UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO-CHILE

PROYECTO DE EVALUACIÓN TÉCNICO Y ECONÓMICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN PROCESO DE RECICLAJE DE PANELES FOTOVOLTAICOS EN DESUSO O FALLA

VICENTE SANDOVAL TAPIA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: ING. JOSÉ DELIS CONTRERAS
PROFESOR CORREFERENTE: DR. RODRIGO BARRAZA VICENCIO

Octubre 2019

AGRADECIMIENTOS

A Dios, mi mamá, esposa, hermanos y amigos.

RESUMEN

Este proyecto nace en el contexto de la creciente participación de la energía solar fotovoltaica en Chile, con proyecciones por parte del coordinador eléctrico nacional, en donde esta alcanza participaciones de hasta un 70% de participación en la potencia instalada de la matriz energética Chilena. Este crecimiento en la energía solar fotovoltaica está ligado a un aumento en la cantidad de paneles solares fotovoltaicos instalados en el país, los cuales tienen una vida útil de 25 [años] desde su instalación. Bajo estas condiciones, es cosa de tiempo antes de que se empiece a evidenciar una gran cantidad de desechos por paneles solares fotovoltaicos en desuso. Lo que bajo el marco de la ley 20.920 (responsabilidad extendida del productor), que al imponer al productor (o importador) que seleccione una gestión que revaloricé los desechos, genera una oportunidad de negocios en función crear una opción que revaloricé al máximo los componentes del panel solar fotovoltaico.

El objetivo general de este trabajo es realizar una evaluación técnica y económica de una planta de reciclaje de paneles solares fotovoltaicos en Chile, siguiendo tres pasos. En primer lugar, proyectar y cantidad de paneles en falla o desuso para los próximos 40 años y estudiar el mercado de los componentes de un panel solar, para definir un modelo de negocios que utilicé de mejor manera los recursos. Segundo, se realizar un análisis técnico, al recopilar información sobre todas las tecnologías de reciclaje existente, y analizar la factibilidad de su implementación en el modelo de negocios estipulado. Tercero, realizar un análisis económico, a través de distintos indicadores económicos inherentes al proyecto, aportando sensibilidad a las condiciones supuestas y analizando la implementación del proyecto con distintos años de inicio.

Al realizar la proyección de los paneles solares en desuso, se encuentran distintos escenarios, destacando dos, que se dividen según el modo de falla de los paneles: Tasa de falla constante y Weibull, a cada escenario se le aportó incertidumbre al trabajar con tres casos: un flujo de paneles alto, medio y bajo. El estudio de mercado para los componentes del panel solar, entrego como mejor escenario: La reutilización del vidrio, instaurando una economía circular, al utilizarse para elaborar nuevos paneles solares. El reciclaje del aluminio, al contar con un mercado robusto y un proceso sencillo. La disposición del resto de los componentes por falta de opciones para ser revalorizados en el mercado.

En función al párrafo anterior, el análisis técnico entrega como resultado que la línea automatizada elaborada por NPC Incorporated en Japón, cumple con los requisitos para realizar el modelo de negocios en Chile, posicionando la planta en la región de atacama, al tener una mayor cercanía geográfica con la mayor densidad de plantas solares fotovoltaicas.

Los resultados económicos al evaluar la implementación de la planta, fueron positivos, al existir escenarios en donde se tienen tasas internas de retorno de hasta un 41% para ciertos escenarios, con inversiones desde 3.572.460 [USD] hasta 25.647.798 [USD] para distintos escenarios, y un VAN máximo de 23.481.568 [USD]. Al sensibilizar el proyecto se visualiza la preponderancia del porcentaje total de paneles en desuso adjudicados por planta, como el parámetro con mayor incidencia en los resultados del proyecto, y una escalabilidad de la planta, del doble de su tamaño por cada 20% del porcentaje de paneles en desuso adjudicados.

Se concluye que la implementación de la planta de reciclaje de paneles solares fotovoltaicos es factible técnicamente, con la tecnología y procesos existentes. Y es factible económicamente, a partir del año 2025 con una duración del proyecto de 30 años, aumentando sus beneficios a medida que más se aplaza el inicio del proyecto, pero aumentando el riesgo al entrar tarde al rubro y perder posicionamiento en el mercado. Por lo que se recomienda mantener en registro y estudio la falla de los paneles, para aumentar la precisión del escenario de falla, implementar un centro de innovación para mejorar la tecnología de reciclaje y comenzar a posicionarse en el mercado, y realizar un estudio para analizar la factibilidad de escalar la planta a un nivel internacional.

ABSTRACT

This project is born in the context of the growing participation of photovoltaic solar energy in Chile, with projections by the national electricity coordinator, where it reaches shares of up to 70% of the installed power of the Chilean energy matrix. This growth in photovoltaic solar energy is linked to an increase in the number of photovoltaic solar panels installed in the country, which have a useful life of 25 [years] from their installation. Under these conditions, it is a matter of time before a large amount of waste from disused solar photovoltaic panels begins to show up. Under the framework of the law 20,920 (extended producer responsibility), which by imposing the producer (or importer) to select a management that revalued the waste, generates a business opportunity based on creating an option that revalue the maximum components of the solar photovoltaic panel.

The general objective of this work is to carry out a technical and economic evaluation of a photovoltaic solar panel recycling plant in Chile, following three steps: first, project the quantity of panels in failure or disuse for the next 40 years and study the market of the components of a solar panel, to define a business model that uses the resources in a better way. Second, a technical analysis will be performed, collecting information on all existing recycling technologies, and analyzing the feasibility of their implementation in the stipulated business model. Third, an economic analysis, through different economic indicators inherent to the project, providing sensitivity to the assumed conditions and analyzing the implementation of the project considering different years when to start the project.

When projecting the disused solar panels, different scenarios are found, highlighting two, which are divided according to the failure mode of the panels: constant failure rate and Weibull, each scenario was given uncertainty by working with three cases: a high, medium and low flow of panels. The market study for the solar panel components, delivered as the best scenario: The reuse of glass, establishing a circular economy, when used to develop new solar panels. The recycling of aluminum, by having a robust market and a simple process. The disposal of the rest of the components due to the lack of options to be revaluated in the market.

Based on the previous paragraph, the technical analysis shows that the automated line developed by "NPC" Incorporated in Japan meets the requirements for the business model in

Chile, positioning the plant in the region of Atacama, as it is geographically closer to the highest density of solar photovoltaic plants.

The economic results when evaluating the implementation of the plant were positive, as there are scenarios where internal rates of return are up to 41% for certain scenarios, with investments from 3,572,460 [USD] to 25,647,798 [USD] for different scenarios, and a maximum "NPV" of 23,481,568 [USD]. When the project is sensitized, the preponderance of the total percentage of disused panels awarded per plant is displayed as the parameter with the greatest impact on the project results, and a scalability of the plant of twice its size for every 20% of the percentage of disused panels awarded.

It is concluded that the implementation of the photovoltaic solar panel recycling plant is technically feasible, with the existing technology and processes. And it is economically feasible, from the year 2025 with a duration of the project of 30 years, increasing its benefits as more is postponed the beginning of the project, but increasing the risk to enter late to the item and lose market positioning. Therefore, it is recommended to keep in record and study the failure of the panels, to increase the accuracy of the failure scenario, to implement an innovation center to improve the recycling technology and start positioning in the market, and to conduct a study to analyze the feasibility of scaling the plant to an international level.

GLOSARIO

ACV	Análisis de Ciclo de Vida
CEN	Coordinador Eléctrico Nacional
CNE	Comisión Nacional de Energía
DS	Decreto Supremo
EC	Economía Circular
ELCD	European Platform on Life Cycle Assessment
EVA	Etilvinilacetato
IEA	International Energy Agency
IRENA	International Renewable Energy Agency
MMA	Ministerio del Medio Ambiente
MW	Megawatts
O&M	Operación y Mantenimiento
PF	Panel Fotovoltaico
PMT	Payment
PV	Photovoltaics
ROI	Return On Investment
SEN	Sistema Eléctrico Nacional
TIR	Tasa Interna de Retorno
USD	United States Dollar
VAN	Valor Actual Neto

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS……II

RESUMEN……..III

ABSTRACT……V

GLOSARIO……...……VII

ÍNDICE GENERAL…….……VIII

ÍNDICE DE FIGURAS……...XI

ÍNDICE DE TABLAS……...……XV

INTRODUCCIÓN……1

OBJETIVOS……..2

1. Estado del arte 3
   1.1. Paneles fotovoltaicos 3
      1.1.1. Celdas fotovoltaicas 3
      1.1.2. Composición Panel Fotovoltaico c-Si 6
      1.1.3. Modos de Falla 8
   1.2. Reciclaje de Paneles Fotovoltaicos en Chile 12
      1.2.1. Situación actual 12
      1.2.2. Ley 20.920 13
   1.3. Recopilación de metodologías para el reciclaje de PF 14
      1.3.1. Publicaciones 14
      1.3.2. Reporte de IEA Task 12 17
2. Análisis del mercado para el reciclaje de PF 19
   2.1. Proyección de PF en desuso 19
      2.1.1. Falla de los paneles 19
      2.1.2. Paneles fotovoltaicos instalados en Chile 20

2.1.3. Proyección de fallas 27
2.1.4. Cantidad de paneles en falla 29
2.2. Mercado de componentes 34
2.2.1. Aluminio 34
2.2.2. Vidrio 35
2.2.3. Polímeros 37
2.2.4. Celda fotovoltaica 37
2.2.5. Caja de conexiones 38
3. Selección de la tecnología y aplicación 39
3.1. Oportunidad de negocio 39
3.1.1. Proceso principal 40
3.1.2. Procesos secundarios y productos 41
3.2. Selección de tecnología 42
3.2.1. Tecnologías de reciclaje 42
3.2.2. Comparación y selección 46
3.3. Planta de reciclaje 47
3.3.1. Funcionamiento de la planta 47
3.3.2. Dimensiones 48
3.4. Inversión 50
3.4.1. Maquinaria 50
3.4.2. Infraestructura 52
3.4.3. Otros 53
3.5. Costos 53
3.5.1. Mano de obra 53
3.5.2. Energía 54
3.5.3. Servicios 55
3.5.4. Terreno 55
4. Análisis y resultados 56
4.1. Suposiciones 56
4.2. Resultados económicos 60
4.2.1. Indicadores económicos 60
4.2.2. Inversión 63
4.2.3. Análisis 64
4.3. Resultados ambientales 65
4.3.1. Cantidad de paneles reciclados 65
4.3.2. Impacto ambiental 67
4.4. Sensibilización 69

Conclusiones 74
A. Degradación paneles según proveedor 79
B. Datos de proyección PF en falla en Chile 80
B.1 Proyección potencia instalada por escenario 80
B.2 Proyección paneles instalados por escenario 82
B.3 Proyección paneles en falla por año 83
C. Datos de resultados económicos del proyecto 86
C.1 Gráficos resultados VAN vs año de inicio 86
C.2 Gráficos reales resultados sensibilización 90
C.3 Ejemplo de flujo de caja 93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Funcionamiento celda fotovoltaica [1] 4
Figura 1.2 Tipos de celdas fotovoltaicas [2] 5
Figura 1.3 Estructura panel solar c-Sí. [3] 6
Figura 1.4 Proporción másica componentes panel c-Si. [4] 7
Figura 1.5 Tasa de degradación para distintas condiciones climáticas. [5] 9
Figura 1.6 Modo de degradación no lineal, para paneles fotovoltaicos. [7] 10
Figura 1.7 Diagrama de flujo con opciones de reciclaje. 16
Figura 1.8 Cantidad de patentes para reciclaje, por país y año. [13] 17
Figura 1.9 Porcentaje de patentes para reciclaje, según componente a recuperar. [13] 18
Figura 2.1 Potencia solar fotovoltaica Instalada en Chile por año. [14] 20
Figura 2.2 Supuestos para los escenarios A1 y A6 de la proyección de la potencia instalada de energía Solar Fotovoltaica. [15] 22
Figura 2.3 Escenario A1 con descarbonización. 23
Figura 2.4 Escenario A1 sin descarbonización. 23
Figura 2.5 Escenario A6 con descarbonización. 24
Figura 2.6 Escenario A6 sin descarbonización 24
Figura 2.7 Cantidad de Paneles instalados por año, escenario A1. 25
Figura 2.8 Cantidad de Paneles instalados por año, escenario A6. 26
Figura 2.9 Porcentaje de falla por año, para los factores de forma propuestos. 28
Figura 2.10 Porcentaje de falla por año, para tasas de falla constante propuestas. 29
Figura 2.11 Cantidad de Paneles en falla por año, escenario A1 con descarbonización - Weibull. 30
Figura 2.12 Cantidad de Paneles en falla por año, escenario A1 con descarbonización - Constante. 30
Figura 2.13 Cantidad de Paneles en falla por año, escenario A1 sin descarbonización - Weibull. 31
Figura 2.14 Cantidad de Paneles en falla por año, escenario A1 sin descarbonización - Constante. 31
Figura 2.15 Cantidad de Paneles en falla por año, escenario A6 con descarbonización - Weibull. 32

Figura 2.16 Cantidad de Paneles en falla por año, escenario A6 con descarbonización - Constante. 32
Figura 2.17 Cantidad de Paneles en falla por año, escenario A6 sin descarbonización - Weibull. 33
Figura 2.18 Cantidad de Paneles en falla por año, escenario A6 sin descarbonización - Constante. 33
Figura 3.1 Proceso para maximizar la oportunidad de negocio. 40
Figura 3.2 Línea automatizada para el reciclaje de PF, NPC Inc. [24] 43
Figura 3.3 Línea automatizada para el reciclaje de PF, Veolia. [25] 44
Figura 3.4 Sistema para separar vidrio en PF. [26] 45
Figura 3.5 Layout tipo planta de reciclaje. 49
Figura 3.6 Manipulador telescópico Bobcat T35120SL. 50
Figura 3.7 Grúa horquilla, Fullen CPCD30 A. 51
Figura 3.8 Tecle eléctrico, Itaka. 51
Figura 4.1 Sensibilización en función del precio del vidrio y el mercado de paneles. 70
Figura 4.2 Sensibilización en función del precio del aluminio y el mercado de paneles. 71
Figura 4.3 Sensibilización en función del cobro por panel y el mercado de paneles. 72
Figura 4.4 Sensibilización en función del máximo de líneas y el mercado de paneles. 73
Figura A.1 Garantía rendimiento módulo Jinko 310PP-72. 79
Figura A.2 Garantía rendimiento módulo JAP6. 79
Figura C.1 VAN al iniciar el proyecto en distintos años, Modo de falla de Weibull con 20% del mercado de paneles [USD]. 86
Figura C.2 VAN al iniciar el proyecto en distintos años, Modo de falla de Weibull con 40% del mercado de paneles [USD]. 87
Figura C.3 VAN al iniciar el proyecto en distintos años, Modo de falla de Weibull con 60% del mercado de paneles [USD]. 87
Figura C.4 VAN al iniciar el proyecto en distintos años, Modo de falla Constante con 20% del mercado de paneles [USD]. 88
Figura C.5 VAN al iniciar el proyecto en distintos años, Modo de falla Constante con 40% del mercado de paneles [USD]. 88
Figura C.6 VAN al iniciar el proyecto en distintos años, Modo de falla Constante con 60% del mercado de paneles [USD]. 89
Figura C.7 Datos reales, sensibilización del proyecto en función del precio del vidrio y el mercado de paneles. 90
Figura C.8 Datos reales, sensibilización del proyecto en función del precio del Aluminio y el mercado de paneles. 90

Figura C.9 Datos reales, sensibilización del proyecto en función del cobro por panel y el mercado de paneles. 91
Figura C.10 Datos reales, sensibilización del proyecto en función del máximo de líneas y el mercado de paneles. 91
Figura C.11 Datos reales, sensibilización del proyecto en función de la vida útil de las plantas y la duración del proyecto. 92
Figura C.12 Datos reales, sensibilización del proyecto en función de la productividad de la tecnología y el precio de la tecnología. 92
Figura C.13 Ejemplo de flujo de caja con sus indicadores económicos. 94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Precios de disposición Hydronor. 12
Tabla 2.1 Cantidad de Módulos instalados por año. 21
Tabla 2.2 Total de paneles instalados desde 2020 a 2040. 26
Tabla 2.3 Valores de factores de forma, falla PF por Weibull. 27
Tabla 2.4 Valores de porcentaje de falla, para PF por tasa de falla constante. 28
Tabla 2.5 Precio del aluminio para reciclaje en Chile (Contacto directo). 34
Tabla 2.6 Costo reciclaje de vidrio (Contacto directo). 35
Tabla 2.7 Precios de vidrio templado con recubrimiento anti reflectante para paneles solares. . 36
Tabla 2.8 Tabla de precios de disposición perteneciente a Hydronor. 37
Tabla 3.1 Escenario de revalorización para los distintos componentes del panel solar. 41
Tabla 3.2 Información línea automatizada para reciclaje de paneles fotovoltaicos, NPC Inc. [24] 43
Tabla 3.3 Comparación entre tecnologías de reciclaje de PF. 46
Tabla 3.4 Espacio requerido para la operación de planta de reciclaje. 48
Tabla 3.5 Precio y cantidad de maquinaria requerida. 52
Tabla 3.6 Precio construcción infraestructura requerida. [27] 52
Tabla 3.7 Mano de obra y costo asociado. 53
Tabla 3.8 Costo por concepto de uso energético [28]. 54
Tabla 3.9 Precio Terreno, Norte de Chile. Precio concesión corresponde a un pago anual. 55
Tabla 4.1 Suposiciones para la evaluación del proyecto. 56
Tabla 4.2 VAN correspondiente a distintos escenarios, comenzando el proyecto el año 2020 [USD]. 60
Tabla 4.3 TIR correspondiente a distintos escenarios, comenzando el proyecto el año 2020. ... 60
Tabla 4.4 ROI correspondiente a distintos escenarios, comenzando el proyecto el año 2020 [años]. 61
Tabla 4.5 VAN correspondiente a distintos escenarios, comenzando el proyecto el año 2025 [USD]. 61
Tabla 4.6 TIR correspondiente a distintos escenarios, comenzando el proyecto el año 2025. ... 61
Tabla 4.7 ROI correspondiente a distintos escenarios, comenzando el proyecto el año 2025 [años]. 62

Tabla 4.8 VAN correspondiente a distintos escenarios, comenzando el proyecto el año 2030 [USD]. 62
Tabla 4.9 TIR correspondiente a distintos escenarios, comenzando el proyecto el año 2030. ... 62
Tabla 4.10 ROI correspondiente a distintos escenarios, comenzando el proyecto el año 2030 [años]. 63
Tabla 4.11 Inversión necesaria para realizar el proyecto dando inicio el año 2020 [USD]. 63
Tabla 4.12 Inversión necesaria para realizar el proyecto dando inicio el año 2025 [USD]. 64
Tabla 4.13 Inversión necesaria para realizar el proyecto dando inicio el año 2030 [USD]. 64
Tabla 4.14 Año mínimo al que al comenzar el proyecto este registra ganancias, para distintos escenarios. 65
Tabla 4.15 Cantidad de paneles reciclados, distintos escenarios, flujo medio de paneles. 66
Tabla 4.16 Metros cúbicos de desechos reciclados a lo largo del proyecto para distintos años de inicio [m3]. 66
Tabla 4.17 Toneladas de materias recolectadas a lo largo del proyecto para sus distintos años de inicio. 66
Tabla 4.18 Impacto ambiental componentes por tonelada de material. Reciclaje para el caso del Aluminio y reutilización para el caso del vidrio. [29]. 67
Tabla 4.19 Emisión de tCO2 equivalente, planta de reciclaje de paneles solares, por tonelada de paneles [30]. 67
Tabla 4.20 Toneladas de CO2 equivalente no emitidos, por concepto de reciclaje de paneles y economía circular. 68
Tabla 4.21 Metros cúbicos de agua no utilizados, por concepto de reciclaje de paneles y economía circular [m3]. 68
Tabla 4.22 Parámetros utilizados para analizar la sensibilidad del proyecto. 69
Tabla B.1 Proyección potencia instalada en Chile por año [MW]. [14] 80
Tabla B.2 Proyección potencia instalada acumulada en Chile por año [MW]. [14] 81
Tabla B.3 Proyección PF instalados en Chile por año. 82
Tabla B.4 Proyección PF en falla en Chile por año, modo de falla de Weibull. 83
Tabla B.5 Proyección PF en falla en Chile por año, modo de falla de tasa constante. 84

INTRODUCCIÓN

La energía solar fotovoltaica ha vivido un crecimiento durante los últimos años, y se espera que esta tendencia se mantenga o incremente a medida que las matrices energéticas de los países buscan ser más limpias. Tal ha sido el caso de Chile que en los últimos cinco años ha instalado un total de 2.500 [MW] de energía solar fotovoltaica, lo ha significado una transformación significativa en la matriz energética, que se acentuará aún más, a medida que los proyectos de descarbonización se empiecen a ejecutar.

Es en este contexto que el estudio y desarrollo de una implementación más eficiente, rentable y sustentable, de la energía solar fotovoltaica debe emerger como uno de los desafíos a afrontar hoy en día. Y una de las interrogantes que se presentan en torno a la energía solar fotovoltaica es ¿Cómo se gestionaran los paneles solares fotovoltaicos que se encuentren en estado de falla o abandono? El panel solar representa la base de esta tecnología, y se estima que una planta de 100 [MW] cuenta con un número aproximado de 330.000 paneles, que se encontraran en estado de desecho una vez que la planta haya cumplido con su vida útil.

Es por esto que este trabajo de título busca aportar al desarrollo de esta tecnología al analizar un posible modelo de negocios, para gestionar los paneles solares fotovoltaicos que se encuentren en estado de desuso o falla.

Minimizar la cantidad de residuos en una tecnología de generación es importante, pero lograr revalorizar los componentes de está, y aprovechar al máximo la inversión en distintas formas de recurso para su implementación, es fundamental para un desarrollo sustentable de está. Es por eso que no solo se propondrá un modelo de gestión para los residuos buscando minimizar su impacto ambiental de disposición, sino que se buscará desarrollar un modelo de economía circular en donde los paneles solares fotovoltaicos, la base de la tecnología, sean revalorizados. Para lograr esto se deben analizar distintos escenarios, en función del modo de falla de los paneles, los componentes de este y sus posibles mercados, y la tecnología existente para realizar un proceso que cumpla con los objetivos de revalorización, en función de su precio desarrollo y productividad.

OBJETIVOS

Objetivo General

Realizar una evaluación técnica y económica del proceso de reciclaje de paneles fotovoltaicos, evaluando tecnologías existentes, en función del contexto nacional y el impacto ambiental.

Objetivos específicos

- Recopilar antecedentes sobre las técnicas, tecnologías y criterios para la gestión de reciclaje de paneles fotovoltaicos.
- Analizar los posibles escenarios para el mercado de reciclaje de paneles fotovoltaicos.
- Seleccionar la tecnología que mejor se adapte al contexto y realidad nacional, a través de criterios económicos y ambientales.
- Realizar análisis y evaluación económica, estimando costos y beneficios, y tomando en cuenta la sensibilidad del proyecto a posibles cambios en el contexto económico y/o técnico.

Capítulo 1

1. Estado del arte

1.1. Paneles fotovoltaicos

1.1.1. Celdas fotovoltaicas

El principal componente para el funcionamiento de la energía solar fotovoltaica es la celda solar. Este componente es el responsable de captar la energía del sol, transformarla a energía eléctrica y captar los electrones resultantes de dicha transformación.

La celda logra transformar la energía proveniente del sol a energía eléctrica a través del efecto fotoeléctrico, el cual consiste en que los fotones incidentes son absorbidos por electrones libres que al estar dotados con mayor energía por la aportada por el electrón tienden a intentar salir de la estructura en la que se encuentran creando la posibilidad de ocupar a dicho electrón libre como energía eléctrica.

Para lograr esto la celda debe estar compuesta por un material semiconductor. Estos material se encuentran entre las características de un material conductor, materiales que facilitan el movimiento de los electrones a través de su red por el abandono de los electrones de valencia del átomo, y los materiales aislantes, los cuales restringen en gran medida el movimiento de los electrones a través de su red por la dificultad de que sus electrones de valencia abandonen el átomo. Estos materiales semiconductores pueden comportarse como uno u otro si se varían condiciones tales como, temperatura, radiación, campo magnético campo eléctrico, etc. Compuestos que presentan características semiconductoras son el silicio, germanio, cadmio y telurio entre otros.

La idea de usar materiales semiconductores es que permitan el movimiento de electrones bajo ciertas condiciones, para aprovechar este efecto, la celda fotovoltaica es dopada con elementos como el arsénico o el fosforo al formarse los enlaces covalentes quedaría un electrón libre formando una unión N (Llamada así por la carga negativa que contiene) y si es dopada con elementos como el Boro o Galio al formarse los enlaces covalentes faltaría un electrón y se formaría un espacio llamado hueco, generando una unión tipo P (Llamada así por la carga positiva que contiene).

Al unir elementos dopados de forma N y de forma P se forma una unión PN que puede comportarse como aislante o conductor en función del sentido de la corriente. Esta unión generará un campo eléctrico por la diferencia de cargas entre ambas partes. La celda fotovoltaica está compuesta por una unión PN y cuando la radiación solar aporta energía a los electrones que se encuentran en la zona afectada por el campo eléctrico, y si está energía es lo suficientemente grande para vencer dicho campo, el electrón saldrá de dicha zona para pasar a ser utilizable por su potencial eléctrico.

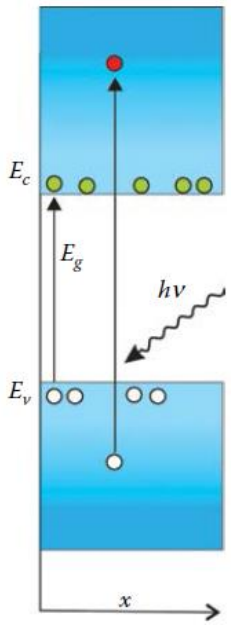

Figura 1.1 Funcionamiento celda fotovoltaica [1]

Aunque el funcionamiento de todas las celdas fotovoltaicas obedecen al efecto fotoeléctrico, existen distintos tipos de celda que se diferencian principalmente por el tipo de semiconductor utilizado, y como es dispuesto dicho semiconductor para formar la celda, los principales tipos de celdas fotovoltaicas son:

- **Monocristalina,** corresponden a celdas formadas de un solo lingote de silicio cristalizado que es cortado en la forma de la celda. Es el más eficiente (15-20%) pero también el más caro y difícil de formar.

- **Policritstalina,** corresponden a celdas formadas por trozos o restos de silicio cristalizado, aunque su red es cristalina al estar formado por trozos de lingote no es uniforme. Su eficiencia sigue siendo alta (14-17%), y sus costos son menores a los monocrsitalinos.

- **Silicio Amorfo,** corresponden a celdas formadas por silicio no cristalizado, lo que significa que su red no es uniforme, su eficiencia es baja (9-10%) y su degradación es mayor que la de celdas poli y monocristalinas, pero sus costos son menores.

- **Capa Fina,** corresponden a celdas formadas por silicio amorfo pulverizado lo que forma una celda más fina (en algunos casos hasta flexible), con una eficiencia más baja (7-13%), pero con costos más bajos.

- **CdTe,** corresponden a celdas de capa fina pero formadas por Telurio de Cadmio como reemplazo del silicio como semiconductor. Tienen una eficiencia más alta que un capa fina de silicio amorfo (13-18%), pero sus componentes son dañinos para la salud humana.

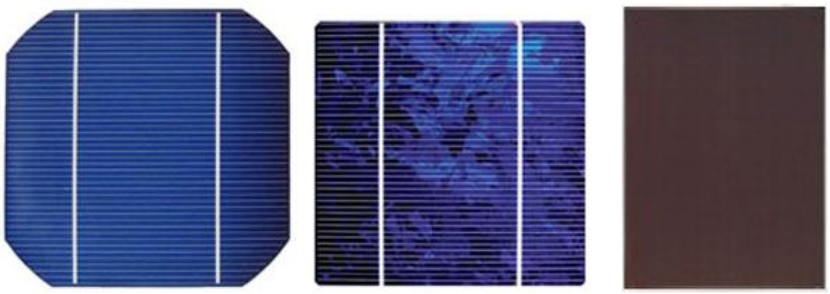

Figura 1.2 Tipos de celdas fotovoltaicas [2]

1.1.2. Composición Panel Fotovoltaico c-Si

Por efectos que serán explicados en la sección 1.2 solo se expondrá la composición de los distintos tipos de paneles solares en base a silicio, y desde este punto solo se trabajará con esta tecnología.

Dentro de este conjunto de paneles solares fotovoltaicos se encuentran todos los paneles en base a silicio (y que no sean Capa Fina). Por ejemplo, Monocristalinos, Policristalinos o Silicio Amorfo. Todos estos tipos de paneles presentan composiciones similares y se sustentan bajo el mismo diseño.

Algún parámetro de los diseños tales como proporción másica y volumétrica de los materiales, masa del conjunto o tipos de aislantes, puede variar entre una marca u otra pero como se mencionó anteriormente todos siguen un diseño estándar en el cual se pueden reconocer los principales componentes de un panel solar fotovoltaico.

