



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Propuesta de reducción de impacto
ambiental en una empresa de
ensamble de paneles solares**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera Industrial

P R E S E N T A

María Ximena Martínez Juárez

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Flor Hernández Padilla



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2021

Este trabajo se desarrolló en las instalaciones de Centro de Ingeniería Avanzada de la División de Ingeniería Mecánica e Industrial de la Facultad de Ingeniería.

Investigación realizada gracias al Programa de Apoyo de Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM, Proyecto “Soluciones Innovadoras y sustentables para casas y movilidad” IT10332.

Agradezco a DGAPA-UNAM por la beca recibida

También agradezco a las personas que me apoyaron e hicieron posible la realización de esta tesis:

A la Dra. Flor Hernández Padilla, por la orientación, paciencia, empatía y confianza que tuvo hacia mí desde el inicio de este proyecto, usted fue mi guía y apoyo durante todos los momentos complejos y situaciones que tuvimos que atravesar de forma paralela a este trabajo, sus enseñanzas de fortaleza quedarán en mí durante toda mi vida profesional.

Al Dr. Javier Noé Ávila Cedillo y al Dr. Vicente Borja Ramírez que fueron fundamentales para la realización de las visitas a la planta y que confiaron en mi capacidad en todo momento, proporcionándome un lugar en el proyecto y las herramientas necesarias para poder realizar el ACV aquí mostrado .

Así mismo, al Ing. Jorge Tenorio por formar parte de las visitas a la planta, permitiéndome con sus conocimientos, comprender mejor los procesos que observaba.

Agradecimientos

Agradezco a mi mamá por ser mi cuidadora, amiga, consejera y pilar principal durante toda mi vida, tú me llevaste, trajiste, te desvelaste y sufriste conmigo todos los momentos de estrés y frustración desde el kínder hasta la universidad e incluyendo la creación de esta tesis, además de estar en todas las alegrías y logros, me muestras tu amor en todas las situaciones y me inspiras todos los días a siempre a dar lo mejor de mí, te amo mamá y lo haré siempre.

Agradezco a mi papá por sus palabras de aliento, su apoyo y su amor interminable, gracias por la fe que tienes en mí y por tu esfuerzo que busca siempre darme lo mejor. Desde pequeña quise poder estar escribiendo estas palabras como una profesionalista para hacerte sentir orgulloso, eso dio las bases para que me dedicara a mis estudios y pudiera concluir esta etapa, ahora que estoy aquí me doy cuenta de que, en realidad, el verdadero privilegio es simplemente el ser tu hija. Te amo papá.

Mamá y papá: Este trabajo existe, gracias a los dos. La persona y profesionalista que soy ahora es gracias a ustedes, a la educación, ejemplo y valores que ambos me han proporcionado, mi deuda hacia ambos es infinita.

Quiero agradecer a mi hermano Miguel por ser “mi segundo papá”, fratello, sin duda el seguir tus pasos ha sido de las mejores decisiones que he tomado, gracias por el rol tan importante que tuviste que asumir para que yo pudiera estar aquí, gracias por las clases de matemáticas, la primera calculadora, la laptop nunca devuelta, los libros, por llevarme a CU y por recogerme en las noches, gracias por la confianza y las pláticas dramáticas, pero sobre todo, gracias por el ejemplo de profesionalista y persona a la que aspiro ser. Te quiero hermano, ¿Ya te dije que eres un hijo muy inteligente?

También quiero agradecer a “mi tercer papá”, mi hermano Carlos, quien si bien me olvidó en el kínder, fue durante mi infancia mi modelo a seguir favorito y de adulta eres la representación del amor de familia, gracias a ti aprendí a disfrutar de la lectura, aprendí que aprender es tan divertido como jugar y que nunca hay que dejar de hacerlo, aprendí de la paciencia hacia los niños, eres la persona que quiero ser cuando sea grande y eres precursor de que seamos 3 ingenieros por lo que gran parte de este logro es debido a ti, te quiero con todo mi ser.

Hermanito, gracias por haber llegado, seguro cuando leas esto, no te vas a acordar, pero yo llegaba de la universidad en las noches y verte me llenaba de alegría y energía, el amor tan inocente y profundo que representas es un motor muy grande para continuar pese a las

dificultades. Espero poder ser tu ejemplo y en un futuro leer mi nombre en tus agradecimientos de tesis. Te amo Isaac.

Eve, o bueno... Rosenda, sabes que, si mis hermanos son "mis otros papás", tú eres "mi otra mamá", gracias por ser mi amiga, por las anécdotas con vino, por el ejemplo tan grande de esfuerzo y fortaleza en situaciones difíciles, gracias porque estás en cada momento, bueno y malo.

Gracias por la empatía tan grande que has tenido conmigo y por esas noches de pláticas profundas que tanto han sido útiles para mi corazón.

Además de mi familia, agradezco a dos profesores que hicieron que mi tiempo en la universidad tuviera un antes y un después de conocerlos: Ing. Diego A. Fierro Nieto, como siempre lo he dicho, gracias por "lanzarme a los tiburones", sin ese impulso mi tiempo en la universidad hubiera sido completamente diferente, gracias por tu amistad y sólo quiero decir que espero algún día ser tan buena profesora como tú. Mtro. Omar Alejandro Llanes Briceño, sobra decir de nuevo todas las cosas que te agradezco así que sólo diré gracias por verme y creer en mí, gracias por pasar de ser mi profesor a mi mentor y luego mi amigo para terminar siendo como mi familia, mi deuda contigo es otra de las deudas infinitas que jamás podré terminar de pagar pero que pasaré mucho tiempo intentándolo.

Así mismo, agradezco a mis amigas y amigos, Alin, Moni, Vale y Yuri, chicas, su alegría, dramas y risas contagiosas, hacen que cualquier día malo se convierta en un día bueno, son una recarga de energía cada que nos vemos, las adoro; Chava, gracias por todo el apoyo y por estar para mí desde el inicio, te quiero mucho; Rodri, gracias por tu valiosa amistad y por el cariño tanto tuyo como de tu familia, gracias por aventarte el final de lineal conmigo y aprender a estudiar juntos, te quiero; Carlos, Chuy, Leo, María y Zorri, ustedes son todavía mi "dream team", gracias por todos los proyectos, fiestas y navidades, no me imagino la universidad sin ustedes. Luis, gracias por ser mi equipo desde electrónica y hasta la fecha, gracias por pasar conmigo todos los altibajos de este proyecto y por el respeto, cariño, empatía, honestidad y paciencia que me has demostrado, sabes el lugar que ocupas en mi corazón.

Finalmente, agradezco a Dios, por permitirme tener en mi vida a todas estas personas tan maravillosas y por todos los privilegios que me ha dado.

Contenido

Resumen	- 1 -
Introducción.....	- 3 -
Objetivo general	- 5 -
1. Marco teórico y Estado del arte.....	- 6 -
1.1. Energía en México	- 6 -
1.2. Energía solar en México, situación actual	- 10 -
1.2.1. Funcionamiento y ensamble de paneles solares.....	- 12 -
1.2.2. Problemáticas ambientales relacionadas	- 16 -
1.3. <i>Value Stream Mapping</i> (VSM).....	- 19 -
1.3.1. Objetivo de <i>Value Stream Mapping</i>	- 20 -
1.3.2. Alcances.....	- 20 -
1.3.3. Metodología para la construcción de <i>Value Stream Map</i> en planta.....	- 20 -
1.4. Otras herramientas análisis y mejora de procesos	- 23 -
1.5. Análisis de ciclo de vida (ACV)	- 27 -
1.5.1. Definición.....	- 27 -
1.5.2. Fases del ACV	- 28 -
1.5.3. Bases de datos y métodos.....	- 30 -
1.5.4. Software y Base de datos	- 31 -
1.6. Estado del arte del ACV y VSM aplicado a paneles solares	- 33 -
2. Planteamiento del problema y justificación	- 35 -
3. Metodología.....	- 36 -
3.1. Metodología para el Value Stream Map.....	- 37 -
3.1.1. Levantamiento de datos en planta	- 37 -
3.1.2. Definición de escenario base.....	- 38 -
3.1.3. Límites del sistema	- 39 -
3.1.4. Estudio de tiempos	- 39 -

3.2.	Metodología del Análisis de Ciclo de Vida	- 40 -
3.2.1.	Objetivo del ACV	- 40 -
3.2.2.	Metodología, Categorías de impacto y Unidad funcional.....	- 44 -
3.2.3.	Selección de librería Ecoinvent.	- 49 -
4.	Resultados de Value Stream Map base	- 50 -
4.1.	Layout de planta	- 50 -
4.2.	VSM base	- 51 -
5.	Inventario y evaluación del análisis de ciclo de vida de escenario base	- 59 -
5.1.	Inventario de ciclo de vida del escenario base.....	- 59 -
5.2.	Resultados de Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida	- 64 -
6.	Rediseño de proceso	- 85 -
6.1.	Técnicas de análisis de mejora de procesos	- 85 -
6.1.1.	VSM, AMFE, y Diagrama Ishikawa	- 85 -
6.2.	Herramientas de mejora de procesos	- 89 -
6.2.1.	SMED y POKA YOKE	- 89 -
6.3.	Planeación y control de producción	- 93 -
6.4.	Rediseño del proceso. VSM propuesto	- 94 -
7.	Inventario y evaluación del análisis de ciclo de vida del escenario propuesto	- 98 -
7.1.	Inventario de ciclo de vida de escenario propuesto	- 98 -
7.2.	Interpretación de resultados	- 100 -
8.	Discusión de resultados.....	- 118 -
9.	Conclusiones	- 138 -
	Anexos	- 140 -

Resumen

En los próximos años, se pronostica una mayor participación de la tecnología solar en la matriz de generación eléctrica en México, debido a la disminución de costos provocada por el desarrollo tecnológico, la apertura del mercado eléctrico, la comercialización de instrumentos que fomenten la inversión en Energías Limpias, así como la mayor competitividad en el mercado eléctrico (SENER, 2018). En este contexto es importante identificar los impactos asociados al ensamble de paneles solares en México, para ello en esta tesis se usa el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) ya que estudia los aspectos ambientales a lo largo de la vida de un producto, aunque el alcance en este trabajo es delimitado a ser desde la cuna hasta la puerta ya que no toma en cuenta los usos de los paneles ni su disposición final.

Se realizaron dos ACV, el primero es en un escenario base, que es definido por medio de visitas a una empresa de ensamble de paneles solares y el segundo es definido por las propuestas de mejora de procesos que se generaron respecto al escenario base, usando la herramienta de *Value Stream Map* (VSM) como principal recurso para el reconocimiento de áreas de oportunidad en dichos procesos. En ambos ACV se utiliza la metodología ReCiPe V1.13 y se calculan los impactos para las categorías de Cambio Climático (GWP20), Ecotoxicidad terrestre, Ecotoxicidad de agua dulce, Agotamiento del ozono, Toxicidad humana, Uso de suelo urbano, Uso de suelo de agricultura, Acidificación terrestre, Creación fotoquímica de oxidantes y Material Particulado, también se debe mencionar que el objeto de estudio en ambos análisis está enfocado a la ensamble de paneles solares monocristalinos con tecnología PERC, de 380W y que la unidad funcional está definida como 1m² de panel solar.

Los resultados del análisis del VSM mostraron que el proceso presentaba 3 cuellos de botella importantes en los procesos de soldadura de celdas, inspección y prueba de simulación solar, también se mostró que había una existencia considerable de inventario antes de los procesos de ensamble final y embalaje, además se comprobó que con las condiciones y tiempos de ese escenario base no era posible suplir la demanda de paneles monoPERC 380W, por lo que la empresa debía adquirir paneles extranjeros para completar la demanda. Al someter el escenario base a la EICV, se identificó que la producción de materia prima, especialmente celdas solares era el proceso con mayor impacto en las categorías, representando en promedio el 59.73% del impacto total, dicho impacto no podía ser modificado ya que las propuestas se basaron en los procesos que realizaba la planta de ensamble y en este caso, las celdas eran importadas.

En consecuencia, la propuesta general de modificación del proceso versó en aquellas enfocadas a la eliminación de los cuellos de botella, buscando conseguir que se eliminara la

necesidad de importar paneles, mientras que también se buscó la reducción de inventario, disminución del consumo energético y uso de suelo en la fábrica, basado en esto, se modificó el VSM , creando así un escenario propuesto que permitió adecuar el inventario de ciclo de vida (ICV) del escenario base para que reflejase los resultados de haber aplicado las mejoras.

Finalmente, al realizar la EICV se detectó que, en las 11 categorías escogidas existió una disminución del impacto ambiental, asociado a la unidad funcional y que el Lead Time del proceso disminuyó considerablemente, por lo que se considera que el escenario propuesto es mejor que el base ya que no sólo implica una mejora en la eficiencia de los procesos si no también en el impacto ambiental.

Introducción

En México, la energía solar está tomando un papel cada vez más importante y para el 2030 se espera que tanto la energía eólica y solar fotovoltaica combinadas representen casi el 60% de la generación de energía renovable de México, y el 26% de la generación total (IRENA, 2015). Sin embargo, este tipo de energía que es considerada limpia, podría generar impactos ambientales que no deben ser ignorados entonces surge la pregunta ¿Es posible realizar una disminución de impactos ambientales al aplicar herramientas de manufactura esbelta para la mejora en la eficiencia del proceso?

Esta tesis se enfoca en analizar la posible correlación entre el aumento de la eficiencia del proceso y la disminución de sus cargas ambientales. Fueron analizados: un escenario base actual y un escenario propuesto basado en la optimización del proceso mediante los principios de Manufactura Esbelta.

El estudio de campo se desarrolló en una empresa que tiene relaciones comerciales muy estrechas con China para la adquisición de insumos, por lo que el transporte de las materias primas juega un rol importante. Gracias al marco consistente y estandarizado de la herramienta de evaluación de impacto ambiental llamada Análisis de Ciclo de Vida (ACV), junto con el uso de la base de datos Ecoinvent y el software OpenLCA, se definió el escenario base cuantificando el impacto ambiental asociado al ensamblaje de estos paneles y se generó un *Value Stream Map* (VSM) de dicho escenario. Posteriormente, por medio herramientas de mejora de procesos de Manufactura Esbelta, fue desarrollado un escenario propuesto que buscaba ser más eficiente, el cual subsecuentemente fue sometido a un ACV con la finalidad de comprobar si existe o no una correlación entre la optimización de procesos y la reducción del impacto ambiental asociado al ensamble de estos paneles solares.

Resumen capitular

En el capítulo *1- Marco teórico y estado del arte*, se proporciona un panorama general para comprender el desarrollo del estudio, iniciando desde la perspectiva de la energía en México, con enfoque en la energía solar y su funcionamiento, seguido de la descripción de Manufactura Esbelta y sus herramientas de mejora de procesos, entre ellas el *Value Stream Map*. Por otro lado se presenta la metodología y utilidad del Análisis de Ciclo de Vida, para estudiar el impacto ambiental de este tipo de tecnologías.

En el capítulo *2- Planteamiento del problema y justificación*, se da a conocer un poco más sobre las motivaciones detrás de la creación de este estudio.

En el capítulo 3- *Metodología*, se presentan los métodos y el procedimiento seguido tanto para el levantamiento de VSM en la planta como para la creación del ACV que establece el escenario base para el desarrollo del resto de este estudio.

En los capítulos 4- *Resultados de Value Stream Map base* y 5- *Resultados de inventario y EICV del escenario base*, se desarrollan las aplicaciones de VSM y ACV para identificar las áreas de oportunidad en el proceso y los impactos ambientales asociados a este, en 11 categorías de punto medio.

En el capítulo 6- *Rediseño de proceso*, se presentan las ideas y propuestas que buscan atender las problemáticas encontradas en el capítulo 4, y se muestra un VSM propuesto con las mejoras aplicadas.

En el capítulo 7- *Inventario y evaluación del análisis de ciclo de vida de escenario propuesto*, se modifican las características del inventario de ciclo de vida del escenario base para que reflejen las mejoras asociadas al capítulo anterior y se muestran los resultados obtenidos.

En los capítulos 8- *Discusión de resultados* y 9- *Conclusiones*, se comparan los resultados obtenidos y se presentan los juicios finales del trabajo.

Objetivo general

Realizar una propuesta para la reducción de impacto ambiental mediante las herramientas *Value Stream Map* (VSM) base y propuesto del proceso de ensamble de paneles solares en una empresa, así como la aplicación del Análisis de Ciclo de Vida (ACV), con la finalidad de comprobar si existe o no una correlación entre la optimización de procesos y la reducción de dicho impacto.

Objetivos específicos

- Obtener y recolectar datos referentes al proceso de ensamble de módulos solares monoPERC de 380 [W], en el sitio.
- Elaborar un mapa de proceso usando la herramienta *Value Stream Mapping* (VSM) del escenario base del proceso de ensamble, con la información obtenida.
- Desarrollar un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) del escenario base del proceso bajo las condiciones observadas en los pasos previos para determinar el impacto ambiental generado.
- Analizar el VSM y el ACV realizados para la definición de la problemática a corregir.
- Proponer alternativas de solución y adecuaciones basadas en técnicas y herramientas de Manufactura Esbelta para la mejora de procesos.
- Generar un escenario propuesto del proceso aplicando las mejoras sugeridas para visualizar los efectos a la problemática mediante un VSM.
- Efectuar un ACV a partir del escenario propuesto para identificar el efecto de las mejoras en el desempeño ambiental del proceso.

1. Marco teórico y Estado del arte

Con la finalidad de proporcionar un panorama amplio respecto al trabajo que realiza esta tesis, se proporcionará contexto sobre la energía en México, después se realizará un enfoque en la energía solar y los análisis ambientales que se han realizado a dicha tecnología, para, realizar un salto hacia las herramientas de la Manufactura Esbelta y para el rediseño de un proceso de ensamble de paneles solares.

1.1. Energía en México

La energía es un insumo primario para la realización de actividades productivas, de transformación y servicios en el país. De 2005 a 2015, la industria eléctrica (generación, transmisión y distribución) alcanzó una participación promedio de 1.2% en el PIB nacional y de 3.6% en la actividad industrial (SENER, 2015). El crecimiento de la demanda y el consumo de electricidad están sujetos a diversos factores, entre los más determinantes se encuentran el crecimiento económico, crecimiento poblacional, estacionalidad, precio de la electricidad y combustibles, pérdidas de energía eléctrica y eficiencia energética (SENER, 2019).

México, a nivel mundial se posicionó en el periodo 2018-2019 como el lugar 81 de 141 economías, por la calidad de suministro de energía eléctrica (Foro Económico Mundial (WEF) & Scwab, 2019); en materia de generación de electricidad se encuentra en el sitio 106 de 190 países (Banco Mundial, 2019). Respecto a energías limpias, en 2020 ocupa la posición 24 de las 40 economías con mayor atractivo para inversiones en este tipo de energía (Ernst & Young, 2020). El 17 de febrero de 2018 se convirtió de forma oficial en el miembro 30 y primer país de América Latina que formó parte de la Agencia Internacional de Energía (SENER, 2018). Después de la Reforma Energética de 2013 hasta el año 2019 el costo de la energía eólica y solar disminuyó. De acuerdo a la evaluación de las condiciones de inversión para energía limpia en economías emergentes de Climatescope publicado por Boomborg en 2019, las oportunidades comerciales de inversión internacional en México, enfocadas en energía renovable, esperaban enfrentar mayor incertidumbre y no alcanzar la cifra de inversión realizada en 2018 (2.31 USD bn) con la elección del presidente López Obrador en diciembre de ese año y ante la cancelación de las subastas eléctricas en 2019 (Bloomberg New Energy Finance, 2019) , sin embargo se registró en 2019 una inversión extranjera de 2.97 USD bn, lo que representa un aumento del 28.57% respecto a la inversión atraída en 2018 (BloombergNEF, 2020) .

El Sistema Eléctrico Nacional (SEN) está conformado por 1 sistema eléctrico aislado (Sistema Mulegé) y nueve regiones de control, estas son:

1. Central (CEL), que abarca a los estados de CDMX, Guerrero, Hidalgo, Estado de México, Michoacán, Morelos y Puebla;

2. Oriental (ORI), que incluye Chiapas, Guerrero, Hidalgo, Morelos, Oaxaca, Puebla, Tabasco, Tlaxcala y Veracruz;
3. Occidental (OCC), que engloba los estados de Aguascalientes, Colima, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, Nayarit, Querétaro, San Luis Potosí y Zacatecas;
4. Noroeste (NOR), que abarca a Sinaloa y Sonora;
5. Norte (NTE) que incluye los estados de Chihuahua, Coahuila y Durango;
6. Noreste (NES), que engloba a Coahuila, Nuevo León, San Luis Potosí, Tamaulipas, Veracruz y Zacatecas;
7. Baja California (BC)
8. Peninsular (PEN) que incluye a Campeche, Quintana Roo, Tabasco y Yucatán.
9. Baja California sur (BCS)

Se muestran todas las regiones de control en la Fig.1.



Fig. 1: Mapa de regiones de control del SEN y Sistema Mulegé (SENER, 2021)

En 2020, el consumo bruto nacional del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) registró 315,958 GWh, lo que significa una disminución de 2.76% respecto al consumo de 2019 con 324,927 GWh (SENER, 2021). En la Tabla 1 se muestra el consumo bruto por regiones de control para los años 2019 y 2020 además de en qué porcentaje incrementó o disminuyó este consumo al comparar ambos años y la capacidad instala en 2020. Gracias a esta tabla podemos identificar que las regiones con mayor consumo son la Occidental (21.45% del total en 2020) y la Central (18.72% del total en 2020).

Tabla 1: Consumo bruto por región 2019, Consumo bruto y Capacidad instalada por región de control 2020.

Región	2019	2020		Incremento de consumo bruto
	Consumo Bruto [GWh]	Consumo Bruto [GWh]	Capacidad instalada [MW]	%
Central	60,853	57,429	221	-5.6

Oriental	51,655	50,436	113	-2.4
Occidental	69,697	68,154	459	-2.2
Noroeste	24,966	26,104	81	4.6
Norte	28,868	29,291	133	1.5
Noreste	57,418	54,239	225	-5.5
Baja California	14,621	14,938	48	2.2
Peninsular	13,872	12,497	85	-9.9
Baja California Sur	2,823	2,722	22	-3.6
Sistema Mulegé	155	159	1	2.6
Total	324,927	315,968	1,388	-2.8

Fuente: Adaptado de SENER (2021)

Existen dos grandes grupos de tecnologías de generación de energía en México, estos son las tecnologías convencionales y las energías limpias, sus características se pueden ver en la Fig.2. Dentro de esos grupos se reparten los tipos de energía: Ciclo combinado, Termoeléctrica convencional, Carboeléctrica, Lecho Fluidizado, Turbogás, Combustión interna, Hidroeléctrica, Nucleoeléctrica, Eólica, Geotérmica, Solar, Cogeneración eficiente, Bioenergía y Frenos Regenerativos (SENER, 2015).

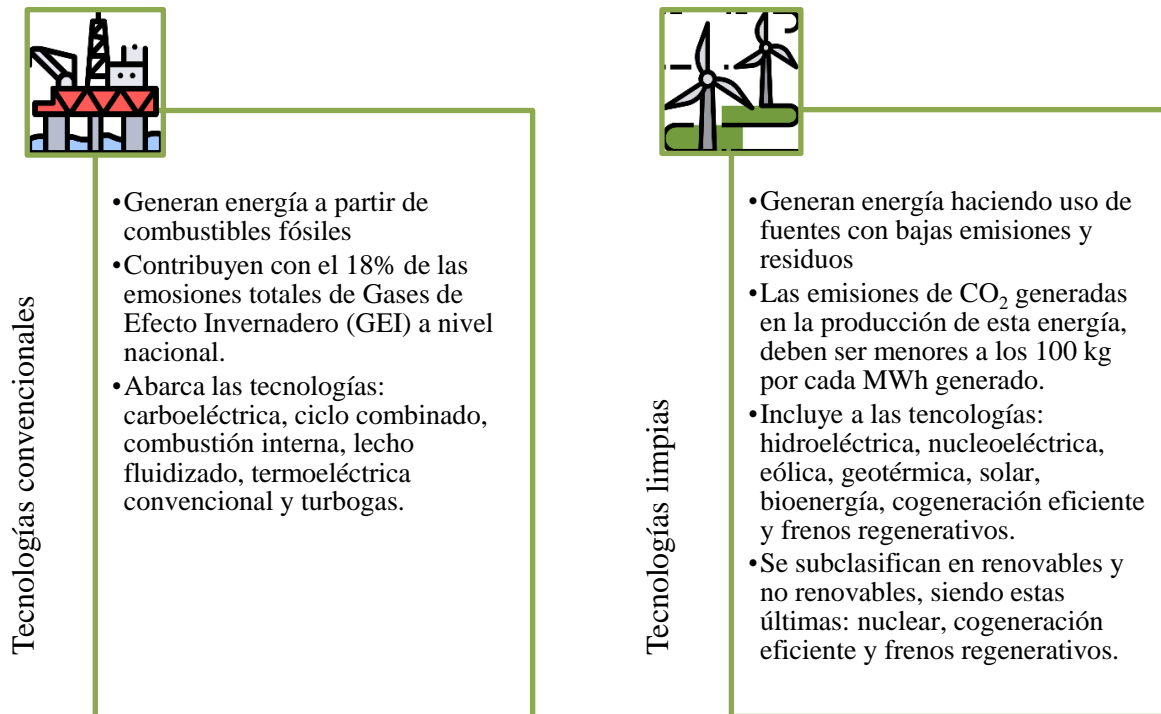


Fig. 2: Grupos de tecnologías de generación eléctrica en México.
Fuente: Adaptado de SENER (2015) con información de SENER (2021)

Al año 2021, en México predomina la generación eléctrica a partir de ciclos combinados (SENER, 2021), en el 2017 existían 83 centrales eléctricas de ciclo combinado con una capacidad instalada equivalente al 37.11% de la capacidad instalada nacional y una generación equivalente al 50.20% de la generación nacional de energía (SENER, 2018), en

el 2018, esta misma tecnología representó el 51.0% de la generación (SENER, 2019) y a lo largo de los últimos 3 años se ha mantenido como la fuente principal, con un porcentaje creciente de capacidad instalada, como puede verse en la Tabla 2, donde se presenta la capacidad instalada en el SEN por los principales tipos de tecnología para 2019, 2020 y 2021.

Tabla 2: Capacidad instalada SEN, por tipo de tecnología para 2019, 2020 y 2021.

Tipo de generación	Capacidad instalada 2019		Capacidad instalada 2020		Capacidad instalada 2021 ¹		
	MW	%	MW	%	MW	%	
Tecnologías convencionales	Ciclo combinado	30,402	38.76%	31,948	38.44%	35,060	39.18%
	Termoeléctrica convencional ²	11,831	15.08%	11,809	14.21%	11,809	13.20%
	Carboeléctrica	5,463	6.96%	5,463	6.57%	5,463	6.11%
	Turbogás	2,960	3.77%	3,545	4.26%	3,781	4.23%
	Combustión interna	891	1.14%	850	1.02%	734	0.82%
Tecnologías limpias	Hidroeléctrica	12,612	16.08%	12,612	15.17%	12,614	14.10%
	Nucleoeléctrica	1,608	2.05%	1,608	1.93%	1,608	1.80%
	Eólica	6,050	7.71%	6,504	7.82%	7,691	8.60%
	Geotérmica	899	1.15%	951	1.14%	976	1.09%
	Solar	3,636	4.64%	5,149	6.19%	7,026	7.85%
	Bioenergía	375	0.48%	378	0.45%	408	0.46%
	Cogeneración eficiente	1,710	2.18%	2,305	2.77%	2,309	2.58%
	Frenos regenerativos	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%
Total: convencionales	51,547	65.72%	53,615	64.50%	56,847	63.53%	
Total: limpias	26,890	34.28%	29,507	35.50%	32,632	36.47%	
Total	78,437	100.00%	83,122	100.00%	89,479	100.00%	

Fuente: Adaptado de SENER (2021)

1. Actualizado hasta el 30 de abril de 2021

2. Incluye lecho fluidizado

La participación de las energías limpias va en aumento como se puede apreciar en la Tabla 2, siendo únicamente la tecnología de cogeneración eficiente aquella que va aumentando su participación y cuya fuente es no renovable, por otro lado en el año 2020, la capacidad instalada de las centrales eléctricas de energía limpia renovable fue de 25,594 MW, y al 30 de abril de 2021 se tiene 28,714 MW; un incremento del 12.19% con respecto al 2020. Siendo las Centrales Eléctricas con Energía Limpia Intermitente eólicas y solares fotovoltaicas las principales fuentes de tal incremento, considerando las Centrales Eléctricas en operación y en pruebas (SENER, 2021).

Para complementar el panorama, se muestra en la Figura 3 el mix energético de generación de energía en México durante los años 2017, 2018, 2019, 2020 y 2021 (enero-abril), por tipo de tecnología.

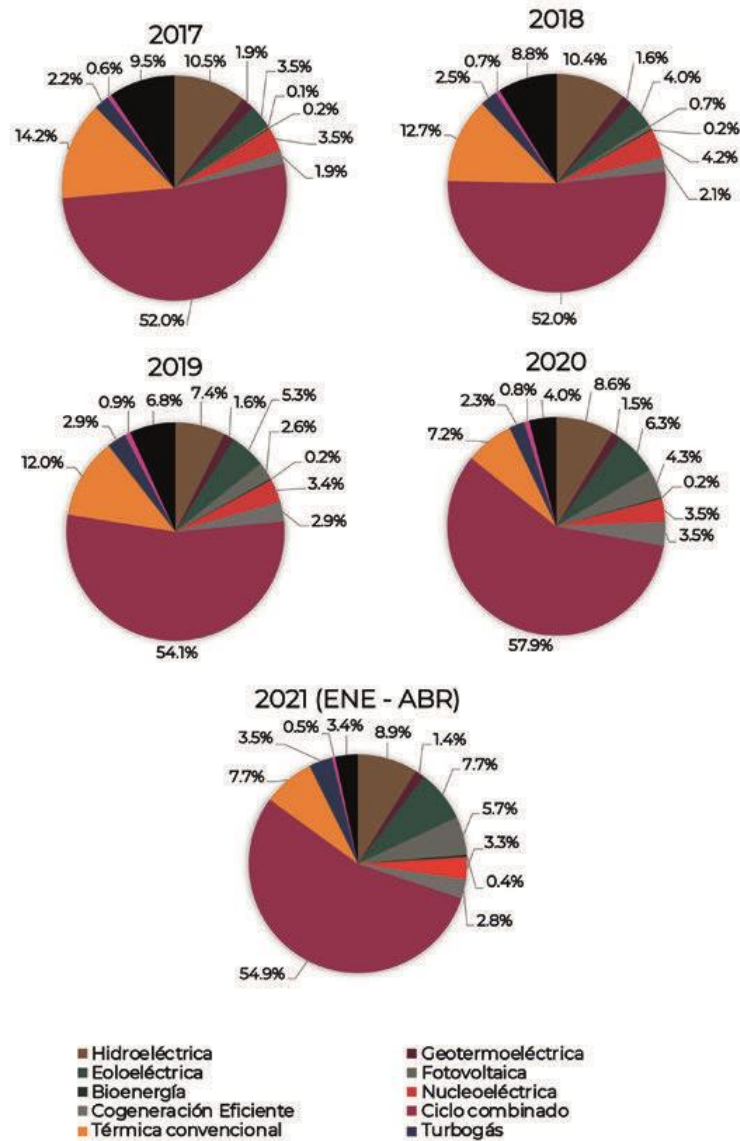


Fig. 3: Mix energético de México en 5 años, por tipo de tecnología
Fuente: Tomado de SENER (2021)

1.2. Energía solar en México, situación actual

La energía solar consiste en la conversión de la luz solar en electricidad por medio de un dispositivo semiconductor (celdas fotovoltaicas) o bien, mediante concentradores solares que elevan la temperatura de un fluido que pasa a una turbina conectada a un generador para producir electricidad (SENER, 2018).

La energía solar fotovoltaica (FV) es una tecnología que no requiere el uso de combustibles, por lo que puede ser utilizada cerca de los centros de consumo reduciendo la congestión del sistema eléctrico. Su dependencia del recurso solar provoca intermitencia en la generación, no obstante, la disponibilidad del recurso es altamente predecible respecto a la energía eólica,

con auxilio de tecnologías de pronóstico existentes (SENER, 2018). Las energías eólicas y solar representaron el 90% de la capacidad renovable recientemente adicionada en el mundo y como ejemplo de ello, tenemos que la capacidad instalada de energía solar en México ha aumentado de 0.8 MW en 2010 a 1,388 MW en 2020 (SENER, 2021), como se muestra en la Fig 4.

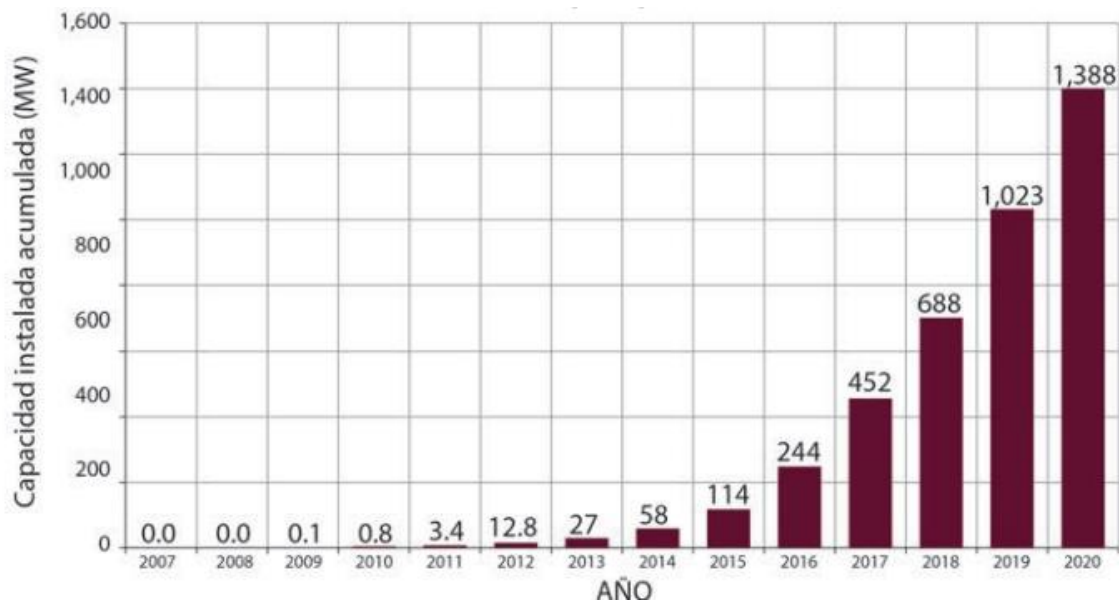


Fig. 4: Evolución de la capacidad instalada de los sistemas fotovoltaicos 2017-2020
Fuente: Obtenida de SENER (2021)

En los próximos años, se pronostica una mayor participación de esta tecnología en la matriz de generación en México, debido a la disminución de costos provocada por el desarrollo tecnológico, la apertura del mercado eléctrico, la comercialización de instrumentos que fomenten la inversión en Energías Limpias, así como la mayor competitividad en el mercado eléctrico (SENER, 2018) y para el 2030 se espera que tanto la energía eólica y solar fotovoltaica combinadas representen casi el 60% de la generación de energía renovable de México, y el 26% de la generación total. (IRENA, 2015). Se pronostica que de abril de 2021 a diciembre de 2024, México adicione un 24.78% de capacidad instalada de energía solar, respecto a la que se tiene actualmente, de acuerdo con lo proyectado en el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2021 (SENER, 2021), con esto se tendría una capacidad instalada de 8,767 MW en 2024.

Por otro lado, de acuerdo con el Atlas Nacional de Zonas con Alto Potencial de Energías Limpias (AZEL), las regiones con mayor calidad energía solar, es decir, en las que el recurso es bueno para su aprovechamiento en la producción de electricidad son Norte, Occidental, Central y Oriental, más específicamente los estados de Durango, Zacatecas, San Luis Potosí, Aguascalientes, Jalisco, Guanajuato y Estado de México (SENER, 2016).

En México, la energía solar fotovoltaica hubiera podido aportar 30 GW de capacidad de energía, generando 66 TWh de electricidad por año en 2030, pero para lograr esto se hubiera requerido de una tasa de instalación anual promedio de 1,5 GW, desde 2015 (IRENA, 2015). Además, las tecnologías de energía renovable (entre ellas la solar), aún deben superar las limitaciones técnicas que les impiden convertirse en la principal fuente de energía en el

futuro, por ejemplo, con la tecnología actual, la infraestructura de electricidad renovable requiere significativamente más tierra y materiales que las plantas de energía de combustibles fósiles para producir la misma producción: para producir 1 MWh de energía, las plantas de combustibles fósiles requieren solo 0,4 metros cuadrados de terreno, mientras que las granjas solares 10 metros cuadrados (25 veces más) (Fritsche, Cowie, & Johnson, 2017). Entonces para suministrar los 315,968,000 MWh de energía total que requiere el país al año, se necesita un área de: 3,159.68 km² de terreno, es decir alrededor de 2.13 veces la superficie de la CDMX. Es importante mencionar también que de acuerdo con la SENER, se estima que cada granja solar colocada tendrá 30 años de vida útil (SENER, 2018).

Finalmente, a nivel mundial, México ocupa el lugar 12 de 40 economías, en qué tan atractiva es la inversión en energía solar fotovoltaica en este país en 2020 (Ernst & Young, 2020), y se estima que el periodo entre 2014 y 2018, destinó 13.2 miles de millones de dólares al desarrollo de esta tecnología, de ese porcentaje, alrededor del 64% fue de capital extranjero (Bloomberg New Energy Finance, 2019).

1.2.1. Funcionamiento y ensamble de paneles solares.

El Sol es una estrella que emite energía electromagnética, la Tierra recibe una fracción muy pequeña del total de esta radiación solar emitida, cuando esta fracción viaja por el espacio, llega a la Tierra, atraviesa la atmósfera e incide sobre la superficie terrestre con cierta inclinación e intensidad. Es gracias al efecto fotovoltaico que puede ser percibida por un módulo (o panel) fotovoltaico que, al estar conectado a un sistema fotovoltaico, permite la generación de energía (Martínez Gómez, 2017).

El efecto fotovoltaico; convierte la energía luminosa que transportan los fotones de luz expedidos por el sol, en energía eléctrica capaz de impulsar los electrones despedidos de un material semiconductor a través de un circuito exterior (Fernández, 2010). Este efecto fue observado por primera vez en 1839 por Alexandre-Edmond Becquerel. Sin embargo, la primera celda solar fue fabricada hasta 1954 y era de silicio (Tous, 2010).

El principio de funcionamiento de las celdas fotovoltaicas se basa en la propiedad que tienen los semiconductores de que la energía que liga a los electrones de valencia (los de mayor energía) al núcleo es similar a la energía que poseen los fotones de la luz solar. Entonces, cuando la luz solar incide sobre el material semiconductor, sus fotones proporcionan la energía necesaria a los electrones de valencia para romper sus enlaces y queden libres para así propagarse por el material (Martínez Gómez, 2017).

Una celda fotovoltaica es fabricada con un semiconductor tipo “p” y uno tipo “n”. La región “p” actúa impidiendo el paso de electrones, la región “n” actúa como contacto selectivo para los electrones. Para lograr que el silicio forme un material tipo “p” y “n”, se deben agregar impurezas al material, esto se llama dopaje. En el caso del semiconductor tipo “p” al silicio se le agregan impurezas de boro pues le falta un electrón en su banda de valencia al tener

sólo 3 electrones, esto forma un hueco que actúa como una partícula cargada positivamente, creando una corriente positiva; en el caso del semiconductor tipo “n” el silicio es dopado con fósforo, dado que tiene 5 electrones en la capa exterior, 1 electrón queda libre y da como resultado, una corriente negativa (Bekkelund, 2013).

Cuando los fotones emitidos por el sol son absorbidos por los semiconductores, se generan pares de portadores de carga eléctrica, que viajan bajo un gradiente de concentración donde son separados por efecto del campo eléctrico, este campo se acumula hasta que no es posible que las partículas cargadas se muevan en las superficies del dispositivo, dando como resultado un voltaje que se puede medir externamente (Martínez Gómez, 2017).

Los módulos fotovoltaicos están formados por la interconexión y encapsulación de células fotovoltaicas que pueden ser de varios tipos, las más usadas son las de silicio cristalino. Existen dos tipos de celdas de silicio cristalino: monocristalinas y policristalinas. En las primeras, todos los átomos de silicio están perfectamente ordenados formando un solo cristal y su rendimiento varía entre 14 y 17%. Las segundas están formadas por la agrupación de pequeños cristales que no se unen de forma ordenada, el rendimiento es menor, oscilando entre 12 y 14%, pero son más baratas (Jutglar , 2012). Este tipo de tecnología representa el 95% del mercado de celdas solares (Siddiqui, Pant, Saxena, & Chandril, 2019) .

La eficiencia de las células solares es la clave para la reducción continua de los costos fotovoltaicos, por décadas cerca del 90% de la producción global de celdas solares, ha sido realizada con el diseño de campo superficial posterior, de aluminio (Al-BSF) (Blakers, 2019), pero buscando superar una eficiencia de 20% en las celdas de silicio cristalino, la tecnología de celdas Emisor Pasivado y Celda Posterior (PERC por sus siglas en inglés), se volvió tendencia en los últimos 5 años y se esperaba que para 2020 representara el 50% de todas las celdas de silicio cristalino usadas en la industria. La diferencia entre una celda Al-BSF y una PERC es que en el lado posterior, la PERC tiene una lámina dieléctrica de aproximadamente 100 nm de espesor que consta de capas de AlOX (óxido de aluminio) y SiNx (nitruro de silicio) (Siddiqui, Pant, Saxena, & Chandril, 2019), y las mayores ventajas de esto son la reducción de la recombinación de portadores de carga en la superficie trasera y una reflectividad mejorada (Blakers, 2019). En la Fig. 5 se muestra un esquema de celda PERC y Al-BSF.

Las celdas solares son extremadamente delgadas y frágiles, por lo que en un panel PV, a fin de protegerlas y dar solidez al conjunto, se encapsulan en un material plástico. El conjunto se protege de los agentes exteriores y fenómenos atmosféricos mediante una cubierta de vidrio en la cara que debe recibir la luz solar. A fin de proporcionar puntos de anclaje y ubicar la conexión eléctrica con el exterior, el conjunto se instala dentro de un marco metálico (Jutglar , 2012). La Fig. 6 muestra un esquema ilustrativo de un panel con las características propias de los paneles en los que se enfoca esta tesis.

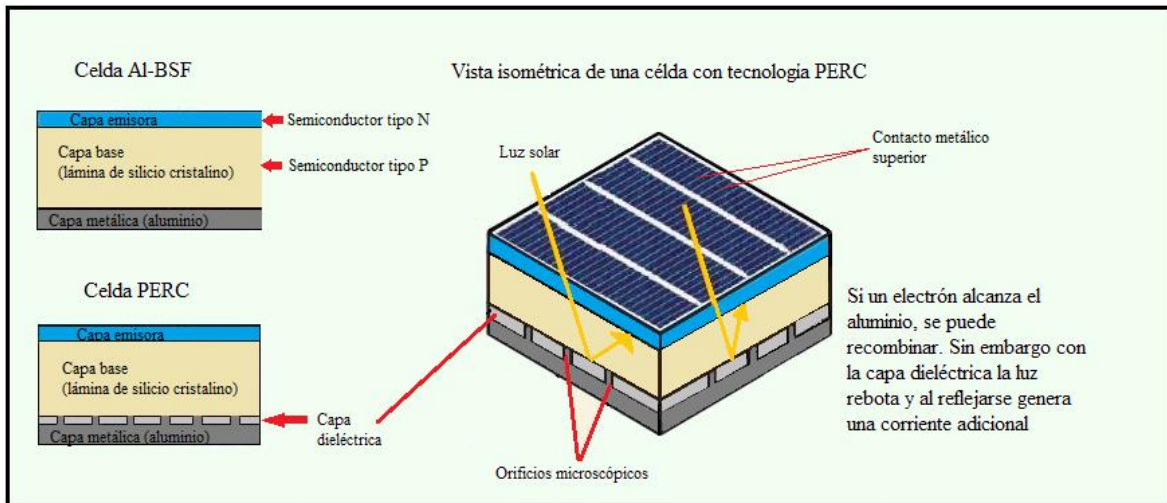


Fig. 5: Diferencia entre celdas convencionales Al-BSF y PERC
 Fuente: Adaptado de Renewable Energy Magazine (2014)

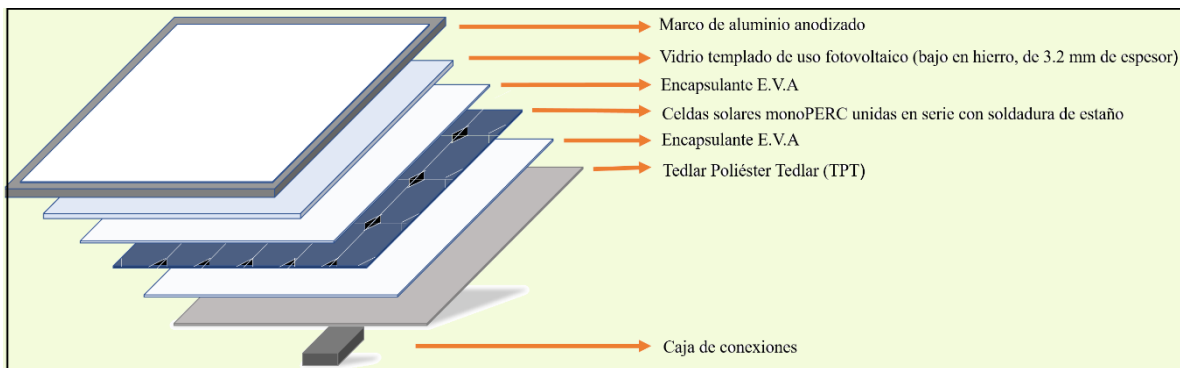


Fig. 6: Esquema de panel solar fotovoltaico
 Fuente: Adaptado de Secretaría de Energía Argentina (2019)

El proceso de producción de paneles fotovoltaicos inicia con la obtención de cuarzo para la formación de silicio, este último se genera por medio de un proceso electrometalúrgico realizado en un horno eléctrico de muy alta temperatura donde se mezcla el cuarzo con carbón y madera, al finalizar este proceso el silicio tiene un porcentaje de pureza de 99% por lo que se requiere una purificación posterior pues en la industria fotovoltaica se usa silicio 99.999% puro (Partouche, 2012), para realizar esto se deben eliminar por pirolisis los gases obtenidos en el paso anterior: triclorosilano (SiHCl_3) y silano (SiH_4) (Matsumoto, 2011), el silicio resultante se deposita y se obtienen pepitas de silicio policristalino (Partouche, 2012).

Existen dos métodos para generar el aumento de tamaño de las pepitas obtenidas y obtener lingotes de silicio monocristalino: el método de Czochralski y el de zona flotante (siendo este el más frecuente), los lingotes que se obtienen tienen diámetros de 10 a 15 cm. (Matsumoto, 2011). A los lingotes se les da una forma cuadrangular con esquinas chatas y los extremos, que son ricos en impurezas e imperfecciones, son eliminados (Partouche, 2012). El corte para obtener las celdas se realiza mediante el uso de disco con abrasivos de diamante, las celdas

obtenidas oscilan de 9.4 a 0.5 mm de espesor y al tener daños inducidos durante el corte, son químicamente pulidas o texturizadas mediante sustancias ácidas como HNO_3 o alcalinas como KOH en agua. Una vez realizado lo anterior, se genera la formación de uniones n-p al realizar un dopaje a las celdas con fósforo o boro, vía difusión térmica, después se realiza la formación de contactos eléctricos ya sea por serigrafía, evaporación o depósitos de metales vía baño químico (Matsumoto, 2011).

Ya formadas las células de silicio, se agrega una capa antirreflejo que permite una absorción más efectiva de fotones, se usa un proceso de deposición de vapor para ello, este recubrimiento también les da a las celdas solares su característico color azul (Partouche, 2012). En el proceso PERC se requiere en este punto un revestimiento dieléctrico trasero de la celda y después los orificios de contacto a través del dieléctrico trasero se forman por ablación con láser (Green, 2015). La creación de la celda concluye con la metalización con alrededor de 25 g de plata (Agnoletti, y otros, 2014), al agregar un circuito eléctrico en la parte frontal para que lleve la corriente colectada (Partouche, 2012).

Una vez terminada la celda, en el caso de este estudio, es importada a México, donde se realiza una inspección para eliminar las dañadas y separación por tonos de azul en bloques de 150 celdas, después se realiza la soldadura de estas para formar líneas de celdas, y estas líneas son soldadas entre sí para obtener un panel con la capacidad deseada, al concluir esto, se realiza el proceso de encapsulación que implica colocar TPT, EVA, las celdas y vidrio cristalino de acuerdo con el esquema mostrado en la Fig. 6. Antes de unir estas capas de manera definitiva, se realiza una prueba de electroluminiscencia con el panel pre-ensamblado para corroborar el correcto funcionamiento de cada una de las celdas solares, posteriormente se realiza un proceso de laminación para unir las capas, después se ensambla un marco de aluminio y la caja de conexiones correspondientes, para finalizar el proceso con una prueba de simulación solar para corroborar la eficiencia del panel. Se muestran en la Fig. 7 algunas fotos del proceso observado en planta y en la Fig. 8 un diagrama de flujo simplificado de todos los pasos de producción y ensamble de panel solar.



Fig. 7.a: Selección de celdas



Fig. 7.b: Soldadura automatizada



Fig. 7.c: Inspección-Encapsulado

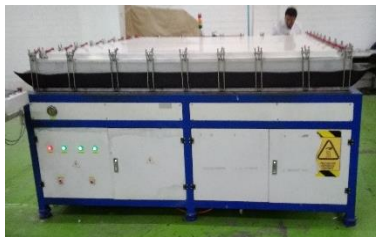


Fig. 7.d: Laminación

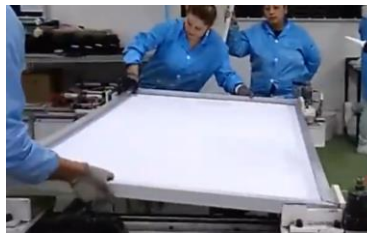


Fig. 7.e: Ensamble final

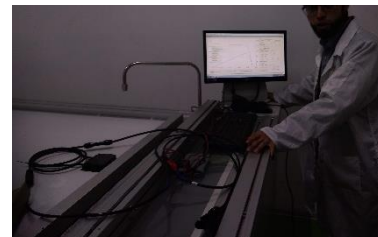


Fig. 7.f: Prueba de simulación solar

Fig. 7: 6 procesos observados en la planta, en orden

Fuente: Fotos de obtención propia

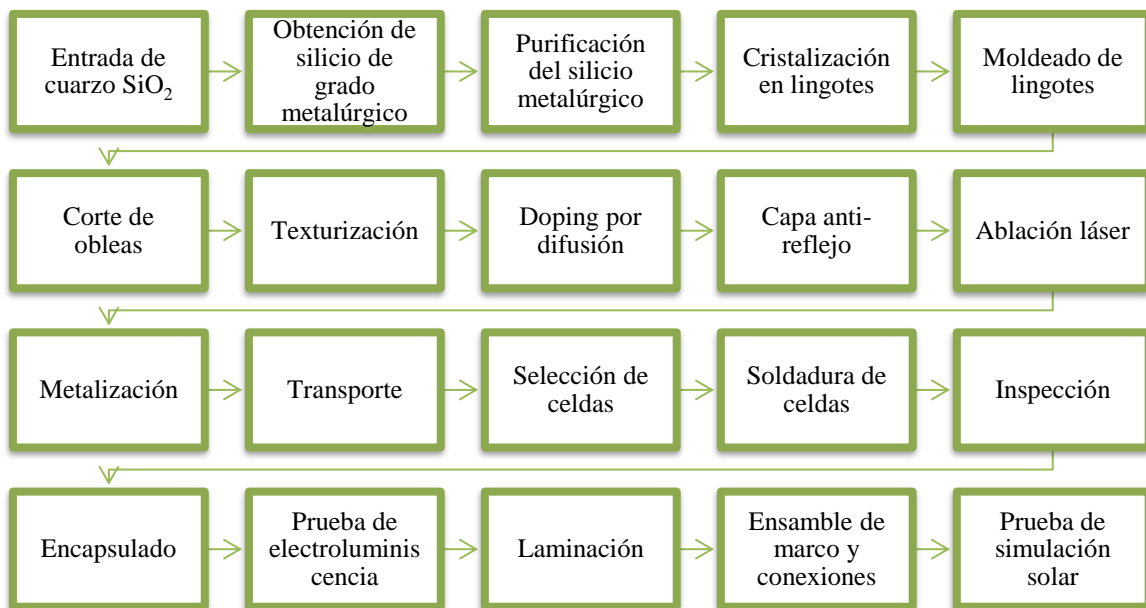


Fig. 8: Diagrama de producción simplificado

Fuente: Adaptado de (Martínez Gómez, 2017), con información colectada en planta.

No se muestra en este diagrama la generación de residuos.

1.2.2. Problemáticas ambientales relacionadas

La producción, ensamble, instalación y disposición de paneles solares, implica impactos en el ambiente que deben ser tomados en cuenta al instalar una granja solar, entre ellos se pueden identificar los siguientes, dependiendo del recurso afectado:

- Suelo y hábitat:

Por observación en la realización de esta tesis, se puede mencionar que una gran dificultad y posible fuente de contaminación está relacionada al rechazo y disposición de celdas en la fase del ensamble de paneles, debido a sus imperfecciones o fractura durante el transporte o manipulación, como puede verse en la Fig. 9.



Fig. 9.a: Celdas fracturadas e en proceso

Fig. 9.b: Celdas fracturadas acumuladas

Fig. 9: Residuos generados por celdas fracturadas.

Fuente: Fotos de obtención propia

Las celdas mostradas en 9.b son 1 de 4 cajas de celdas que se habían acumulado a lo largo del tiempo en que la planta de ensamble había estado activa.

Durante la etapa de instalación y uso, el cambio de uso de suelo es uno de los mayores impactos, ya que los equipos que se instalan ocupan gran parte del terreno que será destinado a un proyecto de este tipo, esto implica la pérdida de vegetación debido a su remoción necesaria y el desplazamiento y eliminación de la fauna existente con trampas tóxicas para el caso de los roedores, otro posible impacto surge en esta etapa ya que existe la posibilidad de que se presente un derrame accidental de las aguas residuales que se generen, así como el vertido de combustibles, producto del funcionamiento de la maquinaria usada en la instalación (Bustillo, Calidonio, Bonilla, Portillo, & Zúñiga, 2008).

Respecto al final de ciclo de vida de los paneles solares, en un informe de la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA), determinó que, en el año 2016, los flujos de residuos fotovoltaicos globales acumulados alcanzarían entre 43,500 y 250,000 toneladas métricas, y que, dada una vida útil promedio del panel de 30 años, se anticipan grandes cantidades de residuos anuales para principios de la década de 2030 y alrededor de 5-5 a 6 millones de toneladas de residuos no reciclables para la década de 2050 (IRENA, 2016).

- Aire:

El impacto ambiental al aire es medido en general con la cantidad de emisiones de CO₂-eq que suelen considerarse desde la extracción de materia prima, pasando por el ensamble

de paneles, y dependiendo del alcance del proyecto suele medirse por la producción de 1KWh de energía eléctrica. (Muteri, y otros, 2020)

El transporte para la distribución de celdas desde las fábricas hacia las ensambladoras de paneles distribuidas en todos los continentes (82% de los paneles son ensamblados en en Asia) tiene un papel importante en los impactos ambientales (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, 2021) La ubicación geográfica es clave al examinar el impacto ambiental ya que el lugar de producción de las celdas está conectado con el mix energético de dicha región, lo que impacta directamente en la categoría de Cambio Climático (GWP) debido a la emisión de CO₂-eq producido en la generación de energía por metodologías convencionales, por otra parte también influye en el transporte de materiales e insumos pues cuanto mayor sea la distancia entre el lugar de extracción y el procesamiento o ensamble, mayor será la carga ambiental asociada a dicho transporte. Un aspecto particular de esto se refiere al comercio internacional de materias primas que provocan la separación de impactos ambientales entre los países involucrados en el comercio, en este caso la evaluación es más compleja y sólo pocos estudios han analizado estos aspectos en detalle (Muteri, y otros, 2020). En este estudio este transporte debido a la importación de materia prima, si se está considerando.

- Agua:

Asociado a la etapa producción de celdas solares de silicio, se estima que se realiza el consumo de aproximadamente 8.88 litros de agua, por cada 1 kWh de energía fotovoltaica que será generada en el futuro (Vanegas, Pasqualino, & Cabrera, 2015).

Como se menciona en el apartado de suelo, el posible derrame de combustibles o aceites puede contaminar a los mantos de agua subterráneos, además para disminuir el polvo, es necesario establecer un riego continuo (Bustillo, Calidonio, Bonilla, Portillo, & Zúñiga, 2008).

De acuerdo con un estudio realizado en el *Indian Institute of Technology* , acerca de la disposición de paneles solares en relleno sanitario, en el lixiviado, generado por agua de lluvia, en un año de una pieza de panel solar monocristalino de 15 x 15 cm en descomposición, se pueden encontrar los contaminantes referidos en la Tabla 4:

Tabla 3: Cantidad de contaminantes por litro de lixiviado

Contaminante	Cantidad [mg/L]
Cloruros	22.0
Nitrógeno amoniacal (NH ₃ N)	2.30
Sólidos disueltos totales (TDS)	1069.00
Coliformes	100.00
Nitrógeno total Kjeldahl	20.30
Arsénico (As)	0.08
Cobre (Cu)	210.30
Cromo (Cr)	0.02

Hierro (Fe)	11.66
Plomo (Pb)	29.02
Níquel (Ni)	68.10
Zinc (Zn)	2.70

Fuente: (Kumar & Preeti, 2020)

Si bien en una sola pieza no representan una contaminación mayor, al tomar en cuenta los pronósticos de residuos de paneles solares mencionados anteriormente, la contaminación del agua en esta etapa del ciclo de vida se vuelve relevante al aumentar la cantidad de emisiones hacia el agua subterránea y hacen falta estudios posteriores para poder cuantificar esta información en escenarios más reales (Kumar & Preeti, 2020).

Existen además otro tipo de impactos como son: las emisiones de CO₂ y otros contaminantes como NO_x y SO_x referidos a la obtención de materia prima para la fabricación de celdas y otros elementos del panel, a lo largo de esta investigación estos factores si serán tomados en cuenta.

