

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

INSTITUTO DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL Y DE MANUFACTURA



**EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LA MÁQUINA-189, CASO
SAERTEX MÉXICO S.A. DE C.V.**

Tesis presentada por:

Huillcacuri Vega, Xuxa Susana

Para optar el Título Profesional de:

Maestría en Ingeniería Industrial

Director de tesis:

Dr. Jorge Luis García Alcaraz

Codirector de tesis:

Juan Manuel Madrid Solorzano

CIUDAD JUÁREZ - MÉXICO

JUNIO DE 2026

Dedicatoria

La presente tesis esta dedicada a cada uno de los miembros de mi familia por ser mi soporte diario en este mundo tan desafiante.

A Dios, por el regocijo que brinda al alma en los momentos más difíciles en los que la vida nos pone a prueba.

A mi madre, por la comprensión y apoyo en cada decisión que tomo.

A mi hermana Ruth, ya que su valentía por afrontar nuevos retos me anima a seguir intentándolo.

A mi hermano Henry, con la esperanza de ayudarlo cuando él me lo permita.

A mi hermana Jimena, a quien le deseo muchas valentía y ferocidad para que tome la decisión de ir por lo que ella quiera.

A mi padre por su confianza y amor.

Y a la empresa SAERTEX México S.A. de C.V., que día a día amplía mi visión en la industria.

Xuxa Susana Huilcacuri Vega

Resumen

La presente investigación tiene como objetivo evaluar el efecto de las mejoras implementadas bajo la filosofía de manufactura esbelta, medido mediante el índice de calidad en el primer intento, sobre el ACV del proceso de la máquina 189 de la empresa SAERTEX México, bajo el enfoque *cradle to gate* (*cuna a la puerta*); empleando los métodos ReCiPe 2016 Midpoint (H) y CML-IA baseline v3.04 / EU25 del software SIMAPRO. Para lo cual se realizaron inventarios de consumos y salidas en las etapas del proceso productivo de la máquina 189 (configuración, producción y empaque). Considerando el FTQ promedio para el año 2024 y 2025 de 97.14% y 98.82 respectivamente. Determinándose así que, la producción de tejido biaxial en SAERTEX México presenta un potencial de calentamiento global de 12 kgCO₂-eq por kilogramo de tejido de fibra de vidrio biaxial. Este valor supera significativamente los referentes internacionales reportados en Europa, los cuales se sitúan en un rango aproximado de 2 a 3 kgCO₂-eq por kilogramo de tejido de malla.

Además, la evaluación del índice de producción de calidad en el primer intento evidenció que su mejora de 97.14% a 98.82% generó una reducción aproximada del 7% de emisiones de kgCO₂-eq, así como un 10% en los costos de mala calidad, equivalente a un ahorro estimado de 100,000 USD anuales; además, los escenarios proyectados muestran que alcanzar niveles de 99.5% y 99.8% podría generar ahorros de hasta 50,496.00 USD anuales, con retornos de inversión superiores al 300% y periodos de recuperación menores a 3 meses. Estos resultados confirman que la mejora de la calidad no solo tiene beneficios operativos, sino que representa una estrategia económicamente viable con impacto directo en la rentabilidad del proceso, en el contexto actual donde la industria de energías renovables exige cadenas de suministro más sostenibles, minimizar la huella ambiental no solo responde a criterios ambientales, sino que se convierte en un factor clave para la permanencia y competitividad de la empresa en el mercado a futuro.

Palabras Clave: Manufactura esbelta, análisis de ciclo de vida, impacto ambiental, SIMAPRO, tejidos de fibra de vidrio, composites.

Abstract

This research aims to evaluate the effect of improvements implemented under the lean manufacturing philosophy, measured by the first-attempt quality index, on the Life Cycle Assessment (LCA) of machine 189 at SAERTEX Mexico, using the cradle-to-gate approach. The ReCiPe 2016 Midpoint (H) and CML-IA baseline v3.04 / EU25 methods of the SIMAPRO software were employed. To this end, inventories of inputs and outputs were conducted at each stage of the machine 189 production process (setup, production, and packaging). The average First-Attempt Quality (FTQ) for 2024 and 2025 was considered to be 97.14% and 98.82%, respectively. It was determined that the production of biaxial fabric at SAERTEX Mexico has a global warming potential of 12 kgCO₂-eq per kilogram of biaxial fiberglass fabric. This value significantly exceeds international benchmarks reported in Europe, which range approximately from 2 to 3 kgCO₂-eq per kilogram of mesh fabric.

Furthermore, the evaluation of the quality production index in the first attempt showed that its improvement from 97.14% to 98.82% generated an approximate 7% reduction in kgCO₂-eq emissions, as well as a 10% reduction in poor quality costs, equivalent to an estimated annual savings of USD 100,000. Moreover, projected scenarios show that achieving levels of 99.5% and 99.8% could generate annual savings of up to USD 50,496.00, with investment returns exceeding 300% and payback periods of less than 3 months. These results confirm that quality improvement not only has operational benefits, but also represents an economically viable strategy with a direct impact on the profitability of the process. In the current context where the renewable energy industry demands more sustainable supply chains, minimizing the environmental footprint not only responds to environmental criteria, but also becomes a key factor for the company's permanence and competitiveness in the future market.

***Keywords:* Lean Manufacturing, Life Cycle Analysis, environmental impact, SIMAPRO, fiber glass fabric, composites.**

Introducción

La industria de los materiales compuestos, en particular los tejidos de fibra de vidrio, es esencial en la fabricación de componentes para sectores estratégicos como el energético, el cual demanda materiales ligeros, duraderos y de bajo impacto ambiental. Como señalan Castro, M., y Barreto (2022), “La energía eólica se convirtió en una de las fuentes de generación de energía más limpia en el mundo, se debe evaluar los impactos que se podrían generar en el medio ambiente como una forma para implementar medidas que permitan mitigarlos en las futuras construcciones de proyectos de generación de energía eólica, considerando la idea de que hasta la fecha las energías renovables que se emplean causan un efecto mínimo en el medio ambiente”.

En el contexto de una creciente preocupación global por la sostenibilidad, las empresas deberán adoptar prácticas de manufactura que reduzcan los impactos negativos sobre el medio ambiente, como por ejemplo las emisiones de dióxido de carbono a la atmosfera, mientras mantienen altos niveles de calidad y eficiencia productiva. En este sentido, la metodología de manufactura esbelta ME ha ganado relevancia al ofrecer un enfoque sistemático para reducir desperdicios, optimizar recursos y mejorar la calidad en los procesos industriales, contribuyendo así a los objetivos de sostenibilidad (Hernández & Vizán, 2013). Y según la investigación del Dr. García, J. (2021), la relación que tiene la aplicación de las herramientas de ME con algún tipo de sustentabilidad es casi nula en el sector industrial, donde se limitan solamente a índices de tipo operativo y productivo, ignorando su impacto ambiental.

Partiendo de estas premisas, la presente investigación tiene como principal objetivo, evaluar el impacto ambiental del proceso productivo de la máquina 189, considerando variaciones en el índice de calidad la primera vez (FTQ), mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida a través de uso del software SIMAPRO, mediante los métodos ReCiPe 2016 Midpoint (H) y CML-IA baseline v3.04 / EU25, que esta regulado por las normas internacionales ISO 14040 e ISO 14044 (Carnerero, 2019).

Para lo cual, en primer lugar se realizó el inventario de consumos de un lote de producción de tejido de fibra de vidrio haciendo uso de la base de datos de Eco-Invent, para posteriormente modelarse tres escenarios diferentes; los que diferían el porcentaje de producción de calidad en el primer intento (97.14%, 98.82 y 100%), correspondientes a los valores promedio obtenidos para la producción de los años 2024, 2025 y el caso ideal respectivamente.

De los resultados, se definieron las categorías de impacto ambiental más relevantes para la industria y se compararon estos valores con los reportes obtenidos por otras empresas; para finalmente proponer un plan de trabajo que minimice los impactos ambientales generado por el producto no conforme por defectos de calidad de la máquina 189, estableciéndose un periodo de retorno y ROI para dicha inversión.

Índice

Dedicatoria.....	2
Resumen	3
Abstract.....	4
Introducción.....	5
Índice	7
Índice de tablas	11
Índice de figuras	12
Lista De Abreviaturas	13
1 Capítulo I: Generalidades	14
1.1 Antecedentes.....	14
1.2 Definición del Problema.....	24
1.3 Objetivo general y específico	25
1.3.1 Objetivo General.....	25
1.3.2 Objetivos Específicos	25
1.4 Justificación	25
1.4.1 Justificación Ambiental	26
1.4.2 Justificación Económica	26
1.4.3 Justificación Social	27
1.4.4 Justificación tecnológica.....	27
1.5 Limitaciones y delimitaciones	27
1.5.1 Limitaciones	27
1.5.2 Delimitaciones:.....	28
2 Capítulo 2: Marco Teórico.....	29
2.1 Análisis de Ciclo de Vida (ACV)	29

