.947,16	\$120.847.794,76	\$156.247.743,97
\$-15.156.171,02	\$-20.544.125,11	\$-26.562.116,47
\$73.997.776,14	\$100.303.669,65	\$129.685.627,49
\$5.357.142,86	\$5.357.142,86	\$0,00
\$0,00	\$0,00	\$0,00
\$0,00	\$0,00	\$0,00
\$79.354.919,00	\$105.660.812,50	\$129.685.627,49
\$0,00	\$0,00	\$0,00
\$0,00	\$0,00	\$0,00
\$0,00	\$0,00	\$0,00
\$0,00	\$0,00	\$0,00
\$-15.105.592,37	\$0,00	\$0,00
\$64.249.326,63	\$105.660.812,50	\$129.685.627,49

6.3. Análisis de sensibilidad

Con el fin de estudiar el posible comportamiento financiero de la empresa, se realiza un análisis de sensibilidad, en el que se modifica en ceteris paribus las principales variables que componen el flujo de caja. En particular se estudia el efecto de aumentar o disminuir en un 10 % los costos fijos, variables y los ingresos. Todos los casos se estudian suponiendo que la demanda se comporta de forma optimista (en el sentido de que hay menos paneles degradados), según lo visto en la figura 6.2, por lo que representa la cota mínima.

En las siguientes tablas 6.11 y 6.12 se observan los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad para el caso de financiamiento con 100 % de patrimonio propio y, 50 % de patrimonio propio y 50 % de crédito con garantía Corfo, respectivamente, como se puede observar el flujo de caja es altamente dependiente del valor de los productos que se utilizan para degradar la EVA y limpiar el silicio, por lo que esta empresa posiblemente se beneficiara de las economías de escala.

Tabla 6.11: Análisis de sensibilidad 100 % de patrimonio propio

	VAN	TIR
Situacion normal	\$ 35.642.425	14 %
CF + 10 %	\$ 22.075.493	12 %
CF - 10 %	\$ 49.209.356	17 %
CV + 10 %	-\$ -76.030.765	0 %
CV - 10 %	\$ 147.315.614	25 %
I + 10 %	\$ 23.234.425	12 %
I - 10 %	\$ 48.050.425	16 %

Tabla 6.12: Análisis de sensibilidad 50 % de patrimonio propio

	VAN	TIR
Situacion normal	\$ 97.682.425	25 %
CF + 10 %	\$ 84.115.493	23 %
CF - 10 %	\$ 111.249.356	27 %
CV + 10 %	-\$ -27.557.697	5 %
CV - 10 %	\$ 195.788.682	36 %
I + 10 %	\$ 71.707.493	20 %
I - 10 %	\$96.523.493	26 %

Conclusión

6.4. Comparativa de medios de reciclaje

Según los resultados encontrados, se concluye que el método de reciclaje que genera menos impactos al medio ambiente es el térmico. Al observar la tabla 3.6 se puede apreciar una diferencia significativa en la generación de CO_2 entre el método térmico y el mecánico, se identifican dos factores claves para explicar este comportamiento. En primer lugar, la tasa de recuperación del método térmico es del 95 %, mientras que el del método mecánico es solo del 80 % al 85 %. En segundo lugar, se identifica una mayor dependencia del método mecánico a la red eléctrica que en el térmico, esto último se ve reflejado en otro indicador que se encuentra inusualmente alto en el método mecánico (aparte de la generación de CO_2), que es el agotamiento de la energía fósil medido en Kg de Oil equivalente, si se recuerda la figura 1.1, en Chile predominan las fuentes de energía fósil.

Por otro lado, se concluye que el método de reciclaje químico es superior desde el punto de vista del cambio climático (generación de CO_2) al método mecánico y ligeramente inferior al térmico. Al observar la tabla 3.6 se advierte que este método no se comporta bien desde el punto de vista de la toxicidad humana, esto se debe al uso de químicos orgánicos para disolver la EVA tales como el tolueno. Por otro lado, para poder industrializar este método, es necesario calentar el modulo, razón por la cual su impacto medio ambiental es muy similar al térmico.

Al observar de forma desagregada la información para el método térmico, se concluye que los procesos que generan más emisiones corresponden a la incineración de la EVA, y la separación del vidrio. Por lo general, procesos que involucren incinerar plásticos, son altamente contaminantes, se propone como posible investigación encontrar alternativas o soluciones que hagan más eficiente este proceso.

Por último, según los resultados expuestos, se concluye que Chile dado su mercado más reducido, debe centrarse en investigar los métodos térmicos y químicos a pequeña escala como la opción de pequeño a mediano plazo para el reciclaje y reutilización de paneles solares fotovoltaicos. Se propone como trabajo posterior el incluir la capacidad que poseen estos métodos y realizar un análisis de ciclo de vida consecucional (consequential LCA).