1.3. Value Stream Mapping (VSM)

Para definir al método Mapeo de Flujo de Valor o *Value Stream Mapping* (VSM), se debe entender que *value stream* (flujo de valor) son todas las acciones actualmente requeridas para llevar un producto desde que es materia prima hasta las manos del cliente. Usar la perspectiva de *value stream* significa trabajar con una imagen completa y no sólo partes individuales de los procesos (Rother & Shook, 1999), de ahí se entiende que el concepto detrás de esta técnica es el de lograr una representación gráfica de la cadena de flujo de valor de “puerta a puerta”, en otras palabras, desde la recepción de la orden del cliente, pasando por todos los procesos de transformación y hasta la entrega final del producto

Un VSM es un mapa que presenta por medio de íconos estandarizados cada uno de los elementos dentro de la cadena de valor, gracias a esto es posible identificar inventarios acumulados, tiempo total de fabricación, operaciones y tiempos que agregan valor y aquellos que no, entre otras cosas (Rohac & Januska, 2015). En la Fig. 10 se muestran algunos de los símbolos más frecuentemente usados en un VSM. El flujo de información es tratado en esta técnica casi con la misma importancia que el de los materiales, por lo que también se mapea (Rother & Shook, 1999).

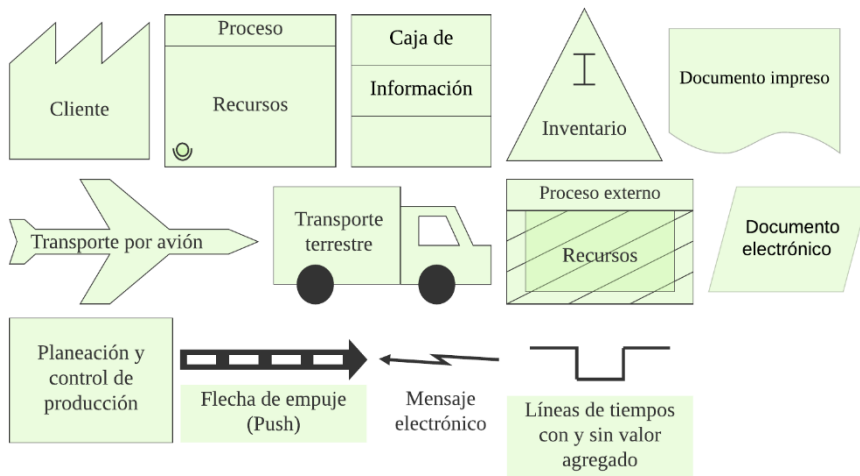


Fig. 10: Símbolos usados en VSM

Fuente: Creación propia con símbolos de Lucidchart adaptado de Rother & Shook, (1999)

1.3.1. Objetivo de *Value Stream Mapping*

El VSM busca resaltar los desperdicios en un sistema de fabricación con el objetivo final de reorientar las prácticas de producción para alinearlas con el pensamiento *Lean* y poder establecer planes para mejoras futuras (Black & Phillips, 2010).

1.3.2. Alcances

El rango de aplicación de este método, inicialmente estaba limitado a la industria automotriz, sin embargo, su implementación en otras industrias fue posible y desde entonces se han obtenido experiencias positivas en la construcción de maquinaria y óptica, tecnología sanitaria y de línea, así como en la industria de bienes de clientes, de acuerdo con (Erlach, 2013) el mapa de flujo de valor ha demostrado ser altamente adecuado para el análisis y el nuevo diseño de todo tipo de producciones de piezas, tanto en empresas multinacionales como en las Pequeñas y Medianas empresas (PYME por sus siglas) .

1.3.3. Metodología para la construcción de *Value Stream Map* en planta

El modelado del flujo de valor de una fábrica se basa en seis elementos básicos, cada uno de los cuales puede describirse mediante parámetros específicos y diferenciarse aún más por tipo.

1. "Proceso de producción" se refiere a las actividades directamente productivas dentro de la fábrica, así como a las actividades de procesamiento externo.
2. "Proceso comercial" describe las tareas de procesamiento de pedidos, incluyendo planificación y control de la producción.

3. "Flujo de material" es el movimiento de materiales entre los procesos de producción o ensamble.
4. "Flujo de información" significa la transmisión de datos y documentos entre los procesos comerciales individuales y hacia los procesos de producción, incluidas las frecuencias de datos.
5. El "Cliente" refleja la demanda del cliente que debe satisfacer la producción, modelando así la carga del sistema.
6. El "Proveedor" representa el suministro de producción de materias primas y piezas.

Además, se debe tener en cuenta que el flujo de valor fluye desde los proveedores a través de la fábrica hasta los clientes, entonces un VSM se lee de izquierda a derecha, aunque comienza a realizarse desde los clientes hacia el proceso, es decir, de derecha a izquierda (Rother & Shook, 1999)

De forma simplificada, para dibujar el estado presente o base de una fábrica, con la metodología VSM, se deben seguir los siguientes pasos:

- 1) Seleccionar el producto o la familia de productos a mapear: como regla general, un VSM se aplica a una combinación de todos los procesos de producción para un producto en particular. Sin embargo, en el caso de algunas empresas, mapear productos individuales no sería la mejor solución posible. Por tanto, el primer paso de un análisis de flujo de valor es la deducción de familias de productos, usualmente se agrupan por criterios relevantes como similitud en los pasos de producción.
- 2) Obtener información en planta: Se debe avanzar paso a paso a través de la producción y el procesamiento de pedidos, tratando de entender los procesos y haciendo preguntas a los operarios cómo ¿Cuáles son sus tareas y deberes? ¿Cómo sabes qué es lo que debes hacer y cuándo? ¿De dónde obtienes material? Y así mismo, se deben medir los siguientes tiempos de cada etapa del proceso:
 - a) *Operation time (OP)*: Indica cuánto tiempo permanece una pieza en particular en determinada etapa de la producción.
 - b) *Processing time (PT)*: Indica cuánto tiempo permanecen las piezas individuales de un lote, en la etapa medida. Si se maneja una pieza, entonces el tiempo de operación es igual al tiempo de procesamiento.
 - c) *Change time* o *Set up time (ST)*: Tiempo durante el cual una máquina no está disponible para su procesamiento debido a un cambio de accesorios, herramientas o materiales para un nuevo tipo de pieza.
 - d) *Cycle time (CT)*: Indica cuánto tiempo se necesita para completar una pieza o producto en un proceso de producción.
Si solo hay una máquina, entonces el *cycle time* es idéntico al *Operation time* y en caso de que no, o de que el proceso sea continuo, se debe calcular el con las siguientes ecuaciones (Erlach, 2013):

Para el caso de más de una máquina (o estación de trabajo)

Para el caso de procesos continuos o por lotes

$$CT = \frac{OT \times \#P}{\#Res}$$

$$CT = \frac{PT * \#P}{PQ * \#Res}$$

Dónde,

#P- Cantidad de piezas iguales que son usadas en el producto final

#Res- Cantidad de recursos disponibles (por ejemplo: máquinas, estaciones de trabajo)

PQ- Cantidad de piezas por lote o capacidad de la máquina

3) Dibujar mapa:

- a) Dibujar los íconos de “cliente, proveedor y control de la producción”
- b) Ingresar los requisitos del cliente (demanda, distancia, frecuencia de orden) y características del proveedor (cantidad proporcionada, distancia, frecuencia de envío)
- c) Dibujar los medios de transporte con su frecuencia
- d) Agregar las cajas de los procesos en secuencia, de izquierda a derecha
- e) Agregar las cajas de datos debajo de cada proceso y la línea de tiempo debajo de las cajas
- f) Agregar las flechas de comunicación y flechas pull o push
- g) Colocar información sobre el tiempo (OP, PT, CT) así como cantidad de operarios, en las cajas de información de los procesos
- h) Agregar información sobre inventarios, como el *range of coverage* o RC (que representa la cantidad de tiempo cubierto por el inventario existente) que se calcula con la siguiente ecuación:

$$RC = \frac{SQ * FPY}{DD * \#P}$$

Dónde,

- RC Range of coverage [días]
- SQ Cantidad de piezas en stock [piezas]
- FPY First pass yield= (1-% de rechazos) [%]
- DD Demanda diaria [piezas/d]
- #P Cantidad de piezas iguales por producto terminado [piezas]

i) Añadir el tiempo de trabajo diario por turno

j) Agregar Lead Time de Producción (LTP), calculado con la siguiente ecuación:

$$LTP = \sum_i RC_i$$

Dónde,

RC_i = *Range of coverage* del proceso i

i = etapa del proceso que se está midiendo

k) Agregar información sobre el flujo de información (Rother & Shook, 1999).

El VSM elaborado, representa el escenario base del proceso, posteriormente se procede a analizar toda la información ahí representada para identificar posibles áreas de oportunidad y visualizar mejoras para obtener un proceso propuesto que debe ser plasmado en un nuevo VSM. Para este análisis se puede hacer uso de otras herramientas y conceptos como los 7 MUDAS o desperdicios, KANBAN, SMED, además de un balance de línea para identificar los cuellos de botella e identificar si el tiempo y cantidad de estaciones de trabajo son las adecuadas para cumplir con la demanda del producto bajo estudio. Se debe tomar en cuenta que entre los elementos que no agregan valor, están los inventarios, usualmente existen gran variedad de problemas escondidos detrás de los mismos, es la misión del VSM identificar y lograr eliminar todos los inventarios innecesarios (Rohac & Januska, 2015).

1.4. Otras herramientas análisis y mejora de procesos

Cuando se habla de mejora de procesos, especialmente de mejora continua, se está hablando también de calidad, entendida esta como un término subjetivo para cada persona pero que técnicamente puede tener dos significados: la característica de un producto o servicio que incide sobre su capacidad para satisfacer necesidades declaradas o implícitas, y un producto o servicio libre de deficiencias (Bauer, 2006). También se hace referencia a las técnicas de pequeñas y frecuentes mejoras que permiten adquirir y mantener una ventaja competitiva, estas mejoras consisten en fortalecer y mejorar los procesos internos de las organizaciones, especialmente la modificación en la forma de realizar algunas actividades, buscando facilitarlas y haciendo más eficientes los procesos (Corredor, 2015).

El fundador de Toyota, Sakichi Toyoda, su hijo Kiichiro y el ingeniero Taiichi Ohno, crearon el Toyota Production System (TPS) entre 1946 y 1975. El objetivo más importante de este sistema es aumentar la eficiencia de la producción mediante la eliminación constante y completa de residuos, el TPS tiene como pilar fundamental el *Just In Time* y la automatización con toque humano (Ohno, 1988), con el tiempo el TPS fue uniendo sus principios a los de *Six Sigma* para crear *Lean Six Sigma* (Vargas-Lozano & Castaño-Garavino, 2020).

La Fig. 11 muestra algunas de las herramientas más relevantes, las cuales son usadas en conjunto por el llamado *Lean Six Sigma*.

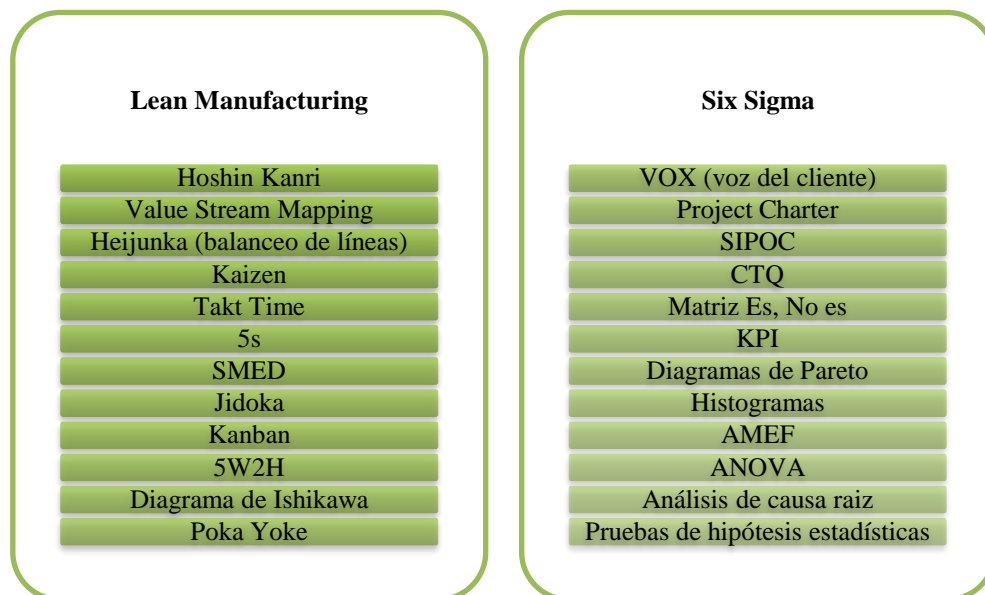


Fig. 11: Herramientas de Lean Six Sigma

Fuente: Creación propia con información de Vargas-Lozano & Castaño-Garavino (2020)

- Manufactura esbelta o *Lean Manufacturing*

Se puede definir como un proceso continuo y sistemático de identificación y eliminación del desperdicio o excesos (también llamados MUDA), entendiendo como exceso toda aquella actividad que no agrega valor en un proceso, pero sí costo y trabajo. Esta eliminación sistemática se lleva a cabo mediante trabajo con equipos de personas bien organizadas y capacitadas. *Lean Manufacturing* es una tarea incansable e ininterrumpida para crear empresas más efectivas, innovadoras y eficientes (Socconini, 2019).

- 7 desperdicios

Se define a un desperdicio como toda actividad que no añade valor para el cliente, que no transforma el producto, ni contribuye visiblemente a la consecución del bien final, que además consume recursos y por tanto genera un sobre costo para el productor que, de ser posible, debe ser reducida o eliminada (Corredor, 2015). Los 7 desperdicios a los que se suele hacer referencia en la industria y literatura son:

- Sobreproducción: Producir más de lo necesario o anticipadamente. Reflejando que el proceso no trabaja con respecto a la demanda, por lo que existen inventarios innecesarios.

- Esperas: Tiempo perdido durante el proceso por parte de los recursos (humanos y máquinas), quienes permanecen en pausa debido a que hay una actividad precedente que no ha concluido.
- Transportes: Todas las actividades relacionadas con el movimiento de material o herramientas, de un sitio a otro.
- Movimientos: Son todas las actividades que realizan los trabajadores de manera innecesaria en su puesto de trabajo o en otro sitio de la planta (ejemplo; acomodad, buscar, alcanzar).
- Defectos: Errores en los productos que los vuelven un producto con defecto o defectuosos, puede ser cualquier materia prima, producto en proceso o producto terminado fuera de especificaciones.
- Sobreprocesamiento: Se refiere a hacer más trabajo de lo que se requiere y a procesos ineficientes.
- Inventario: Es todo el material partes, insumos, productos procesados o terminados que se encuentran estancados en espera de ser procesados o vendidos. Pueden estar acumulados en almacenes o en la misma línea de producción (Corredor, 2015).
- Gemba: Gemba es un término Japonés que significa “lugar real” la estrategia creada por el presidente de Toyota, Fujio Cjo, se describe como “Ve a ver, pregunta por qué, muestra respeto” (Thull-Freedman, Mondoux, Stang, & Chaetier, 2020), y se trata de un componente clave de Lean Manufacturing, en el que se busca que todos los interesados en una mejora de procesos visiten, observen y comprendan los procesos en la planta, para lograr mejores resultados y evitar errores debidos a información errónea (Swinburne, 2019).
- Diagrama Ishikawa (Diagrama Causa-Efecto): Es una técnica que ilustra en forma gráfica la relación jerárquica entre un problema y sus causas potenciales, existen diferentes métodos para su construcción y pueden dividirse en:
 - Modelo por clasificación de las causas de un proceso (6 M's)- Primero establece las causas posibles que general el defecto, estas pueden ser mano de obra, método, maquinaria o equipo, materia prima, medición y medio ambiente.
 - Modelo por fases del proceso- Se usa cuando el efecto se genera a través de fases definidas y separadas, cada fase se inserta en un recuadro y el problema o efecto se escribe del lado derecho.
 - Modelo por enumeración de las causas- Consiste en enumerar todas las posibles causas que pueden influir sobre un problema (Galgano, 1995).
- AMEF: El análisis modal de fallas y efectos (AMEF) fue desarrollado en el ejército de Estados Unidos y se empleaba para evaluar la fiabilidad y determinar los efectos de los errores de los equipos y sistemas, en el éxito de una misión. Es una herramienta que permite identificar errores en productos y procesos y evaluar objetivamente sus

efectos, causas y elementos de detección para evitar su ocurrencia y tener un método documentado de prevención.

El procedimiento para llevarlo a cabo es el siguiente:

- Desarrollar el mapa del proceso
- Documentar el proceso
- Determinar los pasos clave del proceso
- Determinar los errores potenciales de cada paso, definir los efectos de los fallos y evaluar su nivel de severidad.
- Identificar las causas de cada error y evaluar la ocurrencia de los fallos.
- Indicar los controles que se tienen para detectar errores y evaluarlos.
- Obtener el número de prioridad para cada error y tomar decisiones.
- Empezar acciones preventivas, correctivas o de mejora (Socconini, 2019)
- SMED: Sus siglas significan *Single Minute Exchange of Die* o cambio de herramientas en un minuto, es una herramienta que evita tiempos muertos y reduce las operaciones de configuración de máquinas, fue desarrollado en Toyota por Shigeo Shingo en 1955, la reducción de tiempos significa que los trabajadores pueden cambiar las piezas de las maquinarias con más frecuencia y más rápido, lo que disminuye los inventarios del trabajo en proceso (Chiarini, 2012).

Los pasos para llevar a cabo esta herramienta son:

- Mapear el proceso
- Identificar la máquina en que se debe centrar todo
- Observar el tiempo total de cambio
- Separar las actividades internas de las externas
- Convertir actividades internas en externas y mover actividades externas fuera del paro
- Eliminar desperdicio de las actividades internas
- Eliminar desperdicio de las actividades externas
- Estandarizar y mantener el nuevo procedimiento (Socconini, 2019)
- Poka Yoke: Viene del japonés “Poka” que es errores inadvertidos y “Yokeru” que significa evitar. Los dispositivos poka yoke son métodos que evitan los errores humanos en los procesos antes de que se conviertan en defectos, estos sistemas permiten realizar la inspección al 100% y, por ende, emprender acciones inmediatas cuando se presentan defectos. Existen 4 mecanismos de poka yoke, físicos, secuenciales, de agrupamiento y de información (Socconini, 2019)
- Heijunka (balanceo de líneas): El concepto detrás de esta herramienta surge de las observaciones de Taiichi Ohno sobre la necesidad de balancear las líneas de producción y los desafíos que esto conlleva (Ohno, 1988). Heijunka es una herramienta que consiste en distribuir físicamente las tareas en estaciones de trabajo con el objeto de balancear la carga de trabajo, disminuir el tiempo ocioso e identificar el cuello de botella en el sistema. Para llevar a cabo este balance, se debe determinar

el tiempo de ciclo del sistema y después calcular el número ideal de estaciones de trabajo que debe haber en el mismo (Reyna Amador, 2017).

- DMAIC

Six Sigma utiliza una metodología llamada DMAIC (siglas en inglés de define, measure, analyze, improve, control) que consiste en:

- Definir: se delimita el proyecto a realizar.
- Medir: se obtienen datos.
- Analizar: se estudian los datos y se convierten en información.
- Mejorar: se llevan a cabo acciones de mejora.
- Controlar: se verifica que las mejoras se mantengan (Socconini, 2019).

1.5. Análisis de ciclo de vida (ACV)

El ciclo de vida de un producto es el conjunto de etapas ordenadas desde su elaboración hasta la disposición final. El análisis de ciclo de vida (ACV) contabiliza todos los materiales, energía, emisiones y uso de suelo de cada etapa del ciclo de vida del producto, considerando la extracción de recursos, la producción, envasado, distribución, uso, mantenimiento, reciclaje, la reutilización, valorización o eliminación final (LCI, 2015). Se considera que el surgimiento del ACV se dio en la década de los años 70's y fue motivado por las preocupaciones relacionadas con la posible falta de recursos naturales y energía en el futuro, incentivando la elaboración de métodos para cuantificar el uso de recursos en proyectos, visualizando la reducción del uso de insumos para la producción y el impacto al medio ambiente de los residuos resultantes (Curran, 2012).

1.5.1. Definición

La norma ISO 14040:1997 (1997) se refiere a la metodología del ACV como “una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados con un producto, lo cual se efectúa recopilando un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema; evaluando los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas interpretando los resultados de las fases de inventario e impacto en relación con los objetivos del estudio.”

En este estudio, se va a trabajar con la definición del primer centro reconocido de ACV, el CML de la Universidad de Leiden de Países Bajos: Es una herramienta que evalúa el desempeño ambiental durante todo el ciclo de vida de un producto o de la realización de un servicio, realiza la cuantificación de las emisiones del aire, agua y suelo así como la extracción y el consumo de recursos (incluida la energía), en todas las etapas del ciclo de vida (Curran, 2012).

1.5.2. Fases del ACV













Un ACV, de acuerdo con la norma ISO 14040:2006 (2006), se compone de 4 fases definición de objetivo y alcance, análisis de inventario (ICV), evaluación de impacto (EICV) e interpretación de resultados

Definición de objetivo y alcance. En esta la primera fase, se debe definir un objetivo que identifique las razones para realizar el estudio, también se debe definir: el sistema del producto, que son los procesos unitarios relacionados al producto y la descripción del tipo de producto; la unidad funcional que es la que permite proporcionar una referencia a la que se relacionan las entradas y salidas; los límites del sistema que son los procesos que se considerarán dentro del estudio; las categorías de impacto y evaluación de impacto que se considerarán (en la Tabla 4 se muestran algunas de las categorías de impacto y daño existentes); la calidad de los datos y las hipótesis consideradas.

Análisis de inventario. Se refiere a una lista cuantificada de todos los datos de entradas y salidas del sistema por unidad funcional. Las limitaciones prácticas en la recopilación de los datos y los límites del sistema deben tenerse en cuenta en el alcance y documentarse en el informe del estudio. De acuerdo con la norma ISO 14040:2006 (2006), hay tres tipos de datos que es posible recopilar:

- Los obtenidos por mediciones directas, realizadas por el analista o proporcionadas directamente por el fabricante.
- Datos de estudios anteriores que se encuentren disponibles en la literatura científica y en bases de datos.
- Datos estimados con base en análisis anteriores. Estos tipos de datos son los que presentan mayor incertidumbre ISO 14040:2006 (2006).

Tabla 4: Algunos ejemplos de categorías de impacto y las 3 categorías de daño usadas

Categorías de impacto (punto medio)	Categorías de daño (punto final)
 Cambio climático	 Salud humana
 Emisión de gases efecto invernadero	 Entorno natural
 Agotamiento de ozono troposférico	 Recursos renovables
 Lluvia ácida	
 Consumo de energía	
 Eutrofización	
 Toxicidad	
 Radiación ionizante	
 Uso de agua	
 Uso de suelo	
 Recursos minerales	
 Recursos fósiles	

Fuente: Adaptado de ISO 14040:2006 (2006)

Evaluación de impacto de Ciclo de Vida (EICV). Es la fase en la cual el grupo de datos resultado del análisis de inventario es matemáticamente procesado en términos de impacto ambientales. Básicamente en la EICV se traducen los datos del ICV a indicadores de categoría de impacto para reflejar los impactos ambientales relacionados con el producto bajo estudio. Los elementos obligatorios de una EICV son:

- Selección: En este paso se seleccionan las categorías de impacto y los métodos de caracterización que se van a considerar en el estudio.
- Clasificación: Es la asignación de los datos del inventario a las diferentes categorías de impacto.
- Caracterización: Se refiere al cálculo del indicador de impacto para cada una de las categorías de impacto seleccionadas, usando factores de caracterización (FC), los cuales son obtenidos con base en modelos de caracterización contenidos en las diferentes metodologías de EICV ISO 14040:2006 (2006)

Los elementos opcionales de esta fase, establecidos en la ISO 14040:2006 (2006) son la normalización, agrupación, ponderación y análisis de la calidad de datos. Se identifican como

opcionales por tratar de poner los resultados en contexto, es decir, conocer las proporciones para cada categoría de impacto de un sistema bajo estudio.

Interpretación. Esta fase compila toda la información obtenida en las fases anteriores del ACV y proporciona resultados que sean coherentes con el objetivo y alcance definido para el estudio, con la finalidad de plantear las conclusiones y recomendaciones para la toma de decisiones. En esta fase se detectan los puntos críticos del sistema estudiado, percibiendo los puntos de mayor impacto ambiental. En esta fase se realizan verificaciones y calidad de datos para obtener una evaluación concisa y si es necesario aplicar estudios de sensibilidad y coherencia para comprobar la fiabilidad de las respuestas dadas ISO 14040:2006 (2006).

1.5.3. Bases de datos y métodos

Para realizar un ACV, es necesario usar bases de datos ya que ayudan a la reducción de tiempo de recabación de información previamente generada por otros analistas, la base de datos proporciona esta información complementaria que disminuye el tiempo y posibilita la evaluación.

Las bases de datos de ICV son bases con información de productos, incluyen entradas y salidas, de materiales, energía, características de materiales específicos para algunas industrias, información general de procesos, entre otros. Estas BD son usadas a nivel mundial y entre las más comunes se encuentran Ecoinvent, DEAM, GEMIS, IDEMAT y Umberto.

Las metodologías de ACV son herramientas para medir el impacto ambiental que se usan en la fase de EICV y contienen factores de caracterización, gracias a esto permiten clasificar las preocupaciones ambientales, así como realizar ponderación y normalización de resultados para obtener los impactos ambientales del ciclo de vida del producto. En la tabla 5 se muestran las metodologías de impacto mejor sustentadas.

Tabla 5: Metodologías de impacto mejor sustentadas

Metodología/año	Desarrollador	Validez Regional	Punto medio/Punto final
CML, 2002	Universidad de Leiden	Europa	Punto medio
Eco-indicador 95,99/2000	Pré consultants y del Instituto Nacional de Salud Pública y ambiente de los Países Bajos	Calculado con la premisa de que las emisiones son realizadas en Europa	Punto final
Ecological scarcity, 2006	OEBU- alianza de empresas suizas para la investigación ambiental	Desarrollado para Suiza, pero en la última versión incluye a Japón y Bélgica	Punto final
EDIP 2003	Universidad Tecnológica de Dinamarca (DTU)	44 regiones de Europa	Punto medio
EDIP 2008	Instituto Federal Suizo de Tecnología (ETH)	Suiza	Punto Final
EPS 2000	Universidad Chalmers Suecia	Suecia	Punto final

ReCiPe/ 2009	Pré consultants, RIVM, CML	Europa	Punto medio y punto final
LIME/2006	JEMAI	Japón	Punto medio y punto final
LUCAS/ 2007	CIRAIG	Canadá	Punto medio
TRACI /2002	USEPA	EUA	Punto medio
MEEuP/2005	DE Enterprise	Europa	Solo energía
USEtox/ 2010	UNEP- SETAC	Continente genérico de 300,000 habitantes	Punto medio con unidades que pueden ser transformadas a DALY
Impact World + /2014	CIRAIG	Regionalizada para todos los países en toxicidad, radiación ionizante, uso del agua, acidificación, eutrofización y uso de suelo	Punto medio y punto final
Impact 2002 + / 2007	Pré consultats, CLM, CIRAIG	Europa	Punto medio y punto final

Fuente: (Hernández-Padilla, 2016)

1.5.4. Software y Base de datos

En este estudio, el ACV se lleva a cabo con el software OpenLCA que es una herramienta de código abierto desarrollada por GreenDelta en 2007 para la evaluación del ciclo de vida (LCA por sus siglas en inglés) y estudios de evaluación de la sostenibilidad. Este software es una de las herramientas más completas disponibles hoy en día, para realizar esta tarea y es ampliamente utilizado por industrias y ONG, es muy versátil y se puede vincular con diferentes bases de datos que ayudan a complementar el estudio que se esté realizando (Open LCA, 2020).

- **Base de datos**

Ecoinvent es una base de datos genérica impulsada y desarrollada por el Centro Ecoinvent suizo, que contiene los datos de inventario de más de 4,100 productos y servicios. El Centro ecoinvent es una iniciativa conjunta de los institutos y departamentos de los Institutos Federal Suizo de Tecnología de Zúrich (ETH Zürich) y Lausana (EPFL), del Instituto Paul Scherrer (PSI), de los Laboratorios Federales Suizos para Pruebas de Materiales e Investigación (EMPA) y del Centros de Investigación Federal Suizo Federal Research Station Agroscope Recken Holz-Tänikon (ART).

Esta base de datos es de la más alta calidad a nivel mundial, abarca los campos de la producción de energía, la extracción de recursos, químicos, papel, agricultura, servicios de transporte y gestión de residuos. Incluye también procesos de construcción y materiales como madera, pinturas, pegamentos, vidrio, metal, aislamiento, sistemas fotovoltaicos y colectores solares. La fuente de datos es sobre todo la industria suiza y alemana, pero se puede aplicar al resto de Europa y actualmente tiene incorporación de algunos procesos de la industria de países Latinoamericanos como Argentina, Barbados, Bolivia, Brasil, Belice, Chile,

Colombia, Costa Rica, Cuba, Ecuador, Granada, Guatemala República Dominicana, México y Perú, por mencionar algunos (ecoinvent, 2020).

Ecoinvent v7 (2020). ofrece 3 diferentes tipos de modelos de sistema que describen cómo los conjuntos de datos de las actividades están unidos para formar sistemas de productos. Los tipos de sistemas ofrecidos son:

- Modelo de sistema Cut-Off: Este modelo de sistema está basado en contenido reciclable o enfoque cut-off. Es el sistema recomendado para los nuevos usuarios. La filosofía subyacente es que un productor es completamente responsable por la disposición de sus residuos y no recibe ningún crédito por el suministro de materiales reciclables, en consecuencia, los materiales están disponibles sin carga para los procesos de reciclaje y los materiales reciclados sólo soportan los impactos de los procesos de reciclaje (ecoinvent, 2020). Un ejemplo de esto sería en la producción de botellas de PET reciclado, con este modelo la producción de dicha botella sólo estaría considerando la carga ambiental del reciclaje de PET y no el impacto ambiental de la producción de PET. Este modelo implica menor memoria requerida y menor tiempo de cálculo, así como una pérdida de detalles en los resultados. Por otro lado, depende de un factor de escala relacionado con la demanda de los procesos.
- Modelo de sistema APOS *Allocation at the point of substitution* o Asignación en el punto de sustitución: En este modelo se sigue el enfoque atribucional en el que las cargas se atribuyen a procesos específicos, de forma proporcional. Es decir, el usuario puede asignar las cargas a los procesos que le sean convenientes, en el ejemplo de la botella de PET reciclado, se podría decidir si a la producción de esta botella se asocia sólo la carga ambiental del proceso de reciclaje de PET o también una parte de la carga ambiental asociada con la obtención de PET y su transporte. En la práctica es un enfoque complejo que puede llevar a resultados curiosos como que un elemento reciclado tenga más impacto que uno nuevo.
- Modelo de sistema consecuencial: Es el modelo más teóricamente correcto para abordar procesos, se utiliza para estudios de perspectiva y predicción de cambios futuros. En este modelo, los mercados son abastecidos por los proveedores que pueden adaptarse a cambios (ecoinvent, 2020) . Siguiendo con el ejemplo de la botella, en este modelo se tendrían que considerar si la carga de la producción de PET se puede evitar por completo o no, al usar PET reciclado que cumpliera con los requisitos de calidad y/o características correctos y que fueran residuos de algún otro proceso de producción de cualquier otro producto, además se considera que la demanda de botellas de PET va a cambiar en el futuro entonces la fuente del PET reciclado debe ser de un proveedor que pueda abastecer la demanda futura .

Por otro lado, cada modelo de sistema ofrece tres paqueterías de datos, una basada en sistemas de procesos (LCI) y dos basadas en unidades de procesos (Unit process). La elección de la librería a usar se describe en el capítulo de metodología.

1.6. Estado del arte del ACV y VSM aplicado a paneles solares

- ACV de paneles solares

La cantidad de estudios de ACV realizados en el mundo ha ido aumentando conforme crece el interés por la tecnología fotovoltaica. La mayoría de las investigaciones buscan aumentar la eficiencia de los paneles solares por lo que constantemente se consideran nuevas tecnologías y materiales a evaluar desde el punto de vista técnico y desde el punto de vista ambiental, debido a la gran diversidad de tecnologías emergentes, se separa a los paneles solares en 3 generaciones distintas: la primera generación incluye a todos cuyas celdas solares son tradicionales (de silicio monocristalino y policristalino, incluyendo las PERC) , la segunda generación se basa en el uso de células solares de película delgada, que incluyen silicio amorfo (a-Si), telururo de cadmio (CdTe) y sulfuro de cadmio (CdS) entre otros, y la tercera generación incluye a todos los paneles de celdas no basadas en silicio y con nuevos conceptos (Muteri, y otros, 2020).

La literatura muestra que incluso cuando se examinan módulos similares, es difícil comparar diferentes estudios, ya que los analistas de LCA pueden elegir diferentes enfoques metodológicos al realizar el análisis, sin embargo por lo general se muestra que la contribución específica a los impactos ambientales se atribuye en gran medida a la fabricación y el tratamiento del silicio, que resultan en procesos intensivos en energía. También se identifica que muchos estudios tienen alcance de “la cuna a la puerta” pues el uso suele omitirse ya que el panel no genera emisiones en esta etapa. Dependerá del analista definir aspectos clave los parámetros a considerar en el análisis, la entrada de los procesos, los aspectos metodológicos y la comunicación de los resultados. (Muteri, y otros, 2020)

- VSM y ACV

Existen estudios que integran la metodología de VSM a un enfoque ambiental, creando un concepto llamado VSM sostenible o verde, por ejemplo: el de Brown, Amudson, & Bardudeen (2014) y el de Faulkner & Badurdeen (2004) en los que se sugiere agregar el consumo de energía, el impacto social y el trabajo físico como métricas que deben ser representadas en el mapa. También existen artículos que integran el concepto de VSM y ACV, usando el mismo concepto de VSM sostenible pero midiendo el impacto ambiental generado haciendo uso de ACV, por ejemplo: el de Vinodh, Ben Ruben, & Asokan (2016), Hartini, Ciptomulyono & Anitysari (2019) o el de Roosen & Pons (2013), en este último se crearon índices para medir el impacto ambiental de los MUDAS de cada etapa del proceso evaluado. Y sólo existe un artículo, realizado en Irán, que hace referencia a VSM, ACV y energía solar, sin embargo, la energía solar no es el enfoque del artículo decir cuál es su enfoque (Heravi, Rostami, & Kebria, 2020).

Respecto a estudios usando la herramienta VSM aplicados a una empresa de ensamble de paneles solares, sólo existe una tesis realizada en 2011, en la que se buscaba analizar la distribución de una planta sueca de ensamble de paneles solares, así como el proceso de producción para desarrollar una metodología que permitiera identificar, visualizar y medir los residuos en el proceso de producción de módulos solares fotovoltaicos (Michelle, 2011)

2. Planteamiento del problema y justificación

Ante el inminente crecimiento de la energía fotovoltaica, se vuelve fundamental conocer los factores que pueden limitar los beneficios de la energía solar y no asumir que es limpia por no emplear combustibles fósiles.

Gracias al apoyo de la empresa que permitió el acceso a sus procesos e información, se puede crear una propuesta integral que busque responder ¿Cuál es la correlación entre la optimización del proceso de ensamble de paneles solares y la reducción del impacto ambiental asociada? En ese sentido, este trabajo también servirá para verificar si la herramienta de VSM es útil para esta identificación de problemáticas bajo el enfoque de ciclo de vida.

De ser así, se podría tomar este trabajo como base para comprobar que existe una relación directa entre la mejora en la eficiencia de un proceso y la reducción del daño ambiental, y fomentar la creación de propuestas integrales que busquen satisfacer ambos enfoques, en ese sentido, se podría también ampliar esta investigación al aumentar el alcance de esta al incluir soluciones de Layout y optimización a detalle de procesos (usando diagramas de mano derecha e izquierda) o se podrían crear nuevas líneas de investigación futuras que mantengan la metodología aquí usada y permitan comparar escenarios, por ejemplo un escenario donde se compare el impacto ambiental después de la optimización de procesos en una planta más automatizada.

3. Metodología

Para este proyecto se seguirá una metodología consistente en 8 pasos, (Fig.12), que nos permitirá analizar el proceso, proponer mejoras y comparar el escenario base con el escenario propuesto desde la perspectiva tanto de procesos como ambiental. En este capítulo se explicarán más a detalle estas etapas.



Fig. 12: Metodología

3.1. Metodología para el Value Stream Map

La obtención de la información en planta es vital para la construcción de un VSM, en la literatura se suele recomendar la construcción de un VSM borrador mientras se realiza un recorrido al sitio del proceso a estudiar, sin embargo, en esta tesis se optó por realizar primero el levantamiento de datos y después la construcción del mapa pues de esta forma el tiempo ocupado en las visitas se usaba de forma más eficiente. Para identificar los datos necesarios para la creación del VSM, se realizó una investigación previa sobre el tema y tras haber detectado la información básica indispensable, y realizado una planificación de las herramientas y del apoyo necesario para la recolección de esta información, se llevaron a cabo 3 visitas a planta de la empresa “X” de ensamble de paneles solares.

3.1.1. Levantamiento de datos en planta

Las visitas realizadas a planta se basaron en el concepto de GEMBA más enriquecedoras, previamente a las visitas se realizaron hojas de verificación para la recolección de datos. Dichos formatos se pueden observar en el ANEXO A de este trabajo y fueron llenados haciendo uso de 3 tipos de recursos:

1. Observación directa: Se llevó a cabo usando el sentido de la vista y buscando identificar problemas del proceso de producción, especialmente aquellos referidos a inventarios en proceso y a errores en etapas de producción ocurridos durante las visitas.
2. Entrevista a operarios: Se realizaron preguntas específicas a los operarios para conocer sus actividades así como para encontrar insights (o percepciones) relacionados tanto a los errores frecuentes en los procesos, como a defectos usuales en la materia prima.
3. Fotografías y videos: Para contabilizar el inventario en proceso (Fig.13) y tiempos de procesos.



Fig. 13: Ejemplo de imagen de inventario en proceso
Fuente: Obtención propia

Es relevante mencionar que estas visitas fueron realizadas con apoyo de otras 2 personas que se encargaban de ayudar a obtener los datos requeridos, así mismo se debe tomar en cuenta que el propósito de las visitas fue el siguiente:

Visita 1: Conocer a la empresa, sus productos y comprender el proceso de ensamble de paneles en forma general para obtener un diagrama de proceso simple; elegir la familia de productos a estudiar; identificar la cantidad y potencia de las máquinas usadas, materia prima, recursos usados y emisiones de cada proceso, así como, realizar un layout de planta inicial.

Visita 2: Obtener datos más específicos y relevantes como tiempos de procesos, demanda mensual y proveedores, así como cantidades de materiales y productos defectuosos.

Visita 3: Identificar inventarios en proceso y completar faltantes de operaciones que no habían podido ser observadas en visitas anteriores. En esta visita no hubo un formato a llenar, se trabajó sobre un borrador de VSM.


Respecto a la tercera visita, es importante comentar que se llevó a cabo en un día donde por motivos sociales, las mujeres no estaban trabajando, lo que originó que gran parte de la planta de ensamble estuviera detenida, por lo que la información obtenida podría haberse visto afectada.

3.1.2. Definición de escenario base

Después de la primera visita, se decidió estudiar a un panel solar de silicio monocristalino con tecnología PERC de 380 W pues de todos los productos manejados en planta, es el que representa mayor demanda debido a la eficiencia de este tipo de celdas y las necesidades de los clientes respecto a la potencia de los paneles, por lo tanto, resulta ser el más representativo tanto de la planta como de la familia de paneles PERC. Las características del panel se muestran en la Tabla 6. Debido a la elección anterior, se consideraron sólo los procesos que competen a dicho tipo de panel y que son realizados en la planta, los cuales se pueden apreciar en la Fig.14.

Tabla 6: Características del producto a evaluar

Producto	Panel solar de silicio monocristalino PERC de 380 W	
Dimensiones	1979x1002x40 mm	
Peso	22.5 Kg	
Potencia	380 – 400W	
Eficiencia	19.16% – 20.16%	
Cantidad de celdas	72 celdas completas	
Área de las celdas	240.25 cm	
Grosor de celda	30 micras	
Marco	Aluminio anodizado	
Vidrio	Vidrio templado de 0.32 cm de grosor	
Grosor de EVA	0.04 cm	
Grosor TPT	0.05 cm	



Fuente: Creación propia con información de la empresa “X”

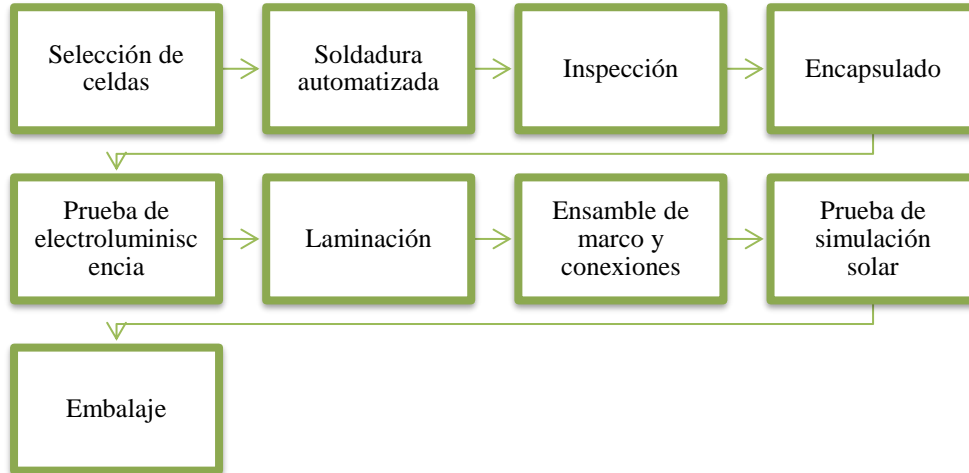


Fig. 14: Etapas de ensamblaje consideradas en el VSM

Fuente: Creación propia

Nota: En todas las etapas se consideró la cantidad de residuos producidos y la cantidad de residuos que se tenían acumulados en la zona exterior de la planta.

Es importante indicar que al VSM convencional, se está añadiendo información que es relevante para la construcción del ACV, estos datos son la energía usada por la máquina (E) y el porcentaje de residuos que se van a relleno sanitario (%DRS).

3.1.3. Límites del sistema

En función del escenario base comentado, se presentan a continuación los límites del sistema en estudio, en cuanto a espacio, procesos considerados para el VSM e información.

- a) Límite espacial: Este estudio se centra en una planta de ensamblaje de paneles solares “X” que se ubica en la República Mexicana, en la región Central.
- b) Límite de procesos considerados: Se toman en cuenta los procesos que se realizan dentro de la planta y que son parte del sistema de producción del panel en estudio (Fig. 12). Aunque para este estudio se añade además información del principal proveedor de materia prima y su distancia respecto a la planta, de igual forma se adiciona dicha información del principal cliente.
- c) Límite de información: Demanda mensual promedio de los paneles, flujos de información dentro de procesos de ensamblaje y órdenes de compra a proveedores.

3.1.4. Estudio de tiempos

Algunos procesos y sus tiempos están documentados para auditorías ISO 9001:2015, los tiempos de los procesos faltantes, se obtuvieron cronometrando y llenando un formato de observaciones de tiempo, además los tiempos en el formato fueron corroborados por medio de la revisión de filmaciones de los procesos. El formato que fue usado puede observarse en el Anexo B.

3.2. Metodología del Análisis de Ciclo de Vida

La metodología estipulada por la norma ISO 14040 explica los pasos a seguir para el desarrollo de un ACV, en esta tesis, se seguirán dichas etapas.

3.2.1. Objetivo del ACV

Realizar el análisis de ciclo de vida de un panel solar monocristalino PERC de 380 W de potencia, para estimar los impactos ambientales potenciales asociados

Alcances y límites

El alcance del estudio abarca desde la extracción de materia prima hasta la obtención del panel listo para ser usado, no se incluye el uso e instalación y disposición final del mismo al final de su ciclo de vida, sin embargo, si se consideran los residuos generados durante el proceso de ensamble estudiado en el VSM y la disposición final de los mismos.

Los procesos considerados para la realización del inventario de ciclo de vida son:

1. Producción de silicio metalúrgico
2. Purificación de silicio
3. Cristalización en Lingotes
4. Moldeado de lingotes y corte de obleas
5. Creación de celda monocristalina PERC (abarca los procesos de texturización, doping por fusión, creación de capa antirreflejo, ablación láser y metalización)
6. Transporte
7. Selección de celdas
8. Soldadura automatizada
9. Inspección
10. Encapsulado
11. Prueba de electroluminiscencia
12. Laminación
13. Ensamble final
14. Simulación solar
15. Embalaje
16. Disposición final de paneles dañados y celdas fracturadas.

Se pueden observar estos 16 procesos en el diagrama de ciclo de vida presentado en la Fig. 15. De acuerdo con este diagrama, los procesos se dividen en de primer, segundo y tercer orden, los procesos de primer orden son aquellos que fueron medidos o recopilados en sitio y aquellos que fueron estimados a partir de los datos recopilados en sitio. Entre estos últimos se encuentran los siguientes elementos:

- Km*Ton de transporte de materiales entre la ciudad de los proveedores en China, hasta la ubicación de la planta, considerando transporte en avión y en camión.
- Uso de suelo por cada proceso, considerando el inventario en espera relativo al proceso.
- Peso de materiales auxiliares como capuchas de polipropileno o acero inoxidable usado en un cúter.
- Cantidad de materia prima usada (los pesos fueron calculados por medio de la densidad del material)
- Cantidad de lámparas asociadas a cada proceso (calculadas por medio de fotografías y videos de la planta).
- Electricidad consumida por proceso, en función de la cantidad de tiempo que se usan las máquinas al día y las lámparas por proceso.
- Acumulación de celdas fracturadas. Uso de suelo e impacto por disposición en relleno sanitario.

Los cálculos referentes al uso de electricidad, uso de suelo y pesos serán detallados más adelante en el capítulo 5.

Los valores de los elementos marcados como segundo orden serán tomados de la literatura, basándose en el artículo “Life Cycle Inventories of Photovoltaics” de Jungbluth, Flury y Stucki (2012), las estimaciones de electricidad de los procesos en China se basarán en el artículo de Fui, Liu y Yuan, llamado “Life-cycle assessment of multi-crystalline photovoltaic (Pv)” (2015) y se usará de apoyo la base de datos Ecoinvent 3.7. Los valores que son obtenidos por medio de estos dos recursos serán adaptados en el inventario de ciclo de vida de forma correspondiente para coincidir más con el caso base.

Es importante recalcar que, si bien el panel solar estudiado es ensamblado en México, todos los procesos anteriores a la selección de celdas son realizados en China, además un gran porcentaje de los paneles necesarios para cumplir con la demanda mensual son traídos de dicho país, la producción en China y el transporte de los paneles completos que son importados, también se considerará dentro del inventario y también se pueden observar estas consideraciones dentro del diagrama de la Fig. 13.

Por otro lado, los elementos identificados como de tercer orden son aquellos que no serán tomados en cuenta para este análisis y que por ello están colocados fuera de los límites del sistema, con excepción de la extracción de madera, cuarzo y carbón que sí son considerados dentro del estudio por lo que se encuentran dentro de los límites del sistema, pero la información relativa a ellos no es detallada por lo que se consideran como procesos de tercer orden.

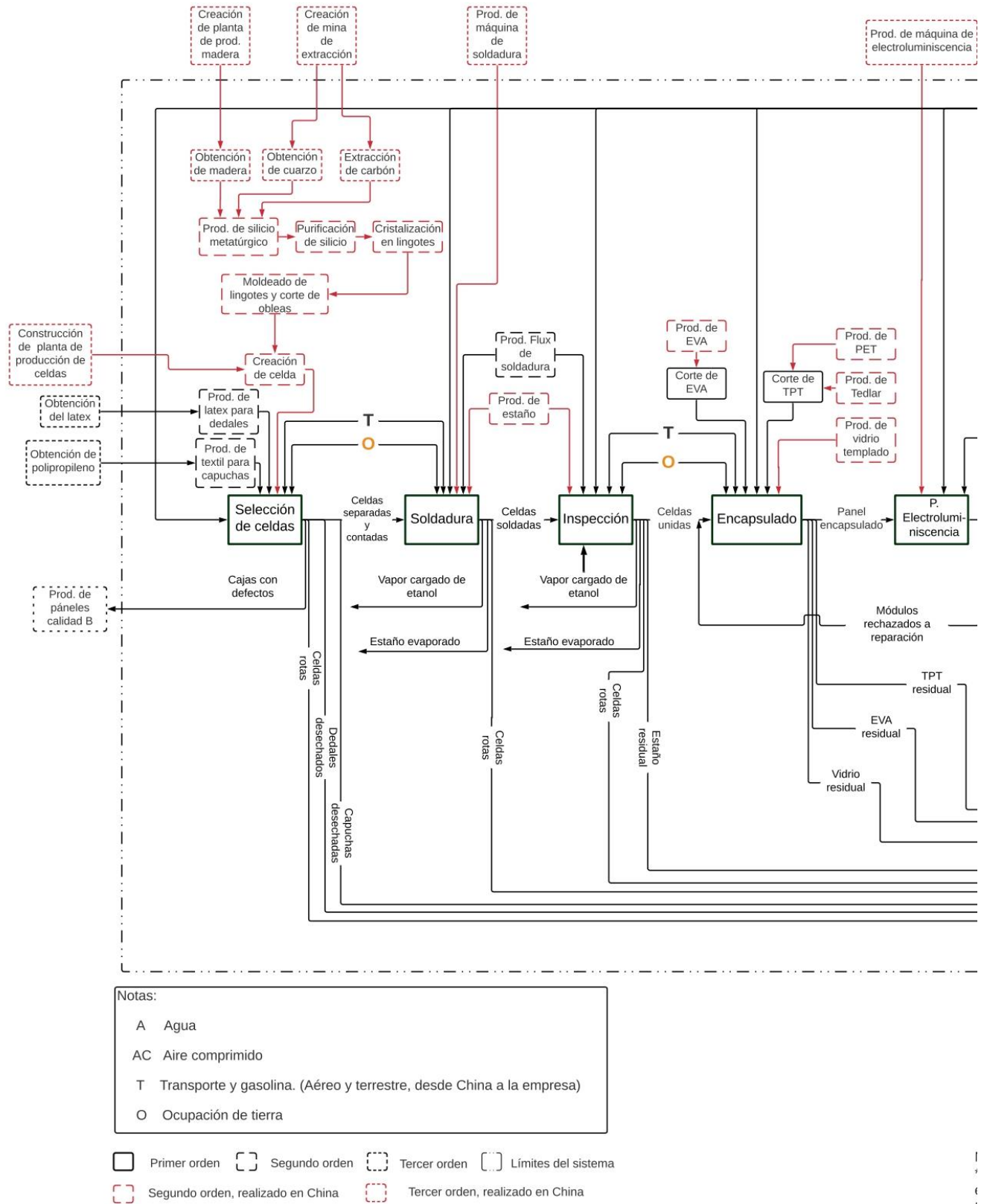
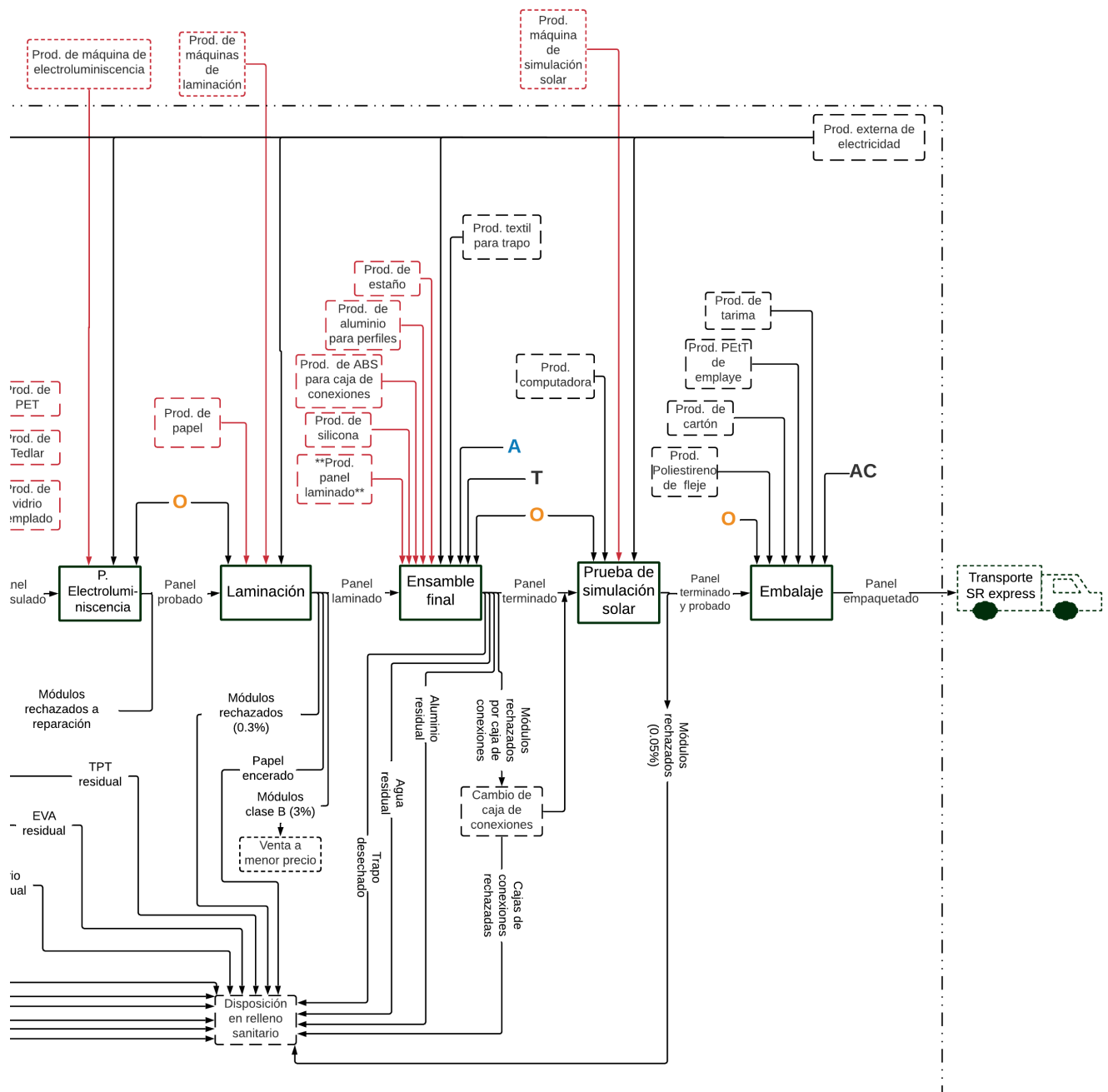


Fig. 15: Mapa de Flujo para ACV de creación de paneles solares monoPERC 380 W
Fuente: Creación propia



Nota sobre proceso de ensamble final

Se muestran los resultados considerando la producción de paneles en el extranjero y su transporte, así como los resultados considerando únicamente el transporte

3.2.2. Metodología, Categorías de impacto y Unidad funcional

Para determinar la metodología de evaluación de impacto a emplear y las categorías de impacto que se analizarían en esta tesis, se realizó la Tabla 7 con 30 estudios que fueron usados para identificar las metodologías y categorías que son normalmente usadas para análisis de ciclo de vida de paneles o celdas solares en la literatura, además en dicha tabla se muestra el país de origen del estudio los límites del mismo y la unidad funcional (UF) que emplea.

Tabla 7: Estudios con su metodología, categorías de impacto y unidad funcional.