2.1.1	Metodología del análisis de ciclo de vida.....	29
2.1.2	Principios del ACV.....	31
2.1.3	Importancia del ACV en manufactura y gestión ambiental.....	32
2.1.4	Aplicación en la industria manufacturera.....	32
2.1.5	Métricas de sustentabilidad	33
2.2	Software SIMAPRO.....	33
2.2.1	Características del software SIMAPRO	35
2.2.2	Metodología de análisis de ciclo de vida en el software	35
2.3	Manufactura esbelta.....	38
2.3.1	Origen de la manufactura esbelta	39
2.3.2	Principios de manufactura esbelta	40
2.3.3	Herramientas clave de manufactura esbelta	41
2.3.4	Métricas de calidad (KPI's: Key Performance Indicator)	42
2.3.5	Índice de Calidad a la Primera (FTQ)	42
2.3.6	Factores que afectan el FTQ en procesos de manufactura.	42
2.3.7	Calidad a la primera vez	43
2.3.8	Relación entre calidad y eficiencia operativa	44
3	Capítulo 3: Metodología De La Investigación	45
3.1	Diseño De La Investigación	45
3.2	Tipo de Investigación	45
3.3	Población y Muestra	45
3.4	Población	45
3.4.1	Muestra	45
3.5	Desarrollo de los Objetivos Específicos	45
3.5.1	Objetivo y alcance	46

3.5.2	Límite del sistema de ACV.....	47
3.5.3	Unidad funcional (UF)	49
3.5.4	Datos y estimación	49
3.5.5	Análisis del inventario	49
3.5.6	Evaluación del impacto	50
4	Capítulo 4: Resultados Y Discusiones.....	52
4.1	Límite del sistema de ACV.....	52
4.2	Unidad funcional (UF)	52
4.3	Datos y estimación	52
4.4	Análisis del inventario	53
4.5	Evaluación del impacto	55
4.5.1	Método ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.00	55
4.5.2	Método CML-IA baseline V3.04 / EU25	59
4.6	Interpretación de resultados.....	63
4.7	Discusiones.....	66
4.7.1	Análisis Económico-Ambiental.....	66
4.7.2	Benchmarking industrial	72
4.7.3	Análisis de Factibilidad de Mejoras	72
4.7.4	Competitividad y Cumplimiento Normativo.....	75
4.7.5	Validación y limitaciones del Estudio	76
5	Recomendaciones	79
6	Conclusiones.....	81
6.1	Primer Objetivo.	81
6.2	Segundo Objetivo	81
6.3	Tercer Objetivo.	82

6.4	Cuarto Objetivo.	82
7	Bibliografía.....	83

Índice de tablas

Tabla 2.1 Métricas de sustentabilidad según la ISO 14044:2016.	33
<i>Tabla 2.2 Base de datos SIMAPRO.</i>	<i>34</i>
Tabla 3.1 Valor del Índice de calidad a la primera vez promedio para los años 2023 y 2025.	50
<i>Tabla 4.1 Inventario por etapas del proceso.</i>	<i>54</i>
Tabla 4.2 Entradas para la producción de tejido de fibra de vidrio.	55
Tabla 4.3 Evaluación de Impacto Ambiental para un índice de calidad del 100%... 56	
Tabla 4.4 Evaluación de Impacto Ambiental para un índice de calidad del 97.14%.	57
Tabla 4.5 Evaluación de Impacto Ambiental para un índice de calidad del 98.82% 58	
Tabla 4.6 Evaluación de Impacto Ambiental para un índice de calidad del 100%.. 60	
Tabla 4.7 Evaluación de Impacto Ambiental para un índice de calidad del 97.14%.	61
Tabla 4.8 Evaluación de Impacto Ambiental para un índice de calidad del 98.82%	62
Tabla 4.9 Leyenda de plan de acción.	69
Tabla 4.10 Plan de acción 2025, M189.....	70
Tabla 4.11 Plan de acción para la mejora continua de la máquina 189.	73
Tabla 4.12 Costo actual de scrap.	74
Tabla 4.13 Estimación ROI y payback.	74
Tabla 4.14 Proyección de emisiones CO ₂ eq anual.	75

Índice de figuras

Figura 1.1 Layout de la empresa SAERTEX México.....	15
Figura 1.2 Esquema de máquina Karl Mayer.	15
Figura 1.3 Esquema de máquina Karl Mayer.	16
Figura 1.4 Máquina LIBA.	17
Figura 1.5 Transporte de rollos de fibra de vidrio con grúas aéreas.	18
Figura 1.6 Producto terminado en proceso de paletizado.	18
Figura 1.7 Diagrama de flujo del proceso productivo de SAERTEX México.	19
Figura 1.8 Diagrama Ishikawa para el defecto de faltante de costura.	21
Figura 1.9 Diagrama Ishikawa para el defecto de "gaps".	22
Figura 1.10 Diagrama Ishikawa para el defecto de contaminación.	22
Figura 1.11 Diagrama Ishikawa para el defecto de ondas en el tejido.	22
Figura 1.12 Diagrama Ishikawa para el defecto de "telescoping".	23
Figura 2.1 Marco del análisis del ciclo de vida.	30
Figura 2.2 Metodología del análisis del ciclo de vida en el software.	37
Figura 2.3 Métodos de evaluación de ACV en el software SIMAPRO.	38
Figura 2.4 Herramientas de la manufactura esbelta.	41
Figura 3.1 Rollo de tejido de fibra de vidrio.	46
Figura 4.1 Limite de sistema establecido para el estudio.	52
Figura 4.2 Proceso productivo de tejido de fibra de vidrio.	53
Figura 4.3 Evaluación De Impacto Ambiental (Ic=100%).	57
Figura 4.4 Evaluación De Impacto Ambiental IC=97.14%.	58
Figura 4.5 Evaluación De Impacto Ambiental (IC=98.82%)	59
Figura 4.6 Evaluación De Impacto Ambiental (IC=100%)	61
Figura 4.7 Evaluación De Impacto Ambiental (IC:97.14%)	62
Figura 4.8 Evaluación De Impacto Ambiental (IC=98.82%)	63
Figura 4.9 Evolución del índice de Calidad a la primera vez 2023-2025.....	65
Figura 4.10 Costos de disposición de residuos vs Producción.	66
Figura 4.11 Residuos de Manejo Especial dispuestos al relleno sanitario.	68
Figura 4.12 Material no conforme generado por la M189, 2024-2025.	69

Lista De Abreviaturas

FTQ: First Time Quality / Calidad a la primera vez/Calidad en el primer intento

LCA: Life Cycle Assessment

ACV: Análisis de Ciclo de Vida

CO₂: Dióxido de carbono

NCF: Non-Crimp Fabric / Tejidos sin ondas

GWP: Global Warming Potential / Potencial de Calentamiento Global

ISO: International: Organization for Standardization / Organización Internacional de Normalización

EIA: Evaluación de Impacto Ambiental

CTU: Comparative Toxic Unit / Unidad Comparativa de Toxicidad

LCC: Life Cycle Cost / Costo del Ciclo de Vida

LM: Lean Manufacturing / Manufactura Esbelta

AMEF: Análisis de Modo y Efecto de Falla

CML: Método de ACV que evalúa impactos ambientales en categorías midpoint.

UF: Unidad Funcional

PET: Polyethylene Terephthalate/ Polietileno tereftalato

SMED: Single Minute Exchange of Die / Cambio rápido de herramienta

Capítulo I: Generalidades

1.1 Antecedentes

En 1982, Bruno Lammers y Gert Wagener fundaron SAERTEX Wagener GmbH y Co. KG en Saerbeck, Westfalia, Alemania; la idea era producir material de refuerzo en forma de tejido con puntadas, actualmente denominado tejidos planos (NCF, por sus siglas en inglés), en lugar de tejidos convencionales. Así, SAERTEX se convierte en una compañía de manufactura de tejido plano a base de fibras de carbono, vidrio y/o aramida para diferentes industrias, como la aviación, la construcción, la infraestructura, la construcción de barcos y principalmente, la energía eólica.

Desde 1996 SAERTEX empieza la expansión de la compañía hacia nuevos países, empezando en Sudáfrica, Estados Unidos, Francia, India, Portugal, China, Brasil, Turquía, y por último en México en el año 2020, estableciéndose en Ciudad Juárez, en el estado de Chihuahua.

SAERTEX México S.A. de C.V., se ubica en el ramo de industria textil de hilos de fibra e vidrio, empezó funciones operativas en el 2022, que consiste en la operación de un sistema industrial de tejido de hilos de fibras y polyester (Tejedoras Industriales), para la fabricación de Tela de Fibra de Vidrio, en dos áreas de proceso bien definidas, la primera donde se tienen cuatro líneas de producción, identificadas por el nombre de la marca de los equipos KARL MAYER y un número de asignación (186), (189),(190), (187), y tres líneas más de producción con los equipos denominados LIBA, con los siguientes números (134), (92), (131), para un total de 7 líneas de producción.

Cada línea de producción, en sí, se compone de un equipo industrial de tejido, donde el producto final es un rollo de tela de fibra de vidrio, enrollado en tubos de cartón. En las máquinas marca Karl Mayer se obtienen tejidos denominados biaxiales, por la dirección en $\pm 45^\circ$ de las fibras. En la Figura 1.1 Layout de la empresa SAERTEX México. se muestra el layout de la planta de producción:



Figura 1.1 Layout de la empresa SAERTEX México.

En la Figura 1.2 Esquema de máquina Karl Mayer, se representa un modelo digital de conjunto de una máquina de tejido de la marca Karl Mayer, que en resumen representa toda la operación de tejido y el proceso en sí.



Figura 1.2 Esquema de máquina Karl Mayer.

A continuación, se muestra el equipo real Karl Mayer #186, dentro del área de producción.



Figura 1.3 Esquema de máquina Karl Mayer.

El proceso de tejido industrial, con los equipos de marca LIBA, básicamente es el mismo principio operativo, donde una de sus grandes diferencias con el sistema Karl Mayer, es la alimentación del hilo de fibra de vidrio, el cual se hace desde un segundo piso (mezanine), donde está ubicada la zona denominada “Creel”, los cuales descienden verticalmente a la máquina de tejido LIBA. Otra diferencia significativa, es que los equipos LIBA solo tienen un sistema mecánico de entramado de hilos denominado “Carrier” que se desplaza perpendicularmente a la rotación de la banda a diferencia de los equipos Karl Mayer que tiene 3 “Carrier” haciendo un entramado más complejo.