6.5. Tiempo óptimo de reciclaje de paneles solares según su impacto medio ambiental

Según los resultados encontrados, se concluye que existe una diferencia significativa en la producción de energía debido a la degradación. Al observar la tabla 4.1 se puede apreciar al menos un 12 % entre el método más conservador, y el más extremo en la degradación de paneles solares. Al observar los gráficos 4.11 y 4.12, se concluye que la degradación JPL presenta un decaimiento más rápido que los modelos exponenciales y lineales en los primeros años, pero en contraste, este se estabiliza y se hace menor al final de la vida útil. Como trabajo posterior se propone el uso de datos experimentales e inteligencia artificial, tales como redes neuronales o algoritmos genéticos con el fin de obtener mejores aproximaciones a la realidad.

Con las curvas de degradación obtenidas, se concluye que para una degradación base, es posible pensar en un momento óptimo para el reciclaje y o reutilización de los paneles solares entre los años 10 a 15. Este resultado implica que es preferible priorizar métodos de reutilización química o reciclaje térmico entre los años comentados que ejecutar un reciclaje mecánico al llegar al año 30 y el panel se encuentre totalmente degradado, pues la ganancia extra en energía producida no compensa el cambio en tecnología de reciclaje. Con respecto a una degradación aumentada, los datos no son concluyentes. Se propone como trabajo futuro el investigar nuevas formas de reciclaje y reutilización de paneles solares.

Según los resultados encontrados, se propone una investigación en el área de políticas públicas y gestión para determinar que tan provechoso como sociedad puede llegar a ser el enfoque propuesto de reciclar paneles solares en torno al año 10 a 15.

6.6. Tiempo óptimo de reemplazo de paneles solares según la economía

Según los resultados encontrados, se concluye que para una degradación base, es posible pensar en un momento óptimo para el reemplazo de los paneles solares en torno al año 18 y para una degradación acelerada en torno al año 16. Se identifica como factores claves el precio de la energía, y los costos de operación y mantenimiento, pues al observar la tabla 5.2 se puede notar que al aumentar estos ítems el argumento mínimo de la curva CAUE se ve disminuido.

Por otro lado, se concluye que existe una diferencia de al menos 3 años entre el recambio de paneles solares desde el punto de vista ecológico y desde el punto de vista económico, por lo que se identifica un trade off. Como trabajo futuro se plantea la posibilidad de incluir costos por el reciclaje y reutilización, pues aún no están definidos para Chile, tanto de manera cualitativa como cuantitativa.

Por último, según los resultados encontrados, se puede observar que en el ciclo de vida de una planta solar, los costos de compra de los activos, llámese paneles solares, inversores, cableado, estructura civil, etc. Son los más cuantiosos y relevantes. Se propone como trabajo futuro el variar la dimensión de la unidad funcional con el fin de observar posibles efectos de economías de escala.

6.7. Modelo de negocios para el reciclaje de paneles solares

Según los resultados encontrados, se concluye que es posible el realizar un modelo de negocios rentable para el reciclaje y la reutilización de paneles solares en Chile. Se identifica como crítico el valor de los insumos destinados a tratar paneles solares fotovoltaicos para realizar este modelo de negocios, se observa en la tabla 5.2 que al aumentar en un 10 % el costo de los insumos se pasa de un valor positivo a un valor negativo en el valor actualizado neto, aun así, debe considerarse que el modelo se realiza con una demanda pesimista, se propone como trabajo posterior, usar una demanda más realista una vez se posean más datos sobre este mercado en Chile.

Por otro lado, se concluye que un modelo de negocios cuya meta sea reciclar y o reutilizar paneles solares, debe ser capaz de generar otros servicios conexos a este, tales como predicción y clasificación del estado de salud de paneles solares fotovoltaicos. Se propone como trabajo futuro el uso de herramientas de inteligencia artificial para realizar estos servicios. En particular en la actualidad se investiga el uso de cámaras termografías y redes neuronales recurrentes.

Como trabajo futuro se plante la posibilidad de realizar una propuesta de negocios, y además un prototipo de planta, que formalice lo desarrollado sobre este modelo de negocios y profundice con el propósito de tener un acercamiento más completo al nacimiento de una posible empresa.