Autor(es)	Año	País	Límites	Metodología	Categorías	UF
Akinyele et al.	2017	Nigeria	De la cuna al uso	IEC 61,724 Standard	Cambio Climático (GWP), Tiempo de recuperación de energía (EPBT), Tiempo de emisión del ciclo de vida (LCER), Demanda de energía acumulada, Ratio de energía neta (NER)	1kWp
Alsema, E	2000	Países bajos	De la cuna a la puerta	No especificado	EPBT, Emisiones de CO2	1 m ²
Corcelli et al,	2017	Italia	Reciclaje	ReCiPe	GWP, Formación de oxidantes fotoquímicos (EOFP), Acidificación terrestre (TA), Eutrofización de agua fresca (FE), Ecotoxicidad terrestre (TE), Toxicidad humana (HT), Agotamiento de agua (WD), Agotamiento de metales (MD), Agotamiento de recursos fósiles (FD).	1 m ²
Cucchiella & Dadamo	2012	Italia	De la cuna a la tumba	EPBT	EPBT, Emisiones de GEI (GHG), Retorno de la inversión de energía (EROI), Tiempo de recuperación de gases de efecto invernadero (GPBT), Retorno de la inversión de los gases de efecto invernadero (GROI)	1kWh/m ²
Frankl et al	2005	Italia	De la cuna a la tumba	No especificado	Emisiones de CO2, Emisiones de NH4, Emisiones de Nox, Compuestos Orgánicos Volátiles Distintos del Metano (COVDM),	1 kWh

					Material particulado, Emisiones de SO2, Uso de suelo	
Fthenakis et al.	2008	Europa meridional	De la cuna a la puerta	No especificado	Emisiones de GEI, Emisiones de SO2, Emisiones de NOx, Emisiones de metales pesados	1 m ²
Fu et al.	2015	China	De la cuna a la puerta	CML, 2001	GWP, EPBT, potencial de acidificación (AP), potencial de eutrofización (EP), Cambio climático (CC), HT, Agotamiento de ozono (ODP), Creación fotoquímica de ozono (POCP)	1 kWh
Fukurozaki et al	2012	Brasil	De la cuna al uso	CML, 2001	EPBT, Emisión de CO2, CED	1.2 kW de potencia
Hondo	2005	Japón	De la cuna a la tumba	Life cycle GHG emission factor	Emisiones de GEI	1 kWh
Hong et al.	2016	China	De la cuna a la puerta	IMPACT2002 +	GWP, energía no renovable, carcinógenos (CNG), no carcinógenos (NCNG), radiación ionizante (IR), ODP, inorgánicos respiratorios (RI), orgánicos respiratorios (RO), FE, TE, TA, Uso de suelo (LO), Acidificación acuática (AA), Eutrofización acuática (AE), Extracción mineral (Mex)	1kWp
Hou et al	2016	China	De la cuna al uso	EPBT	EPBT, GEI	1 kWh
Huang et al.	2017	China	De la cuna a la tumba	ReCiPe	Agotamiento de metales (MD), Agotamiento de fósiles (FD), Agotamiento del ozono (ODP), Eutrofización marina (ME), Potencial de ecotoxicidad de agua fresca (FAEP), Potencial de toxicidad humana (HTP), Potencial de ecotoxicidad terrestre (TETP), Creación fotoquímica de ozono (POCP), Radiación	1kWp

					ionizante (IR), Potencial de eutrofización (EP), Cambio climático (CC) , material particulado (PM), acidificación / nitrificación terrestre (TA)	
Ito et al.	2010	China	De la cuna al uso	EPBT	Requerimientos de energía, Tiempo de recuperación de energía (EPBT), Emisiones de CO2 y tasa de emisiones de CO2	1 kWh
Jungbluth, N	2005	Suiza	De la cuna a la tumba	Eco-indicator 99 y ecological scarcity	Ocupación de tierras (LO), emisión de: dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, particulados <2.5 micras, energía de recursos no renovables (fósiles), energía de recursos no renovables (nuclear), energía de recursos renovables (agua), energía de recursos renovables (viento, sol, geotermia, biomasa), cambio climático, efectos respiratorios, ecotoxicidad	1 kWh
Kannan et al.	2006	Singapur	De la cuna a la tumba	No especificado	EPBT, Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)	1 kWh
Kim et al	2014	Korea	De la cuna a la tumba	EPBT	Cambio Climático (GWP), EPBT, Tiempo de recuperación de CO2	1 kWh
Lenzen et al.	2006	Australia	De la cuna al uso	No especificado	Emisiones de GEI, EPBT, energía consumida	1 kWh
Luo et al.	2018	Singapur	De la cuna al uso	EPBT	EPBT, GEI	One 60-cell silicon
Mahmud et al	2018	Australia	De la cuna a la tumba	IMPACT2002 + e ILCD	MD, FD, Agotamiento del recurso agua, LO, Ecotoxicidad de agua fresca, ME, Eutrofización terrestre (TE), Acidificación, Formación de ozono fotoquímico (POC), IR, PM, Toxicidad humana (HT), Agotamiento del ozono (OD), CC, Salud humana , Calidad de ecosistema.	1 kWh

Martínez, E	2017	México	De la cuna a la tumba	CML, 2001	Acidificación, CC, Consumo de recursos abióticos, OD, Toxicidad y Ecotoxicidad, Eutrofización, Oxidación fotoquímica.	1 kWh
Mathur et al.	2002	India	De la cuna a la puerta	No especificado	Ratio de rendimiento energético, demanda de energía acumulada y efecto invernadero acumulado	1 m ²
Pacca et al.	2006	EUA	De la cuna al uso	No especificado	Ratio de energía neta (NER), EPBT y emisiones de CO ₂	No específica
Rashedi et al.	2020	Australia	De la cuna al uso	ReCiPe	CC, OD, acidificación terrestre (TA), Eutrofización de agua dulce (FAE), ME, HT, POCP, PM, Ecotoxicidad terrestre, Ecotoxicidad de agua dulce, Ecotoxicidad marina, IR, Ocupación de tierra de agricultura, Ocupación de tierra urbana, Transformación de áreas naturales, Agotamiento del agua, MD, FD, Salud humana, ecosistemas y aumentos de costos en la extracción de recursos.	1kWp
Soares et al	2018	Brasil	Producción	Eco-indicator 99	Emisiones de CO ₂ , óxidos de nitrógeno, Non methane volatile organic compounds (NMVOC), material particulado, SO ₂ .	1 m ²
Stoppato	2008	Turquía	De la cuna a la puerta	No especificado	Requerimiento de energía, Cambio Climático (GWP), EPBT, Tiempo de retorno de CO ₂ , Potencial de mitigación de CO ₂	No específica
Stylos de Koroneos	2014	Grecia	De la cuna al uso	Eco-Indicator 95	GEI	1 kWh
Sumper et al	2011	España	De la cuna al uso	No especificado	EPBT, emisiones de GEI	1 m ²
Tripangano-stopoulos et al.	2006	Grecia	De la cuna a la tumba	No especificado	Cambio Climático para un horizonte temporal de 100 años (GWP100) y el consumo de recursos energéticos primarios (PER), Tiempo de recuperación de CO ₂	30 kWp y 30 m ²

Vellini et al	2017	Italia	De la cuna a la tumba	CML, 2001	Requerimiento de energía primaria, EPBT, toxicidad, agotamiento de recursos,	1 m ²
Yang et al.	2015	China	De la cuna a la puerta	CML, 2001	GWP, potencial de agotamiento abiótico (ADP), AP, EP, HTP, potencial de ecotoxicidad acuática de agua dulce (FAEP), potencial de ecotoxicidad acuática marina (MAEP), potencial de ecotoxicidad terrestre (TETP), ODP y POCP	1kWp

Fuente: Adaptado de Muteri et al. (2020), Hsu, et al. (2012) y Amendariz, et al. (2018).

Al analizar la información recabada en la Tabla 7, se observó que solamente 20 de los 30 estudios especifican una metodología de ACV. Las metodologías más usadas fueron: EPBT(5), CML 2001 (5) y ReCiPe (3), de estas, EPBT es todos estos estudios tenía un alcance de la cuna a la tumba o al uso, es decir, no se adecuaba al alcance de este estudio. Por otro lado ReCiPe permite integrar y armonizar en un marco consistente el enfoque orientado al impacto de CML, 2001y el enfoque orientado al daño de Ecoindicator 99 (Hernández-Padilla, 2016), por ello se decidió realizar el análisis con la metodología ReCiPe.

Por otro lado, de acuerdo con las categorías más evaluadas en los estudios y compatibles con la metodología, las categorías de impacto a evaluar en esta tesis serán las mostradas en la Tabla 8 (para más información sobre las categorías, consultar el anexo C).

Con base en el análisis de la Tabla 7, la unidad funcional es: Fabricación de 1m² de panel solar monocristalino PERC de 380 W de potencia.

Tabla 8: Categorías de punto medio evaluadas

Categoría	Abreviación (en inglés)	Cantidad de estudios previos	Unidad
Cambio climático*	GWP	25	kg CO2 al aire
Ecotoxicidad terrestre	TETP	8	kg 1.4-DCB a suelo industrial
Ecotoxicidad agua dulce	FETP	8	kg 1.4- DCB a agua dulce
Eutrofización de agua dulce	FEP	8	kg P a agua dulce
Agotamiento del ozono	ODP	6	kg CFC-11 al aire
Toxicidad humana	HTP	6	kg 1.4- DCB a aire urbano
Uso de suelo	LOP	5	m2 × año de tierra de cultivo anual
Acidificación terrestre	TAP	9	kg SO2 al aire
Creación fotoquímica de ozono	EOFP y HOFPP	3	Kg NMVOC al aire
Material particulado	PMFP	4	kg PM10-Eq al aire

Fuente: Adaptado de Huijbregts, et al. (2016)

*Se están considerando también aquellos estudios que mencionan emisiones de CO₂ y emisiones de GEI.

3.2.3. Selección de librería Ecoinvent.

Como se menciona en el marco teórico, Ecoinvent ofrece 3 modelos de sistemas diferentes para hacer la EICV y además cada uno de los modelos puede ser usado con 3 diferentes paqueterías o librerías de datos, generando así 9 alternativas diferentes de bases de datos a usar. Los sistemas Cutoff y APOS están más enfocados a modelar procesos donde el reciclaje se considera como una suma de impactos positivos, dando crédito al producto mismo y el modelo Consequential está enfocado a estudios donde cambia la demanda del mercado en el futuro, por lo que en él se consideran únicamente los proveedores marginales que pueden adaptarse a esta demanda

Debido a que, como se mencionó en el marco teórico, el modelo de sistema Cutoff es el que Ecoinvent recomienda usar para nuevos usuarios que deseen mantener la forma de trabajo que se realizaba en Ecoinvent 1 y 2, además de tomar en cuenta de que no se están usando medidas de reciclaje en este estudio y por lo tanto no se deben tomar consideraciones especiales al modelar con Cutoff, este fue el modelo elegido.

Por otra parte, la librería escogida fue de UPR pues el cómputo de los resultados era más ágil a comparación de LCI y LCIA y permitía identificar más fácilmente los procesos responsables del impacto en cada una de las categorías. Es importante decir que los resultados de modelar con UPR, LCI o LCIA son los mismos.

4. Resultados de Value Stream Map base

En este capítulo se presentan los resultados relacionados a la generación del Value Stream Map, obtenidos a partir de las visitas realizadas a planta, con la metodología explicada en el capítulo anterior.

4.1. Layout de planta

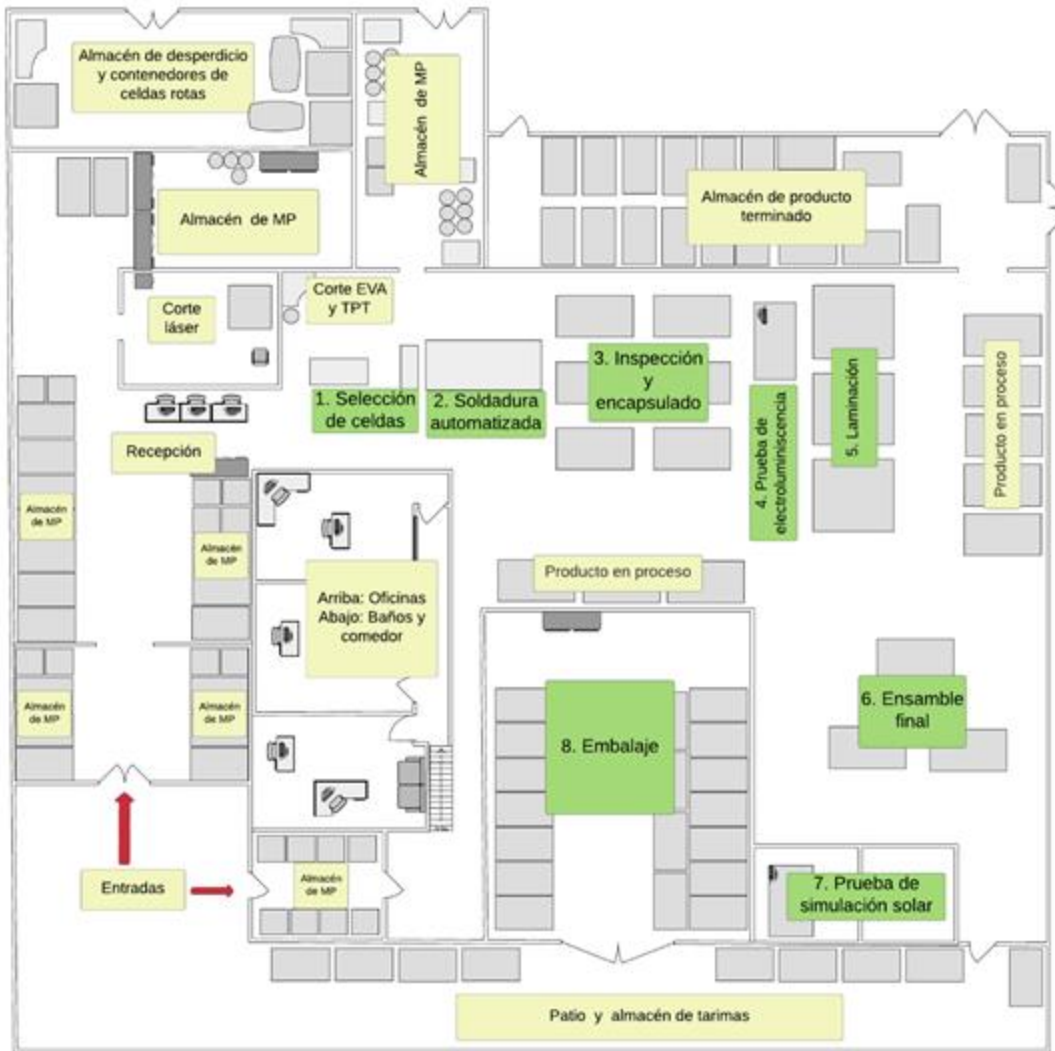


Fig. 16: Layout de planta de empresa de ensamblaje de paneles solares
Fuente: Elaboración propia

En la Fig.16 se puede apreciar la distribución de la producción, el uso del espacio, el flujo que sigue el proceso e identificar las áreas de almacenamiento y colocación de productos en proceso, además de permitir estimar el uso de suelo relativo a cada etapa. Dentro de esta

misma figura se encuentran enumerados y en color verde los procesos que integran el ensamble de los paneles solares.

4.2. VSM base

A continuación, se mostrará la información más relevante obtenida en las visitas, durante la primera se obtuvo la siguiente información de los procesos (Tabla 9).

Tabla 9: Información de los procesos de ensamble de paneles solares de la empresa "X"

Proceso	Máquinas/ herramienta	Energía	Materia prima	Materiales auxiliares	Operarios
Selección de celdas	Láser scribing machine	20 W	Celdas solares	Capuchas Dedales	2
Soldadura automatizada	Automatic solar cell stringer machine	600 W	Celdas solares separadas Soldadura de estaño	Flux de soldadura	2
Inspección	Cautín	30 W	Celdas soldadas Soldadura de estaño	Flux de soldadura	8 (divididos en 3 mesas de trabajo)
Encapsulado	Ninguna	0 W	Celdas unidas TPT 2 EVA Vidrio templado	Ninguno	8 (mismos que proceso anterior)
Prueba de electroluminiscencia	Computadora Keyland Solar defecto panel solar	200W 330 W	Panel encapsulado	Ninguno	3
Laminación	Laminadora (3 con capacidad de 2 paneles cada una)	3728.5 W	Panel probado	2 piezas de papel encerado	3 (mismos que en proceso anterior)
Ensamble final	Cautín	30 W	Panel laminado Silicón Caja de conexiones Soldadura de estaño	Agua Aire comprimido	6 (divididos en 3 mesas de trabajo)
Prueba de simulación	Computadora Keyland Sol flash simulador	200W 6000W	Panel terminado	Ninguno	3
Embalaje*	Flejadora neumática	0W	24 paneles terminados	Caja de cartón para 24 paneles	3

				Fleje de 5/8 Emplaye	
--	--	--	--	-------------------------	--

Fuente: Creación propia

*Se obtuvo la información en la tercera visita

Durante la segunda visita se obtuvo la información suficiente para construir un primer borrador de VSM y además se obtuvo la siguiente tabla de tiempos (Tabla 10):

Tabla 10: Tiempo de procesos de empresa "X"

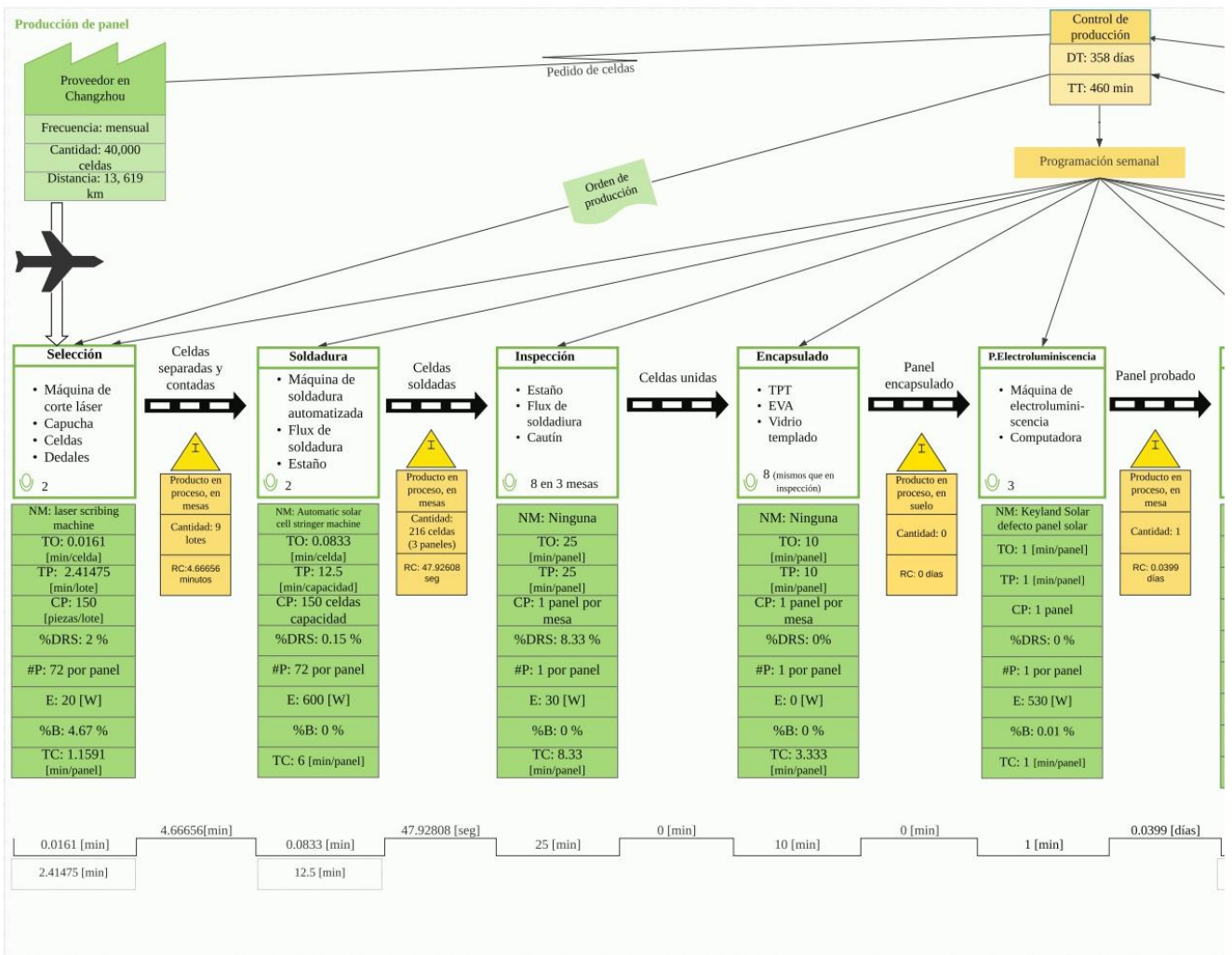
Proceso	Subproceso	Tiempo promedio de procesamiento
Selección de celdas	Selección por color	0.761 s por celda
	Selección por defectos	30.735 s por lote de 150 celdas
Soldadura automatizada	NA	12.5 min por 150 celdas
Inspección	NA	25 min por panel
Encapsulado	NA	10 min por panel
Prueba de electroluminiscencia	NA	1 min por panel
Laminación	NA	17 min por panel
Ensamble final	Colocar perfiles de aluminio	0.9611 min por panel
	Limpieza	3 min por panel
	Colocar caja de conexión	0.3838 min por panel
Prueba de simulación solar	NA	5 min por panel
Embalaje *	NA	18.48 min por caja

Fuente: Creación propia

*Se obtuvo el tiempo hasta la tercera visita

NA- No aplica

En la tercera visita sólo se identificó la información faltante para terminar de construir el VSM, este resultado se muestra en la Figura 16.

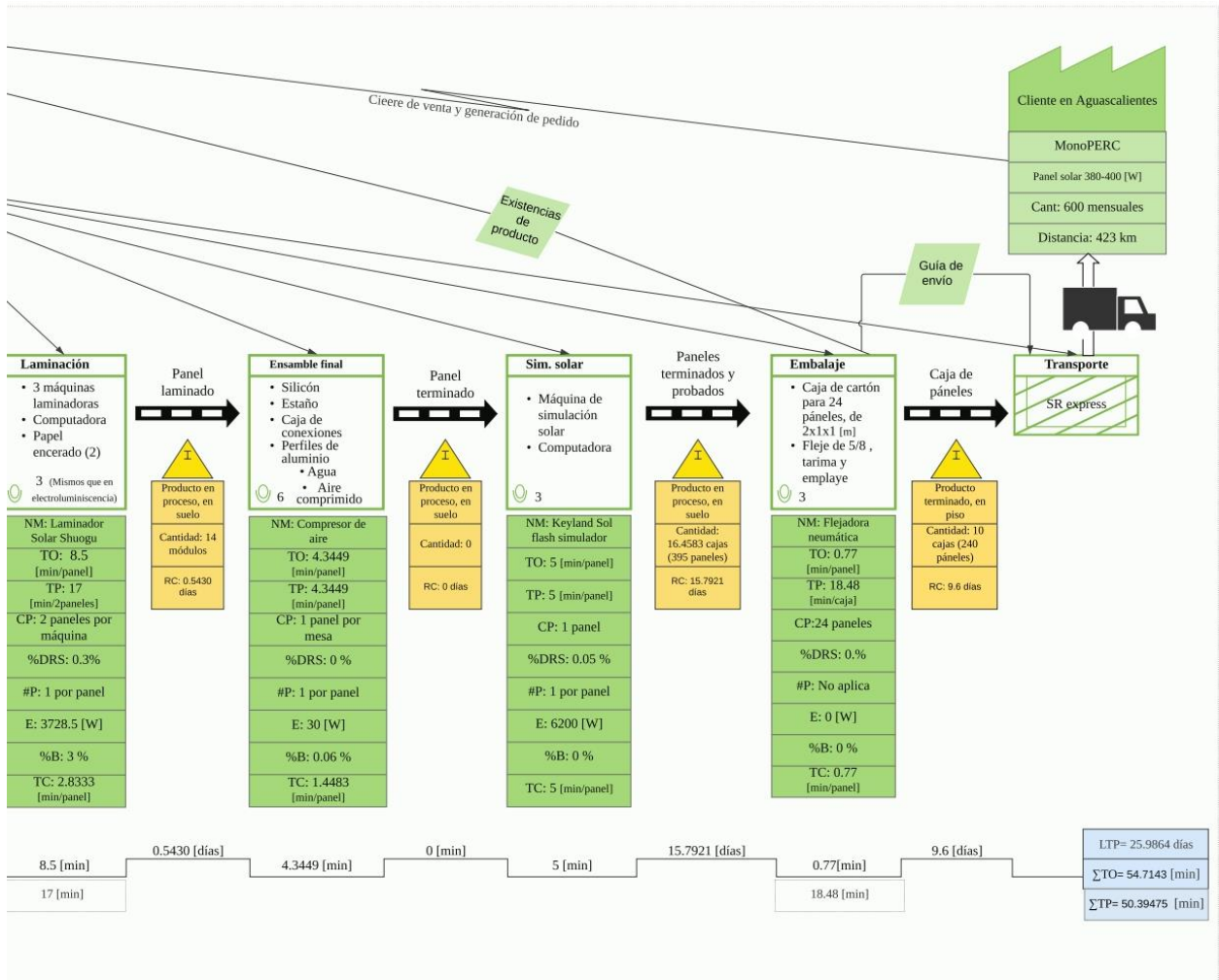


Simbología:	
TP- Tiempo de procesamiento	%DRS- Porcentaje de celdas que se van a ar disposición en relleno sanitario
#P: Número de piezas en el producto final	NM: Nombre de máquina
TC: Tiempo de ciclo del proceso	E: Energía consumida por el proceso
%B- Porcentaje de celdas que van a categoría B	TT: Tiempo de trabajo diario
DT: Días de trabajo	RC: Rango de cobertura
TO: Tiempo de operación	
CP: Cantidad de piezas trabajadas	

Fig. 17: VSM base de empresa de ensamble de paneles solares

Fuente: Elaboración propia

Nota: Operation time, processing time, Cycle time y Range of coverage se están traduciendo al español en la figura



A partir de la creación de este VSM, se puede realizar el siguiente análisis:

Se observa que el rango de cobertura existente en el inventario de producto en proceso antes de embalaje es muy alto, esto no se debe a la existencia de un cuello de botella en dicho proceso si no a una inexistente planeación de la producción, provocada por la adquisición de paneles a proveedores externos de China, siendo esto un factor que fomenta que se sobrepase la capacidad instalada actual para embalar, aunque otro proceso que se puede ver afectado por estas importaciones es el de ensamble final, pues los paneles llegan sin cajas de conexiones por lo que deben pasar por dicho proceso. El embalaje será considerado como una etapa aparte del sistema de ensamble.

Enfocándose en los tiempos de las etapas de ensamblaje, se tiene que un panel solar hipotético (P1), que sea ensamblado en la empresa “X” que está libre de otros pedidos, tarda 70.750 minutos en ser terminado de forma teórica, considerando en este cálculo el tiempo de ciclo de soldadura automatizada (asumiendo que sólo se deben procesar 72 celdas), el tiempo de operación de inspección, encapsulado, prueba de electroluminiscencia, ensamble final y simulación solar; así como el tiempo de procesamiento de selección de celdas, laminación y embalaje. Sin embargo, de forma práctica, el primer panel terminado al día tarda alrededor de 76.759 min dado que el proceso de laminación se realiza en pares por lo que P1 debe esperar al segundo panel en proceso para poder entrar a laminación, esta demora se debe a que 6 min es el tiempo que tarda el segundo panel en salir del proceso de soldadura.

A continuación, para analizar mejor los tiempos del proceso, se obtuvo el takt time (Tt) de la planta, con la fórmula:

$$Tt = \frac{\textit{Tiempo de producción disponible diario}}{\textit{Demanda diaria}}$$

Tomando en cuenta que todos los paneles, sin importar su tecnología, pasan por el mismo proceso y de acuerdo con la información proporcionada por la empresa, se tiene una demanda diaria de 110 paneles de todas las variantes que se manejan en la empresa. Entonces, se tiene que el Tt resulta:

$$Tt = \frac{460 \textit{ min}}{110 \textit{ paneles}} = 4.181 \textit{ min/panel}$$

Esto significa que, para cumplir con la demanda mensual de paneles solares se debe producir 1 panel solar cada 4.181 min, en la Fig.18 se aprecia que existen 4 procesos dónde se presenta un cuello de botella, siendo estos: Soldadura automatizada, inspección-encapsulado y prueba de simulación solar, siendo el área de inspección la más lenta puesto que la inspección y el encapsulado se realizan en las mismas mesas de trabajo, por lo que esta no se libera hasta que ambos procesos son concluidos. De acuerdo con esta información, se puede decir que actualmente no se puede cumplir con la demanda de paneles.

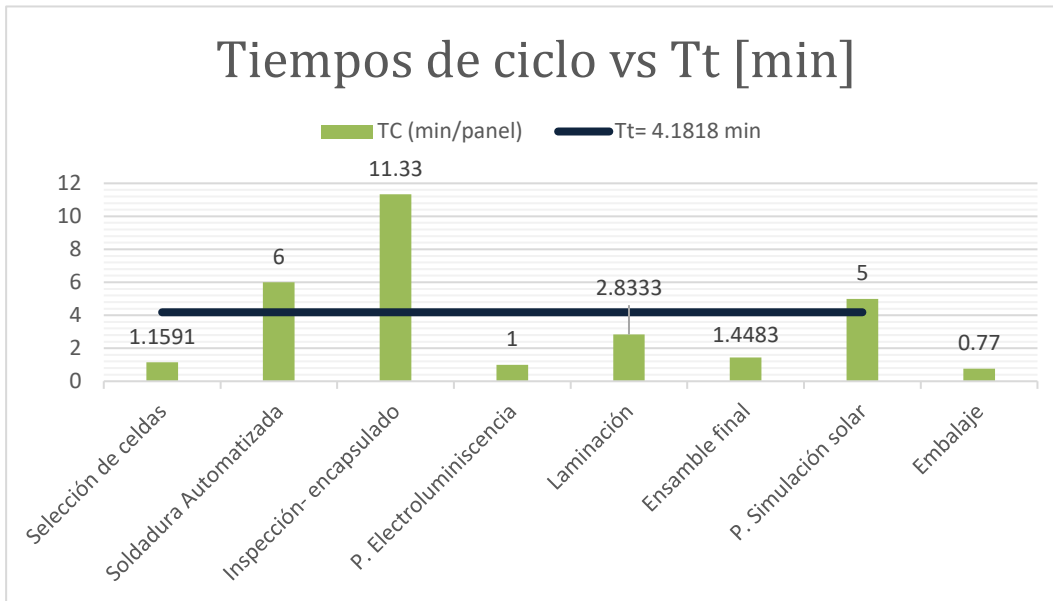


Fig. 18: Tiempos de ciclo de la empresa "X" y Takt time calculado
Fuente: Creación propia

Haciendo una breve simulación en Excel (consultar Anexo D para ver la simulación realizada) con los tiempos registrados, bajo la consideración de que en todos los procesos el puesto de trabajo que termine primero es al que se le va a asignar el siguiente panel y respetando la capacidad actual de ensamble, se confirma lo mencionado anteriormente pues después de la salida del primer panel, el tiempo promedio transcurrido para tener el siguiente panel listo varía entre 5 min como mínimo y 24 min como máximo, siendo el promedio de 11.36 min. Y alcanzando a ensamblarse entonces sólo 34 paneles diarios en 460 min de trabajo. Esto significa que existe un déficit del 69% en la cantidad de paneles ensamblados al día, para poder abastecer la demanda.

Enfocándonos en los objetos de estudio, de los 110 paneles diarios que debería ensamblar la empresa, 25 tienen que ser monoPERC de 380 W, considerando que la demanda mensual de este producto es de 600 paneles los cuales se deben ensamblar en 4 semanas de 6 días de trabajo. Dado que es un producto muy relevante para la empresa y representa más del 20% de la demanda diaria, se esperaría que se le designara entre 30% y 35% del tiempo de trabajo diario al ensamble de dichos paneles, es decir entre 2 hr y 18 min hasta 2hr 41 min. De acuerdo con esta información, sólo podrían ser ensamblados 12 paneles diarios de este tipo, por lo que hay una falta de abastecimiento de 312 paneles mensuales del tipo monoPERC 380 que son adquiridos de China, esto explicaría el inventario observado de este tipo de paneles en espera de embalaje o como producto terminado en cajas.

Para ampliar el análisis, se va a calcular el porcentaje de utilización (%U) de todo el sistema de ensamble, con la siguiente fórmula:

$$\%U = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \frac{TC_i}{Tt} \times 100$$

Dónde

n- cantidad de procesos contenidos en el VSM

TC- Tiempo de ciclo del proceso [min]

Tt- Takt time de la producción [min]

Por lo que,

$$\%U = \frac{100}{8} \times \frac{1.159 + 6 + 8.33 + 3.33 + 1 + 2.833 + 1.448 + 5}{4.181} = 86.985\%$$

Esto indica que teóricamente la capacidad instalada es suficiente para ensamblar la cantidad de productos necesarios mensualmente, incluso podrían ensamblarse más puesto que si el takt time fuera de 3.6507 min, es decir que al día la demanda fuera de 126 paneles, se tendría una utilización de 99.64% de la capacidad instalada. Sin embargo, dado que el sistema no se encuentra nivelado, las demoras en los procesos cuello de botella impiden que se cumpla con la demanda, por lo que se buscará una alternativa para nivelar el sistema.

Para poder estudiar más a detalle cada uno de los procesos catalogados como cuellos de botella (Fig.18), se identificó primero la cantidad de estaciones teóricas (#ET) que debería tener cada proceso para cumplir con la producción demandada, es decir, es el número de estaciones de trabajo mínimas y para ello se calculó primero el índice de productividad (IP) ideal del proceso, con la siguiente fórmula:

$$IP = \frac{\text{Cantidad de unidades producidas}}{\text{Tiempo de producción}} = \frac{1}{Tt}$$

Entonces, sabiendo que el Tt calculado es de 4.181 min, tenemos que:

$$IP = \frac{1}{4.1818} = 0.239$$

Designando un nivel de eficiencia esperado del 95%, y con los tiempos de procesamiento (para los procesos de elaboración por lotes) y de operación (para los procesos de elaboración por pieza), se procede a calcular el número de estaciones teóricas con la siguiente fórmula:

$$\#ET = \frac{\text{Tiempo} \times IP}{\text{Eficiencia}}$$

En la Tabla 11 se muestran los resultados ya redondeados de dicha operación, junto con la cantidad de estaciones reales de trabajo (#ER), en esta tabla se puede observar cómo es que

en los procesos dónde se mencionó la existencia de cuellos de botella, la cantidad de estaciones reales es menor a las estaciones teóricas de trabajo, estos procesos son soldadura automatizada, inspección y encapsulado, y simulación solar, el trabajo posterior estará enfocado en estos procesos y en la reducción del tiempo de embalaje para poder eliminar la cantidad de inventario de paneles suelos existentes en el suelo de la planta.

Tabla 11: Estaciones teóricas de trabajo vs estaciones reales

Proceso	Tiempo	Unidades	#ER	#Ei
Selección de celdas	2.414	min/lote	1	1
Soldadura Automatizada	6	min/panel	1	2
Inspección y encapsulado	35	min/panel	3	9
Electroluminiscencia	1	min/panel	1	1
Laminación	17	min/panel	6	5
Ensamble	4.344	min/panel	3	2
Simulación solar	5	min/panel	1	2
Embalaje	0.77	min/panel	1	1

Fuente: Creación propia

Despejando la fórmula de #ET, también se calculó el tiempo máximo que debería tener cada proceso con la finalidad de reconocer la reducción necesaria para no tener que aumentar estaciones de trabajo. En la tabla 12 se exponen estos resultados y de acuerdo con ellos, la soldadura tendría que disminuir su tiempo casi un 40%, inspección y encapsulado un 65% y simulación solar un 20%.

Tabla 12: Tiempo máximo por estación de trabajo

Proceso	Unidades	#ER	Tiempo máximo por estación *
Selección de celdas	min/lote	1	3.972
Soldadura Automatizada	min/panel	1	3.972
Inspección y encapsulado	min/panel	3	11.918
Electroluminiscencia	min/panel	1	3.972
Laminación	min/panel	6	23.836
Ensamble	min/panel	3	11.918
Simulación solar	min/panel	1	3.972
Embalaje	min/panel	1	3.972

Fuente: Creación propia

* Tiempo basado en los cálculos de balance de línea con respecto a Takt time

5. Inventario y evaluación del análisis de ciclo de vida de escenario base

En este capítulo, se van a exponer los resultados de 3 etapas de la metodología de ACV: análisis de inventario (ICV), evaluación de impacto (EICV) e interpretación de resultados. Es importante recalcar que el enfoque de este estudio es analizar sólo los procesos observados en planta pues son aquellos en los que se enfocarán las propuestas de mejora desarrolladas en el siguiente capítulo.

5.1. Inventario de ciclo de vida del escenario base

Como se explicó en la metodología, los datos de este inventario fueron obtenidos gracias a observaciones, mediciones y estimaciones propias realizadas para los procesos de selección de celdas, soldadura automatizada, inspección, encapsulado, prueba de electroluminiscencia, ensamble final, prueba de simulación solar y embalaje, en todos estos procesos fue considerado aparte el impacto asociado al transporte, producción de materia prima, disposición de residuos a relleno sanitario y el impacto propio del proceso (incluye electricidad, uso de suelo, aire comprimido y agua usada). A continuación se mostrará el cálculo de consumo de electricidad, uso de suelo, transportes y disposiciones a relleno sanitario consideradas en el inventario.

Los pesos unitarios de los materiales usados en el ensamble de paneles solares fueron obtenidos tanto por medición directa como por estimación con base en la densidad investigada del material. El motivo por el que algunos de los materiales no fueron medidos es debido a que eran elementos genéricos y considerados como materiales auxiliares, como en el caso del acero inoxidable del cúter o la capucha de polipropileno, o porque debido a sus dimensiones físicas no era posible pesarlos individualmente en el momento de la medición, por lo que se obtuvieron sus medidas y su densidad fue investigada, como es el caso del vidrio templado y el aluminio. El no tener la medición de estos elementos si bien repercute en la calidad de los datos, no influye de forma significativa pues en el caso de los elementos que son materia prima del panel (vidrio templado y aluminio), el resultado obtenido fue comparado con estimaciones mencionadas por la empresa y con lo reportado en el inventario de ciclo de vida del panel solar contenido en la base de datos de ecoinvent de nombre *photovoltaic panel production, single-Si wafer*. Estos pesos pueden ser revisados en la Tabla 13, dónde también se añade información sobre la emisión del vapor emitido en la soldadura y se menciona la fuente de la cual fue obtenida la densidad o si fue medida.

Tabla 13: Características de materiales usados en el ensamble de paneles solares, para obtención de ICV

Material	Densidad	Unidades	Peso Unitario	Unidades	Fuente
Látex de dedos	NC	NC	299.500	g	Medición

Acero inoxidable (cúter)	7.93	g/cm ³	19.032	g	(The World Material, 2020)
Capucha Polipropileno 100%	0.91	g/cm ³	0.8199	g	(Sanmetal, s.a., 2020)
Estaño (soldadura)	NC	NC	250	g	Proporcionado por la empresa
Flux de soldadura	NC	NC	0.030	g/g de soldadura	Estimación proporcionada por personal experimentado en soldadura
Vapor emitido por soldadura	NC	NC	2	mg/m ³	(Weldecote metals, 2015)
Estaño (inspección)	7.3	g/cm ³	10.249	g	(Carl Roth, 2018)
Vidrio templado	2500	kg/m ³	15.863	kg	(Espaicenor, 2020)
EVA	0.618	g/cm ³	267.262	g	Medición
TPT	0.225	g/cm ³	22.819	g	Medición
Papel encerado	0.132	g/cm ³	7.852	g	Medición
Aluminio 6061 anodizado (marco largo)	2.7	g/m ³	1025.913	g	(ReVesConsult, 2020)
Aluminio 6061 anodizado (marco corto)			519.4368	g	
Silicona	NC	NC	70	g/panel	Proporcionado por la empresa
Algodón (textil)	NC	NC	55	g	Medición
ABS	1.07	g/cm ³	157.290	g	(Prospector, 2020)
Cartón	605	g/cm ³	2.110	kg	Medición
Fleje PET 5/8	1.4	g/cm ³	222.736	g	Medición
Polietileno	0.93	g/cm ³	17.758	g	(Universidad de Barcelona, 2020)
Celdas solares	NC	NC	0.01006	kg	Medición

Fuente: Creación propia

NC: No calculado

Para calcular el consumo de electricidad en kWh por proceso y asociado a cada panel solar, se usó la siguiente fórmula.

kWh por proceso y panel

$$= \frac{h_i * ((PM * \#M_i) + (PL * \#L_i))}{\text{Cantidad de paneles monoPERC 380W ensamblados al día}}$$

Dónde,

i- {selección de celdas, soldadura automatizada, inspección..., etc.}

PM- potencia de cada máquina [kW]

#M_i - Cantidad de máquinas usadas en cada proceso

PL- potencia de cada lámpara [kW]

#L_i - Cantidad de lámparas usadas en cada proceso

h_i – Horas al día que el proceso está siendo realizado para producción de paneles monoPERC 380W

Para el cálculo de las lámparas usadas en cada proceso se recurrió al conteo por medio de videos y fotografías, la Fig.19 es un ejemplo de esto último y se consideró una potencia de 0.018 kW por lámpara dadas las características de las lámparas LED de uso industrial.



Fig. 19 : Ejemplo de imagen referencia para la estimación de luminaria
Fuente: Obtención propia

En las tablas 14 y 15 se muestra el tiempo de uso y energía consumida asociada a cada proceso en un día de trabajo en el que se destina el 35% del tiempo a la producción de paneles monoPERC 380 W, es decir sólo se producen 12 paneles diarios de este tipo. También se asume que no hay consumo eléctrico de ningún tipo si el proceso no se está

realizando.

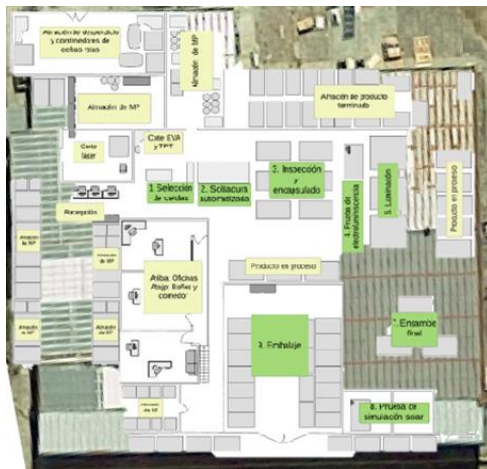


Fig. 20: Layout superpuesto con imagen real de planta

Fuente: Creación propia

Respecto al cálculo de uso de suelo por proceso, se tomó como referencia el layout realizado en las visitas y se hizo uso de la tecnología de Google Maps para calcular el tamaño de la planta y en consecuencia el tamaño de cada proceso. En la Fig. 20 se aprecia la superposición del layout y la plant, que fueron usados para este cálculo. En la tabla 16 se podrá apreciar más a detalle el área calculada por proceso y por panel, bajo la misma suposición de producción de paneles monoPERC 380 W que se menciona en el párrafo anterior.

Por otro lado, software ecoinvent solicita que los transportes sean calculados en la unidad ton*km (el resultado proporcionado por el software ya incluye el consumo de turbosina, por lo que para la estimación de los mismos se consideró la distancia entre Xinbei District, Changzhou, Jiangsu China (como el lugar de origen de los materiales) hasta la ubicación de la planta, considerando el transporte terrestre como los km entre la zona del proveedor hasta al aeropuerto más cercano en China y adicionando los km entre el aeropuerto mexicano más cercano a la planta y la empresa de ensamblaje. El transporte

terrestre es únicamente considera la distancia entre el aeropuerto en China y el aeropuerto en México. Para el cálculo de las toneladas, con ayuda del peso de cada material, la cantidad usada por panel, sabiendo que se producen 12 paneles diarios y que mensualmente se importan 312 paneles a los que es necesario insertar una caja de conexiones, se estimaron los kg de material que deben ser comprados mensualmente (un mes está conformado por 14 días de trabajo) y después se transformó este dato a toneladas. La cantidad de km*ton por proceso, se muestran en la tabla 17.

Tabla 14: Electricidad consumida por lámparas de cada proceso

Electricidad por luminaria				
Proceso	Cantidad de lámparas	W	Tiempo de trabajo diario [h]	Wh/día
Selección de celdas	2	18	0.232	8.345
Soldadura Automatizada	4	18	1.200	86.400
Inspección	9.23	18	1.667	276.900
Encapsulado	3.77	18	0.667	45.240
Electroluminiscencia	11	18	0.200	39.600
Laminación	19	18	0.567	193.800
Ensamble	15	18	0.603	162.934
Simulación solar	4	18	2.083	150.000
Embalaje	25	18	0.321	144.375
			Total	1107.5941

Fuente: Creación propia

Tabla 15: Electricidad consumida por máquinas de cada proceso

Proceso	W de máquina	# máquinas	Tiempo de trabajo diario [h]	WH/día
Selección de celdas	20.00	1	0.2318	4.636
Soldadura Automatizada	600.00	1	1.2000	720.000
Inspección	30.00	3	1.6667	150.000
Encapsulado	0.00	0	0.6667	0.000
Electroluminiscencia	530.00	1	0.2000	106.000
Laminación	3728.50	3	0.5667	6338.450
Ensamble	30.00	3	0.6035	54.311
Simulación solar	6200.00	1	2.0833	12916.667
Embalaje	0.00	0	0.3208	0.000
			Total	20290.06424

Fuente: Creación propia

Tabla 16: Cálculo de uso de suelo por proceso

Proceso	b	h	m ² /proceso
Selección de celdas	3.52	1.76	6.195
Soldadura Automatizada	5.28	2.464	13.009
Inspección	5.68	5.68	32.262
Encapsulado	2.32	2.32	5.382
Electroluminiscencia	1.76	3.52	6.195
Laminación	12.32	10.56	130.099
Ensamble	14.14	26.92	380.648
Simulación solar	4.58	3.52	16.107
Embalaje	14.02	29.5928	414.820

Fuente: Creación propia

Tabla 17: Toneladas de material transportadas mensualmente.

Proceso	Material	Cantidad mensual	Peso (ton)
Selección de celdas	Celdas	20736	0.209
Soldadura automatizada	Soldadura de estaño	72	0.072
Inspección	Soldadura de estaño	2.9517696	0.003
Encapsulado	Vidrio templado	288	4.569
	EVA	576	0.154
	TPT	288	0.007
Ensamble final ¹	Aluminio largo	1200	1.231
	Aluminio corto	1200	0.623
	Silicona	42	0.042
	ABS	94.374	0.094
	Soldadura de estaño	15.0234	0.015
	Paneles completos	312	6.924

Fuente: Creación propia

Cálculos únicamente para paneles monoPERC 380W, considerando distancias en avión de 13590 km y 103.81 km de transporte terrestre

¹ Para el cálculo de la cantidad mensual requerida de los materiales en ensamble final, se considera que diariamente pasan por este proceso 25 paneles pues también los paneles importados requieren la colocación de los marcos de aluminio.

Para determinar la cantidad de disposiciones a relleno sanitario correspondiente a cada proceso, se tomaron en cuenta dos tipos de residuos, el primero es un residuo de celdas fracturadas que se ha acumulado a lo largo de 2 años de producción de tecnología monoPERC en la empresa y el segundo tipo es el de los residuos generados en cada una de las etapas, estos se refieren a celdas rotas por la manipulación, desechadas por defectuosas y a paneles dañados que ya no pueden ser comercializados ni como de menor calidad y cuyos porcentajes están representados en el VSM.

Respecto a las celdas fracturadas acumuladas en el tiempo, se observaron 4 cajas llenas, con dimensiones de 80x100x100 cm cada una. Para calcular la cantidad de celdas contenidas en cada caja se consideró un factor volumétrico de conversión (también conocido como factor

de esponjamiento) de 1.25 para el volumen de celdas y que sólo 35% de dichos residuos corresponden a los generados por el panel en estudio. Para poder identificar la cantidad de celdas fracturadas (acumuladas) por proceso se tomaron en cuenta aquellos procesos donde se manipulan celdas de forma individual, es decir, aquellos previos a la laminación, también asumió que el 85% de las celdas fracturadas son generadas en el proceso de selección de celdas y el restante 15% está repartido de forma equitativa en los procesos restantes, finalmente el resultado obtenido para cada proceso fue después convertido a la unidad funcional y el resultado puede observarse en la Tabla 18.

Tabla 18: Celdas fracturadas (acumuladas) por proceso y unidad funcional

Proceso	Cantidad
Selección de celdas	15.4133
Soldadura automatizada	0.9633
Inspección	0.9633
Encapsulado	0.9633
Prueba de electroluminiscencia.	0.9633

Fuente: Creación propia

En el anexo E se muestra el inventario completo, con cantidades correspondientes a la unidad funcional (1 m² de panel solar monoPERC de 380 W), que fue considerado para realizar la evaluación del impacto en las diferentes categorías.

5.2. Resultados de Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida

Como se ha mencionado anteriormente, mensualmente se importan 312 paneles monoPERC de 380 W, mientras que en planta en México que se ensamblan sólo 288, es decir que, por cada panel ensamblado en México, son importados 1.08 paneles de China. La EICV en la unidad funcional se calculó considerando dos escenarios:

- por cada m² de panel ensamblado en México se suman la producción de paneles provenientes de China y el correspondiente transporte hacia México (Tabla 19),
- m² de panel ensamblado en México y únicamente el transporte de los paneles importados (Tabla 20).

Tabla 19: Resultados de la EICV utilizando Recipe, considerando la producción e importación de paneles de China.

Categoría	Resultado	Unidad
Cambio climático (GWP20)	678.8688	kg CO ₂ eq al aire
Ecotoxicidad terrestre	6.2216	kg 1.4-DCB eq a suelo industrial
Ecotoxicidad agua dulce	5.9672	kg 1.4- DCB eq a agua dulce
Eutrofización de agua dulce	0.2457	kg P eq a agua dulce
Agotamiento del ozono	7.6103E-05	kg CFC-11 eq al aire
Toxicidad humana	83.51041	kg 1.4- DCB eq a aire urbano
Uso de suelo urbano	6.2204	m ² × año de tierra de cultivo anual

Uso de suelo de agricultura	28.4233	
Acidificación terrestre	2.3379	kg SO ₂ eq al aire
Creación fotoquímica de oxidantes	2.5040	Kg NMVOC al aire
Material particulado	1.3393	kg PM10 eq al aire

Tabla 20: Resultados de la EICV utilizando Recipe, considerando sólo el transporte de paneles importados.

Categoría	Resultado	Unidad
Cambio climático (GWP20)	357.4876	kg CO ₂ eq al aire
Ecotoxicidad terrestre	5.6896	kg 1.4-DCB eq a suelo industrial
Ecotoxicidad agua dulce	2.6867	kg 1.4- DCB eq a agua dulce
Eutrofización de agua dulce	0.1081	kg P eq a agua dulce
Agotamiento del ozono	4.45E-05	kg CFC-11 eq al aire
Toxicidad humana	28.2422	kg 1.4- DCB eq a aire urbano
Uso de suelo urbano	2.6667	m ² × año de tierra de cultivo anual
Uso de suelo de agricultura	15.4488	
Acidificación terrestre	1.2352	kg SO ₂ eq al aire
Creación fotoquímica de oxidantes	1.4545	Kg NMVOC al aire
Material particulado	0.65664	kg PM10 eq al aire

Es importante mencionar que en línea con el enfoque de la tesis, en análisis posteriores serán los resultados de la Tabla 20 los que se tomen en cuenta. En la Tabla 21 estos resultados se comparan con los resultados obtenidos directamente de la base de datos de ecoinvent para 1 m² de panel solar de 60 celdas solares con dimensiones de 156 x 156 cm² y 224 W de potencia y que están basados en el ACV de Jungbluth et al. (2012), también se comparan con los resultados obtenidos por Soares et al. (2018), Yang et al. (2015) y Hong et al. (2016) que son algunos de los estudios que fueron mencionados en el capítulo 3. Metodología.

Tabla 21: Comparación de resultados de la EICV de 1m² de panel solar, obtenida de la base de datos de ecoinvent, otros estudios y resultados de esta tesis.

Categoría	Unidad	Resultado ICV de este estudio	Resultado base de datos de ecoinvent	% diferencia	Otro resultado de referencia	% diferencia
Cambio climático (GWP20)	kg CO ₂ -eq al aire	357.48765	315.75	13.22	340 ¹	5.14
Ecotoxicidad terrestre	kg 1.4-DCB- eq a suelo industrial	5.68965	0.48	1085.34	0.0120 ²	47,178
Ecotoxicidad agua dulce	kg 1.4-DCB- eq a agua dulce	2.68678	2.69	0.12	2.85 ²	6.00
Eutrofización de agua dulce	kg P- eq a agua dulce	0.10817	0.13	16.79	0.29 ²	62.00
Agotamiento del ozono	kg CFC-11- eq al aire	4.45E-05	3.24E-05	37.27	1.11E-04 ²	60.00

Toxicidad humana	kg 1,4-DCB-eq a aire urbano	28.24223	27.80	1.59	11.91 ²	137.00
Uso de suelo urbano	m ² × año de tierra de cultivo anual	2.6667	3.99	33.17	0.83 ²	221.00
Uso de suelo de agricultura		15.4488	21.69	28.77	No se pudo realizar la comparación**	
Acidificación terrestre	kg SO ₂ -eq al aire	1.23525	0.98	26.05	1.00 ¹	23.53
Creación fotoquímica de ozono	Kg NMVOC al aire	1.45455	1.08	34.68	0.3 ¹	384.85
Material particulado	kg PM10-eq al aire	0.65664	0.72	8.80	0.70 ³	6.12

Fuente: Con información obtenida de 1. Soares et al., (2018), 2. Yang et al., (2015), 3. Hong et al., (2016)

Nota: Los estudios realizados por Yang et al., (2015), y .Hong et al., (2016) tienen como unidad funcional 1kWp, en esta tabla se muestra la conversión de los resultados que obtuvieron, expresados en la unidad funcional de 1m², la conversión se pudo realizar al saber que un panel de los evaluados en este estudio tiene una potencia de 380 Wp y que el área del panel es de 1.98 m².

**No se pudo realizar la comparación de uso de suelo de agricultura debido a que el estudio de Rashedi et al., (2020) es el único que puede ser comparable por el alcance y unidad funcional, pero no muestra sus resultados de forma cuantitativa, sólo de forma relativa.

Como se aprecia en la Tabla 21, los resultados obtenidos en este escenario son consistentes al ser los resultados del mismo orden en todas las categorías salvo Ecoxicidad terrestre, categoría en la que la diferencia con ambas comparaciones realizadas muestra diferencias significativas al ser el resultado obtenido en este estudio más de 10 veces mayor que el deecoinvent y más de 400 mayor al de Yang et al. (2015) , esto se debe a que en este estudio se está considerando la disposición final de celdas fracturadas que fueron calculadas en la Tabla 18.

Tabla 22: Comparación de electricidad usada en este estudio y en literatura

Proceso	Unidad	Escenario base	Vellini et al (2017)	% dif.	Yang et al (2015)	% dif.
Ensamble de panel	kWh/m ²	0.605	4.723	87.17%	4.790	87.36%
	País	México	Italia		China	

Fuente: : Con información obtenida de Vellini et al., (2017) y Yang et al., (2015).

Nota: Los resultados de los estudios fueron transformados a la unidad funcional, para poder ser comparadas.

Por otro lado, en la Tabla 22 se aprecia la electricidad considerada para este estudio en comparación con la usada por otros dos artículos, si bien hay diferencias significativas se debe tomar en cuenta que la metodología de este estudio permite que el consumo eléctrico sea un dato de primer orden, mientras que en los otros estudios y en general en la literatura es un dato de segundo orden.

También es importante decir que en los resultados obtenidos, es el proceso de producción de celda el mayor causante del impacto en todas las categorías, esto es consistente con lo descrito por Muteri et al. (2020) en *Review on Life Cycle Assessment of Solar Photovoltaic*

Panels pues ahí se menciona que para la primera generación de paneles fotovoltaicos, el mayor causante de impacto para la mayoría de los índices ambientales en los estudios que analiza, fue la producción de silicio o la cristalización del lingote necesario para la formación de celdas solares. Por otro lado, menciona que se identificó que los impactos ambientales importantes, que no están directamente relacionado con la producción de celda o consumo de energía, pueden atribuirse a la producción de materiales como aluminio y acero usados en el marco del panel. A continuación, se podrá verificar dichas afirmaciones pues se muestran los procesos con mayor impacto, por categoría.

- **Cambio climático (GWP20)**

De acuerdo con los resultados obtenidos, se muestran en la Fig. 21 los tipos de impacto considerados en el análisis y el porcentaje del impacto que representa cada uno de ellos en esta categoría, en esta misma imagen se puede observar que la producción de celda representa el 61.04% del impacto total de la categoría siendo el proceso con mayor impacto y se debe a que esta producción emite 174.95 kg de CO₂ al aire y 0.5067 kg de metano al aire, el segundo lugar es ocupado por el impacto asociado al transporte de la materia prima y se debe a las emisiones de 123.323 kg de CO₂ y 0.048 kg de metano al aire; el tercer lugar es ocupado por el impacto de la producción de materia prima distinta a celda solar, en particular es debido a la producción del vidrio templado que emite 7.6980 kg de CO₂ y 0.0131 kg de metano al aire.

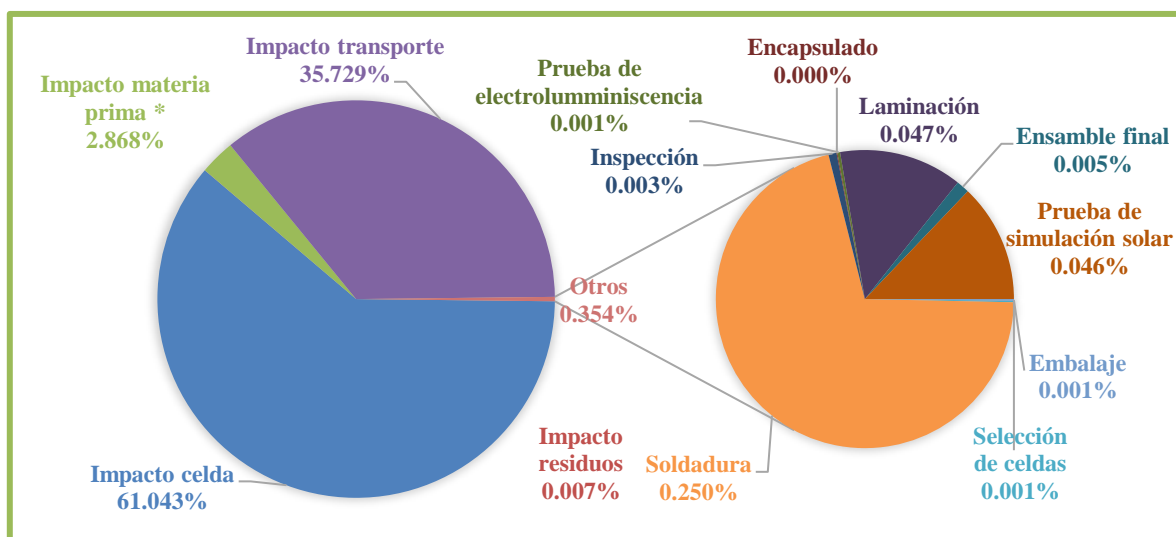


Fig. 21 : Resultados Cambio Climático en escenario base

* El impacto de materia prima involucra al impacto causado por la producción de vidrio templado, aluminio, EVA, TPT, soldadura de estaño, silicona y ABS de caja de conexiones. También en este impacto se está considerando la producción de pallets usados en el embalaje.

NOTA: Del lado derecho se divide el impacto asociado al ensamble (luz, agua, uso de suelo, aire comprimido) de cada uno de los procesos.

Tabla 23: Cambio climático- Impacto por proceso

	Selección de celas	Soldadura	Inspección	Encapsulado	Prueba electroluminiscencia	Laminación	Ensamble final	Prueba de simulación solar	Embalaje
Cambio climático [kg CO₂-eq]									
Impacto materia prima	218.219	0.0101	1.01E-02	8.756		0.0007	0.938		0.539
Impacto transporte de materia prima	1.9206	0.0272	2.72E-02	43.541			82.208		
Impacto ensamble (electricidad, uso de suelo, aire comprimido, agua)	0.0021	0.8940	0.0111	0.001	0.003	0.169	0.017	0.162	0.002
Impacto residuos	0.0028	2.44E-04	0.0002	0.001		0.0035	0.016	0.0003	
Impacto total por proceso	220.145	0.9316	0.0486	52.299	0.003	0.173	83.181	0.163	0.540
Impacto total de ensamble de panel	357.487								

Nota: La celda marcada con color rosa indica el impacto asociado a la producción de celdas solares.

En la Tabla 23 se muestran con más detalle los tipos de impacto considerado para cada proceso de ensamble y el total del impacto por cada uno de ellos, siendo observable en ella que respecto a materia prima es la producción de celdas solares la de mayor impacto, respecto al transporte de materia prima es el proceso de ensamble en el que se registra el mayor impacto y esto se debe a que en ese proceso es donde se introducen los paneles importados, sobre el impacto que hace referencia al ensamble es el proceso de soldadura el de mayor impacto y esto se debe al consumo de electricidad requerido por dicho proceso, finalmente respecto a residuos es también el proceso de ensamble final quien tiene mayor impacto y se debe a que en este proceso se generan residuos de trapos de algodón, aluminio, plástico ABS de las cajas de conexiones y agua.