En ambos casos se obtienen tejidos de diferentes anchos y longitudes dependiendo de las especificaciones del cliente. Figura 1.4 Máquina LIBA.



Figura 1.4 Máquina LIBA.

En concreto, toda la operación de la producción industrial la hacen los siete equipos de tejido; los procesos auxiliares se basan en operaciones de manejo y transporte de insumos y de producto terminado mediante grúas y montacargas eléctricos, contando con una amplia área de almacenamiento de racks industriales.

Además, como equipos auxiliares, con una función puramente de transporte y manipulación de insumos y producto final, el diseño tiene un sistema de 4 grúas viajeras de capacidad máxima de (2 Toneladas cada una), que corren sobre y paralelamente hacia ambas áreas de tejido (Karl Mayer y Liba), cuyo propósito es recoger, y transportar los rollos de tela de fibra de vidrio (producto terminado), a una área de recepción, empaque de plástico y fijación, en tarimas de madera, para su transporte mediante montacargas eléctricos al área de almacenamiento de producto final, ver Figura 1.5 Transporte de rollos de fibra de vidrio con grúas aéreas.



Figura 1.5 Transporte de rollos de fibra de vidrio con grúas aéreas.

Estos mismos operadores de montacargas transportan el producto final ya flejado al área de “Racks” de almacenamiento de producto terminado en tarimas de madera, con una estiba de 6 rollos de tela de fibra de vidrio cada uno, véase Figura 1.6: Producto terminado en proceso de paletizado.



Figura 1.6 Producto terminado en proceso de paletizado.

En la Figura 1.7, diagrama de flujo del proceso productivo de SAERTEX México. Se presenta el diagrama de flujo del proceso productivo de SAERTEX México.

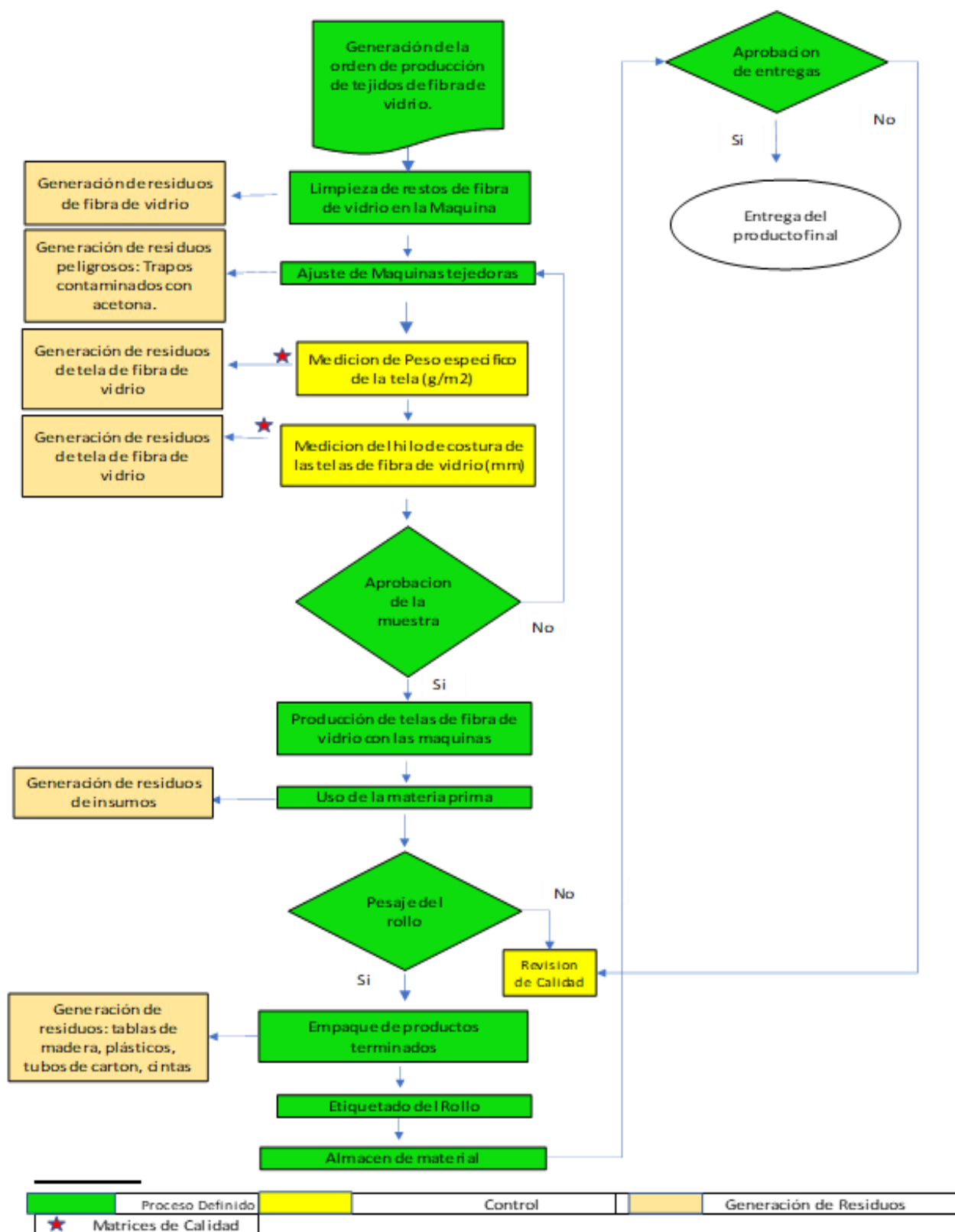


Figura 1.7 Diagrama de flujo del proceso productivo de SAERTEX México.

Con respecto a los recursos humanos, básicamente el trabajo de los técnicos operativos, es la vigilancia del proceso desde el punto de vista de su calidad, identificados defectos en los entramados, ya sea en el tejido de formación de la tela, o bien en el proceso; por lo tanto la operación en sí, no está sujeta al error humano, desde el punto de vista de proceso, pues el operador no decide las secuencias del sistema, ya que todo el conjunto se activa al iniciar operaciones, o todo el conjunto se desactiva al surgir un desperfecto, y el desacoplamiento del rollo de tela de fibra de vidrio como producto final a un carro rodante.

Es concluyente, que la operatividad industrial genera residuos especiales de hilos de fibra de vidrio, y residuos de empaque de la materia prima, pues el proceso no implica el uso de agua potable, ni el consumo de sustancias químicas líquidas, sólidas o gaseosas.

El proyecto se estableció como un desarrollo de proveeduría regional para aumentar la cadena de valor, incentivando la economía circular, para todas las industrias que utilizan materiales “composites”, en la manufactura de productos en Norte América. La tendencia es un crecimiento en la industria de las energías renovables, aeronáutica, fabricación de prótesis, astro y cosmonáutica, ingeniería naval, ingeniería civil. El principal cliente de SAERTEX México se dedica a la construcción de diferentes componentes de las palas para aerogeneradores, mediante la unión de resina epóxica y varias capas de telas de fibra de vidrio en moldes, para luego pasar por un proceso de curado en condiciones de vacío.

Como menciona P. D. A. R. Jha, (2011), el diseño de las aspas del aerogenerador obtiene sus bases teóricas de la aerodinámica y aero-elástica; por lo tanto, los materiales utilizados en su fabricación deben ser capaces de proporcionar la resistencia estructural y la rigidez necesaria en cada zona del aspa. Además de garantizar los factores de seguridad definidos en directrices y normativas de diseño como la IEC 61400-1 y requerimientos de diseño GL2010, estos procesos requieren de una exhaustiva examinación (Jha, 2011)

Por otro lado, las métricas de calidad son herramientas que permiten medir y evaluar el desempeño de los procesos productivos respecto a los estándares establecidos. Estas métricas identifican la eficacia y eficiencia en la producción, asegurando la conformidad del producto final con las especificaciones requeridas.

Algunas de las métricas más comunes incluyen el porcentaje de defectos, el nivel de satisfacción del cliente, y el índice de calidad a la primera vez (FTQ por sus siglas en inglés).

En el proceso productivo de SAERTEX México, el índice de calidad a la primera vez se define como la proporción de productos que cumplen con los requisitos establecidos desde el primer intento, sin necesidad de reprocesos ni correcciones. Este indicador mide la capacidad del proceso para entregar libres de defectos y optimiza recursos al reducir el desperdicio y el tiempo invertido en ajustes o reparaciones

La máquina 189 juega un papel crucial en la fabricación de tejidos de fibra de vidrio biaxiales, para componentes de turbinas eólicas. El desempeño de esta máquina afecta directamente la calidad final del producto y la cantidad de desperdicios generados, lo que impacta tanto en la eficiencia operativa como en el rendimiento económico.