Bibliografía

- [1] Ala'K Abu-Rumman, Iyad Muslih, Mahmoud Barghash, et al. Life cycle costing of pv generation system. *Journal of Applied Research on Industrial Engineering*, 4(4):252–258, 2017.
- [2] Abdulrahim Hamed S Alghamdi, Carlos Henrique Marciano Rodrigues Castro, and Ramon Zamora. Review of cost optimization of electricity supply by using homer and a case study for a big commercial customer in brazilian amazon area. In *International Conference on Smart Grid Inspired Future Technologies*, pages 220–229. Springer, 2018.
- [3] Asociación de generadoras de Chile. Boletín del mercado eléctrico sector generación, May 2019. <http://generadoras.cl/media/page-files/817/Boletin>.
- [4] J Bauer, J-M Wagner, A Lotnyk, H Blumtritt, B Lim, J Schmidt, and O Breitenstein. Hot spots in multicrystalline silicon solar cells: avalanche breakdown due to etch pits. *physica status solidi (RRL)–Rapid Research Letters*, 3(2-3):40–42, 2009.
- [5] Wolfgang Berger, Franz-Georg Simon, Karin Weimann, and Erik A Alsema. A novel approach for the recycling of thin film photovoltaic modules. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(10):711–718, 2010.
- [6] Ramchandra Bhandari, Clemens A Trudewind, and Petra Zapp. Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis—a review. *Journal of cleaner production*, 85:151–163, 2014.
- [7] Comite solar gobierno de Chile. Estudio benchmark de plantas solares fotovoltaicas en chile, 2017. [https://file:///C:/Users/Usuario/Desktop/Memoria\\$\\$\\$20word/Informe-Benchmarking-Plantas-Solares-Fotovoltaicas_actualizaci\\$\\$\\$3\\$\\$\\$B3n.pdf](https://file:///C:/Users/Usuario/Desktop/Memoria$$$20word/Informe-Benchmarking-Plantas-Solares-Fotovoltaicas_actualizaci$$$3$$$B3n.pdf).
- [8] CRN (clean energy reviwis) . Solar pv cell construction, 2019. <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/solar-pv-cell-construction>.
- [9] Federica Cucchiella, Paolo Rosa, et al. End-of-life of used photovoltaic modules: A financial analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47:552–561, 2015.
- [10] James M Donald, Kim Hooper, and Claudia Hopenhayn-Rich. Reproductive and developmental toxicity of toluene: a review. *Environmental health perspectives*, 94:237–244,

1991.

- [11] Jiawei Fan. *Life cycle assessment and life cycle cost of photovoltaic panels on Lake Street Parking Garage*. PhD thesis, Colorado State University. Libraries, 2014.
- [12] Vasilis Fthenakis, HyungChul Kim, Rolf Frischknecht, Marco Raugei, Parikhit Sinha, Matthias Stucki, et al. Life cycle inventories and life cycle assessment of photovoltaic systems. *International Energy Agency (IEA) PVPS Task*, 12, 2011.
- [13] Utpal Gangopadhyay, Sukhendu Jana, and Sayan Das. State of art of solar photovoltaic technology. In *Conference Papers in Science*, volume 2013. Hindawi, 2013.
- [14] Andrea Lucas Garín. Cambio climático e instrumentos económicos: propuestas de regulación jurídica para un mercado de emisiones para chile. *Vniversitas*, 67(137), 2018.
- [15] María Teresa Gómez Escorial et al. Diseño de un prototipo de soporte mecánico para la realización de medidas de electroluminiscencia en plantas fotovoltaicas. 2017.
- [16] Sukmin Kang, Sungyeol Yoo, Jina Lee, Bonghyun Boo, and Hojin Ryu. Experimental investigations for recycling of silicon and glass from waste photovoltaic modules. *Renewable Energy*, 47:152–159, 2012.
- [17] Ewa Klugmann-Radziemska, Piotr Ostrowski, Kazimierz Drabczyk, Piotr Panek, and Marek Szkodo. Experimental validation of crystalline silicon solar cells recycling by thermal and chemical methods. *Solar energy materials and solar cells*, 94(12):2275–2282, 2010.
- [18] Joshua Kneifel, David Webb, and Eric O’Rear. Energy and economic implications of solar photovoltaic performance degradation. Technical report, 2016.
- [19] Lisa Krueger. Overview of first solar’s module collection and recycling program. In *EPIA 1st International Conference on PV Module Recycling*, volume 26, 2010.
- [20] Katsumi Kushiya, Mineo Ohshita, and Manabu Tanaka. Development of recycling and reuse technologies for large-area cu (inga) se/sub 2/-based thin-film modules. In *3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2003. Proceedings of*, volume 2, pages 1892–1895. IEEE, 2003.
- [21] Kari Larsen. End-of-life pv: then what? *Renewable Energy Focus*, 10(4):48–53, 2009.
- [22] Oskar Larsson Ivanov, Daniel Honfi, and Håkan Stripple. Uncertainty and variation in lca-implementation of probabilistic methods to assess environmental impacts of infrastructures. *TVBK*, (3070), 2018.
- [23] Cynthia EL Latunussa, Fulvio Ardente, Gian Andrea Blengini, and Lucia Mancini. Life cycle assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels. *Solar energy materials and solar cells*, 156:101–111, 2016.
- [24] Hui Li, Jianlu Zhang, Zheng Shi, Datong Song, Khalid Fatih, Shaohong Wu, Haijiang