El panel fotovoltaico está compuesto principalmente por: una capa de celdas fotovoltaicas conectadas en serie, un material encapsulante (normalmente EVA u otro polímero) que se encuentra rodeando las celdas, un vidrio templado, un backsheet (normalmente de Tedlar u otro polímero), marco de aluminio y por ultimo una caja con conexiones donde se encuentran los diodos de bypass y las conexiones para que el panel pueda transmitir la energía producida, como se puede apreciar:

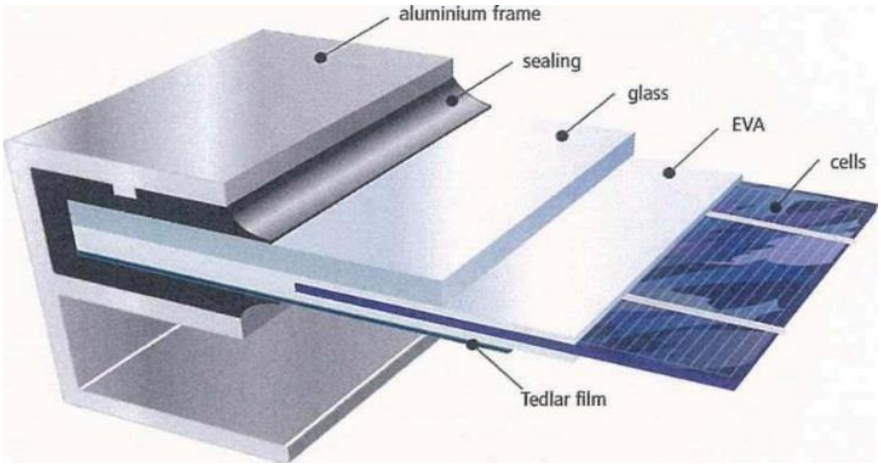

Figura 1.3 Estructura panel solar c-Sí. [3]

En cuanto a la proporción másica de dichos componentes, estos se encuentran principalmente distribuidos como se muestra:

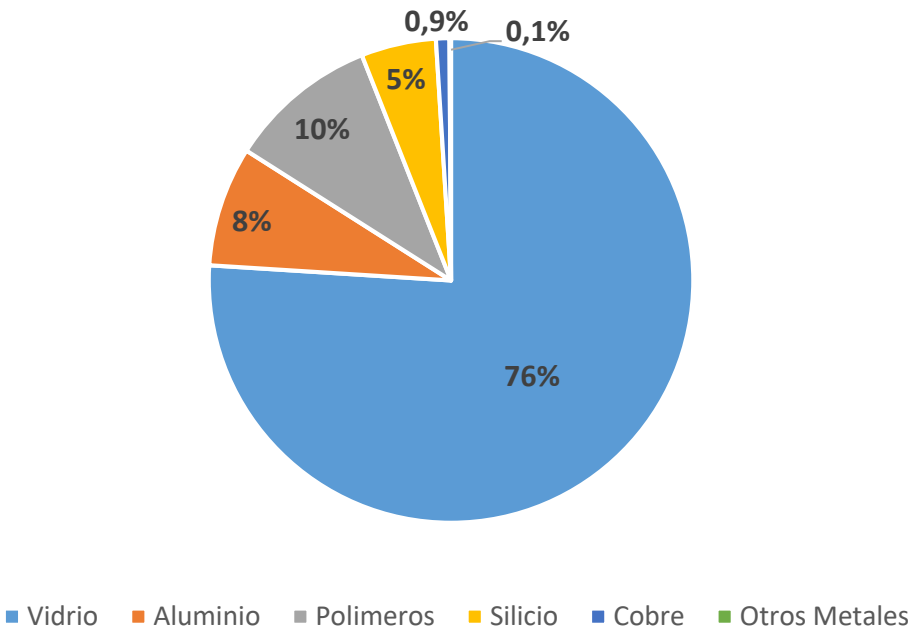

Figura 1.4 Proporción másica componentes panel c-Si. [4]

Por lo que se puede apreciar que el principal componente de un panel solar fotovoltaico es el vidrio templado alcanzando un 76% de su masa y el segundo componente es el marco de aluminio que alcanza un 8% de la masa del panel, luego hay un conjunto que incluye polímeros (EVA y backsheet) que alcanza un 10%, para que el resto de componentes (Silicio, Cobre, Plata, etc.) no supera el 6% de la composición másica del panel. Estos valores corresponden a datos representativos en función del funcionamiento de los paneles solares c-Si, pero la composición másica puede variar en función del proveedor y el modelo del panel, pero tenderán a la proporción presentada anteriormente.

En el contexto del reciclaje de dichos paneles fotovoltaicos, el vidrio y el aluminio al ser los elementos que representan la mayor parte de la masa del panel tienden a ser los componentes que se intentan recuperar más comúnmente para su reciclaje, el vidrio tiende a ser templado y muchas veces con tratamientos superficiales para que mejoren el rendimiento de la incidencia de la radiación solar sobre las celdas, mientras que el aluminio solo contiene un tratamiento de anodización para protegerlo de posible corrosión y desgaste al encontrarse a la intemperie.

El mayor desafío se encuentra en lograr una metodología que logre tratar con el encapsulante, ya que este polímero envuelve la celda solar por completo y la une al vidrio y al backsheet, por lo que tratar con el encapsulante se traduce en lograr recuperar gran parte de los componentes del panel fotovoltaico.

1.1.3. Modos de Falla

Los paneles solares fotovoltaicos cuentan con distintos modos de falla, pero estos pueden dividirse en dos grandes grupos, modos de falla que generan una falla temprana y modos de falla que generan una falla regular.

Falla regular

La falla regular en un panel fotovoltaico se produce cuando el panel sufre una baja en su capacidad de generación, disminuyendo su potencia máxima.

Este fenómeno se produce por dos efectos, el primero es de manera continua a lo largo de toda la vida del panel fotovoltaico, independiente de su marca, tecnología, y lugar de instalación va a sufrir degradación de sus componentes lo que se traducirá en una baja de eficiencia. Mientras que el segundo se produce por una baja de eficiencia instantánea llamada LID (Light Induced Degradation) que se produce en todos los paneles fotovoltaicos cuando se exponen por primera vez a la radiación solar, esta baja de eficiencia puede variar entre un 0,5 a 5%.

Distintos fabricantes prometen una degradación lineal durante un rango de 20 a 30 años y puede llegar a niveles de eficiencia entre un 80 a 85% en dicho rango de tiempo (Eficiencia de distintos fabricantes Anexo A). Este modelo de degradación se basa en estudios de degradación acelerada, en donde en condiciones de laboratorio se opera el panel fotovoltaico a sobre carga durante un periodo de tiempo más corto del de operación para así simular el comportamiento del panel fotovoltaico durante su vida útil. Este sistema contiene múltiples falencias pero principalmente se encuentran los errores por parte de la aceleración y por parte de las condiciones de laboratorio, que no contemplan las condiciones ambientales de operación.

Aunque tener una eficiencia menor a la estipulada en los catálogos para dicho tiempo (por causa de la degradación del panel), supone un cambio de garantía por parte del productor, esta no suele hacerse efectiva ya que debe comprobarse por laboratorio, simulando las mismas condiciones de prueba (25 C° y 1000 w/m^2), y así justificar para cada módulo que la eficiencia se encuentra fuera de los rangos prometidos por el fabricante, lo que supone esfuerzos de transporte y servicios de laboratorio que suelen dificultar el uso de la garantía por causas de degradación.

Los principales estudios sobre degradación de paneles fotovoltaicos, han sido realizados por D. Jordan por medio del NREL [5]. La metodología ocupada por Jordan fue la de recopilar la mayor cantidad de datos, en plantas de todo el mundo, que se encuentran en distintas condiciones ambientales y han entrado en funcionamiento en distintos años.

Para el 2016 se había recopilado datos de la degradación anual de 11.000 paneles en distintas condiciones.

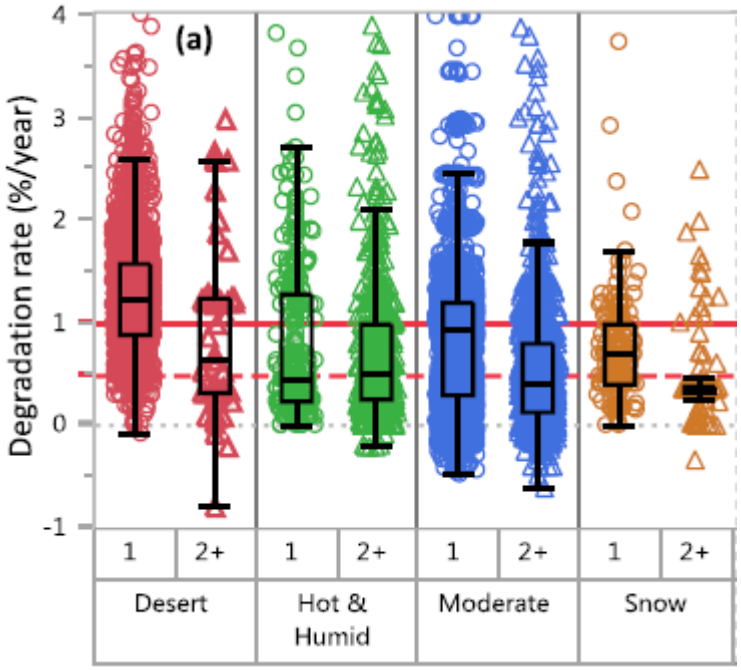

Figura 1.5 Tasa de degradación para distintas condiciones climáticas. [5]

En la Figura 1.5 , se puede apreciar que en condiciones desérticas (predominante en las plantas instaladas en Chile) se tiene una degradación anual mayor a un 1% para paneles con una medición al año, mientras que dicho parámetro se encuentra entre 0,5% y 1% para paneles con dos o más mediciones al año.

Por misma recomendación del autor es preferible usar los datos con dos mediciones o más, ya que aunque son menos datos, hay mayor confiabilidad de los resultados. El autor nombre que dicha media se encuentra entre 0,8% y 0,9% y la mediana en 0,6%. Al ser la mediana un valor más representativo de la muestra se decide que dicho dato es el que mejor representa la degradación anual de los paneles, dando una vida útil de entre 22 a 27 años dependiendo del LID. Por lo que los datos entregados por los proveedores de una vida útil de 25 años, es representativa para modelar el comportamiento de los paneles fotovoltaicos.

Por otro lado cabe destacar que en el estudio de D. Jordan, *PV degradation curves: non-linearities and failure modes* [6] y en el estudio de la IEA, *PVPS Task-13* [7]. Que se puede asumir una linealidad para el periodo de vida media del módulo (entre los 5 y 25 años), pero que en la etapa temprana se apreciaran no linealidades en su degradación por efectos del LID y defectos en la producción, mientras que se apreciará de mayor manera este efecto en la última etapa del módulo por efectos de corrosión en

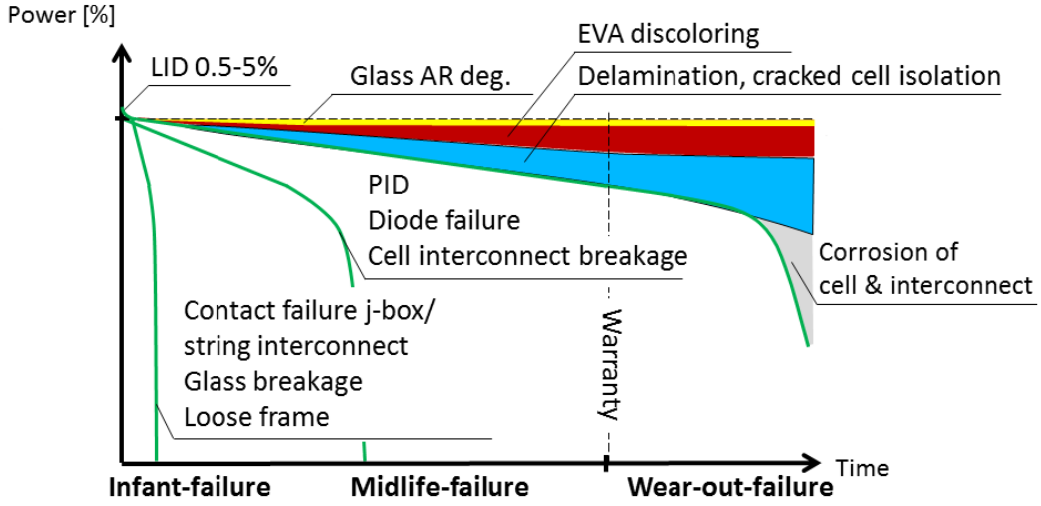

Figura 1.6 Modo de degradación no lineal, para paneles fotovoltaicos. [7]

En la Figura 1.6 es importante rescatar, que fuera de los años de degradación lineal, esta tiende a comportarse de manera no lineal, lo que genera incertidumbre sobre el comportamiento del módulo, por lo que aunque el módulo tenga un 80% de eficiencia tras los 25 años de operación es preferible re potenciar a mantener un módulo con incertidumbre sobre su productividad.

Falla temprana

La falla temprana en un panel fotovoltaico se produce por cualquier causa que retire el panel fotovoltaico de servicio antes del tiempo estipulado por el fabricante como vida útil, existen diversos modos de falla que se pueden presentar en un panel fotovoltaico para llevarlo a una falla temprana, siendo los más importantes de estos:

- **Puntos calientes**

Este efecto se puede generar cuando se impide el paso de la corriente por una o más celdas, ya que estas se encuentran conectadas en serie y al impedir que una de las celdas entregue la corriente que debería, la corriente del sistema bajará a la de menor intensidad y esta se transformará en una carga que disipara el exceso de energía que produce el resto de las celdas en forma de calor produciéndose los puntos calientes.

Estos puntos se pueden producir por dos grandes razones, la primera es el sombramiento de una o más celdas del panel, esto generará que dichas celdas no produzcan energía y se generé el efecto

de punto caliente. Para solucionar este problema se conectan grupos de celdas a diodos de bypass, así las celdas sombreadas solo disiparan la energía de las celdas pertenecientes a su grupo y no del resto. La principal causa de este problema es la suciedad que se produce sobre el panel, pero en general esta causa no genera puntos calientes permanentes, ya que una vez que el sombramiento pasa el punto caliente se disipa. Y por los diodos de bypass no alcanza temperaturas que dañen la celda de forma irreversible.

La segunda causa es por problemas internos en el panel, mala unión entre las celdas, minicracks dentro de las celdas, problemas con las soldaduras o cualquier causa que impida el paso de la corriente. Estos errores se pueden generar en la etapa de fabricación, transporte e instalación u operación por degradación de los componentes, y a diferencia del sombramiento el efecto es permanente, por lo que la única solución es reemplazar el panele.

- **Rotura**

La rotura de un módulo se puede producir por condiciones netamente externas, tanto ambientales como errores humanos. Algunas de las cusas tienden a ser, ráfagas de viento que deforman el panel, genera que caiga al piso estallando el vidrio o corta los cables que conectan los paneles solares, o errores humanos como el desprendimiento de piedras por el paso de vehículos en la planta que estallan el vidrio de los paneles.

- **Componentes eléctricos**

Los componentes eléctricos tienden a ser un modo de falla recurrente, especialmente los diodos de bypass que se encuentran en la caja de conexiones, estos componentes pueden sufrir fallas por alteraciones en el circuito, o por mala fabricación o instalación. Lo que genera que existan casos en donde los componentes de la caja de conexiones fallen impidiendo el funcionamiento del panel solar.

- **Delaminación**

La delaminación es un efecto que se produce en las distintas capas que componen el panel solar, y sucede cuando estas capas se separan, este efecto se puede producir por distintas razones pero principalmente se debe a errores en la fabricación, especialmente en la aplicación del encapsulante, ya que este elemento uno y protege al resto de los componentes del panel, por lo que si su aplicación no fue correcta y contiene burbujas de aire o no alcanzó la temperatura correcta, va presentar este tipo de fallas. Por lo general esta falla no se hace evidente en el inicio de la operación sino que se produce una vez que estos pequeños errores de fabricación se ven expuestos al desgaste y condiciones ambientales en donde el defecto se empieza propagar hasta convierte en la delaminación de sus componentes.

- **Decoloración del encapsulante**

Este efecto se produce en el encapsulante del panel solar, y es generado por la irradiación que recibe de forma constante, la cual degrada el polímero y lo decolora, quitándole su transparencia y generando manchas y un tono amarillento en el panel. Este efecto afecta la irradiación total que incide sobre el panel, lo que baja su eficiencia y genera una disminución en la producción del panel.

1.2. Reciclaje de Paneles Fotovoltaicos en Chile

1.2.1. Situación actual

Hoy en día en chile no existe ninguna opción para el reciclaje de paneles fotovoltaicos, aunque existen empresas especialistas en reciclaje, la cantidad de elementos que contiene el panel fotovoltaico representa un desafío para cualquier empresa de reciclaje convencional.

Por lo que la única opción que se encuentra en Chile para solucionar el problema de los paneles fotovoltaicos en falla es la acumulación (en espera de que en algún momento se creé una opción para el reciclaje de paneles fotovoltaicos) o la disposición final la que se debe realizar como aparato eléctrico o electrónico. Esto se puede realizar a través de distintas empresas especialistas y acreditadas en la disposición de residuos.

Tabla 1.1 Precios de disposición Hydronor.

Tipo de residuo	Precio USD/Ton
Residuos Peligrosos Componentes eléctricos	199
Residuos No Peligrosos	101

La Tabla 1.1 corresponde al coto de disposición de la empresa Hydronor, la diferencia de precio corresponde a si el componente es o no peligroso, a la fecha no hay consenso de si al disponer de los paneles estos deben ser tratados como peligrosos o no peligrosos, por lo que se debe realizar un estudio de peligrosidad a cada modelo de panel instalado para poder asegurar su falta de peligrosidad (lo que disminuye su costo de disposición a la mitad).

1.2.2. Ley 20.920

Esta ley entra en vigencia en 2016 y busca: *"Marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje".*

Por lo tanto esta ley busca que en Chile menos residuos lleguen a la etapa de disposición final y aprovechar al máximo las opciones de reutilización, reciclaje o poder calorífico de dichos materiales.

Para lograr esto se toman seis productos, y aunque sean o no considerados peligrosos, caben dentro de una nueva categoría llamada, productos prioritarios, los cuales son:

- Aceites lubricantes
- Aparatos eléctricos y electrónicos
- Baterías
- Envases y embalajes
- Neumáticos
- Pilas

Esta ley busca plantear metas de recolección y re valorización de estos productos. Estas metas serán fijadas a través de un decreto supremo que considerará, la peligrosidad del producto, potencial de valorización, el volumen del producto en el país y el carácter domiciliario o no domiciliario del residuo. Por lo tanto en base a estos criterios el decreto supremo establecerá las metas de recolección y sobre todo las metas de re valorización, en donde se definirá que porcentaje del producto debe ser re valorizado, a través de su re utilización, reciclaje o uso de su poder calorífico. Así se busca fomentar el reciclaje y crear una gestión de estos residuos de una manera normada, para disminuir estos potenciales residuos en su máximo porcentaje.

Otro de los puntos importantes que busca crear esta ley, es el de los responsables por la gestión de los productos prioritarios, para esto ha extendido la responsabilidad del productor a este punto. Es decir los productores de los productos prioritarios son los responsables de la gestión de sus productos cuando se vuelvan residuos, en el marco de las metas que establece el decreto supremo que corresponde a sus productos. Dentro de la categoría de productor de productos prioritarios se encuentran las empresas que importen estos productos al país, por lo que una empresa que importa cualquiera de los seis productos prioritarios debe hacerse responsable por la gestión de estos cuando se vuelvan residuos, procurando su recolección y revalorización.

Los paneles solares fotovoltaicos, independiente de la tecnología, son una sub categoría de los aparatos eléctricos y electrónicos, por lo tanto están dentro del marco de la ley 20.920 y deben ser tratados como productos prioritarios.

Por lo tanto cualquier empresa productora de paneles solares fotovoltaicos o que importe dichos paneles para su uso profesional (comercialización a particulares, generación on y off grid) serán responsables de la gestión para que los paneles solares fotovoltaicos que pasen a ser residuos sean recolectados y re valorizados, según las metas planteadas en el decreto supremo correspondiente.

Hasta la fecha no se ha publicado el decreto supremo que regula la gestión de Aparatos eléctricos y electrónicos.

1.3. Recopilación de metodologías para el reciclaje de PF

1.3.1. Publicaciones

Aunque la energía solar fotovoltaica se encuentra en auge a nivel mundial, y son cada vez más los países y empresas que invierten en esta tecnología, los estudios sobre el reciclaje y gestión sustentable de los paneles solares fotovoltaico (el principal componente de las plantas), no se encuentra muy avanzado. La mayoría de las publicaciones con respecto al tema se encuentran concentradas entre el 2016 y el 2018 [8][9][10][11][12].

El alcance de las publicaciones es extenso, algunas van desde la separación de componentes del panel solar completo, hasta la recuperación de metales de la celda de Silicio. El problema es que no existe una gran densidad de estas en cada parte del proceso sino que en la mayoría de los casos, son solo acercamientos al problema principal. Y la mayoría de las publicaciones se centran en estudios experimentales a muy pequeñas escalas y no se logra encontrar estudios una gran variedad de estudios que analicen la viabilidad de la aplicación de dichos estudios a nivel industrial.

En la Figura 1.7 se puede apreciar un diagrama de flujo con respecto a los distintos métodos y resultados esperados que presentan las distintas publicaciones, cabe destacar que este diagrama de flujo está construido con respecto a la celda de Silicio. Para el diagrama se deja fuera el retiro del marco de aluminio al tratarse de un proceso simple y por lo tanto no especificado en las publicaciones.

Existen tres métodos utilizados para descomponer el panel solar fotovoltaico en compuestos más simples, estos son: Mecánico, Químico y Térmico.

- **Mecánico,** busca triturar el panel solar para llevarlo a gránulos muy finos, al llegar a dichos tamaños (aproximadamente entre 400-80 µm). Y luego pasar los gránulos por distintos procesos, térmicos para sublimar el EVA, eléctricos para recuperar metales, flotabilidad, ópticos, etc. Y así separar los componentes. Este método es relativamente sencillo al tratarse de un sistema de chancado, los cuales son sumamente industrializados y estudiados, pero por otro lado se consiguen componentes de baja pureza, los cuales no pueden ser utilizados en un proceso de economía circular y de menor valor comercial y productivo.

- **Térmico,** busca eliminar el EVA (y en algunos casos también el backsheet) a través de procesos térmicos, buscando su punto de sublimación, para así poder separar el resto de los componentes para llevarlos a post procesos donde se reciclaran o revalorizarán. Este método permite recuperar componentes de mayor grado de pureza y calidad, permitiendo que tengan un mayor valor comercial y productivo, pero el proceso es más engorroso y existe la posibilidad de dañar componentes durante su aplicación.

- **Químico,** al igual que el método térmico, el método químico busca eliminar el EVA a través de su disolución en distintos tipos de disolventes, y así recuperar el resto de sus componentes. Este proceso permite recuperar componentes de alta pureza y calidad, pero es riesgoso tanto para la operación como para el medio ambiente y existe la probabilidad de dañar el resto de los componentes. Cabe destacar que a través de un proceso químico llamado wet etching, se logra separar los metales del silicio en la celda, para reutilizar estos componentes en nuevas celdas u otros fines.

Distintos métodos pueden ser o no ser destructivos con respecto a la celda Solar, y dichos métodos pueden o no ser destructivos con respecto al vidrio templado, por lo que cada estudio tienen distintas metas de recuperación y por lo tanto distintos post procesos para el reciclaje o reúso de los componentes de panel solar. En función de la celda de silicio como se muestra en la Figura 1.7 se puede recuperar la celda en tres grandes niveles.

- **Silicio,** es el nivel más bajo de recuperación y consiste en volver la celda a la materia prima que es el silicio para volver a procesarlo y crear nuevos wafers de silicio. Esto se logra al pasar la celda (en cualquier estado de funcionalidad y rotura) por un proceso químico de wet etching en donde se retiran los metales para obtener silicio, y luego un proceso de trituración para llevar al silicio a un tamaño granular y así poder procesarlo. La ventaja de este proceso es que no importa la condición en que se encuentre la celda para llevarlo a cabo.

- **Wafer,** es un nivel intermedio de recuperación, ya que se procesa la celda por un proceso de wet etching, para retirar los metales de esta, pero manteniendo la forma del silicio (wafer) para no tener que re procesar el silicio para llevarlo a la forma deseada. Y así poder llevarlo a un proceso de dopaje y agregar el resto de componentes para formar una nueva celda. La ventaja de este proceso es que se tiene un nivel de recuperación más alto que el silicio, pero solo puede ser utilizado en celdas que no han sido rotas, aunque no importa su funcionalidad.

- **Celda,** es el nivel más alto de recuperación, ya que se trata de reúso total de la celda sin necesidad de procesarla para su funcionalidad. Esto se logra recuperando la celda de forma intacta y reutilizándola para la creación de nuevos paneles solares. La ventaja de este proceso es que no se necesita de ningún tipo de post proceso para volver a tener una celda operacional (más que agregarla a un nuevo panel), pero significa que la celda debe estar completamente operacional y con una eficiencia mínima (que valga la pena comercializar) y esto solo se da en fallas tempranas en donde parte de las celdas del panel no hayan sido dañadas y sean rescatables, por lo que se debe tener otro proceso para el reciclaje de paneles en donde las celdas no sean operacionales como fallas regulares (por la baja eficiencia) o fallas tempranas en donde todas, o la gran mayoría de las celdas hayan sido dañadas.

El caso del vidrio es más simple al tener solo dos niveles de recuperación, vidrio roto y vidrio intacto. El vidrio intacto es útil para generar una economía circular y reusar directamente en la elaboración de nuevos paneles. Mientras que el vidrio roto puede reciclarse para crear nuevo vidrio o para sub productos como lana de vidrio.

Dentro de las publicaciones existentes se pueden encontrar estudios sobre un análisis de carácter económico, ambiental y energético de las opciones de métodos para el reciclaje de paneles solares. Estos estudios no son acabados ni específicos, sino que hacen un análisis general enfocado en los métodos, pero no en todo lo que puede incluir el proceso completo. Por lo que su metodología puede ser útil como base para construir un estudio más completo y especifico, pero sus resultados no son útiles al momento de analizar la viabilidad de implementar un proceso de reciclaje.

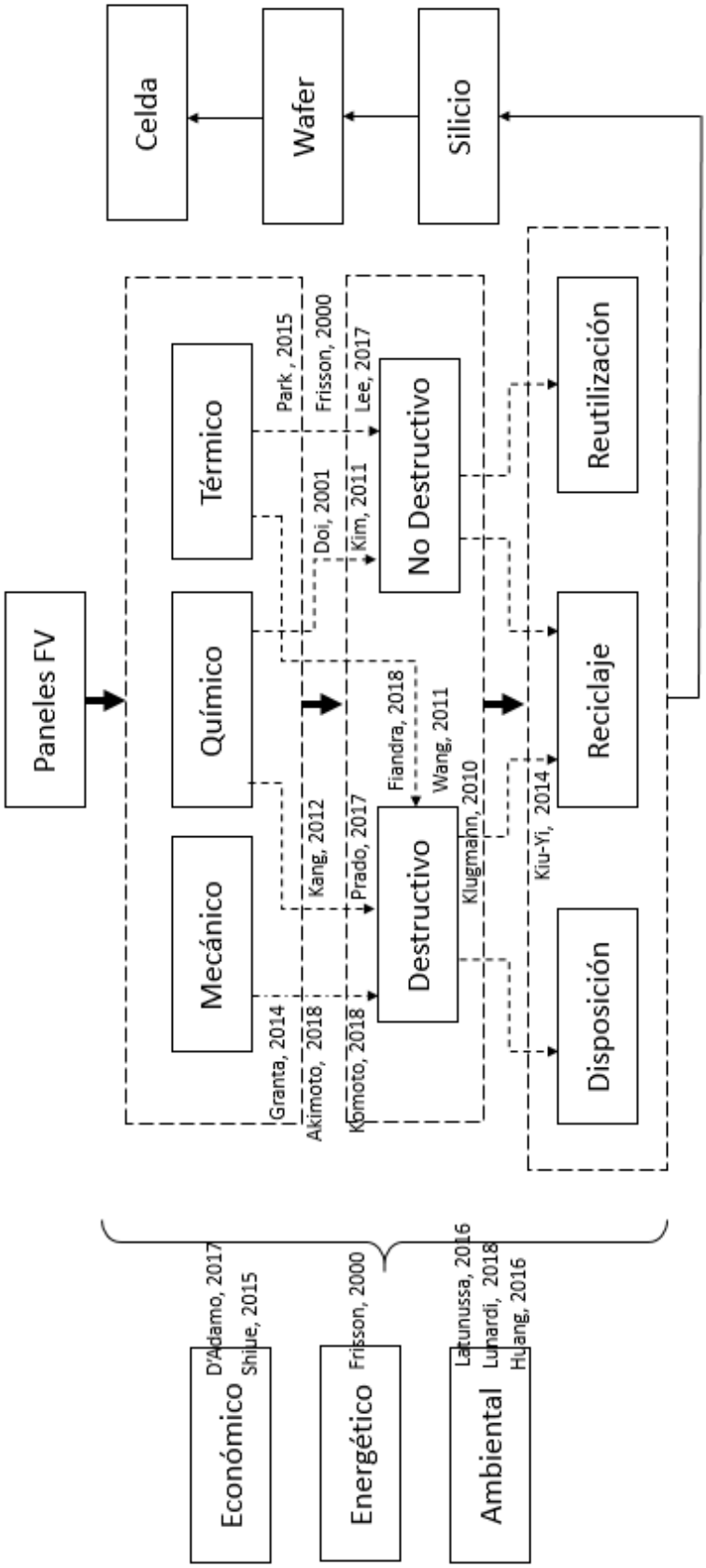

Figura 1.7 Diagrama de flujo con opciones de reciclaje.

1.3.2. Reporte de IEA Task 12

La IEA (International Energy Agency) en Enero de 2018, recopiló información sobre las distintas patentes que existen en Europa, Estados Unidos, Japón, China y Corea, también revisaron las patentes existentes en el PCT (Patent Corporation Treaty) [13]. El periodo de la información recolectada es de 1976-2016. En total se recolectaron 128 patentes enfocadas en reciclaje de paneles c-Si, en la Figura 1.8 se aprecia la cantidad de patentes por país y año.