En el análisis de desempeño de la máquina 189, se han identificado cinco defectos recurrentes que afectan tanto la calidad del producto como la cantidad de desperdicios. A continuación, se presenta una clasificación de los defectos y el análisis de posibles causas, de acuerdo con la metodología de Ishikawa:

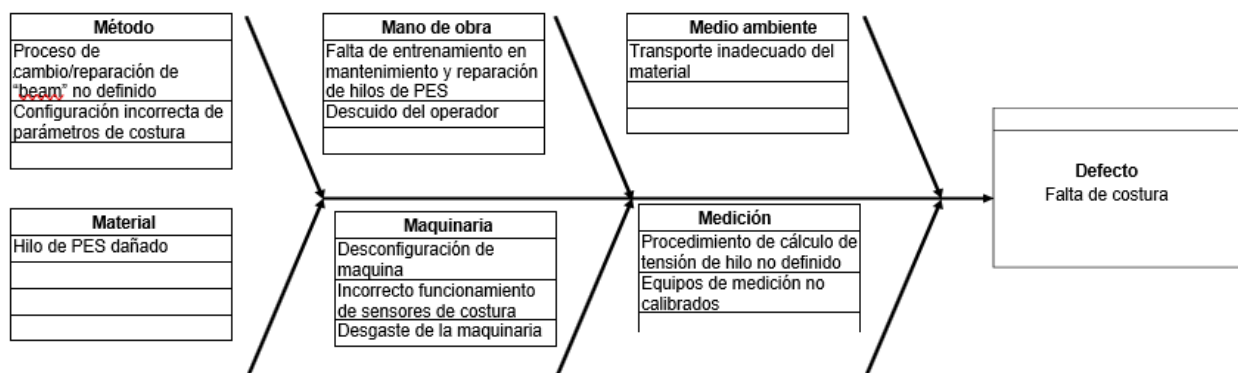


Figura 1.8 Diagrama Ishikawa para el defecto de faltante de costura.

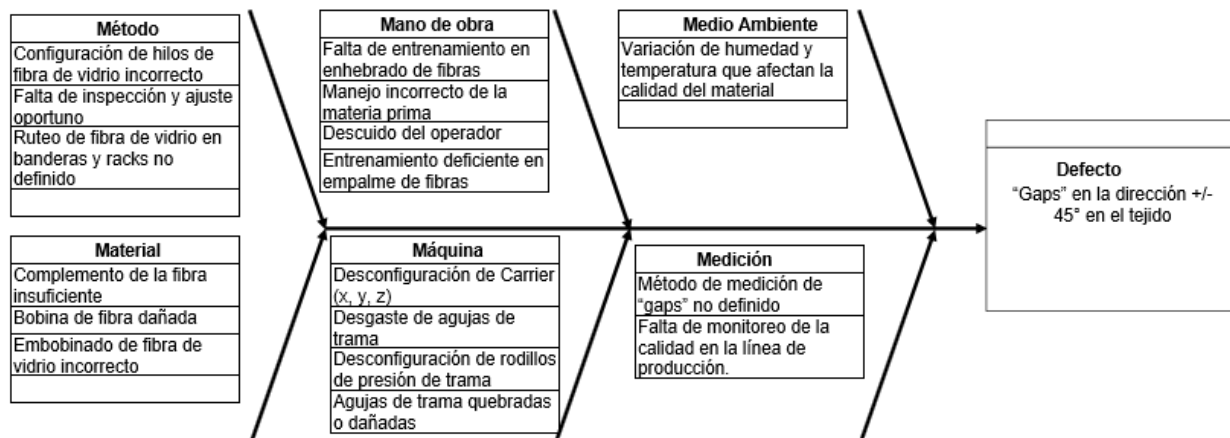


Figura 1.9 Diagrama Ishikawa para el defecto de "gaps".

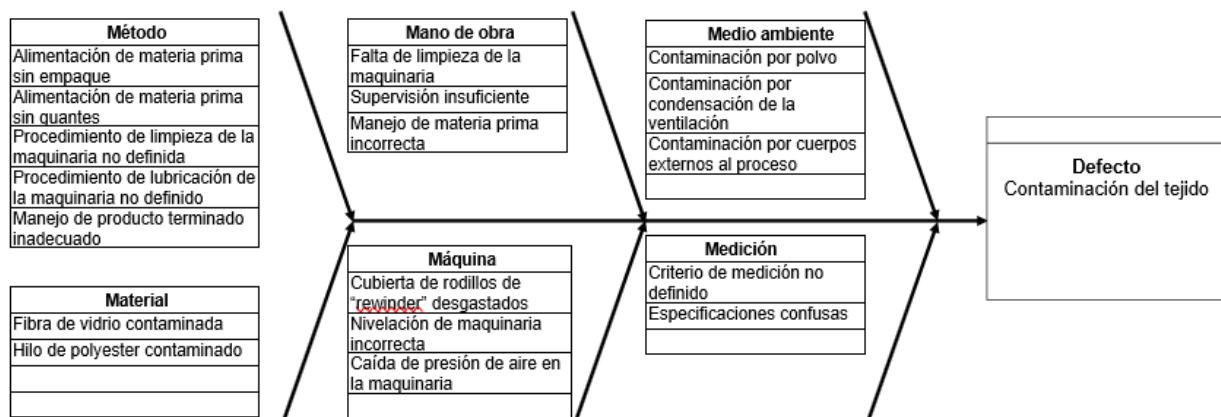


Figura 1.10 Diagrama Ishikawa para el defecto de contaminación.

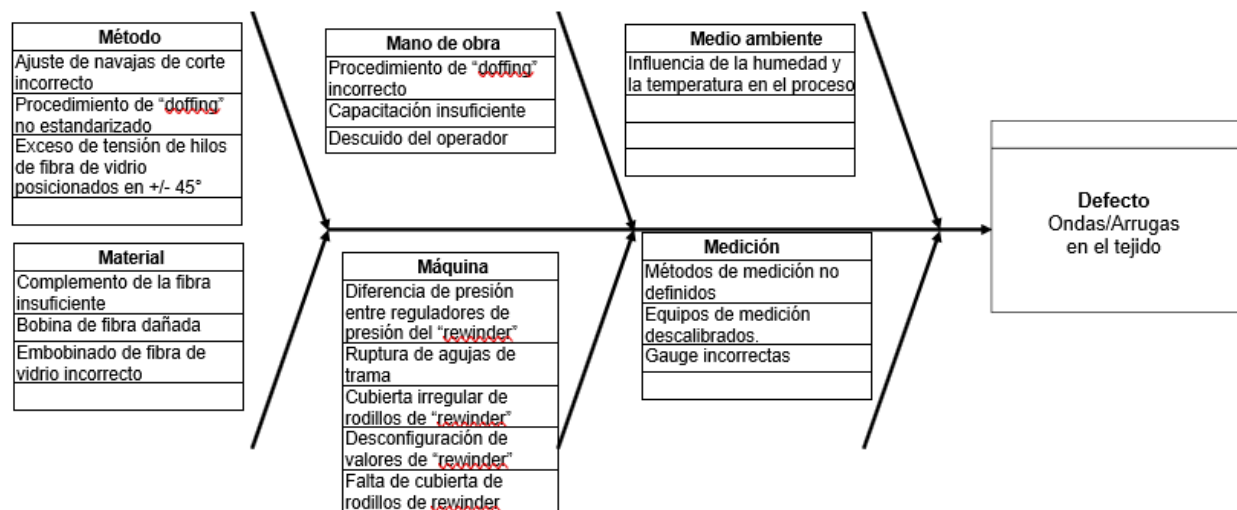


Figura 1.11 Diagrama Ishikawa para el defecto de ondas en el tejido.

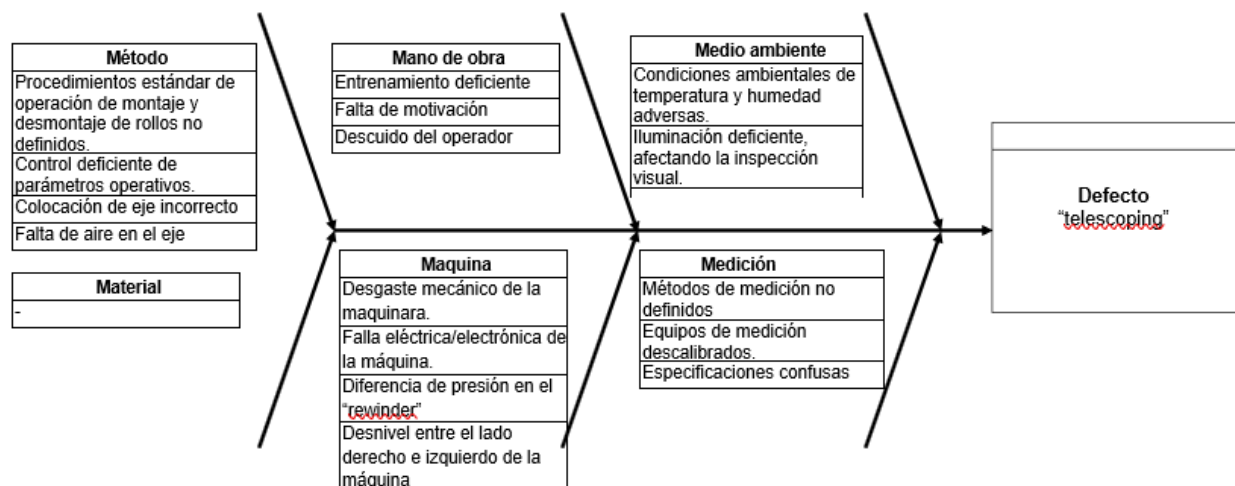


Figura 1.12 Diagrama Ishikawa para el defecto de "telescoping".

Concluyendo que los principales defectos que presenta la máquina 189 son:

- Falta de costura
- “Gaps” (Espacios en la trama)
- “Telescoping” (Diferencia de tensión en el proceso de embobinado del rollo)
- Ondas o arrugas.
- Contaminación en el tejido.

Cabe mencionar que durante el año 2024, SAERTEX México ha generado 58.28 toneladas de productos de segunda calidad, de las cuales la máquina 189 ha generado un total de 17.14 toneladas, lo cual representa el 29.40% del total.