Como se ha mencionado anteriormente, los resultados de esta categoría son consistentes, de acuerdo con los datos proporcionados en la base de datos deecoinvent que reportan la emisión de 315.75 kg de CO₂- eq y también son consistentes con Soares, Athayde & Nunes (2018), quienes obtuvieron 340 kg de CO₂-eq en esta categoría, por cada m² de panel solar, mientras que en el modelo generado para esta tesis, el resultado es de 357.487 kg de CO₂-eq

- **Ecotoxicidad terrestre**

En la Fig. 22 se muestran los tipos de impacto considerados en el análisis y el porcentaje del impacto que representa cada uno de ellos en esta categoría, se puede apreciar en ella que el 91.28% del impacto es debido a los residuos y se debe en particular a la disposición final de

celdas fracturadas y dañadas en los procesos pues se emiten en total 0.005 kg de plata al suelo durante su disposición final. Por otro lado, el segundo impacto más grande es el asociado con la producción de celdas pues dicho proceso emite 0.0007 kg de plata al suelo. También se puede apreciar que el impacto asociado al ensamble es prácticamente nulo.

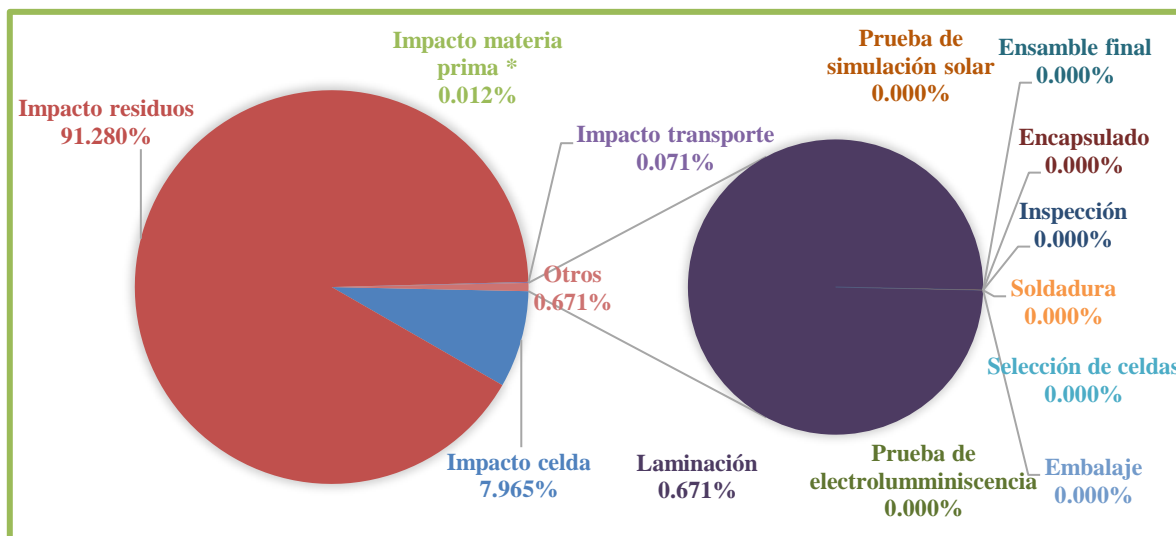


Fig. 22: Resultados Ecotoxicidad terrestre en escenario base

* El impacto de materia prima involucra al impacto causado por la producción de vidrio templado, aluminio, EVA, TPT, soldadura de estaño, silicona y ABS de caja de conexiones. También en este impacto se está considerando la producción de pallets usados en el embalaje.

NOTA: Del lado derecho se divide el impacto asociado al ensamble (luz, agua, uso de suelo, aire comprimido) de cada uno de los procesos

En la Tabla 24 se puede observar cada tipo de impacto considerado y el impacto por cada uno de los procesos de ensamble de paneles solares, también en ella se puede identificar que para el impacto por materia prima el proceso con más impacto asociado es la producción de celdas solares, el impacto por transporte de materia prima es mayor para ensamble final y se debe al transporte de paneles solares importados, el impacto del ensamble es mayor en el proceso de laminación y es por la electricidad que consume dicho proceso, respecto al impacto por residuos la cantidad de celdas fracturadas que es generada en la selección de celdas es la principal responsable del impacto.

Tabla 24: Ecotoxicidad terrestre- Impacto por proceso

	Selección de celdas	Soldadura	Inspección	Encapsulado	Prueba electroluminiscencia	Laminación	Ensamble final	Prueba de simulación solar	Embalaje
Ecotoxicidad terrestre 1.4 DCB-eq									
Impacto materia prima	0.4563	2.92E-05	1.20E-06	0.0005		5.07E-07	0.0001		0.0001

Impacto transporte de materia prima	0.0001	2.11E-05	8.64E-07	0.0014			0.0026		
Impacto ensamble (electricidad, uso de suelo, aire comprimido, agua)	2.00E-08	1.24E-06	6.59E-07	6.98E-08	0.000	0.0385	1.61E-07	0.0000	1.32E-07
Impacto residuos	4.1455	0.0140	1.0243	1.45E-07		0.0384	1.10E-06	0.0064	
Impacto total por proceso	4.6018	0.0140	1.0243	0.0019	0.000	0.0769	0.0027	0.0064	0.0001
Impacto total de ensamble de panel	5.7281								

Nota: La celda marcada con color rosa indica el impacto asociado a la producción de celdas solares

Como se mencionó anteriormente, los resultados aquí mostrados son considerablemente mayores a los obtenidos por medio de la base de datos deecoinvent y a los registrados por Yang et al. (2015) debido a las consideraciones de celdas fracturadas almacenadas que se realizaron en este escenario.

- **Ecotoxicidad agua dulce**

Se pueden observar los resultados de esta categoría, divididos por tipo de impacto considerado en la Fig.22, gracias a la cual también se puede observar que el proceso de producción de celdas solares representa el 82.145% del total del impacto calculado, esto se debe a las emisiones al agua de : 0.008 kg de iones de níquel, 0.69 kg de manganeso, 0.0005 kg de iones de plata, 0.001 kg de iones de vanadio, 0.021 kg de iones de zinc, 0.003 kg de bromo, 0.0002 kg de berilio, 0.002 kg de cobalto, 0.017 kg de bario y 0.0002 kg de selenio. También se puede identificar en la Fig.23 que el impacto de la disposición de residuos es el segundo más grande, esto es debido a que emite 0.005 kg de plata al suelo, el tercer mayor impacto es el del transporte de materia prima ya que emite al agua: 0.001kg de bromo, 0.001 kg de níquel, 0.001 kg de iones de vanadio, 0.0009 kg de hidrocarburos, 0.001 kg de magnesio, 0.001 kg de bario, 0.0002 kg de iones de zinc, 4.50E-6 kg de berilio, 4.87E-5 kg de bromo, 4.12E-6 kg de iones de plata y 3.88E-5 kg de cobalto. Finalmente se puede decir que el tercer impacto más grande es por la producción de materia prima distinta a celdas solares, especialmente es debido a la producción de vidrio templado y soldadura de estaño.

En la Tabla 25 se muestran los resultados de forma más detallada por tipo y proceso, gracias a ella se puede identificar que el proceso con mayor impacto en el tipo de impacto por materia prima es la producción de celdas solares, al igual que en las dos categorías previas el proceso de ensamble final es el que tiene más impacto por transporte de materia prima y es debido a la importación de paneles que se requiere en este escenario. Respecto al impacto por ensamble el de mayor impacto es el proceso de inspección y se debe a la electricidad que requiere. Sobre el impacto por residuos el proceso de mayor impacto es la disposición final de celdas fracturadas generadas en el proceso de selección de celdas.

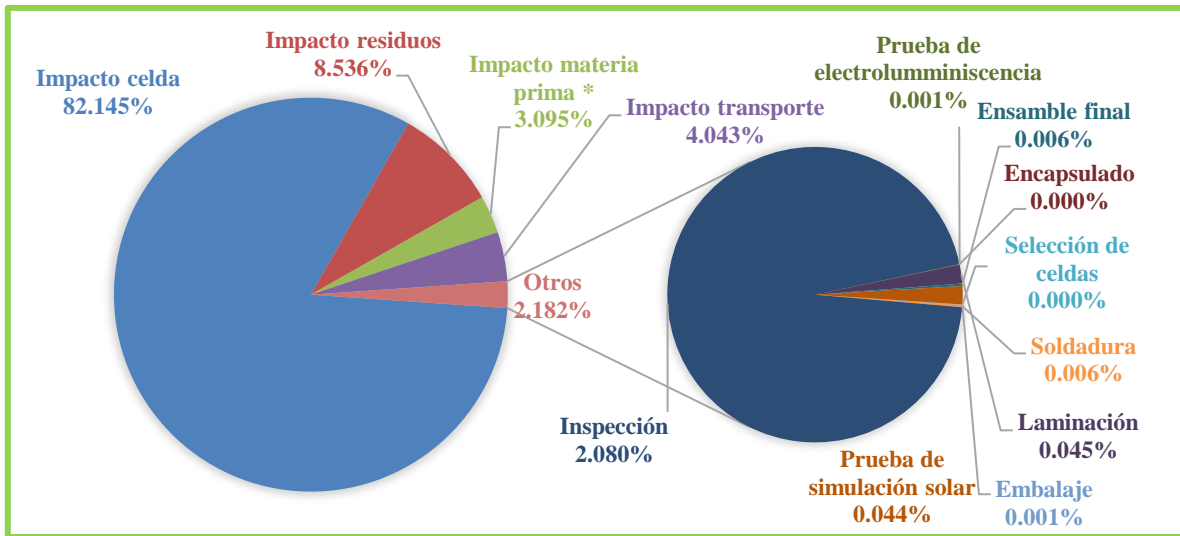


Fig. 23: Resultados Ecotoxicidad terrestre en escenario base

* El impacto de materia prima involucra al impacto causado por la producción de vidrio templado, aluminio, EVA, TPT, soldadura de estaño, silicona y ABS de caja de conexiones. También en este impacto se está considerando la producción de pallets usados en el embalaje.

NOTA: Del lado derecho se divide el impacto asociado al ensamble (luz, agua, uso de suelo, aire comprimido) de cada uno de los procesos

Tabla 25: Ecotoxicidad de agua dulce- Impacto por proceso

	Selección de celdas	Soldadura	Inspección	Encapsulado	Prueba electroluminiscencia	Laminación	Ensamble final	Prueba de simulación solar	Embalaje
Ecotoxicidad de agua dulce 1.4 DCB-eq									
Impacto materia prima	2.2071	0.0257	0.0011	0.0413		6.34E-06	0.0113		0.0038
Impacto transporte de materia prima	0.0016	0.0006	0.0000	0.0368			0.0696		
Impacto ensamble (electricidad, uso de suelo, aire comprimido, agua)	8.75E-06	0.0001	0.0559	1.13E-06	3.00E-05	0.0012	0.0002	0.0012	1.81E-05
Impacto residuos	0.2259	0.0008	1.08E-06	0.0002		0.0021	2.10E-05	0.0004	
Impacto total por proceso	2.4345	0.0271	0.0570	0.0784	0.0000	0.0033	0.0811	0.0015	0.0038
Impacto total de ensamble de panel	2.6868								

Fuente: Nota: La celda marcada con color rosa indica el impacto asociado a la producción de celdas solares

Estos resultados son consistentes con los obtenidos por ecoinvent y con el resultado obtenido por Yang et al. (2015).

- **Eutrofización de agua dulce**

En la Fig.24 se pueden visualizar los resultados para esta categoría por cada tipo de impacto que fue medido, gracias a ello es posible identificar que la producción de celdas fotovoltaicas es el proceso de mayor impacto al ser responsable del 96.33% del impacto total ya que emite 0.315 kg de fosfatos al agua, en segundo lugar se encuentra el proceso de transporte de materia prima que emite 0.005 kg de fosfatos al agua y 4.93E-5 kg de fósforo al agua.

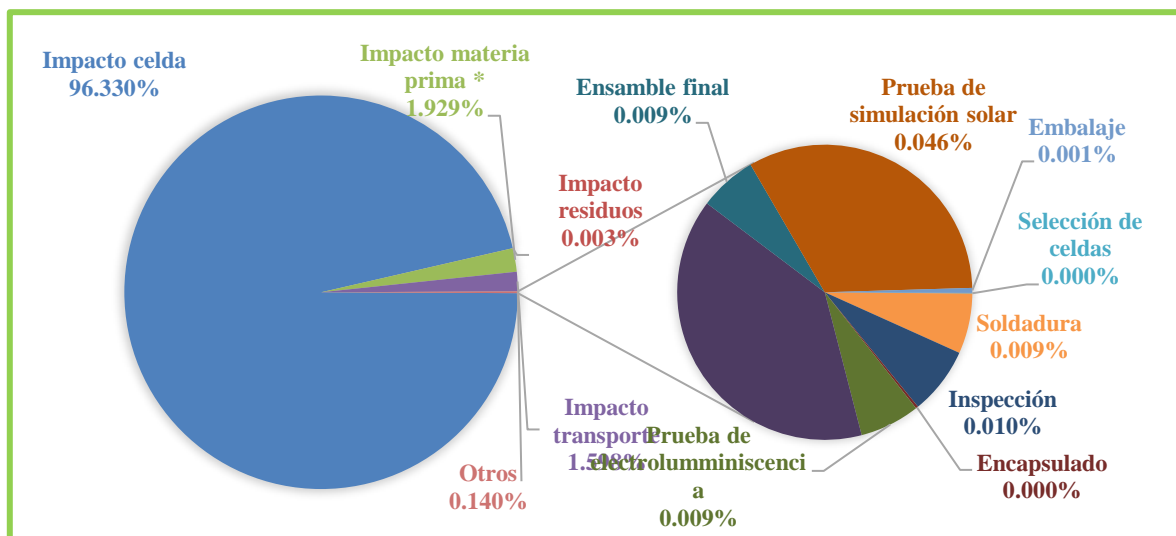


Fig. 24: Resultados Eutrofización de agua dulce

* El impacto de materia prima involucra al impacto causado por la producción de vidrio templado, aluminio, EVA, TPT, soldadura de estaño, silicona y ABS de caja de conexiones. También en este impacto se está considerando la producción de pallets usados en el embalaje.

NOTA: Del lado derecho se divide el impacto asociado al ensamble (luz, agua, uso de suelo, aire comprimido) de cada uno de los procesos

En la Tabla 26 se puede visualizar más a detalle el impacto por tipo y por proceso, gracias a ello se puede identificar que en materia prima el mayor impacto es debido a la producción de celdas solares, respecto al impacto por transporte es en el ensamble final donde se ve reflejada más carga ambiental y se debe a la necesidad de importar paneles, el mayor impacto debido al ensamble se debe al consumo de electricidad en el proceso de laminación y respecto a residuos el mayor impacto se encuentra en el proceso de inspección y se debe a las consideraciones hechas sobre la cantidad de celdas fracturadas y residuos de soldadura que son llevados a disposición final.

Como fue mencionado previamente y se puede apreciar en la Tabla 21, los resultados obtenidos en esta tesis son consistentes con los resultados de ecoinvent y los obtenidos por Yang et al. (2015).

Tabla 26: Eutrofización de agua dulce- Impacto por proceso

	Selección de celas	Soldadura	Inspección	Encapsulado	Prueba electroluminiscencia	Laminación	Ensamble final	Prueba de simulación solar	Embalaje
Eutrofización de agua dulce [kg de P eq]									
Impacto materia prima	0.1042	0.0006	2.56E-05	0.0010		1.93E-07	0.0003		0.0001
Impacto transporte de materia prima	2.00E-05	1.00E-05	3.61E-07	0.0006			0.0011		
Impacto ensamble (electricidad, uso de suelo, aire comprimido, agua)	1.18E-07	1.00E-05	1.12E-05	4.10E-07	1.00E-05	0.0001	9.60E-06	5.00E-05	8.29E-07
Impacto residuos	9.74E-08	3.11E-10	2.84E-06	0.0000		1.03E-07	3.95E-07	1.66E-08	
Impacto total por proceso	0.1042	0.0006	0.0000	0.0016	1.00E-05	0.0001	0.0015	0.0000	0.0001
Impacto total de ensamble de panel	0.1082								

Nota: La celda marcada con color rosa indica el impacto asociado a la producción de celdas solares

- **Agotamiento del ozono**

Observando la Fig.25 se puede identificar que existen dos procesos que representan la mayor parte del impacto total de esta categoría, siendo el de transporte el de mayor impacto debido a la emisión de 1.87 kg de Halón 1301 y el de la producción de celda el segundo con mayor impacto debido a que emite: 1.04E-5 kg de R-10, 4.06E-7 kg de Halón 131, 4.60E-6 kg de CFC-12, 3.57E-7 kg de Halón 1211 y 2.80E-5 kg HCFC-22. El tercer mayor impacto de esta categoría se debe a la producción de materia prima distinta a celdas solares, es especial se debe a la producción de vidrio templado que emite 4.73E-8 kg de Halón 1301 y 7.12E-9 kg de Halón 1211.

En la Tabla 27 se desglosa de forma cuantitativa el impacto por tipo y por proceso, gracias a lo que se puede identificar que respecto al impacto de producción de materia prima es la producción de celdas solares la responsable de la mayor cantidad de impacto, respecto al impacto de transporte es el transporte de paneles importados el de mayor impacto, sobre el impacto por ensamble es el proceso de laminación el que tiene mayor impacto, especialmente por el consumo de energía requerida en dicho proceso y respecto al impacto por residuos el mayor es el de la disposición final de celdas fracturadas en selección de celdas.

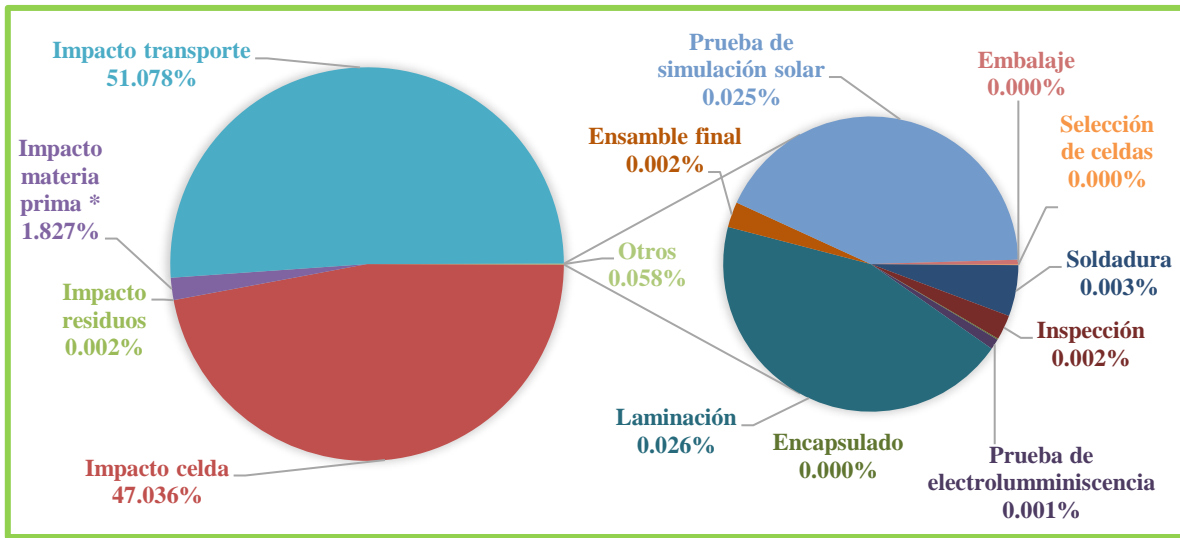


Fig. 25: Resultados agotamiento de ozono

* El impacto de materia prima involucra al impacto causado por la producción de vidrio templado, aluminio, EVA, TPT, soldadura de estaño, silicona y ABS de caja de conexiones. También en este impacto se está considerando la producción de pallets usados en el embalaje.

NOTA: Del lado derecho se divide el impacto asociado al ensamble (luz, agua, uso de suelo, aire comprimido) de cada uno de los procesos

Tabla 27: Agotamiento del ozono- Impacto por proceso

	Selección de celdas	Soldadura	Inspección	Encapsulado	Prueba electroluminiscencia	Laminación	Ensamble final	Prueba de simulación solar	Embalaje
Agotamiento del ozono [kg de CFC-11-eq]									
Impacto materia prima	2.09E-05	1.47E-08	6.11E-10	6.22E-07		4.90E-11	5.67E-08		1.18E-07
Impacto transporte de materia prima	3.40E-07	1.17E-07	4.81E-09	7.71E-06			1.45E-05		
Impacto ensamble (electricidad, uso de suelo, aire comprimido, agua)	2.27E-11	1.44E-09	7.03E-10	2.94E-11	3.00E-10	1.14E-08	7.18E-10	1.10E-08	1.29E-10
Impacto residuos	3.08E-10	7.67E-11	7.67E-11	5.81E-13		3.32E-11	2.82E-10	5.46E-12	
Impacto total por proceso	2.13E-05	1.34E-07	6.20E-09	8.33E-06	3.00E-10	1.15E-08	1.46E-05	1.10E-08	1.18E-07
Impacto total de ensamble de panel	4.45E-05								

Nota: La celda marcada con color rosa indica el impacto asociado a la producción de celdas solares

Como fue mencionado previamente, el resultado de esta categoría es consistente con los resultados de la base de datos de ecoinvent y con Yang et al. (2015).

- **Toxicidad humana**

En la Fig.26 se pueden observar los resultados por cada tipo de impacto evaluado gracias a lo cual se aprecia que la mayor cantidad de impacto está asociada a la producción de celdas solares debido a las emisiones de: 0.0006 kg de plata al aire, 0.0006 kg de plomo al aire, 8.14E-5 kg de fósforo al suelo, 0.0003 kg de iones de arsénico al agua, 0.0002 kg de cloro al aire, 0.017 kg de bario al agua, 4.14E-5 kg de fósforo al aire, 0.069 kg de manganeso al agua, 0.0002 kg de iones de arsénico al agua y 8.76E-5 kg de vanadio al aire; el segundo proceso con mayor impacto es la disposición de residuos debido a la emisión de 0.005 kg de platas al suelo; el tercer impacto más grande es por el proceso de transporte de materia prima que genera emisiones de: 4.93E-5 kg de fósforo al suelo, 0.0001 kg de vanadio al aire, 0.0006 kg de plomo al aire, 9.66 kg de mercurio al aire, 0.001 kg de bario al aire, 7.50E-6 kg de antimonio al aire, entre otras sustancias; y la producción de materia prima diferente a celdas solares es el cuarto proceso con mayor impacto, en particular la producción de vidrio templado que emite 3.44E-5 kg de fósforo al agua, 0.0001 kg de fluoruro de hidrógeno, 3.06E-6 kg de antimonio al aire, 7.28E-6 kg de iones de arsénico al aire, 1.84E-8 kg de mercurio al aire y 2.31 kg de vanadio al aire.

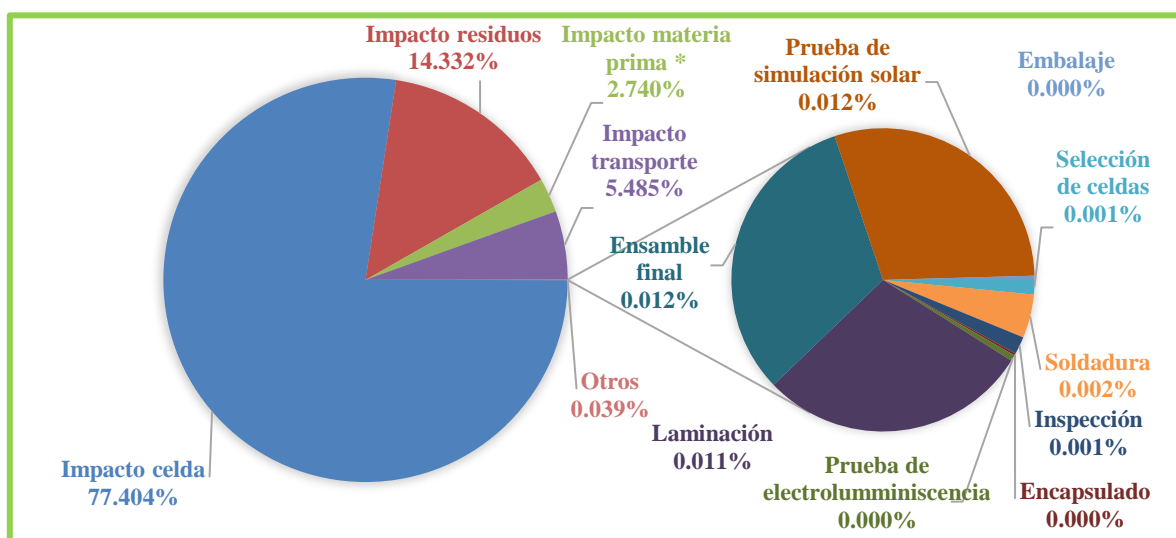


Fig. 26: Resultados Toxicidad humana

* El impacto de materia prima involucra al impacto causado por la producción de vidrio templado, aluminio, EVA, TPT, soldadura de estaño, silicona y ABS de caja de conexiones. También en este impacto se está considerando la producción de pallets usados en el embalaje.

NOTA: Del lado derecho se divide el impacto asociado al ensamble (luz, agua, uso de suelo, aire comprimido) de cada uno de los procesos

En la Tabla 28 se pueden apreciar de forma más detallada los tipos de impacto por procesos, con lo que se puede identificar que respecto al impacto de producción de materia prima el proceso con mayor impacto es la producción de celdas solares; sobre el impacto por transporte, el proceso con mayor impacto es ensamble final y se debe a la importación de paneles; la generación de la electricidad consumida en la laminación es el proceso con mayor impacto en el impacto por ensamble, por otro lado, la mayor cantidad de impacto relacionada

con disposición final de residuos es parte del proceso de selección de celdas, esto se debe a las consideraciones hechas sobre celdas fracturadas en dicho proceso.

Tabla 28: Toxicidad humana- Impacto por proceso

	Selección de celas	Soldadura	Inspección	Encapsulado	Prueba electroluminiscencia	Laminación	Ensamble final	Prueba de simulación solar	Embalaje
Toxicidad humana [kg de 1.4 DCB-eq]									
Impacto materia prima	21.8606	0.0763	0.0031	0.5567		0.0002	0.0419		0.0957
Impacto transporte de materia prima	0.0232	0.0080	0.0003	0.5256			0.9920		
Impacto ensamble (electricidad, uso de suelo, aire comprimido, agua)	0.0002	0.0005	0.0002	2.72E-05	0.0001	0.0032	0.0035	0.0033	0.0001
Impacto residuos	3.2081	0.0108	0.7927	0.0010		0.0300	9.80E-06	0.0050	
Impacto total por proceso	25.0920	0.0956	0.7964	1.0833	0.0001	0.0334	1.0375	0.0082	0.0957
Impacto total de ensamble de panel	28.2422								

Nota: La celda marcada con color rosa indica el impacto asociado a la producción de celdas solares

- **Uso de suelo urbano**

En esta categoría, la producción de celdas solares es el proceso con mayor impacto, esto se debe a que utiliza 2.042 m² de tierra anual para dicha producción, este valor representa el 76.58% del impacto total de la categoría, como puede observarse en la Fig. 27. El impacto asociado a la producción de materia prima distinta a la celda solar es el segundo más grande debido a que la producción de vidrio templado utiliza 0.199 m² de tierra anual y la producción de pallets utiliza 0.122 m² de tierra anual, el tipo de impacto que ocupa el tercer lugar en participación del impacto total es el de transporte de materia prima pues utiliza anualmente 0.232 m² de tierra anual.

Por otra parte, en la Tabla 29 se muestra mayor detalle en el impacto por tipo y por cada uno de los procesos de ensamble, siendo sencillo identificar el papel tan importante que tiene la producción de celdas en el impacto por producción de materia prima, también se puede ver que para el resto de tipos de impacto, los procesos con mayor impacto son similares a los mencionados en las categorías pasadas: ensamble final debido a la importación de paneles es el proceso de mayor impacto para transporte de materia prima, el proceso de laminación es el que requiere mayor consumo de energía por lo que es el de mayor impacto en el tipo de impacto de ensamble, aunque a diferencia de en las categorías anteriores, en esta categoría el proceso de mayor impacto en desperdicios es encapsulado, esto se debe no sólo a la

cantidad de celdas fracturadas que tiene dicho proceso si no también a los residuos de EVA y TPT que son generados en este proceso.

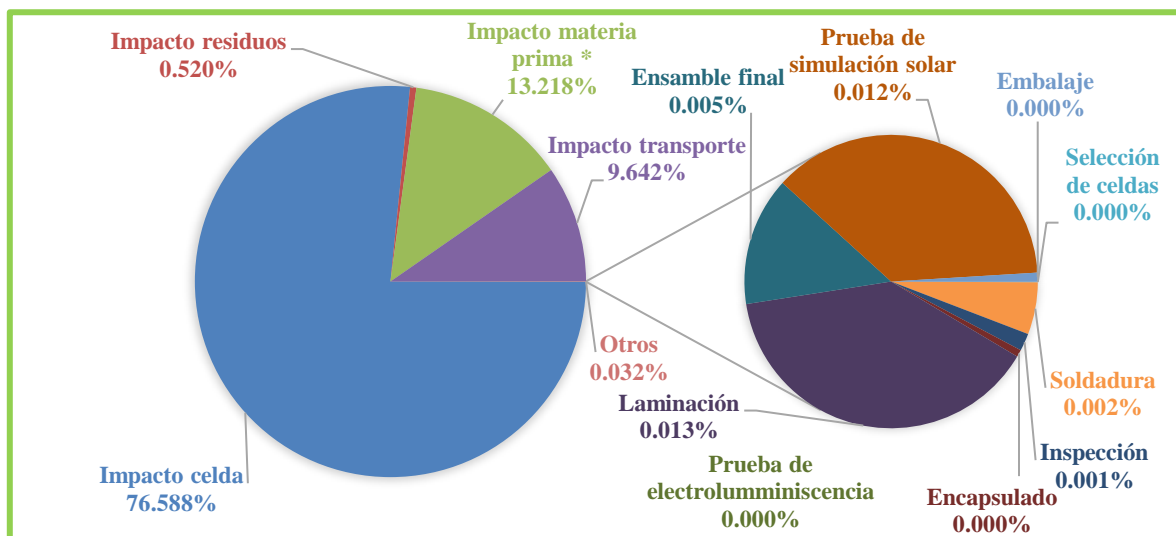


Fig. 27: Resultados Uso de suelo urbano

* El impacto de materia prima involucra al impacto causado por la producción de vidrio templado, aluminio, EVA, TPT, soldadura de estaño, silicona y ABS de caja de conexiones. También en este impacto se está considerando la producción de pallets usados en el embalaje.

NOTA: Del lado derecho se divide el impacto asociado al ensamble (luz, agua, uso de suelo, aire comprimido) de cada uno de los procesos

Tabla 29: Uso de suelo urbano- Impacto por proceso

	Selección de celdas	Soldadura	Inspección	Encapsulado	Prueba electroluminiscencia	Laminación	Ensamble final	Prueba de simulación solar	Embalaje
Uso de suelo urbano [m² de tierra x año]									
Impacto materia prima	2.0424	0.0175	0.0007	0.2002		1.41E-05	0.0108		0.1234
Impacto transporte de materia prima	0.0038	0.0013	5.00E-05	0.0871			0.1648		
Impacto ensamble (electricidad, uso de suelo, aire comprimido, agua)	6.37E-07	4.92E-05	1.65E-05	6.78E-06	0.00E+00	3.34E-04	1.22E-04	3.19E-04	8.48E-06
Impacto residuos	2.51E-04	8.38E-07	6.35E-05	1.34E-02		0.0001	3.84E-05	2.05E-05	
Impacto total por proceso	2.0465	0.0188	0.0009	0.3006	0.0000	0.0005	0.1757	0.0003	0.1234
Impacto total de ensamble de panel	2.6667								

Nota: La celda marcada con color rosa indica el impacto asociado a la producción de celdas solares

- **Uso de suelo agrícola**

En la Fig.28 se muestran los impactos por cada uno de los tipos considerados en la EICV, gracias a ello se puede apreciar que el 54.699% del impacto se genera en el proceso de producción de celda, esto se debe a que utiliza 8.45 m² de tierra anual, por otro lado un 43.315% del impacto es debido a la producción del resto de materia prima, siendo la producción de pallets y vidrio templado los principales causantes de dicho impacto pues utilizan 6.21 m² y 0.37 m² de tierra anual, respectivamente. Otro proceso que tiene un porcentaje relevante de contribución al impacto es el transporte de materia prima que utiliza 0.23 m² de tierra anual.

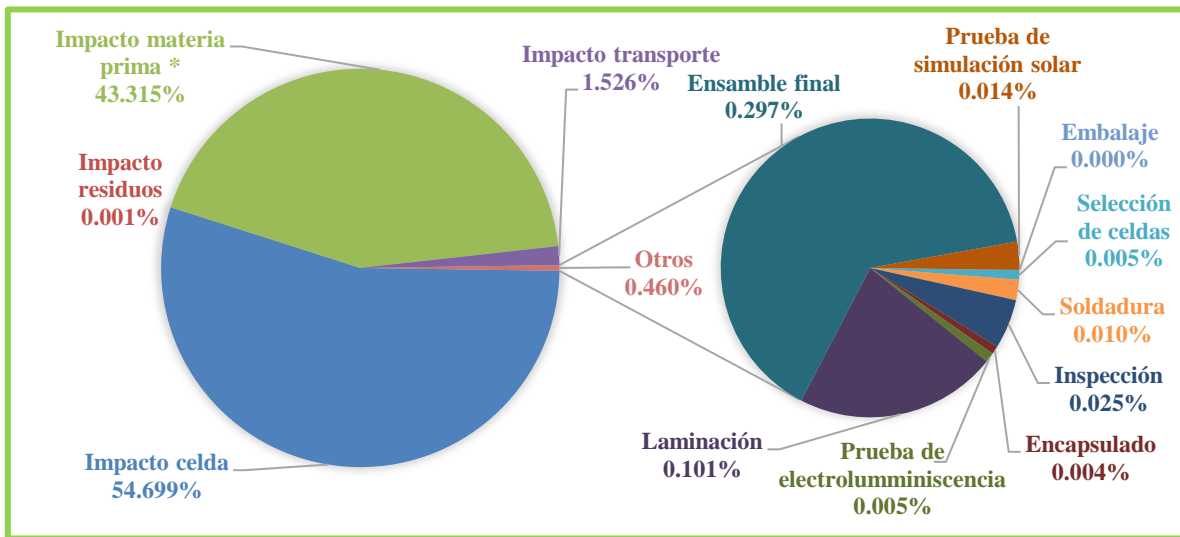


Fig. 28: Resultados Uso de suelo agrícola

* El impacto de materia prima involucra al impacto causado por la producción de vidrio templado, aluminio, EVA, TPT, soldadura de estaño, silicona y ABS de caja de conexiones. También en este impacto se está considerando la producción de pallets usados en el embalaje.

NOTA: Del lado derecho se divide el impacto asociado al ensamble (luz, agua, uso de suelo, aire comprimido) de cada uno de los procesos

En la Tabla 30 se aprecian los resultados del impacto por tipo de impacto medido y por proceso, resalta el impacto relacionado a la producción de celdas solares como el mayor impacto debido a producción de materia prima, respecto al transporte de materia prima el proceso de ensamble final sigue siendo el de mayor contribución, principalmente debido a la importación de paneles que se realiza para suplir la demanda; sobre impacto por ensamble, el proceso de laminación es el que representa un mayor porcentaje de impacto y se debe a la cantidad de energía eléctrica que requiere, finalmente se observa que los residuos de celdas solares fracturadas en el proceso de selección de celdas son los que más impactan en esta categoría.

Tabla 30: Uso de suelo agrícola- Impacto por proceso

	Selección de celas	Soldadura	Inspección	Encapsulado	Prueba electroluminiscencia	Laminación	Ensamble final	Prueba de simulación solar	Embalaje
Uso de suelo agrícola [m² de tierra x año]									
Impacto materia prima	8.4503	0.0093	0.0004	0.3810		0.0010	0.0172		6.2827
Impacto transporte de materia prima	0.0035	0.0012	0.0001	0.0800			0.1510		
Impacto ensamble (electricidad, uso de suelo, aire comprimido, agua)	0.0007	0.0016	0.0038	0.0006	0.0007	0.0155	0.0458	0.0022	1.05E-05
Impacto residuos	4.97E-05	1.65E-07	1.23E-05	1.41E-07		0.0000	4.06E-05	2.71E-06	
Impacto total por proceso	8.4546	0.0121	0.0043	0.4616	0.0007	0.0165	0.2141	0.0022	6.2827
Impacto total de ensamble de panel	15.4488								

Nota: La celda marcada con color rosa indica el impacto asociado a la producción de celdas solares

- **Acidificación terrestre**

Para esta categoría, se puede apreciar en la Fig.29 que el proceso de mayor impacto es la producción de celdas solares que es responsable del 56.90% del impacto total debido a la emisión al aire de 0.476 kg de dióxidos de azufre (SO_x), 0.429 kg de óxidos de nitrógeno (NO_x) y 0.005 kg de amoníaco. También se puede identificar que el impacto por transporte de materia prima representa el 37.35% del impacto total, situación que se debe a la emisión de 0.1476 kg de SO_x y 0.626 kg de NO_x al aire, finalmente se puede ver que la producción de materia prima distinta a celdas solares representa el 5.61% del impacto, es especialmente la producción de vidrio templado la que genera dicho impacto pues emite al aire las siguientes cantidades y sustancias: 0.0115 kg de SO_x, 0.0341 kg de NO_x y 0.0013 kg de amoníaco.

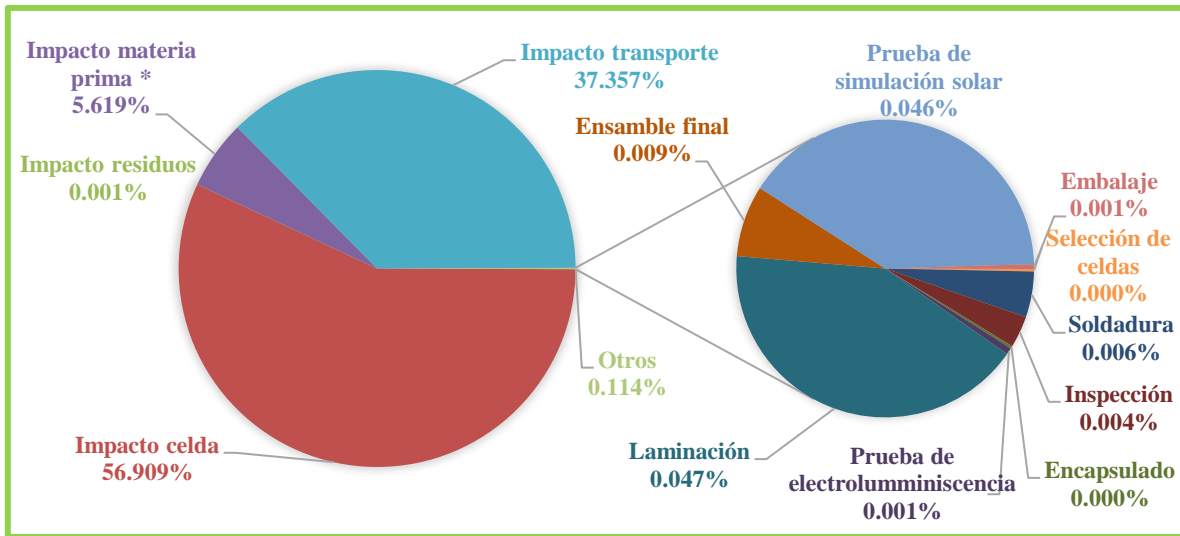


Fig. 29: Resultados Acidificación terrestre

* El impacto de materia prima involucra al impacto causado por la producción de vidrio templado, aluminio, EVA, TPT, soldadura de estaño, silicona y ABS de caja de conexiones. También en este impacto se está considerando la producción de pallets usados en el embalaje.

NOTA: Del lado derecho se divide el impacto asociado al ensamble (luz, agua, uso de suelo, aire comprimido) de cada uno de los procesos

En la Tabla 31 se pueden apreciar de forma más detallada los tipos de impacto por procesos, con lo que se puede identificar que respecto al impacto de producción de materia prima el proceso con mayor impacto es la producción de celdas solares; sobre el impacto por transporte, el proceso con mayor impacto es ensamble final y se debe a la importación de paneles; la generación de la electricidad consumida en la laminación es el proceso con mayor impacto en el impacto por ensamble, por otro lado, la mayor cantidad de impacto relacionada con disposición final de residuos es parte del proceso de selección de celdas, esto se debe a las consideraciones hechas sobre celdas fracturadas en dicho proceso, estos resultados son consistentes con el resto de las categorías pues se ha visto que en la mayoría de ellas, los procesos mencionados son los de mayor impacto.

Tabla 31: Acidificación terrestre- impacto por proceso

	Selección de celas	Soldadura	Inspección	Encapsulado	Prueba electroluminiscencia	Laminación	Ensamble final	Prueba de simulación solar	Embalaje
Acidificación terrestre [kg de SO₂-eq]									
Impacto materia prima	0.7030	0.0018	0.0001	0.0615		2.56E-06	0.0037		0.0024
Impacto transporte de materia prima	0.0069	0.0024	0.0001	0.1565			0.2955		

Impacto ensamble (electricidad, uso de suelo, aire comprimido, agua)	3.78E-06	7.00E-05	4.85E-05	4.09E-06	1.00E-05	5.86E-04	1.09E-04	0.0006	7.45E-06
Impacto residuos	6.22E-06	2.03E-08	1.51E-06	0.0000		1.57E-06	7.90E-07	2.56E-07	
Impacto total por proceso	0.7099	0.0043	0.0002	0.2180	1.00E-05	0.0006	0.2993	0.0006	0.0024
Impacto total de ensamble de panel	1.2353								

Nota: : La celda marcada con color rosa indica el impacto asociado a la producción de celdas solares

- **Creación fotoquímica de ozono/oxidantes**

En la Fig.30 se muestran los tipos de impacto considerados en este análisis y es posible identificar que el impacto asociado a la producción de celda solar es el mayor al representar el 48.99% del impacto total ya que esta producción emite al aire 0.429 kg de NOx, 0.220 kg de compuestos orgánicos volátiles distintos al metano (NMVOC por sus siglas en inglés) y 0.370 kg de SOx; el segundo impacto más grande es el asociado al transporte de materia prima ya que genera emisiones al aire de 0.626 kg de NOx y 0.04 kg de NMVOC; el tercer impacto más grande es el que se debe a la producción de materia prima, especialmente a la producción de vidrio templado pues en ella se generan emisiones al aire de 0.034 kg de NOx, 0.002 kg de NMVOC y 0.033 kg de SOx.

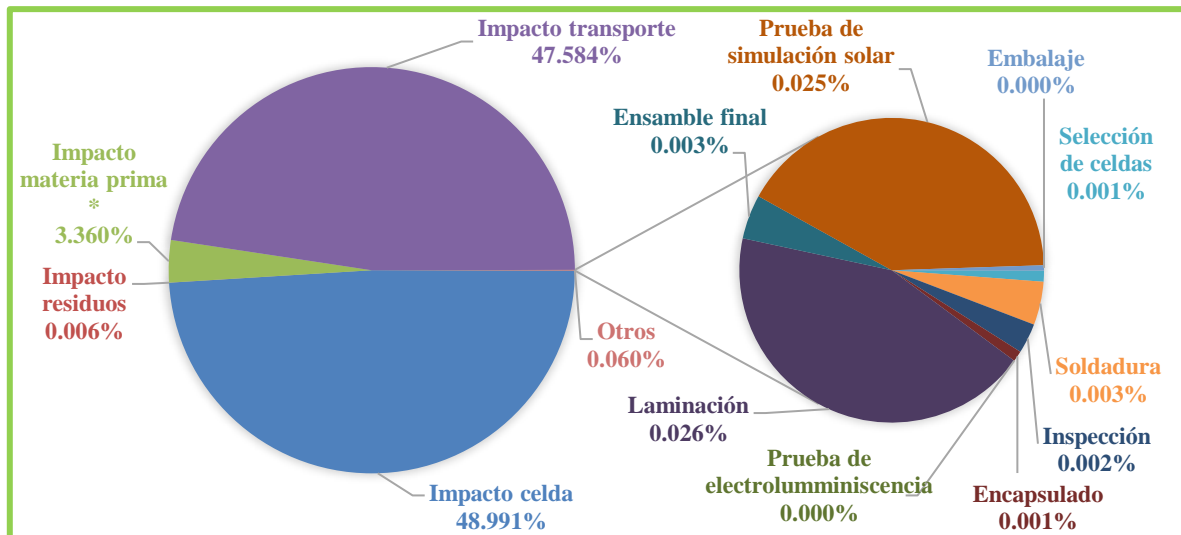


Fig. 30: Creación fotoquímica de oxidantes

* El impacto de materia prima involucra al impacto causado por la producción de vidrio templado, aluminio, EVA, TPT, soldadura de estaño, silicona y ABS de caja de conexiones. También en este impacto se está considerando la producción de pallets usados en el embalaje.

NOTA: Del lado derecho se divide el impacto asociado al ensamble (luz, agua, uso de suelo, aire comprimido) de cada uno de los procesos

En la Tabla 32 se desglosa de forma cuantitativa el impacto por tipo y por proceso, gracias a lo que se puede identificar que respecto al impacto de producción de materia prima es la producción de celdas solares la responsable de la mayor cantidad de impacto, respecto al impacto de transporte es el transporte de paneles importados el de mayor impacto y se ve

reflejado en el ensamble final, sobre el impacto por ensamble son los procesos de laminación y simulación solar los que tienen mayor impacto, especialmente por el consumo de energía que requieren y respecto al impacto por residuos el mayor es el de la disposición final de paneles dañados en el ensamble final.

Tabla 32: Creación fotoquímica de oxidantes- Impacto por proceso

	Selección de celas	Soldadura	Inspección	Encapsulado	Prueba electroluminiscencia	Laminación	Ensamble final	Prueba de simulación solar	Embalaje
Creación fotoquímica de oxidantes [kg de NMVOC]									
Impacto materia prima	0.7126	0.0021	0.0001	0.0406		2.17E-06	0.0029		0.0031
Impacto transporte de materia prima	0.0104	0.0036	0.0002	0.2348			0.4433		
Impacto ensamble (electricidad, uso de suelo, aire comprimido, agua)	1.02E-05	4.00E-05	2.76E-05	9.85E-06	0.00E+00	0.0004	4.08E-05	0.0004	4.84E-06
Impacto residuos	9.76E-06	3.20E-08	2.37E-06	1.46E-07		2.14E-06	0.0001	0.0000	
Impacto total por proceso	0.7230	0.0057	0.0003	0.2754	0.0000	0.0004	0.4463	0.0004	0.0031
Impacto total de ensamble de panel	1.2353								

Nota: : La celda marcada con color rosa indica el impacto asociado a la producción de celdas solares

- **Material particulado**

Los resultados por tipo de impacto medido en esta categoría se pueden observar en la Fig.31 donde se identifica que el 67.58% del impacto se debe a la producción de celdas solares debido a las emisiones al aire de 0.244 kg de partículas < 2.5 um, 0.457 kg de SOx y 0.429 kg de NOx; el impacto asociado al transporte de materia prima es el segundo de mayor participación con 28.05% del total y debido a la emisión al aire de 0.626 kg de Nox, 0.147 kg de SOx y 0.0117 kg de Partículas < 2.5 um. La producción de materia prima distinta de celdas solares también tiene un impacto relevante al representar el 4.23% del impacto total en esta categoría y se debe principalmente a la producción de vidrio templado que emite al aire 0.041 kg de SOx, 0.034 kg de NOx, .0044 kg de partículas < 2.5 um y 0.001 kg de amoníaco.

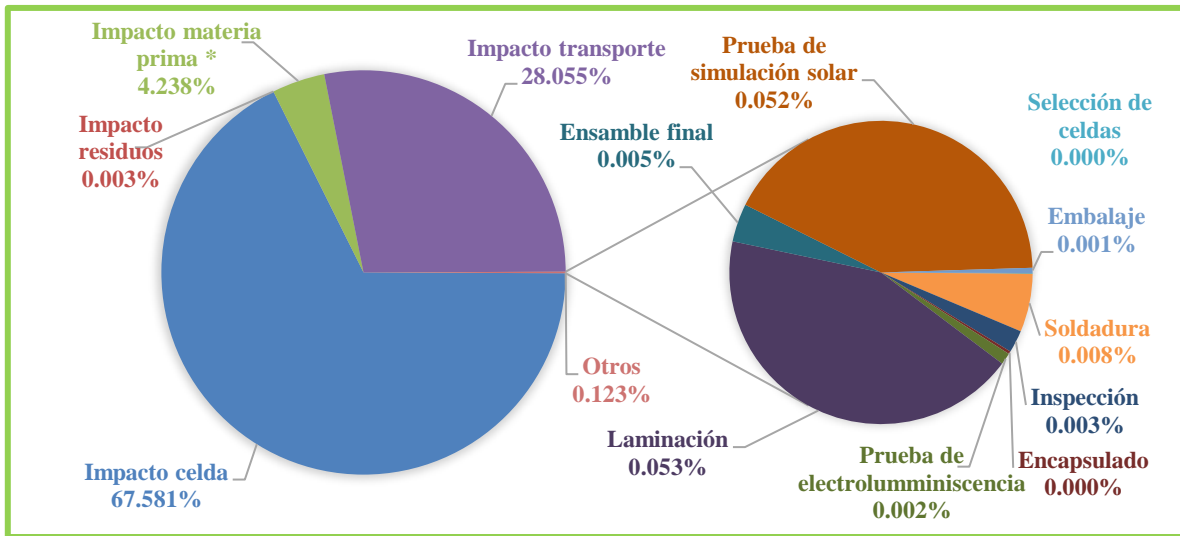


Fig. 31: Resultados Material particulado

* El impacto de materia prima involucra al impacto causado por la producción de vidrio templado, aluminio, EVA, TPT, soldadura de estaño, silicona y ABS de caja de conexiones También en este impacto se está considerando la producción de pallets usados en el embalaje. .

NOTA: Del lado derecho se divide el impacto asociado al ensamble (luz, agua, uso de suelo, aire comprimido) de cada uno de los procesos

Por otra parte, en la Tabla 33 se muestra mayor detalle en el impacto por tipo y por cada uno de los procesos de ensamble, se identifica fácilmente el papel tan importante que tiene la producción de celdas en el impacto por producción de materia prima, también se puede ver que para el resto de tipos de impacto, los procesos con mayor impacto son similares a los mencionados en las categorías pasadas: debido a la importación de paneles, ensamble final es el proceso de mayor impacto para transporte de materia prima, los procesos de laminación y simulación solar son los que que requiere mayor consumo de energía por lo que son los de mayor impacto en el tipo de impacto de ensamble, aunque a diferencia de en las categorías anteriores, en esta categoría el proceso de mayor impacto en desperdicios es ensamble final, esto se debe a la cantidad de residuos de aluminio, agua, y ABS de las cajas de conexiones que son generados en este proceso.

Tabla 33: Material particulado- Impacto por proceso

	Selección de celdas	Soldadura	Inspección	Encapsulado	Prueba electroluminiscencia	Laminación	Ensamble final	Prueba de simulación solar	Embalaje
Material particulado [kg de PM10-eq]									
Impacto materia prima	0.4438	0.0026	0.0001	0.0211		2.17E-06	0.0024		0.0016
Impacto transporte de materia prima	0.0028	0.0010	4.00E-05	0.0625			0.1180		

Impacto ensamble (electricidad, uso de suelo, aire comprimido, agua)	6.88E-07	5.00E-05	1.92E-05	2.40E-06	1.00E-05	0.0003	3.28E-05	0.0003	4.48E-06
Impacto residuos	3.13E-06	1.03E-08	7.63E-07	1.08E-08		8.18E-07	1.72E-05	1.36E-07	
Impacto total por proceso	0.4465	0.0036	0.0002	0.0836	0.0000	0.0003	0.1204	0.0003	0.0016
Impacto total de ensamble de panel	0.6566								

Nota: : La celda marcada con color rosa indica el impacto asociado a la producción de celdas solares

Como observación general del capítulo, se puede decir que salvo en ecotoxicidad terrestre y agotamiento de ozono, la producción de celdas solares es el proceso de mayor impacto, siendo en promedio el 53.51% del impacto total, también se puede decir que en la mayoría de ellas el transporte de celdas y la producción del resto de materia prima son los siguientes procesos con mayor impacto. Ocurre un caso particular en ecotoxicidad terrestre ya que en dicha categoría el mayor impacto se debe a la disposición final de residuos, por lo que si bien las consideraciones hechas sobre celdas fracturadas (acumuladas) influyen en todas las categorías, su repercusión es mucho mayor en ecotoxicidad terrestre y se podría esperar una disminución de este impacto en el escenario propuesto al considerar estas disposiciones en las propuestas que se realizarán en los siguientes capítulos.

6. Rediseño de proceso

En este capítulo se expondrá la lógica que se siguió para realizar propuestas que pretendan tanto mejorar el proceso y que pueda cumplir con la producción de su demanda, como reducir el impacto ambiental. Al igual que en el caso de la creación de VSM base, en alcance de las propuestas de mejora, únicamente involucra a los procesos realizados en México y que fueron visualizados en planta. La sección de Planeación y control de producción hace referencia únicamente a la creación de esta planeación con nuevos valores de inventarios de seguridad y punto de pedido. Al final del capítulo se colocará el VSM resultante de estas propuestas.

6.1. Técnicas de análisis de mejora de procesos

Para poder hacer la identificación de áreas de oportunidad en el proceso, se analizó el VSM generado para enfocarse en los cuellos de botella y la posibilidad de nivelar el proceso, después con base en los archivos AMFE proporcionados por la empresa y diagramas Ishikawa se encontraron las causas de las demoras para intentar disminuir tiempos en procesos clave.

6.1.1. VSM, AMFE, y Diagrama Ishikawa

Conforme en lo mostrado en el capítulo 4 al revisar el VSM, existen 4 procesos que son un cuello de botella en la línea de ensamble de paneles solares (Ver capítulo 4, Fig. 18), Retomando los resultados obtenidos, para cumplir con el takt time de 4.1818 min, la soldadura tendría que disminuir su tiempo casi un 40%, inspección y encapsulado un 65% y simulación solar un 20%. Desafortunadamente, el tiempo de soldadura no se puede disminuir puesto que es un proceso automatizado, en ese sentido la única alternativa para eliminar ese cuello de botella es agregar una segunda máquina que trabaje a la par con la ya existente.

Respecto a los procesos de inspección y encapsulado, se realizará una propuesta para reducir el tiempo de esos procesos, haciendo uso de la identificación de las causas demora en la inspección, pues tarda alrededor de 25 min y es un tiempo gastado en un proceso que no añade valor al producto.

Con la finalidad de entender el proceso de inspección y de encapsulado, se hizo un breve diagrama que muestra las actividades que se realizan, estas se muestran en la Fig. 32 y con

base en ello se identificó que el proceso de inspección es sólo una corrección de celdas que están dañadas o que no son correctas en el panel.

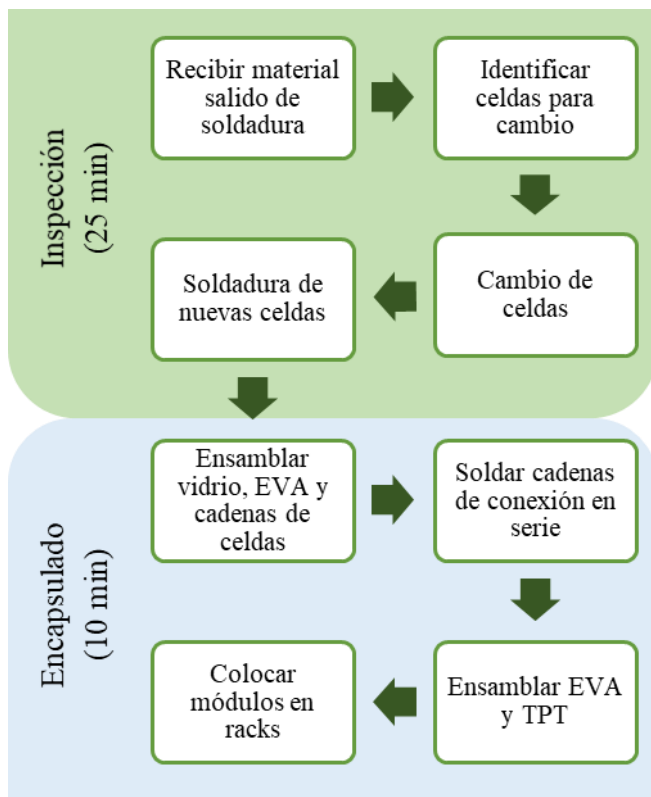


Fig. 32 Diagrama de inspección y encapsulado
Fuente: Creación propia

Gracias a un análisis modal de fallos y efectos (AMFE) proporcionado por la empresa (el cual por confidencialidad no será añadido al trabajo), se puede observar que existen dos razones por las cuales es necesario realizar el proceso de inspección, la primera es debido a que las celdas del panel no tienen el mismo tono de color y aunque la ocurrencia de ello es baja, es un problema de alta severidad, también se requiere inspección debido a que las celdas pueden estar rotas, dañadas o mal conectadas, finalmente se puede generar una demora adicional en el proceso debido a falta de racks para colocar los paneles preensamblados, estas observaciones se resumen en la Tabla 34.

Para trabajar más sobre las causas sobre la necesidad de reemplazar celdas en el proceso de inspección, se realizó el breve diagrama Ishikawa que se presenta en la Fig.33 con apoyo de lo observado en la planta y considerando las fallas, gracias a este diagrama, se logra identificar que entre las causas generadas por consecuencia de errores en los materiales, del el método o forma en que se realiza el proceso, de la mano de obra y de la máquina, se pueden generar recomendaciones respecto a las siguientes:

- Material
 - Existencia de muchas variantes de tonos en las celdas: Negociar con los proveedores la posibilidad de mandar tonos iguales o limitar los lotes mandados a 3 tonos diferentes.
 - Celdas más frágiles: Esto se debe principalmente al cambio de proveedores por variación en el precio, entonces se recomendaría la búsqueda de negociación con 3 proveedores clave diferentes que cumplan las características de calidad.
- Método
 - Separación por colores visual: Hay errores debido a la mala calidad de la iluminación y también debido a que no hay un apoyo en este método y es

muy sencillo equivocarse, se sugiere considerar la búsqueda tecnológica de apoyo, es decir, colocar un celular fijo con una aplicación de detección de color (como “Color grab”, que no requiere conexión a internet), bajo luz fija que permita que los operarios pasen cada celda por el lente del celular para que con la detección automática puedan encontrar la clasificación adecuada del tono de la celda o apoyarse en ello cuando tengan duda, este manejo individual un poco más detallado de las celdas también debería permitir que se identifiquen las celdas dañadas.