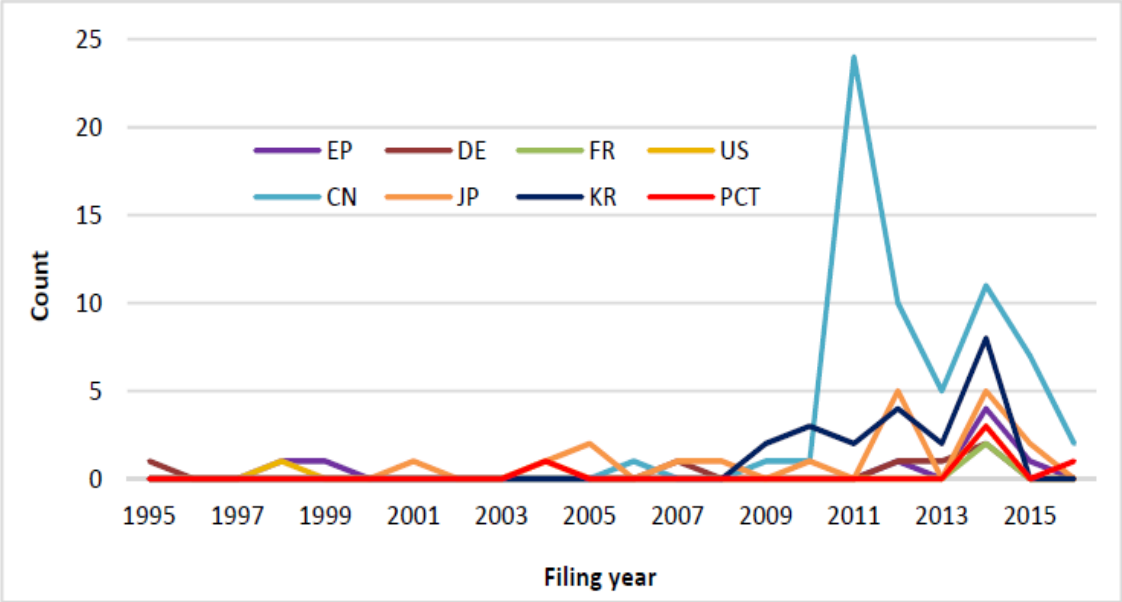

Figura 1.8 Cantidad de patentes para reciclaje, por país y año. [13]

A lo largo del periodo se puede apreciar cómo han aumentado las patentes publicadas desde el 2010, esto se debe principalmente al auge en la instalación de energía solar fotovoltaica especialmente en los países asiáticos. Se proyecta que a medida que las plantas empiecen a llegar a sus etapas de abandono (o por su defecto re potenciamiento) seguirá aumentando el número de patentes, especialmente en países en donde esté regulada la gestión de paneles fotovoltaicos para disminuir su disposición.

Por otra parte se debe diferenciar a qué componentes del panel busca tratar cada una de las patentes. La Figura 1.9 muestra la proporción en que tratan las patentes a los distintos componentes del panel fotovoltaico.

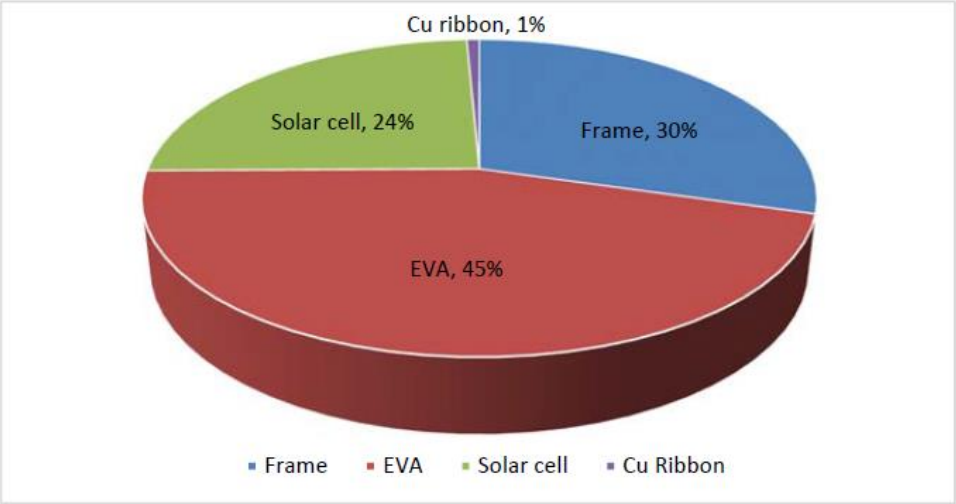

Figura 1.9 Porcentaje de patentes para reciclaje, según componente a recuperar. [13]

Como se puede observar en la Figura 1.9 el 45% de las patentes se enfocan en métodos para tratar el encapsulante, no especifica si estas patentes al tratar el encapsulante dañan otros componentes como el vidrio o las celdas o en qué condiciones se recuperan estos componentes al tratar el encapsulante por cada uno de estos métodos. Otro 30% se enfoca en tratar el marco de aluminio, este se puede considerar el proceso más sencillo ya que el marco de aluminio solo se encuentra acoplado al panel fotovoltaico por presión, por lo que solo se necesita de un proceso mecánico simple para retirar dicho componente. Luego un 24% se enfoca en la celda de silicio, esto no se refiere a lograr recuperar la celda de un panel fotovoltaico, ya que dicho proceso se logra tratando el encapsulante, estas patentes están enfocadas en recuperar elementos valiosos de la celda solar (principalmente Si y Ag). Por ultimo un 1% busca revalorizar las conexiones de cobre que se encuentran dentro del panel.

De las 128 patentes recuperadas solo 47 (37%) están otorgadas, mientras que el resto está pendientes, expiradas o abandonadas. De las 47 patentes otorgadas 3 se han implementado durante un periodo experimental en un contexto industrial, mientras que 11 han sido o están siendo probadas a nivel investigativo.

Capítulo 2

2. Análisis del mercado para el reciclaje de PF

El mercado que está en contacto con el reciclaje de paneles solares fotovoltaicos se compone por dos partes:

La primera, se basa en la cantidad de paneles en desuso a cada año, ya que este valor es el que define la cantidad de insumos disponibles para cada periodo, siendo un punto de limitación para el diseño y evaluación de la planta.

La segunda, es el mercado de los componentes resultantes del reciclaje, cuales son las opciones de valorización y a cuales son los procesos y opciones que entregan mayores beneficios al modelo de negocios.

2.1. Proyección de PF en desuso

2.1.1. Falla de los paneles

Para poder calcular la cantidad de paneles en falla por año, es necesario tomar dos elementos en consideración: Primero, las proyecciones de la cantidad de paneles instalados por años. Segundo, los datos de falla de paneles.

Tomando dichos datos se construye una tabla con el porcentaje de paneles que irá fallando, tomando en cuenta la tasa de falla por año de los paneles. Aunque la tasa de falla muestra la confiabilidad (probabilidad de que el panel falle en dicho año), al tener un universo que cuenta con una gran cantidad de elementos se supone que a cada año va a ir fallando la cantidad de paneles, según la confiabilidad de estos. Y se supone que el resto de paneles que no fallo antes de la vida útil, serán retirados cumplido este plazo, por la incertidumbre en su funcionamiento.

Con dichos resultados se tiene que el año en que entra en operación la planta, se toma como año uno y esta va fallando en porcentaje según va avanzando en el tiempo. Cabe destacar que la falla de las plantas se irá superponiendo y cada una fallará a tiempos distintos al entrar en operación en distintos años.

Aunque se calcularán los resultados de todas las plantas para los seis escenarios de modos de falla posibles, se supone que todas las plantas fallan según el modo del escenario que se está calculando, por lo que el modelo no permite que para un mismo escenario las plantas fallen con distintos modos.

2.1.2. Paneles fotovoltaicos instalados en Chile

Situación actual

La energía solar fotovoltaica entra en el mercado Chileno para el 2014 cuando se instalan alrededor de 190 MW en la matriz energética nacional. Desde entonces año a año ha ido aumentando siendo el 2017 el año en que se instaló la mayor potencia con un total de 704 MW. Para el 2018 se registró un total de 2.315 MW instalados y a Mayo del 2019, 2.382 MW. [14]

.

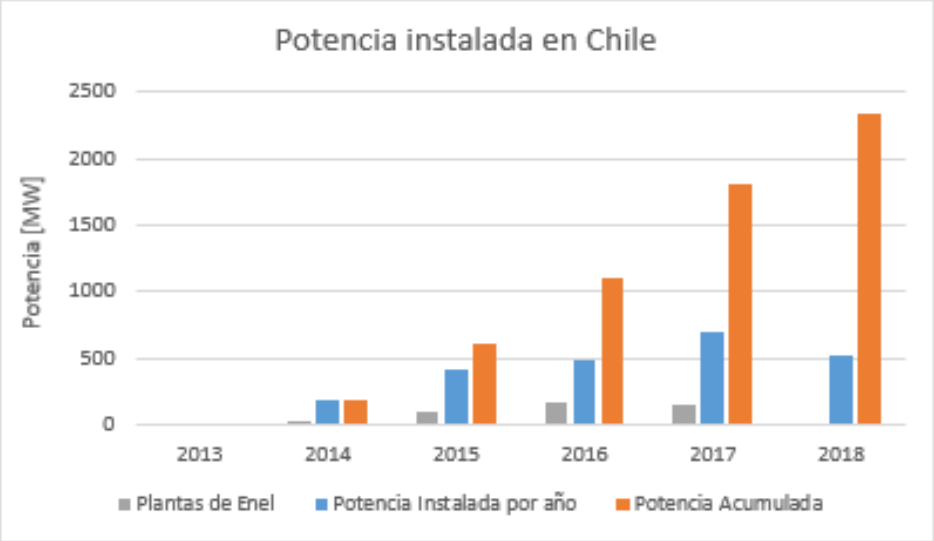

Figura 2.1 Potencia solar fotovoltaica Instalada en Chile por año. [14]

Otro punto a tener en consideración, es la cantidad de módulos que se han instalados a lo largo de la operación de las plantas solares fotovoltaicas en Chile, este dato es sumamente difícil de obtener ya que cada operador tiene la información de la cantidad de módulos utilizados y comprados. Pero se puede aproximar al dividir la potencia nominal instalada a nivel nacional, por la potencia nominal de un panel tipo, para lograr esto se debe elegir un tipo de tecnología para decidir su potencia nominal. Por lo que se usará la potencia nominal de un módulo c-Si, al tener presencia en el 90% de las instalaciones nacionales, por tener un menor costo y una mayor eficiencia.

Tomando lo anterior en cuenta se dividió la potencia nominal instalada, por 310 [Wp], siendo está la potencia nominal de un módulo c-Si entre los años 2014 y 2018, obteniéndose:

Tabla 2.1 Cantidad de Módulos instalados por año.

Año	**Módulos Enel**	**Módulos Resto**	**Total**
2014	39.996	454.994	494.990
2015	387.468	895.877	1.283.345
2016	567.738	957.919	1.525.657
2017	518.320	1.603.016	2.121.336
2018	0	1.524484	1.524.484
Total	**1.513.522**	**5.436.290**	**6.949.812**

Crecimiento y proyección

La energía solar fotovoltaica se encuentra en auge, principalmente por la capacidad de explotación que se encuentra en el norte de Chile, el decrecimiento de los costos y la preferencia de las ERNC. En base a este último punto a finales del 2017 el Coordinador Eléctrico Nacional, realizó proyecciones del Sistema Eléctrico Nacional, proponiendo dos casos: con descarbonización y sin descarbonización [15].

Luego se proponen seis escenarios basados en factores económicos y Limitaciones técnico-sociales, siendo los más variables para la tecnología solar los escenarios A1 y A6, siendo sus supuestos:

Combinatoria de supuestos		A1	A6
Mecanismo de descarbonización		Vida útil	Vida útil
Costos de inversión tecnologías de generación renovables	CSP	Ref.	Alto
	Solar	Ref.	Bajo
	Eólico	Ref.	Bajo
	Geotérmica	Ref.	Ref.
	Hidráulica	Ref.	Ref.
Costos de inversión sistemas de almacenamiento	Baterías	Ref.	Bajo
	Bombeo hidráulico	Ref.	Bajo
Costos de inversión tecnologías convencionales	GNL	Ref.	Ref.
Restricción inversiones por oposición social o limitaciones técnico-ambientales asociadas a proyectos hidroeléctricos, bombeo y geotermia		Ref.	Limitado
Costo de combustible GNL		Ref.	Alto
Demanda Energética		Ref.	Ref.

Figura 2.2 Supuestos para los escenarios A1 y A6 de la proyección de la potencia instalada de energía Solar Fotovoltaica. [15]

En base a los anteriores supuestos se obtiene:

Escenario A1

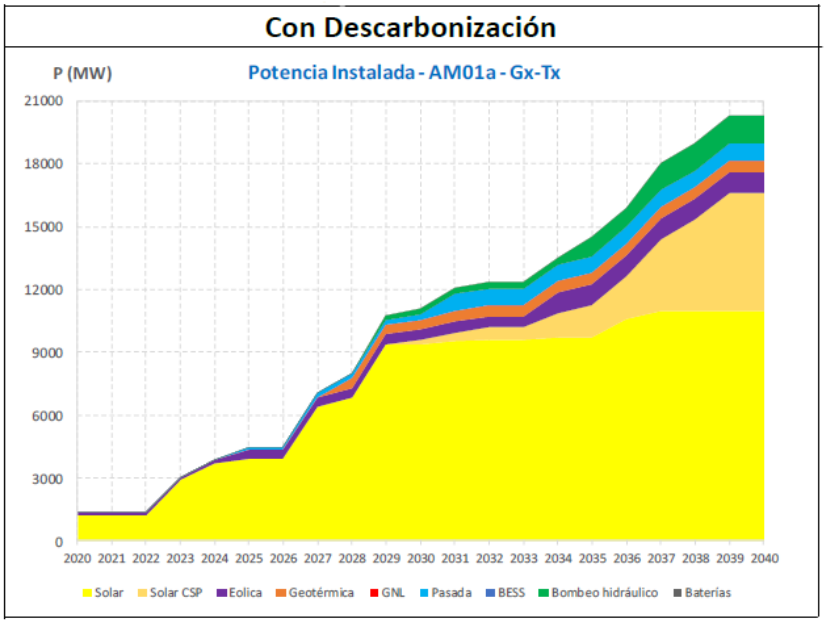

Figura 2.3 Escenario A1 con descarbonización.

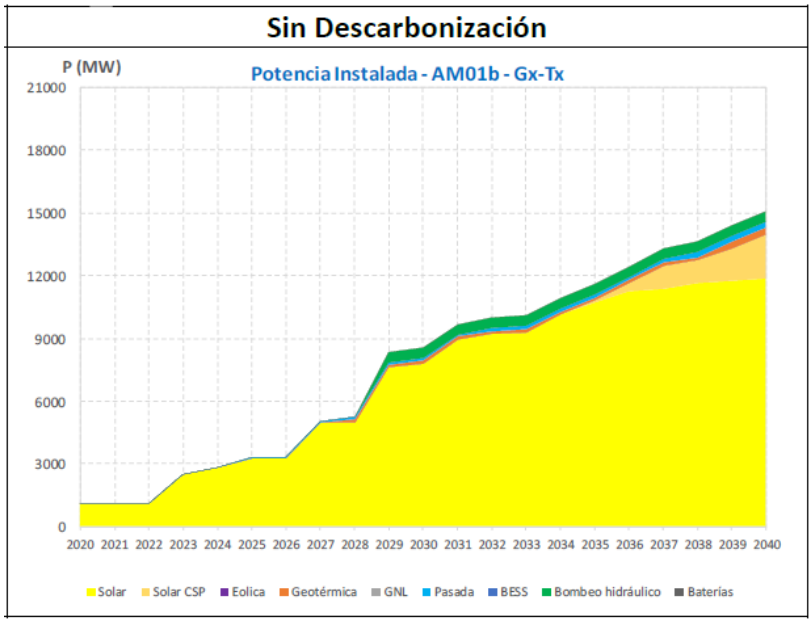

Figura 2.4 Escenario A1 sin descarbonización.

Escenario A6

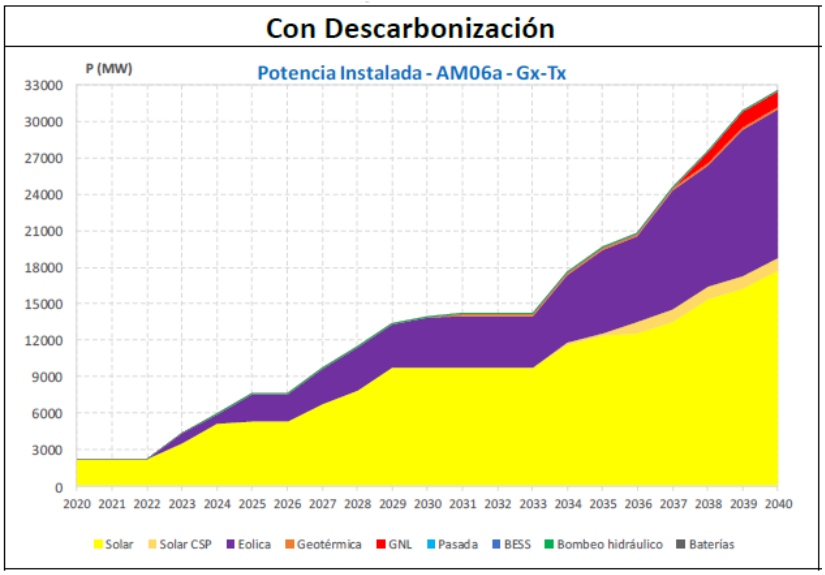

Figura 2.5 Escenario A6 con descarbonización.

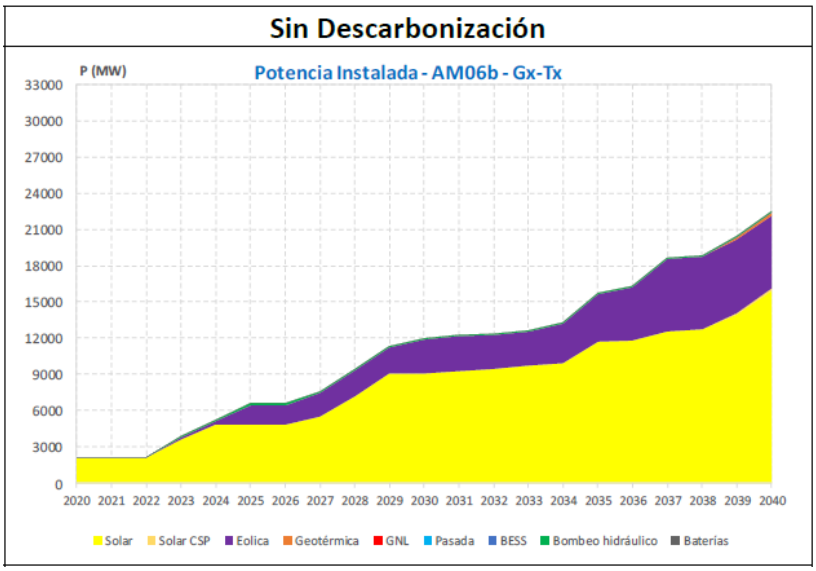

Figura 2.6 Escenario A6 sin descarbonización

En el Anexo B se pueden encontrar Tablas con los valores de potencia total instalada a cada año y potencia instalada por año en MW.

Otro punto a tomar en cuenta es la cantidad de paneles que se irá instalando cada año, este punto es el que define cuan factible será la oportunidad de negocio y en qué año será más provechosa su implementación.

Para proyectar esta situación, se recopilo información generada por el Coordinador Eléctrico Nacional, en donde se realizó un estudio para proyectar la matriz del Sistema Eléctrico Nacional, para anteponerse a la probabilidad de que en Chile se inicie un proceso de descarbonización y se generen cambios drásticos en la matriz. Para esto se crean seis escenarios con distintos supuestos de costos y limitaciones, de las cuales se toman los escenarios A1 y A6. . Las tablas con los datos utilizados se encuentran en el Anexo B.

Para poder proyectar la cantidad de paneles instalados se tomó la potencia instalada por cada año y se decidió por la potencia nominal de un panel c-Si. Se decidió transformar el total de paneles como si fueran c-Si, ya que esta es la tecnología que presenta la mayor eficiencia y costos más bajos, la potencia que se decidió utilizar fue de 400 MW, por la incorporación de paneles bifaciales al mercado.

Obteniéndose así un total de paneles instalados a cada año igual a:

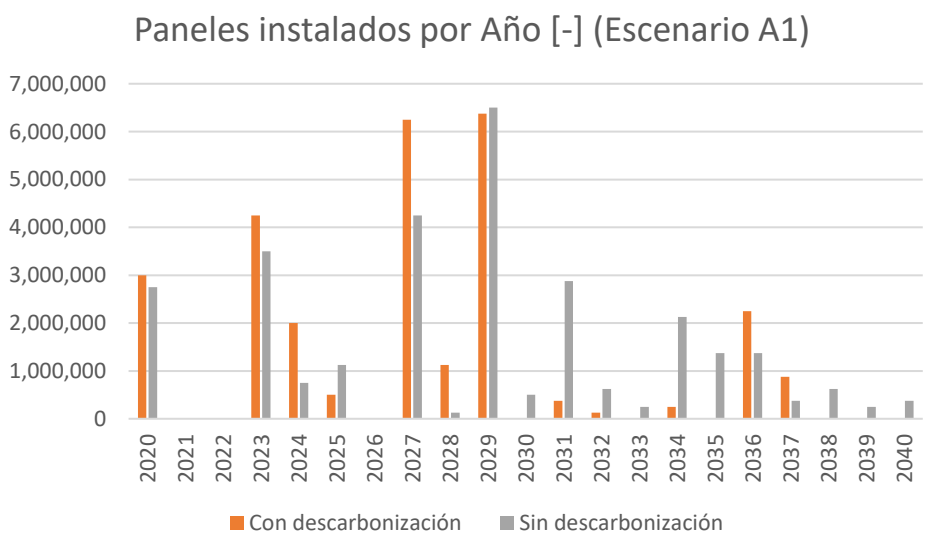

Figura 2.7 Cantidad de Paneles instalados por año, escenario A1.

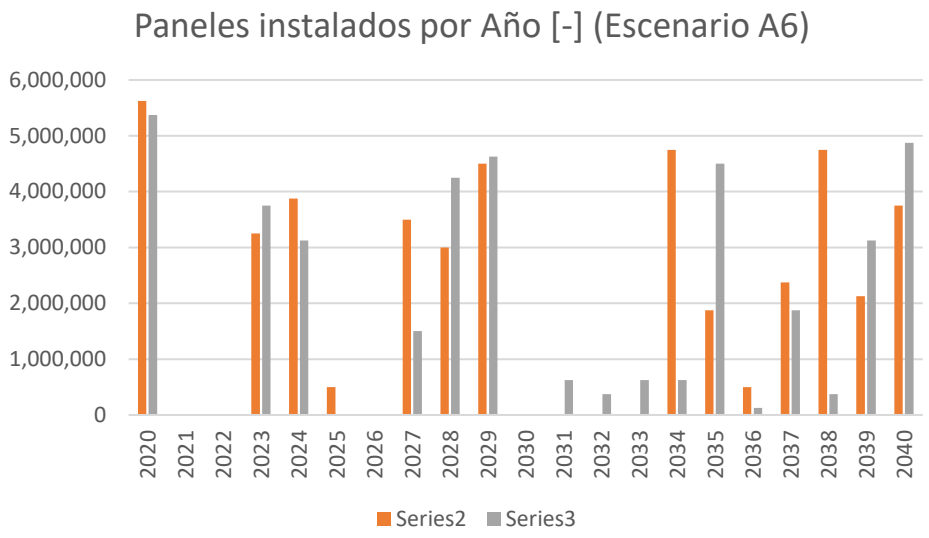

Figura 2.8 Cantidad de Paneles instalados por año, escenario A6.

Obteniéndose un total de paneles igual a:

Tabla 2.2 Total de paneles instalados desde 2020 a 2040.

	A1	**A6**
Con descarbonización	27.375.000	44.375.000
Sin descarbonización	29.750.000	39.750.000

2.1.3. Proyección de fallas

En la bibliografía se pueden encontrar dos criterios para proyectar la tasa de falla de los módulos fotovoltaicos, el primero es a través de la función de distribución de Weibull y la segunda es a través de una tasa de falla constante.

Weibull

La función de distribución de Weibull es una función estadística en donde a través de dos parámetros, un factor de forma y otro de escala, se logra distribuir la probabilidad de ciertos eventos con un valor de entrada mayor a cero. Esta función es ampliamente ocupada para estudiar la probabilidad de falla de componentes, al adaptarse de buena forma al tiempo como valor de entrada.

Para obtener los parámetros de forma y escala, se necesita de la historia de falla del componente a analizar. Por lo que al aplicar esta técnica a plantas fotovoltaicas, se encuentra un problema, por la gran cantidad de tiempo que se requiere para registrar la historia de una planta, aunque el único factor que se ve afectado es el de escala, ya que el factor de forma solo se ve afectado por los intervalos entre falla y falla.

Es por esto que se tienen dos escenarios posibles: (i) o se selecciona una planta y se registra por un tiempo menor a la vida útil, (ii) o se toma una muestra menor y se hace un estudio acelerado para analizar el comportamiento.

Existen estudios para ambos casos, pero se ocuparan los estudios realizado bajo la primera condición (i), ya que bajo estas condiciones se puede modelar de mejor manera el factor de forma real de la planta, y se puede ocupar la vida útil de la los módulos (definida en el punto 2), como factor de escala [16]. También al ocupar este método se puede ir mejorando la muestra al seguir tomando datos.

Tabla 2.3 Valores de factores de forma, falla PF por Weibull.

Fuente	Factor de Forma [-]
Unión Europea [17]	3,5
Kuitche [18]	5,3759
Kumar & Sarkar [16]	9,982

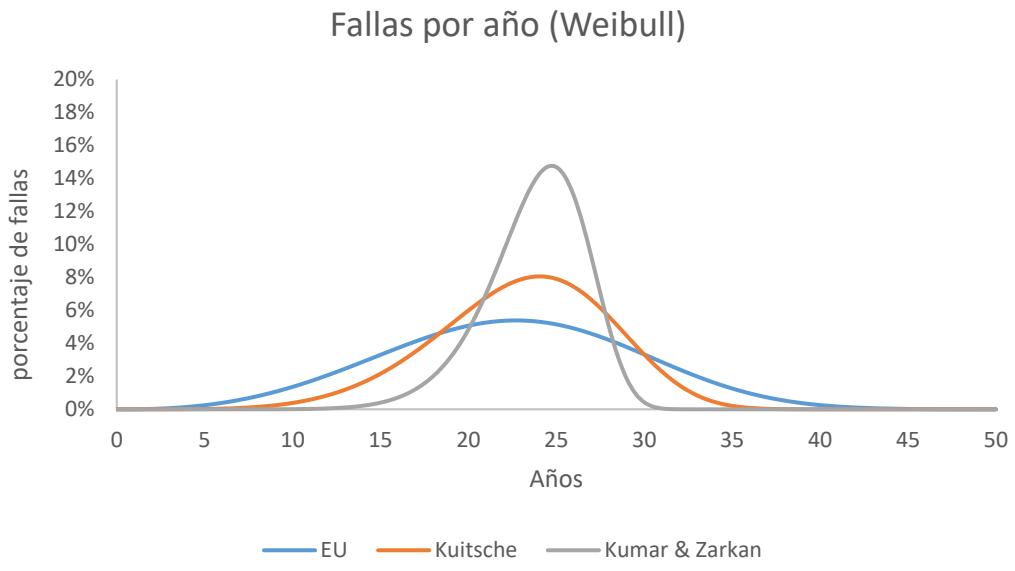

Figura 2.9 Porcentaje de falla por año, para los factores de forma propuestos.

Constante

El modelo de tasa de falla constante es el más sencillo que se puede utilizar. Se basa en suponer que va a ir fallando un porcentaje constante del total de módulos cada año. Aunque los supuestos de este modelo se contradicen con la bibliografía que muestra una tasa de falla adaptad a "la curva de la bañera" [7], por la gran cantidad de fallas que se ven en los primeros años de operación, por errores de la manufactura, este modelo se basa en que la proporción de paneles en falla temprana versus la cantidad de paneles en falla regular será tan baja, que la diferencia entre las fallas al inicio de la operación y el resto de la ida útil, no tendrá efectos considerables.

Este modelo es adoptado por el ministerio de medio ambiente de Japón [19], donde en un informe dedicado a explicar los peligros de los módulos fotovoltaicos si pasan a ser residuos explican que adoptarán el modelo de tasa de falla constante por las razones anteriormente señaladas.

Tabla 2.4 Valores de porcentaje de falla, para PF por tasa de falla constante.

Fuente	Tasa de Falla [%]
MMA Japón [19]	0,5
MMA Japón [19]	0,3
Propuesta	0,1

Dentro de las tasas de falla constante expuestas, se propone una de un 0,1%, en base a la historia de las plantas de Enel, tomando los valores de paneles en fallas por inspección termografica.

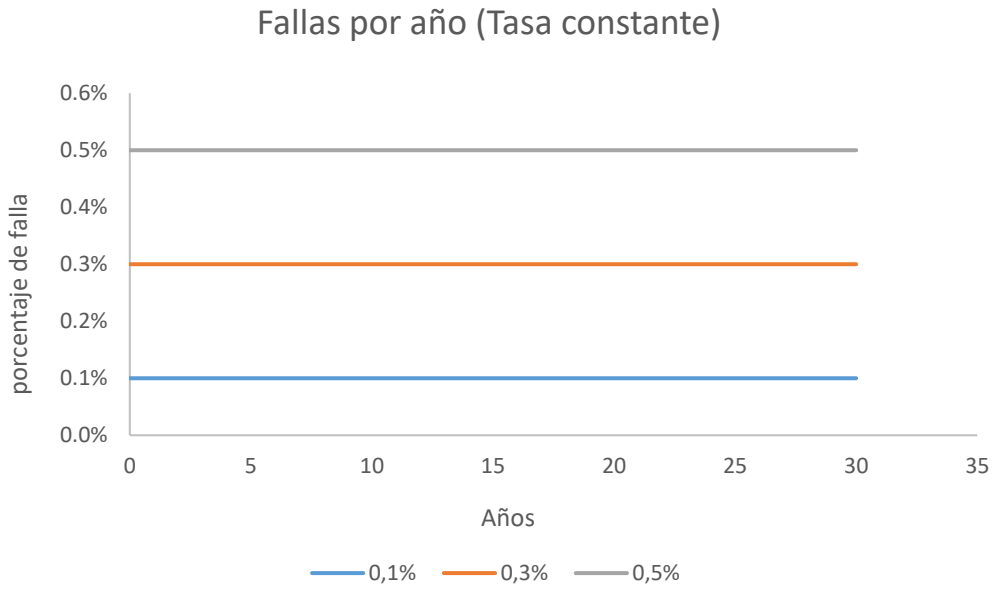

Figura 2.10 Porcentaje de falla por año, para tasas de falla constante propuestas.

2.1.4. Cantidad de paneles en falla

En función de lo expuesto anteriormente, más la vida útil de las plantas (25 años) presentada en la sección 1.1.3 se puede calcular la cantidad de paneles en desuso para cada año, teniendo un total de ocho escenarios posibles, cada uno con tres casos, un flujo bajo, medio y alto de paneles solares.