Este material ha sido transportado y dispuesto en rellenos sanitarios por un costo de aproximado de **\$26000 MXN**, considerando \$1 por kilogramo de transporte y \$300 por tonelada de disposición final aproximadamente. La fibra de vidrio al ser un material no biodegradable, agrava los problemas de gestión de residuos y contribuye a la saturación de los vertederos.

La generación de desperdicio no solo incrementa los costos operativos, sino que también implica un desaprovechamiento de recursos y materias primas, reduciendo la rentabilidad del proceso productivo. Además, estos defectos afectan la eficiencia global del sistema y limitan la capacidad de la empresa para optimizar sus márgenes de ganancia en un mercado altamente competitivo como el de energías renovables.

Los defectos identificados y el volumen significativo de desperdicios generados por la máquina 189 reflejan áreas críticas que requieren optimización. La implementación de herramientas de manufactura esbelta y el análisis del ciclo de vida mediante SIMAPRO pueden ser fundamentales para reducir los desperdicios, mejorar la eficiencia del proceso y reducir el impacto ambiental del proceso productivo de la máquina 189.

1.2 Definición del Problema

La industria manufacturera enfrenta una creciente presión para mejorar simultáneamente su desempeño operativo y ambiental, debido a las exigencias regulatorias, las expectativas de los clientes y los compromisos internacionales en materia de sostenibilidad. En este contexto, la reducción de desperdicios y el uso eficiente de los recursos se han convertido en factores estratégicos para incrementar la competitividad de las organizaciones.

En SAERTEX México S.A. de C.V., la máquina 189 ha presentado diferentes eventos de problemas de calidad que ocasionan una elevada generación de productos no conformes, reprocesos y desperdicio de materia prima. Esta situación disminuye el indicador de calidad a la primera vez (First Time Quality, por sus siglas en inglés), lo que incrementa el consumo de materiales, energía y tiempo de producción, además de elevar los costos operativos.

Si bien la implementación de herramientas de Manufactura Esbelta ha demostrado ser efectiva para mejorar la eficiencia de los procesos y reducir desperdicios, existe poca evidencia dentro de la empresa sobre el efecto que estas mejoras operativas tienen en el desempeño ambiental del proceso productivo. En consecuencia, se desconoce en qué

medida la disminución de defectos y reprocesos contribuye a reducir los impactos ambientales asociados a la fabricación del producto.

Ante esta problemática, resulta necesario evaluar el impacto ambiental del proceso de producción de la máquina 189 antes y después de la implementación de herramientas de Manufactura Esbelta mediante un Análisis de Ciclo de Vida (ACV), utilizando el software SimaPro. Esta evaluación permitirá cuantificar los cambios en indicadores ambientales derivados de la mejora de la calidad del proceso y proporcionar información objetiva para la toma de decisiones orientadas hacia una manufactura más sostenible. Por lo anterior, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es el impacto de la mejora de la calidad del proceso productivo de la máquina 189, mediante la implementación de herramientas de Manufactura Esbelta, en la sustentabilidad ambiental de SAERTEX México S.A. de C.V., evaluado mediante un Análisis de Ciclo de Vida utilizando el software SimaPro?

1.3 Objetivo general y específico

1.3.1 Objetivo General

Evaluar el impacto ambiental del proceso productivo de la máquina 189 de SAERTEX México S.A. de C.V. antes y después de la implementación de herramientas de Manufactura Esbelta, mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) utilizando el software SimaPro.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar un inventario de ciclo de vida del proceso productivo de la máquina 189.
- Evaluar el impacto ambiental del proceso productivo mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), utilizando los métodos ReCiPe y CML del software SimaPro.
- Comparar los resultados del impacto ambiental obtenidos antes y después de la implementación de las herramientas de Manufactura Esbelta, considerando las variaciones del índice de calidad a la primera vez (FTQ).
- Proponer un plan para integrar las herramientas de manufactura esbelta en las operaciones de SAERTEX México, alineado con estándares como ISO 14040 e ISO 14044.

1.4 Justificación

La mala calidad de la máquina 189 en SAERTEX México S.A. de C.V., no solo afecta la eficiencia operativa de la empresa, sino que también tiene repercusiones significativas en

múltiples dimensiones, incluyendo el entorno ambiental, la economía de la empresa, el bienestar social y la adopción de tecnologías avanzadas. A continuación se detallan estas justificaciones:

1.4.1 Justificación Ambiental

La industria manufacturera genera un impacto ambiental significativo en términos de residuos, consumo energético y emisiones de CO₂. Al emplear el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) con SIMAPRO, se puede cuantificar el impacto ambiental en las diferentes fases de producción y evaluar los beneficios ambientales de reducir desperdicios y consumo de recursos mediante el uso de herramientas de manufactura esbelta.

El concepto de manufactura sostenible se comprende en tres niveles: producto, proceso y sistema. La interacción entre estos niveles facilita la consecución de objetivos de sostenibilidad. En el nivel de producto, el enfoque se centra en identificar los materiales que mayor impacto ambiental aportan. A nivel de proceso, la reducción de consumo energético se logra mediante tecnologías optimizadas y una planificación eficiente, mientras que un sistema de cadena de suministro integral, que abarca todas las etapas del ciclo de vida prefabricación, fabricación, uso y postpaso, conforma un sistema sostenible efectivo (Kishawy, Hegab, & Elsadig, 2018).

Implementar herramientas de manufactura esbelta junto con el ACV puede mejorar el desempeño ambiental de la máquina tejedora, reduciendo no solo el impacto ambiental sino también los costos operativos al disminuir el uso de energía y los materiales de desecho, contribuyendo a un modelo de negocio más sostenible y rentable (Wang et al., 2021).

1.4.2 Justificación Económica

La investigación busca reducir los costos asociados al desperdicio generado por la máquina 189 de SAERTEX México S.A. de C.V. En lo que va del año 2024, este equipo ha producido 10,461.00 m de material defectuoso, equivalente al 27% del total de residuos generados, con un peso aproximado de 19,614.375 kg. Estos desperdicios contribuyen significativamente a las 344.25 toneladas enviadas al relleno sanitario.

El manejo de los residuos de la máquina 189 implica costos elevados. El transporte de 19,614.375 kg genera un gasto de \$19,614.38 MXN, mientras que la disposición en relleno sanitario (a \$297.48 por tonelada) representa \$5,831.11 MXN, resultando en un costo total de \$25,445.49 MXN en lo que va del 2024, según las tarifas del 2023, del gobierno municipal de Ciudad Juárez.

La optimización del índice de calidad a la primera vez mediante la implementación de manufactura esbelta reducirá defectos y desperdicios, generando ahorros en transporte, disposición, materia prima y reprocesos. Estos resultados fortalecerán la sostenibilidad económica de la empresa, permitiendo reinvertir en mejoras tecnológicas y competitividad en el sector de energías renovables.

1.4.3 Justificación Social

Desde el ámbito social, la adopción de manufactura esbelta al disminuir el impacto ambiental, la empresa contribuye a una mayor responsabilidad social, mejorando la percepción y confianza de los clientes.

1.4.4 Justificación tecnológica

El ACV permite evaluar de forma detallada los impactos ambientales asociados a cada etapa del proceso productivo, desde la obtención de materias primas hasta la disposición final de los productos, proporcionando una visión integral que facilita la identificación de áreas clave para reducir el consumo energético y la generación de residuos (Uddin & Kumar, 2014a). Este enfoque es particularmente relevante en el contexto de la manufactura esbelta, que se centra en minimizar los desperdicios y optimizar los recursos productivos. Las tecnologías de análisis de ciclo de vida, como el software SIMAPRO, ofrecen una precisión avanzada para medir el impacto ambiental de los procesos industriales y permiten a las empresas evaluar la eficiencia de las estrategias de mejora continua (Pereira y Calado, 2019).

1.5 Limitaciones y delimitaciones

1.5.1 Limitaciones

Restricciones metodológicas: El análisis se realizará utilizando la metodología establecida en las normas ISO 14040 e ISO 14044, que se enfoca en evaluar los impactos

ambientales a través del ciclo de vida de productos, limitando el alcance al enfoque normativo de dichas directrices.

Herramientas: El estudio depende de la base de datos de Ecoinvent lo cual podría restringir la profundidad del análisis dependiendo de las bases de datos disponibles en el programa.

Disponibilidad de datos: La calidad de los resultados estará condicionada a la precisión y cantidad de datos proporcionados por la empresa, particularmente en la medición de desperdicios y consumo de recursos.

1.5.2 Delimitaciones:

El análisis se centrará exclusivamente en los impactos ambientales asociados a los defectos y desperdicios de la máquina 189 dentro de SAERTEX México, enfocándose en el impacto ambiental de la materia prima que ingresa al proceso productivo de la máquina 189, y concluyendo con el empaque del producto terminado para la venta al cliente, sin extenderse a otras áreas de la empresa o sus procesos generales, es decir un enfoque “cradle to gate”.

Indicadores ambientales: Los resultados estarán delimitados por los indicadores establecidos en la ISO, tales como el potencial de calentamiento global (GWP por sus siglas en inglés) y el consumo energético acumulado, entre otros.

Temporalidad: La investigación considera datos generados durante el año 2024 y 2025 para analizar la generación de desperdicios y los costos asociados a su manejo.

Geografía: Se delimitará a los procesos realizados en las instalaciones de SAERTEX México, excluyendo impactos fuera de esta ubicación.

Capítulo 2: Marco Teórico

2.1 Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

La norma ISO 14040:2006, establece que “el ACV es 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, e interpretando los resultados de las fases de inventario e impacto en relación con los objetivos del estudio”.

Las normas que regulan el análisis de ciclo de vida son las siguientes:

ISO 14040:2006: Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Principios y marco. Esta norma establece el marco general del ACV, sus principios y estructura.