- Error humano
 - o Empleados sin manejo adecuado de panel: Se sugiere otorgar capacitación y generar alta consciencia de la importancia de un manejo cuidadoso de celdas y paneles por medio de una campaña de sensibilización.

Si se llegaran a implementar estas propuestas, se esperaría reducir al menos $\frac{3}{4}$ partes del tiempo de inspección, dado que se eliminarían las incidencias generadas por proporcionar celdas de diferentes tonalidades y se disminuiría la cantidad de celdas dañadas, con ello el proceso de inspección pasaría de 25 min a 6 min. Sin embargo, dado que el proceso de encapsulado sigue tomando 10 min, aún se presentaría un cuello de botella en dicho proceso por lo que sería necesario considerar el añadir una nueva estación de trabajo, por otra parte, se podría considerar al tiempo usado en inspección como un KPI de eficiencia de dicho proceso y de disminución de errores en los procesos anteriores.

Tabla 34: Resumen de AMFE proporcionado por la empresa “X”

Área causante	Área afectada	Modo de la falla	Causa	Acción	Severidad	Ocurrencia
Selección de celdas	Inspección	Pasar celdas de diferentes tonos	Mala iluminación	Cambiar la celda	Bajo	Alta
Soldadura automatizada	Inspección	Celda con diferente tono	Mala identificación de tonos	Notificar a inspección para reemplazo	Alto	Bajo
Soldadura automatizada	Inspección	Mala identificación de celdas dañadas	No revisar bien toda la cadena	Notificar a inspección para reemplazo	Moderado	Baja
Inspección	Inspección	Ruptura de una o más celdas	Mal manejo de las cadenas	Cambiar la celda	Moderado	Moderada
Inspección	Inspección	Falta de racks	Falta de espacio	Esperar a que un rack se libere	Moderado	Moderada
Electroluminiscencia	Inspección	Mala conexión	Mala soldadura	Regresar a inspección para corregir	Muy alto	Bajo
Electroluminiscencia	Inspección	Celdas rotas	Se movió durante el transporte	Regresar a inspección para corregir	Muy alto	Moderada

Fuente: Adaptado de información de la empresa “X”

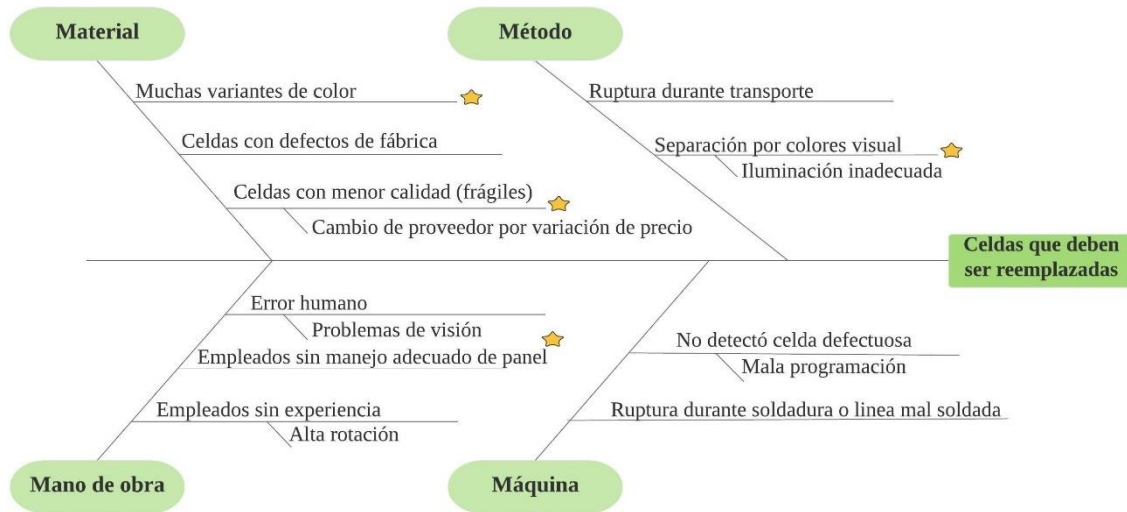


Fig. 33: Ishikawa de inspección- ¿Por qué se deben reemplazar las celdas?

Fuente: Creación propia

Para balancear el proceso en el área de simulación solar, se trabajará bajo la suposición de que, dado que es un proceso únicamente para corroborar la calidad del producto, se puede trabajar con una muestra y no es necesario probar el 100% de los paneles, y para definir el tamaño de la muestra ideal, se usará la fórmula de cálculo de tamaño de muestra (n) para una población finita, la cual expresa que:

$$n = \frac{N \times Z_{\alpha}^2 \times p \times q}{e^2 \times (N - 1) + Z_{\alpha}^2 \times p \times q}$$

Dónde:

N- Tamaño de la población, en este caso, 110

Z- Parámetro estadístico que depende del nivel de confianza asignado, en este caso se usará una confianza de 99%

e- Error de estimación máximo aceptado, se usará un 3%

p- Probabilidad de que ocurra el evento

q- (1-p) o probabilidad de que no ocurra el evento

Al conocer los procesos de la fábrica y sabiendo que se inspecciona la electroluminiscencia y en el ensamble final se prueba brevemente el funcionamiento, se asignará una probabilidad de 5% a que falle el panel y un 95% a que funciona correctamente, por lo que p= 5% y q= 95%.

Obteniendo de las tablas de áreas bajo la curva de la distribución normal estandarizada, el valor de Z con $\alpha=0.01$ es de $Z_{0.995}=2.576$, por lo que al sustituir:

$$n = \frac{110 \times 2.576 \times .05 \times .95}{.03^2 \times 109 + 2.576 \times .05 \times .95} = 61.0523$$

Entonces en realidad, el porcentaje de paneles que requieren pasar por ese proceso es del 55.50% de la cantidad de demanda.

6.2. Herramientas de mejora de procesos

Finalmente, para reducir el tiempo de embalaje, se usará la herramienta SMED y Poka Yokes que serán descritos en la siguiente sección, junto con algunas consideraciones sobre el flujo del proceso al aplicarse Kanban.

6.2.1. SMED y POKA YOKE

Con la intención de conocer adecuadamente el proceso de embalaje, se realizó un diagrama dónde se representan las actividades de cada uno de los 3 operarios, este diagrama puede ser revisado en la Fig. 34 y en este diagrama se colocaron notas respecto a las mejoras que se tendrían que hacer para aplicar SMED, las propuestas se dividen en eliminar, simplificar o externalizar actividades, el resumen de estas es:

- Eliminar:
 - Medición del panel: realizada por operarios 1 y 3,
 - Ir por empaque: se pretende colocarlo en un carrito móvil,
 - Ir por patín: se recomienda iniciar el proceso de embalaje con el patín ya colocado,
 - Trasladar tarima al centro del almacén: Se soluciona iniciando el proceso en el lugar adecuado
- Externalizar:
 - Agregar esquina: Acercar las esquinas en una caja de un carrito móvil
 - Ir por fleje y flejadora: Colocar la flejadora y el fleje en un sitio definido, de forma preferencial, en un carrito móvil.
 - Ir por caja y abrirla: Colocar las cajas más cerca
- Simplificar:
 - Ir por caja y abrirla: El operario 1 va por la caja
 - Pasar y estirar fleje: Tener dos rollos de fleje, mientras el operario 1 estira el fleje, los operarios 2 y 3 lo colocan para la siguiente posición.
 - Ir por hoja de pedido: El operario 1 va por hoja del pedido
 - Verificar pedido: El operario 1 verifica el pedido.

Con estas medidas de SMED, al pasar muchas de las actividades al operario uno, dividir la actividad de pasar el fleje y apretarlo entre los 3 operarios y ahorrar tiempos acercando las cosas, se pretende que el tiempo de este proceso pase de tomar 18.48 min por caja, a 9.5 min por caja de paneles solares. Por otro lado, para el apoyo y mantenimiento de este nuevo proceso, se sugiere utilizar como Poka Yoke una señalización en el piso sobre dónde se debe realizar el proceso de embalaje de forma tal que todos los elementos ocupados se encuentren

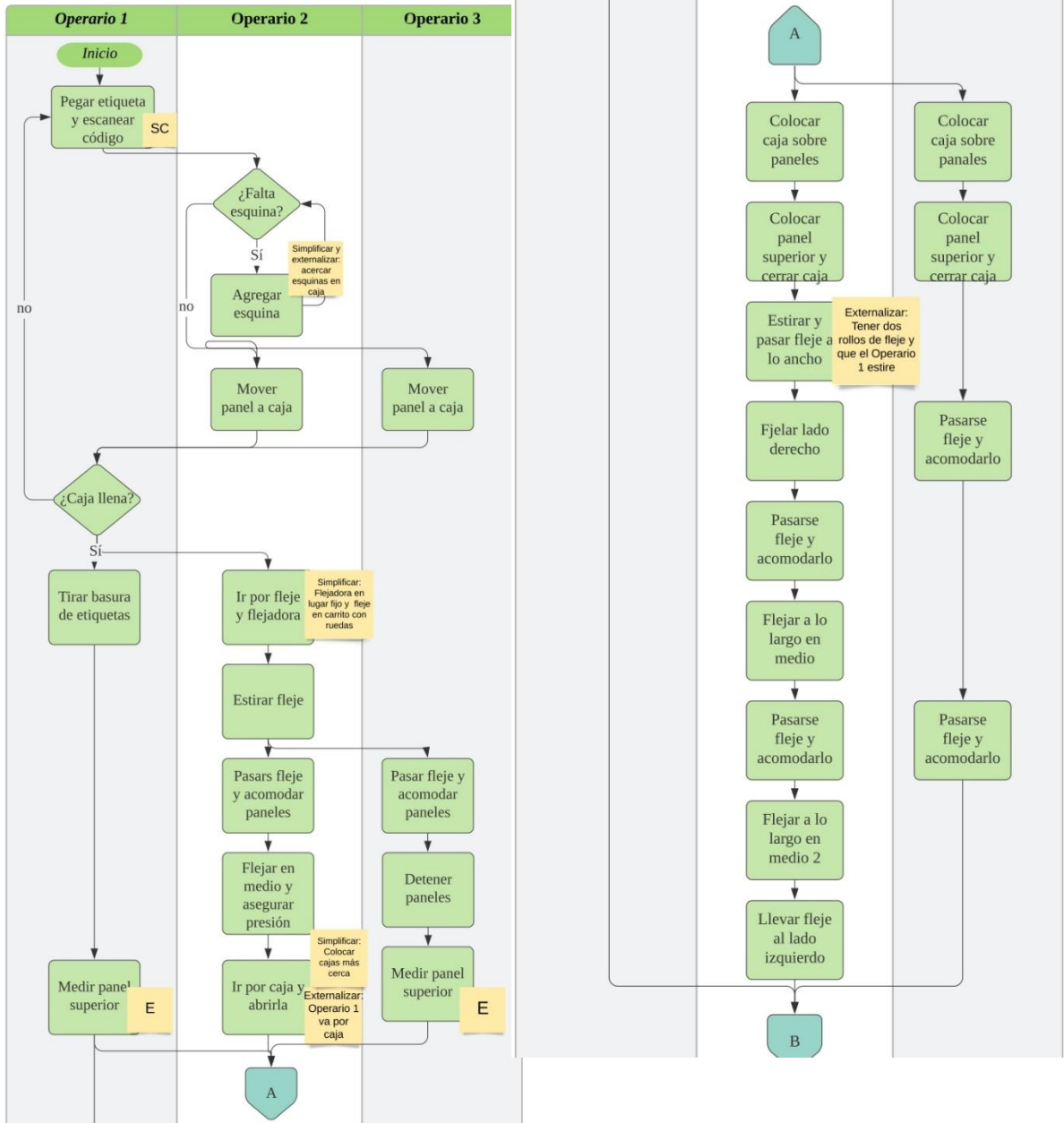


Fig. 34 (a): Diagrama de embalaje con notas de SMED
Fuente: Creación propia

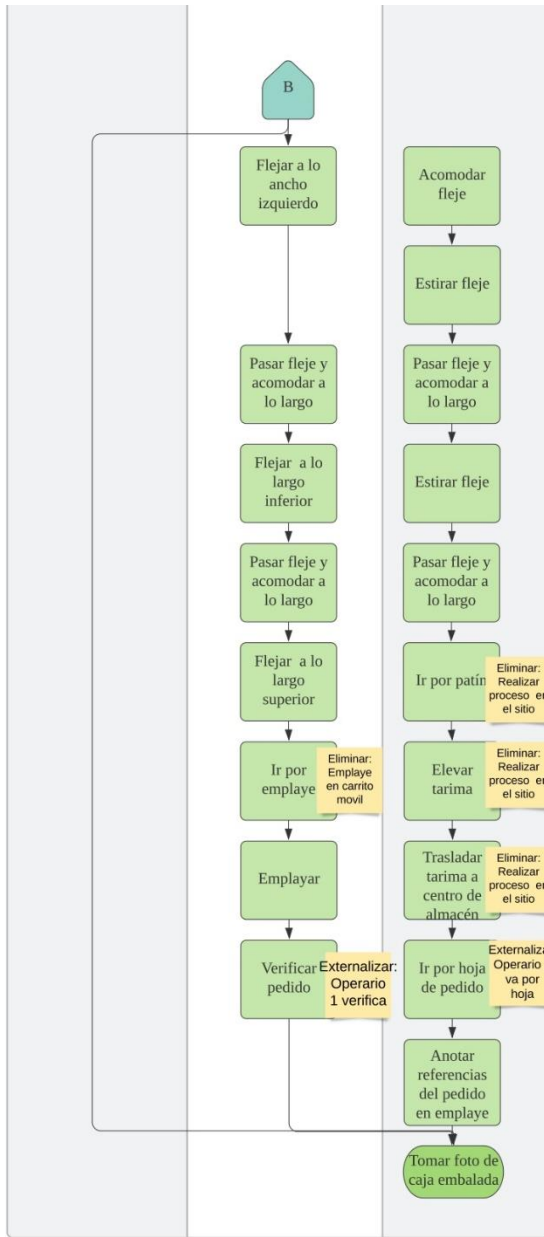


Fig. 33 (b): Continuación de diagrama de flujo de embalaje con notas SMED
Fuente: Creación propia

cerca de esa área, también se sugiere el uso de un carrito con compartimientos y ruedas, con imágenes sobre qué elemento va en qué sección, como se muestra en la Fig. 35.



Fig. 35: Propuesta de carrito para embalaje
Fuente: Creación propia

Por otra parte, la implementación de Kaban en la línea de producción, permitiría que se redujeran los inventarios entre los procesos, pero para ello, sería necesario hacer una correcta planeación de la demanda, pues las tarjetas requieren que el sistema sea “liderado” por la demanda de los clientes para que cada proceso vaya solicitando la cantidad de elementos requeridos del anterior.

Como conclusión del capítulo, se muestra un resumen de las propuestas comentadas en esta sección, en la Tabla 35, dónde también se menciona el objetivo de implementar esta propuesta en la planta.

Tabla 35: Resumen de propuestas

Proceso	Propuesta	Objetivo de la propuesta
Selección de celdas	Apoyo al proceso mediante celular con identificación de color y luz fija	Disminución de tiempo de inspección para eliminar cuello de botella

Soldadura automatizada	Instalación de segunda máquina	Eliminar cuello de botella
Inspección y encapsulado	Agregar otra mesa de trabajo	Eliminar cuello de botella
	Considerar el tiempo de inspección como un KPI	Medir eficiencia del proceso, mantener balance de línea y motivar a los empleados a disminuir el tiempo
Embalaje	Aplicar propuestas de SMED	Mantener inventarios de productos terminados sin embalaje, en 0
	Añadir Poka Yokes simples al proceso	Mantener la propuesta SMED
Generales	Negociación con proveedores sobre cantidades de tonos límite en los lotes	Disminución de tiempo de inspección para eliminar cuello de botella
	Identificación y negociación con proveedores clave de celdas que cumplan con características de calidad	Disminuir cantidad de celdas rotas y necesidad de proceso de inspección
	Capacitación y campaña de sensibilización sobre el cuidado del manejo de celdas y paneles	Disminuir cantidad de celdas rotas y necesidad de proceso de inspección
	Mantener correcto el inventario de seguridad	Disminuir uso innecesario de suelo y MUDA por inventario
	Uso de Kanban en los procesos	Mantener el balance de línea y disminuir inventarios

Fuente: Creación propia

Finalmente, dadas estas propuestas, habiendo ya mencionado que el nuevo tiempo de inspección es de 6 min, y el de embalaje de 9.5 min por caja, se debe también calcular el nuevo tiempo de selección de celdas, el cual, con base en experimentos usando la aplicación de “color grab“(en la Fig. 35 se muestra un ejemplo del funcionamiento de la aplicación), se espera que el tiempo por celda sea de alrededor de 1.5 segundos, lo que significa aproximadamente 3.8 min por lote.



Fig. 36:Funcionamiento de “Color Grab”

Fuente: Creación propia

6.3. Planeación y control de producción

La empresa proporcionó información general referente al consumo de paneles monoPERC 380, mas no se tiene un histórico de ventas, sin embargo, se puede hacer una estimación de inventario de seguridad que se debe tener en almacén y compararla con el valor actual para identificar el excedente.

Se sabe que la demanda mensual es de 600 paneles, asumiendo que los pedidos de materia prima y paneles completos pueden tardar en promedio 30 días y hasta 40 días, se calculará la cantidad de paneles extra que deben solicitarse con la producción actual, así como la cantidad de celdas que deberían solicitarse y el inventario mínimo que se debería tener de las mismas.

Para calcular el inventario de seguridad de celdas, se tiene que:

- Consumo diario: 12 paneles de 72 celdas, que equivalen a 864 celdas
- Plazo de entrega: 30 días
- Retraso: 30 días

La fórmula del cálculo de inventario mínimo (SS, por sus siglas en inglés) es

$$SS = \text{Retraso de entrega} \times \text{Consumo diario}$$

Sustituyendo, tenemos que

$$SS = 30 \times 864 = 25,920 \text{ celdas}$$

Se puede observar que, dado los plazos de entrega, el punto de pedido (suma de las celdas de consumo diario en el plazo de entrega y el inventario de seguridad), es el doble del inventario de seguridad, es decir, son 51,840 celdas. Y que la cantidad a pedir mensualmente deben ser también 25,920 celdas. Sin embargo, se sabe que, de acuerdo con la información proporcionada, se solicitan 40,000 celdas mensuales, lo cual genera que el inventario de celdas se acumule mensualmente, sin embargo, también se sabe que el inventario actual es de 8400 celdas, lo que puede significar que la cantidad mensual solicitada fue mal proporcionada o que él se lleva un mal registro de inventarios.

Para satisfacer la demanda de paneles solares, se mencionó anteriormente que la empresa requiere la compra de 312 paneles mensuales, es decir que diario serían consumidos 13 de ellos para completar la producción programada, este valor se toma como el consumo diario.

Asumiendo los mismos valores en los plazos de envío y la misma ecuación de cálculo de inventario de seguridad, se obtiene que este es de 390 paneles y también haciendo el cálculo de punto de pedido, se tiene que realizar uno nuevo cuando existan 780 paneles en el inventario. Cabe mencionar que este inventario de seguridad representaría alrededor de 42.5 m² de suelo usado y en consecuencia se requieren aproximadamente 83 m² de suelo destinado únicamente al inventario de paneles exportados monoPERC 380 W, lo ideal es que, al realizar

las propuestas generadas con el balance de línea, la necesidad de este inventario desapareciera al desaparecer la necesidad de compra de paneles para completar la demanda.

6.4. Rediseño del proceso. VSM propuesto

De acuerdo con todo lo comentado anteriormente, buscando alcanzar un takt time de 4.181 min. Teniendo ya las propuestas, se calculó la comparación de tiempos máximos por estación y tiempos de la propuesta, para verificar el balance de la línea. Estos resultados se muestran en la Tabla 36 y como puede observarse, salvo por 6 segundos y medio en el área de inspección y encapsulado, la línea se encuentra balanceada.

Tabla 36: Comparación de tiempos ideales vs tiempo obtenido de la propuesta, por proceso

Proceso	Tiempo máximo por estación*	Tiempo de la propuesta	Unidades	#EN
Selección de celdas	3.972	3.8	min/lote	1
Soldadura Automatizada	7.945	6	min/panel	2
Inspección y encapsulado	15.890	16	min/panel	4
Electroluminiscencia	3.972	1	min/panel	1
Laminación	23.836	17	min/panel	6
Ensamble	11.918	4.3449	min/panel	3
Simulación solar	7.163	5	min/panel	1
Embalaje	3.972	0.3958	min/panel	1

Fuente: Creación propia

*Tiempo basado en los cálculos de balance de línea con respecto a Takt time

EN: Estaciones de trabajo nuevas, de acuerdo con la propuesta

Para poder hacer el VSM propuesto, se tomaron en consideración los tiempos mencionados en la Tabla 36, también se asumió que la cantidad de celdas solicitada es la necesaria para producir los 600 paneles mensuales, lo que significaría que se adquieren 43,200 celdas mensuales, con los tiempos nuevos se calculan los tiempos de ciclo y se deben estimar los inventarios esperados de cada proceso (asumiendo que no se ha implementado un Kanban), por lo que se realizó una simulación breve en Excel de esta nueva propuesta (se puede ver la tabla en el Anexo E) y al analizarla, se encontraron los siguientes inventarios:

- En promedio, habrá 20 paneles esperando soldadura
- 14 paneles en espera de inspección
- 1 panel en espera de electroluminiscencia
- 1 panel en espera de laminación (debido a que ingresan 2 paneles a laminación)

A partir de las modificaciones propuestas, el primer panel se encuentra listo en el minuto 49.1449 y que a partir de ese momento, el promedio entre paneles egresados es de 3.98 min, por lo que los 25 paneles diarios que se deben producir de monoPERC 380 W, estarían listos en 145.1449 min, lo que significa que con el porcentaje de tiempo asignado para la producción de estos paneles, que es del 35% del total, si se alcanza a producir la demanda, sin embargo, se encontró también que al día, considerando los 460 min de trabajo diario, se producirían 104 paneles de todas las variantes que se manejan.

La Fig. 38 representa el VSM creado a partir de todas las propuestas y con todos los datos considerados, En la Fig. 37 se puede ver la disminución de tiempos calculada y por otro lado el rango de cobertura bajó, lo que significa que existe menor inventario. Finalmente se observa que la cantidad de celdas solicitadas al proveedor es mucho mayor y esto se debe a que con modificaciones en los tiempos de procesos, ya se puede suplir la demanda de los 600 paneles mensuales por lo que es necesario tener mayor materia prima.

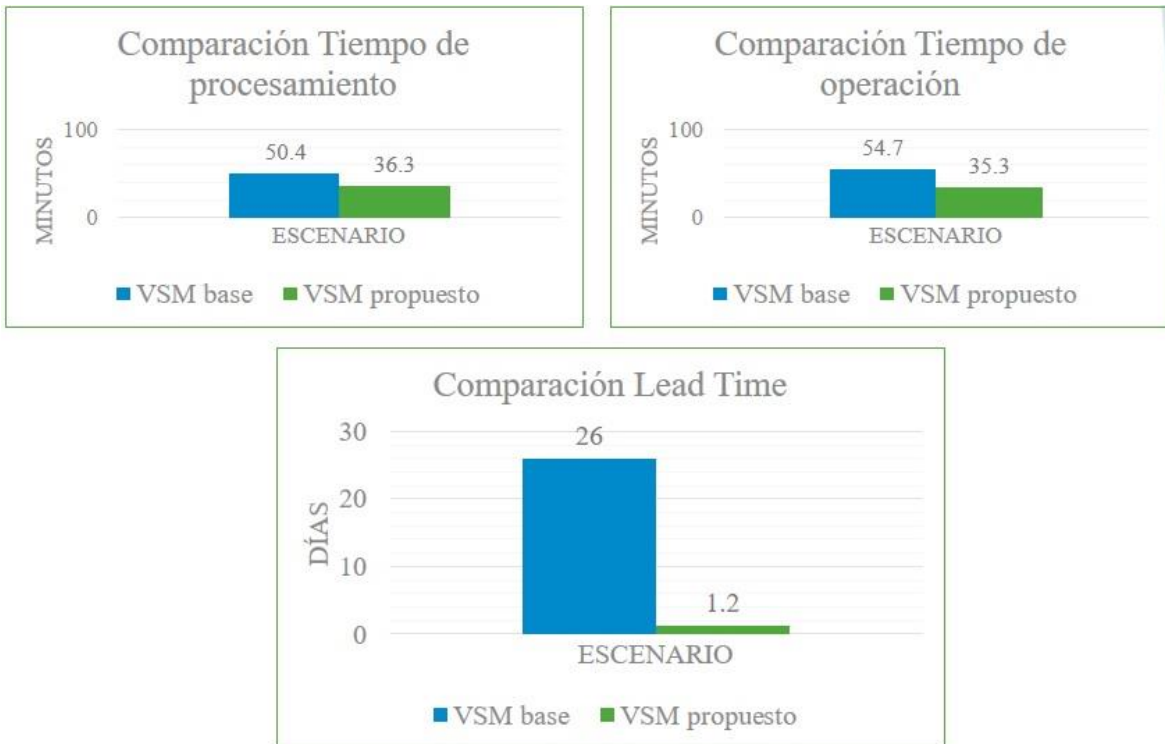
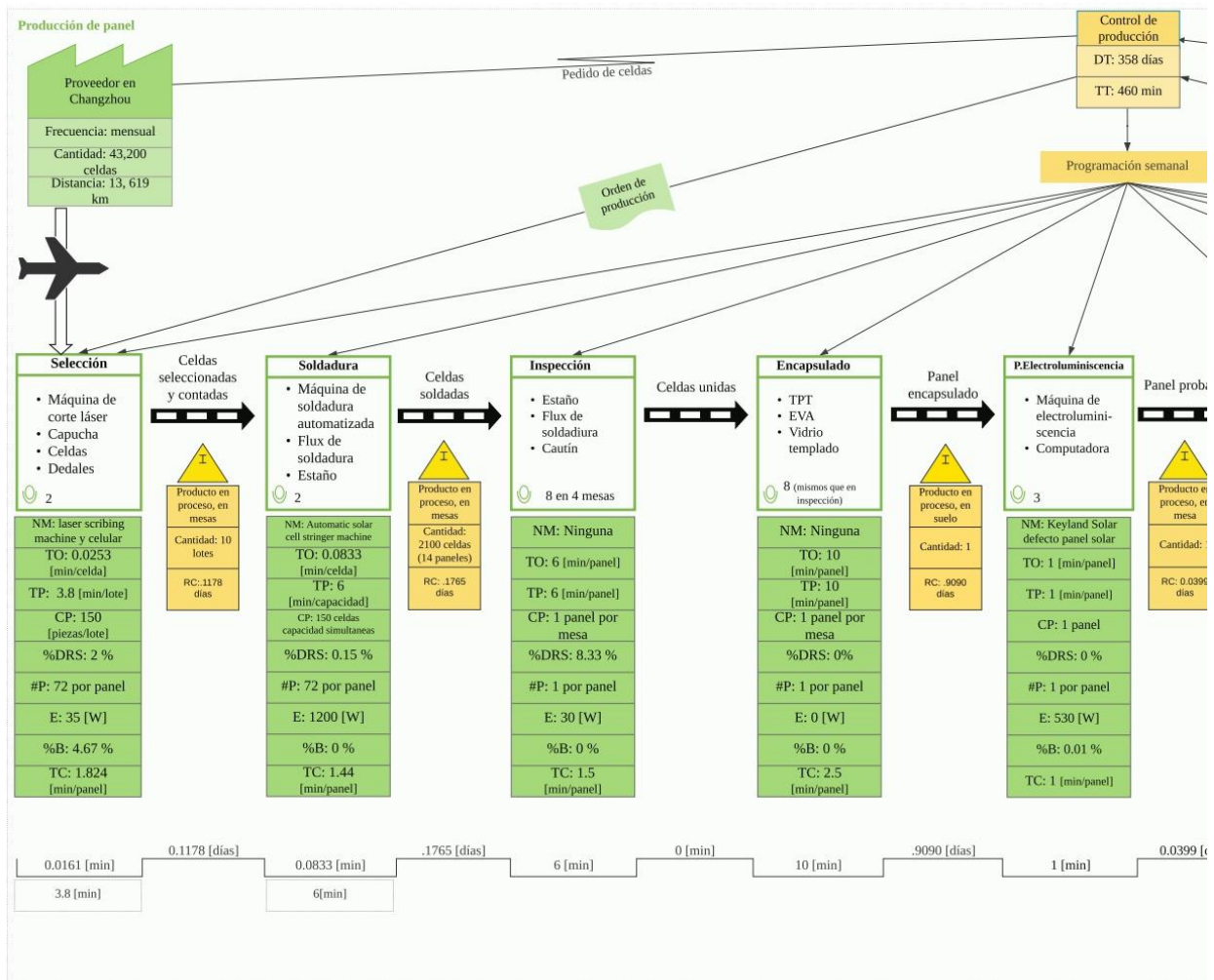
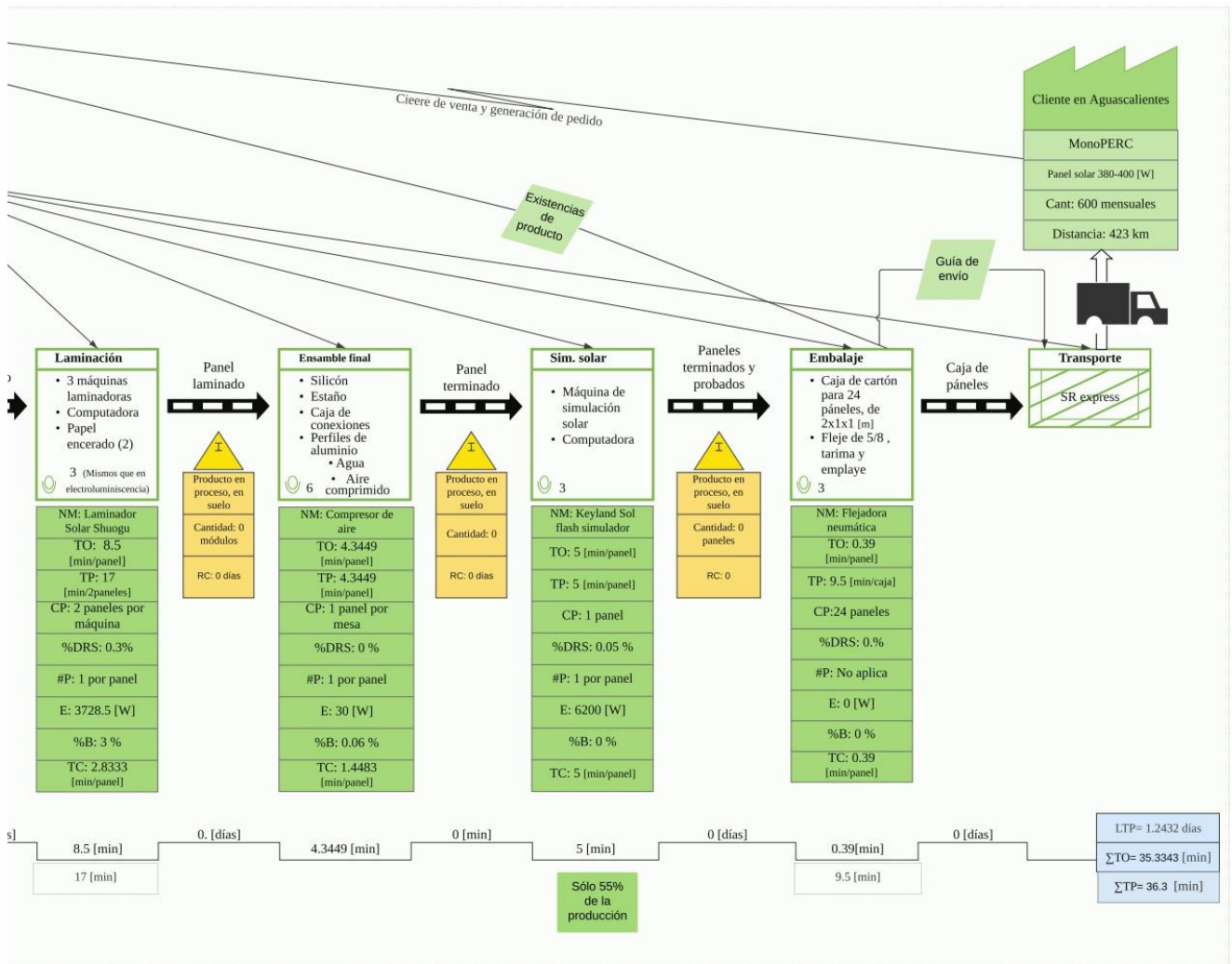


Fig. 37: Comparación tiempos
Fuente: Creación propia



<p>Simbología: TP- Tiempo de procesamiento #P: Número de piezas en el producto final TC: Tiempo de ciclo del proceso %B- Porcentaje de celdas que van a categoría B DT: Días de trabajo TO: Tiempo de operación CP: Cantidad de piezas trabajadas</p>	<p>%DRS- Porcentaje de celdas que se van a a disposición en relleno sanitario NM: Nombre de máquina E: Energía consumida por el proceso TT: Tiempo de trabajo diario RC: Rango de cobertura</p>
---	---

Fig. 38: Mapa VSM propuesto para el ensamble de celdas en la planta de producción "X"
 Fuente: Creación propia



7. Inventario y evaluación del análisis de ciclo de vida del escenario propuesto

Para poder determinar la reducción o aumento del impacto ambiental en un escenario dónde se aplican las propuestas mencionadas en el capítulo anterior, es necesario realizar un nuevo inventario dónde se tomen en cuenta las implicaciones en energía, uso de suelo y transportes de estas, en este capítulo se expondrán las modificaciones al inventario inicial, y los resultados obtenidos con OpenLCA una vez que se realizó la nueva carga de datos.

7.1. Inventario de ciclo de vida de escenario propuesto

En la Tabla 37 se describen las consideraciones que se deben tomar en cada uno de los procesos de la empresa al implementar las propuestas, y en las Tablas 38, 39, 40 y 41 se muestran el inventario de ciclo de vida de consumos eléctricos, transportes y uso de suelo.

Tabla 37: Implicaciones de propuestas en ICV

Proceso	Energía máquina	Energía luminaria	Transporte	Uso de suelo
Selección de celdas	Agregar consumo energético de celular	Agregar una lámpara más, para la selección de tonos.	Calcular celdas para 600 paneles	Sin cambios
Soldadura	Duplicar y multiplicar por nuevo tiempo de uso de máquina	Duplicar cantidad de lámpara necesarias	Calcular estaño para 600 paneles	Duplicar
Inspección y encapsulado	Calcular para nuevo tiempo de uso	Aumentar lámparas necesarias para nueva mesa	Calcular vidrio, EVA y TPT para 600 paneles	Agregar el espacio de una nueva mesa de trabajo
Electroluminiscencia	Calcular para nuevo tiempo de uso	Calcular para nuevo tiempo de uso	Sin cambios	Sin cambios
Laminación	Calcular para nuevo tiempo de uso	Calcular para nuevo tiempo de uso	Sin cambios	Sin cambios
Ensamble	Calcular para nuevo tiempo de uso	Calcular para nuevo tiempo de uso	Calcular perfiles de aluminio para 600 paneles	Quitar espacio de almacén de paneles exportados
Simulación solar	Calcular para nuevo tiempo de uso	Calcular para nuevo tiempo de uso	Sin cambios	Sin cambios
Embalaje	Calcular para nuevo tiempo de uso	Calcular para nuevo tiempo de uso	Sin cambios	Quitar espacio de almacén de paneles exportados

Fuente: Creación propia

Para el cálculo de energía consumida por las máquinas y luminaria se asumió que el consumo diario de electricidad es el equivalente al tiempo de producción de los 25 paneles monoPERC de 380 W que debe producir la empresa diariamente para suplir la demanda. También es

importante mencionar que se estimó que el consumo de un celular promedio es de 15W y que se mantuvieron los valores previos de consumo por cada máquina.

Para el cálculo de transportes, al igual que en el inventario del escenario base del proceso, sólo se calcularon las toneladas de materiales requeridos para la fabricación del tipo de panel en estudio, es decir para los 600 paneles monoPERC 380W que son ensamblados mensualmente.

Tabla 38: Inventario de ciclo de vida del escenario propuesto (consumo energético de máquinas y herramientas)

Proceso	Maquinaria	W	Tiempo de trabajo diario [h]	Wh/día
Selección de celdas	Celular	15	0.760	11.400
	Máquina corte	20	0.760	15.200
Soldadura Automatizada	Máquinas de soldadura	1200	1.200	1440.000
Inspección	Cautín	30	1.250	150.000
Encapsulado	Ninguna	0	1.042	0.000
Electroluminiscencia	Máquina de Electroluminiscencia	18	0.417	220.833
Laminación	Laminadora	3728.5	1.181	13205.104
Ensamble	Cautín	30	0.603	54.311
Simulación solar	Máquina de Simulación Solar	6200	1.146	7104.167
Embalaje	Ninguna	0	0.165	0.000

Fuente: Creación propia

Tabla 39: Inventario de ciclo de vida de escenario propuesto (consumo energético de luminaria)

Proceso	Cantidad de lámparas	W	Tiempo de trabajo diario [h]	Wh/día
Selección de celdas	3	18	0.760	41.04
Soldadura Automatizada	8	18	1.200	172.8
Inspección	12.07	18	1.250	271.575
Encapsulado	4.93	18	1.042	92.4375
Electroluminiscencia	11	18	0.417	82.5
Laminación	19	18	1.181	403.75
Ensamble	15	18	0.603	162.93375
Simulación solar	4	18	1.146	82.5
Embalaje	25	18	0.165	74.21875

Fuente: Creación propia

Tabla 40: Inventario de Ciclo de Vida de escenario propuesto (uso de suelo)

Proceso	b	h	m ² /proceso	m ² /producto
Selección de celdas	3.520	1.760	6.195	1.66E-04
Soldadura Automatizada	10.280	4.464	45.889	1.23E-03
Inspección	6.390	6.040	38.563	1.04E-03
Encapsulado	2.610	2.470	6.433	1.73E-04

Electroluminiscencia	1.760	3.520	6.195	1.66E-04
Laminación	12.320	10.560	130.099	3.49E-03
Ensamble	10.560	9.051	95.583	2.43E-03
Simulación solar	4.580	3.520	16.107	7.44E-04
Embalaje	9.350	12.460	116.440	2.96E-03

Fuente: Creación propia

Tabla 41: Inventario de Ciclo de Vida de escenario propuesto (toneladas mensuales)

Proceso	Elemento	Cantidad mensual	Peso (ton)
Selección de celdas	Celdas	43200	0.434592
Soldadura	Soldadura de estaño	150	0.15
Inspección	Soldadura de estaño	6.14952	0.00614952
Encapsulado	Vidrio templado	600	9.5181984
	EVA	1200	0.6414294
	TPT	600	0.01365264
Ensamble final	Aluminio largo	1200	2.46219264
	Aluminio corto	1200	1.24664832
	Silicona	42	0.042
	ABS	600	0.094374
	Soldadura de estaño	15.0234	0.0150234

Fuente: Creación propia

Los km recorridos en avión son de 13,590 y los km recorridos por medios terrestres son 103.81 para todos los cálculos.

Es importante mencionar que en este escenario ya no se está considerado la disposición final de celdas fracturadas (acumuladas) ya que se asume que en este escenario propuesto esas celdas habrían sido llevadas hasta su disposición final en el escenario base. Respecto a disposiciones de celdas fracturadas y paneles dañados propios de la operación, se están considerando nuevos porcentajes que fueron mapeados en el VSM y que corresponden a los procesos en este estado propuesto, habiendo una mayor disminución de celdas fracturadas debido a las mejoras en el proceso de selección de celdas y el enfoque de disminuir la necesidad del proceso de inspección.

Una vez calculados estos elementos, se adecuaron a la misma unidad funcional usada en el ICV base: 1 m² de panel solar, para poder hacer una comparación adecuada entre ellos. No se anexa el nuevo inventario dado que las únicas modificaciones al mismo son únicamente las comentadas en esta sección.

7.2. Interpretación de resultados

De acuerdo con los resultados mostrados en la Tabla 43, los valores siguen siendo congruentes con los obtenidos anteriormente y los proporcionados por la base de datos deecoinvent (Ver capítulo 5). En esta sección se van a mostrar de forma más breve las gráficas de porcentajes de impacto considerados y las tablas que desglosan el impacto por cada proceso. No se mencionarán las emisiones generadas por la producción de celdas solares pues

dato que la propuesta no modifica la cantidad de celdas que requiere 1m² de panel, las emisiones son las mismas que ya fueron explicadas en el capítulo 5. Inventario y evaluación del análisis de ciclo de vida de escenario base. La comparación de resultados entre el escenario base y el escenario propuesto se realizará en el siguiente capítulo.

Tabla 42: Resultados generales de EICV, para proceso propuesto

Categoría	Resultado	Unidad
Cambio climático (GWP20)	293.673	kg CO2 al aire
Ecotoxicidad terrestre	0.8340	kg 1.4-DCB a suelo industrial
Ecotoxicidad agua dulce	2.367	kg 1.4- DCB a agua dulce
Eutrofización de agua dulce	0.107	kg P a agua dulce
Agotamiento del ozono	3.32E-05	kg CFC-11 al aire
Toxicidad humana	23.722	kg 1.4- DCB a aire urbano
Uso de suelo urbano	2.525	m2 × año de tierra de cultivo anual
Uso de suelo de agricultura	15.249	
Acidificación terrestre	1.005	kg SO2 al aire
Creación fotoquímica de ozono	1.110	Kg NMVOC al aire
Material particulado	0.564	kg PM10-eq al aire

- Cambio climático (GWP20)

En la Fig. 39 se muestran los resultados de esta categoría por cada uno de los tipos de impacto considerados, es notorio que el proceso de mayor impacto es la producción de celdas solares que representa el 74.30% del impacto, el impacto por transporte de materia prima es el segundo más grande en esta categoría, con un porcentaje de 21.99% y debido a que se emiten al aire 64.315 kg de CO₂ y 0.024 kg de metano. El impacto por producción de materia prima distinta a celdas solares representa un impacto de 3.57% del total y se debe principalmente a la producción de vidrio templado, que emite al aire 0.95 kg de CO₂ y 0.013 kg de metano.

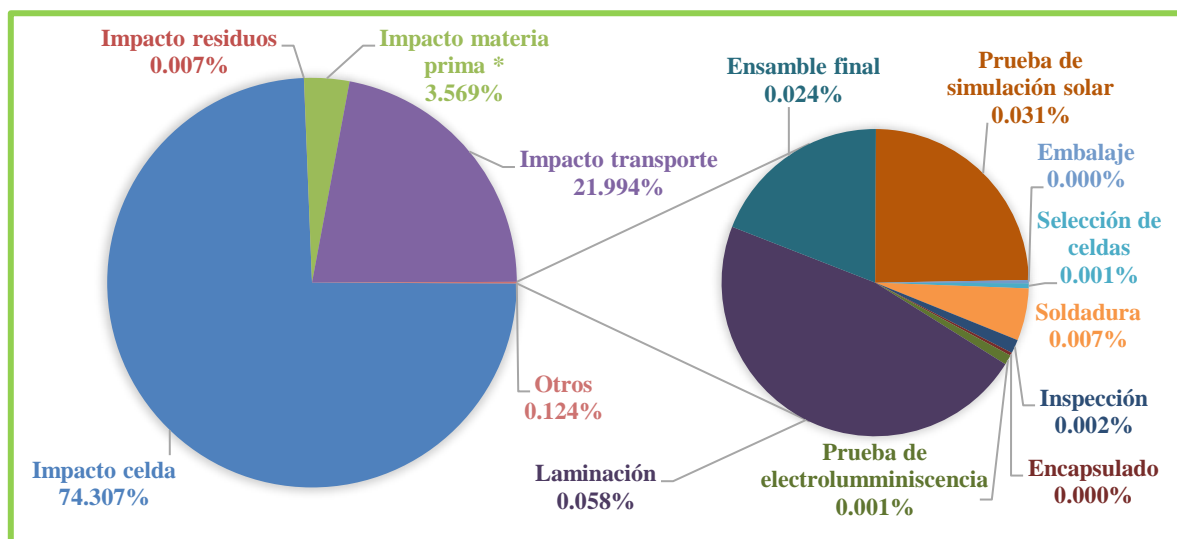


Fig. 39: Resultados Cambio Climático- escenario propuesto

* El impacto de materia prima involucra al impacto causado por la producción de vidrio templado, aluminio, EVA, TPT, soldadura de estaño, silicona y ABS de caja de conexiones. También en este impacto se está considerando la producción

de pallets usados en el embalaje.

NOTA: Del lado derecho se divide el impacto asociado al ensamble (luz, agua, uso de suelo, aire comprimido) de cada uno de los procesos

En la Tabla 43 se desglosa el impacto por cada uno de los procesos de ensamble de paneles solares y por tipo de impacto, gracias a ello se puede ver que en el impacto por transporte de materia prima el proceso que más contribuye es el de encapsulado, esto se debe a la cantidad de vidrio, EVA y TPT que debe ser transportado para poder ensamblar los 600 paneles mensuales que se demandan. Respecto al impacto por ensamble, es el proceso de laminación el que más impacto genera, previamente ya se explicó que se debe a la electricidad consumida en dicho proceso. Finalmente en el impacto por residuos, es el proceso de ensamble final el que genera un mayor impacto, principalmente por la disposición de trapos, aluminio, cajas de conexiones y agua.

Tabla 43: Cambio climático- impacto por proceso- escenario propuesto

	Selección de células	Soldadura	Inspección	Encapsulado	Prueba electroluminiscencia	Laminación	Ensamble final	Prueba de simulación solar	Embalaje
Cambio climático [kg de CO₂-eq]									
Impacto materia prima	218.2196	0.2470	6.56E-07	8.7561		0.0005	0.9386		0.538
Impacto transporte de materia prima	1.9206	0.6629	1.76E-06	43.539			18.466		
Impacto ensamble (electricidad, uso de suelo, aire comprimido, agua)	0.0020	0.0200	0.0053	0.0012	0.0038	0.1711	0.0697	0.0897	0.001
Impacto residuos	0.0006	3.26E-06	0.0000	0.0002		0.0015	0.0167	0.0003	
Impacto total por proceso	220.1428	0.9299	0.0053	52.297	0.0038	0.1731	19.491	0.0900	0.539
Impacto total de ensamble de panel	293.6736								

Nota: : La celda marcada con color rosa indica el impacto asociado a la producción de celdas solares

- Ecotoxicidad terrestre

Para este escenario, el proceso con mayor contribución al impacto por ecotoxicidad terrestre es la producción de celdas solares, seguido por la disposición de celdas fracturadas que emite 0.0003 kg de plata al suelo y la disposición de paneles dañados, que emiten 4.368 kg de plata al suelo. En esta categoría el impacto por producción de materia prima distinta a celdas solares es sólo de 0.081% y el del transporte de la materia prima es de 0.247%, de acuerdo con la Fig.40.

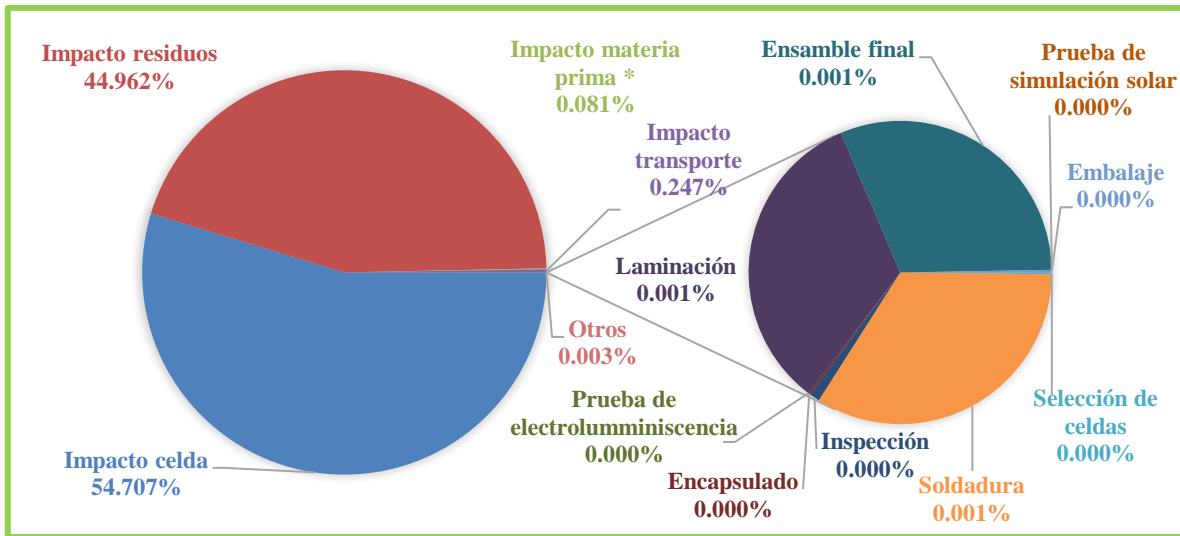


Fig. 40: Resultados Ecotoxicidad terrestre- escenario propuesto

* El impacto de materia prima involucra al impacto causado por la producción de vidrio templado, aluminio, EVA, TPT, soldadura de estaño, silicona y ABS de caja de conexiones. También en este impacto se está considerando la producción de pallets usados en el embalaje.

NOTA: Del lado derecho se divide el impacto asociado al ensamble (luz, agua, uso de suelo, aire comprimido) de cada uno de los procesos

Gracias a la Tabla 44, se pueden identificar los procesos de ensamble con mayor impacto para cada uno de los tipos de impacto medido, como era de esperarse para el impacto por producción de materia prima, la producción de celdas es el proceso que más daño ambiental genera, respecto a transporte de materia prima es en encapsulado donde se aprecia un mayor impacto ya que se deben importar materiales como vidrio templado, EVA y TPT para suplir la demanda de paneles mensuales, sobre el ensamble es el proceso de laminación el de mayor impacto y sobre residuos la disposición de celdas fracturadas que son generadas en el proceso de selección de celdas es el proceso de mayor impacto.

Tabla 44: Ecotoxicidad terrestre- impacto por proceso- escenario propuesto

	Selección de celdas	Soldadura	Inspección	Encapsulado	Prueba electroluminiscencia	Laminación	Ensamble final	Prueba de simulación solar	Embalaje
Ecotoxicidad terrestre [kg de 1.4 DCB-eq]									
Impacto materia prima	2.2071	0.0257	6.82E-08	0.0413		0.0000	0.0113		0.0038
Impacto transporte de materia prima	0.0016	0.0006	1.49E-09	0.0369			0.0156		
Impacto ensamble (electricidad, uso de suelo, aire comprimido, agua)	3.34E-05	0.0001	3.98E-05	9.74E-06	3.00E-05	0.0012	0.0006	0.0007	1.38E-05

Impacto residuos	0.0102	0.0008	0.0071	1.03E-05		0.0021	2.09E-05	0.0004	
Impacto total por proceso	2.2189	0.0271	0.0071	0.0782	3.00E-05	0.0033	0.0276	0.0010	0.0038
Impacto total de ensamble de panel	2.3670								

Nota: : La celda marcada con color rosa indica el impacto asociado a la producción de celdas solares

- Ecotoxicidad agua dulce

Con la Fig.41 es posible identificar el impacto que tiene la producción de celdas solares en esta categoría pues representa el 93.241% del impacto total, también se puede observar que la producción de otros tipos de materia prima es responsable del 3.46% del impacto y en particular es la producción de vidrio templado y de soldadura de estaño la causante de este impacto pues en la primera se generan emisiones al agua de bromo, fósforo, manganeso, berilio, cobalto, bario, entre otros (las cantidades emitidas se mencionan en el capítulo 5) y en la segundo se emiten al agua 2.41E-5 kg de iones de plata, 5.25E-5 kg de iones de níquel, 0.0006 kg de iones de zinc, 0.0004 kg de manganeso, 0.0006 kg de bario, 3.11E-6 kg de berilio, 2.92E-5 kg de cobalto, 3.50 kg de iones de arsénico y 6.51E-6 kg de talio. Por otro lado, el transporte de materia prima representa el 3.46% del impacto total y se debe a las emisiones al agua de las siguientes cantidades y sustancias: 0.0006 kg de bromo, 8.88E-5 kg de iones de níquel, 5.39E-5 kg de iones de vanadio, 0.0004 kg de hidrocarburos, 0.0005 kg de manganeso, 0.0008 kg de bario, 0.0001 kg de iones de zinc, 2.26E-6 kg de berilio, 2.45E-5 kg de bromo, 2.07E-6 kg de iones de plata y 1.95E-5 kg de cobalto.

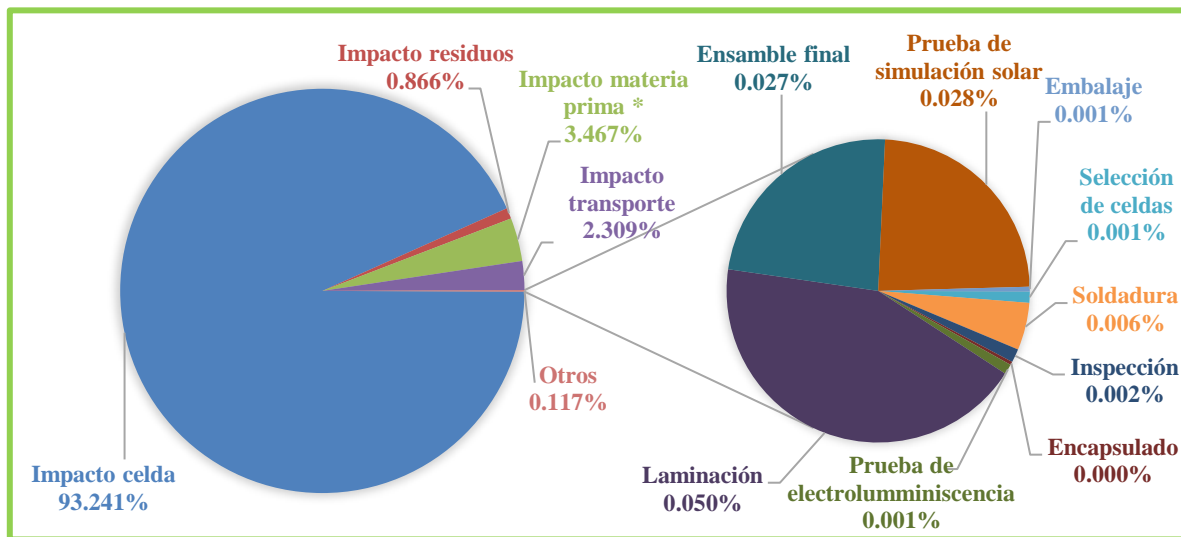


Fig. 41: Resultados Ecotoxicidad agua dulce- escenario propuesto

* El impacto de materia prima involucra al impacto causado por la producción de vidrio templado, aluminio, EVA, TPT, soldadura de estaño, silicona y ABS de caja de conexiones. También en este impacto se está considerando la producción de pallets usados en el embalaje.

NOTA: Del lado derecho se divide el impacto asociado al ensamble (luz, agua, uso de suelo, aire comprimido) de cada uno de los procesos

En la Tabla 45 se pueden encontrar los resultados divididos por tipo de impacto evaluado y por proceso gracias a lo cual se puede identificar al proceso con mayor impacto por cada uno de los tipos, siendo notorio que en producción de materia prima el proceso de mayor impacto es la producción de celdas, en transporte de materia prima el proceso de mayor impacto es el de encapsulado debido a que se deben transportar materiales como vidrio templado, EVA y TPT. Finalmente, en disposición de residuos, son los residuos de celdas fracturadas provenientes de la selección de celdas, los que generan más impacto.

Tabla 45: Ecotoxicidad de agua dulce- Resultados por proceso- Escenario propuesto

	Selección de celdas	Soldadura	Inspección	Encapsulado	Prueba electroluminiscencia	Laminación	Ensamble final	Prueba de simulación solar	Embalaje
Ecotoxicidad de agua dulce [kg de 1.4 DCB-eq]									
Impacto materia prima	2.2071	0.0257	6.82E-08	0.0413		0.0000	0.0113		0.0038
Impacto transporte de materia prima	0.0016	0.0006	1.49E-09	0.0369			0.0156		
Impacto ensamble (electricidad, uso de suelo, aire comprimido, agua)	3.34E-05	0.0001	3.98E-05	9.74E-06	3.00E-05	0.0012	0.0006	0.0007	1.38E-05
Impacto residuos	0.0102	0.0008	0.0071	1.03E-05		0.0021	2.09E-05	0.0004	
Impacto total por proceso	2.2189	0.0271	0.0071	0.0782	3.00E-05	0.0033	0.0276	0.0010	0.0038
Impacto total de ensamble de panel	2.3670								

Nota: : La celda marcada con color rosa indica el impacto asociado a la producción de celdas solares

- Eutrofización de agua dulce

En la Fig. 42 se pueden observar los tipos de impacto que son medidos en este estudio, queda expuesto en ella que el proceso con mayor impacto es la producción de celdas solares que representa el 97.14% del impacto total, la producción del resto de materia prima es el segundo impacto más grande con 1.907% del total y en tercer lugar se encuentra el transporte de esta con el 0.815% del impacto.

En la Tabla 46 se desglosan los tipos de impacto medidos en cada uno de los procesos de ensamble, con lo que es posible determinar que además de la producción de celdas solares, la producción de vidrio templado, EVA y TPT generan un impacto considerable y se ve reflejado en el impacto de encapsulado, este mismo proceso es el que tiene mayor impacto en el transporte de su materia prima. Por otro lado, al igual que en categorías anteriores el proceso de laminación tiene el mayor impacto por ensamble debido al consumo eléctrico que requiere y finalmente se puede ver que los residuos generados en inspección son los que mayor impacto generan en esta categoría.