Todos los escenarios suponen una proyección de paneles en falla hasta aproximadamente el año 2065 (25 años desde el 2040 último año de proyección, sobre paneles instalados en Chile, según potencia solar fotovoltaica), por lo que los escenarios se darán en un lapso de 45 años. Las tablas con los resultados se pueden encontrar en el Anexo B.

Escenario A1 Con descarbonización

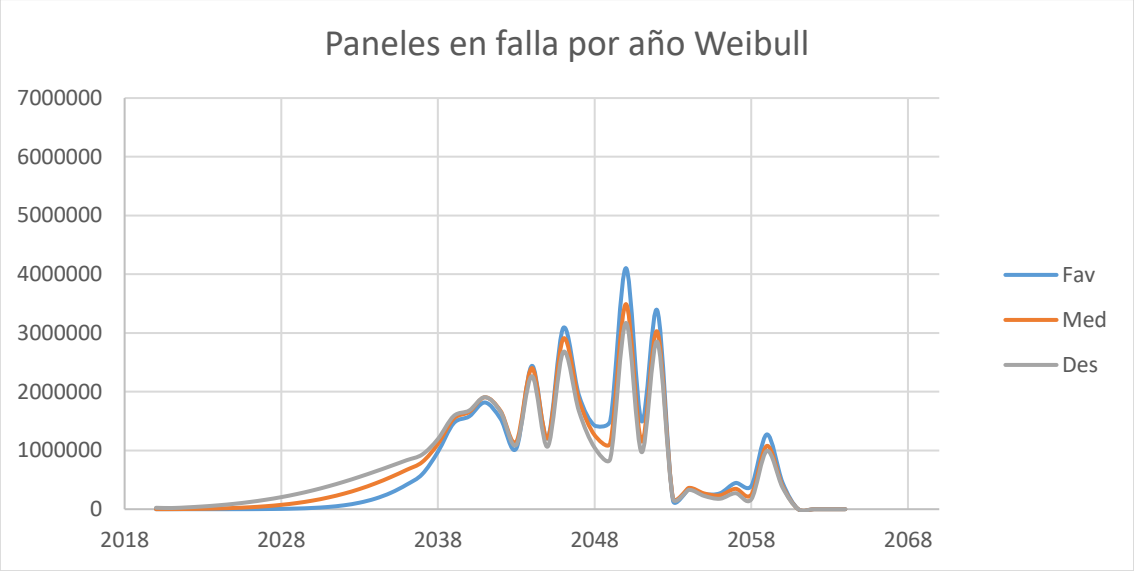

Figura 2.11 Cantidad de Paneles en falla por año, escenario A1 con descarbonización - Weibull.

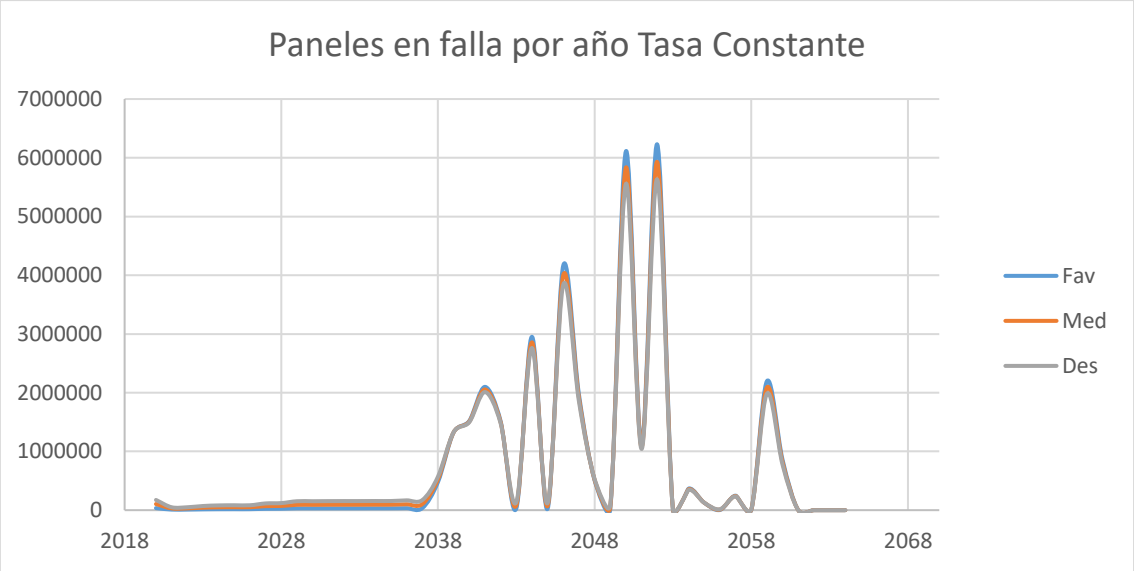

Figura 2.12 Cantidad de Paneles en falla por año, escenario A1 con descarbonización - Constante.

Escenario A1 Sin descarbonización

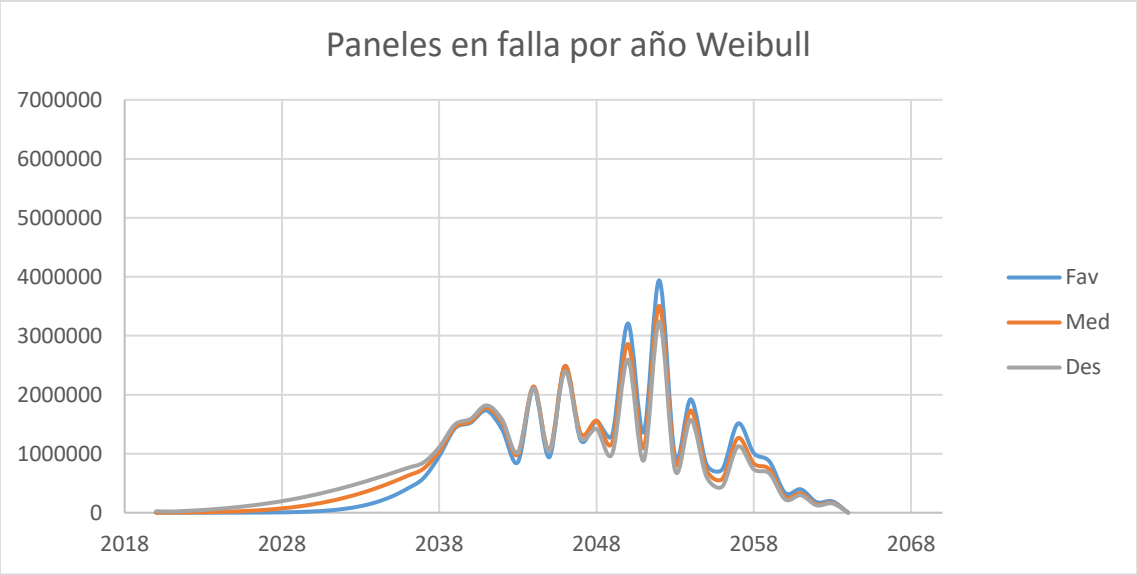

Figura 2.13 Cantidad de Paneles en falla por año, escenario A1 sin descarbonización - Weibull.

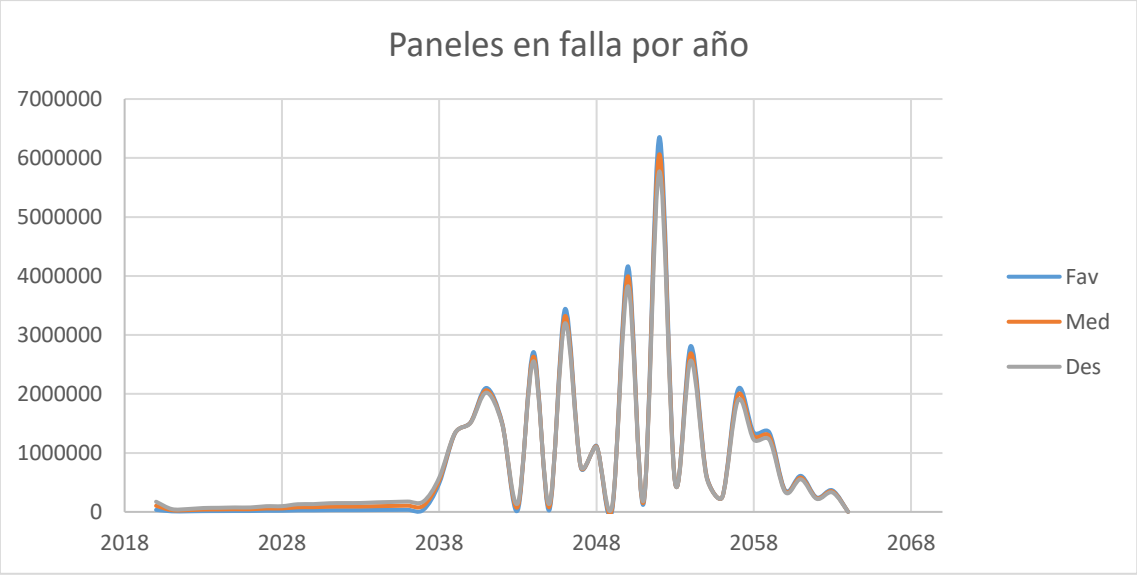

Figura 2.14 Cantidad de Paneles en falla por año, escenario A1 sin descarbonización - Constante.

Escenario A6 Con descarbonización

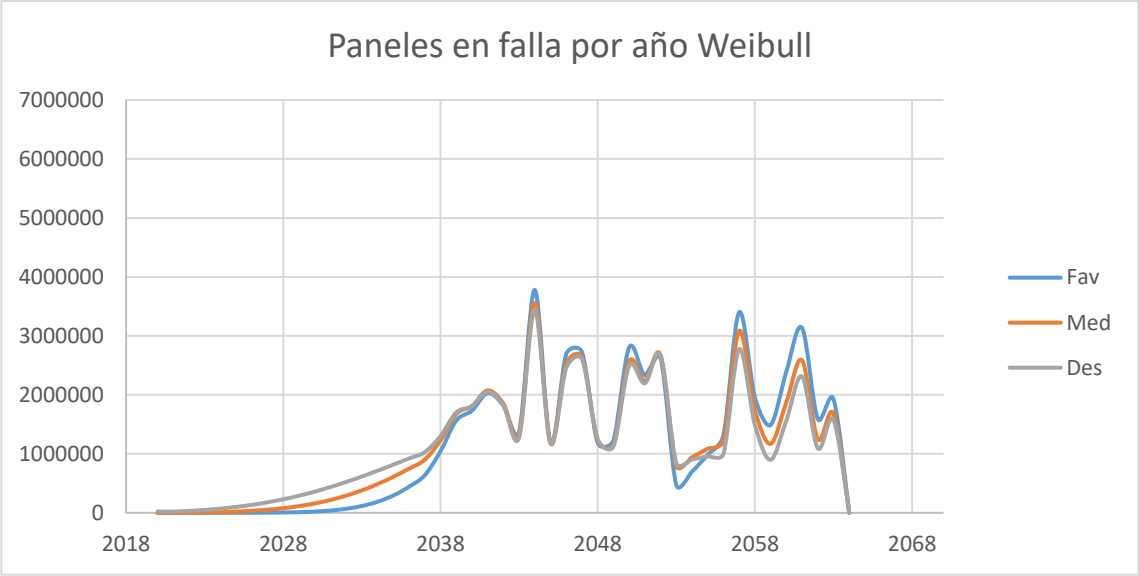

Figura 2.15 Cantidad de Paneles en falla por año, escenario A6 con descarbonización - Weibull.

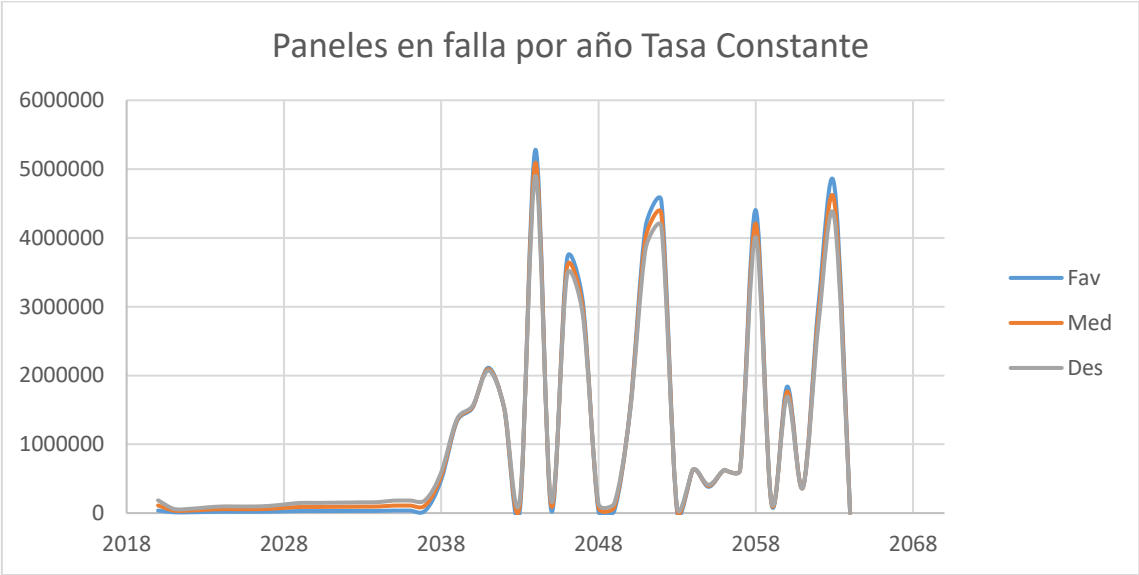

Figura 2.16 Cantidad de Paneles en falla por año, escenario A6 con descarbonización - Constante.

Escenario A6 Sin descarbonización

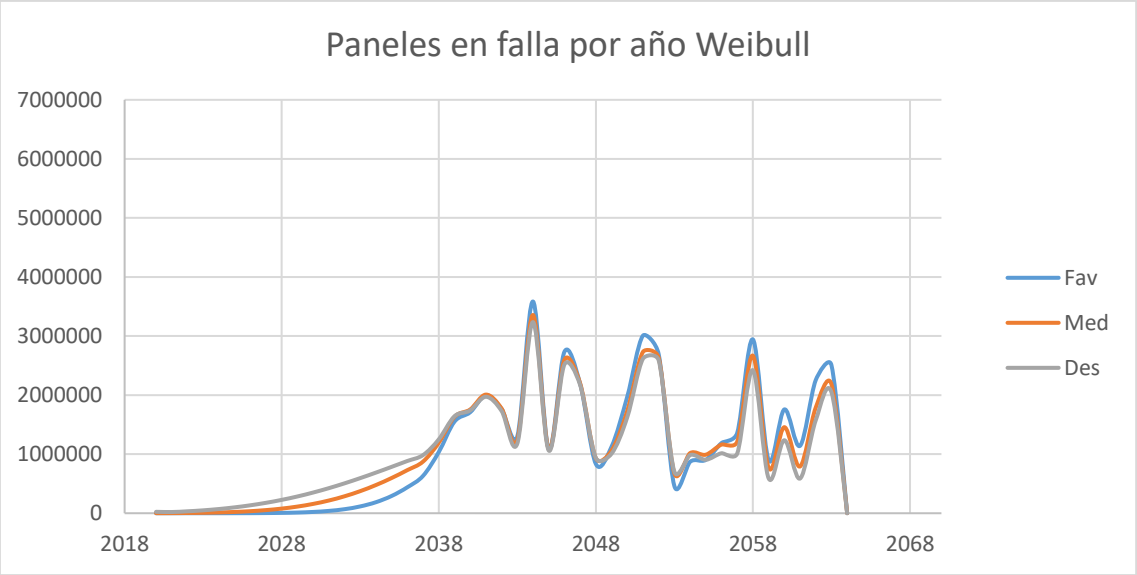

Figura 2.17 Cantidad de Paneles en falla por año, escenario A6 sin descarbonización - Weibull.

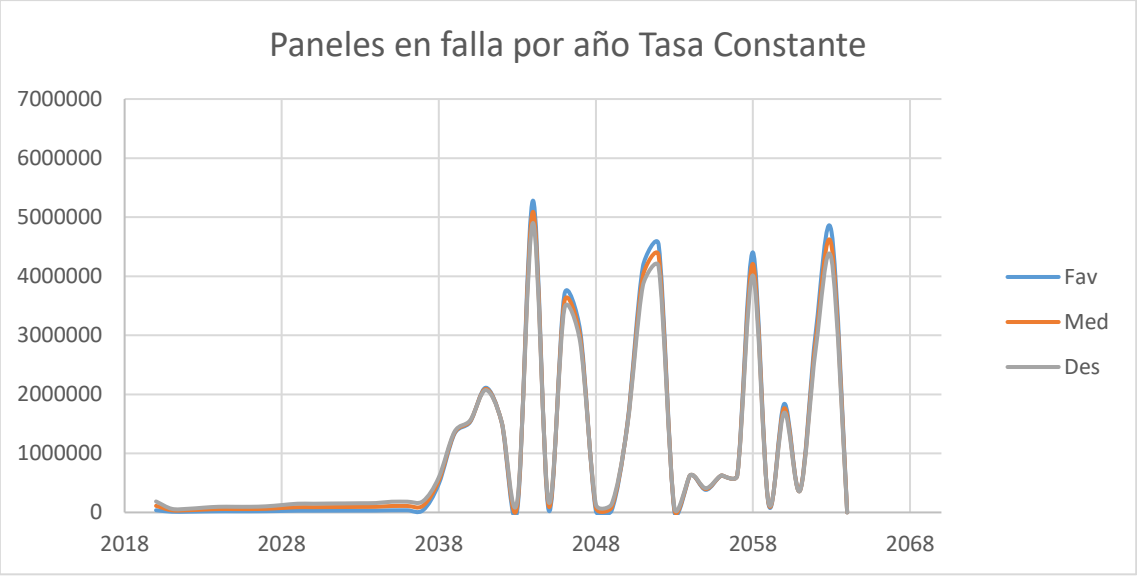

Figura 2.18 Cantidad de Paneles en falla por año, escenario A6 sin descarbonización - Constante.

2.2. Mercado de componentes

2.2.1. Aluminio

El aluminio es un material con grandes ratios de reciclaje en todo el mundo, por el hecho de que su reciclaje supone un menor costo, un menor gasto energético y un menor impacto ambiental en comparación con producir el material de manera virgen.

Estos grandes ratios a nivel mundial y lo sencillo del proceso, suponen que no habrá variaciones en la calidad del reciclaje en distintos países o instituciones, por lo que minimizar los costos e impacto del traslado es uno de los objetivos principales. Es por esto que los precios para la venta de aluminio fueron tomados por compradores Chilenos.

Tabla 2.5 Precio del aluminio para reciclaje en Chile (Contacto directo)

Empresa	Precio [USD/Kg]
Reciclaje San Francisco	0,84
Maetalum	1,08
Metalbras	1,19
Metalreci	1,01
Indumet	0,87
Promedio	**0,998**

El precio del aluminio para reciclaje se encuentra estrictamente ligado a la demanda de aluminio (Lingote), por lo que los precios irán variando según el mercado. En los últimos 10 años el aluminio alcanzo una variación máxima en su precio de un 45%, pero el Banco Mundial proyecta un alza constante el precio por los próximos 10 años [20]. Este punto agrega un factor de riesgo al proyecto que debe ser tomado en cuenta.

2.2.2. Vidrio

Existen dos opciones para gestionar el vidrio resultante del proceso de reciclaje de los paneles solares:

Reciclaje del vidrio

El reciclaje del vidrio refiere a usarla chatarra de vidrio como materia prima para generar nuevo vidrio, el cual puede utilizarse para diversos fines que contengan este material (ventanas, botellas, etc) inclusive vidrio para paneles solares.

El reciclaje de vidrio tiene un impacto positivo para el medio ambiente al reducir en un 5% las emisiones (CO2 eq.) y utilizar 2,5% menos energía, en comparación a la utilización de material virgen. El problema es que el reciclaje del vidrio plano no es autosustentable del punto de vista económico, por el costo asociado al proceso. Lo que significa que enviar la chatarra de vidrio a reciclar supone un costo y no un beneficio.

También cabe destacar que en Chile no existe ninguna planta de reciclaje de vidrio plano, por lo que esta alternativa supondría un aumento en el costo del transporte.

Hoy en día el reciclaje de vidrio no tiene un mercado establecido y robusto, y solo se tienen iniciativas aisladas que no son competitivas, y aunque los productores de vidrios están dispuestos y avanzando en este punto, el principal mercado para el vidrio plano es la construcción, lo que dificulta la gestión para la recolección de este material cuando el proyecto ha finalizado su vida útil. Este problema se soluciona para el mercado del vidrio para paneles solares con una planta de reciclaje de paneles, lo que es una gran oportunidad de negocios para los fabricantes de vidrio para paneles solares.

Hoy en día el reciclaje de vidrio tiene un costo asociado:

Tabla 2.6 Costo reciclaje de vidrio (Contacto directo).

Empresa	Costo [USD/Ton]
Molinos Ferba (Argentina)	40
Vlakglas (Holanda)	33
Promedio	**33,5**

Reutilización del vidrio

Como explica su nombre la reutilización del vidrio consiste en volver a utilizar el vidrio para el mismo u otro fin para el que fue creado, intentando maximizar la relación entre retribución e inversión en el material.

Para el caso del vidrio usado en paneles solares, lo óptimo sería aprovechar su reutilización para generar más paneles solares, lo que cumple con el objetivo de economía circular. El principal obstáculo que se presenta esta opción es la degradación del recubrimiento anti reflectante que contiene el vidrio (lo que aumenta la eficiencia de los paneles), por lo que al momento de recuperar el vidrio será necesario un tratamiento superficial (pulido) para remover el recubrimiento degradado y así poder volver a proporcionar al vidrio un recubrimiento nuevo, para que vuelva cumplir su ciclo de vida.

En ningún lugar se realiza este procedimiento, por lo que no existe información sobre los beneficios que se pueden obtener por este material, por lo que se puede presentar los precios del vidrio para paneles solares y así analizar posibles beneficios en la sección de suposiciones.

Tabla 2.7 Precios de vidrio templado con recubrimiento anti reflectante para paneles solares.

Empresa	Precio [USD/Ton]
Laurel Glass Technology Co.	1050
Global Star Glass Ltd.	1200
Boriuto traiding Co.	850
Taida Glass Co.	1450
Promedio	**1137,5**

.

2.2.3. Polímeros

Hoy en día no existe un mercado para el reciclaje de los polímeros que componen el panel solar (EVA y Tedlar), principalmente porque los cambios físicos y químicos que se producen en el proceso para su utilización no son reversibles, por lo que no pueden ser re utilizados para los mismos fines, y aun no existe un mercado para la utilización del producto con dichos cambios.

Por lo que se tienen dos opciones para su manejo:

- La primera, es la disposición de los polímeros lo que supone que aún se encuentran unidos físicamente a la celdas fotovoltaicas, lo que fija su precio al de un residuo electrónico.
- La segunda, es la incineración de estos lo que significaría que se separan de las celdas fotovoltaicas y se transforman en gases como CO, HCN, NOx, SOx y HCL, los cuales deben ser abatidos por su peligrosidad tanto para humanos como el medio ambiente.

Ambas opciones suponen un costo tanto económico como ambiental, siendo los polímeros el componente menos provechoso del panel solar.

2.2.4. Celda fotovoltaica

Las celdas fotovoltaicas en desuso representan un gran desafío en cuanto a su recuperación, ya que estas se encuentran inmersas en un polímero encapsulante (generalmente EVA) por lo que se requiere de un proceso extra para su separación, los procesos con mayor respaldo académico corresponden a incinerar el encapsulante para recuperar la celda [21].

Una vez recuperada la celda se debe someter a un proceso llamado Wet Etching, por el cual se logra separar el Silicio (principal componente de la celda) del resto de los componentes que contiene (los cuales no son reutilizables) [22].

Según PV Insights (comparación de precios para celdas fotovoltaicas en el mercado Chino) el precio del Silicio para tecnología fotovoltaica es de 5.680 [USD/Ton] [23], por lo que existe la oportunidad de negocio, pero la falta de materia prima (Paneles en desuso) no ha permitido que el mercado se desarrolle, por lo que para la fecha no existen industrias que desarrollen este proceso.

Por lo expuesto anteriormente otra opción es la disposición final de la celda fotovoltaica a un vertedero o relleno sanitario, para dicha operación los precios son:

Tabla 2.8 Tabla de precios de disposición perteneciente a Hydronor.

Tipo de residuo	Precio [USD/Ton]
Residuos Peligrosos Componentes eléctricos	199
Residuos No Peligrosos	101

2.2.5. Caja de conexiones

La caja de conexiones está compuesta por un contenedor plástico y componentes eléctricos (conectores y diodos). En el mercado se pueden encontrar cajas de conexiones de diferentes tipos de plásticos (PVC, ABS, PPO, Otros, etc) lo que dificulta su gestión ya que no todos pueden ser reciclados.

En el caso de la disposición final este componente se trata como un residuo industrial obedeciendo los costos de la Tabla 2.8.

Capítulo 3

3. Selección de la tecnología y aplicación

Para poder seleccionar la tecnología que entregue mejores resultados, es necesario entender la oportunidad de negocios, para así definir el modelo de negocios y así seleccionar la tecnología que realicé de forma más eficaz y eficiente los procesos necesarios para cumplir con el modelo ideado.

En función de la tecnología seleccionada y el modelo de negocios establecido, se debe analizar los elementos en los que se debe invertir para lograr el funcionamiento de la planta, y los costos asociados al ejercicio de está.

3.1. Oportunidad de negocio

La oportunidad de negocios nace desde la sección anterior, en función de la cantidad de paneles con potencial de ser reciclados por cada año, y el mercado asociado a la venta de los componentes y el cobro por el servicio de reciclaje.

El cobro de servicio de reciclaje está ligado a los costos de disposición y niveles de recuperación que estipule la Ley, pero el mercado asociado a los componentes del panel, tiene distintas opciones.

En función de lo expuesto en la sección anterior se desarrolla un modelo de recuperación óptimo, siendo esté:

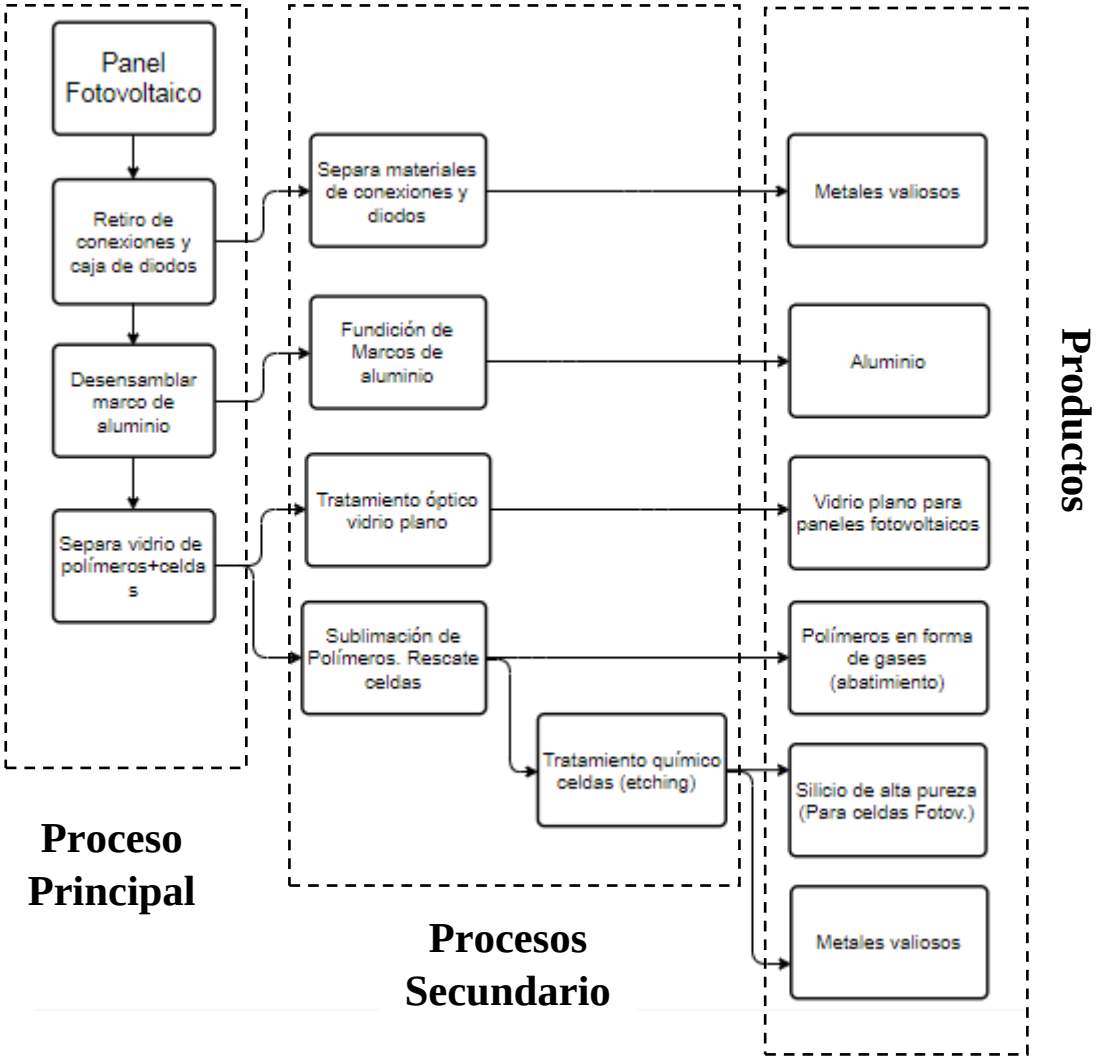

Figura 3.1 Proceso para maximizar la oportunidad de negocio.

3.1.1. Proceso principal

El proceso principal consiste en el trabajo directo con el panel solar fotovoltaico, es el que permite la revalorización de sus componentes, al separarlos para permitir tratarlos por separado en sus respectivos procesos secundarios.

Este proceso principal es llevado a cabo por la denominada tecnología de reciclaje, la cual condiciona el modelo de negocios al permitir distintos grados de recuperación de los componentes en función del método empleado para separarlos.