- Wang, JiuJun Zhang, Nengyou Jia, Silvia Wessel, et al. Pem fuel cell contamination: Effects of operating conditions on toluene-induced cathode degradation. *Journal of The Electrochemical Society*, 156(2):B252–B257, 2009.
- [25] A Martí, JL Balenzategui, and RF Reyna. Photon recycling and shockley’s diode equation. *Journal of Applied Physics*, 82(8):4067–4075, 1997.
- [26] Castillo Miranda and Juan Pablo Andrés. Sistema fotovoltaico para aplicaciones móviles de tracción eléctrica. 2008.
- [27] MA Munoz, M Carmen Alonso-García, Nieves Vela, and Faustino Chenlo. Early degradation of silicon pv modules and guaranty conditions. *Solar energy*, 85(9):2264–2274, 2011.
- [28] Shahriyar Nasirov and Carlos Silva. Diversification of chilean energy matrix: Recent developments and challenges. 2017.
- [29] Ababacar Ndiaye, Abdérafi Charki, Abdessamad Kobi, Cheikh MF Kébé, Pape A Ndiaye, and Vincent Sambou. Degradations of silicon photovoltaic modules: A literature review. *Solar Energy*, 96:140–151, 2013.
- [30] Jenny Nelson. *The physics of solar cells*. World Scientific Publishing Company, 2003.
- [31] S Nieland, U Neuhaus, T Pfaff, and E Rädlein. New approaches for component recycling of crystalline solar modules. In *2012 Electronics Goes Green 2012+*, pages 1–5. IEEE, 2012.
- [32] G Oreski and GM Wallner. Evaluation of the aging behavior of ethylene copolymer films for solar applications under accelerated weathering conditions. *Solar Energy*, 83(7):1040–1047, 2009.
- [33] Rong Pan, Joseph Kuitche, and Govindasamy Tamizhmani. Degradation analysis of solar photovoltaic modules: Influence of environmental factor. In *2011 Proceedings-Annual Reliability and Maintainability Symposium*, pages 1–5. IEEE, 2011.
- [34] Jinqing Peng, Lin Lu, and Hongxing Yang. Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems. *Renewable and sustainable energy reviews*, 19:255–274, 2013.
- [35] Laura Rocchetti and Francesca Beolchini. Recovery of valuable materials from end-of-life thin-film photovoltaic panels: environmental impact assessment of different management options. *Journal of Cleaner Production*, 89:59–64, 2015.
- [36] Malin Rosqvist, Anna Liberg, and Alexander Farnsworth. Green robots: Robot-based automation is enabling energy efficiency in the plastics industry. *ABB review*, (1):63–67, 2009.
- [37] RICARDO ALFONSO SALAZAR HARCHA. Desarrollo de herramienta para la eliminación de asimetrías de información en el mercado fotovoltaico chileno de autoabasteci-

miento. 2017.

- [38] AF Sherwani, JA Usmani, et al. Life cycle assessment of solar pv based electricity generation systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1):540–544, 2010.
- [39] Jeongeun Shin, Jongsung Park, and Nochang Park. A method to recycle silicon wafer from end-of-life photovoltaic module and solar panels by using recycled silicon wafers. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 162:1–6, 2017.
- [40] Ariel Apolo Andrés Silva Villegas. Modelo de negocio y evaluación técnica económica para un emprendimiento en gestión de residuos reciclables en comunidades de la región metropolitana. 2013.
- [41] Explorador Solar. Ministerio de energía. *Explorador Solar*, 2017.
- [42] Jing Tao and Suiran Yu. Review on feasible recycling pathways and technologies of solar photovoltaic modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 141:108–124, 2015.
- [43] P AARNE Vesilind, ALAN E Rimer, and WILLIAM A Worrell. Performance characteristics of a vertical hammermill shredder. In *Proc. ASME National Solid Waste Processing Conf., Washington, DC*, pages 199–210, 1980.
- [44] Andy Walker. Pv o&m cost model and cost reduction. Technical report, National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2017.
- [45] Teng-Yu Wang, Jui-Chung Hsiao, and Chen-Hsun Du. Recycling of materials from silicon base solar cell module. In *2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pages 002355–002358. IEEE, 2012.
- [46] Stephanie Weckend, Andreas Wade, and Garvin Heath. End-of-life management: Solar photovoltaic panels. Technical report, National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2016.
- [47] WorldAutoSteel. Steel industry provides improved tools to contribute to sustainable automotive industry, 2019. <https://www.worldautosteel.org/life-cycle-thinking/ucsb-energy-ghg-model/>.
- [48] Yan Xu, Jinhui Li, Quanyin Tan, Anesia Lauren Peters, and Congren Yang. Global status of recycling waste solar panels: A review. *Waste Management*, 75:450–458, 2018.