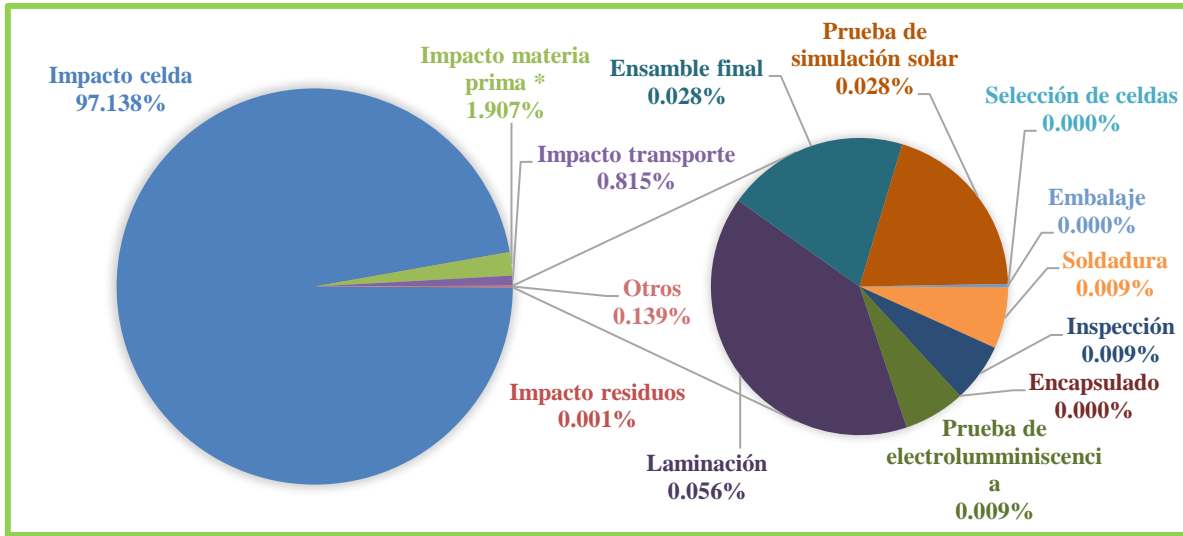


Fig. 42: Resultados Eutrofización de agua dulce- escenario propuesto

* El impacto de materia prima involucra al impacto causado por la producción de vidrio templado, aluminio, EVA, TPT, soldadura de estaño, silicona y ABS de caja de conexiones. También en este impacto se está considerando la producción de pallets usados en el embalaje.

NOTA: Del lado derecho se divide el impacto asociado al ensamble (luz, agua, uso de suelo, aire comprimido) de cada uno de los procesos

Tabla 46: Eutrofización de agua dulce- resultados por proceso- escenario propuesto

	Selección de celdas	Soldadura	Inspección	Encapsulado	Prueba electroluminiscencia	Laminación	Ensamble final	Prueba de simulación solar	Embalaje
Eutrofización de agua dulce [kg de P -eq]									
Impacto materia prima	0.1042	0.0006	1.66E-09	0.0010		2.03E-07	0.0003		0.0001
Impacto transporte de materia prima	2.00E-05	1.00E-05	2.38E-11	0.0006			0.0003		
Impacto ensamble (electricidad, uso de suelo, aire comprimido, agua)	2.94E-7	1.00E-05	9.56E-06	1.32E-9	1.00E-05	0.0001	2.96E-05	3.00E-05	5.24E-07
Impacto residuos	7.54E-09	3.11E-10	4.37E-07	1.32E-9		1.03E-07	3.84E-07	1.64E-08	
Impacto total por proceso	0.1042	0.0006	1.00E-05	0.0016	1.00E-05	0.0001	0.0006	3.00E-05	0.0001
Impacto total de ensamble de panel	0.1073								

Nota: : La celda marcada con color rosa indica el impacto asociado a la producción de celdas solares

- Agotamiento del ozono

Para esta categoría se construyó la Fig. 43 que muestra los porcentajes en la contribución al impacto total, de cada uno de los tipos de impacto considerados, siendo evidente en ella que

el proceso de mayor impacto es la producción de celdas solares con el 63.04% del impacto total y también teniendo una contribución relevante el transporte de materia prima y la producción de materia prima ya que la primera genera emisiones al aire de $9.45E-7$ kg de Halón 1301 y en la segunda se destaca la producción de vidrio templado que genera emisiones de $4.73E-8$ kg de Halón 1301 y $7.125E-9$ kg de Halón 1211.

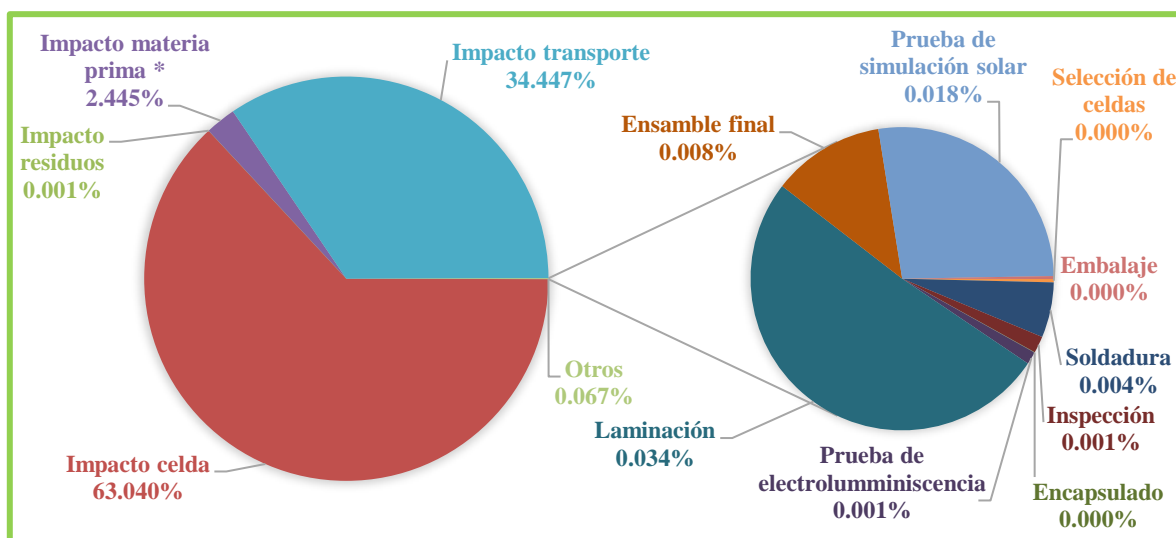


Fig. 43: Resultados Agotamiento del ozono escenario propuesto

* El impacto de materia prima involucra al impacto causado por la producción de vidrio templado, aluminio, EVA, TPT, soldadura de estaño, silicona y ABS de caja de conexiones. También en este impacto se está considerando la producción de pallets usados en el embalaje.

NOTA: Del lado derecho se divide el impacto asociado al ensamble (luz, agua, uso de suelo, aire comprimido) de cada uno de los procesos

En la Tabla 47 se muestran los resultados obtenidos por cada tipo de impacto considerado y dividido en cada uno de los procesos de ensamble que fueron tomados en cuenta, con esta tabla es posible identificar que respecto al impacto por transporte de materia prima, el proceso de encapsulado es el de mayor impacto y se debe a la necesidad de importar materiales como vidrio templado, EVA y TPT para poder ensamblar los 600 paneles mensuales que la demanda requiere; respecto al impacto por ensamble, el proceso de laminación es el que más impacto genera debido al consumo energético de dicho proceso, sobre el impacto por disposición de residuos, es en la etapa de ensamble final donde se está generando la mayor cantidad de impacto y se debe a los residuos de trapos, agua, aluminio y plástico (de las cajas de conexiones) que son generados a lo largo de este proceso.

Tabla 47: Agotamiento del ozono- impacto por proceso- escenario propuesto

	Selección de celas	Soldadura	Inspección	Encapsulado	Prueba electroluminiscencia	Laminación	Ensamble final	Prueba de simulación solar	Embalaje
Agotamiento del ozono [kg de CFC-11-eq]									
Impacto materia prima	2.09E-05	1.47E-08	3.90E-14	6.22E-07		5.39E-11	5.66E-08		1.18E-07
Impacto transporte de materia prima	3.40E-07	1.17E-07	3.12E-13	7.71E-06			3.27E-06		
Impacto ensamble (electricidad, uso de suelo, aire comprimido, agua)	7.91E-11	1.32E-09	3.99E-10	9.44E-12	3.00E-10	1.14E-08	2.69E-09	6.09E-09	7.05E-11
Impacto residuos	2.09E-11	1.03E-12	1.85E-13	5.58E-13		3.28E-11	2.81E-10	5.46E-12	
Impacto total por proceso	2.13E-05	1.33E-07	4.00E-10	8.33E-06	3.00E-10	1.15E-08	3.33E-06	6.10E-09	1.18E-07
Impacto total de ensamble de panel	3.32E-05								

Nota: : La celda marcada con color rosa indica el impacto asociado a la producción de celdas solares

- Toxicidad humana

Con ayuda de la Fig.44 se pueden visualizar los tipos de impacto considerados y su porcentaje de contribución al impacto total en esta categoría, resulta evidente que la producción de celdas solares es el proceso de mayor impacto en esta categoría, seguido del impacto por transporte y el impacto de producción del resto de materia prima, esto se debe a que en el primero se emiten las siguientes cantidades y sustancias: 2.67E-5 kg de fósforo al suelo, 6.51E-5 kg de vanadio al aire, 3.43E-4 kg de plomo al aire, 4.85E-6 kg de fósforo al agua, 4.86E-8 kg de mercurio al aire, 0.0008 kg de bario al agua, 3.77E-6 kg de antimonio al aire, 0.0002 kg de bario al suelo, 1.28E-10 kg de dioxinas, 3.12E-5 kg de níquel al aire, 7.34E-6 kg de iones de arsénico al agua y 4.80E-7 kg de fósforo al aire; en el segundo el impacto se debe en su mayoría a la producción de vidrio templado que emite: 3.44E-5 kg de fósforo al agua, 0.0001 kg de fluoruro de hidrógeno, 6.07E-6 kg de fósforo al suelo, 8.34E-7 kg de fósforo al aire, 3.06E-6 kg de antimonio al aire, 1.27E-5 kg de iones de arsénico al agua, 1.84E-8 kg de mercurio al aire y 2.31E-6 kg de vanadio al aire. También el proceso de disposición de residuos tiene un impacto importante en esta categoría y se debe a la emisión al suelo de 0.0003 kg de plata.

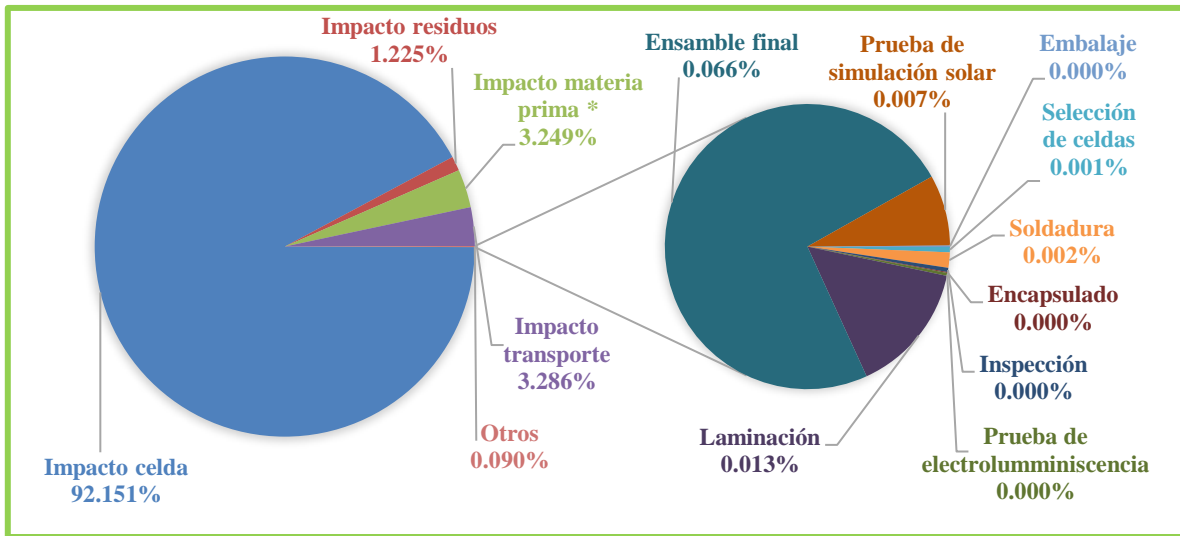


Fig. 44: Resultados Toxicidad humana escenario propuesto

* El impacto de materia prima involucra al impacto causado por la producción de vidrio templado, aluminio, EVA, TPT, soldadura de estaño, silicona y ABS de caja de conexiones. También en este impacto se está considerando la producción de pallets usados en el embalaje.

NOTA: Del lado derecho se divide el impacto asociado al ensamble (luz, agua, uso de suelo, aire comprimido) de cada uno de los procesos

En la Tabla 48 se muestran los resultados obtenidos por cada tipo de impacto considerado y para cada uno de los procesos de ensamble de paneles solares, en ella además de visualizar el impacto de la producción de celdas en el impacto por producción de materia prima, se puede ver que el proceso con mayor impacto generado por transporte de materia prima es el de encapsulado y se debe a la cantidad de vidrio templado, EVA y TPT requeridos para ensamblar 600 paneles mensuales; también se ve en la tabla que en esta categoría el proceso de ensamble final es aquel que tiene más impacto por ensamble y se debe a la electricidad y agua usada en el proceso; por otro lado el proceso de selección de celdas es el de mayor impacto en el impacto por disposición de residuos y se debe a las celdas fracturadas que son generadas en ese proceso.

Tabla 48: Toxicidad humana- impacto por proceso- escenario propuesto

	Selección de celas	Soldadura	Inspección	Encapsulado	Prueba electroluminiscencia	Laminación	Ensamble final	Prueba de simulación solar	Embalaje
Toxicidad humana [kg de 1.4 DCB-eq]									
Impacto materia prima	21.8606	0.0763	2.03E-07	0.5567		0.0002	0.0419		0.0957
Impacto transporte de materia prima	0.0232	0.0080	2.13E-08	0.5254			0.2228		

Impacto ensamble (electricidad, uso de suelo, aire comprimido, agua)	0.0001	0.0004	0.0001	2.18E-05	0.0001	0.0032	0.0157	0.0017	3.45E-05
Impacto residuos	0.1443	0.0108	0.1003	3.82E-05		0.0299	0.0001	0.0050	
Impacto total por proceso	22.0282	0.0955	0.1004	1.0821	0.0001	0.0332	0.2805	0.0067	0.0957
Impacto total de ensamble de panel	23.7225								

Nota: : La celda marcada con color rosa indica el impacto asociado a la producción de celdas solares

- Uso de suelo urbano

En la Fig. 45 se aprecian los tipos de impacto medidos en esta categoría, gracias a ello se puede apreciar que el proceso de producción de celdas solares es el que genera mayor impacto ya que representa el 80.88% del total, seguido por el proceso de producción del resto de materias primas en el que la producción de vidrio temprano Y la producción de pallets son los procesos que representan más impacto ya que utiliza 0.1996 m² de tierra anuales y 0.122 m² de tierra anuales, respectivamente. El impacto por transporte es el tercer impacto más grande en esta categoría y se debe a que utiliza 0.117 m² de tierra anuales.

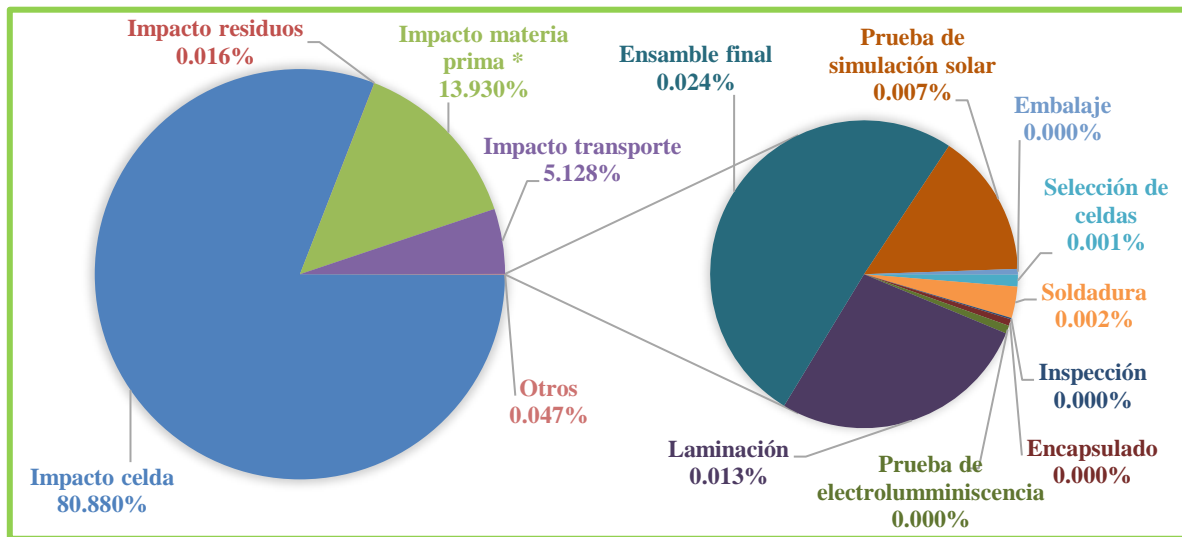


Fig. 45: Resultados Uso de suelo urbano, escenario propuesto

* El impacto de materia prima involucra al impacto causado por la producción de vidrio templado, aluminio, EVA, TPT, soldadura de estaño, silicona y ABS de caja de conexiones. También en este impacto se está considerando la producción de pallets usados en el embalaje.

NOTA: Del lado derecho se divide el impacto asociado al ensamble (luz, agua, uso de suelo, aire comprimido) de cada uno de los procesos

Gracias a la Tabla 49, se puede identificar el proceso de ensamble que representa más impacto para cada uno de los tipos de impactos medidos en esta categoría, por ejemplo, se aprecia que la producción de celdas solares es el proceso de producción de materia prima con mayor impacto, respecto a transporte de materia prima el proceso de mayor impacto es el de traer la materia prima para el encapsulado, sobre el ensamble podemos ver que el proceso de laminación es el que representa mayor impacto gracias al consumo de energía que requiere

para poder ser realizado, y finalmente se ve que son los residuos generados en el proceso de selección de celdas los que generan mayor impacto en esta categoría.

Tabla 49: Uso de suelo urbano- impacto por proceso- escenario propuesto

	Selección de celas	Soldadura	Inspección	Encapsulado	Prueba electroluminiscencia	Laminación	Ensamble final	Prueba de simulación solar	Embalaje
Uso de suelo urbano [m² de tierra anual]									
Impacto materia prima	2.0424	0.0175	4.64E-08	0.2001		1.33E-05	0.0108		0.1234
Impacto transporte de materia prima	0.0038	0.0013	3.52E-09	0.0873			0.0370		
Impacto ensamble (electricidad, uso de suelo, aire comprimido, agua)	1.50E-05	3.92E-05	1.85E-06	8.23E-06	1.00E-05	0.0003	0.0006	0.0002	6.83E-06
Impacto residuos	1.50E-05	8.38E-07	8.10E-06	0.0002		0.0001	3.81E-05	2.05E-05	
Impacto total por proceso	2.0462	0.0188	1.00E-05	0.2876	0.0000	0.0005	0.0484	0.0002	0.1234
Impacto total de ensamble de panel	2.5252								

Nota: : La celda marcada con color rosa indica el impacto asociado a la producción de celdas solares

- Uso de suelo de agricultura

Con base en la Fig. 46 se puede ver que en esta categoría la producción de celdas solares es el proceso con mayor impacto ya que representa el 55.41% del impacto total, también se puede ver que la producción de materia prima diferente de celdas solares tiene un porcentaje de participación en el impacto muy importante y esto se debe a que la producción de pallets utiliza 6.21 m² de tierra anual y la producción de vidrio templado requiere 0.37 m² de tierra anual.

En la Tabla 51 se desglosan los resultados obtenidos por tipo de impacto para cada uno de los procesos de ensamble de celdas solares gracias a esto se puede identificar que la producción de celdas solares es el proceso de generación de materia prima con mayor impacto, también es posible identificar que el encapsulado es el proceso que genera mayor impacto debido al transporte de materia prima que requiere para realizarse, respecto al impacto por el ensamble a diferencia de otras categorías, en esta no es la laminación sino el ensamble final el que más impacto genera y esto se debe no sólo al consumo eléctrico si no también al consumo de agua que utiliza. Finalmente respecto a residuos, son los generados en el ensamble final los que generan mayor impacto.

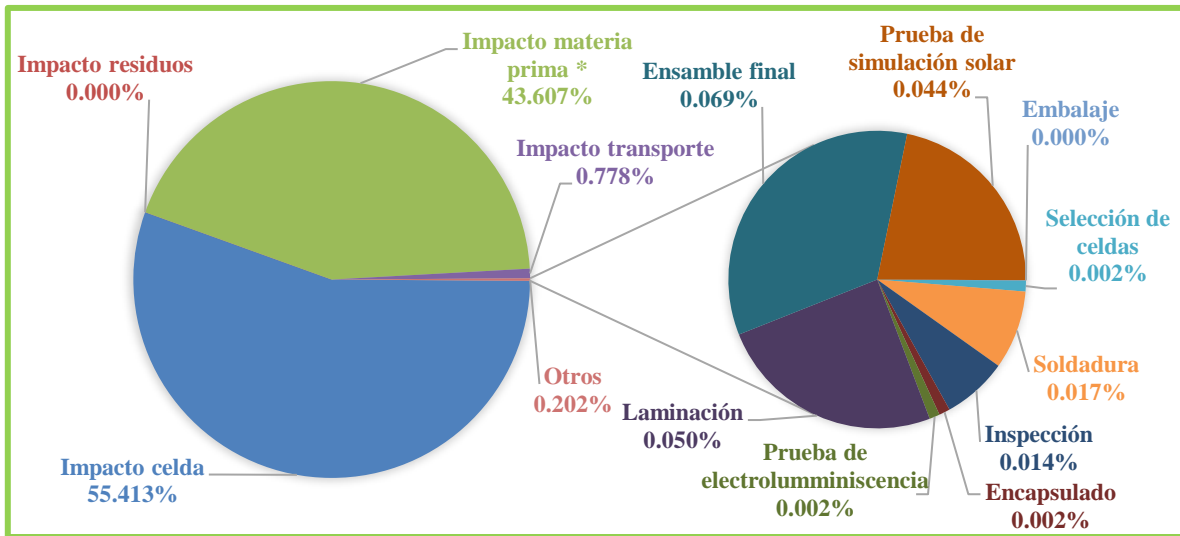


Fig. 46: Resultados Uso de suelo agrícola escenario propuesto

* El impacto de materia prima involucra al impacto causado por la producción de vidrio templado, aluminio, EVA, TPT, soldadura de estaño, silicona y ABS de caja de conexiones. También en este impacto se está considerando la producción de pallets usados en el embalaje.

NOTA: Del lado derecho se divide el impacto asociado al ensamble (luz, agua, uso de suelo, aire comprimido) de cada uno de los procesos

Tabla 50: Uso de suelo agrícola- impacto por proceso- escenario propuesto

	Selección de celdas	Soldadura	Inspección	Encapsulado	Prueba electroluminiscencia	Laminación	Ensamble final	Prueba de simulación solar	Embalaje
Uso de suelo agrícola [m² de tierra anual]									
Impacto materia prima	8.4503	0.0093	2.47E-08	0.3810		0.0018	0.0172		6.2406
Impacto transporte de materia prima	0.0035	0.0012	2.79E-08	0.0800			0.0339		
Impacto ensamble (electricidad, uso de suelo, aire comprimido, agua)	0.0004	0.0026	0.0022	0.0004	0.0003	0.0076	0.0105	0.0067	9.11E-06
Impacto residuos	3.40E-06	1.66E-07	1.57E-06	1.35E-07		1.63E-05	4.05E-05	2.71E-06	
Impacto total por proceso	8.4542	0.0131	0.0022	0.4613	0.0003	0.0094	0.0617	0.0067	6.2406
Impacto total de ensamble de panel	15.2496								

Nota: : La celda marcada con color rosa indica el impacto asociado a la producción de celdas solares

- Acidificación terrestre

Para este proceso se muestran en la Fig. 47 Los resultados obtenidos por cada uno de los tipos de impacto medidos, siendo visible que la producción de celdas solares es el proceso

de mayor impacto en esta categoría como seguido del impacto de transportar la materia prima para el ensamble de los paneles pues emite $7.16E-3$ kg de NO_x y $7.43E-2$ kg de SO_x al aire; el impacto por la producción del resto de materia prima también tiene un porcentaje relevante del impacto total en esta categoría y esto se debe en su mayoría a la producción de vidrio templado ya que emite $4.16E-02$ kg de SO_x al aire, $3.41E-02$ kg de NO_x al aire y 0.001 kg de amoníaco al aire.

Con base en la tabla 51, se puede identificar que en efecto la producción de células solares es el proceso de producción de materia prima con mayor impacto, también se puede ver que el transporte de la materia prima para encapsulado representa la mayor cantidad de impacto asociado con transporte, al igual que en categorías anteriores, el proceso de laminación es el de mayor impacto por ensamble debido a la cantidad de energía eléctrica que consume, respecto a la disposición final de los residuos es el proceso de ensamble final el que genera mayor impacto ya que en el surgen residuos de trapos, aluminio, plástico de la caja de conexiones y agua.

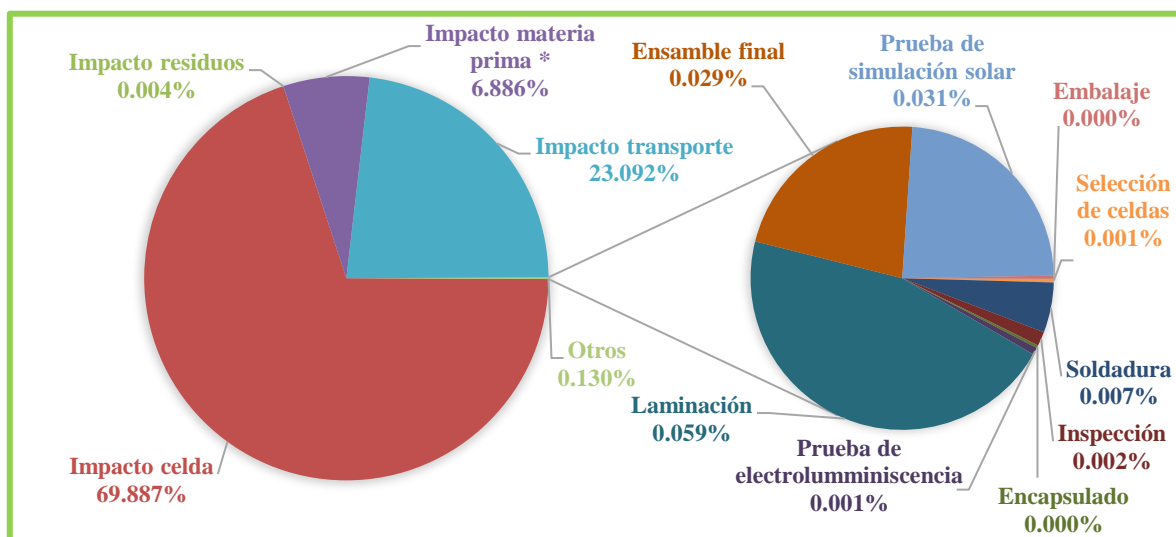


Fig. 47: Resultados Acidificación terrestre escenario propuesto

* El impacto de materia prima involucra al impacto causado por la producción de vidrio templado, aluminio, EVA, TPT, soldadura de estaño, silicona y ABS de caja de conexiones. También en este impacto se está considerando la producción de pallets usados en el embalaje.

NOTA: Del lado derecho se divide el impacto asociado al ensamble (luz, agua, uso de suelo, aire comprimido) de cada uno de los procesos

Tabla 51: Acidificación terrestre- impacto por proceso- escenario propuesto

Selección de celas	Soldadura	Inspección	Encapsulado	Prueba electroluminiscencia	Laminación	Ensamble final	Prueba de simulación solar	Embalaje
--------------------	-----------	------------	-------------	-----------------------------	------------	----------------	----------------------------	----------

Acidificación terrestre [kg de SO ₂ -eq]									
Impacto materia prima	0.7030	0.0018	4.82E-09	0.0615		2.19E-06	0.0037		0.0024
Impacto transporte de materia prima	0.0069	0.0024	6.33E-09	0.1565			0.0664		
Impacto ensamble (electricidad, uso de suelo, aire comprimido, agua)	5.05E-06	0.0001	1.98E-05	4.01E-06	1.00E-05	0.0006	0.0003	0.0003	4.40E-06
Impacto residuos	4.54E-07	0.0000	1.91E-07	1.87E-08		1.56E-06	3.97E-05	2.56E-07	
Impacto total por proceso	0.7099	0.0043	2.00E-05	0.2180	0.0000	0.0006	0.0704	0.0003	0.0024
Impacto total de ensamble de panel	1.0059								

Nota: : La celda marcada con color rosa indica el impacto asociado a la producción de celdas solares

- Creación fotoquímica de ozono/oxidantes

En la figura 48 se pueden ver los resultados obtenidos en esta categoría divididos por el tipo de impacto evaluado, gracias a ello se puede identificar claramente que el proceso de producción de celdas solares es el que mayor impacto genera con el 48.99% del total y seguido muy de cerca por el impacto asociado al transporte de la materia prima que representa el 47.58% del impacto total y esto se debe a que emite al aire 0.315 kg de NO_x y 0.02 kg de NMVOC. También en la figura mencionada se puede ver que el impacto de materia prima es el tercero con mayor participación en el impacto total y eso es su mayoría se debe a la producción de vidrio templado que emite al aire 3.41E-02 kg de NO_x, 2.25E-03 kg de NMVOC y 0.033 kg de SO_x.

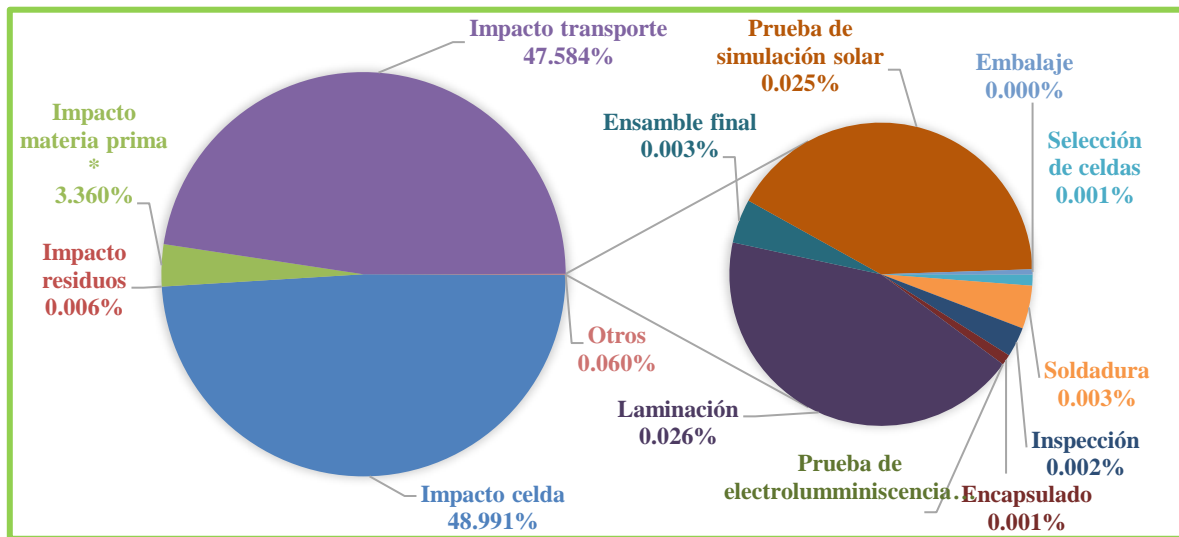


Fig. 48: Resultados Creación fotoquímica de oxidantes, escenario propuesto

* El impacto de materia prima involucra al impacto causado por la producción de vidrio templado, aluminio, EVA, TPT, soldadura de estaño, silicona y ABS de caja de conexiones. También en este impacto se está considerando la producción de pallets usados en el embalaje.

NOTA: Del lado derecho se divide el impacto asociado al ensamble (luz, agua, uso de suelo, aire comprimido) de cada uno de los procesos

Los resultados de esta categoría desglosados por el tipo de impacto evaluado y cada uno de los procesos del ensamble se muestran en la tabla 52, en ella se aprecia que el proceso de producción de celdas solares Es el proceso de producción de materia prima con mayor impacto, el proceso de transporte con mayor impacto es usado en el proceso de encapsulado ya que se requiere traer vidrio templado, EVA y TPT para la producción de 600 paneles mensuales, al igual que en categorías anteriores el proceso de laminación es el que representa más impacto por ensamble y es debido a la cantidad de energía eléctrica que consume, respecto a la disposición final de residuos son los producidos en ensamble final los que generan mayor impacto.

Tabla 52: Creación fotoquímica de oxidantes- impacto por proceso- escenario propuesto

	Selección de celas	Soldadura	Inspección	Encapsulado	Prueba electroluminiscencia	Laminación	Ensamble final	Prueba de simulación solar	Embalaje
Creación fotoquímica de oxidantes [kg de NMVOC-eq]									
Impacto materia prima	0.7126	0.0021	5.53E-09	0.0406		1.75E-06	0.0029		0.0031
Impacto transporte de materia prima	0.0104	0.0015	9.50E-09	0.2348			0.0996		
Impacto ensamble (electricidad, uso de suelo, aire comprimido, agua)	9.29E-06	2.14E-03	9.68E-06	9.96E-06	0.00E+00	0.0004	0.0002	0.0002	2.92E-06
Impacto residuos	7.11E-07	3.20E-08	3.01E-07	3.89E-08		2.13E-06	0.0001	3.06E-07	
Impacto total por proceso	0.7230	0.0057	0.0000	0.2754	0.0000	0.0004	0.1028	0.0002	0.0031
Impacto total de ensamble de panel	1.1106								

Nota: : La celda marcada con color rosa indica el impacto asociado a la producción de celdas solares

- Material particulado

Para esta categoría se creó la figura 49 con los porcentajes de impacto de cada uno de los tipos de impacto evaluados en este estudio coma gracias a ella se puede visualizar que la producción de celdas solares es el proceso con mayor impacto pues representa el 78.55% del impacto total, el impacto por transportes en segundo más grande con 16.40% del total y se debe a la emisión al aire de 3.15E-01 kg de NOx, 7.43E-02 kg de SOx y 5.91E-03 kg de partículas < 2.5 um; el impacto por la producción de materia prima diferente a celdas solares representa el 4.90% del impacto total siendo el tercer impacto más grande en esta categoría y se debe en su mayoría a la producción de vidrio templado que emite al aire: 4.16E-02 kg de SOx, 3.41E-02 kg de NOx, 3.45E-03 kg de partículas < 2.5 um, 0.0007 kg de partículas >2.5 um y < 10 um, y 0.001 kg de amoniaco.

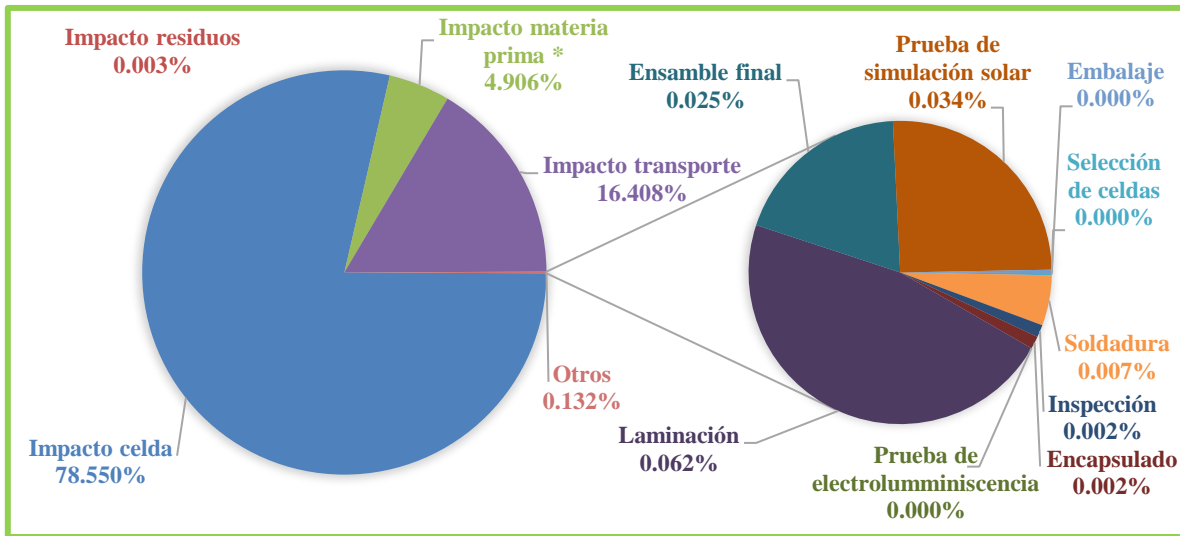


Fig. 49: Resultados Material particulado, escenario propuesto

* El impacto de materia prima involucra al impacto causado por la producción de vidrio templado, aluminio, EVA, TPT, soldadura de estaño, silicona y ABS de caja de conexiones. También en este impacto se está considerando la producción de pallets usados en el embalaje.

NOTA: Del lado derecho se divide el impacto asociado al ensamble (luz, agua, uso de suelo, aire comprimido) de cada uno de los procesos

Gracias a la tabla 53 podemos ver desglosado los resultados por tipo de impacto para cada uno de los procesos de ensamble de paneles solares, con base en esto se puede identificar cuál proceso generó mayor impacto para esta categoría por cada uno de los tipos siendo así que la producción de celdas solares es el proceso de producción de materia prima con mayor impacto, El encapsulado es el proceso cuyo transporte tiene mayor impacto, la laminación es el proceso con más impacto de ensamble debido al consumo de electricidad que requiere y el ensamble final es el proceso cuyos residuos generan más impacto ya que son residuos de trapos de algodón, de aluminio, de agua sucia y de plástico de caja de conexiones.

Tabla 53: Material particulado- impacto por proceso- escenario propuesto

	Selección de celdas	Soldadura	Inspección	Encapsulado	Prueba electroluminiscencia	Laminación	Ensamble final	Prueba de simulación solar	Embalaje
Material particulado [kg de PM10-eq]									
Impacto materia prima	0.4438	0.0026	6.90E-09	0.0211		9.18E-07	0.0024		0.0016
Impacto transporte de materia prima	0.0028	0.0010	2.53E-09	0.0625			0.0265		
Impacto ensamble (electricidad, uso de suelo, aire comprimido, agua)	1.72E-06	4.00E-05	9.89E-06	9.99E-06	0.00E+00	0.0003	0.0001	0.0002	2.69E-06

Impacto residuos	2.26E-07	1.03E-08	9.68E-08	9.18E-09		8.19E-07	1.71E-05	1.36E-07	
Impacto total por proceso	0.4465	0.0036	1.00E-05	0.0836	0.0000	0.0003	0.0290	0.0002	0.0016
Impacto total de ensamble de panel	0.5650								

Nota: : La celda marcada con color rosa indica el impacto asociado a la producción de celdas solares

Como un breve resumen se puede decir que para todas las 11 categorías evaluadas el proceso de producción de células solares es el que genera mayor impacto, siendo también relevante la producción del resto de materia prima y el transporte de esta. De forma más específica se puede decir que la necesidad de importar materiales para el encapsulado hace que este sea el proceso con más impacto debido al transporte, la laminación es el proceso con más impacto debido al ensamble (por su consumo eléctrico) y los residuos generados en el ensamble final son los que tienen más impacto en casi todas las categorías.

8. Discusión de resultados

Una vez obtenidos los resultados de evaluación del inventario de ciclo de vida tanto del escenario base del proceso como del escenario propuesto, es posible comparar ambos para determinar si realmente existe una ventaja de la propuesta modificada vs la situación actual, en términos de impacto ambiental en las 11 categorías escogidas. En la Tabla 54 se muestran los resultados generales de la comparación.

Tabla 54: Resultados generales obtenidos en el escenario base y propuesto

Categoría	Resultado escenario base	Resultado propuesto	Unidad
Cambio climático (GWP20)	357.4876	293.673	kg CO2 al aire
Ecotoxicidad terrestre	5.6896	0.8340	kg 1.4-DCB a suelo industrial
Ecotoxicidad agua dulce	2.6867	2.367	kg 1.4- DCB a agua dulce
Eutrofización de agua dulce	0.1081	0.107	kg P a agua dulce
Agotamiento del ozono	4.45E-05	3.32E-05	kg CFC-11 al aire
Toxicidad humana	28.2422	23.722	kg 1.4- DCB a aire urbano
Uso de suelo urbano	2.6667	2.525	m2 × año de tierra de cultivo anual
Uso de suelo de agricultura	15.4488	15.249	
Acidificación terrestre	1.2352	1.005	kg SO2 al aire
Creación fotoquímica de oxidantes	1.4545	1.110	Kg NMVOC al aire
Material particulado	0.65664	0.565	kg PM10 al aire

En la Fig.50 se muestra de forma más gráfica, la disminución de los impactos en las 11 categorías evaluadas, la explicación de esta reducción se menciona en los párrafos siguientes, por categoría, dividiendo el impacto en el asociado a la producción de materia prima, el transporte de la materia prima, el impacto asociado al desecho de celdas y el impacto de cada operación de ensamble (que involucra electricidad, uso de suelo, aire comprimido y agua).

Después de la Fig. 50, se iniciará una etapa de comparación categoría por categoría y es importante mencionar que en esta comparación no se pondrá información sobre las sustancias y cantidades emitidas en cada escenario, fuera de los indicadores de categoría, pues ya se proporcionó esta información en los capítulos 5 y 7.

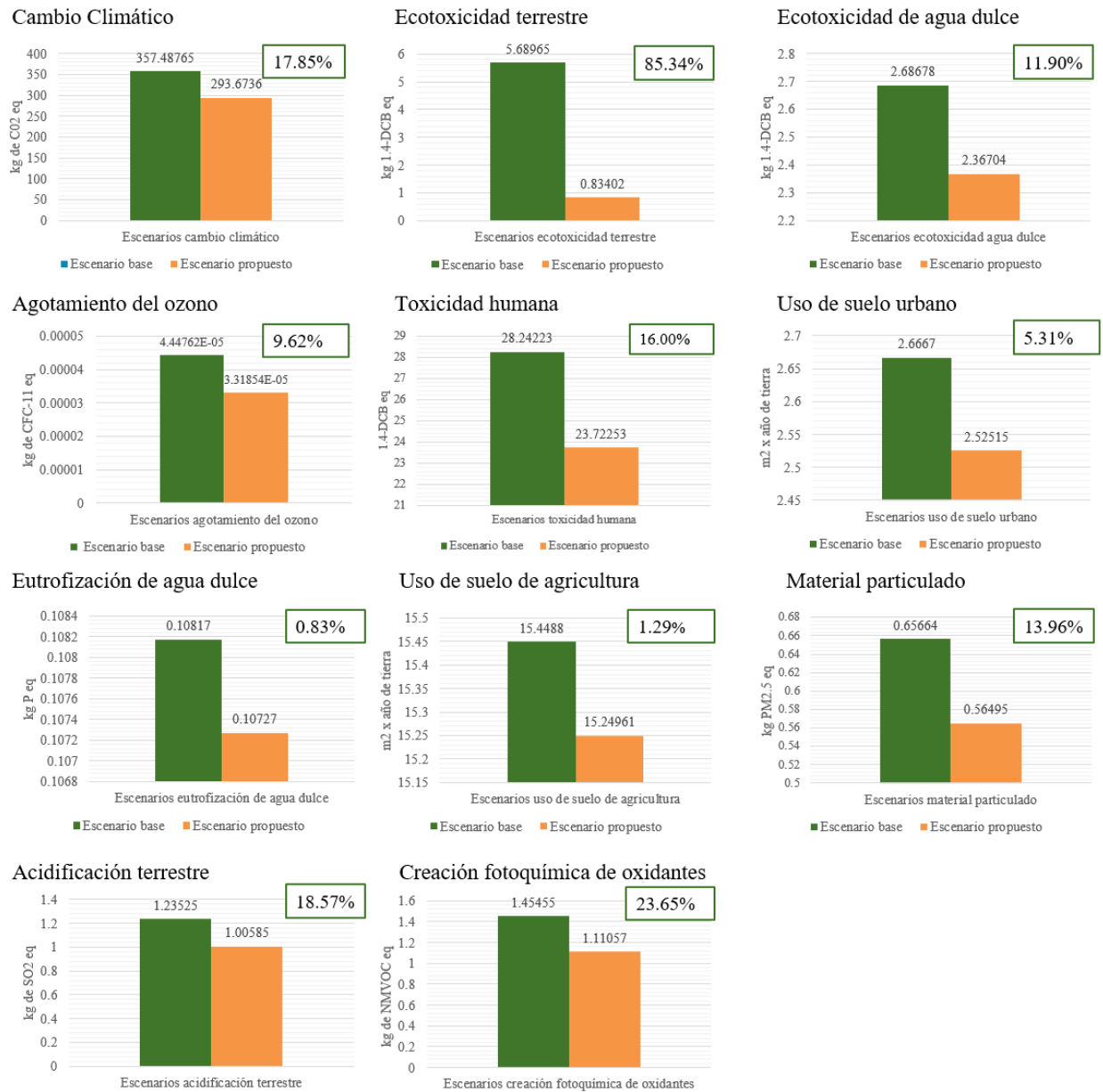


Fig. 50: Comparación de resultados de los distintos modelos comparados
 El valor encerrado en un recuadro verde, representa el porcentaje de impacto reducido

- Cambio climático (GWP20)

Con base en la Tabla 55 se puede observar que la mayor contribución al impacto del escenario base y propuesto en GWP, se debe al proceso de producción de celdas solares, esto es por la cantidad de CO₂ y metano que es emitida en esta etapa y que representa un indicador de 218.2196 kg de CO₂ eq, dicho valor se mantiene constante en ambos escenarios por lo que no se ve ninguna ventaja en ese sentido al escoger el escenario propuesto, sin embargo, el transporte de materia prima también tiene un impacto relevante en esta categoría al sumar

127.725 kg de CO₂ eq en el escenario base y 64.589 kg de CO₂ eq en el escenario propuesto, siendo esta la primera ventaja del escenario propuesto frente al escenario base, esta reducción de impacto asociado al transporte es principalmente observada en el proceso de ensamble final y es debido a que en esa etapa fue eliminada la necesidad de importar paneles completos para cumplir con la demanda y si bien parte de esta disminución se ve compensada por el aumento del impacto por traer materia prima en selección de celdas, soldadura y encapsulado, aun así hay una reducción en el indicador de 63.135 kg de CO₂ eq además hay una reducción importante también en el proceso de inspección y corresponde a las propuestas que buscaban reducir la necesidad de realizar ese proceso al implementar el apoyo visual en la separación de celdas de distintos tonos de azul.

La segunda ventaja del escenario propuesto frente al escenario base en esta categoría está en la reducción de impacto debido a la disminución de desperdicios, en el escenario base los desperdicios de materia prima y producto terminado (incluyendo celdas fracturadas, EVA, TPT, soldadura de estaño, papel encerado y paneles completos) y su disposición final a *open dump* representan un valor de 0.0247 kg de CO₂ eq en contraposición con el escenario propuesto donde sólo representan 0.0193 kg de CO₂ eq, esta disminución de impacto se debe en mayor medida a que en el escenario propuesto se está considerando que ya fue desechado todo el material de celdas fracturadas que tiene acumulado el almacén en el escenario base y que sería generado en el proceso de selección de celdas, así como la disminución de desperdicios debidos a las mejoras en el proceso de inspección.

Finalmente, en la Tabla 55 también se puede ver que en casi todos los procesos hubo una reducción de impacto, en caso de selección de celdas y encapsulado la reducción es mínima por lo que el porcentaje mostrado en verde es considerado de 0% aunque sólo en el caso de prueba de electroluminiscencia el impacto se mantiene igual.

Tabla 55: Resultados de ambos escenarios, dividido por proceso de ensamble y por tipo de impacto, para Cambio climático.

	Selección de celdas	Soldadura	Inspección	Encapsulado	Prueba electroluminiscencia	Laminación	Ensamble final	Prueba de simulación solar	Embalaje
Escenario base [kg de CO₂ eq]									
Impacto materia prima	218.2196	0.0101	1.01E-02	8.7560		0.0007	0.9386		0.538
Impacto transporte de materia prima	1.9206	0.0272	2.72E-02	43.541			82.208		
Impacto ensamble (electricidad, uso de suelo, aire comprimido, agua)	0.0021	0.8940	0.0111	0.0012	0.0038	0.1691	0.0179	0.1628	0.002
Impacto residuos	0.0028	2.44E-04	0.0002	0.0010		0.0035	0.0167	0.0003	

Impacto total por proceso	220.1452	0.9316	0.0486	52.299	0.0038	0.1733	83.181	0.1630	0.540
Impacto total de ensamble de panel	357.4877								
Escenario propuesto [kg de CO₂ eq]									
Impacto materia prima	218.2196	0.2470	6.56E-07	8.7561		0.0005	0.9386		0.538
Impacto transporte de materia prima	1.9206	0.6629	1.76E-06	43.539			18.466		
Impacto ensamble (electricidad, uso de suelo, aire comprimido, agua)	0.0020	0.0200	0.0053	0.0012	0.0038	0.1711	0.0697	0.0897	0.001
Impacto residuos	0.0006	3.26E-06	0.0000	0.0002		0.0015	0.0167	0.0003	
Impacto total por proceso	220.1428	0.9299	0.0053	52.297	0.0038	0.1731	19.491	0.0900	0.539
Impacto total de ensamble de panel	293.6736								
Variación de impacto [%]									
% Variación total por proceso	0.00%	-0.2%	-89.1%	0.0%	0.0%	-0.1%	-76.6%	-44.8%	-0.2%
% Variación total de ensamble	-17.85%								

Las casillas de variación de impacto mostradas en verde y con números negativos, muestran el porcentaje de reducción que se obtuvo entre el impacto del escenario base y el escenario propuesto.

Las casillas de variación de impacto mostradas en rojo muestran el porcentaje de aumento del impacto entre el escenario base y el escenario propuesto.

Las casillas de variación de impacto en amarillo muestran los impactos que permanecieron sin modificaciones en ambos escenarios.

Las casillas grises hacen referencia a que en ese proceso no se está tomando en consideración ese impacto debido a que la operación no lo requiere.

Las casillas azules son los totales de impacto, por proceso y total general.

- Ecotoxicidad terrestre (TETP).

Basándose en la Tabla 56, se puede identificar que en el escenario base, la mayor contribución a TETP es debida al desecho de desperdicios, de forma más específica es debido a las emisiones de plata al suelo, que se generan durante la disposición final de celdas fracturadas y paneles completos, en el escenario base esta emisión es de 0.005 kg de plata y en el escenario propuesto es de 0.0003 kg, generando así indicadores de categoría de 5.228 kg de 1.4 DCB eq y 0.375 kg de 1.4 DCB eq respectivamente, esta diferencia radica en que el escenario base se está asumiendo la disposición de las celdas fracturadas (generadas en su mayoría por la selección de celdas) que ya se tienen actualmente acumuladas en la empresa y adicionalmente las celdas y paneles que son desechados debido a errores en el proceso, en caso del escenario propuesto, sólo están siendo consideradas las celdas y paneles que son desechados en el proceso. En el escenario propuesto el tipo impacto con mayor contribución es el de la producción de materia prima, especialmente la producción de celdas solares, este valor es constante en ambos escenarios.

En esta categoría también hay una ventaja en el escenario base frente al escenario propuesto, generada por la reducción del impacto asociado al transporte de materia prima , siendo los

procesos de inspección y ensamble final los causantes de este efecto, al haber considerado la reducción de materia prima requerida para inspección y eliminar la necesidad de importar paneles para cumplir con la demanda, según lo explicado en las propuestas y obteniendo una reducción en el indicador de 4.89 kg de 1.4 DCB-eq.

Es importante mencionar también que en esta categoría sólo hay una variación mínima en el impacto de producción de materia prima de escenario base y escenario propuesto siendo esta variación de 5.85E-6 kg de 1.4DCB eq, también hay reducciones en el impacto generado por el ensamble en los procesos de selección de inspección, encapsulado, laminación, prueba de simulación solar y embalaje, esto se debe a que con las propuestas disminuyó la cantidad de energía requerida por la unidad funcional, esta reducción representa solo 0.0384 kg de 1.4DCB-eq. Y como se puede observar en la Tabla 56, el porcentaje de reducción de impacto entre el escenario base y el propuesto, es de 92.7%.

Tabla 56: Resultados de ambos escenarios, dividido por proceso de ensamble y por tipo de impacto, para Ecotoxicidad terrestre.

	Selección de celas	Soldadura	Inspección	Encapsulado	Prueba electroluminiscencia	Laminación	Ensamble final	Prueba de simulación solar	Embalaje
Escenario base [kg de 1.4 DCB eq]									
Impacto materia prima	0.4563	2.92E-05	1.20E-06	0.0005		5.07E-07	0.0001		0.0001
Impacto transporte de materia prima	0.0001	2.11E-05	8.64E-07	0.0014			0.0026		
Impacto ensamble (electricidad, uso de suelo, aire comprimido, agua)	2.00E-08	1.24E-06	6.59E-07	6.98E-08	0.00	0.0385	1.61E-07	0.0000	1.32E-07
Impacto residuos	4.1455	0.0140	1.0243	1.45E-07		0.0384	1.10E-06	0.0064	
Impacto total por proceso	4.6018	0.0140	1.0243	0.0019	0.000	0.0769	0.0027	0.0064	0.0001
Impacto total de ensamble de panel	5.7281								
Escenario propuesto [kg de 1.4 DCB eq]									
Impacto materia prima	0.4563	2.92E-05	7.77E-11	0.0005		4.80E-07	4.47E-05		0.0001
Impacto transporte de materia prima	0.0001	2.11E-05	5.60E-11	0.0014			0.0006		
Impacto ensamble (electricidad, uso de suelo, aire comprimido, agua)	5.01E-08	9.69E-06	3.12E-07	6.84E-08	0.00	9.52E-06	8.91E-06	0.0000	7.95E-08
Impacto residuos	0.1865	0.0140	0.1296	2.00E-08		0.0384	1.09E-06	0.0064	

Impacto total por proceso	0.6429	0.0141	0.1296	0.0019	0.000	0.0385	0.0006	0.0064	0.0001
Impacto total de ensamble de panel	0.8340								
Variación de impacto [%]									
% Variación total por proceso	-86.0%	0.1%	-87.3%	0.0%	0.0%	-50.0%	-76.0%	-0.2%	0.0%
% Variación total de ensamble	-92.7%								

Las casillas de variación de impacto mostradas en verde y con números negativos, muestran el porcentaje de reducción que se obtuvo entre el impacto del escenario base y el escenario propuesto.

Las casillas de variación de impacto mostradas en rojo muestran el porcentaje de aumento del impacto entre el escenario base y el escenario propuesto.

Las casillas de variación de impacto en amarillo muestran los impactos que permanecieron sin modificaciones en ambos escenarios.

Las casillas grises hacen referencia a que en ese proceso no se está tomando en consideración ese impacto debido a que la operación no lo requiere.

Las casillas azules son los totales de impacto, por proceso y total general.

- Ecotoxicidad agua dulce

En esta categoría, para ambos escenarios el proceso con mayor impacto es la producción de celdas solares y la producción del resto de materia prima, en este sentido el escenario propuesto tiene un menor impacto (el indicador disminuye 0.001 kg de 1.4 DCB-eq) debido principalmente a haber disminuido la cantidad de soldadura de estaño usada en el proceso de inspección, gracias a las mejoras propuestas.

Además de la anterior, el escenario propuesto muestra otra ventaja en la disminución del impacto del desecho tanto de celdas fracturadas como de paneles dañados a *open dump*, este impacto es debido a la emisión al suelo de la plata contenida en estos desperdicios, en el escenario base se tenía un indicador de 0.2293 kg de 1.4 DCB-eq y en el propuesto el indicador es de 0.0205 kg de 1.4 DCB-eq, al comparar ambos resultados podemos identificar una reducción de este tipo de impacto en el escenario propuesto de 11.9% frente al escenario base.

Al igual que en los casos anteriores, existe una reducción de impacto asociada al proceso de transporte de materia prima, situación que se hace más evidente en los procesos de inspección y de ensamble final, como se ha explicado previamente esto se debe a la reducción de materia prima requerida en la inspección y a haber eliminado la necesidad de importación de paneles en el ensamble final. En la tabla 57 también se puede apreciar que los procesos que fueron optimizados en el escenario propuesto son aquellos en los que también hubo una reducción de impacto asociada al ensamble (es decir, sólo considerando electricidad, agua, aire comprimido y uso de suelo) esta reducción es únicamente de 0.055 kg de 1.4 DCB-eq. Finalmente, se puede ver que el impacto total en esta categoría se redujo un 11.9%.

Tabla 57: Resultados de ambos escenarios, dividido por proceso de ensamble y por tipo de impacto, para Ecotoxicidad de agua dulce.

	Selección de celas	Soldadura	Inspección	Encapsulado	Prueba electroluminiscencia	Laminación	Ensamble final	Prueba de simulación solar	Embalaje
Escenario base [kg de 1.4 DCB eq]									
Impacto materia prima	2.2071	0.0257	0.0011	0.0413		6.34E-06	0.0113		0.0038
Impacto transporte de materia prima	0.0016	0.0006	0.0000	0.0368			0.0696		
Impacto ensamble (electricidad, uso de suelo, aire comprimido y agua)	8.75E-06	0.0001	0.0559	1.13E-06	3.00E-05	0.0012	0.0002	0.0012	1.81E-05
Impacto residuos	0.2259	0.0008	1.08E-06	0.0002		0.0021	2.10E-05	0.0004	
Impacto total por proceso	2.4345	0.0271	0.0570	0.0784	3.00E-05	0.0033	0.0811	0.0015	0.0038
Impacto total de ensamble de panel	2.6868								
Escenario propuesto [kg de 1.4 DCB eq]									
Impacto materia prima	2.2071	0.0257	6.82E-08	0.0413		0.0000	0.0113		0.0038
Impacto transporte de materia prima	0.0016	0.0006	1.49E-09	0.0369			0.0156		
Impacto ensamble (electricidad, uso de suelo, aire comprimido y agua)	3.34E-05	0.0001	3.98E-05	9.74E-06	3.00E-05	0.0012	0.0006	0.0007	1.38E-05
Impacto residuos	0.0102	0.0008	0.0071	1.03E-05		0.0021	2.09E-05	0.0004	
Impacto total por proceso	2.2189	0.0271	0.0071	0.0782	3.00E-05	0.0033	0.0276	0.0010	0.0038
Impacto total de ensamble de panel	2.3670								
Variación de impacto [%]									
%Variación total por proceso	-8.9%	0.0%	-87.5%	-0.3%	0.0%	0.0%	-65.9%	-33.6%	0.0%
%Variación total de ensamble	-11.9%								

Las casillas de variación de impacto mostradas en verde y con números negativos, muestran el porcentaje de reducción que se obtuvo entre el impacto del escenario base y el escenario propuesto.