3.1.2. Procesos secundarios y productos

En función del estudio de mercado hecho para los componentes del panel solar fotovoltaico se puede resumir que los procesos secundarios existentes en el mercado y los productos que se pueden obtener son:

Tabla 3.1 Escenario de revalorización para los distintos componentes del panel solar.

Componente	Escenario de revalorización
Vidrio	Reutilización para producir nuevos paneles solares.
Aluminio	Reciclaje.
Celdas fotovoltaicas	Disposición.
Conexiones y diodos	Disposición.
Polímeros	Disposición.

Por lo que el escenario optimo que es realizable en la actualidad, es el que logra revalorizar tanto el vidrio como el aluminio, al existir procesos secundarios que permiten que estos componentes vuelvan a ingresar al mercado. Pero perdiendo la oportunidad de revalorizar el Silicio y metales valiosos de las celdas fotovoltaicas y los metales valiosos correspondientes a la caja de conexiones.

Por lo que el proceso principal se debe enfocarse: Primeramente, en la recuperación del vidrio para su reutilización, instaurando una economía circular en donde los vidrios que han sido manufacturados para la elaboración de paneles solares sean reutilizados para la elaboración de nuevos paneles solares, aprovechando al máximo el valor que se le ha entregado en su manufactura. (En función de las dimensiones, calidad superficial, métodos empleados y composición). Y en segundo lugar, en la recuperación de los marcos de aluminio, los cuales pasan a ser reciclados, ya que la facilidad y bajo costo de este proceso, no justifica aumentar el traslado de este componente a países en donde se elaboren paneles solares, por lo que no se instaura como una economía circular, pero reduce la cantidad de elaboración de aluminio a partir de materias vírgenes.

3.2. Selección de tecnología

3.2.1. Tecnologías de reciclaje

La tecnología para reciclar paneles solares fotovoltaicos a nivel industrial, se encuentra en sus primeras etapas, principalmente por la falta de interesados en instaurar el proceso por la baja cantidad de paneles en falla hasta el momento. Por lo que la accesibilidad a la información de dichas tecnologías es limitada.

NPC Incorporated, línea de reciclaje de PF

NPC Inc. Es una empresa Japonesa dedicada a la fabricación de maquinaria para la manufactura de paneles fotovoltaicos, quienes se encuentran innovando en el proceso de reciclaje de los mismos, hoy en día se encuentra una línea de reciclaje operativa en estado de prueba.

La empresa ya cuenta con la patente una línea de reciclaje automatizada, enfocada en ser fácil de operar y fácil de exportar a los lugares en donde existan interesados en el reciclaje de paneles.

Esta línea automatizada consta de tres secciones:

- **Primero:** Retira la caja de conexiones, a través de un sistema de espátula, el cual se inserta entre la caja de conexiones y la parte trasera del panel (backsheet) para cortar el pegamento y permitir, que la caja caiga por gravedad a un depósito.

- **Segundo:** Retirar el marco de aluminio, a través de un sistema de pistones neumáticos, los cuales retiran el marco que se encuentra sujeto a presión al resto del panel. Luego el marco cae por gravedad a un depósito.

- **Tercero:** Separa el sándwich (encapsulante, celdas y backsheet) del vidrio, a través de un sistema que presiona al panel desde la parte frontal (vidrio) y avanza permitiendo que un cuchillo caliente, que se encuentra debajo del panel, corte el sándwich separándolo del vidrio. El sándwich cae por gravedad, mientras que el vidrio avanza a la salida de la línea, para ser retirado.

Este sistema solo necesita de una conexión a energía eléctrica y operadores capacitados.

Tabla 3.2 Información línea automatizada para reciclaje de paneles fotovoltaicos, NPC Inc. [24]

Línea automatizada NPC Inc.	
Precio	1.300.000 [USD]
Productividad	1 [Panel/min]
Dimensiones (A) x (L)	1,9 [m] x 17,4 [m]
Dimensiones del panel	Min: 600x1.000 [mm] Max: 1.090x2.100 [mm]
Grosor del vidrio	2,0 - 4,0 [mm]
Interfaz	Pantalla táctil

La empresa ya se encuentra en desarrollo de un mecanismo que permita el reciclaje de paneles bifaciales, dicho mecanismo sería una etapa que puede ser añadida a la línea existente, al separar los dos vidrios del panel, cortando el sándwich que los une, para luego proceder con la tercera parte del proceso.

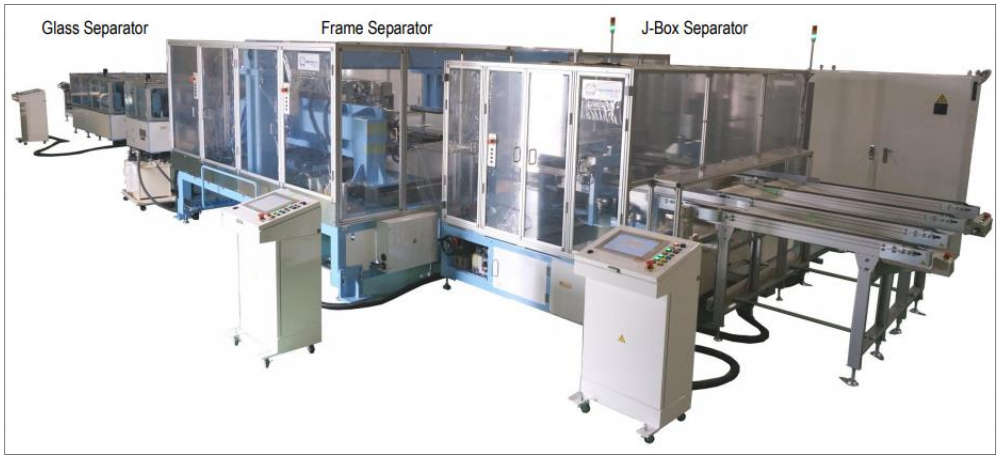

Figura 3.2 Línea automatizada para el reciclaje de PF, NPC Inc. [24]

Veolia, línea de reciclaje de PF

La empresa francesa Veolia se especializa en tratamiento y gestión de residuos, y cuenta con una unidad enfocada en residuos de plantas solares fotovoltaicas. En este contexto ha instalado una planta de reciclaje para paneles fotovoltaicos, que realiza el proceso de reciclaje a través de una línea automatizada. Dicha línea cuenta con tres secciones:

- **Primero:** Retirar el marco de aluminio, a través de un sistema de pistones neumáticos, los cuales retiran el marco que se encuentra sujeto a presión al resto del panel. Luego el marco cae por gravedad a un depósito.

- **Segundo:** Triturar el resto del módulo, no se especifica el sistema de triturado ni las dimensiones de los gránulos al final el proceso.

- **Tercero:** Separar los gránulos por componentes, se emplean imanes para separar los componentes metálicos, pero no se especifica el método empleado para separar elementos no metálicos.

No se tiene información sobre el método empleado para retirar la caja de conexiones, pero esta no se encuentra en el panel para el proceso de triturado.

Este proceso recupera componentes de baja calidad, principalmente porque el sistema de separado no es perfecto, y el vidrio es contaminado con elementos metálicos los que impiden que los gránulos puedan ser agregados como materia para la fundición de nuevo vidrio.

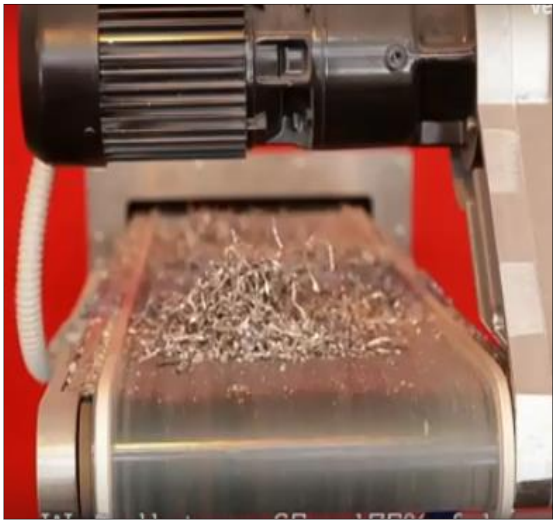

Figura 3.3 Línea automatizada para el reciclaje de PF, Veolia. [25]

Loser Chemie, sistema para recuperación de vidrio

La empresa Alemana Loser Chemie se especializa en químicos, tratamiento de materiales y procesos para revalorizar desechos. Han innovado para construir un piloto de sistema capaz de separar el sándwich (Encapsulante, Celdas y Backsheet) del vidrio, en un panel solar. (Cabe destacar que para utilizar este sistema el módulo no debe tener caja de conexiones ni marco de aluminio. La empresa no posee las secciones para separar dichos componentes, por lo que su sistema debe ser acoplado a otros que cumplan con estas tareas). A través de tres secciones:

- **Primero:** Se trata el encapsulante con luz láser, para que pierda propiedades físicas y sea más sencillo retirarlo.

- **Segundo:** Separar la mayor cantidad de sándwich a través de un sistema de ventosas en donde estas generan fuerzas opuestas entre el vidrio y el sándwich, separando gran parte de este.

- **Tercero:** Realizar un baño químico para retirar el encapsulante sobrante que se encuentra sobre el vidrio.

Este sistema requiere de conexión a la energía eléctrica, más insumos químicos para retirar el encapsulante en su totalidad, generando desechos peligrosos.

Figura 3.4 Sistema para separar vidrio en PF. [26]

3.2.2. Comparación y selección

Tabla 3.3 Comparación entre tecnologías de reciclaje de PF.

Tecnología	Estado	Nivel de información	Calidad de los componentes	Impacto ambiental	Interés en venta	Complejidad del proceso
NPC	Comercial	Alto	Medio	Bajo	Alto	Bajo
Veolia	Comercial	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Alto
Loser Chemie	Piloto	Medio	Alto	Alto	Alto	Alto

Al comparar las distintas tecnologías de reciclaje, se desprende que **la línea de NPC Inc. es la que presenta las mejores características** en relación al modelo de negocios planteado, al permitir reutilizar el vidrio y reciclar el aluminio. Aunque el sistema de Loser Chemie también cumple con el objetivo de recuperar el vidrio y a una mayor calidad, este sistema necesita de otros para completar con el proceso, su estado piloto no permite conocer su productividad, tiene un mayor impacto ambiental, y la complejidad del sistema encarece la instalación, operación y mantenimiento de la planta.

3.3. Planta de reciclaje

3.3.1. Funcionamiento de la planta

Ingreso y almacenaje de paneles

En primer lugar se debe ingresar los paneles a la planta, para esto una zona de descarga en donde los camiones con paneles en desuso puedan detenerse para realizar la descarga, la descarga inicial debe realizarse en una zona de almacenaje temporaria de paneles, para luego pasar a dos opciones: A la planta de reciclaje si esta no cuenta con paneles para ser procesados, o a la zona de almacenaje de paneles si la planta se cuenta con paneles para procesar.

La zona de almacenaje de paneles dependerá de la cantidad de paneles que entran en falla por año, al haber años en que habrá un gran flujo de paneles y no se podrán procesar todos, pero también habrá años en donde habrá escasez de paneles para la productividad de la planta. La zona de almacenaje permite distribuir el proceso de reciclaje de una forma más pareja para cada año.

Reciclaje

El reciclaje es la etapa que realmente agrega valor al negocio, y consiste en desmantelar el panel solar en materias que tienen valor comercial y las que no, como se describe en la sección anterior. El proceso consiste en una línea automatizada, por la cual se ingresa un panel y se desmantela en tres etapas: primero se separa la caja de conexiones, segundo se retira el marco de aluminio, y por último se separa el vidrio de la combinación de encapsulante, celdas y backsheet. De las materias generadas, todas excepto el vidrio se van acumulando en reservorios a las que son arrojadas por la línea, mientras que el vidrio es retirado a la salida de la línea.

Almacenaje y retiro de materias generadas

A medida que los reservorios alcanzan su máxima capacidad, estos son cambiados por otro, y este es llevado a bodega en donde es vaciado en un gran reservorio de cada materia, de los cuales hay aluminio y desechos (caja de conexiones, celdas, polímeros y backsheet), mientras que el vidrio es empacado a la salida de la línea y almacenado en bodega.

Tanto el retiro del aluminio como de los desechos puede ser coordinados con una baja anticipación, esto se debe a que ambos tienen destinos nacionales. Mientras que el vidrio tiene por destino productores de vidrio para paneles solares, los cuales hasta el momento se encuentran en el extranjero, lo que significa coordinar los retiros con mayor anticipación y para un volumen determinado de material, por lo que el vidrio es el elemento que tiene prioridad en el almacenaje y el resto de las materias son retiradas según el almacenaje de vidrio lo requiera.

3.3.2. **Dimensiones**

La planta de reciclaje de paneles fotovoltaicos está sujeta a los siguientes espacios para su funcionamiento:

- ***Líneas de reciclaje**:* Se necesita de un espacio que pueda contener hasta cuatro línea de reciclaje producidas por NPC Inc. con espacio para que maniobren las grúas horquillas.

- ***Bodega**:* Espacio utilizado para almacenar las materias resultantes del reciclaje, siendo el más crítico el vidrio, al ser trasladado fuera del país.

- ***Almacenaje de paneles**:* Espacio utilizado para almacenar paneles solares para su reciclaje y dar flexibilidad para desmantelar a los clientes. Se necesita almacenar 500.000 paneles.

- ***Pre almacenaje de paneles:*** Espacio utilizado para descargar de forma más eficiente los camiones con paneles, para luego ser trasladados al sector de almacenaje de paneles. Se necesita almacenar al menos 25.000 paneles.

- ***Carga/descarga:*** Espacio utilizado para cargar camiones con las materias resultantes del reciclaje y la descarga de paneles para su almacenaje.

- ***Caminos:*** Espacios utilizados para el movimiento de las grúas horquillas o vehículos, para su acceso a los distintos sitios de la planta.

- ***Otros:*** Espacio utilizado para baños, duchas, lockers, oficinas, comedor y bodega para repuestos y maquinaria.

Para cumplir con las especificaciones presentadas se requiere de los siguientes espacios:

Tabla 3.4 Espacio requerido para la operación de planta de reciclaje.

Requerimiento	**Área [m2]**
Almacenaje Paneles	10.000
Reciclaje	1.600
Bodega	1.200
Otros	400
Carga descarga	400
Pre almacenaje paneles	1.000
Caminos	3.000
Total	**18.000**

A continuación se presenta un Layout tipo de una planta de reciclaje (el layout real varía según el terreno escogido).

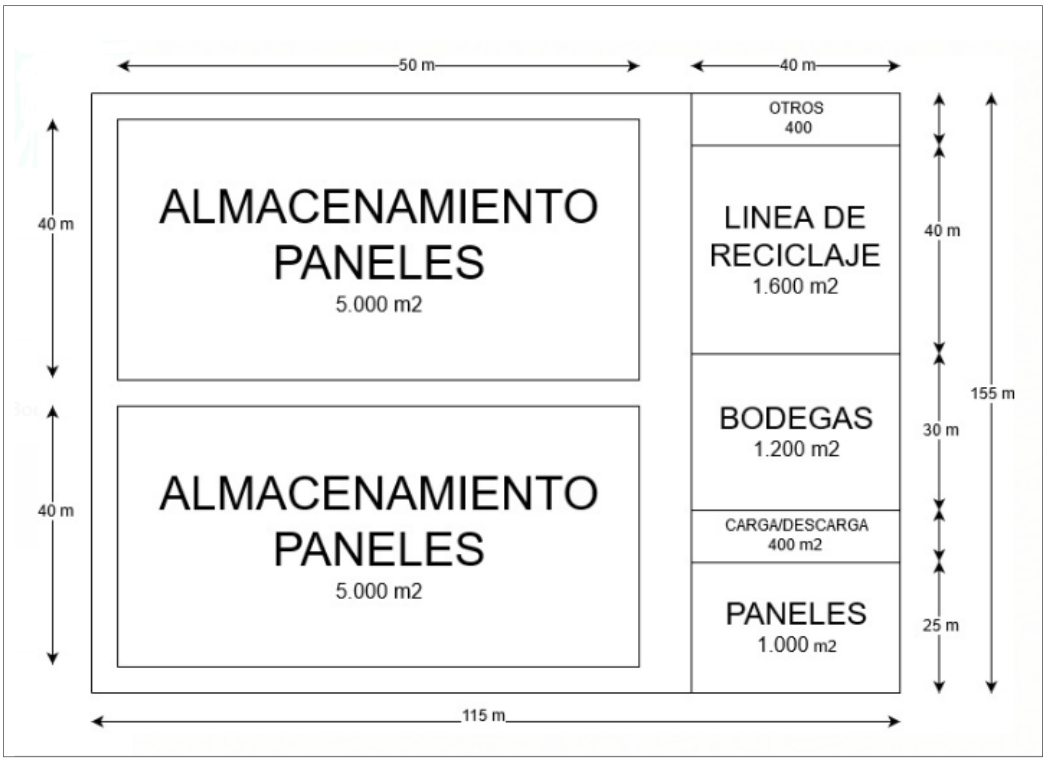

Figura 3.5 Layout tipo planta de reciclaje.

3.4. Inversión

3.4.1. Maquinaria

Manipulador telescópico

Para la descarga de los camiones con paneles en desuso, y su traslado hacia los sectores de acopio y hacia la entrada de la planta. Es necesario por tener un gran alcance y la capacidad de maniobrar sobre distintos terrenos, lo que disminuye la inversión por tratamiento de suelos. Uso de Diesel.

Figura 3.6 Manipulador telescópico Bobcat T35120SL.

Grúa horquilla

Para el movimiento de los paneles solares dentro de la planta, hacia la entrada de la línea de producción y el retiro de las materias recopiladas del reciclaje a sus sitios de acopio (bodega) para su posterior retiro. Es necesaria por su capacidad para maniobrar en espacios reducidos y tener un alto nivel de precisión. Uso de GLP.

Figura 3.7 Grúa horquilla, Fullen CPCD30 A.

Tecle eléctrico

Para el posicionamiento de los paneles solares dentro de la línea de reciclaje y para el retiro del vidrio a la salida de la línea. Su uso será por parte de un operador, lo que permite que esté mueva el peso de un panel fotovoltaico. Uso de energía eléctrica.

Figura 3.8 Tecle eléctrico, Itaka.

Tabla 3.5 Precio y cantidad de maquinaria requerida.

Precio maquinaria				
Elemento	**Cotización**	**Cantidad**	**Precio unitario [USD]**	**Costo [USD]**
Por planta de reciclaje				
Manipulador telescópico	Doosan-Bobcat	2	100.000	200.000
Grúa horquilla	Fullen	1	15.000	15.000
			Total	**215.000**
Por línea de reciclaje				
Tecle eléctrico	Itaka	4	500	2.000
Grúa horquilla	Fullen	1	15.000	15.000
			Total	**17.000**

La adquisición de una grúa horquilla para la planta de reciclaje se debe a que este componente es clave para el proceso de reciclaje por lo que esta unidad es reservada para mantener dicho elemento en redundancia. El uso de cuatro tecles eléctricos se debe a que estos se instalan en redundancia e la entrada y salida de la línea.

3.4.2. Infraestructura

La inversión necesaria para cumplir con los requerimientos para cumplir con lo estipulado en la sección de dimensiones de la planta, es necesario realizar la construcción de la siguiente infraestructura:

Tabla 3.6 Precio construcción infraestructura requerida. [27]

Ítem	Precio	Dimensión	Inversión [USD]
Galpón Estructura Metálica	27,9 [USD/m2]	2900 [m2]	80.910
Galpón radier	35,7 [USD/m2]	2900 [m2]	103.530
Galpón muros	235,7 [USD/m]	300 [m]	70.710
Edificio general	19.000 [USD/m2]	160 [m2]	304.000
		Total	**559.150**

3.4.3. Otros

En evaluación de proyectos los extras u otros, suelen evaluarse entre un 2%-5% dependiendo del factor de riesgo del proyecto. Este factor de riesgo incluye el conocimiento del mercado, experiencia previa en construcción e implementación de proyectos similares y confiabilidad y experiencia en la operación y mantenimiento de la tecnología utilizada.

Al trabajar con un nuevo mercado (paneles solares en desuso) y no tener experiencia en la operación y mantenimiento de la tecnología a utilizar se debe optar por un alto factor de riesgo. Cabe destacar que aunque no existe vasta experiencia en construcción de plantas de reciclaje de paneles solares, la infraestructura de esta se considera sencilla y la manipulación del insumo (carga, descarga y almacenamiento de paneles solares) puede replicarse de la construcción y operación y mantenimiento de plantas solares fotovoltaicas.

3.5. Costos

3.5.1. Mano de obra

Tabla 3.7 Mano de obra y costo asociado.

Personal línea de reciclaje de paneles fotovoltaicos			
Cargo	**Sueldo bruto mens. [CLP] (por cargo)**	**Cantidad**	**Costo anual [USD] (total cargo)**
Por planta de reciclaje			
Gerente	3.500.000	1	60.000
Logístico	2.000.000	1	34.290
Ventas	2.000.000	1	34.290
Supervisor	2.000.000	3	102.860
Operador Manipulador	700.000	2	24.000
		Total	**255.450**
Por línea de reciclaje			
Operador línea	900.000	1	15.430
Operador Grúa	700.000	1	12.000
Apoyo a línea	700.000	2	24.000
		Total	**51.430**

- ***Gerente**:* Encargado del funcionamiento correcto de la planta, de la toma de decisiones y de reunir todas la áreas para crear un proceso eficaz y efectivo.

- ***Logístico**:* Encargado de la logística de la planta, tanto para la gestión de las necesidades de la planta, como la de los servicios y transporte.

- ***Ventas**:* Encargado de la captación y trato con clientes, tanto para el reciclaje de los módulos, como para la venta de las materias generadas.

- ***Operador Grúa**:* Encargado de operar grúas horquilla, para el orden, traslado y posicionamiento, de paneles solares y materias generadas.

- ***Supervisor**:* Encargado de supervisar el funcionamiento de las líneas de reciclaje, tomando en cuenta los niveles de producción y los mantenimientos requeridos. También es el encargado de supervisar un correcto almacenaje de los paneles.

- ***Operador línea**:* Encargado de operar la línea de reciclaje y de realizar los mantenimientos menores.

- ***Apoyo línea:*** Ingreso panel a la línea. Retiro de vidrio de la línea a embalaje (2 trabajadores).

- ***Desmantelamiento J-Box:*** Retirar diodos de by pass (manual) de caja de conexiones para reciclaje del plástico.

3.5.2. Energía

El costo del uso energético para el reciclaje de paneles solares se divide en dos ítems, consumo de energía eléctrica, en función del costo medio del [KWh] para el sector norte, para la línea de reciclaje y consumo de combustibles para las grúas horquillas y manipulador telescópico.

Tabla 3.8 Costo por concepto de uso energético [28].

Costo energía por panel					
Tipo	**Precio**	**Consumo**	**Precio por tiempo**	**Tiempo por panel**	**Costo por panel**
Eléctrica	0,11 [USD/KWh]	50 [KW]	5,5 [USD/h]	1 [min/u.]	0,09 [USD/u.]
Comb. GLP	0,6 [USD/lt]	4 [lt/h]	2,4 [USD/h]	0,6 [min/u.]	0,024 [USD/u.]
Comb. Diésel	1,1 [USD/lt]	22,3[lt/h]	24,5[USD/h]	0,12 [min/u.]	0,049 [USD/u]
				Total	**0,163 [USD/u.]**

3.5.3. Servicios

Para estimar el costo de los servicios asociados a la planta de reciclaje, se tomará en consideración el costo de servicios correspondiente a una planta Solar fotovoltaica de 200 [MW], que alberga a aproximadamente 20 trabajadores, ya que los costos fijos de servicios (seguridad, limpieza, retiro de lodos, etc) y la cantidad de personal es similar.

Costo aproximado servicios planta solar: 150.000 [USD/Año]

3.5.4. Terreno

La planta de reciclaje de paneles solares debe ser instalada en el Norte de Chile (Regiones II o III) al encontrarse la mayor densidad de plantas solares fotovoltaicas y debe estar destinada a terreno industrial, por el tipo de trabajo que se le dará.

Para financiar un terreno se puede considerar tres opciones, la primera consiste en comprar el terreno al comenzar el proyecto para venderlo finalizando esté, la desventaja de este medio es que el terreno se paga según la tasa de descuento del proyecto. La segunda es arrendar el terreno a un tercero, lo que supondría un aumento en los costos y se pagaría según la tasa de un proyecto inmobiliario. La tercera es conseguir la concesión de un terreno por medio de una licitación o un pase directo como lo estipula el artículo 58 del DL 1939/77 (Proyectos con méritos especiales), esta opción también se considera como un costo.

Tabla 3.9 Precio Terreno, Norte de Chile. Precio concesión corresponde a un pago anual.

Precio Terreno		
Cotización	**Financiación**	**Precio aproximado [USD/ha]**
EGP	Concesión	583,8
Polz & Asociados	Arriendo y Compra	1.145.000

Precio Arriendo y compra corresponde a precio final del terreno (En caso de arriendo generar PMT anual con tasa a valor de mercado).

Capítulo 4

4. Análisis y resultados

4.1. Suposiciones

En función de lo presentado en los capítulos sobre mercado de componentes, Costos e Inversión y Cantidad de paneles en falla, se presenta la siguiente tabla con todas las suposiciones y magnitudes asumidas para los resultados económicos y ambientales del proyecto.

Tabla 4.1 Suposiciones para la evaluación del proyecto.

Área	Suposición	Magnitud/Decisión
	Paneles en Falla	
Cantidad de paneles instalados en Chile	Se utilizaran los valores calculados en la sección 2.1.	Sección 2.1.
Proyección de paneles instalados en Chile	Se utilizará un promedio entre la proyección de los dos escenarios creados por el CEN, y se utilizará el caso de descarbonización al ser el más probable.	Sección 2.1.
Vida útil de los paneles	Se utilizará la vida útil determinada en la sección 1.1	25 [Años]

Tasa de falla	Se utilizaran las tasa de falla de Weibull y Constante, como dos escenarios posibles. Ambos escenarios se dividirán en tres casos, según el flujo de paneles que entra en desuso.	Escenarios: Weibull y Constante Casos: Bajo, Medio y Alto flujo de paneles
Mercado de componentes		
Masa promedio de un panel solar c-Si	Se utilizará la masa media presentada en la sección 1.1.	25 [Kg]
Composición de un panel solar c-Si	Se utilizará la composición presentada en la sección 1.1	Vidrio: 76% Aluminio: 8% Resto: 16%
Precio Aluminio	Se utilizará el promedio de las cotizaciones presentadas en la sección 2.2	1 [USD/Kg] (Redondeado)
Precio Vidrio	Se utilizará el precio de venta de reutilización del vidrio al ser el escenario donde se aprovecha mejor el recurso. Se fija un precio al 30% del promedio de venta del vidrio cotizado en la sección 2.2.	340 [USD/Ton] (Redondeado)
Precio Polímeros	Se utilizará el precio del costo de disposición al no tener ningún valor comercial. Deberá ser dispuesto como residuo no peligroso, al no contar con dichas características.	101 [USD/Ton]
Precio Celda Fotovoltaica	Se utilizara el precio del costo de disposición como residuo no peligroso, ya que aún no existe el mercado de reciclaje de celdas, y no se puede tener aproximaciones de sus precios.	101 [USD/Ton]
Precio Caja de conexiones	Se utilizara el precio del costo de disposición como residuo no peligroso.	101 [USD/Ton]
Cobro por reciclaje de panel	Cobro en base al costo de disposición del panel solar a un vertedero autorizado (2,5 [USD/unidad])	2 [USD/unidad]
	Ingresos por panel reciclado	**10,27 [USD/unidad]**

Inversión		
Línea de Reciclaje	Se utilizara la línea de reciclaje de NPC Inc. La cual se presenta en la sección 3.2. Con un aumento del 15% por concepto de instalación y traslado.	1.500.000 [USD]
Maquinaria general	Se utilizara los precios de referencia de la sección 3.4.	Inicial: 215.000 [USD] Línea: 17.000 [USD]
Infraestructura	Se utilizara los precios de referencia de la sección 3.4.	559.150 [USD]
Otros	Se utilizara un valor de extras correspondiente a un 5% de la inversión del proyecto por el riesgo del proyecto.	5%
	Inversión Total	**Inicial: 812.857 [USD]** **Línea: 1.592.850 [USD]**
Costos		
Costos Fijos		
Mano de obra	Se utilizara los costos de mano de obra presentados en la sección 3.5, a los cuales se le agregara un 20% del costo total por gastos de la empresa (bonos, seguros, alimentación, etc.). Se necesita cuatro equipos de reciclaje por línea para mantener la planta funcionando 24 horas al día.	246.854 [USD/Año] (Por línea de reciclaje) 306.540 [USD/Año] (Por planta de reciclaje)
Terreno	Se utilizará el precio del terreno por concesión, esto es posible al tratarse de un proyecto de alto impacto, por el desarrollo sustentable y ambiental que implica. Y se supondrá que el terreno concesionado es de 2 [ha].	1.150 [USD/Año]
Servicios	Se utilizaran los costos de servicio de la planta solar usada como referencia. Sección 3.5	150.000 [USD/Año]
Mantenimiento	Al no tener datos sobre el mantenimiento de la maquinaria, por falta historia, se aproxima a un 3% del costo de inversión anual (valor bibliográfico).	45.000 [USD/Año]

Otros	Se utilizara un valor de extras correspondiente a un 5% de los costos del proyecto por el riesgo del proyecto.	5%
	Total costos Fijos	**480.574 [USD/Año]** **(Por planta reciclaje)** **303.307 [USD/Año]** **(Por línea de reciclaje)**
Costos Variables		
Energía	Se utilizaran los valores de energía presentados en la Sección 3.5	0,163 [USD/unidad]
	Total costos Variables	**0,163 [USD/unidad]**
	Otros	
Tasa de descuento	En baso a los datos utilizados para dicho tipo de proyecto.	10%
Porcentaje del mercado reciclado	Los resultados se calcularán en base a tres escenarios sobre el mercado de paneles reciclados.	20%, 40% y 60%
Horas de reciclaje anuales	Se maximizará la producción trabajando 24 horas diarias, 350 días al año, apartando 15 días al año, por concepto de feriados y mantenimientos.	24 [horas] x 350 [días]
Depreciación	La depreciación de los activos será de forma normal según lo estipula el SII para cada tipo.	Normal
Prestamos	Se determina que cierto porcentaje de la inversión será por medio de un préstamo bancario, donde se amortizara el total de la deuda el último periodo.	Porcentaje: 60% Tasa: 6% (anual)
Duración del proyecto	En base a la vida útil de los activos principales (líneas de reciclaje)	30 [años]
Capital de trabajo	Se estima en base al 15% de la inversión inicial. También se agrega un capital de trabajo a cada periodo en que el resultado del ejercicio es negativo y no se cuenta con los ingresos para solventarlo.	343.000 [USD]
Efecto Inflacionario	LA evaluación se efectuará sin tomar en cuenta el efecto inflacionario, por lo tanto los resultados corresponderán a valores nominales.	Nominal

4.2. Resultados económicos

4.2.1. Indicadores económicos

Los resultados económicos se presentan en forma de VAN, TIR y ROI, para distintos años de inicio del proyecto (2020,2025 y 2030), y en función de los escenarios posibles: Porcentaje del mercado de paneles procesado (20%, 40% y 60%) y modos de falla de los paneles (Weibull o Constante, con alto, medio y bajo flujo de paneles).