ISO 14044:2006: Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Requisitos y directrices. Complementa a la ISO 14040, proporcionando los requisitos específicos para realizar un estudio de ACV.

2.1.1 Metodología del análisis de ciclo de vida

De acuerdo con la ISO 14040, el ACV consta de cuatro fases: definición de los objetivos y el alcance, análisis del inventario, evaluación del impacto e interpretación de resultados.

La segunda y tercera fase se consideran activas o dinámicas, en las que se recopilan y evalúan los datos; la primera y cuarta fase pueden considerarse como fases estáticas.

A partir de los resultados de cada fase pueden reconsiderarse las hipótesis de la fase anterior y reconducir el enfoque a lo que ofrezca el nuevo conocimiento adquirido.

El ACV es, por lo tanto, un proceso que se retroalimenta y se enriquece a medida que se realiza. A continuación, se detalla cada una de las fases que implica un ACV. Ver Figura 2.1 Marco del análisis del ciclo de vida.

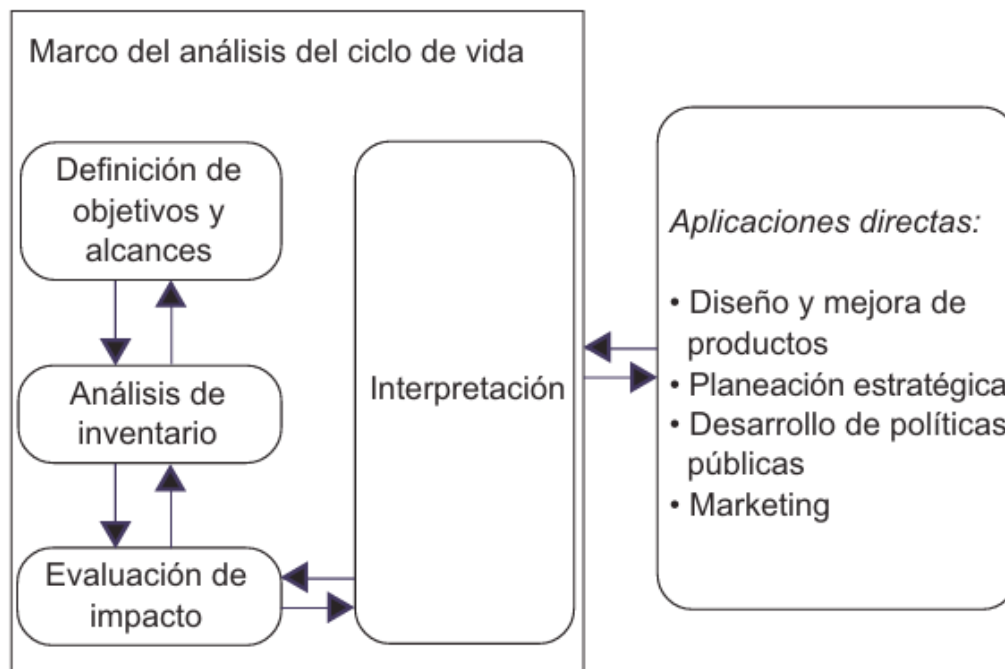


Figura 2.1 Marco del análisis del ciclo de vida.

2.1.1.1 Definición de objetivo y alcance

Según la **ISO 14044:2006** (Sección 4.2.1), esta fase establece la finalidad del estudio, el público al que va dirigido y cómo se utilizarán los resultados. También define los límites del sistema, la unidad funcional y las hipótesis asumidas.

“La definición del objetivo debe ser clara, coherente con el alcance del estudio, y reflejar el contexto de la toma de decisiones en el que se aplicarán los resultados” (ISO 14044:2006).

2.1.1.2 Análisis del inventario del ciclo de vida

Consiste en la recopilación cuantitativa de las entradas (por ejemplo, materias primas, energía) y salidas (emisiones, residuos) del sistema evaluado.

“El análisis del inventario incluye los datos relacionados con cada proceso dentro del sistema de producto, y debe considerar aspectos como la asignación, calidad de datos y validación” (ISO 14044:2006, Sección 4.3).

2.1.1.3 Evaluación del impacto del ciclo de vida

En esta fase se traducen los datos del inventario en impactos ambientales potenciales. La ISO 14044 establece que debe incluir tres elementos obligatorios:

Selección de categorías de impacto, indicadores y modelos de caracterización.

Asignación de los resultados del inventario a las categorías de impacto.

Cálculo de indicadores para cada categoría.

Categorías comunes incluyen: cambio climático, agotamiento del ozono, toxicidad humana, eutrofización, entre otros.

2.1.1.4 Interpretación

La última fase consiste en la interpretación sistemática de los resultados obtenidos en el LCI y el LCIA. Debe ser transparente, coherente con los objetivos del estudio y proporcionar conclusiones, limitaciones y recomendaciones.

“La interpretación debe incluir la identificación de asuntos significativos, una verificación de integridad, sensibilidad y coherencia, así como conclusiones y recomendaciones” (ISO 14044:2006, Sección 4.5).

2.1.2 Principios del ACV

La ISO 14040 establece los siguientes principios fundamentales:

Perspectiva de ciclo de vida completa: Enfoque basado en sistemas, el ACV considera el producto como parte de un sistema complejo, que puede incluir múltiples entradas, y salidas.

Transparencia: se deben documentar claramente las limitaciones y métodos.

Relevancia: los métodos y datos utilizados deben ser apropiados para los objetivos del estudio.

Coherencia científica: los métodos deben estar basados en principios científicos y ser aplicados de forma sistemática.

Documentación completa

Estos principios garantizan la calidad, trazabilidad y utilidad de los resultados obtenidos mediante el ACV. La norma ISO 14044:2006, especifica que deben cumplirse estos principios en cada fase del ACV.

2.1.3 Importancia del ACV en manufactura y gestión ambiental

En el marco de la gestión ambiental internacional se han desarrollado diferentes métodos conceptuales para la industria con el objetivo de alcanzar el desarrollo sostenible, se destacan: ciclo de vida, ecodiseño, tecnología limpia, ecología industrial y gestión de la calidad ambiental total.

Estas herramientas deben tener un procedimiento de uso sistemático y de ser posible informativo , y permiten obtener información cuantificable para alcanzar dicho objetivo. (Fullana y Puig, 1997).

La herramienta del ACV ofrece ventajas significativas en este aspecto; las principales ventajas incluyen: la evaluación a lo largo de todo el ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final del producto terminado, esto permite la identificación de puntos críticos, proporcionando métricas objetivas y medibles, a través de su proceso estandarizado por las normas internacionales ISO 14040/14044 de brindar soporte para tomar las decisiones que se relacionan con productos o servicios(Romero Rodríguez, 2003).

2.1.4 Aplicación en la industria manufacturera

De acuerdo con la ISO 14044, en la industria manufacturera el ACV se ha convertido en una herramienta clave para aquellas empresas que buscan cumplir criterios de sostenibilidad y reducir su huella ambiental, ya que este puede aplicarse para el diseño de productos más sostenibles, mejora de procesos productivos, comparación entre tecnologías y la evaluación de estrategias de economía circular; en cada etapa productiva la aplicación del ACV en la industria manufacturera, requiere la colaboración entre áreas de calidad ingeniería, compras y medio ambiente; asegurando así que las mejoras identificadas se integren en el diseño y la operación de los procesos. (Secretaria Central de ISO, 2006)

2.1.5 Métricas de sustentabilidad

Según la ISO 14044:2006, las métricas de sustentabilidad se agrupan en categorías de impacto, que permiten interpretar los efectos potenciales sobre el medio ambiente.

A continuación, se presentan las métricas más comunes en la Tabla 2.1 Métricas de sustentabilidad según la ISO 14044:2016.

Tabla 2.1 Métricas de sustentabilidad según la ISO 14044:2016.

Categoría de impacto	Unidad de medida	Indicador común
Cambio climático	kg CO ₂ eq	Huella de carbono
Consumo de agua	m ³ de agua consumida	Huella Hídrica
Eutrofización	kg PO ₄ ³⁻ eq	Afectación a cuerpos de aguas
Ecotoxicidad	CTUe (Comparative Toxic Unit)	Toxicidad para ecosistemas
Agotamiento de recursos fósiles	MJ o kg de petróleo eq.	Consumo energético no renovable
Formación de ozono troposférico	kg C ₂ H ₄ equivalente	Formación de smog

Extraído de: (Secretaría Central de ISO, 2006)

Las métricas permiten no solo comparar escenarios, si no también, establecer indicadores clave de desempeño ambiental y establecer planes de mejora.

2.2 Software SIMAPRO

Existe una variedad de programas informáticos para llevar a cabo la evaluación de los impactos ambientales en la metodología de análisis de ciclo de vida de una actividad o proceso. SIMAPRO es un software de origen holandés que permite realizar el ACV completo con múltiples métodos de evaluación, y es una de las herramientas de software más utilizadas en Latinoamérica para el análisis de ciclo de vida de acuerdo con Gonzales (2018), el cual permite realizar estudios de:

- Huella de carbono
- Huella hídrica

- Declaración ambiental del producto
- Huella ambiental
- Ecodiseño, etc.

SIMAPRO incorpora diferentes bases de datos como Ecoinvent, ILCD, Agri footprint, etc. Además permite utilizar las metodologías de evaluación de impacto más importantes y actualizadas, como: ILCD 2011 Midpoint+, CML – IA baseline, ReCiPe 2016, IPCC 2013 y Traci 2.1. Con esta herramienta se facilita el análisis y la representación gráfica de ciclos de vida complejos, de un modo sistemático y transparente.