Las casillas de variación de impacto mostradas en rojo muestran el porcentaje de aumento del impacto entre el escenario base y el escenario propuesto.

Las casillas de variación de impacto en amarillo muestran los impactos que permanecieron sin modificaciones en ambos escenarios.

Las casillas grises hacen referencia a que en ese proceso no se está tomando en consideración ese impacto debido a que la operación no lo requiere.

Las casillas azules son los totales de impacto, por proceso y total general.

- Eutrofización de agua dulce

En esta categoría, el proceso responsable del mayor impacto es la producción de celdas solares, esto se visualiza ya que el indicador de impacto en este proceso es de 0.1042 kg de P-eq, como se aprecia en la Tabla 58, respecto al total de la materia prima el indicador es de 0.1062 kg de P-eq y como se ha mencionado previamente, este impacto es el mismo en ambos escenarios debido a que no hubo modificaciones en cuanto a los requerimientos de materiales necesarios para producir un panel.

También el transporte de materia prima juega un papel relevante en el impacto de esta categoría y en este proceso donde se encuentra la primera ventaja del escenario propuesto frente al escenario base, puesto que en el primero el impacto asociado es de 0.0017 kg de P-eq y en el segundo es de 0.0009 kg de P-eq, esto significa que se redujo el impacto un 49.4% en el escenario propuesto.

Por otro lado, como se ha mencionado previamente, con las consideraciones realizadas sobre las celdas fracturadas acumuladas y generadas en el escenario base se consigue una reducción de impacto en el escenario propuesto y aunque esta reducción es mínima (2.51E-6 kg de P-eq), contribuye a que de forma general el escenario propuesto tenga una reducción total del 0.83% del impacto, como se puede ver en la Tabla 58.

Tabla 58: Resultados de ambos escenarios, dividido por proceso de ensamble y por tipo de impacto, para Eutrofización de agua dulce

	Selección de celdas	Soldadura	Inspección	Encapsulado	Prueba electroluminiscencia	Laminación	Ensamble final	Prueba de simulación solar	Embalaje
Escenario base									
Impacto materia prima	0.1042	0.0006	2.56E-05	0.0010		1.93E-07	0.0003		0.0001
Impacto transporte de materia prima	2.00E-05	1.00E-05	3.61E-07	0.0006			0.0011		
Impacto ensamble (electricidad, uso de suelo, aire comprimido y agua)	1.18E-07	1.00E-05	1.12E-05	4.10E-07	1.00E-05	0.0001	9.60E-06	5.00E-05	8.29E-07
Impacto residuos	9.74E-08	3.11E-10	2.84E-06	0.0000		1.03E-07	3.95E-07	1.66E-08	
Impacto total por proceso	0.1042	0.0006	0.0000	0.0016	1.00E-05	0.0001	0.0015	0.0000	0.0001
Impacto total de ensamble de panel	0.1082								
Escenario propuesto									
Impacto materia prima	0.1042	0.0006	1.66E-09	0.0010		2.03E-07	0.0003		0.0001
Impacto transporte	2.00E-05	1.00E-05	2.38E-11	0.0006			0.0003		
Impacto ensamble	2.94e-7	1.00E-05	9.56E-06	1.32E-09	1.00E-05	0.0001	2.96E-05	3.00E-05	5.24E-07
Impacto residuos	7.54E-09	3.11E-10	4.37E-07	1.32E-09		1.03E-07	3.84E-07	1.64E-08	

Impacto total por proceso	0.1042	0.0006	1.00E-05	0.0016	1.00E-05	0.0001	0.0006	3.00E-05	0.0001
Impacto total de ensamble	0.1073								
Variación de impacto									
% Variación total por proceso	0.0%	0.0%	-75.0%	0.0%	0.0%	0.0%	-57.5%	-40.0%	0.0%
% Variación total de ensamble	0.83%								

Las casillas de variación de impacto mostradas en verde y con números negativos, muestran el porcentaje de reducción que se obtuvo entre el impacto del escenario base y el escenario propuesto.

Las casillas de variación de impacto mostradas en rojo muestran el porcentaje de aumento del impacto entre el escenario base y el escenario propuesto.

Las casillas de variación de impacto en amarillo muestran los impactos que permanecieron sin modificaciones en ambos escenarios.

Las casillas grises hacen referencia a que en ese proceso no se está tomando en consideración ese impacto debido a que la operación no lo requiere.

Las casillas azules son los totales de impacto, por proceso y total general.

- Agotamiento del ozono

En esta categoría, para el escenario base el proceso que genera más impacto es el transporte de materia prima, lo que representa 2.17E-5 kg de CFC-11 eq en el escenario base, en el escenario propuesto, existe una reducción entre ambos escenarios al tener un indicador de 1.14E-5 kg de CFC-11-eq, esta se debe a haber disminuido la necesidad de transportar materia prima en la inspección del escenario propuesto y debido a quitar la necesidad de importar paneles en el ensamble final, esto puede ser apreciado en la Tabla 59 .

En el escenario propuesto, el proceso de mayor impacto es la producción de celdas fotovoltaicas y el resto de materia prima pues todo esto representa un impacto de 2.17E-5 kg de CFC-11 eq , valor que se mantiene constante en ambos escenarios por lo que no existe en este aspecto ninguna ventaja del escenario propuesto frente al escenario base.

Respecto al impacto asociado al ensamble, son soldadura, inspección, encapsulado, ensamble final, prueba de simulación solar y embalaje los procesos que muestran una reducción de impacto en el escenario propuesto debido a la disminución de electricidad utilizada, sin embargo el total de esta reducción es sólo de 3.38E-9 kg de CFC-11 eq. Otro aspecto importante es que existe también una reducción de impacto en la disposición final de residuos, siendo el indicador en el escenario base de 7.82E-10 y en el escenario propuesto de 3.42E-10, es decir este tipo de impacto se redujo 56.3% en el escenario propuesto y como se ha mencionado previamente se debe a las consideraciones hechas sobre las celdas fracturadas acumuladas en el escenario base.

Finalmente, se aprecia que de forma general en la categoría hay una reducción de impacto del 25.4% en el escenario propuesto.

Tabla 59: Resultados de ambos escenarios, dividido por proceso de ensamble y por tipo de impacto, para Agotamiento del ozono

	Selección de células	Soldadura	Inspección	Encapsulado	Prueba electroluminiscencia	Laminación	Ensamble final	Prueba de simulación solar	Embalaje
Escenario base [kg de CFC-11 eq]									
Impacto materia prima	2.09E-05	1.47E-08	6.11E-10	6.22E-07		4.90E-11	2.09E-05	1.47E-08	6.11E-10
Impacto transporte de materia prima	3.40E-07	1.17E-07	4.81E-09	7.71E-06			3.40E-07	1.17E-07	4.81E-09
Impacto ensamble (electricidad, uso de suelo, aire comprimido, agua)	2.27E-11	1.44E-09	7.03E-10	2.94E-11	3.00E-10	1.14E-08	2.27E-11	1.44E-09	7.03E-10
Impacto residuos	3.08E-10	7.67E-11	7.67E-11	5.81E-13		3.32E-11	3.08E-10	7.67E-11	7.67E-11
Impacto total por proceso	2.13E-05	1.34E-07	6.20E-09	8.33E-06	3.00E-10	1.15E-08	2.13E-05	1.34E-07	6.20E-09
Impacto total de ensamble de panel	4.45E-05								
Escenario propuesto [kg de CFC-11 eq]									
Impacto materia prima	2.09E-05	1.47E-08	3.90E-14	6.22E-07		5.39E-11	5.66E-08		1.18E-07
Impacto transporte de materia prima	3.40E-07	1.17E-07	3.12E-13	7.71E-06			3.27E-06		
Impacto ensamble (electricidad, uso de suelo, aire comprimido, agua)	7.91E-11	1.32E-09	3.99E-10	9.44E-12	3.00E-10	1.14E-08	2.69E-09	6.09E-09	7.05E-11
Impacto residuos	2.09E-11	1.03E-12	1.85E-13	5.58E-13		3.28E-11	2.81E-10	5.46E-12	
Impacto total por proceso	2.13E-05	1.33E-07	4.00E-10	8.33E-06	3.00E-10	1.15E-08	3.33E-06	6.10E-09	1.18E-07
Impacto total de ensamble de panel	3.32E-05								
Variación de impacto									
% Variación total por proceso	0.0%	-0.1%	-93.5%	0.0%	0.0%	0.0%	-77.2%	-44.5%	-0.4%
% Variación total de ensamble	-25.4%								

Las casillas de variación de impacto mostradas en verde y con números negativos, muestran el porcentaje de reducción que se obtuvo entre el impacto del escenario base y el escenario propuesto.

Las casillas de variación de impacto mostradas en rojo muestran el porcentaje de aumento del impacto entre el escenario base y el escenario propuesto.

Las casillas de variación de impacto en amarillo muestran los impactos que permanecieron sin modificaciones en ambos escenarios.

Las casillas grises hacen referencia a que en ese proceso no se está tomando en consideración ese impacto debido a que la operación no lo requiere.

Las casillas azules son los totales de impacto, por proceso y total general.

- Toxicidad humana

Para la categoría de toxicidad humana el proceso de mayor impacto es la producción de celdas solares y toda la producción de materia prima ya que las emisiones generadas representan un indicador de 22.635 kg de 1.4 DCB-eq para el escenario base y 22.631 kg de 1.4 DCB-eq en el escenario propuesto, existiendo esta ligera reducción debido a que en el escenario propuesto se consume menos cantidad de soldadura de estaño al optimizar el proceso de inspección, siendo esta reducción la primera ventaja del escenario propuesto frente al escenario base.

Respecto al impacto asociado al transporte, al igual que en las categorías anteriores, hay una reducción de impacto debida a la disminución de la necesidad de transportar materia prima para encapsulado y paneles importados para ensamble final, como puede verse en la Tabla 60, esta reducción es de 0.7697 kg de 1.4 DCB-eq y es la segunda ventaja del escenario propuesto frente al base. Además, nuevamente se muestran las reducciones esperadas por el decremento en el consumo de electricidad en el escenario propuesto para los procesos optimizados.

Sobre la disposición de celdas rotas y paneles defectuosos a *open dump*, debido a las consideraciones realizadas sobre las celdas fracturadas acumuladas en el escenario base, en el escenario propuesto puede identificarse una disminución de impacto considerable pasando de un indicador de 4.047 kg de 1.4DCB-eq en el escenario base a 0.29 kg de 1.4 DCB-eq en el escenario propuesto. Esto genera que el impacto en esta categoría se reduzca en 16.00% en el escenario propuesto.

Tabla 60: Resultados de ambos escenarios, dividido por proceso de ensamble y por tipo de impacto, para Toxicidad humana

	Selección de celas	Soldadura	Inspección	Encapsulado	Prueba electroluminiscencia	Laminación	Ensamble final	Prueba de simulación solar	Embalaje
Escenario base [kg de 1.4 DCB eq]									
Impacto materia prima	21.8606	0.0763	0.0031	0.5567		0.0002	0.0419		0.0957
Impacto transporte de materia prima	0.0232	0.0080	0.0003	0.5256			0.9920		
Impacto ensamble (electricidad, uso de suelo, aire comprimido, agua)	0.0002	0.0005	0.0002	2.72E-05	0.0001	0.0032	0.0035	0.0033	0.0001
Impacto residuos	3.2081	0.0108	0.7927	0.0010		0.0300	9.80E-06	0.0050	
Impacto total por proceso	25.0920	0.0956	0.7964	1.0833	0.0001	0.0334	1.0375	0.0082	0.0957
Impacto total de ensamble de panel	28.2422								

Escenario propuesto [kg de 1.4 DCB eq]									
Impacto materia prima	21.8606	0.0763	2.03E-07	0.5567		0.0002	0.0419		21.8606
Impacto transporte de materia prima	0.0232	0.0080	2.13E-08	0.5254			0.2228		0.0232
Impacto ensamble (electricidad, uso de suelo, aire comprimido, agua)	0.0001	0.0004	0.0001	2.18E-05	0.0001	0.0032	0.0157	0.0017	0.0001
Impacto residuos	0.1443	0.0108	0.1003	3.82E-05		0.0299	0.0001	0.0050	0.1443
Impacto total por proceso	22.0282	0.0955	0.1004	1.0821	0.0001	0.0332	0.2805	0.0067	22.0282
Impacto total de ensamble de panel	23.7225								
Variación de impacto									
% Variación total por proceso	-12.2%	-0.1%	-87.4%	-0.1%	0.0%	-0.5%	-73.0%	-18.8%	0.0%
% Variación total de ensamble	-16.0%								

Las casillas de variación de impacto mostradas en verde y con números negativos, muestran el porcentaje de reducción que se obtuvo entre el impacto del escenario base y el escenario propuesto.

Las casillas de variación de impacto mostradas en rojo muestran el porcentaje de aumento del impacto entre el escenario base y el escenario propuesto.

Las casillas de variación de impacto en amarillo muestran los impactos que permanecieron sin modificaciones en ambos escenarios.

Las casillas grises hacen referencia a que en ese proceso no se está tomando en consideración ese impacto debido a que la operación no lo requiere.

Las casillas azules son los totales de impacto, por proceso y total general.

- Uso de suelo urbano

En esta categoría, la producción de materia prima es el proceso que tiene mayor impacto al ocupar 2.3948 m² de tierra anuales en el escenario base y manteniéndose constante en el escenario propuesto por lo que no existe ninguna ventaja asociada a este tipo de impacto en el escenario propuesto.

Sin embargo, en el proceso de transporte es donde si existe una primera ventaja del escenario propuesto pues debido a las mejoras principalmente realizadas en inspección y al balanceo de línea que eliminó la necesidad de importar paneles, en el escenario propuesto hay una reducción de uso de suelo urbano de 4.7% del total, tan sólo por disminución de transportes al haber pasado del uso de 0.257 m² de tierra anuales en el escenario base a 0.129 m² de tierra anuales en el escenario propuesto .

Por otro lado, como puede apreciarse en la tabla el desecho de desperdicios, incluyendo celdas fracturadas, paneles desechados y desperdicios del resto de la materia prima, sufre una disminución considerable (97.1% menos) en el escenario propuesto, pasando del uso de 0.013 m² anuales de suelo a 0.0004 m² anuales de suelo, esto es debido a (como se ha mencionado anteriormente) las consideraciones realizadas al considerar en el escenario base las celdas fracturadas acumuladas en la planta de ensamble.

En contraposición con la disminución de uso de suelo, en el impacto por el ensamble encontramos que en el proceso de encapsulado existe un aumento de impacto en el escenario propuesto esto se debe a que en las propuestas se consideró la adición de otra mesa de encapsulado, lo que implicó un aumento en el suelo destinado a este proceso. Finalmente, el escenario propuesto resulta ser el más conveniente al tener una reducción del 5.3% respecto al escenario base, como se puede ver en la Tabla 61.

Tabla 61: Resultados de ambos escenarios, dividido por proceso de ensamble y por tipo de impacto, para Uso de suelo urbano

	Selección de celas	Soldadura	Inspección	Encapsulado	Prueba electroluminiscencia	Laminación	Ensamble final	Prueba de simulación solar	Embalaje
Escenario base [m² por año de tierra]									
Impacto materia prima	2.0424	0.0175	0.0007	0.2002		1.41E-05	0.0108		0.1234
Impacto transporte de materia prima	0.0038	0.0013	5.00E-05	0.0871			0.1648		
Impacto ensamble (electricidad, uso de suelo, aire comprimido, agua)	6.37E-07	4.92E-05	1.65E-05	6.78E-06	0.00E+00	3.34E-04	1.22E-04	3.19E-04	8.48E-06
Impacto residuos	2.51E-04	8.38E-07	6.35E-05	1.34E-02		0.0001	3.84E-05	2.05E-05	
Impacto total por proceso	2.0465	0.0188	0.0009	0.3006	0.0000	0.0005	0.1757	0.0003	0.1234
Impacto total de ensamble de panel	2.6667								
Escenario propuesto [m² por año de tierra]									
Impacto materia prima	2.0424	0.0175	4.64E-08	0.2001		1.33E-05	0.0108		0.1234
Impacto transporte de materia prima	0.0038	0.0013	3.52E-09	0.0873			0.0370		
Impacto ensamble (electricidad, uso de suelo, aire comprimido, agua)	1.50E-05	3.92E-05	1.85E-06	8.23E-06	0.00E+00	0.0003	0.0006	0.0002	6.83E-06
Impacto residuos	1.50E-05	8.38E-07	8.10E-06	0.0002		0.0001	3.81E-05	2.05E-05	
Impacto total por proceso	2.0462	0.0188	1.00E-05	0.2876	0.0000	0.0005	0.0484	0.0002	0.1234
Impacto total de ensamble de panel	2.5252								
Variación de impacto									
% Variación total por proceso	0.01%	0.0%	-98.8%	-4.3%	0.0%	0.0%	-72.4%	-41.2%	0.0%
% Variación total de ensamble	-5.3%								

Las casillas de variación de impacto mostradas en verde y con números negativos, muestran el porcentaje de reducción que se obtuvo entre el impacto del escenario base y el escenario propuesto.

Las casillas de variación de impacto mostradas en rojo muestran el porcentaje de aumento del impacto entre el escenario base y el escenario propuesto.

Las casillas de variación de impacto en amarillo muestran los impactos que permanecieron sin modificaciones en ambos escenarios.

Las casillas grises hacen referencia a que en ese proceso no se está tomando en consideración ese impacto debido a que la operación no lo requiere.

Las casillas azules son los totales de impacto, por proceso y total general.

- Uso de suelo de agricultura

En esta categoría de impacto, al igual que en la categoría de Uso de suelo urbano, es la producción de celdas el proceso que mayor cantidad de metros cuadrados anuales de tierra agrícola usa, este valor es de 8.45 m² de tierra. Otra similitud entre ambas categorías es que el impacto de la producción de pallets, y de vidrio templado son sumamente relevantes y estos valores de producción de materia prima se mantienen constantes en ambos escenarios analizados.

Respecto al transporte de materia prima, el escenario propuesto muestra una ventaja al disminuir el impacto gracias a que ya que no se requiere transportar los paneles importados y a las propuestas para eliminar los retrabajos en inspección (basadas en la detección eficiente de celdas de tono adecuados y sin defectos), esto provoca que el indicador de impacto disminuya de 0.235 m² de tierra anual en el escenario base a 0.118 m² de tierra anual en el escenario propuesto.

También existe una reducción de impacto asociada al ensamble y se debe principalmente a la disminución del consumo eléctrico en el escenario propuesto, pues es necesario que se destine suelo a la producción de energía eléctrica independientemente de la tecnología que la produzca, entonces al disminuir la cantidad de kWh usados, disminuye el impacto de esta categoría. En la Tabla 62 se puede ver que sólo el proceso de soldadura no tiene un menor impacto en el escenario propuesto debido al impacto por el ensamble, se debe a que en la propuesta se consideró la adición de una nueva máquina de soldadura y esto genera que aumente el uso de suelo requerido para el proceso.

Finalmente, la variación debida al desecho de celdas fracturadas y paneles es de 5.72E-5 m², siendo el escenario propuesto el que menos metros cuadrados de suelo utiliza. Todas estas variaciones ocasionan que en general la categoría muestre una disminución del impacto en el escenario propuesto, al compararlo con el escenario base, esta reducción es del 1.3%, como puede verse en la Tabla 62.

Tabla 62: Resultados de ambos escenarios, dividido por proceso de ensamble y por tipo de impacto, para Uso de suelo de agricultura.

	Selección de celas	Soldadura	Inspección	Encapsulado	Prueba electroluminiscencia	Laminación	Ensamble final	Prueba de simulación solar	Embalaje
Escenario base [m² por año de tierra]									
Impacto materia prima	8.4503	0.0093	0.0004	0.3810		0.0010	0.0172		6.2827
Impacto transporte de materia prima	0.0035	0.0012	0.0001	0.0800			0.1510		
Impacto ensamble (electricidad, uso de suelo, aire comprimido, agua)	0.0007	0.0016	0.0038	0.0006	0.0007	0.0155	0.0458	0.0022	1.05E-05
Impacto residuos	4.97E-05	1.65E-07	1.23E-05	1.41E-07		0.0000	4.06E-05	2.71E-06	
Impacto total por proceso	8.4546	0.0121	0.0043	0.4616	0.0007	0.0165	0.2141	0.0022	6.2827
Impacto total de ensamble de panel	15.4488								
Escenario propuesto [m² por año de tierra]									
Impacto materia prima	8.4503	0.0093	2.47E-08	0.3810		0.0018	0.0172		6.2406
Impacto transporte de materia prima	0.0035	0.0012	2.79E-08	0.0800			0.0339		
Impacto ensamble (electricidad, uso de suelo, aire comprimido, agua)	0.0004	0.0026	0.0022	0.0004	0.0003	0.0076	0.0105	0.0067	9.11E-06
Impacto residuos	3.40E-06	1.66E-07	1.57E-06	1.35E-07		1.63E-05	4.05E-05	2.71E-06	
Impacto total por proceso	8.4542	0.0131	0.0022	0.4613	0.0003	0.0094	0.0617	0.0067	6.2406
Impacto total de ensamble de panel	15.2496								
Variación de impacto									
% Variación total por proceso	0.0%	8.1%	-48.7%	-0.1%	-52.7%	-43.1%	-71.2%	67.7%	-0.7%
% Variación total de ensamble	-1.3%								

Las casillas de variación de impacto mostradas en verde y con números negativos, muestran el porcentaje de reducción que se obtuvo entre el impacto del escenario base y el escenario propuesto.

Las casillas de variación de impacto mostradas en rojo muestran el porcentaje de aumento del impacto entre el escenario base y el escenario propuesto.

Las casillas de variación de impacto en amarillo muestran los impactos que permanecieron sin modificaciones en ambos escenarios.

Las casillas grises hacen referencia a que en ese proceso no se está tomando en consideración ese impacto debido a que la operación no lo requiere.

Las casillas azules son los totales de impacto, por proceso y total general.

- Acidificación terrestre

Para la categoría de acidificación terrestre, el proceso con mayor impacto es la producción de materia prima, de forma más específica la producción de celdas solares y de vidrio

templado representan un impacto considerable sin embargo estos valores se mantienen iguales en ambos escenarios como puede verse en la Tabla 63 y no representan ninguna ventaja del escenario propuesto.

En segundo proceso con mayor impacto es el transporte de materia prima, debido a las cantidades de óxidos de nitrógeno (NO_x) y dióxidos de azufre (SO_x) que emite al aire y que representan indicadores de 0.461 kg de SO₂-eq en el escenario base y 0.232 kg de SO₂-eq en el escenario propuesto, la disminución de este valor se debe a que como se ha mencionado previamente ya no es necesario importar paneles para cumplir con la demanda y disminuyó la cantidad de materia prima usada en inspección.

Por otro lado, la reducción del impacto del escenario propuesto en el ensamble es mínima, siendo solo de 0.0001 kg de SO₂-eq. De forma particular en esta categoría y con base en lo que refleja la Tabla 63, es posible identificar que son las mejoras en el proceso de inspección (detección eficiente de color y defectos en celdas solares para evitar retrabajos en inspección), ensamble final (se eliminó la necesidad de importar paneles solares para cumplir con la demanda) y embalaje (se propuso un proceso mejorado con SMED) lo que permite que el escenario propuesto sea preferible al escenario base pues muestra ser de menor impacto al tener una disminución del mismo de 18.6%.

Tabla 63: Resultados de ambos escenarios, dividido por proceso de ensamble y por tipo de impacto, para Acidificación terrestre

	Selección de celdas	Soldadura	Inspección	Encapsulado	Prueba electroluminiscencia	Laminación	Ensamble final	Prueba de simulación solar	Embalaje
Escenario base [kg de SO₂ eq]									
Impacto materia prima	0.7030	0.0018	0.0001	0.0615		2.56E-06	0.0037		0.0024
Impacto transporte de materia prima	0.0069	0.0024	0.0001	0.1565			0.2955		
Impacto ensamble (electricidad, uso de suelo, aire comprimido, agua)	3.78E-06	7.00E-05	4.85E-05	4.09E-06	1.00E-05	5.86E-04	1.09E-04	0.0006	7.45E-06
Impacto residuos	6.22E-06	2.03E-08	1.51E-06	0.0000		1.57E-06	7.90E-07	2.56E-07	
Impacto total por proceso	0.7099	0.0043	0.0002	0.2180	1.00E-05	0.0006	0.2993	0.0006	0.0024
Impacto total de ensamble de panel	1.2353								
Escenario propuesto [kg de SO₂ eq]									
Impacto materia prima	0.7030	0.0018	4.82E-09	0.0615		2.19E-06	0.0037		0.0024
Impacto transporte de materia prima	0.0069	0.0024	6.33E-09	0.1565			0.0664		

Impacto ensamble (electricidad, uso de suelo, aire comprimido, agua)	5.05E-06	0.0001	1.98E-05	4.01E-06	1.00E-05	0.0006	0.0003	0.0003	4.40E-06
Impacto residuos	4.54E-07	0.0000	1.91E-07	1.87E-08		1.56E-06	3.97E-05	2.56E-07	
Impacto total por proceso	0.7099	0.0043	2.00E-05	0.2180	1.00E-05	0.0006	0.0704	0.0003	0.0024
Impacto total de ensamble de panel	1.0059								
Variación de impacto									
% Variación total por proceso	0.0%	0.0%	-90.9%	0.0%	0.0%	0.0%	-76.5%	-45.6%	0.0%
% Variación total de ensamble	-18.6%								

Las casillas de variación de impacto mostradas en verde y con números negativos, muestran el porcentaje de reducción que se obtuvo entre el impacto del escenario base y el escenario propuesto.

Las casillas de variación de impacto mostradas en rojo muestran el porcentaje de aumento del impacto entre el escenario base y el escenario propuesto.

Las casillas de variación de impacto en amarillo muestran los impactos que permanecieron sin modificaciones en ambos escenarios.

Las casillas grises hacen referencia a que en ese proceso no se está tomando en consideración ese impacto debido a que la operación no lo requiere.

Las casillas azules son los totales de impacto, por proceso y total general.

- Creación fotoquímica de ozono/oxidantes.

En esta categoría son los procesos de creación de celdas solares y de vidrio templado, estos procesos y la producción del resto de materia prima representan un indicador de categoría de 0.761 kg de NMVOC en ambos escenarios pues al igual que en categorías anteriores, no se propusieron cambios en las cantidades de materia prima por lo que este impacto no representa ninguna ventaja del escenario propuesto o del escenario base.

El segundo proceso con mayor impacto es el proceso de transporte debido a la cantidad de NOx y NMVOC que libera al aire, en el escenario base esto se ve reflejado en el indicador de categoría con un total de 0.692 kg de NMVOC en tanto que en el escenario propuesto este valor es de 0.346 kg de NMVOC, lo que implica que la disminución de este impacto en el escenario propuesto es del 50% y es importante decir que los procesos de ensamble de panel solar responsables de ello son inspección y ensamble final debido a que las propuestas se enfocaron en disminuir la cantidad de materia prima requerida para la inspección y eliminar la necesidad de importar paneles para cumplir con la demanda.

Respecto al impacto del ensamble hay una disminución de impacto en el escenario propuesto para los procesos de selección de celdas, inspección, prueba de simulación solar y embalaje, esto corresponde a la disminución de electricidad usada en dichos procesos. Como se ha visto en las categorías de impacto anteriores, las consideraciones realizadas en el escenario base respecto a la cantidad y disposición final de celdas fracturadas, generan que dicho escenario tenga un valor mayor al comparar su impacto por residuos con el escenario propuesto, en este caso, el escenario base está solamente 1.12E-5 kg de NMVOC arriba del escenario propuesto.

Finalmente, como se aprecia en la Tabla 64, el escenario propuesto tiene una reducción de impacto del 23.6% frente al escenario base.

Tabla 64: Resultados de ambos escenarios, dividido por proceso de ensamble y por tipo de impacto, para Creación fotoquímica de oxidantes

	Selección de células	Soldadura	Inspección	Encapsulado	Prueba electroluminiscencia	Laminación	Ensamble final	Prueba de simulación solar	Embalaje
Escenario base [NMVOC]									
Impacto materia prima	0.7126	0.0021	0.0001	0.0406		2.17E-06	0.0029		0.0031
Impacto transporte de materia prima	0.0104	0.0036	0.0002	0.2348			0.4433		
Impacto ensamble (electricidad, uso de suelo, aire comprimido, agua)	1.02E-05	4.00E-05	2.76E-05	9.85E-06	0.00	0.0004	4.08E-05	0.0004	4.84E-06
Impacto residuos	9.76E-06	3.20E-08	2.37E-06	1.46E-07		2.14E-06	0.0001	0.0000	
Impacto total por proceso	0.7230	0.0057	0.0003	0.2754	0.000	0.0004	0.4463	0.0004	0.0031
Impacto total de ensamble de panel	1.4546								
Escenario propuesto [NMVOC]									
Impacto materia prima	0.7126	0.0021	5.53E-09	0.0406		1.75E-06	0.0029		0.0031
Impacto transporte de materia prima	0.0104	0.0015	9.50E-09	0.2348			0.0996		
Impacto ensamble (electricidad, uso de suelo, aire comprimido, agua)	9.29E-06	2.14E-03	9.68E-06	9.96E-06	0.00	0.0004	0.0002	0.0002	2.92E-06
Impacto residuos	7.11E-07	3.20E-08	3.01E-07	3.89E-08		2.13E-06	0.0001	3.06E-07	
Impacto total por proceso	0.7230	0.0057	0.0000	0.2754	0.000	0.0004	0.1028	0.0002	0.0031
Impacto total de ensamble de panel	1.1106								
Variación de impacto									
% Variación total por proceso	0.0%	0.0%	-96.2%	0.0%	0.0%	0.0%	-77.0%	-47.2%	0.0%
% Variación total de ensamble	-23.6%								

Las casillas de variación de impacto mostradas en verde y con números negativos, muestran el porcentaje de reducción que se obtuvo entre el impacto del escenario base y el escenario propuesto.

Las casillas de variación de impacto mostradas en rojo muestran el porcentaje de aumento del impacto entre el escenario base y el escenario propuesto.

Las casillas de variación de impacto en amarillo muestran los impactos que permanecieron sin modificaciones en ambos escenarios.

Las casillas grises hacen referencia a que en ese proceso no se está tomando en consideración ese impacto debido a que la operación no lo requiere.

Las casillas azules son los totales de impacto, por proceso y total general.

- Material particulado

Para la categoría de Material particulado, el proceso de mayor impacto es debido a la producción de materia prima, la cual tiene un indicador de impacto de 0.4716 kg de PM10-eq en el escenario base y 0.4715 kg de PM10-eq en el escenario propuesto, la ligera disminución que muestra se debe a la reducción del consumo de soldadura de estaño en el proceso de inspección propuesto.

En segundo lugar se tiene al transporte debido a las emisiones de NOx, partículas < 2.5 μ m y SOx que genera, el transporte de materia prima en el escenario base tiene un indicador de 0.184 kg de PM10-eq en tanto que en el escenario propuesto el impacto es de 0.092 kg de PM10-eq, lo que implica que entre el primero y el segundo hay una disminución de aproximadamente 49% de este tipo de impacto. Al igual que en las categorías anteriores, esto corresponde a la disminución de materia prima usada en la inspección y a la eliminación de la necesidad de importar paneles.

También en esta categoría se puede ver que el impacto disminuye en los procesos que fueron optimizados, lo que representa una ventaja del escenario propuesto frente al escenario base. Respecto al impacto asociado con el desecho de celdas fracturadas, paneles dañados y materia prima, en esta categoría el escenario presente tiene un impacto total de 2.20E-5 kg de PM10-eq y el propuesto de 1.84E-4 kg de PM10-eq, esto significa que en el escenario propuesto el impacto disminuye en 14.0%.

En total, el escenario propuesto tiene menor impacto ambiental como se puede ver en la Tabla 65 que muestra una reducción general de 45.1%.

Tabla 65: Resultados de ambos escenarios, dividido por proceso de ensamble y por tipo de impacto, para Material Particulado

	Selección de celas	Soldadura	Inspección	Encapsulado	Prueba electroluminiscencia	Laminación	Ensamble final	Prueba de simulación solar	Embalaje
Escenario base [kg de PM 2.5]									
Impacto materia prima	0.4438	0.0026	0.0001	0.0211		2.17E-06	0.0024		0.0016
Impacto transporte de materia prima	0.0028	0.0010	4.00E-05	0.0625			0.1180		
Impacto ensamble (electricidad, uso de suelo, aire comprimido, agua)	6.88E-07	5.00E-05	1.92E-05	2.40E-06	1.00E-05	0.0003	3.28E-05	0.0003	4.48E-06
Impacto residuos	3.13E-06	1.03E-08	7.63E-07	1.08E-08		8.18E-07	1.72E-05	1.36E-07	
Impacto total por proceso	0.4465	0.0036	0.0002	0.0836	0.0000	0.0003	0.1204	0.0003	0.0016

Impacto total de ensamble de panel	0.6566								
Escenario propuesto [kg de PM 2.5]									
Impacto materia prima	0.4438	0.0026	6.90E-09	0.0211		9.18E-07	0.0024		0.0016
Impacto transporte de materia prima	0.0028	0.0010	2.53E-09	0.0625			0.0265		
Impacto ensamble (electricidad, uso de suelo, aire comprimido, agua)	1.72E-06	4.00E-05	9.89E-06	9.99E-06	0.00E+00	0.0003	0.0001	0.0002	2.69E-06
Impacto residuos	2.26E-07	1.03E-08	9.68E-08	9.18E-09		8.19E-07	1.71E-05	1.36E-07	
Impacto total por proceso	0.4465	0.0036	1.00E-05	0.0836	0.0000	0.0003	0.0290	0.0002	0.0016
Impacto total de ensamble de panel	0.5650								
Variación de impacto									
% Variación total por proceso	0.0%	0.0%	-94.1%	0.0%	-100.0%	0.0%	-75.9%	-44.1%	0.0%
% Variación total de ensamble	-14.0%								

Las casillas de variación de impacto mostradas en verde y con números negativos, muestran el porcentaje de reducción que se obtuvo entre el impacto del escenario base y el escenario propuesto.

Las casillas de variación de impacto mostradas en rojo muestran el porcentaje de aumento del impacto entre el escenario base y el escenario propuesto.

Las casillas de variación de impacto en amarillo muestran los impactos que permanecieron sin modificaciones en ambos escenarios.

Las casillas grises hacen referencia a que en ese proceso no se está tomando en consideración ese impacto debido a que la operación no lo requiere.

Las casillas azules son los totales de impacto, por proceso y total general.

9. Conclusiones

Por medio de las visitas a la planta de la empresa “X” y preparación previa a dichas visitas, fue posible recolectar los datos específicos del ensamble de paneles solares, de 380W monoPERC, con lo cual se logró realizar un VSM que representara el escenario base de los procesos estudiados y determinar su impacto ambiental realizando un ACV bajo las condiciones observadas. Fue el análisis de ambas herramientas lo que permitió que se obtuvieran propuestas de mejora de procesos basadas en técnicas específicas para este fin, como lo son el balanceo de líneas y la aplicación de SMED, estas adecuaciones al proceso permitieron que se generara un nuevo VSM y un nuevo ICV que fue usado para medir el desempeño ambiental del escenario propuesto.

A partir de los resultados obtenidos y comparados en el capítulo anterior, se identifica que, como consecuencia de las propuestas de mejora de procesos y nivelación de la línea de producción, fue posible reducir el impacto ambiental generado por el proceso actual de ensamble de paneles solares en todas las categorías, pese a que después de la primera evaluación de ACV, se vio reflejado que sólo alrededor del 24% del impacto de cada categoría era debido a los procesos mexicanos que eran los que de acuerdo con el alcance de este estudio, se podían modificar.

Por otro lado, no se puede dejar de ver que gran parte del impacto ambiental identificado en los procesos mexicanos, se produce debido al transporte, uso de vidrio templado, de soldadura de estaño, aluminio y tarimas de madera, tratar de reducir estos impactos no era posible pues a priori ya estaba definido cuánto vidrio, soldadura y tarimas se gastan para el ensamble de paneles y en consecuencia la cantidad que debe ser transportada, es por ello que las propuestas fueron enfocadas en tratar de disminuir la electricidad consumida y el uso de suelo en planta, así como la reducción de inventarios y la eliminación de los cuellos de botella en el proceso para poder cumplir con la demanda señalada de 600 paneles monocristalinos PERC de 380 W de potencia, mensuales. El resultado de esto fue que el escenario propuesto es el mejor desde el punto de vista ambiental y además las mejoras propuestas también podrían significar un impacto económico favorable pues el aumento de la capacidad de producción permite que ya no exista la necesidad de adquirir paneles extranjeros para completar la demanda mensual, generando como consecuencia que el gasto de adquisición de estos ya no sea necesario.

Desafortunadamente durante el periodo en el que fue realizado este estudio, la planta evaluada cerró sus instalaciones y abrió una nueva con procesos más automatizados, corrigiendo las áreas de oportunidad aquí detectadas, especialmente la generación de residuos y aumentando su capacidad de producción. Sin embargo, al realizar este estudio fue posible ver que sí existe una relación directa entre la optimización de procesos y la disminución de

impactos ambientales, siendo el VSM una gran herramienta para identificar rápida y fácilmente diferentes áreas de oportunidad, en ese sentido aún existen herramientas y métodos que podrían aplicarse para continuar con esta reducción de impacto ambiental siguiendo la misma metodología aquí aplicada, esto permite que se abran diferentes líneas de investigación que pueden seguirse en un futuro, por ejemplo: i) la evaluación del impacto ambiental después la aplicación de propuestas más detalladas de cada proceso, haciendo uso de herramientas como diagramas de mano derecha y mano izquierda, ii) La evaluación del papel de la automatización de la planta en el impacto ambiental al compararlo con estado actual, iii) El impacto ambiental resultado de reciclar los residuos generados para compensar el impacto generado, iv) La modificación en el impacto ambiental si se cambiara de proveedores chinos a mexicanos o de algún país más cercano.

Anexos

Anexo A- Formatos de levantamiento de datos

Primera visita

Nombre de proceso:	
Equipos que consumen energía y potencia	
Horas al día en que trabaja el equipo	
Materias primas	
Materiales auxiliares	
Recursos (agua, aire, etc.)	
Residuos (Sólidos, líquidos y emisiones)	

Segunda visita

Generales	
¿Quién es el cliente principal de paneles monoperc 380?	
¿Cuántos paneles monoperc se producen al año aproximadamente?	
¿Qué días descansa la fábrica al año?	
¿A qué hora llegan los empleados? ¿Tienen tiempo de tolerancia para estar a pie de máquina?	
¿Cuánto tiempo de comida tienen los empleados?	
¿Cuántos turnos hay?	
¿Cómo actúan cuando hay una demanda elevada o inferior?	
Demanda mensual de paneles monoperc (de preferencia ver históricos y el pronóstico anual)	
Watt consumido/Watt producido	
Selección de celdas	
Cantidad de operarios	
Tiempo de ciclo	
Inventario promedio	
Porcentaje de celdas categoría B	
Porcentaje de celdas rechazadas	
Proveedor principal de celda monoperc (y distancia aproximada)	
Frecuencia de entrega del proveedor, cantidad y medio de transporte	

Soldadura	
Cantidad de operarios	
Tiempo de ciclo	
¿Hay rechazos? Si, sí, porcentaje	
Tiempo de cambio de máquina	
Cantidad de estaño (en gr, por línea) y proveedor principal	
Inventario promedio de celdas soldadas	
Distancia aproximada del proveedor, cantidad y medio de transporte	
Encapsulado	
Cantidad de operarios	
Proveedor de EVA (distancia, frecuencia, cantidad y tipo de transporte)	
Proveedor de TPT (distancia, frecuencia, cantidad y tipo de transporte)	
Proveedor de vidrio templado (distancia, frecuencia, cantidad y tipo de transporte)	
Tiempo de ciclo	
Cantidad de rechazos	
Inventario promedio de paneles con encapsulado	
Tiempo promedio de inspección	
Prueba de electroluminiscencia	
Cantidad de operarios	

Tiempo de ciclo	
¿Hay rechazos? Si, sí, porcentaje	
Inventario promedio	
Laminación	
Cantidad de operarios	
Tiempo de ciclo	
¿Hay rechazos? Si, sí, porcentaje	
Inventario promedio de paneles laminados	
Distancia aproximada del proveedor de papel encerado, cantidad y medio de transporte	
Cantidad de papel encerado usado por panel	
Ensamble final	
Distancia aproximada del proveedor de marco de aluminio, cantidad y medio de transporte	
Distancia aproximada del proveedor de caja de conexiones, cantidad y medio de transporte	
Cantidad de operarios	
Tiempo de ciclo	
Cantidad de rechazos y porcentaje de defectuosos (paneles ya ensamblados)	
Inventario promedio	
Tiempo de inspección	
Prueba de simulación solar	

Cantidad de operarios	
Tiempo de ciclo	
¿Hay rechazos? Si, sí, porcentaje	
Inventario promedio	
Embalaje	
Tiempo de ciclo	
Cantidad de operarios	
Distancia aproximada del proveedor de cartón, cantidad y medio de transporte	
Cantidad usada de cinta para emplaye	
Medio de transporte a cliente y capacidad del transporte	
Gasolina consumida/energía de transporte a cliente	
Cantidad de paneles por caja	
Inventario actual de paneles monoperc terminados	

Anexo B- Formato estudio de tiempos

Estudio de tiempos			
Estudio número:		Realizado por:	Fecha
Hora de inicio		Hora de término	
Nombre del proceso:			
Nombres de máquinas:		Piezas del lote:	
Número de observación	Tiempos observados		Otras observaciones
	Operación	Procesamiento	
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

Anexo C- Más información sobre las categorías de impacto

Categoría	Abreviación (en inglés)	Unidad	Comentarios obtenidos de (Muteri, y otros, 2020)
Cambio climático	GWP20	kg CO2 al aire	El factor de caracterización del punto medio del cambio climático es el potencial de calentamiento global (GWP) ampliamente utilizado. El GWP expresa la cantidad de forzamiento radiactivo adicional integrado a lo largo del tiempo (en este caso, 20, 100 o 1000 años) causado por una emisión de 1 kg de GEI en relación con el forzamiento radiactivo adicional integrado en ese mismo horizonte de tiempo causado por la liberación de 1 kg de CO2.
Ecotoxicidad terrestre	TETP	kg 1.4- DCB a suelo industrial	El potencial de toxicidad (TP), expresado en kg de diclorobenceno 1.4 equivalentes (1.4DCB-eq), se utiliza como factor de caracterización en el nivel medio para la toxicidad humana, ecotoxicidad acuática de agua dulce, ecotoxicidad marina y ecotoxicidad terrestre. La sustancia química 1.4-diclorobenceno (1.4-DCB) se utiliza como sustancia de referencia en los cálculos del punto medio dividiendo el impacto potencial calculado de la sustancia química por el impacto potencial de 1.4-DCB emitido al aire urbano para la toxicidad humana., al agua dulce para la ecotoxicidad del agua dulce, al agua de mar para la ecotoxicidad marina y al suelo industrial para la ecotoxicidad terrestre.
Ecotoxicidad agua dulce	FETP	kg 1.4- DCB a agua dulce	
Toxicidad humana	HTPc	kg 1.4- DCB a aire urbano	
Eutrofización de agua dulce	FEP	kg P a agua dulce	La eutrofización del agua dulce se produce debido a la descarga de nutrientes en el suelo o en cuerpos de agua dulce y el consiguiente aumento de los niveles de nutrientes, es decir, fósforo y nitrógeno. Siguen una secuencia de impactos ecológicos compensados por el aumento de las emisiones de nutrientes al agua dulce, lo que aumenta la absorción de nutrientes por organismos autótrofos como las cianobacterias y algas, y especies heterótrofas como peces e invertebrados. Esto finalmente conduce a una pérdida relativa de especies. Es por ello por lo que se mide con la cantidad de fósforo (P) al agua. (Muteri, y otros, 2020)
Agotamiento del ozono	ODP	kg CFC- 11 al aire	Las emisiones de sustancias que agotan la capa de ozono (ODS por sus siglas en

			<p>inglés), en última instancia, provocan daños a la salud humana debido al aumento resultante de la radiación UVB. Las sustancias químicas que agotan el ozono son relativamente persistentes y tienen grupos de cloro o bromo en sus moléculas que interactúan con el ozono (principalmente) en la estratosfera. Después de una emisión de una ODS, las concentraciones troposféricas de todas las ODS aumentan y, después de un tiempo, también aumenta la estratosfera de las ODS. Este aumento en el potencial de agotamiento del ozono conduce a una disminución en la concentración de ozono atmosférico, lo que a su vez provoca que una mayor parte de la radiación UVB golpee la tierra. Este aumento de radiación afecta negativamente a la salud humana, aumentando así la incidencia de cáncer de piel y cataratas.</p> <p>El ODP cuantifica la cantidad de ozono que una sustancia puede agotar en relación con el triclorofluorometano (CFC-11) durante un horizonte de tiempo específico y, por lo tanto, está relacionado en gran medida con la estructura molecular de las ODS y especialmente con el número de grupos de cloro y bromo en la molécula, así como la vida atmosférica del químico.</p>
Uso de suelo	LOP	m ² × año de tierra de cultivo anual	<p>Se pueden distinguir tres pasos en el proceso de uso de la tierra. En primer lugar, durante la fase de transformación, el terreno se adapta a su nueva función, p. Ej. quitando la vegetación original. En segundo lugar, durante la fase de ocupación, la tierra se utiliza durante un período determinado. Finalmente, una vez que la tierra ya no se usa, hay una fase de relajación, durante la cual se permite que la tierra vuelva a un estado (semi) natural. Se asume que, durante el período de relajación, la tierra todavía tiene (algún) impacto negativo en la riqueza de especies, dado que no regresa inmediatamente al hábitat primario o no regresa al hábitat original, sino a un estado diferente.</p>
Acidificación terrestre	TAP	kg SO ₂ al aire	La deposición atmosférica de sustancias inorgánicas, como sulfatos, nitratos y fosfatos, provocan un cambio en la acidez

			<p>del suelo. Para casi todas las especies de plantas, existe un nivel óptimo de acidez claramente definido. Una desviación grave de este nivel óptimo es perjudicial para ese tipo específico de especie y se denomina acidificación. Como resultado, los cambios en los niveles de acidez causarán cambios en la ocurrencia de una especie. Las principales emisiones acidificantes son NO_x, NH₃ o SO₂.</p>
<p>Creación fotoquímica de ozono / de oxidantes</p>	<p>EOFP y HOFP</p>	<p>Kg NMVOC al aire</p>	<p>La contaminación del aire que causa aerosoles primarios y secundarios en la atmósfera puede tener un impacto negativo sustancial en la salud humana, desde síntomas respiratorios hasta ingresos hospitalarios y muerte. El ozono no se emite directamente a la atmósfera, pero se forma como resultado de reacciones fotoquímicas de NO_x y compuestos orgánicos volátiles no metano (NMVOC por sus siglas en inglés). Este proceso de formación es más intenso en verano. El ozono es un peligro para la salud humana porque puede inflamar las vías respiratorias y dañar los pulmones. Las concentraciones de ozono conducen a una mayor frecuencia y gravedad de la dificultad respiratoria en los seres humanos, como el asma y las Enfermedades Pulmonares Obstructivas Crónicas (EPOC). Además, el ozono puede tener un impacto negativo en la vegetación, incluida una reducción del crecimiento y la producción de semillas, una aceleración de la senescencia de las hojas y una capacidad reducida para resistir los factores estresantes. La formación de ozono es un proceso no lineal que depende de las condiciones meteorológicas y las concentraciones de fondo de NO_x y NMVOC.</p>
<p>Radiación ionizante</p>	<p>IRP</p>	<p>kg U235-eq</p>	<p>Las emisiones antropogénicas de radionucleidos se generan en el ciclo del combustible nuclear (minería, procesamiento y eliminación de residuos), así como durante otras actividades humanas, como la quema de carbón y la extracción de roca fosfórica. La exposición a la radiación ionizante causada por estos radionúclidos puede</p>

			<p>provocar daños en las moléculas de ADN.</p> <p>Durante el análisis de efectos, la incidencia de cánceres no mortales y la incidencia de cánceres mortales se distinguen de los efectos hereditarios graves. La sustancia de referencia es Uranio-235.</p>
Material particulado	PMFP	kg PM10-eq al aire	<p>Las PM10 se pueden definir como aquellas partículas sólidas o líquidas de polvo, cenizas, hollín, partículas metálicas, cemento o polen, dispersas en la atmósfera, y cuyo diámetro varía entre 2,5 y 10 µm. Están formadas principalmente por compuestos inorgánicos como silicatos, aluminatos, metales pesados entre otros, y material orgánico asociado a partículas de carbono (hollín). Las partículas con un diámetro de 2,5 a 10 µm (PM2,5 a 10) están relacionadas con la morbilidad respiratoria, pues pueden penetrar hasta las vías respiratorias bajas.</p>

Anexo D- Simulación de escenario base en Excel

Tiempo	Acción	Término	Tiempo	Acción	Término
0	Entrada de celdas P1 y P2 a selección	2.41475	26.41475	Celdas P4 en espera de inspección	43.41475
2.41475	Entrada de celdas P1 a soldadura	8.41475	26.41475	Entrada de celdas P5 a soldadura	32.41475
2.41475	Entrada de celdas P2 a soldadura	14.41475	26.41475	Entrada de celdas P6 a soldadura	38.41475
2.41475	Entrada de celdas P3 y P4 a selección	4.8295	26.56225	Celdas P21 en espera de soldadura	122.41475
4.8295	Celdas P3 en espera de soldadura	14.41475	26.56225	Celdas P22 en espera de soldadura	122.41475
4.8295	Celdas P4 en espera de soldadura	14.41475	26.56225	Entrada de celdas P23 y P24 a selección	28.977
4.8295	Entrada de celdas P5 y P6 a selección	7.24425	28.977	Celdas P23 en espera de soldadura	134.4148
7.24425	Celdas P5 en espera de soldadura	26.41475	28.977	Celdas P24 en espera de soldadura	134.4148
7.24425	Celdas P6 en espera de soldadura	26.41475	28.977	Entrada de celdas P25 y P26 a selección	31.39175
7.24425	Entrada de celdas P7 y P8 a selección	9.659	31.39175	Celdas P25 en espera de soldadura	146.4148
8.41475	Entrada de celdas P1 a inspección	33.41475	31.39175	Celdas P26 en espera de soldadura	146.4148
9.659	Celdas P7 en espera de soldadura	38.41475	31.39175	Entrada de celdas P27 y 28 a selección	33.8065
9.659	Celdas de P8 en espera de soldadura	38.41475	32.41475	Celdas P5 en espera de inspección	49.41475
9.659	Entrada de celdas P9 y P10 a selección	12.07375	33.41475	Entrada celdas P1 a encapsulado	43.41475
12.07375	Celdas P9 en espera de soldadura	50.41475	33.8065	Celdas P27 en espera de soldadura	158.4148
12.07375	Celdas P10 en espera de soldadura	50.41475	33.8065	Celdas P28 en espera de soldadura	158.4148
12.07375	Entrada de celdas P11 y P12 a selección	14.4885	33.8065	Entrada de celdas P29 y P30 a selección	36.22125
14.41475	Entrada de celdas P2 a inspección	39.41475	36.22125	Celdas P29 en espera de soldadura	170.4148
14.41475	Entrada de celdas P3 a soldadura	20.41475	36.22125	Celdas P30 en espera de soldadura	170.4148
14.41475	Entrada de celdas P4 a soldadura	26.41475	36.22125	Entrada de celdas P31 y 32 a selección	38.636
14.4885	Celdas P11 en espera de soldadura	62.41475	38.41475	Celdas P6 en espera de inspección	55.41475
14.4885	Celdas P12 en espera de soldadura	62.41475	38.41475	Entrada celdas P7 a soldadura	44.41475
14.4885	Entrada de celdas P13 y P14 a selección	16.90325	38.41475	Entrada celdas P8 a soldadura	50.41475
16.90325	Celdas P13 en espera de soldadura	74.41475	38.636	Celdas P31 en espera de soldadura	182.4148
16.90325	Celdas P14 en espera de soldadura	74.41475	38.636	Celdas P32 en espera de soldadura	182.4148
16.90325	Entrada de celdas P15 y P16 a selección	19.318	38.636	Entrada de celdas P33 y 34 a selección	41.05075
19.318	Celdas P15 en espera de soldadura	86.41475	39.41475	Celdas P2 a encapsulado	49.41475
19.318	Celdas P16 en espera de soldadura	86.41475	41.05075	Celdas P33 en espera de soldadura	194.4148
19.318	Entrada de celdas P17 y P18 a selección	21.73275	41.05075	Celdas P34 en espera de soldadura	194.4148
20.41475	Entrada de celdas P3 a inspección	45.41475	41.05075	Entrada de celdas P35 y 36 a selección	43.4655
21.73275	Celdas P 17 en espera de soldadura	98.41475	43.41475	P1 electroluminiscencia	44.41475
21.73275	Celdas P18 en espera de soldadura	98.41475	43.41475	Celdas P4 a inspección	68.41475
21.73275	Entrada de celdas P19 y P20 a selección	24.1475	43.4655	Celdas P35 en espera de soldadura	206.4148
24.1475	Celdas P19 en espera de soldadura	110.41475	43.4655	Celdas P36 en espera de soldadura	206.4148
24.1475	Celdas P20 en espera de soldadura	110.41475	43.4655	Entrada de celdas P37 y 38 a selección	45.88025
24.1475	Entrada de celdas P21 y P22 a selección	26.56225	44.41475	Celdas P7 en espera de inspección	78.41475

Tiempo	Acción	Término	Tiempo	Acción	Término
44.41475	P1 en espera de laminación	50.41475	91.41475	P5 y P6 a laminación	116.41475
45.41475	Celdas P3 a encapsulado	55.41475	92.41475	Celdas P15 en espera de inspección	160.41475
45.88025	Celdas P37 en espera de soldadura	218.4148	96.41475	P3 y P4 a ensamble final	100.75965
45.88025	Celdas P38 en espera de soldadura	218.4148	98.41475	Celdas P16 en espera de inspección	183.41475
49.41475	P2 a electroluminiscencia	50.41475	98.41475	Celdas P17 a soldadura	104.41475
49.41475	Celdas P5 a inspección	74.41475	98.41475	Celdas P18 a soldadura	110.41475
50.41475	Celdas P8 en espera de inspección	84.41475	100.7596	P3 a simulación solar	105.75965
50.41475	Celdas P9 a soldadura	56.41475	100.7596	P4 en espera de simulación solar	105.75965
50.41475	Celdas P10 a soldadura	62.41475	103.4147	Celdas P7 a encapsulado	113.41475
50.41475	P1 y P2 a laminación	67.41475	104.4147	Celdas P17 en espera de inspección	189.41475
55.41475	P3 a electroluminiscencia	56.41475	105.7596	P3 a embalaje	
55.41475	Celdas P6 a inspección	80.41475	105.75965	P4 a simulación solar	110.75965
56.41475	Celdas P9 en espera de inspección	90.41475	109.41475	Celdas P8 a encapsulado	119.41475
56.41475	P3 en espera de laminación	79.41475	110.41475	Celdas P18 en espera de inspección	195.41475
62.41475	Celdas P10 en espera de inspección	113.4147	110.41475	Celdas P19 a soldadura	116.41475
62.41475	Celdas P11 a soldadura	68.41475	110.4148	Celdas P20 a soldadura	122.4148
62.41475	Celdas P12 a soldadura	74.41475	110.7597	P4 a embalaje	
67.41475	P1 y P2 a ensamble final	71.75965	113.4148	P7 a electroluminiscencia	114.4148
68.41475	Celdas P4 a encapsulado	78.41475	113.4148	Celdas P10 a inspección	138.4148
68.41475	Celdas P11 en espera de inspección	119.4147	114.4148	P7 en espera de laminación	120.4148
71.75965	P1 a simulación solar	76.75965	115.4148	Celdas P9 a encapsulado	125.4148
71.75965	P2 en espera de simulación solar	76.75965	116.4148	P5 y P6 a ensamble final	120.7597
74.41475	Celdas P5 a encapsulado	84.41475	116.4148	Celdas P19 en espera de inspección	218.4148
74.41475	Celdas P12 en espera de inspección	125.4147	119.4148	P8 a electroluminiscencia	120.4148
74.41475	Celdas P13 a soldadura	80.41475	119.4148	Celdas P11 a inspección	144.4148
74.41475	Celdas P14 a soldadura	86.41475	120.4148	P7 y P8 a laminación	137.4148
76.75965	P1 a embalaje		120.7597	P5 a simulación solar	125.7597
76.75965	P2 a simulación solar	81.75965	120.7597	P6 en espera de simulación solar	125.7597
78.41475	P4 a electroluminiscencia	79.41475	122.4148	Celdas P20 en espera de inspección	224.4148
78.41475	Celdas P7 a inspección	103.4147	122.4148	Celdas P21 a soldadura	128.4148
79.41475	P3 y P4 a laminación	96.41475	122.4148	Celdas P22 a soldadura	134.4148
80.41475	Celdas P6 a encapsulado	90.41475	125.4148	P9 a electroluminiscencia	126.4148
80.41475	Celdas P13 en espera de inspección	148.4147	125.4148	Celdas P12 a inspección	150.4148
81.75965	P2 a embalaje		125.7597	P5 a embalaje	
84.41475	P5 en espera de laminación	91.41475	125.7597	P6 a simulación solar	130.7597
84.41475	Celdas P8 a inspección	109.41475	126.4148	P9 a en espera de laminación	149.4148
86.41475	Celdas P14 en espera de inspección	154.41475	128.4148	Celdas P 21 en espera de inspección	230.4148
86.41475	Celdas P15 a soldadura	92.41475	130.7597	P6 a embalaje	
86.41475	Celdas P16 a soldadura	98.41475	134.4148	Celdas P22 en espera de inspección	253.4148
90.41475	P5 a electroluminiscencia	91.41475	134.4148	Celdas P23 a soldadura	140.4148
90.41475	Celdas P9 a inspección	115.41475	134.4148	Celdas P24 a soldadura	146.4148