Inicio año 2020

Tabla 4.2 VAN correspondiente a distintos escenarios, comenzando el proyecto el año 2020 [USD].

Mercado	Weibull			Constante		
	Bajo	**Medio**	**Alto**	**Bajo**	**Medio**	**Alto**
20%	-11.536.853	-9.862.187	-7.687.122	-9.991.676	-8.177.081	-6.318.268
40%	-10.614.179	-8.304.600	-5.364.082	-7.009.913	-3.935.563	-960.513
60%	-9.864.748	-7.045.836	-3.523.583	-4.027.939	305.688	4.222.666

Tabla 4.3 TIR correspondiente a distintos escenarios, comenzando el proyecto el año 2020.

Mercado	Weibull			Constante		
	Bajo	**Medio**	**Alto**	**Bajo**	**Medio**	**Alto**
20%	N/A	N/A	N/A	N/A	0,39%	1,66%
40%	N/A	1,90%	4,38%	4,16%	6,18%	8,89%
60%	1,33%	3,94%	6,75%	7,13%	10,27%	14,70%

Tabla 4.4 ROI correspondiente a distintos escenarios, comenzando el proyecto el año 2020 [años].

Mercado	Weibull			Constante		
	Bajo	**Medio**	**Alto**	**Bajo**	**Medio**	**Alto**
20%	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
40%	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
60%	N/A	N/A	N/A	N/A	29	22

Inicio año 2025

Tabla 4.5 VAN correspondiente a distintos escenarios, comenzando el proyecto el año 2025 [USD].

Mercado	Weibull			Constante		
	Bajo	**Medio**	**Alto**	**Bajo**	**Medio**	**Alto**
20%	-6.821.989	-4.372.443	-1.964.099	-5.227.608	-3.826.636	-2.370.966
40%	-4.346.792	-1.108.622	2.301.731	105.481	2.717.746	5.222.008
60%	-1.878.098	1.986.169	5.921.057	5.120.323	8.993.881	12.564.756

Tabla 4.6 TIR correspondiente a distintos escenarios, comenzando el proyecto el año 2025.

Mercado	Weibull			Constante		
	Bajo	**Medio**	**Alto**	**Bajo**	**Medio**	**Alto**
20%	2,33%	4,48%	7,06%	4,79%	5,89%	7,18%
40%	6,35%	8,97%	12,57%	10,08%	12,32%	15,33%
60%	8,70%	11,53%	15,65%	13,28%	16,97%	22,51%

Tabla 4.7 ROI correspondiente a distintos escenarios, comenzando el proyecto el año 2025 [años].

Mercado	Weibull			Constante		
	Bajo	**Medio**	**Alto**	**Bajo**	**Medio**	**Alto**
20%	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
40%	N/A	N/A	23	29	23	18
60%	N/A	26	18	20	17	16

Inicio año 2030

Tabla 4.8 VAN correspondiente a distintos escenarios, comenzando el proyecto el año 2030 [USD].

Mercado	Weibull			Constante		
	Bajo	**Medio**	**Alto**	**Bajo**	**Medio**	**Alto**
20%	-405.290	2.185.884	3.924.528	1.135.304	2.175.970	3.281.829
40%	3.944.612	7.710.786	10.734.394	9.361.752	11.451.377	13.758.892
60%	7.953.151	13.046.528	16.567.635	17.493.768	20.801.675	23.481.568

.

Tabla 4.9 TIR correspondiente a distintos escenarios, comenzando el proyecto el año 2030.

Mercado	Weibull			Constante		
	Bajo	**Medio**	**Alto**	**Bajo**	**Medio**	**Alto**
20%	9,39%	14,18%	19,81%	11,46%	13,05%	15,18%
40%	14,07%	20,27%	30,56%	18,58%	22,49%	28,34%
60%	16,68%	24,13%	38,45%	23,45%	30,33%	41,38%

Tabla 4.10 ROI correspondiente a distintos escenarios, comenzando el proyecto el año 2030 [años].

Mercado	Weibull			Constante		
	Bajo	**Medio**	**Alto**	**Bajo**	**Medio**	**Alto**
20%	N/A	18	11	22	18	13
40%	19	12	8	12	12	11
60%	18	11	6	12	11	9

4.2.2. Inversión

Se presentan las inversiones necesarias para llevar a cabo el proyecto al iniciar en distintos años (2020, 2025 y 2030). La inversión se encuentra dentro en los indicadores económicos (VAN, TIR y ROI), aquí se presentan los montos que se debe proporcionar al proyecto para que este se desarrolle. (No toma en cuenta el origen del financiamiento, solo valores netos necesarios).

Tabla 4.11 Inversión necesaria para realizar el proyecto dando inicio el año 2020 [USD].

Mercado	Weibull			Constante		
	Bajo	**Medio**	**Alto**	**Bajo**	**Medio**	**Alto**
20%	20.859.668	17.256.533	13.425.775	25.347.703	21.772.550	18.197.398
40%	22.431.033	18.178.430	13.791.310	25.201.235	19.489.785	13.755.425
60%	24.002.398	19.377.488	14.708.435	25.647.798	17.549.270	10.168.438

Tabla 4.12 Inversión necesaria para realizar el proyecto dando inicio el año 2025 [USD].

Mercado	Weibull			Constante		
	Bajo	**Medio**	**Alto**	**Bajo**	**Medio**	**Alto**
20%	13.301.483	9.997.823	7.228.758	18.073.323	15.612.343	13.235.235
40%	14.880.775	11.220.703	8.117.483	20.126.933	16.105.330	10.443.628
60%	18.127.503	12.579.053	9.322.528	19.240.590	13.446.305	8.726.955

Tabla 4.13 Inversión necesaria para realizar el proyecto dando inicio el año 2030 [USD].

Mercado	Weibull			Constante		
	Bajo	**Medio**	**Alto**	**Bajo**	**Medio**	**Alto**
20%	7.224.455	4.858.895	3.572.460	11.930.003	10.362.803	8.922.378
40%	8.831.118	6.251.373	4.815.485	14.496.618	11.882.578	7.628.438
60%	12.077.878	7.684.575	6.252.700	13.909.810	10.122.153	7.734.113

4.2.3. Análisis

Los resultados anteriormente expuestos muestran que a medida que se pospone el inicio del proyecto, todos los indicadores mejoran, aumentando el VAN y la TIR y disminuyendo los años de retorno. Esto tiene concordancia con la falla de paneles, ya que las primeras plantas entran en etapa de abandono, entre el año 2039 y 2040, y la planta no podrá trabajar a su máxima capacidad antes de dichos años. (Los gráficos los VAN para cada escenario se encuentran en el Anexo 1).

Una tasa de falla constante da mejores resultados económicos que el modo de falla de Weibull, ya que al comparar el mismo flujo de paneles de cada modo de falla (bajo, medio y alto), tasa de falla constante siempre tendrá mejores resultados económicos.

El aumento del porcentaje de mercado de paneles reciclados, aumenta los indicadores económicos, y en comparación con los modos de falla, tiene una mayor preponderancia, ya que aumentar el porcentaje de mercado se consigue un mejor resultado que al encontrarse en un mejor escenario de modo de falla.

En cuanto a los años de retorno de la inversión, se puede apreciar tiene valores muy altos comparados con un proyecto tipo (5 a 10 años), ya que para este caso, en los mejores escenarios y posponiendo el inicio del proyecto lo más posible (año 2030). Esto se debe a que los principales ingresos del proyecto se producen al momento en que las plantas solares entran en etapa de abandono, (entre año 2039 y 2040).

Al analizar los gráficos del Anexo C, se puede encontrar el primer año para que cada escenario registre ingresos y no pérdidas, siendo estos años:

Tabla 4.14 Año mínimo al que al comenzar el proyecto este registra ganancias, para distintos escenarios.

Mercado	**Weibull**			**Constante**			**Promedio**
	Bajo	**Medio**	**Alto**	**Bajo**	**Medio**	**Alto**	
20%	N/A	2029	2027	2030	2029	2028	**2029**
40%	2028	2026	2024	2025	2024	2023	**2025**
60%	2027	2025	2023	2023	2020	2020	**2023**
Promedio	**2029**	**2027**	**2025**	**2026**	**2024**	**2024**	**2026**

4.3. Resultados ambientales

4.3.1. Cantidad de paneles reciclados

El impacto ambiental de la planta reciclaje se basa en la cantidad de paneles que recicla. En la siguiente tabla se presenta la cantidad de paneles que reciclados, para los distintos escenarios. Y el volumen reciclado durante la duración del proyecto, para cada año de inicio.

Tabla 4.15 Cantidad de paneles reciclados, distintos escenarios, flujo medio de paneles.

Año	Weibull - Medio			Constante- Medio			Promedio
	20%	40%	60%	20%	40%	60%	
2020	3.778.168	6.042.813	8.307.459	5.549.641	9.585.760	14.063.891	**7.887.955**
2025	5.762.834	9.887.536	14.274.570	7.894.019	14.315.108	21.178.209	**12.218.713**
2030	6.556.227	11.665.283	16.774.339	8.358.696	15.267.166	22.617.648	**13.539.893**
Promedio	**5.365.743**	**9.198.544**	**13.118.790**	**7.267.452**	**13.056.011**	**19.286.583**	**11.215.520**

Tabla 4.16 Metros cúbicos de desechos reciclados a lo largo del proyecto para distintos años de inicio [m3].

Año	2020	2025	2030
Metros cúbicos	631.036	977.497	1.083.191

Tomando el valor promedio de paneles reciclados para los distintos años en que puede iniciar el proyecto se puede calcular la cantidad de toneladas de componentes recuperadas.

Tabla 4.17 Toneladas de materias recolectadas a lo largo del proyecto para sus distintos años de inicio.

Año	2020	2025	2030
Vidrio	149.871	232.156	257.258
Aluminio	15.776	24.437	27.080
Componentes eléctricos	31.552	48.875	54.160
Total disposición	**31.552**	**48.875**	**54.160**
Total recuperado	**165.647**	**259.593**	**284.338**
Total	**197.199**	**308.468**	**338.498**

4.3.2. Impacto ambiental

Para plasmar el impacto ambiental que conlleva la ejecución de la planta de reciclaje de paneles solares, se tomarán en cuenta dos parámetros t CO2 eq. y m3 de agua, necesarios tanto para la fabricación como para el reciclaje del Aluminio y reutilización del vidrio plano. Los datos corresponden a ELCD 3.2 [29]:

Tabla 4.18 Impacto ambiental componentes por tonelada de material. Reciclaje para el caso del Aluminio y reutilización para el caso del vidrio. [29]

Material [Ton]	**Fabricación**		**Reciclaje/Reutilización**		**Diferencia**	
	CO2 eq. [Ton]	**Agua [m3]**	**CO2 eq. [Ton]**	**Agua [m3]**	**CO2 eq. [Ton]**	**Agua [m3]**
Aluminio	2,45	5,4	1,65	5,2	**0,8**	**0,2**
Vidrio	0,78	0,24	0	0	**0,78**	**0,24**

Por otra parte también se debe calcular las emisiones en tCO2 eq. para el reciclaje de paneles solares (por tonelada de paneles).

Tabla 4.19 Emisión de tCO2 equivalente, planta de reciclaje de paneles solares, por tonelada de paneles [30].

	Gasto por panel	**Factor de emisión**	**Emisión**
Electricidad	0,82 [KWh/u.]	0,0004 [tCO2/KWh]	0,0131 [tCO2/Ton]
Comb. GLP	0,04 [lt/u.]	0,0017 [tCO2/lt]	0,0027 [tCO2/Ton]
Comb. Diésel	0,044 [lt/u.]	0,0025 [tCO2/lt]	0,0044 [tCO2/Ton]
		Total	**0,0202 [tCO2/Ton]**

Al realizar el balance de tCO2 equivalente entre la opción de reciclar y reutilizar los componentes se obtiene:

Tabla 4.20 Toneladas de CO2 equivalente no emitidos, por concepto de reciclaje de paneles y economía circular.

Año	**2020**	**2025**	**2030**
Vidrio	116.899	181.082	200.661
Aluminio	12.621	19.550	21.664
Emisión Planta	-3.991	-6.243	-6.851
tCO2 eq. Totales	**125.529**	**194.388**	**215.474**

Por otra parte la cantidad de metros cúbicos de agua, no utilizados por concepto de reciclaje de paneles y economía circular es:

Tabla 4.21 Metros cúbicos de agua no utilizados, por concepto de reciclaje de paneles y economía circular [m3].

Año	**2020**	**2025**	**2030**
Vidrio	35.969	55.717	61.742
Aluminio	3.155	4.887	5.416
Total	**39.124**	**60.605**	**67.158**

Por lo que se puede estimar que a través de este modelo se evitan 16 Kg de CO2 equivalente y 5 litros de agua por panel reciclado, por lo que si los 1.500 [GW] de energía solar fotovoltaica que se espera que sean instalados hasta el 2030 (IRENA [4]), lo que representa 3.750.000.000 paneles instalados para dicha fecha, fuesen gestionados según el modelo propuesto se evitarían, 60.000.000 de Ton de CO2 eq. y 18.750.000 metros cúbicos de agua.

4.4. Sensibilización

La sensibilización del proyecto es realizada en función del VAN como parámetro para definir la incidencia de los parámetros en el proyecto, ciertos parámetros se mantienen constantes para poder comparar los escenarios que se desean comparar, a menos que al análisis establezca que dichos parámetros van a variar para analizar su estabilidad e incidencia en el proyecto.

Los parámetros utilizados son:

Tabla 4.22 Parámetros utilizados para analizar la sensibilidad del proyecto.

Vida útil plantas	25 [años]
Modo de falla	Constante - Flujo medio de paneles
Duración del proyecto	30 [años]
Porcentaje de Mercado	40%
Precio del vidrio	30% del precio nuevo
Precio del aluminio	1000 [USD/Ton]
Cobro por panel	2 [USD/u.]
Máximo de Líneas	4
Almacenamiento	500.000 [u.]
Porcentaje de préstamo	60%
Productividad Tecnología	60 [u./hr]

Los resultados presentados se encuentran en forma que el gráfico resalta los contornos, dando un rango de colores más cerrado para poder analizar mejor las tendencias, los resultados reales, en donde cada punto obtiene un valor distinto se puede encontrar en el Anexo C, en el mismo anexo se pueden encontrar más parámetros sensibilizados pero con menor incidencia en el proyecto.

Se remarcarán con una línea roja los valores que fueron supuestos para el proyecto, para poder visualizar la situación supuesta frente al resto de los escenarios.

Precio del vidrio vs Mercado de paneles

En este punto relaciona el precio de venta del vidrio, en porcentaje (en función del precio para paneles solares fotovoltaico nuevo por tonelada 1.100 [USD] = 100%) y el porcentaje del mercado total de paneles solares en desuso, reciclado en la planta.

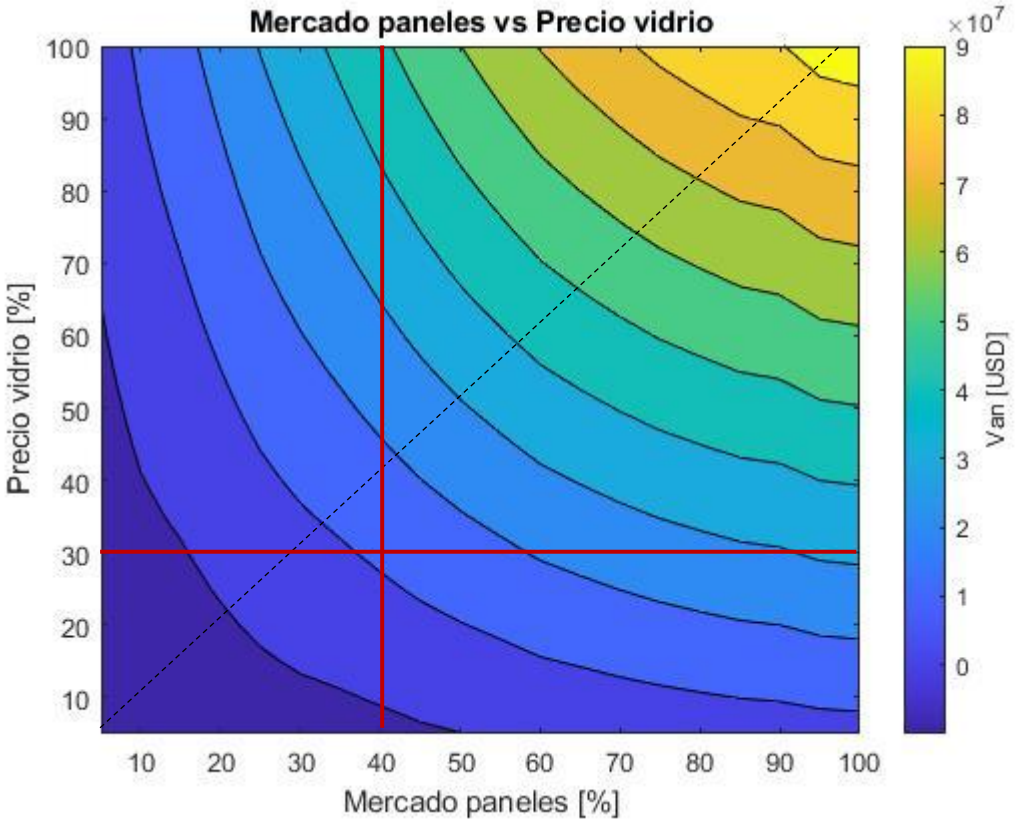

Figura 4.1 Sensibilización en función del precio del vidrio y el mercado de paneles.

En este resultado se puede apreciar como ambos factores ponderan un peso similar en los resultados del negocio, existe un punto de equilibrio (línea punteada), por el cual al aumentar se optimizan los resultados al aumentar ambos parámetros. Por otra parte aumentar solo uno de los parámetros tiene peores resultados que al aumentar ambos juntos (por cada 1% de aumento en el precio del vidrio, 1% de aumento en el mercado de paneles).

Los valores utilizados en la evaluación del proyecto (intersección de líneas rojas), está por debajo del punto de equilibrio, por lo que es conveniente aumentar el precio del vidrio, para encontrarse en dicho punto.

Precio del Aluminio vs Mercado de paneles

En este punto relaciona el precio de venta del aluminio, en USD por tonelada y el porcentaje del mercado total de paneles solares en desuso, reciclado en la planta.

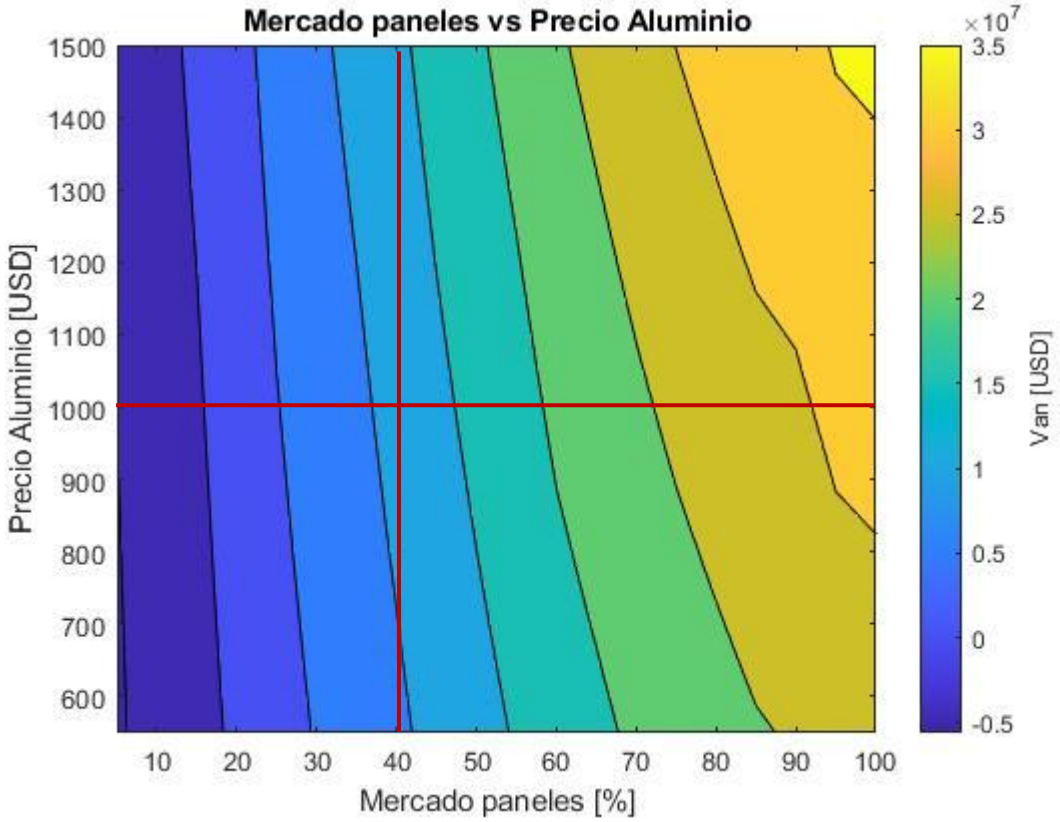

Figura 4.2 Sensibilización en función del precio del aluminio y el mercado de paneles.

En este resultado se puede apreciar como el precio del aluminio tiene una incidencia mucho menor al porcentaje del mercado de paneles reciclado. Siendo el precio del aluminio un factor de menor relevancia en el resultado del proyecto. Para mercados mayores a un 90%, el precio del aluminio tiene mayor inferencia en los resultados.

Los valores utilizados en la evaluación del proyecto (intersección de líneas rojas), se ven poco afectado por el precio del aluminio, siendo necesario que este disminuya en un 40% de su valor para encontrarse en un segmento de resultados más bajo.

Cobro por Panel vs Mercado de paneles

En este punto relaciona el cobro realizado por panel reciclado, en USD por unidad y el porcentaje del mercado total de paneles solares en desuso, reciclado en la planta.

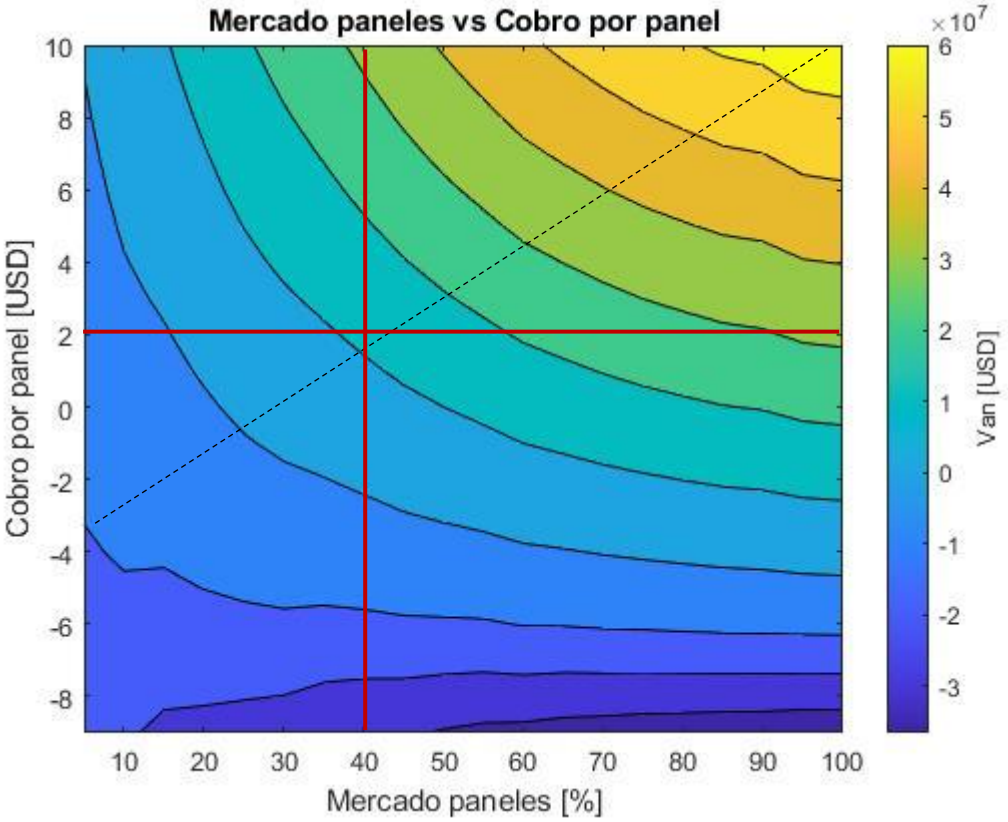

Figura 4.3 Sensibilización en función del cobro por panel y el mercado de paneles.

En este resultado se puede apreciar como ambos factores ponderan un peso similar en los resultados del negocio, existe un punto de equilibrio (línea punteada), por el cual al aumentar se optimizan los resultados al aumentar ambos parámetros. Por otra parte aumentar solo uno de los parámetros tiene peores resultados que al aumentar ambos juntos. Para este caso existe un valor mínimo para el cobro de paneles (-4 [USD]), para que ambos factores tengan el mismo peso.

Los valores utilizados en la evaluación del proyecto (intersección de líneas rojas), está cercano al punto de equilibrio, por lo que se deberían aumentar ambos al mismo ritmo (2 [USD] por panel, por cada 10% de mercado de paneles)

Máximo de Líneas vs Mercado de paneles

Dentro del algoritmo utilizado para optimizar la compra de líneas, se debe colocar el máximo de líneas a adquirir a lo largo de todo el proyecto, a continuación se presenta la cantidad de líneas máxima, en unidades, contra el porcentaje del mercado total de paneles solares en desuso, reciclado en la planta.

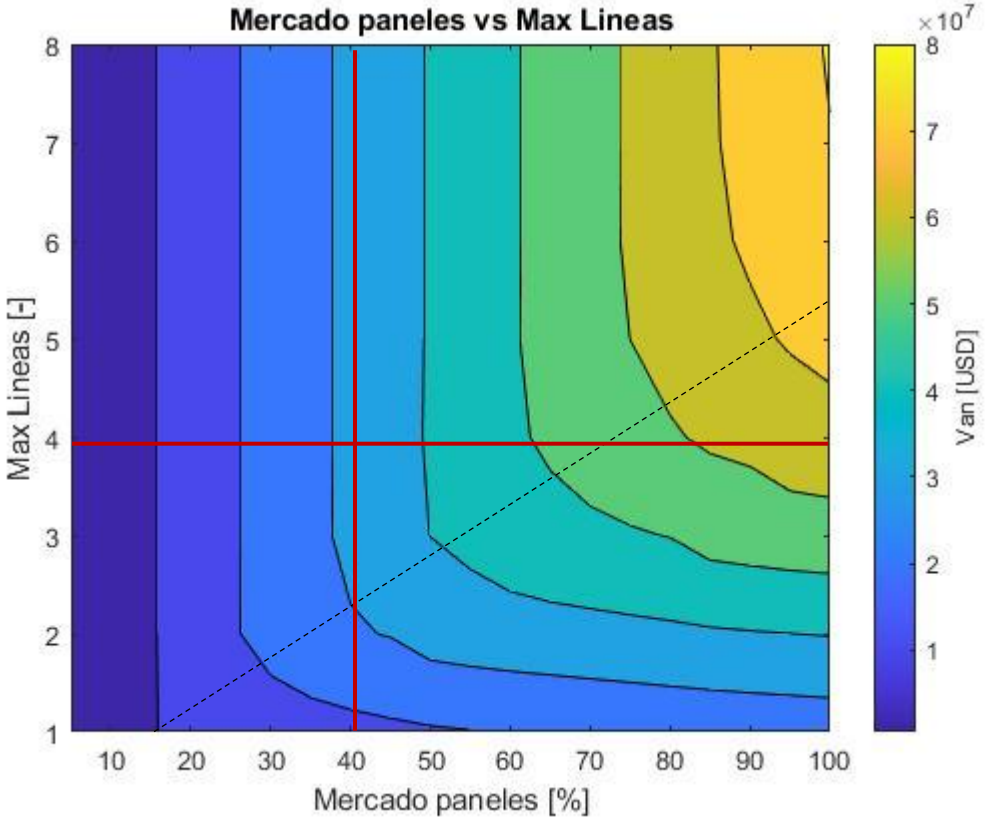

Figura 4.4 Sensibilización en función del máximo de líneas y el mercado de paneles.

En este resultado se puede apreciar como ambos factores ponderan un peso similar en los resultados del negocio, existe un punto de equilibrio (línea punteada), por el cual al aumentar se optimizan los resultados al aumentar ambos parámetros. Por otra parte aumentar solo uno de los parámetros tiene peores resultados que al aumentar ambos juntos. Para este caso existe un valor máximo para el número máximo de líneas (6 [-]), para que ambos factores tengan el mismo peso.

Los valores utilizados en la evaluación del proyecto (intersección de líneas rojas), está por encima del punto de equilibro debiendo disminuir el máximo de líneas a 2, para encontrarse en el punto de equilibrio. (Por cada 20% de mercado de paneles, se debe aumentar en 1 el máximo de líneas)

Capítulo 5

Conclusiones

Las conclusiones del proyecto se basan en la factibilidad técnica, resultados económicos, resultados ambientales y escalabilidad. Puntos que se encuentran detallados y desarrollados en las secciones anteriores.