En SIMAPRO se presenta una descripción de las bases de datos almacenadas en SIMAPRO por sectores productivos:

Tabla 2.2 Base de datos SIMAPRO.

Energía	Carbón mineral
	Aceites
	Gas natural
	Energía nuclear
	Energía hidroeléctrica
	Energía eólica
	Energía fotovoltaica
	Energía calórica
	Suministro de electricidad y mezclas
	Sistemas CHP a pequeña escala
Materiales	Biocombustibles
	Materiales para construcción
	Metales
	Plásticos
Materias primas renovables	Papel y cartón
	Madera
	Madera tropical

	Fibras renovables
Químicos	Químicos básicos
	Solventes petroquímicos
	Detergentes
Transporte	Servicios de transporte
Gestión de residuos	Tratamiento de residuos
Agricultura	Productos y procesos de agricultura
Electrónica	Productos y procesos de electrónica
Ingeniería Mecánica	Procesamiento de metales y aire comprimido

Extraído de (Afanador, 2015)

2.2.1 Características del software SIMAPRO

A continuación se presenta las características del software de acuerdo con (Gonzales Salas, 2018):

- Cuenta con protocolos disponibles para la realización guiada de ACVs.
- Permite modificar en cualquier momento de todos los parámetros del ciclo de vida del producto.
- Permite análisis tipo: LCA: Life Cycle Assessment y LCC: Life Cycle Cost
- Posibilita la redacción de informes de acuerdo con la normativa ISO de ACV.
- Posibilidad de análisis de incertidumbre de los datos, escenarios de fin de vida, análisis de sensibilidad y Monte Carlo.
- Permite exportar la información tanto en formato Ecospold y en Excel

2.2.2 Metodología de análisis de ciclo de vida en el software

En la Figura 2.2 Metodología del análisis del ciclo de vida en el software. se presenta la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV) implementada en el software SIMAPRO, mostrando las principales actividades que comprenden el estudio. Se incluyen la definición de los límites del sistema, que establece el alcance del análisis y las fronteras del proceso considerado; la recopilación de datos, que permite reunir la información sobre entradas y salidas del sistema; el inventario de categorías, donde se clasifican los diferentes flujos de

materia y energía; la cuantificación de las emisiones, mediante el cálculo de los impactos ambientales generados en cada etapa del proceso; el inventario de gases de efecto invernadero (GEI), que identifica y cuantifica las emisiones de estos gases; y las actividades de mitigación, orientadas a proponer acciones para reducir los impactos ambientales detectados. Esta metodología permite un análisis sistemático y detallado de los efectos ambientales del proceso productivo.

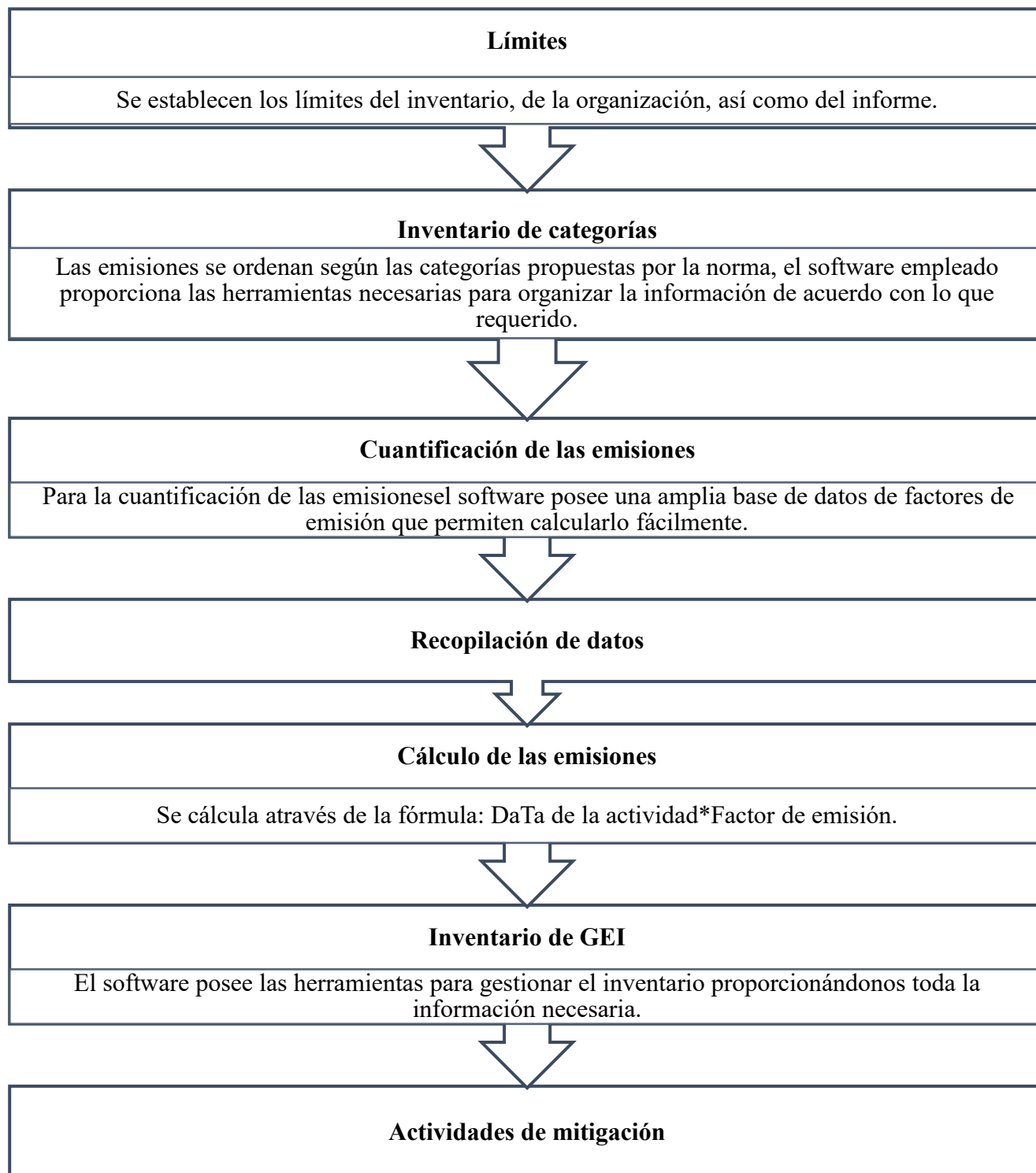


Figura 2.2 Metodología del análisis del ciclo de vida en el software.

Extraído de: (Secretaría Central de ISO, 2006)

Existen cuatro métodos de evaluación para los ACV en SIMAPRO; europeos, norteamericanos, de única categoría y de huella hídrica. véase Figura 2.3 Métodos de evaluación de ACV en el software SIMAPRO.

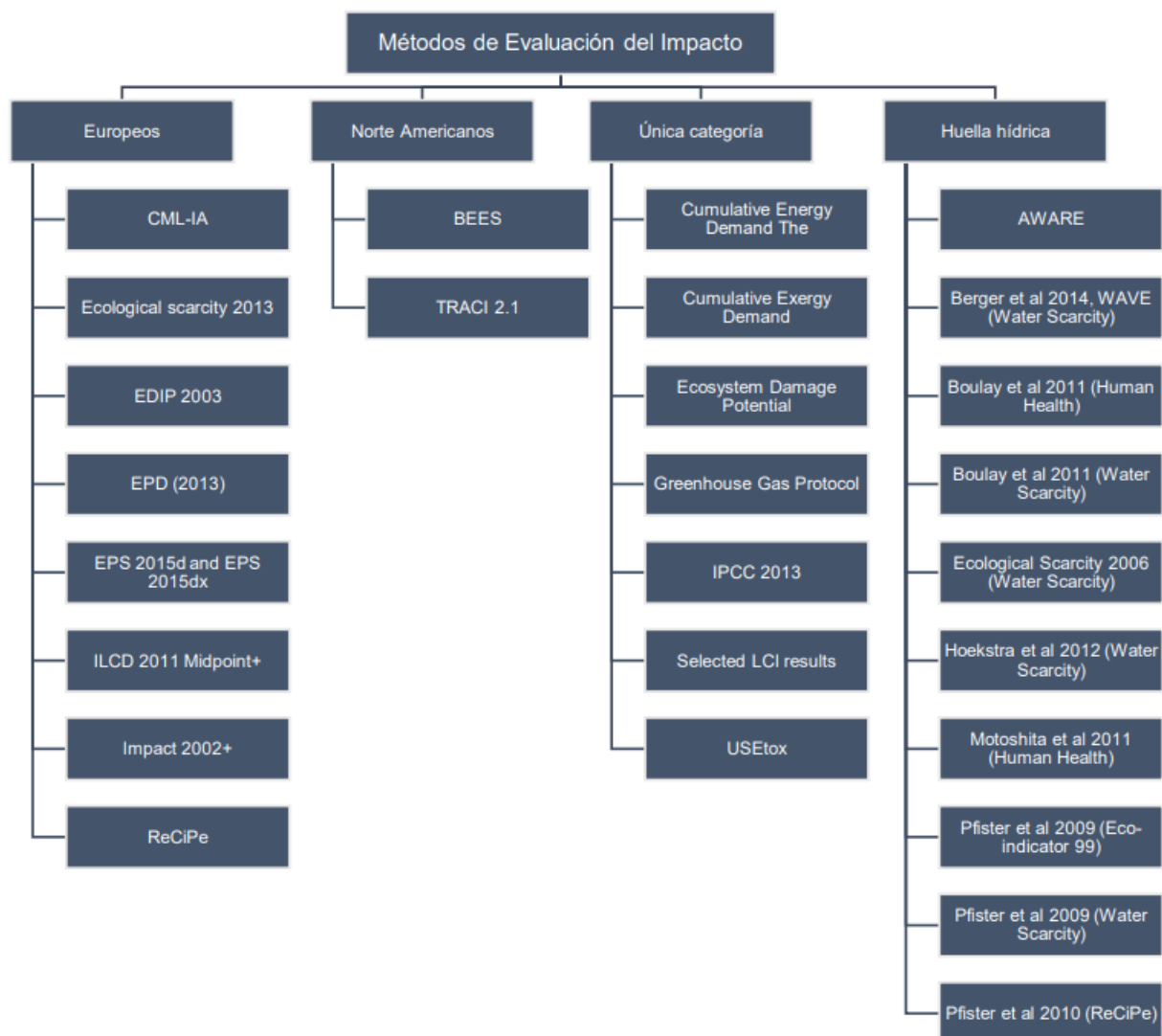


Figura 2.3 Métodos de evaluación de ACV en el software SIMAPRO.