Tiempo	Acción	Término	Tiempo	Acción	Término
137.4148	P7 y P8 a ensamble final	141.7597	182.41475	Celdas P32 a soldadura	194.41475
138.4148	Celdas P10 a encapsulado	148.4148	182.75965	P11 a simulación solar	187.75965
140.4148	Celdas P23 en espera de inspección	259.4148	182.75965	P12 en espera de simulación solar	187.75965
141.7597	P7 a simulación solar	146.7597	183.41475	P13 a electroluminiscencia	184.41475
141.7597	P8 en espera de simulación solar	146.7597	183.41475	Celdas P16 a inspección	208.41475
144.4148	Celdas P11 a encapsulado	154.4148	184.41475	P13 en espera de laminación	190.41475
146.4148	Celdas P24 en espera de inspección	265.4148	185.41475	Celdas P15 a encapsulado	195.41475
146.4148	Celdas P25 a soldadura	152.4148	187.75965	P11 a embalaje	
146.4148	Celdas P26 a soldadura	158.4148	187.75965	P12 a simulación solar	192.75965
148.4148	P10 a electroluminiscencia	149.4148	188.41475	Celdas P31 en espera de inspección	356.75965
148.4148	Celdas P13 a inspección	173.4148	189.41475	P14 a electroluminiscencia	190.41475
146.7597	P7 a embalaje		189.41475	Celdas P17 a inspección	214.41475
146.7597	P8 a simulación solar	151.7597	190.41475	P13 y P14 a laminación	207.41475
149.4148	P9 y P10 a laminación	166.4148	192.75965	P12 a embalaje	
150.4148	Celdas P12 a encapsulado	160.4148	194.41475	Celdas P32 en espera de inspección	364.41475
151.7597	P8 a embalaje		194.41475	Celdas P33 a soldadura	200.41475
152.4148	Celdas P25 en espera de inspección	288.4148	194.41475	Celdas P34 a soldadura	206.41475
154.4148	P11 a electroluminiscencia	155.4148	195.41475	P15 a electroluminiscencia	196.41475
154.4148	Celdas P14 a inspección	179.4148	195.41475	Celdas P18 a inspección	220.41475
155.4148	P11 en espera de laminación	161.4148	196.41475	P15 en espera de laminación	219.41475
158.4147	Celdas P26 en espera de inspección	294.41475	200.41475	Celdas P33 en espera de inspección	370.41475
158.4147	Celdas P27 a soldadura	164.41475	206.41475	Celdas P34 en espera de inspección	391.75965
158.4147	Celdas P28 a soldadura	170.41475	206.41475	Celdas P35 a soldadura	212.41475
160.4147	P12 a electroluminiscencia	161.41475	206.41475	Celdas P36 a soldadura	218.41475
160.4147	Celdas P15 a inspección	185.41475	207.4148	P13 y P14 a ensamble final	211.7597
161.4147	P11 y P12 a laminación	178.41475	208.4148	Celdas P16 a encapsulado	218.4148
164.4147	Celdas P27 en espera de inspección	300.41475	211.7597	P13 a simulación solar	216.7597
166.4147	P9 y P10 a ensamble final	170.75965	211.7597	P14 en espera de simulación solar	216.7597
170.4147	Celdas P28 en espera de inspección	323.41475	212.4148	Celdas P35 en espera de inspección	399.4148
170.4147	Celdas P29 a soldadura	176.41475	214.4148	Celdas P17 a encapsulado	224.4148
170.4147	Celdas P30 a soldadura	182.41475	216.7597	P13 a embalaje	
170.7596	P9 a simulación solar	175.75965	216.7597	P14 a simulación solar	221.7597
170.7596	P10 en espera de simulación solar	175.75965	218.4148	P16 a electroluminiscencia	219.4148
173.4147	Celdas P13 a encapsulado	183.41475	218.4148	Celdas P19 a inspección	243.4148
175.7596	P9 a embalaje		218.4148	Celdas P36 en espera de inspección	405.4148
175.7596	P10 a simulación solar	180.75965	218.4148	Celdas P37 a soldadura	224.4148
176.4147	Celdas P29 en espera de inspección	329.41475	218.4148	Celdas P38 a soldadura	230.4148
178.4147	P11 y P12 a ensamble final	182.75965	219.4148	P15 y P16 a laminación	236.4148
179.4147	Celdas P14 a encapsulado	189.41475	220.4148	celdas P18 a encapsulado	230.4148
180.7596	P10 a embalaje		221.7597	P14 a embalaje	
182.4147	Celdas P30 en espera de inspección	335.41475	224.4148	P17 a electroluminiscencia	225.4148
182.4147	Celdas P31 a soldadura	188.41475	224.4148	Celdas P20 a inspección	249.4148

Tiempo	Acción	Término	Tiempo	Acción	Término
224.4148	Celdas P37 en espera de inspección	426.7597	294.41475	Celdas P26 a inspección	319.41475
225.4148	P17 en espera de laminación	231.4148	295.41475	P23 en espera de laminación	301.41475
230.4148	P18 a electroluminiscencia	231.4148	300.41475	P24 a electroluminiscencia	301.41475
230.4148	Celdas P21 a inspección	255.4148	300.41475	Celdas P27 a inspección	325.41475
230.4148	Celdas P38 en espera de inspección	434.4148	301.41475	P23 y P24 a laminación	318.41475
231.4148	P17 Y P18 a laminación	248.4148	306.41475	P21 y P22 a ensamble final	310.75965
236.4148	P15 y P16 a ensamble final	240.7597	310.75965	P21 a simulación solar	315.75965
240.7597	P15 a simulación solar	245.7597	310.75965	P22 en espera de simulación solar	315.75965
240.7597	P16 en espera de simulación solar	245.7597	313.41475	Celdas P25 a encapsulado	323.41475
243.4148	Celdas P19 a encapsulado	253.4148	315.75965	P21 a embalaje	
245.7597	P15 a embalaje		315.75965	P22 a simulación solar	320.75965
245.7597	P16 a simulación solar	250.7597	318.41475	P23 y P24 a ensamble final	322.75965
248.4148	P17 y P18 a ensamble final	252.7597	319.41475	Celdas P26 a encapsulado	329.41475
249.4148	Celdas P20 a encapsulado	259.4148	320.75965	P22 a embalaje	
250.7597	P16 a embalaje		322.75965	P23 a simulación solar	327.75965
252.7597	P17 a simulación solar	257.7597	322.75965	P24 en espera de simulación solar	327.75965
252.7597	P18 en espera de simulación solar	262.7597	323.41475	P25 a electroluminiscencia	324.41475
253.4148	P19 en espera de laminación	260.4148	323.41475	Celdas P28 a inspección	348.41475
253.4148	Celdas P22 a inspección	278.4148	324.41475	P25 en espera de laminación	329.41475
255.4148	Celdas P21 a encapsulado	265.4148	325.41475	Celdas P27 a encapsulado	335.41475
257.7597	P17 a embalaje		327.7596	P23 a embalaje	
257.7597	P18 a simulación solar	262.7597	327.7596	P24 a simulación solar	332.75965
259.4148	P20 a electroluminiscencia	260.4148	329.4147	P26 a electroluminiscencia	330.41475
259.4148	Celdas P23 a inspección	284.4148	329.4147	Celdas P29 a inspección	354.41475
260.4148	P19 y P20 a laminación	277.4148	330.4147	P25 y P26 a laminación	347.41475
262.7597	P18 a embalaje		332.7596	P24 a embalaje	
265.4148	P21 a electroluminiscencia	266.4148	332.7596	Embalaje de 1 caja	351.23965
265.4148	Celdas P24 a inspección	290.4148	335.4147	P26 a electroluminiscencia	336.41475
266.4147	P21 en espera de laminación	289.41475	335.4147	Celdas P30 a inspección	360.41475
277.4147	P19 y P20 a ensamble final	281.75965	336.4147	P27 en espera de laminación	359.41475
278.4147	Celdas P22 a encapsulado	288.41475	347.4147	P25 y P26 a ensamble final	351.75965
281.7596	P19 a simulación solar	286.75965	348.4147	Celdas P28 a encapsulado	358.41475
281.7596	P20 en espera de simulación solar	286.75965	351.7597	P25 a simulación solar	356.7597
284.4147	P23 a encapsulado	294.41475	351.7597	P26 en espera de simulación solar	356.7597
286.7596	P19 a embalaje		351.2397	Embalaje de caja terminado	
286.7596	P20 a simulación solar	291.75965	354.4148	Celdas P29 a encapsulado	364.4148
288.4147	P22 a electroluminiscencia	289.41475	356.7597	P25 a embalaje	
288.4147	Celdas P25 a inspección	313.41475	356.7597	P26 a simulación solar	361.7597
289.4147	P21 y P22 a laminación	306.41475	358.4148	P28 a electroluminiscencia	359.4148
290.4147	Celdas P24 a encapsulado	300.41475	359.4148	P27 y P28 a laminación	376.4148
291.7596	P20 a embalaje		356.7597	Celdas P31 a inspección	381.7597
294.4147	P23 a electroluminiscencia	295.41475	360.4148	Celdas P30 a encapsulado	370.4148

Tiempo	Acción	Término	Tiempo	Acción	Término
361.7597	P26 a embalaje		431.75965	P32 a embalaje	
364.4148	P29 a electroluminiscencia	365.4148	434.41475	P35 a electroluminiscencia	435.41475
364.4148	Celdas P32 a inspección	389.4148	434.41475	Celdas P38 a inspección	459.41475
365.4148	P29 en espera de laminación	371.4148	435.41475	P 35 en espera de laminación	
370.4148	P30 a electroluminiscencia	371.4148	440.41475	P36 a electroluminiscencia	441.41475
370.4148	Celdas P33 a inspección	395.4148	441.41475	P35 y P36 a laminación	458.41475
371.4148	P29 y P30 a laminación	388.4148	444.75965	P33 y P34 a ensamble final	449.10455
376.4148	P27 y P28 a ensamble final	380.7597	449.10455	P33 a simulación solar	454.10455
380.7597	P27 a simulación solar	385.7597	451.75965	Celdas P37 a encapsulado	461.75965
380.7597	P28 en espera de simulación solar	385.7597	454.10455	P33 a embalaje	
381.7597	Celdas P31 a encapsulado	391.7597	454.10455	P34 a simulación solar	459.10455
385.7597	P27 a embalaje		458.41475	P35 y P36 a ensamble final	462.75965
385.7597	P28 a simulación solar	390.7597	459.10455	P34 a embalaje	
388.4148	P29 y P30 a ensamble final	392.7597	459.41475	Celdas P38 a encapsulado	469.41475
389.4148	Celdas P32 a encapsulado	399.4148	461.75965	P37 a electroluminiscencia	462.75965
390.7597	P28 a embalaje		462.75965	P35 a simulación solar	467.75965
391.7597	P31 a electroluminiscencia	392.7597			
391.7597	Celdas P34 a inspección	416.7597			
392.7597	P29 a simulación solar	397.7597			
392.7597	P30 en espera de simulación solar	399.4148			
392.7597	P 31 en espera de laminación	400.4148			
395.4148	Celdas P33 a encapsulado	405.4148			
397.7597	P29 a embalaje				
397.7597	P30 a simulación solar	402.7597			
399.4148	P32 a electroluminiscencia	400.4148			
399.4148	Celdas P35 a inspección	424.4148			
400.4148	P31 y P32 a laminación	417.4148			
402.7597	P30 a embalaje				
405.4148	P33 a electroluminiscencia	406.4148			
405.4148	Celdas P36 a inspección	430.4148			
406.4148	P 33 en espera de laminación	427.7597			
416.7597	Celdas P34 a encapsulado	426.7597			
417.4148	P31 y P32 a ensamble final	421.7597			
421.7597	P31 a simulación solar	426.7597			
421.7597	P32 en espera de simulación solar	426.7597			
424.4148	Celdas P35 a encapsulado	434.4148			
426.7596	P34 a electroluminiscencia	427.75965			
426.7596	Celdas P37 a inspección	451.75965			
426.7596	P31 a embalaje				
426.7596	P32 a simulación solar	431.75965			
427.7596	P33 y P34 a laminación	444.75965			
430.4147	Celdas P36 a encapsulado	440.41475			

Anexo E- Inventario de Ciclo de Vida de ensamble de paneles solares. Unidad funcional 1m² de panel solar monoPERC

Transporte de celdas. UF 1m² de panel solar monoPERC

Entradas			Salidas			
Material/Sustancia	Cantidad	Unidades	Material/Sustancia	Tipo	Cantidad	Unidades
Celda solar monocristalina PERC	0.8836	m ² de celdas/m ²	Cedas solares transportadas	Producto	36.3093	celdas/m ²
Transporte aéreo	4.9640	t*km/ m ²				
Transporte terrestre	0.0379	t*km/ m ²				

Selección de celdas. UF 1m² de panel solar monoPERC

Entradas			Salidas			
Material/Sustancia	Cantidad	Unidades	Material/Sustancia	Tipo	Cantidad	Unidades
Celda solar transportada	36.3093	celdas/m ²	Celda solar dañada en proceso	RRS	0.7261	celdas/m ²
Electricidad	0.5455	Wh/ m ²	Celdas fracturadas	RRS	15.4133	celdas/m ²
Ocupación de tierra	0.0007	m ² / m ²	Látex de dedales	ES	8.631	g/ m ²
Látex de dedales	8.8845	g/ m ²	Acero inoxidable (del cúter)	ES	0.0117	g/ m ²
Acero inoxidable (del cúter)	0.0117	g/ m ²	Capucha Polipropileno 100%	ES	0.0005	g/ m ²
Capucha Polipropileno 100%	0.0005	g/ m ²	Celdas seleccionadas	Producto	36.3093	celdas/m ²

Nota:

EA- Emisión al Aire

ES- Emisión al suelo

EAG- Emisión al agua

RRS- Residuo a relleno sanitario

Transporte de soldadura automatizada. UF 1m² de panel solar monoPERC

Entradas			Salidas			
Material/Sustancia	Cantidad	Unidades	Material/Sustancia	Tipo	Cantidad	Unidades
Soldadura de estaño	126.0742	g/ m ²	Soldadura transportada	Producto	126.0742	g/ m ²
Transporte (avión)	1.7133	t*km/ m ²				

Transporte terrestre	0.0130	t*km/ m ²				
----------------------	--------	----------------------	--	--	--	--

Soldadura automatizada. UF 1m² de panel solar monoPERC

Entradas			Salidas			
Material/Sustancia	Cantidad	Unidades	Material/Sustancia	Tipo	Cantidad	Unidades
Soldadura transportada	126.0742	g/ m ²	Celda solar dañada en proceso	RRS	0.0544	celdas/ m ²
Celdas seleccionadas	36.3093	celdas/ m ²	Celdas fracturadas	RRS	0.9633	celdas/ m ²
Flux de soldadura	3.782	g/ m ²	Celdas soldadas	Producto	36.3093	celdas/ m ²
Ocupación de tierra	0.0015	m ² / m ²	Vapor cargado de etanol	EA	1.40E-12	kg/ m ²
Electricidad	33.888	Wh/ m ²	Estaño (Vapor)	EA	1.40E-12	kg/ m ²

Nota:

EA- Emisión al Aire

ES- Emisión al suelo

EAG- Emisión al agua

RRS- Residuo a relleno sanitario

Transporte de inspección. UF 1m² de panel solar monoPERC

Entradas			Salidas			
Material/Sustancia	Cantidad	Unidades	Material/Sustancia	Tipo	Cantidad	Unidades
Soldadura de estaño	5.1686	g/ m ²	Soldadura transportada	ES	5.1686	g/ m ²
Transporte (avión)	0.0702	t*km/ m ²				
Transporte terrestre	5.37E-04	t*km/ m ²				

Inspección. UF 1m² de panel solar monoPERC

Entradas			Salidas			
Material/Sustancia	Cantidad	Unidades	Material/Sustancia	Tipo	Cantidad	Unidades
Soldadura transportada	5.1686	g/ m ²	Celda solar dañada en proceso	RRS	3.0245	celdas/ m ²
Electricidad	17.9403	Wh/ m ²	Celdas fracturadas	RRS	0.9633	celdas/ m ²

Ocupación de tierra	0.0037	m ² / m ²	Estaño	ES	0.0004	kg/ m ²
Celdas soldadas	36.309	celdas/ m ²	Celdas inspeccionadas	Producto	36.309	celdas/ m ²
Flux de soldadura	0.1550	g/ m ²	Vapor cargado de etanol	EA	1.416E- 12	kg/ m ²
			Estaño (Vapor)	EA	1.416E- 12	kg/ m ²

Nota:

EA- Emisión al Aire

ES- Emisión al suelo

EAG- Emisión al agua

RRS- Residuo a relleno sanitario

Transporte de encapsulado. UF 1m² de panel solar monoPERC

Entradas			Salidas			
Material/Sustancia	Cantidad	Unidades	Material/Sustancia	Tipo	Cantidad	Unidades
Vidrio templado de bajo contenido de hierro	8.000	kg/ m ²	Materia prima de encapsulado, transportada	Producto	8281.067	g/ m ²
Encapsulante Etil Vinil Acetato (EVA)	269.559	g/ m ²				
Fluoruro de polivinilo (Tedlar)	7.6719	g/ m ²				
PET (capa media de TPT)	3.8359	g/ m ²				
Transporte (avión)	112.5397	t*km/ m ²				
Transporte terrestre	0.8559	t*km/ m ²				

Encapsulado. UF 1m² de panel solar monoPERC

Entradas			Salidas			
Material/Sustancia	Cantidad	Unidades	Material/Sustancia	Tipo	Cantidad	Unidades
Materia prima de encapsulado, transportada	8281.067	g/ m ²	Celdas fracturadas	RRS	0.9633	celdas/ m ²
Electricidad	1.9012	Wh/ m ²	Vidrio templado de bajo contenido de hierro	RSS	3.7438	kg/ m ²
Celdas inspeccionadas	36.3093	celdas/ m ²	Encapsulante Etil Vinil Acetato (EVA)	RSS	56.1581	g/ m ²

Ocupación de tierra	0.0006	m ² / m ²	Fluoruro de polivinilo (Tedlar)	RSS	0.4794	g/ m ²
			PET (capa media de TPT)	RSS	7.89E-05	g/ m ²
			Prepanel encapsulado	Producto	1	m ² / m ²

Nota:

EA- Emisión al Aire

ES- Emisión al suelo

EAG- Emisión al agua

RRS- Residuo a relleno sanitario

Prueba de electroluminescencia. UF 1m² de panel solar monoPERC

Entradas			Salidas			
Material/Sustancia	Cantidad	Unidades	Material/Sustancia	Tipo	Cantidad	Unidades
Prepanel encapsulado	1	m ² / m ²	Prepanel probado	Producto	1	m ² / m ²
Ocupación de tierra	0.0007	m ² / m ²	Celdas fracturadas	RSS	0.9633	celdas/ m ²
Electricidad	6.1188	Wh/m ²				

Nota:

EA- Emisión al Aire

ES- Emisión al suelo

EAG- Emisión al agua

RRS- Residuo a relleno sanitario

Laminación. UF 1m² de panel solar monoPERC

Entradas			Salidas			
Material/Sustancia	Cantidad	Unidades	Material/Sustancia	Tipo	Cantidad	Unidades
Prepanel probado	1	m ² / m ²	Panel desechado	RRS	0.0015	
Papel	7.92	g/ m ²	Papel	RRS	7.92	g/ m ²
Electricidad	274.5162	Wh/m ²	Panel laminado	Producto	1	m ² / m ²
Ocupación de tierra	0.0152	m ² / m ²				

Nota:

EA- Emisión al Aire

ES- Emisión al suelo

EAG- Emisión al agua

RRS- Residuo a relleno sanitario

Transporte de ensamble final. UF 1m² de panel solar monoPERC

Entradas			Salidas			
Material/Sustancia	Cantidad	Unidades	Material/Sustancia	Tipo	Cantidad	Unidades
Perfil de aluminio 6061 anodizado largo AlMg3	1034.7305	g/ m ²	Materia prima de ensamble final, transportada	Producto	1685.8812	g/ m ²
Perfil de aluminio 6061 anodizado ancho AlMg3	523.900	g/ m ²				
Silicona	35.3007	g/ m ²				
Caja de conexiones de acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)	79.32308	g/ m ²				
Soldadura de estaño	12.6270	g/ m ²				
Transporte (avión)	212.4883	t*km/ m ²				
Transporte terrestre	1.6231	t*km/ m ²				

Ensamble final. UF 1m² de panel solar monoPERC

Entradas			Salidas			
Material/Sustancia	Cantidad	Unidades	Material/Sustancia	Tipo	Cantidad	Unidades
Panel laminado	1	m ² / m ²	Perfil de aluminio 6061 anodizado largo AlMg3	ES	41.389	g/ m ²
Materia prima de ensamble final, transportada	1685.8812	g/ m ²	Perfil de aluminio 6061 anodizado ancho AlMg3	ES	20.956	g/ m ²
Panel importado	0.5463	m ² / m ²	Agua	EA	10.085	ml/ m ²
Agua	60.5156	ml/ m ²	Trapo de algodón	ES	0.2101	kg/ m ²
Silicona	35.3007	g/ m ²	Caja de conexiones de acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)	ES	1.5864	g/ m ²
Electricidad	4.3822	Wh/ m ²	Panel terminado	Producto	1	m ² / m ²
Trapo de algodón	0.0210	kg/ m ²				
Ocupación de tierra	0.0046	m ² / m ²				

Nota:

EA- Emisión al Aire

ES- Emisión al suelo
 EAG- Emisión al agua
 RRS- Residuo a relleno sanitario

Prueba de simulación solar. UF 1m ² de panel solar monoPERC						
Entradas			Salidas			
Material/Sustancia	Cantidad	Unidades	Material/Sustancia	Tipo	Cantidad	Unidades
Panel terminado	1	m ² / m ²	Panel terminado y probado	Producto	1	m ² / m ²
Electricidad	263.5792	Wh/ m ²				
Ocupación de tierra	0.0018	m ² / m ²				
Computadora	2.13E-06	producto/ m ²				

Embalaje. UF 1m ² de panel solar monoPERC						
Entradas			Salidas			
Material/Sustancia	Cantidad	Unidades	Material/Sustancia	Tipo	Cantidad	Unidades
Panel terminado y probado	1	m ² / m ²	Panel terminado embalado	Producto	1	m ² / m ²
Caja de Cartón Corrugado	0.0443	kg/ m ²				
Cartón corrugado esquinas	1.1208	g/ m ²				
Fleje de PET 5/8	112.3255	g/m ²				
Ocupación de tierra	0.0486	m ² /m ²				
Electricidad	2.9123	Wh/m ²				
Emplaye calibre 60 de polietileno	8.9554	g/m ²				
Tarima de madera	0.0503	pieza/m ²				
Aire comprimido	1.3237	l/m ²				

Anexo F- Simulación de escenario propuesto en Excel

Tiempo	Acción	Término	Tiempo	Acción	Término
0	Entrada de celdas P1 y P2 a selección	3.8	27.8	Entrada P1 y P2 a laminación	44.8
3.8	Entrada de celdas P1 y P2 a soldadura	9.8	30.4	Celdas P15 y P16 en espera de soldadura	45.8
3.8	Entrada de celdas P3 y P4 a selección	7.6	30.4	Entrada de celdas P17 y P18 a selección	34.2
7.6	Celdas P3 y P4 en espera de soldadura	9.8	31.8	Entrada P3 a electroluminiscencia	32.8
7.6	Entrada de celdas P5 y P6 a selección	11.4	31.8	Entrada P7 a inspección	37.8
9.8	Entrada P1 a inspección	15.8	31.8	P4 en espera de electroluminiscencia	32.8
9.8	Entrada P2 a inspección	15.8	31.8	Entrada P8 a inspección	37.8
9.8	Entrada de celdas P3 y P4 a soldadura	15.8	31.8	Entrada P5 a encapsulado	41.8
11.4	Celdas P5 y P6 en espera de soldadura	15.8	31.8	Entrada P6 a encapsulado	41.8
11.4	Entrada de celdas P7 y P8 a selección	15.2	32.8	P3 en espera de laminación	33.8
15.2	Celdas P7 y P8 en espera de soldadura	21.8	32.8	Entrada P4 a electroluminiscencia	33.8
15.2	Entrada de celdas P9 y P10 a selección	19	33.8	P9 y P10 en espera de inspección	41.8
15.8	Entrada P1 a encapsulado	25.8	33.8	Entrada de celdas P11 y P12 a soldadura	39.8
15.8	Entrada P2 a encapsulado	25.8	33.8	Entrada P3 y P4 a laminación	50.8
15.8	Entrada P3 a inspección	21.8	34.2	Celdas P17 y P18 en espera de soldadura	51.8
15.8	Entrada P4 a inspección	21.8	34.2	Entrada de celdas P19 y P20 a selección	38
15.8	Entrada de celdas P5 y P6 a soldadura	21.8	37.8	Entrada P7 a encapsulado	47.8
19	Celdas P9 y P10 en espera de soldadura	27.8	37.8	Entrada P8 a encapsulado	47.8
19	Entrada de celdas P11 y P12 a selección	22.8	38	Celdas P19 y P20 en espera de soldadura	57.8
21.8	Entrada P3 a encapsulado	31.8	38	Entrada de celdas P21 y P22 a selección	41.8
21.8	Entrada P4 a encapsulado	31.8	39.8	P11 y P12 en espera de inspección	47.8
21.8	P5 y P6 en espera de inspección	25.8	39.8	Entrada de celdas P13 y P14 a soldadura	45.8
21.8	Entrada de celdas P7 y P8 a soldadura	27.8	41.8	Entrada P5 a electroluminiscencia	42.8
22.8	Celdas P11 y P12 en espera de soldadura	33.8	41.8	Entrada P9 a inspección	47.8
22.8	Entrada de celdas P13 y P14 a selección	26.6	41.8	P6 en espera de electroluminiscencia	42.8
25.8	Entrada P1 a electroluminiscencia	26.8	41.8	Entrada P10 a inspección	47.8
25.8	P2 en espera de electroluminiscencia	26.8	41.8	Celdas P21 y P22 en espera de soldadura	63.8
25.8	Entrada P5 a inspección	31.8	41.8	Entrada de celdas P23 y P24 a selección	45.6
25.8	Entrada P6 a inspección	31.8	42.8	P5 en espera de laminación	43.8
26.6	Celdas P13 y P14 en espera de soldadura	39.8	42.8	Entrada P6 a electroluminiscencia	43.8
26.6	Entrada de celdas P15 y P16 a selección	30.4	43.8	Entrada P5 y P6 a laminación	60.8
26.8	P1 en espera de laminación	27.8	44.8	Entrada P1 y P2 a ensamble final	49.1449
26.8	Entrada P2 a electroluminiscencia	27.8	45.6	Celdas P23 y P24 en espera de soldadura	69.8
27.8	P7 y P8 en espera de inspección	31.8	45.6	Entrada de celdas P25 y P26 a selección	49.4
27.8	Entrada de celdas P9 y P10 a soldadura	33.8	45.8	P13 y P14 en espera de inspección	57.8

Tiempo	Acción	Término	Tiempo	Acción	Término
45.8	Entrada de celdas P15 y P16 a soldadura	51.8	63.8	Entrada P11 a electroluminiscencia	64.8
47.8	Entrada P7 a electroluminiscencia	48.8	63.8	Entrada P15 a inspección	69.8
47.8	Entrada P11 a inspección	53.8	63.8	P12 en espera de electroluminiscencia	64.8
47.8	P8 en espera de electroluminiscencia	48.8	63.8	Entrada P16 a inspección	69.8
47.8	Entrada P12 a inspección	53.8	63.8	Entrada P13 a encapsulado	73.8
47.8	Entrada P9 a encapsulado	57.8	63.8	Entrada P14 a encapsulado	73.8
47.8	Entrada P10 a encapsulado	57.8	63.8	P19 y P20 en espera de inspección	79.8
48.8	P7 en espera de laminación	49.8	63.8	Entrada de celdas P21 y P22 a soldadura	69.8
48.8	Entrada P8 a electroluminiscencia	49.8	64.6	Celdas P33 y P34 en espera de soldadura	99.8
49.1449	P1 a embalaje		64.6	Entrada de celdas P35 y P36 a selección	68.4
49.1449	P2 a simulación solar	54.1449	64.8	P11 en espera de laminación	65.8
49.4	Celdas P25 y P26 en espera de soldadura	75.8	64.8	Entrada P12 a electroluminiscencia	65.8
49.4	Entrada de celdas P27 y P28 a selección	53.2	65.1449	P5 a embalaje	
49.8	Entrada P7 y P8 a laminación	66.8	65.1449	P6 a simulación solar	70.1449
50.8	Entrada P3 y P4 a ensamble final	55.1449	65.8	Entrada P11 y P12 a laminación	82.8
51.8	P15 y P16 en espera de inspección	63.8	66.8	Entrada P7 y P8 a ensamble final	71.1449
51.8	Entrada de celdas P17 y P18 a soldadura	57.8	68.4	Celdas P35 y P36 en espera de soldadura	117.8
53.2	Celdas P27 y P28 en espera de soldadura	81.8	69.8	Entrada P15 a encapsulado	79.8
53.2	Entrada de celdas P29 y P30 a selección	57	69.8	Entrada P16 a encapsulado	79.8
53.8	Entrada P11 a encapsulado	63.8	69.8	P21 y P22 en espera de inspección	89.8
53.8	Entrada P12 a encapsulado	63.8	69.8	Entrada de celdas P23 y P24 a soldadura	75.8
54.1449	P2 a embalaje		70.1449	P6 a embalaje	
55.1449	P3 a embalaje		71.1449	P7 a simulación solar	76.1449
55.1449	P4 a simulación solar	60.1449	71.1449	P8 en espera de simulación solar	76.1449
57	Celdas P29 y P30 en espera de soldadura	87.8	73.8	Entrada P13 a electroluminiscencia	74.8
57	Entrada de celdas P31 y P32 a selección	60.8	73.8	Entrada P17 a inspección	79.8
57.8	Entrada P9 a electroluminiscencia	58.8	73.8	P14 en espera de electroluminiscencia	74.8
57.8	Entrada P13 a inspección	63.8	73.8	Entrada P18 a inspección	79.8
57.8	P10 en espera de electroluminiscencia	58.8	74.8	P13 en espera de laminación	75.8
57.8	Entrada P14 a inspección	63.8	74.8	Entrada P14 a electroluminiscencia	75.8
57.8	P17 y P18 en espera de inspección	73.8	75.8	P23 y P24 en espera de inspección	101.8
57.8	Entrada de celdas P19 y P20 a soldadura	63.8	75.8	Entrada de celdas P25 y P26 a soldadura	81.8
58.8	P9 en espera de laminación	59.8	75.8	Entrada P13 y P14 a laminación	92.8
58.8	Entrada P10 a electroluminiscencia	59.8	76.1449	P7 a embalaje	
59.8	Entrada P9 y P10 a laminación	76.8	76.1449	P8 a simulación solar	81.1449
60.1449	P4 a embalaje		76.8	Entrada P9 y P10 a ensamble final	81.1449
60.8	Entrada P5 y P6 a ensamble final	65.1449	79.8	Entrada P15 a electroluminiscencia	80.8
60.8	Celdas P31 y P32 en espera de soldadura	93.8	79.8	Entrada P19 a inspección	85.8
60.8	Entrada de celdas P33 y P34 a selección	64.6	79.8	P16 en espera de electroluminiscencia	80.5

Tiempo	Acción	Término	Tiempo	Acción	Término
79.8	Entrada P20 a inspección	85.8	97.1449	P13 a embalaje	
79.8	Entrada P17 a encapsulado	89.8	97.1449	P14 a simulación solar	102.1449
79.8	Entrada P18 a encapsulado	89.8	97.8	Entrada P19 y P20 a laminación	114.8
80.8	P15 en espera de laminación	81.8	98.8	Entrada P15 y P16 a ensamble final	103.1449
80.8	Entrada P16 a electroluminiscencia	81.8	99.8	P31 y P32 en espera de inspección	127.8
81.1449	P8 a embalaje		99.8	Entrada de celdas P33 y P34 a soldadura	105.8
81.1449	P9 a simulación solar	86.1449	101.8	Entrada P23 a encapsulado	111.8
81.1449	P10 en espera de simulación solar	86.1449	101.8	Entrada P24 a encapsulado	111.8
81.8	P25 y P26 en espera de inspección	105.8	102.1449	P14 a embalaje	
81.8	Entrada de celdas P27 y P28 a soldadura	87.8	103.1449	P15 a embalaje	
81.8	Entrada P15 y P16 a laminación	98.8	103.1449	P16 a simulación solar	108.1449
82.8	Entrada P11 y P12 a ensamble final	87.1449	105.8	Entrada P21 a electroluminiscencia	106.8
85.8	Entrada P19 a encapsulado	95.8	105.8	Entrada P25 a inspección	111.8
85.8	Entrada P20 a encapsulado	95.8	105.8	P22 en espera de electroluminiscencia	106.8
86.1449	P9 a embalaje		105.8	Entrada P26 a inspección	111.8
86.1449	P10 a simulación solar	91.1449	105.8	P33 y P34 en espera de inspección	137.8
87.1449	P11 a embalaje		106.8	P21 en espera de laminación	107.8
87.1449	P12 en espera de simulación solar	91.1449	106.8	Entrada P22 a electroluminiscencia	107.8
87.8	P27 y P28 en espera de inspección	111.8	107.8	Entrada P21 y P22 a laminación	124.8
87.8	Entrada de celdas P29 y P30 a soldadura	93.8	108.1449	P16 a embalaje	
89.8	Entrada P17 a electroluminiscencia	90.8	108.8	Entrada P17 y P18 a ensamble final	113.1449
89.8	Entrada P21 a inspección	95.8	111.8	Entrada P23 a electroluminiscencia	112.8
89.8	P18 en espera de electroluminiscencia	90.8	111.8	Entrada P27 a inspección	117.8
89.8	Entrada P22 a inspección	95.8	111.8	P24 en espera de electroluminiscencia	112.8
90.8	Entrada P18 a electroluminiscencia	91.8	111.8	Entrada P28 a inspección	117.8
90.8	P17 en espera de laminación	91.8	111.8	Entrada P25 a encapsulado	121.8
91.1449	P10 a embalaje		111.8	Entrada P26 a encapsulado	121.8
91.1449	P12 a simulación solar	96.1449	112.8	P23 en espera de laminación	113.8
91.8	Entrada P17 y P18 a laminación	108.8	112.8	Entrada P24 a electroluminiscencia	113.8
92.8	Entrada P13 y P14 a ensamble final	97.1449	113.1449	P17 a embalaje	
93.8	P29 y P30 en espera de inspección	121.8	113.1449	P18 a simulación solar	118.1449
93.8	Entrada de celdas P31 y P32 a soldadura	99.8	113.8	Entrada P23 y P24 a laminación	130.8
95.8	Entrada P19 a electroluminiscencia	96.8	114.8	Entrada P19 y P20 a ensamble final	119.1449
95.8	Entrada P23 a inspección	101.8	117.8	Entrada P27 a encapsulado	127.8
95.8	P20 en espera de electroluminiscencia	96.8	117.8	Entrada P28 a encapsulado	127.8
95.8	Entrada P24 a inspección	101.8	117.8	Entrada de celdas P35 y P36 a soldadura	123.8
95.8	Entrada P21 a encapsulado	105.8	118.1449	P18 a embalaje	
95.8	Entrada P22 a encapsulado	105.8	119.1449	P19 a embalaje	
96.1449	P12 a embalaje		119.1449	P20 a simulación solar	124.1449
96.8	P19 en espera de laminación	97.8	121.8	Entrada P25 a electroluminiscencia	122.8
96.8	Entrada P20 a electroluminiscencia	97.8	121.8	Entrada P29 a inspección	127.8

Tiempo	Acción	Término	Tiempo	Acción	Término
121.8	P26 en espera de electroluminiscencia	122.8	143.8	Entrada P36 a inspección	149.8
121.8	Entrada P30 a inspección	127.8	143.8	Entrada P33 a encapsulado	153.8
122.8	P25 en espera de laminación	123.8	143.8	Entrada P34 a encapsulado	153.8
122.8	Entrada P26 a electroluminiscencia	123.8	144.8	P31 en espera de laminación	145.8
123.8	P35 y P36 en espera de inspección		144.8	Entrada P32 a electroluminiscencia	145.8
123.8	Entrada P25 y P26 a laminación	140.8	145.1449	P25 a embalaje	
124.1449	P20 a embalaje				
124.8	Entrada P21 y P22 a ensamble final	129.1449			
127.8	Entrada P27 a electroluminiscencia	128.8			
127.8	Entrada P31 a inspección	133.8			
127.8	P28 en espera de electroluminiscencia	128.8			
127.8	Entrada P32 a inspección	133.8			
127.8	Entrada P29 a encapsulado	137.8			
127.8	Entrada P30 a encapsulado	137.8			
128.8	P27 en espera de laminación	129.8			
128.8	Entrada P28 a electroluminiscencia	129.8			
129.1449	P21 a embalaje				
129.1449	P22 a simulación solar	134.1449			
129.8	Entrada P27 y P28 a laminación	146.8			
130.8	Entrada P23 y P24 a ensamble final	135.1449			
133.8	Entrada P31 a encapsulado	143.8			
133.8	Entrada P32 a encapsulado	143.8			
134.1449	P22 a embalaje				
135.1449	P23 a embalaje				
135.1449	P24 a simulación solar	140.1449			
137.8	Entrada P29 a electroluminiscencia	138.8			
137.8	Entrada P33 a inspección	143.8			
137.8	P30 en espera de electroluminiscencia	138.8			
137.8	Entrada P34 a inspección	143.8			
138.8	P29 en espera de laminación	139.8			
138.8	Entrada P30 a electroluminiscencia	139.8			
139.8	Entrada P29 y P30 a laminación	156.8			
140.1449	P24 a embalaje				
140.1449	Embalaje caja 1	149.5049			
140.8	Entrada P25 y P26 a ensamble final	145.1449			
143.8	Entrada P31 a electroluminiscencia	144.8			
143.8	Entrada P35 a inspección	149.8			
143.8	P32 en espera de electroluminiscencia	144.8			

Referencias

- Agnoletti, O., Ceola, S., Della Monica, O., Ercole, P., Favaro, N., Hreglich, S., . . . Valloto, M. (2014). *Full Recovery End of Life Photovoltaic: New technology to divide the components of silicon photovoltaic panels at the end of life*. Obtenido de Procedente del Proyecto LIFE+12/ENV/IT000904 (SASIL S.P.A, Brusnengo, Italia., SSV, Murano, Italia., PV CYCLE AISBL, Bruselas, Bélgica): <https://sasil-life.com/wp-content/uploads/2018/05/Sasil-Srl-Slides-Amsterdam-23sett2014.pdf>
- Akinyele, D., Rayudu, R., & Nair, N. (2017). Life cycle impact assessment of photovoltaic power generation from crystalline silicon-based solar modules in Nigeria. *Energy*, 537–549.
- Alsema, E. (2000). Energy pay-back time and CO2 emissions of PV system. “*PV 2000 - And Beyond*”, 17–25.
- Amendariz, J., Arena, A., Gonzalez, M., Luna, A., & Bojorquez, G. (2018). Energy payback time and Greenhouse Gas emissions: Studying the international energy agency guidelines architecture. *Journal of Cleaner Production*, 1566-1575.
- Azapagic, A. (2009). *Life cycle assesment as a tool for sustainable managment of ecosystem services*. Obtenido de University of BATH, Sustaining Future Ecosystem Services: From Understanding to Action: <http://www.bath.ac.uk/research/seminars/esrc/june09/>
- Banco Mundial. (2019). *Ease of Doing Business rankings*. Obtenido de Doing Bussiness: <https://www.doingbusiness.org/en/rankings>
- Bauer, J. E. (2006). *The Quality Improvement Handbook 2nd Edition*.
- Bekkelund, K. (2013). *Life Cycle Assessment of Thon Film Solar Panels*. Norwegian University of Science and Technology.
- Black, J. T., & Phillips, D. T. (2010). The lean to green evolution. En J. T. Black, & D. T. Phillips, *The lean to green evolution* (págs. 46–51.). 42(6): INDUSTRIAL ENGINEER.
- Blakers, A. (2019). Development of the PERC Solar Cell. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 629-635.

- Bloomberg New Energy Finance. (2019). *México. CLIMATESCOPE 2019*. Obtenido de BloombergNEF: <http://global-climatescope.org/results/MX>
- BloombergNEF. (Diciembre de 2020). *Emerging Markets Cross-Border Clean Energy Investment*. Obtenido de Climatescope: <https://global-climatescope.org/clean-energy-investments>
- Brown, A., Amundson, J., & Bardudeen, F. (2014). Sustainable Value Stream Mapping (sus-VSM) in different manufacturing system configurations: applications case studies. *Journal of Cleaner Production*, 164-179.
- Brown, A., Amundson, J., & Badurdeen, F. (2014). Sustainable value stream mapping (Sus-VSM) in different manufacturing system configurations : application case studies. *Journal of Cleaner Production*, 164-179.
- Bustillo, E., Calidonio, C., Bonilla, O., Portillo, F., & Zúñiga, H. (2008). *Estudio de Impacto Ambiental Granja Solar Fotovoltaico Del Pacifico* . Honduras: Fortersa S.A. Honduras.
- Carl Roth. (24 de Julio de 2018). *Ficha de datos de seguridad del estaño*. Obtenido de Carl Roth: <https://www.carlroth.com/medias/SDB-5097-ES-ES.pdf?context=bWFzdGVyfHNIY3VyaXR5RGF0YXNoZWV0c3wyNDEzMzd8YXBwbGljYXRpb24vcGRmfHNIY3VyaXR5RGF0YXNoZWV0cy9oMTgvaDQyLzkwMDQ4MzEwNDc3MTAucGRmfDIyMDNjM2IyNDcxZjk2ZGJiNzIwZjE2ZTA2ZDIxYmQwODRiZTkzNDA5ZjcyNzllYmM1MDk3>
- Chiarini, A. (2012). *Lean Thinking, Total Quality Control to Lean Six Sigma*. Milán: Springer-Verlag .
- Corcelli, F., Ripa, M., & Ulgiati, S. (2017). End-of-life treatment of crystalline silicon photovoltaic panels. An energy-based case study. *Journal of Cleaner Production*, 1129–1142.
- Corredor, I. A. (2015). *Sin identificación de los 7 desperdicios no hay lean*. CDMX. : Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de ingeniería. .
- Cucchiella, F., & Dadamo, I. (2012). Estimation of the energetic and environmental impacts of a roof-mounted building-integrated photovoltaic systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 5245-5259.
- Curran, M. (2012). *Life Cycle Assessment Handbook: A Guide for Environmentally Sustainable Products*. Willey, Massachusetts: Scrivener Publishing.
- ecoinvent. (2020). *Database*. Obtenido de ecoinvent: <https://www.ecoinvent.org/home.html>

- Erlach, K. (2013). *Value Stream Design: The way towards a lean factory*. Berlín: Springer.
- Ernst & Young. (mayo de 2020). *Renewable Energy Country Attractiveness Index May 2020*. Obtenido de Renewable Energy Country Attractiveness Index (RECAI): https://www.ey.com/en_gl/recai
- Espaicenor. (20 de Octubre de 2020). *Vidrio Templado*. Obtenido de Espaicenor Descargas: <http://www.espaicenor.com/docs/DOCUMENTACION%20VIDRIO%20TEMPLADO%20CORTINAS%20VIDRIO.pdf>
- Faulkner, W., & Badurdeen, F. (2004). Sustainable Value Stream Mapping (Sus- VSM) methodology to visualize and asses manufacturing sustainability performance. *Jornal of Cleaner Production*, 8-18.
- Fernández, M. (2010). *Energía solar: electricidad fotovoltaica*. Madrid: Liberfactory.
- Foro Económico Mundial (WEF), & Scwab, K. (2019). *The Global Competitiveness Report 2019*. Obtenido de http://www3.weforum.org/docs/WEF_TheGlobalCompetitivenessReport2019.pdf
- Frankl, P., Menichetti, E., Raugei, M., Lombardelli, S., & Prensushi, G. (2005). Final report on technical data, costs and life cycle inventories of PV applications. *Ia of the NEEDS (New Energy Externalities Developments for Sustainability) project*.
- Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. (2021). *PHOTOVOLTAICS REPORT*. Freiburg: Fraunhofer ISE.
- Fritsche, U. R., Cowie, A. L., & Johnson, F. X. (2017). ENERGY AND LAND USE. *Global Land Outlook Working Paper*.
- Fthenakis, A., Kim, H., & Alsema, E. (2008). Emissions from Photovoltaic Life Cycles. *Environmental Science and Technology*, 2168-2174.
- Fu, Y., Liu, X., & Yuan, Z. (2015). Life-cycle assessment of multi-crystalline photovoltaic (PV) systems in China. *Journal of Cleaner Production*, 180-190.
- Fukurozaki, S., Zilles, R., & Sauer, I. (2012). Energy Payback Time and CO2 Emissions of 1.2kWp Photovoltaic Roof-Top System in Brazil. *Int. J. Smart Grid Clear Energy*, 164–169.
- Galgano, A. (1995). *Los 7 instrumentos de la Calidad Total*. Madrid: DIAZ DE SANTOS.
- Gerbinet, S., Belboom, S., & Léonard, A. (2014). Life Cycle Analysis (LCA) of photovoltaic panels: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 747-753.

- Green, M. A. (2015). Solar Energy Materials & Solar Cells The Passivated Emitter and Rear Cell (PERC): From conception to mass production. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 190-197.
- Hartini, S., Ciptomulyono, & Anityasari, M. (2019). Lyfe cycle- Value stream mapping: Evaluating sustainability using lean manufacturing tools in the life cycle perspective. *AIP Conference Proceedings*, (pág. 2114).
- Heravi, G., Rostami, M., & Kebria, M. (2020). Energy consumption and carbon emissions assessment of integrated production and erection of buildings' pre-fabricated steel frames using lean techniques. *Journal of Cleaner Production*, 253.
- Hernández-Padilla, F. (2016). *Análisis de Ciclo de Vida como herramienta de decisión para el tratamiento de agua residual en América Latina y el Caribe*. CDMX: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hondo, H. (2005). Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case. *Energy* 30 , 11-12.
- Hong, J., Chen, W., Qi, C., Ye, L., & Xu, C. (2016). Life cycle assessment of multi-crystalline silicon photovoltaic cell. *Sol. Energy*, 283–293.
- Hou, G., Sun, H., Jiang, Z., Pan , Z., Wang, y., Zhang, X., . . . Yao, Q. (2016). Life cycle assessment of grid-connected photovoltaic power generation from crystalline silicon solar modules in China. *Appl. Energy*, 882–890.
- Hsu, D., O'Donoghue, P., Fthenakis, V., Heath, G., Kim, H., Sawyer, P., . . . Turney, D. (2012). Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Crystalline Silicon Photovoltaic Electricity Generation. *Journal of Industrial Ecology*, 122-135.
- Huang, B., Zhao, J., Chai, J., Xue, B., & Zhao, F. (2017). Environmental influence assessment of China's multi-crystalline silicon (multi-Si) photovoltaic modules considering recycling process. *Sol. Energy*, 132–141.
- Huijbregts, M., Steinmann, Z., Elshout , P., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., . . . van Zelm, R. (2016). *ReCiPe 2016. A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level* . Países Bajos: National Institute fot Public Health and the Environment.
- IRENA. (2015). Renewable Energy Prospects: Mexico, REmap 2030 analysis. *REmap 2030*, 3.
- IRENA. (2016). *End-of-life management. Solar photovoltaic panels*. IRENA 2016 AND IEA-PVPS 2016.

- IRENA. (2020). *Estadísticas de capacidad renovable 2020*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- ISO 14040.1997. (1997). *International Organization for Standardization*. Obtenido de Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Principios y marco de referencia: <https://www.iso.org/standard/23151.html>
- ISO 14040:2006. (2006). *International Organization for Standardization*. Obtenido de Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Principios y marco de referencia: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es>
- Ito, M., Komoto, K., & Kurokawa, K. (2010). Life-cycle analyses of very-large scale PV systems using six types of PV modules. *Energy*, S271-S273.
- Jungbluth, N., Flury, K., & Stucki, M. (2012). Life Cycle Inventories of Photovoltaics. *Swiss Federal Office of Energy SFOE*.
- Jungbluth, N., Stucki, M., & Frischknecht, R. (2009). *Photovoltaics*. Dubendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
- Jutglar, L. (2012). *Generación de energía solar fotovoltaica*. Barcelona: Marcombo.
- Kannan, R., Leong, K., Osman, R., Ho, H., & Tso, C. (2006). Life Cycle Assessment study of solar PV systems: an example of a 2.7 kWp distributed solar PV system in Singapore. *Sol. Energy*.
- Kim, B., Lee, J., Kim, K., & Hur, T. (2014). Evaluation of the environmental performance of sc-Si and mc-Si PV systems in Korea. *Sol. Energy*, 100–114.
- Kittner, N., Gheewala, S., & Kamens, R. (2013). An environmental life cycle comparison of single-crystalline and amorphous-silicon thin-film photovoltaic systems in Thailand. *Energy Sustain. Dev*, 605-614.
- Kumar, A., & Preeti, N. (2020). Metal dissolution from end-of-life solar photovoltaics in real landfill leachate versus synthetic solutions : One-year study. *Waste Management*, 351-361.
- LCI. (2015). *Environmental LCVA*. . Obtenido de Life cycle initiative: <https://www.lifecycleinitiative.org/starting-life-cycle-thinking/life-cycle-approaches/environmental-lca/>
- Lenzen, M., Dey, C., Hardy, C., & Bilek, M. (2006). *Life-cycle energy balance and greenhouse gas emissions of nuclear energy in Australia*. . Sidney: Report to the Prime Minister's Uranium Mining, Processing and Nuclear Energy Review (UMPNER).

- Luo, W., Khoo, Y., Kumar, A., Low, J., Li, Y., Tan, Y., . . . Ramakrishna, S. (2018). A comparative life-cycle assessment of photovoltaic electricity generation in Singapore by multicrystalline silicon technologies. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 157–162.
- Mahmud, M., Huda, N., Farjana, S., & Lang, C. (2018). Environmental Impacts of Solar-Photovoltaic and Solar-Thermal Systems with Life-Cycle Assessment. *ENERGIES*, 2346.
- María Jose, M. (2011). Optimization of Production Flow at Eco Supplies Solar AB. *Networked Digital Library of Theses & Dissertations*.
- Martínez Gómez, E. (2017). *Análisis del ciclo de vida de una planta solar fotovoltaica en México*. Ciudad Universitaria, CDMX: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Mathur, J., Bansal, N., & Wagner, H. (2002). Energy and environmental correlation for renewable energy systems in India. *Energy Sources*, 19-26.
- Matsumoto, Y. (2011). Celdas solares de silicio: Fundamento y tendencia. *Caos Conciencia*, 32-44.
- Michelle, M. J. (2011). *Optimization of Production Flow at Eco Supplies Solar AB*. Estocolmo: Royal Institute of thecnology.
- Muneer, T., Younes, S., Lambert, N., & Kubie, J. (2006). Life cycle assessment of a medium-sized photovoltaic facility at a high latitude location. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part A J. Power Energy*, 517-524.
- Muteri, V., Cellura, M., Curto, D., Franzitta, V., Longo, S., Mistretta, M., & Parisi, M. L. (2020). Review on Life Cycle Assessment of Solar Photovoltaic Panels. *Energies*, 252.
- Ohno, T. (1988). *Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production*. Boca Raton: CRC Press.
- Open LCA. (2020). *Open LCA*. Obtenido de About- the idea: <https://www.openlca.org/the-idea/>
- Pacca, S., Sivaraman, D., & Keoleian, G. (2007). Parameters affecting the life cycle performance of PV technologies and systems. *Energy Policy*, 3316-3326.
- Partouche, J. (2012). *The PV solar value chain*. Obtenido de TSE PV production: <https://es.scribd.com/document/365746398/TSE-PV-Production-Line-En>

- Pehnt, M., Bubenzer, A., & Rabuer, A. (2002). Life cycle assessment of photovoltaic systems- Trying to fight deep-seated prejudices. . *Photovoltaics guidebook for decision making* .
- Prospector. (29 de Octubre de 2020). *Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) Propiedades típicas Generic ABS*. Obtenido de Prospector: <https://plastics.ulprospector.com/es/generics/1/c/t/acrilonitrilo-butadieno-estireno-abs-properties-processing>
- Pryshlakivsky, J., & Searcy, C. (2013). Fifteen years of ISO 14040: a review. *Journal of Cleaner Production*,, 115–123.
- Rashedi, A., & Taslima , K. (2020). Life Cycle Assessment of Most Widely Adopted Solar Photovoltaic Energy Technologies by Mid-Point and End-Point Indicators of ReCiPe Method. *Environmental Science & Pollution Research* , 29075–29090.
- Renewable Energy Magazine. (26 de septiembre de 2014). *Energías Renovables. El periodismo de las energías limpias*. Obtenido de REC presenta su serie TwinPeak: <https://www.energias-renovables.com/fotovoltaica/rec-presenta-su-serie-twinpeak-20140926>
- ReVesConsult. (29 de Octubre de 2020). *Propiedades Aluminio*. Obtenido de ReVesConsult Aluminio: https://www.revesconsult.com/descargas/propiedades_aluminio.pdf
- Reyna Amador, M. C. (Noviembre de 2017). *Presentaciones por áreas académicas*. Obtenido de Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería: https://www.uaeh.edu.mx/docencia/P_Presentaciones/icbi/asignatura/ingenieria/2017/balanceodelinea.pdf
- Rohac, T., & Januska, M. (2015). Value Stream Mapping Demonstration on Real Case Study. *Procedia Engineering*, 520-529.
- Roosen, T. J., & Pons, D. J. (2013). Environmentally Lean Production: The Development and Incorporation of an Environmental Impact Index into Value Stream Mapping. *Journal of Industrial Engineering*.
- Rother, M., & Shook, J. (1999). *Learnig to see: Value Stream Mapping to Add and Eliminate Muda*. Massachusetts: The Lean Enterprise Institute.
- Sanmetal, s.a. (20 de Octubre de 2020). *Termoplásticos*. Obtenido de Sanmetal, S.A.: <http://www.sanmetal.es/productos/termoplasticos/polipropileno-pp/18>

- Secretaría de Energía. Subsecretaría de Energías Renovables y Eficiencia Energética. (2019). *Manual de generación distribuída solar fotovoltaica*. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Secretaría de Gobierno de Energía.
- SENER. (2015). Programa de Desarrollo Eléctrico Nacional (PRODESEN) 2015-2029. *Diario Oficial de la Federación*, págs. 13-26.
- SENER. (2016). *Zonas con alta calidad solar*. Obtenido de Atlas Nacional de Zonas con Alto Potencial de Energías Limpias:
<https://dgel.energia.gob.mx/azel/mapa.html?lang=es>
- SENER. (2018). Programa de Desarrollo Eléctrico Nacional (PRODESEN) 2018-2032. *Diario Oficial de la Federación*, págs. 14-31.
- SENER. (2019). Programa de Ampliación y Modernización de la Red Nacional de Transmisión y Redes Generales de Distribución del Mercado Eléctrico Mayorista (PRODESEN) 2019-2033. *Diario Oficial de la Federación*, págs. 32-85.
- SENER. (30 de Junio de 2021). Programa de Desarrollo Eléctrico Nacional (PRODESEN) 2021-2035. *Diario Oficial de la Federación*.
- Siddiqui, M. S., Pant, B. K., Saxena, A. K., & Chandril, S. (2019). An analysis of Passivated emitter and rear contact (PERC) cell and module. *IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 334-338.
- Soares, W., Athayde, D., & Nunes, E. (2018). LCA study of photovoltaic systems based on different technologies. *International Journal of Green Energy*, 577–583.
- Socconini, L. (2019). *Lean manufacturing : paso a paso*. Ciudad de México: Alfaomega.
- Stoppato, A. (2008). Life cycle assessment of photovoltaic electricity generation. *Energy* , 224- 232.
- Stylos, N., & Koroneos, C. (2014). Carbon footprint of polycrystalline photovoltaic systems. *J. Clean. Prod.*, 639–645.
- Sumper, A., Robledo, M., Villafila, R., Bergas, J., & Andres, J. (2011). Life-cycle assessment of a photovoltaic system in Catalonia (Spain). *Renew. Sustain. Energy Rev*, 3888-3896.
- Swinburne, A. (2019). The Role of Gemba in Product and Process Innovation. *Food Marketing & Technology*, 54-55.

- The World Material. (20 de Octubre de 2020). *18/8 Stainless Steel Properties, Yield Strength, Composition, Density, Tensile Strength, Hardness*. Obtenido de The World Material: <https://www.theworldmaterial.com/what-is-18-8-stainless-steel/>
- Thull-Freedman, J., Mondoux, S., Stang, A., & Chaetier, L. (2020). Going to the COVID-19 Gemba: Using observation and high reliability strategies to achieve safety in a time of crisis. *CJEM*, 1-4.
- Tous, M. R. (2010). *Energía solar fotovoltaica*. Barcelona: Ceac.
- Tripanagnostopulos, Y., Souliotis, M., Battisti, R., & Corrado, A. (2006). Performance, cost and life-cycle assessment study of hybrid PVT/AIR solar systems. *Progress in Photovoltaics; Research and Applications*, 65-76.
- Universidad de Barcelona. (29 de Octubre de 2020). *Polietileno de baja densidad*. Obtenido de Materials: <http://www.ub.edu/cmematerials/es/content/polietileno-de-baja-densidad>
- Vargas-Lozano, A., & Castaño-Garavino, O. (2020). Lean Manufacturing y la aplicación de esta herramienta en. *Universidad Santiago de Cali, Facultad de Ingeniería, Programa de Tecnología en Gestión de Procesos Industriales*.
- Vanegas, C., Pasqualino, J., & Cabrera, C. (2015). Los impactos ambientales de la implementación de las energías eólica y solar en el Caribe Colombiano . *PROSPECTIVA*, 68-75.
- Vellini, M., Gambini, M., & Prattella, V. (2017). Environmental impacts of PV technology throughout the life cycle: Importance of the end-of-life management for Si-panels and CdTe-panels. *Energy*, 1099–1111.
- Vinodh, S., Ben Ruben, R., & Asokan, P. (2016). Life cycle assessment integrated value stream mapping framework to ensure sustainable manufacturing: a case study. *Clean Techn Environ Policy* , 279- 295.
- Weldcote metals. (25 de mayo de 2015). *Tin / Lead Solid Solder*. Obtenido de Weldcote metals: <https://www.weldcotemetals.com/dataFiles/sds/sds900.pdf>
- Yang, D., Liu, J., Yang, J., & Ding, N. (2015). Life-cycle assessment of China's multi-crystalline silicon photovoltaic. *J. Clean. Prod.*, 35–45.