El reciclaje de paneles solares fotovoltaicos tiende a considerarse como un proyecto lejano, y de poco protagonismo en la actualidad. Pero el contexto nacional e internacional ya está encaminando a la gestión de este residuo en dicha dirección. Distintos organismos privados como gubernamentales están sentando las bases legales, técnicas y económicas para que el desarrollo del reciclaje de paneles. Estudios como los realizados por la IEA [13], buscan motivar a inversores, empresas y estados a seguir desarrollando la tecnología que cumpla con dicho objetivo. Por otra parte variados países están regulando la revalorización de los residuos, tal es el caso de Chile con la Ley 20.920 (Ley REP), lo que fomenta las opciones de reciclaje.

Por otra parte siguen existiendo desafíos para lograr implementar un modelo de economía circular en torno a los paneles solares fotovoltaicos, en primer lugar, la falta de interés de los productores de paneles solares en usar los componentes reciclados, principalmente por la falta de conocimiento en viabilidad del proyecto. Y en segundo lugar, la falta de estudios económicos que incentiven a invertir en plantas de reciclaje que impulsen el modelo de negocios.

En cuanto a los mercados estudiados se puede concluir en base a la sensibilización del proyecto que el mercado de paneles adjudicado para el reciclaje es el parámetro con mayor incidencia en el proyecto, siendo fundamental posicionarse de forma anticipada en el mercado.

Por otra parte el vidrio resulta ser el componente con mayor influencia, sobre el proyecto, por lo que el estudio de las condiciones ópticas y procesos necesarios para que este sea reutilizable en la manufactura de nuevos paneles solares, es imperante para la implementación del proyecto. Por lo que el siguiente en el estudio del reciclaje de paneles solares debe ir en dicha dirección.

En función de lo investigado se puede concluir que desde el área técnica, sí es factible realizar el proyecto de reciclaje de paneles solares fotovoltaicos, ya que se encuentra disponible la tecnología necesaria para su procesamiento y existe un mercado para sus componentes. Aunque esta tecnología se encuentra en estado piloto para algunos casos, ya existen modelos a nivel industrial.

Cabe destacar que la tecnología irá evolucionando a medida que los estados pilotos e investigaciones converjan en patentes industriales, aumentando la productividad y disminuyendo el costo de la tecnología.

En base a los resultados económicos se desprende que existe una tensión entre demorar el inicio del proyecto, para comenzar más cerca de la etapa de abandono de los proyectos solares fotovoltaicos, y comenzar el proyecto de forma temprana para obtener un buen posicionamiento en el mercado. De esta forma, ser una opción que quede plasmada en las RCA de las plantas fotovoltaicas en funcionamiento y así obtener un mayor porcentaje de mercado de paneles en desuso.

Es por esto que se concluye que el **inicio del proyecto debe ser el año 2025**, ya que se logra posicionarse en el mercado, y al mismo tiempo obtener beneficios con tasas internas de retorno competitivas. Los cinco años que se encuentran entre el desarrollo inicial de este proyecto y su implementación, permiten mejorar ciertos factores, como la posibilidad de instaurar un mercado en el que se recupere el silicio de los desechos electrónicos, aumentando el nivel de recuperación, disminuyendo costos y aumentando las ganancias. También permite reevaluar el modo de falla de los PF, permitiendo generar escenarios más precisos, al poseer una mayor historia del funcionamiento de las plantas.

Tras analizar los resultados ambientales se puede concluir que el impacto del reciclaje de paneles solares es positivo, al reducir la huella de carbono de las plantas solares fotovoltaicas y el consumo de agua de la producción de paneles. Todo impacto ambiental positivo que se puede generar en torno a cómo el ser humano genera la energía necesaria para su desarrollo, debe ser implementada. Ya que la demanda energética crecerá con el desarrollo humano, y cada cambio que se implementa, tiene grandes repercusiones en el futuro.

El proyecto posee un gran potencial de escalabilidad tanto a nivel nacional; al conseguir un mayor porcentaje de mercado, como internacional: al asociarse a empresas como PV CYCLE que trabajan en la gestión de residuos fotovoltaicos, a nivel internacional, generando oportunidades de llevar el modelo de negocios a niveles continentales.

Bibliografía

[1] Juan Bisquert. The Physics of Solar Cells: Perovskites, Organics, and Photovoltaic Fundamentals. EEUU, CRC Press, 2017.

[2] Energías Renovables Info. Tipos de Paneles Fotovoltaico. Recuperado de: *http://www.energiasrenovablesinfo.com/solar/tipos-paneles-fotovoltaicos* (Revisado Abril 2019)

[3] SUNFIELDS Europe. ¿Cómo se construye un panele fotovoltaico? Recuperado de: *https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/modulo-fotovoltaico-laminacion-curado-y-enmarcado/* (Revisado Abril 2019)

[4] IRENA and IEA-PVPS. END-OF-LIFE MANAGEMENT Solar Photovoltaic Panels. EU, 2016.

[5] Dirk C. Jordan; Sarah R. Kurtz. Compendium of photovoltaic degradation rates. EEUU, NREL, 2016.

[6] Dirk C. Jordan; Sarah R. Kurtz. PV degradation curves: non-linearities and failure modes. EEUU, NREL, 2016.

[7] Marc Köntges; Sarah Kurtz; Corinne Packard. Review of Failures of Photovoltaic Modules Task-13, IEA-PVPS, 2014.

[8] Marina M. Lunardi; José I. Bilbao. A Review of Recycling Processes for Photovoltaic Modules. Australia, ACAP, 2018.

[9] Sajjad Mahmoud; Masud Behnia. End-of-life photovoltaic modules: A systematic quantitative literature review. Australia, NSW, 2019.

[10] Pablo Dias; Hugo Veit. Recycling Crystalline Silicon Photovoltaic Modules. Brasil, UFRGS, 2019.

[11] Valeria Fiandra; Giorgio Graditi. End-of-life of silicon PV panels: A sustainable materials recovery process. Italia, ENEA, 2018.

[12] Takuya Doi. Experimental study on PV module recycling with organic solvent method. Japón, Tokyo University of Agriculture and Technology, 2001.

[13] Keiichi Komoto; Jin-Seok Lee. End-of-Life Management of Photovoltaic Panels: Trends in PV Module Recycling Technologies Task-12, IEA-PVPS, 2018.

[14] Comisión nacional de Energía. Anuario estadístico de energía. Chile, Ministerio de Energía, 2015, 2016, 2017, 2018.

[15] Coordinador Eléctrico Nacional, Gerencia de la planificación de la transmisión. Estudio de Operación y Desarrollo del SEN sin centrales a carbón, *Informe Principal*. Chile, 2018.

[16] S. Kumar, B. Sarkar. Design For Reliability With Weibull Analysis For Photovoltaic Modules. Production Engineering Department Jadavpur University, India, 2013.

[17] Kees Baldé; Harrie Meeuwissen. MANUAL for the use of the WEEE calculation tool. EU, 2017.

[18] J. Kuitche. Statistical lifetime prediction for photovoltaic modules. Arizona State University, EEUU, 2015.

[19] Ministerios de Medio Ambiente. 太陽光発電設備のリサイクル等の推進に向けた ガイドライン (Directrices, para la promoción del reciclaje, de las instalaciones de generación de energía solar). Japón, 2016.

[20] Knoema. Aluminium Price Forecast. Recuperado de: www.knoema.es/ffzioof/aluminium-prices-forecast-long-term-2018-to-2030-data-and-charts (Revisado Agosto 2019).

[21] M. Monteiro; R. Corkish. A Review of Recycling Processes for Photovoltaic Modules. Australia, ACAP, 2017.

[22] Y. Kyu; M. Jun Chonnam. Recovering valuable metals from recycled photovoltaic modules. National University, Corea, 2014.

[23] PV INSIGHTS. Silicon Price Insights. Recuperado de: https://w*ww.pvinsights.com.* (Revisado Septiembre 2019).

[24] NPC Inc. Automated PV Panel Disassembly Equipment/Line. Recuperado de: *https://www.npcgroup.net/eng/solarpower/reuse-recycle/dismantling.* (Revisado Septiembre 2019).

[25] Veolia. First European plant entirely dedicated to recycling photovoltaic panels Recuperado de: *https://www.veolia.com/en/newsroom/news/recycling-photovoltaic-panels-circular-economy-france.* (Revisado Septiembre 2019).

[26] Loser Chemie. Solar modules – Method for non-destructive reprocessing. Recuperado de: *https://lc-freiberg.de/products-and-services/non-destructive-processing-of-pv-modules/?lang=en.* (Revisado Septiembre 2019).

[27] CYPE Ingenieros S.A. Generadora de precios de la construcción. Recuperado de: *www.chile.generadordeprecios.info/obra_nueva",* (Revisado Agosto 2019)

[28] CGE. Tarifa de Suministro. Recuperado de: *https://www.cge.cl/informacion-comercial/tarifas-y-procesos-tarifarios/tarifa-de-suministro/* (Revisado Agosto 2019).

[29] Cristina Rodríguez. ELCD 3.2 in openLCA. Alemania, GreenDelta, 2016

[30] Energía aberta. Factores de emisión. Recuperado de: http://energiaabierta.cl/visualizaciones/factor-de-emision-sic-sing/. (Revisado Septiembre 2019)

Anexo A

A. Degradación paneles según proveedor

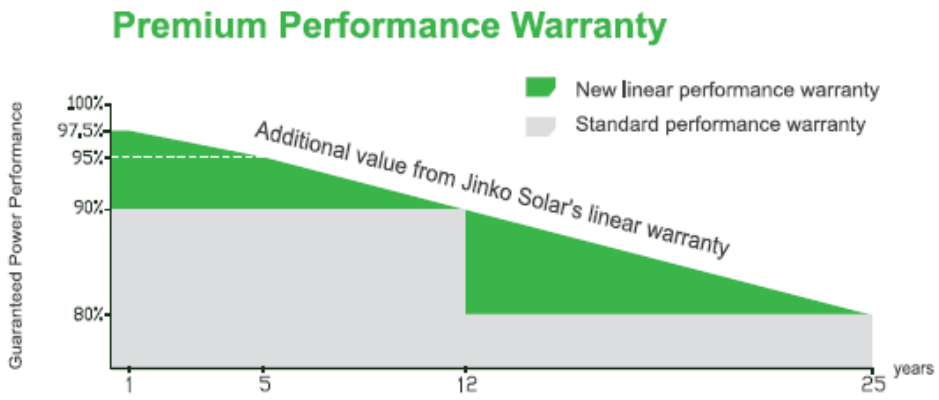

Figura A.1 Garantía rendimiento módulo Jinko 310PP-72.

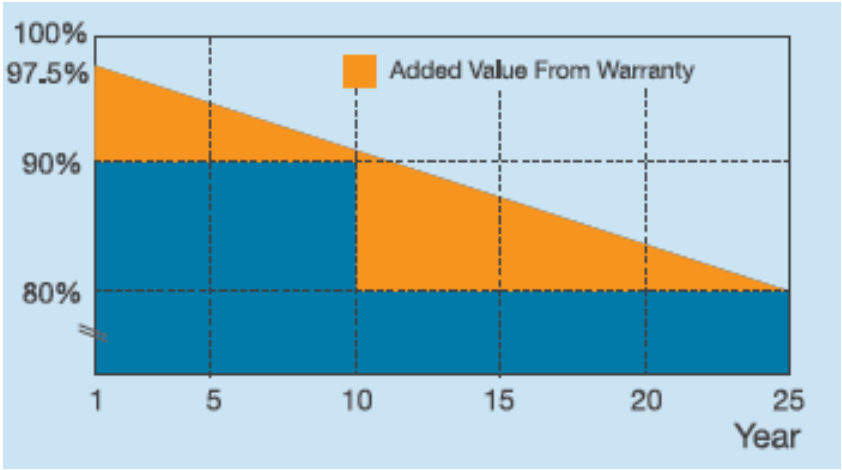

Figura A.2 Garantía rendimiento módulo JAP6.

Anexo B

B. Datos de proyección PF en falla en Chile

B.1 Proyección potencia instalada por escenario

Tabla B.1 Proyección potencia instalada en Chile por año [MW]. [14]

Año	**Potencia Instalada por Año**			
	A1		A6	
	C - DC	S - DC	C - DC	S - DC
2020	1200	1100	2250	2150
2021	0	0	0	0
2022	0	0	0	0
2023	1700	1400	1300	1500
2024	800	300	1550	1250
2025	200	450	200	0
2026	0	0	0	0
2027	2500	1700	1400	600
2028	450	50	1200	1700
2029	2550	2600	1800	1850
2030	0	200	0	0
2031	150	1150	0	250
2032	50	250	0	150
2033	0	100	0	250
2034	100	850	1900	250
2035	0	550	750	1800
2036	900	550	200	50
2037	350	150	950	750
2038	0	250	1900	150
2039	0	100	850	1250
2040	0	150	1500	1950

Tabla B.2 Proyección potencia instalada acumulada en Chile por año [MW]. [14]

Año	**Potencia instalada acumulada por año**			
	A1		A6	
	C - DC	S - DC	C - DC	S - DC
2020	1200	1100	2250	2150
2021	1200	1100	2250	2150
2022	1200	1100	2250	2150
2023	2900	2500	3550	3650
2024	3700	2800	5100	4900
2025	3900	3250	5300	4900
2026	3900	3250	5300	4900
2027	6400	4950	6700	5500
2028	6850	5000	7900	7200
2029	9400	7600	9700	9050
2030	9400	7800	9700	9050
2031	9550	8950	9700	9300
2032	9600	9200	9700	9450
2033	9600	9300	9700	9700
2034	9700	10150	11600	9950
2035	9700	10700	12350	11750
2036	10600	11250	12550	11800
2037	10950	11400	13500	12550
2038	10950	11650	15400	12700
2039	10950	11750	16250	13950
2040	10950	11900	17750	15900

B.2 Proyección paneles instalados por escenario

Tabla B.3 Proyección PF instalados en Chile por año.

Año	Módulos Instalados por cada Año			
	A1		A6	
	C - DC	S - DC	C - DC	S - DC
2020	3.000.000	2.750.000	5.625.000	5.375.000
2021	0	0	0	0
2022	0	0	0	0
2023	4.250.000	3.500.000	3.250.000	3.750.000
2024	2.000.000	750.000	3.875.000	3.125.000
2025	500.000	1.125.000	500.000	0
2026	0	0	0	0
2027	6.250.000	4.250.000	3.500.000	1.500.000
2028	1.125.000	125.000	3.000.000	4.250.000
2029	6.375.000	6.500.000	4.500.000	4.625.000
2030	0	500.000	0	0
2031	375.000	2.875.000	0	625.000
2032	125.000	625.000	0	375.000
2033	0	250.000	0	625.000
2034	250.000	2.125.000	4.750.000	625.000
2035	0	1.375.000	1.875.000	4.500.000
2036	2.250.000	1.375.000	500.000	125.000
2037	875.000	375.000	2.375.000	1.875.000
2038	0	625.000	4.750.000	375.000
2039	0	250.000	2.125.000	3.125.000
2040	0	375.000	3.750.000	4.875.000

B.3 Proyección paneles en falla por año

Tabla B.4 Proyección PF en falla en Chile por año, modo de falla de Weibull.

Año	Paneles en Falla por año Weibull											
	A1						A6					
	C-DC			S-DC			C-DC			S-DC		
	Fav	Medio	Desfav	Fav	Medio	Desfav	Fav	Medio	Desfav	Fav	Medio	Desfav
2021	8	2073	20384	8	2073	20351	8	2076	20731	8	2076	20698
2022	28	4105	31599	28	4102	31485	28	4131	32789	28	4128	32676
2023	84	7521	46819	84	7509	46461	84	7628	49414	84	7618	49220
2024	230	12954	66780	230	12914	65791	230	13266	71651	230	13240	71296
2025	573	21220	92089	573	21104	90031	574	21960	100244	574	21900	99562
2026	1323	33328	123113	1323	33040	119447	1329	34859	135724	1329	34734	134485
2027	2866	50479	160819	2864	49852	154699	2888	53349	178799	2886	53100	176450
2028	5874	74063	205638	5865	72823	195926	5940	79038	230053	5935	78559	226049
2029	11466	105633	258631	11440	103353	243975	11644	113734	290226	11629	112847	283936
2030	21432	146861	319991	21361	142908	298937	21866	159380	359392	21829	157811	350168
2031	38512	199438	389723	38336	192921	361077	39491	217948	437278	39406	215303	424540
2032	66708	264923	467328	66304	254653	430090	68774	291258	523119	68588	287008	506369
2033	111530	344539	551924	110657	329007	505368	115642	380749	615738	115258	374212	594647
2034	179972	438938	642298	178183	416317	586197	187762	487203	714188	186996	477542	688020
2035	279857	547951	736872	276363	516130	671568	293968	610468	817053	292501	596680	785339
2036	418024	670375	834062	411490	627037	760317	442568	749194	922596	439855	730110	884827
2037	596975	803835	931968	585228	746593	850969	638044	900643	1029001	633200	874953	984757
2038	977741	1112182	1195845	957397	1038764	1109292	1043881	1228024	1302021	1035528	1194309	1250412
2039	1462663	1540557	1585177	1428691	1449072	1495279	1565006	1675542	1701623	1551087	1632325	1641766
2040	1580664	1657834	1680998	1525977	1547109	1590512	1732163	1810863	1809725	1709777	1756679	1740784
2041	1817055	1906534	1907009	1732350	1776527	1819161	2029966	2075131	2050568	1995267	2008632	1971824
2042	1538209	1672566	1659190	1412421	1524820	1577608	1818882	1852891	1820683	1767148	1772982	1731574
2043	1033651	1147305	1095500	855523	985407	1024086	1374592	1334458	1278463	1300541	1240452	1178588
2044	2441175	2403216	2265893	2110404	2141206	2116712	3778720	3557597	3439937	3585087	3357395	3237090
2045	1206460	1206706	1065409	941101	1056398	1038974	1189131	1190347	1171287	1090240	1087674	1061933
2046	3086303	2904256	2677023	2487620	2488111	2395898	2691086	2531430	2456623	2733896	2598663	2519551
2047	1940102	1860374	1669432	1227388	1340674	1266443	2722236	2642110	2604946	2190665	2198167	2171321
2048	1424109	1260639	1047670	1558807	1558769	1422021	1188224	1233079	1249905	834282	930991	936220
2049	1510418	1129210	861623	1313082	1185231	996782	1231433	1149880	1124356	1126575	1060988	1008740
2050	4104965	3492000	3172557	3209543	2860017	2595298	2804137	2569398	2488648	1973596	1732942	1625324
2051	1497986	1152384	971305	1362407	1098141	884923	2331359	2232855	2195208	3008176	2732601	2616638
2052	3382719	3022870	2849611	3938165	3507335	3242129	2618692	2672962	2660685	2692785	2634271	2588868
2053	149774	195985	182086	957604	844534	713944	471932	796486	840671	459277	673585	703449

2054	341673	362506	329546	1923397	1732144	1574674	699541	942432	904416	870698	1018482	985637
2055	258368	267783	225597	819425	720865	607795	988179	1087477	958263	903437	991429	906472
2056	270620	236098	178336	734364	570587	444144	1320188	1222492	999977	1188716	1162903	1015839
2057	446529	347036	272749	1512879	1265801	1122825	3401686	3084596	2775102	1359709	1211274	1010875
2058	395087	247071	167636	1012098	836099	736433	1955838	1745272	1490639	2942585	2668070	2421419
2059	1273232	1077964	992477	867752	735739	664296	1487743	1169566	900035	899374	768802	591488
2060	449845	392002	367735	334288	263861	224490	2395335	1873887	1566491	1758009	1456957	1235680
2061	0	0	0	395548	328780	296249	3134392	2585819	2311996	1141142	792132	587454
2062	0	0	0	178451	141983	125155	1591717	1251827	1093953	2255597	1789776	1574486
2063	0	0	0	192791	168001	157601	1927906	1680010	1576008	2506278	2184013	2048811

Tabla B.5 Proyección PF en falla en Chile por año, modo de falla de tasa constante.

Año	**Paneles en Falla por año Tasa Constante**											
	A1						**A6**					
	C-DC			**S-DC**			**C-DC**			**S-DC**		
	Fav	**Medio**	**Desfav**	**Fav**	**Medio**	**Desfav**	**Fav**	**Medio**	**Desfav**	**Fav**	**Medio**	**Desfav**
2021	9950	29849	49749	9700	29099	48499	12575	37724	62874	12325	36974	61624
2022	9950	29849	49749	9700	29099	48499	12575	37724	62874	12325	36974	61624
2023	14200	42599	70999	13200	39599	65999	15825	47474	79124	16075	48224	80374
2024	16200	48599	80999	13950	41849	69749	19700	59099	98499	19200	57599	95999
2025	16700	50099	83499	15075	45224	75374	20200	60599	100999	19200	57599	95999
2026	16700	50099	83499	15075	45224	75374	20200	60599	100999	19200	57599	95999
2027	22950	68849	114749	19325	57974	96624	23700	71099	118499	20700	62099	103499
2028	24075	72224	120374	19450	58349	97249	26700	80099	133499	24950	74849	124749
2029	30450	91349	152249	25950	77849	129749	31200	93599	155999	29575	88724	147874
2030	30450	91349	152249	26450	79349	132249	31200	93599	155999	29575	88724	147874
2031	30825	92474	154124	29325	87974	146624	31200	93599	155999	30200	90599	150999
2032	30950	92849	154749	29950	89849	149749	31200	93599	155999	30575	91724	152874
2033	30950	92849	154749	30200	90599	150999	31200	93599	155999	31200	93599	155999
2034	31200	93599	155999	32325	96974	161624	35950	107849	179749	31825	95474	159124
2035	31200	93599	155999	33700	101099	168499	37825	113474	189124	36325	108974	181624
2036	33450	100349	167249	35075	105224	175374	38325	114974	191624	36450	109349	182249
2037	34325	102974	171624	35450	106349	177249	40700	122099	203499	38325	114974	191624
2038	477944	523844	569744	479694	529094	578494	489069	557219	625369	482319	536969	591619
2039	1324127	1325700	1327272	1326127	1331700	1337272	1337377	1365450	1393522	1331627	1348200	1364772
2040	1520062	1508872	1497682	1522437	1515997	1509557	1537062	1559872	1582682	1532437	1545997	1559557
2041	2099323	2055298	2011273	2101698	2062423	2023148	2116323	2106298	2096273	2111698	2092423	2073148
2042	1515271	1496846	1478421	1517646	1503971	1490296	1532271	1547846	1563421	1527646	1533971	1540296

2043	27375	82125	136875	29750	89250	148750	44375	133125	221875	39750	119250	198750
2044	2952375	2857125	2761875	2711000	2633000	2555000	5528750	5336250	5143750	5280375	5091125	4901875
2045	24375	73125	121875	27000	81000	135000	38750	116250	193750	34375	103125	171875
2046	4168125	4004375	3840625	3439500	3318500	3197500	3207500	3122500	3037500	3690625	3571875	3453125
2047	1970125	1910375	1850625	754750	764250	773750	3813625	3690875	3568125	3077500	2982500	2887500
2048	505625	516875	528125	1119625	1108875	1098125	519125	557375	595625	27500	82500	137500
2049	17625	52875	88125	21625	64875	108125	31125	93375	155625	27500	82500	137500
2050	6111375	5834125	5556875	4165375	3996125	3826875	3443625	3330875	3218125	1490000	1470000	1450000
2051	1108250	1074750	1041250	139250	167750	196250	2952625	2857875	2763125	4169750	4009250	3848750
2052	6225875	5927625	5629375	6354750	6064250	5773750	4412125	4236375	4060625	4531125	4343375	4155625
2053	3875	11625	19375	498250	494750	491250	20125	60375	100625	17125	51375	85625
2054	369500	358500	347500	2813375	2690125	2566875	20125	60375	100625	626500	629500	632500
2055	125375	126125	126875	616750	600250	583750	20125	60375	100625	382125	396375	410625
2056	3375	10125	16875	250500	251500	252500	20125	60375	100625	625500	626500	627500
2057	247125	241375	235625	2078375	1985125	1891875	4651375	4454125	4256875	624875	624625	624375
2058	3125	9375	15625	1345000	1285000	1225000	1843500	1780500	1717500	4402375	4207125	4011875
2059	2196875	2090625	1984375	1343625	1280875	1218125	501000	503000	505000	132250	146750	161250
2060	854000	812000	770000	367250	351750	336250	2328625	2235875	2143125	1838375	1765125	1691875
2061	0	0	0	610625	581875	553125	4641875	4425625	4209375	374000	372000	370000
2062	0	0	0	244375	233125	221875	2077750	1983250	1888750	3054875	2914625	2774375
2063	0	0	0	366000	348000	330000	3660000	3480000	3300000	4758000	4524000	4290000

Anexo C

C. Datos de resultados económicos del proyecto

C.1 Gráficos resultados VAN vs año de inicio

Tasa de falla de Weibull

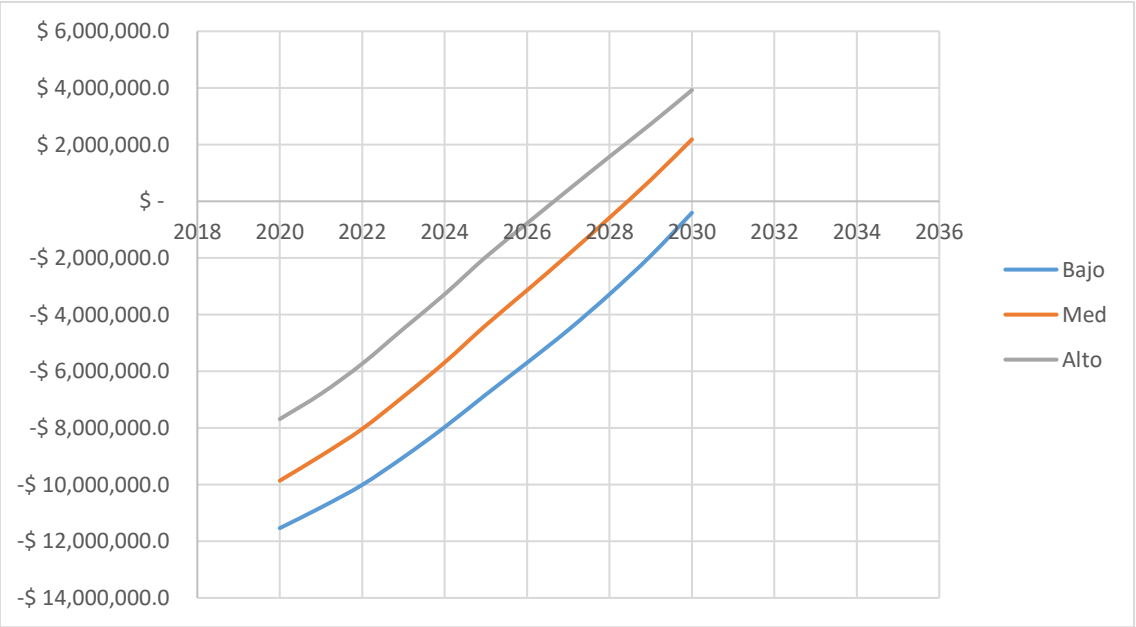

Figura C.1 VAN al iniciar el proyecto en distintos años, Modo de falla de Weibull con 20% del mercado de paneles [USD].

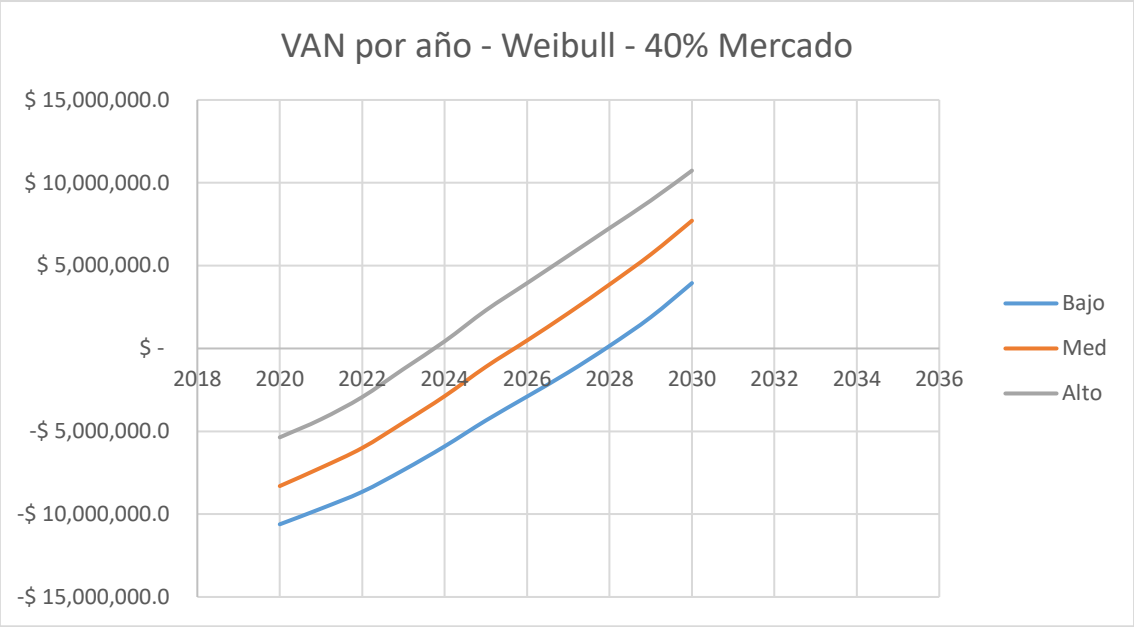

Figura C.2 VAN al iniciar el proyecto en distintos años, Modo de falla de Weibull con 40% del mercado de paneles [USD].

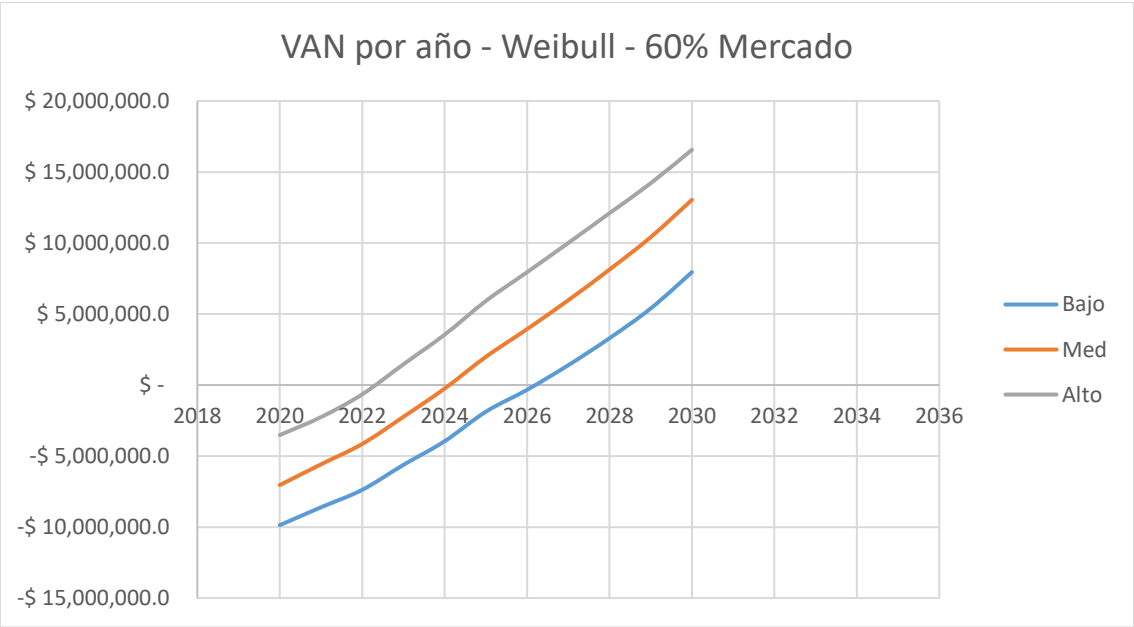

Figura C.3 VAN al iniciar el proyecto en distintos años, Modo de falla de Weibull con 60% del mercado de paneles [USD].

Tasa de Falla Constante

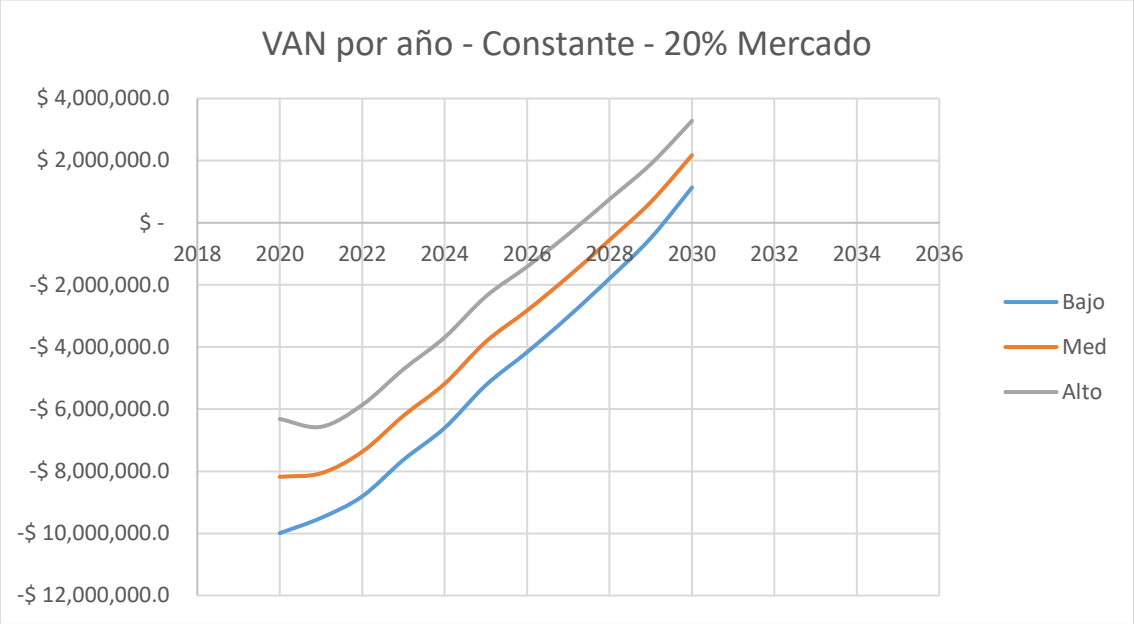

Figura C.4 VAN al iniciar el proyecto en distintos años, Modo de falla Constante con 20% del mercado de paneles [USD].

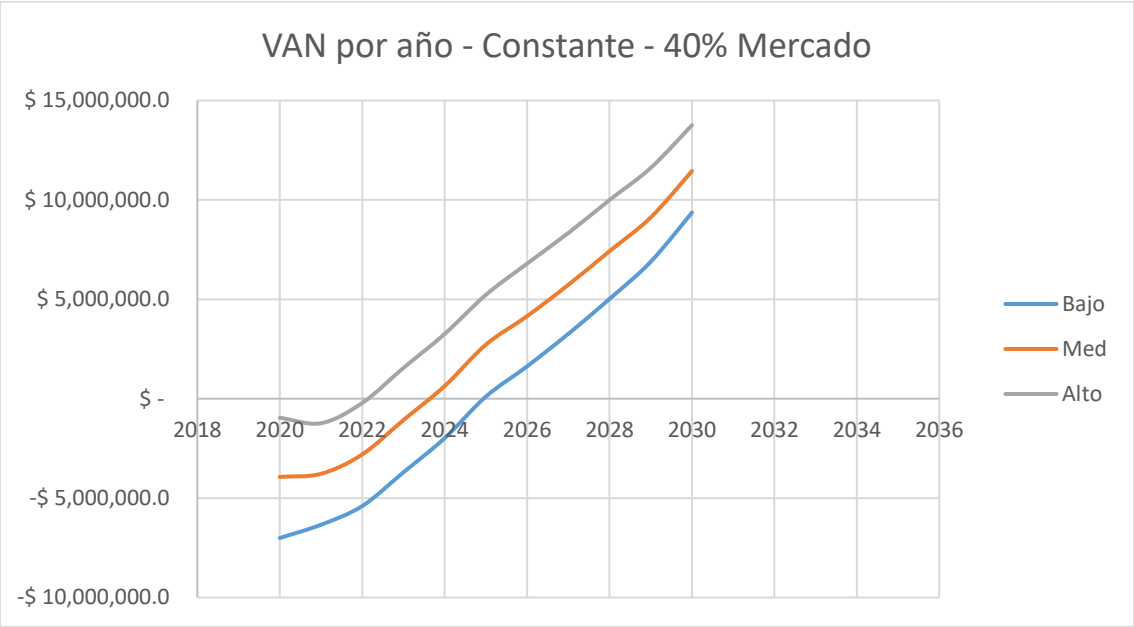

Figura C.5 VAN al iniciar el proyecto en distintos años, Modo de falla Constante con 40% del mercado de paneles [USD].

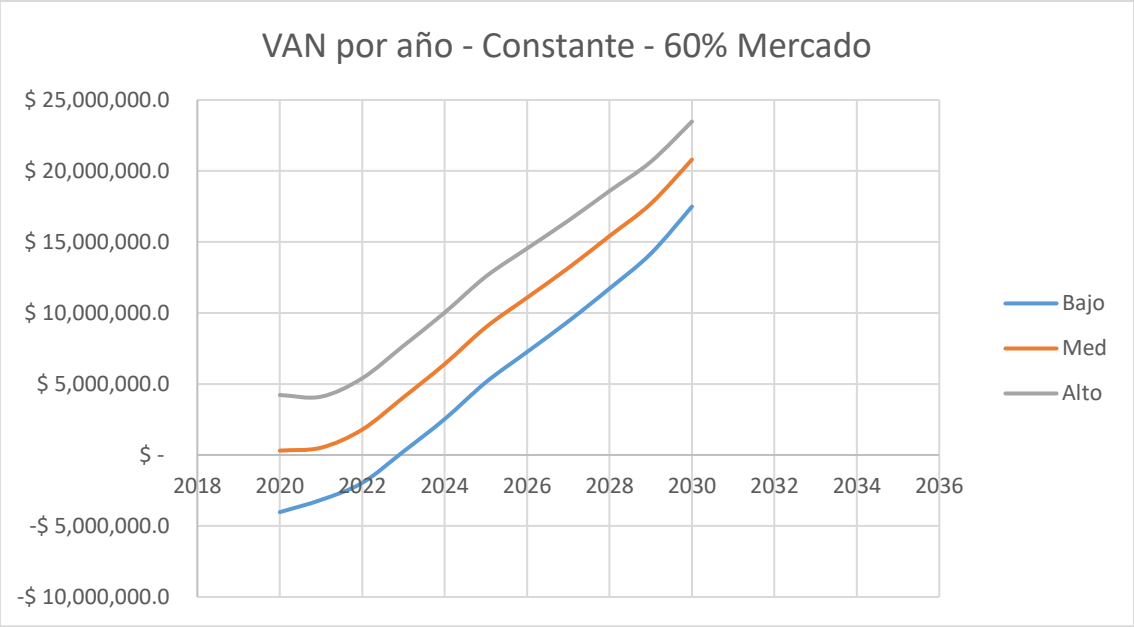

Figura C.6 VAN al iniciar el proyecto en distintos años, Modo de falla Constante con 60% del mercado de paneles [USD].

C.2 Gráficos reales resultados sensibilización

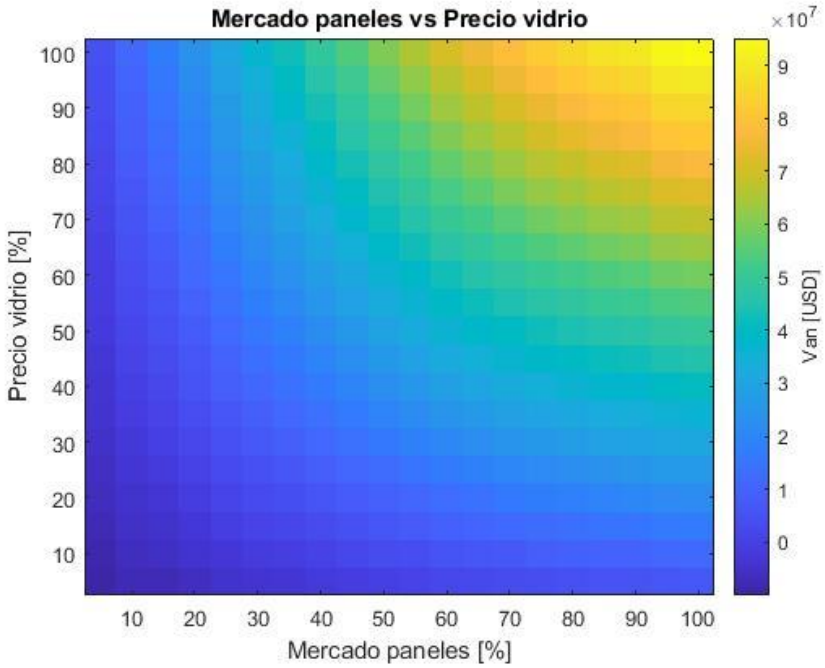

Figura C.7 Datos reales, sensibilización del proyecto en función del precio del vidrio y el mercado de paneles.

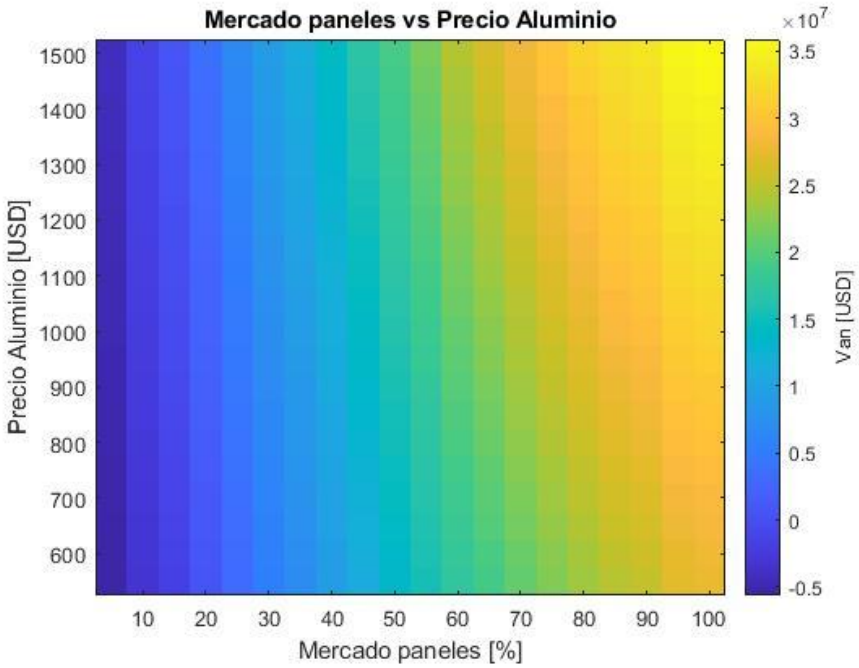

Figura C.8 Datos reales, sensibilización del proyecto en función del precio del Aluminio y el mercado de paneles.

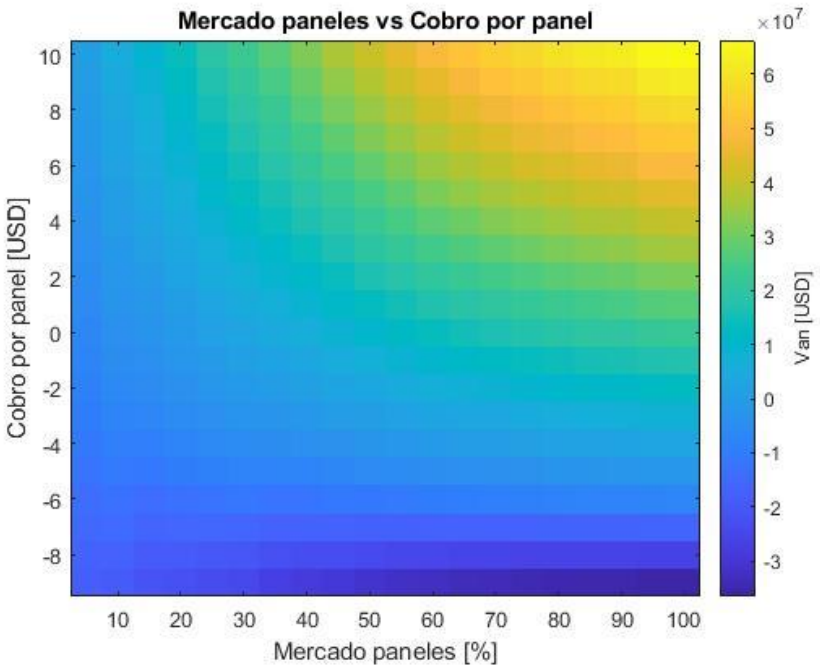

Figura C.9 Datos reales, sensibilización del proyecto en función del cobro por panel y el mercado de paneles.

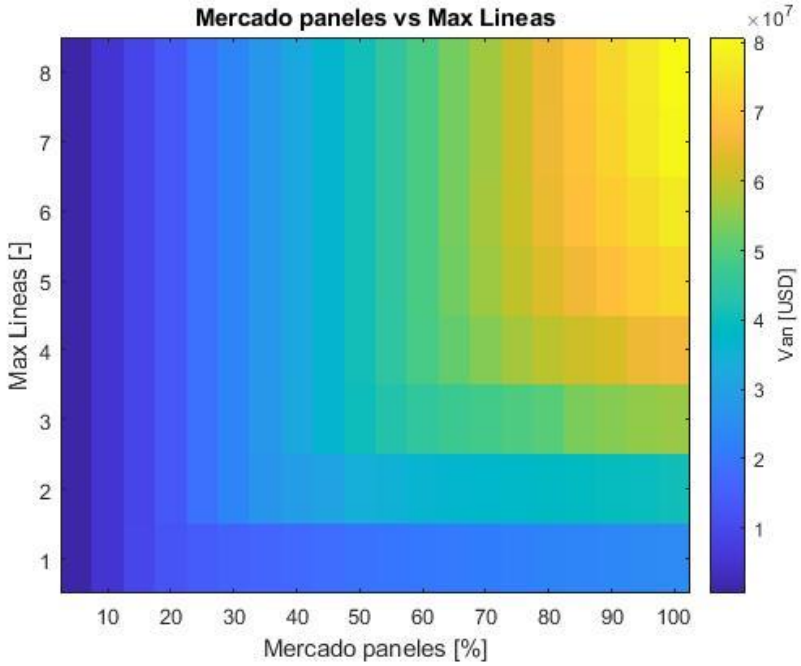

Figura C.10 Datos reales, sensibilización del proyecto en función del máximo de líneas y el mercado de paneles.

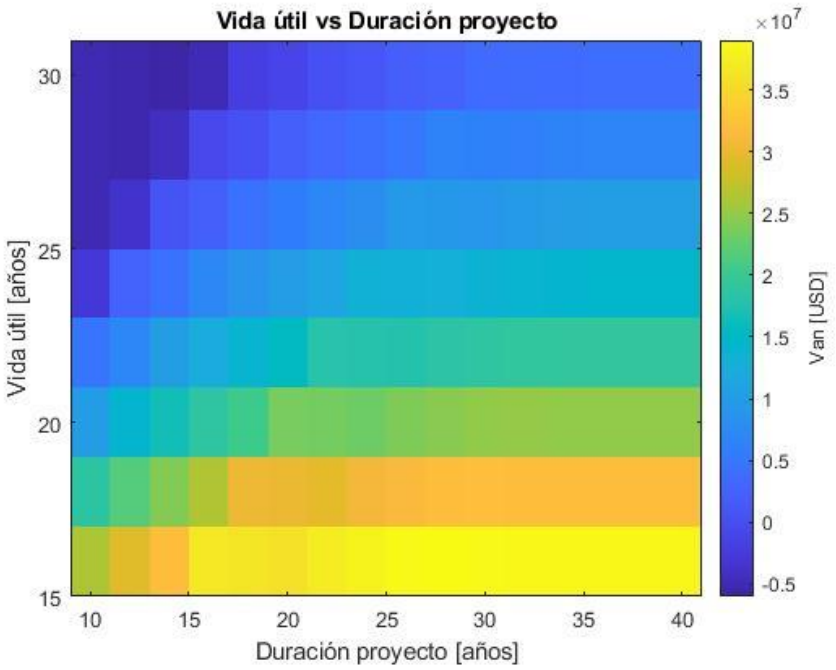

Figura C.11 Datos reales, sensibilización del proyecto en función de la vida útil de las plantas y la duración del proyecto.

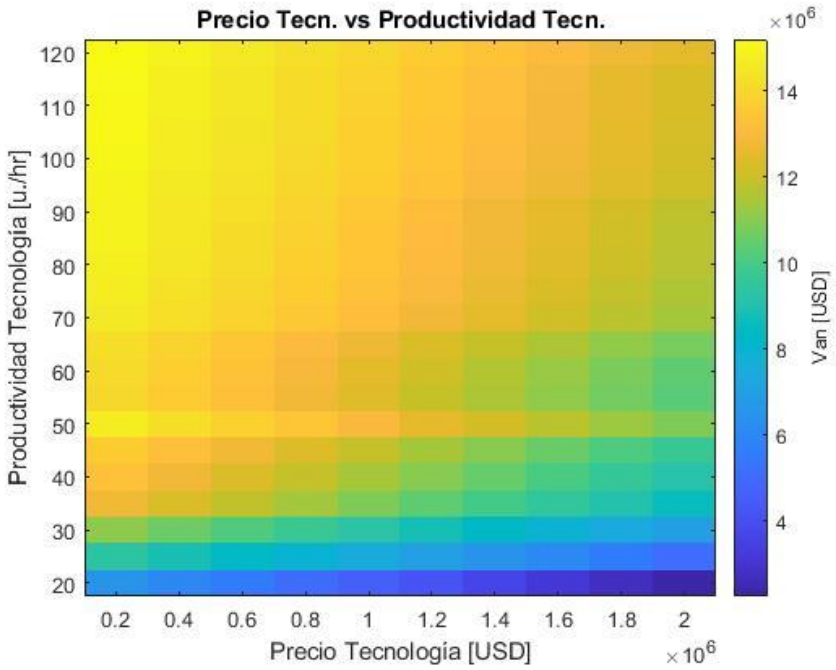

Figura C.12 Datos reales, sensibilización del proyecto en función de la productividad de la tecnología y el precio de la tecnología.

C.3 Ejemplo de flujo de caja

Flujo de caja para modo le falla Constante, con 40% del mercado, flujo medio de paneles para el año 2030. (Inversión no toma en cuenta el aporte bancario).

Flujo Medio	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
Inversion	-$ 2.813.813,63	-$ 472.862,50	-$ 489.885,55	-$ 505.338,25	-$ 522.802,70	-$ 541.623,60	-$ 532.013,05
Depresiacion	$ -	-$ 129.445,42	-$ 129.445,42	-$ 129.445,42	-$ 129.445,42	-$ 129.445,42	-$ 129.445,42
Prestamo	$ 1.688.288,18	$ 283.717,50	$ 293.931,33	$ 303.202,95	$ 313.681,62	$ 324.974,16	$ 319.207,83
Precio unitario reciclaje	$ 10,27	$ 10,27	$ 10,27	$ 10,27	$ 10,27	$ 10,27	$ 10,27
Unidades Recicladas	0	42818,3544	42818,3544	43043,3544	43118,3544	43118,3544	46118,3544
Ingresos	$ -	$ 439.744,50	$ 439.744,50	$ 442.055,25	$ 442.825,50	$ 442.825,50	$ 473.635,50
Costo Variable	-$ 0,57	-$ 0,57	-$ 0,57	-$ 0,57	-$ 0,57	-$ 0,57	-$ 0,57
Costo Fijo	$ -	-$ 787.031,70	-$ 787.031,70	-$ 787.031,70	-$ 787.031,70	-$ 787.031,70	-$ 787.031,70
Intereses	$ -	-$ 101.297,29	-$ 118.320,34	-$ 135.956,22	-$ 154.148,40	-$ 172.969,29	-$ 192.467,74
Costo total	$ -	-$ 912.607,00	-$ 929.630,05	-$ 947.393,50	-$ 965.628,20	-$ 984.449,10	-$ 1.005.648,55
Flujo Neto	$ -	-$ 472.862,50	-$ 489.885,55	-$ 505.338,25	-$ 522.802,70	-$ 541.623,60	-$ 532.013,05
Impuesto 27%	$ -	$ 162.623,14	$ 167.219,36	$ 171.391,59	$ 176.106,99	$ 181.188,63	$ 178.593,79
Remanente Impuesto	$ -	$ 162.623,14	$ 329.842,50	$ 501.234,09	$ 677.341,08	$ 858.529,72	$ 1.037.123,50
Impuesto aplicado	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -
Flujo Caja	-$ 1.125.525,45	-$ 662.007,50	-$ 685.839,77	-$ 707.473,55	-$ 731.923,79	-$ 758.273,04	-$ 744.818,27

2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044
-$ 540.249,65	-$ 543.688,68	$ -	-$ 3.280.200,00	$ -	$ -	$ -	$ -
-$ 129.445,42	-$ 129.445,42	-$ 129.445,42	-$ 129.445,42	-$ 331.712,08	-$ 331.712,08	-$ 331.712,08	-$ 331.712,08
$ 324.149,79	$ 326.213,21	$ -	$ 1.968.120,00	$ -	$ -	$ -	$ -
$ 10,27	$ 10,27	$ 10,27	$ 10,27	$ 10,27	$ 10,27	$ 10,27	$ 10,27
47243,3544	48893,3544	233989,6544	504000	1512000	1363152,195	610226,4748	441475,664
$ 485.189,25	$ 502.134,75	$ 2.403.073,75	$ 5.176.080,00	$ 15.528.240,00	$ 13.999.573,04	$ 6.267.025,90	$ 4.533.955,07
-$ 0,57	-$ 0,57	-$ 0,57	-$ 0,57	-$ 0,57	-$ 0,57	-$ 0,57	-$ 0,57
-$ 787.031,70	-$ 787.031,70	-$ 787.031,70	-$ 787.031,70	-$ 1.399.946,10	-$ 1.399.946,10	-$ 1.399.946,10	-$ 1.399.946,10
-$ 211.620,21	-$ 231.069,20	-$ 250.641,99	-$ 250.641,99	-$ 368.729,19	-$ 368.729,19	-$ 368.729,19	-$ 368.729,19
-$ 1.025.438,90	-$ 1.045.823,43	-$ 1.170.345,83	-$ 1.323.441,69	-$ 2.625.979,29	-$ 2.541.582,59	-$ 2.114.673,71	-$ 2.018.992,00
-$ 540.249,65	-$ 543.688,68	$ 1.232.727,92	$ 3.852.638,31	$ 12.902.260,71	$ 11.457.990,45	$ 4.152.352,19	$ 2.514.963,07
$ 180.817,67	$ 181.746,21	-$ 297.886,28	-$ 1.005.262,08	-$ 3.394.048,13	-$ 3.004.095,16	-$ 1.031.572,83	-$ 589.477,77
$ 1.217.941,17	$ 1.399.687,38	$ 1.101.801,10	$ 96.539,02	$ -	$ -	$ -	$ -
$ -	$ -	$ -	$ -	-$ 3.297.509,11	-$ 3.004.095,16	-$ 1.031.572,83	-$ 589.477,77
-$ 756.349,50	-$ 761.164,16	$ 1.232.727,92	$ 2.540.558,31	$ 9.604.751,60	$ 8.453.895,29	$ 3.120.779,36	$ 1.925.485,31

2045	2046	2047	2048	2049	2050	2051	2052
$ -	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -
-$ 331.712,08	-$ 216.245,42	-$ 216.245,42	-$ 216.245,42	-$ 216.245,42	-$ 216.245,42	-$ 216.245,42	-$ 216.245,42
$ -	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -
$ 10,27	$ 10,27	$ 10,27	$ 10,27	$ 10,27	$ 10,27	$ 10,27	$ 10,27
1512000	164550	37875	1425375	1120250	214850	29250	1512000
$ 15.528.240,00	$ 1.689.928,50	$ 388.976,25	$ 14.638.601,25	$ 11.504.967,50	$ 2.206.509,50	$ 300.397,50	$ 15.528.240,00
-$ 0,57	-$ 0,57	-$ 0,57	-$ 0,57	-$ 0,57	-$ 0,57	-$ 0,57	-$ 0,57
-$ 1.399.946,10	-$ 1.399.946,10	-$ 1.399.946,10	-$ 1.399.946,10	-$ 1.399.946,10	-$ 1.399.946,10	-$ 1.399.946,10	-$ 1.399.946,10
-$ 368.729,19	-$ 368.729,19	-$ 368.729,19	-$ 368.729,19	-$ 368.729,19	-$ 368.729,19	-$ 368.729,19	-$ 368.729,19
-$ 2.625.979,29	-$ 1.861.975,14	-$ 1.790.150,42	-$ 2.576.862,92	-$ 2.403.857,04	-$ 1.890.495,24	-$ 1.785.260,04	-$ 2.625.979,29
$ 12.902.260,71	-$ 172.046,64	-$ 1.401.174,17	$ 12.061.738,33	$ 9.101.110,46	$ 316.014,26	-$ 1.484.862,54	$ 12.902.260,71
-$ 3.394.048,13	$ 104.838,86	$ 436.703,29	-$ 3.198.283,09	-$ 2.398.913,56	-$ 26.937,59	$ 459.299,15	-$ 3.425.224,13
$ -	$ 104.838,86	$ 541.542,14	$ -	$ -	$ -	$ 459.299,15	$ -
-$ 3.394.048,13	$ -	$ -	-$ 2.656.740,94	-$ 2.398.913,56	-$ 26.937,59	$ -	-$ 2.965.924,98
$ 9.508.212,58	-$ 172.046,64	-$ 1.401.174,17	$ 9.404.997,39	$ 6.702.196,90	$ 289.076,67	-$ 1.484.862,54	$ 9.936.335,73

2053	2054	2055	2056	2057	2058	2059	2060
-$ 1.640.100,00	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -	$ 4.492.136,49
-$ 216.245,42	-$ 317.378,75	-$ 317.378,75	-$ 115.112,08	-$ 115.112,08	-$ 115.112,08	-$ 115.112,08	-$ 115.112,08
$ 984.060,00	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -	-$ 7.129.546,57
$ 10,27	$ 10,27	$ 10,27	$ 10,27	$ 10,27	$ 10,27	$ 10,27	$ 10,27
1107525	2016000	31200	83775	37300	14100	939100	0
$ 11.374.281,75	$ 20.704.320,00	$ 320.424,00	$ 860.369,25	$ 383.071,00	$ 144.807,00	$ 9.644.557,00	$ -
-$ 0,57	-$ 0,57	-$ 0,57	-$ 0,57	-$ 0,57	-$ 0,57	-$ 0,57	-$ 0,57
-$ 1.399.946,10	-$ 1.706.403,30	-$ 1.706.403,30	-$ 1.706.403,30	-$ 1.706.403,30	-$ 1.706.403,30	-$ 1.706.403,30	$ -
-$ 368.729,19	-$ 427.772,79	-$ 427.772,79	-$ 427.772,79	-$ 427.772,79	-$ 427.772,79	-$ 427.772,79	-$ 427.772,79
-$ 2.396.641,97	-$ 3.277.248,09	-$ 2.151.866,49	-$ 2.181.676,52	-$ 2.155.325,19	-$ 2.142.170,79	-$ 2.666.645,79	-$ 427.772,79
$ 8.977.639,78	$ 17.427.071,91	-$ 1.831.442,49	-$ 1.321.307,27	-$ 1.772.254,19	-$ 1.997.363,79	$ 6.977.911,21	$ 4.064.363,69
-$ 2.365.576,48	-$ 4.619.617,15	$ 580.181,74	$ 387.833,23	$ 509.588,89	$ 570.368,49	-$ 1.852.955,76	-$ 1.066.297,93
$ -	$ -	$ 580.181,74	$ 968.014,96	$ 1.477.603,86	$ 2.047.972,34	$ 195.016,58	$ -
-$ 2.365.576,48	-$ 4.619.617,15	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -	-$ 871.281,35
$ 5.956.023,30	$ 12.807.454,75	-$ 1.831.442,49	-$ 1.321.307,27	-$ 1.772.254,19	-$ 1.997.363,79	$ 6.977.911,21	-$ 3.936.464,23

Flujo Medio 2030 - 2060		
Van	$	11.451.377
Tir		22%
Roi		12 años
Inversión Total	-$	11.882.578

Figura C.13 Ejemplo de flujo de caja con sus indicadores económicos.