2.3 Manufactura esbelta

La manufactura esbelta, también conocida como “lean manufacturing”, es una filosofía de gestión que se originó en el Sistema de Producción de Toyota. Su objetivo principal es eliminar el desperdicio y maximizar el valor para el cliente mediante la mejora continua y la optimización de los procesos de producción (Gupta y Jain, 2013).

2.3.1 Origen de la manufactura esbelta

La manufactura esbelta es una filosofía de gestión que busca mejorar la eficiencia y productividad mediante la eliminación de desperdicios, considerándose como desperdicios, aquellas que no resultan en un cambio o transformación del producto, que el cliente no está dispuesto a pagar por ellas y la optimización de procesos. Esta metodología se ha implementado en diversas industrias para mejorar la calidad y reducir costos, siendo un enfoque clave para la competitividad empresarial (Achibat et al., 2023).

La manufactura esbelta tiene sus raíces en el sistema de producción de Toyota, desarrollado en Japón después de la Segunda Guerra Mundial. Este sistema se centró en la reducción de desperdicios y la mejora continua, lo que llevó a la creación de herramientas y técnicas como el Just in Time y el Kanban (Salazar y Alejandro, 2010). Con el tiempo, estas prácticas se han adaptado y adoptado en todo el mundo, convirtiéndose en un estándar en la gestión de operaciones.

La implementación de la manufactura esbelta en las empresas suele comenzar con herramientas básicas como las 5S, que ayudan a organizar y mantener el orden en el lugar de trabajo. Otras técnicas comunes incluyen el Análisis Modal de Efectos y Fallos (AMEF) y el Poka Yoke, que se utilizan para identificar y prevenir errores en los procesos. Estas herramientas son fundamentales para las empresas que se encuentran en las etapas iniciales de la adopción de la manufactura esbelta (Ontiveros et al., 2018).

En la actualidad, la manufactura esbelta se aplica en una variedad de sectores, incluyendo la industria alimentaria, donde se ha demostrado que mejora la eficiencia de los procesos de producción y la productividad. Un análisis sistemático de la literatura entre 2015 y 2019 muestra que un gran porcentaje de investigaciones sobre manufactura esbelta proviene de países asiáticos, lo que refleja su continua relevancia y aplicación en la mejora de procesos industriales (Cuggia-Jiménez et al., 2020).

A pesar de sus beneficios, la implementación de la manufactura esbelta puede enfrentar desafíos, como la resistencia al cambio organizacional y la necesidad de una capacitación adecuada para el personal. Sin embargo, con un enfoque estructurado y un compromiso con la mejora continua, las empresas pueden superar estos obstáculos y lograr una mayor eficiencia operativa (Salazar y Alejandro, 2010).

El futuro de la manufactura esbelta parece prometedor, con un enfoque creciente en la integración de tecnologías avanzadas para potenciar aún más sus principios fundamentales.

2.3.2 Principios de manufactura esbelta

- **Eliminación de Desperdicios:** La manufactura esbelta se enfoca en identificar y eliminar desperdicios en las operaciones de la empresa, lo que incluye defectos, exceso de producción, tiempos de espera, transporte innecesario, inventario excesivo, movimientos innecesarios y sobre procesamiento (Deshmukh et al., 2017; Hodge et al., 2011).
- **Mejora Continua (Kaizen):** Implica la participación de los empleados en la mejora continua de los estándares y procesos, promoviendo un ambiente de trabajo donde se busca constantemente la eficiencia y la calidad (Holloway y Hall, 1997).
- **Producción Justo a Tiempo (JIT):** Este principio busca reducir el inventario y los tiempos de espera mediante la producción de bienes solo cuando son necesarios, lo que ayuda a exponer y eliminar desperdicios ocultos (Botti et al., 2017).
- **Calidad en el Origen:** Se enfoca en eliminar defectos desde el inicio del proceso de producción, asegurando que los problemas se detecten y corrijan lo antes posible (Botti et al., 2017).
- **Gestión Visual:** Utiliza técnicas visuales para identificar desviaciones de los estándares, facilitando la detección de problemas y la toma de decisiones rápidas (Holloway y Hall, 1997).
- **Enfoque Holístico:** La manufactura esbelta debe ser adoptada como una estrategia empresarial integral, no solo como una actividad aislada en las operaciones, integrando prácticas esbeltas en todas las funciones del negocio (Fullerton et al., 2014).

Al adoptar estos principios, las empresas pueden mejorar su eficiencia operativa, reducir costos y aumentar la satisfacción del cliente.

2.3.3 Herramientas clave de manufactura esbelta

Dentro del listado de herramientas clave de manufactura esbelta, se incluyen JIT (Just in time), Kaizen, TPM, VSM, 5S, Kanban, SMED, y diseño de planta, las cuales impactan en la reducción de desperdicios, el rendimiento operativo y la mejora de la productividad, desde un enfoque sistemático. La clasificación de estas herramientas puede permitir a las organizaciones a vincular sus problemas de desperdicios con las herramientas adecuadas para su eliminación.

A continuación se presenta el esquema de la casa de producción de Toyota, que representa estas herramientas como pilares para la manufactura esbelta.

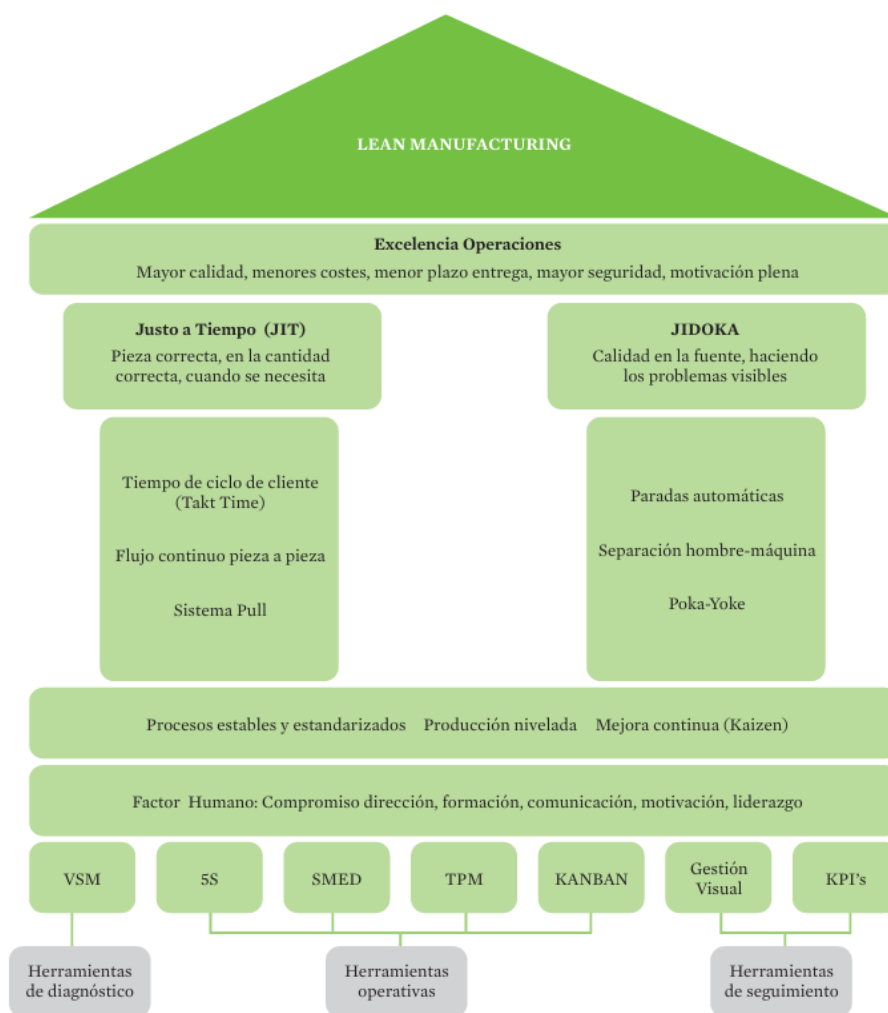


Figura 2.4 Herramientas de la manufactura esbelta.

2.3.4 Métricas de calidad (KPI's: Key Performance Indicator)

Se refieren a herramientas para el control y mejora de procesos, expresan de forma específica el desempeño en términos de eficacia, eficiencia y rapidez de un proceso. Por tanto, sirven para la toma de decisiones y acciones cuando se ven desviaciones diferentes del nivel deseado.

En la práctica, se suelen cometer diferentes errores al hacer uso de KPI's, como por ejemplo: la recolección de indicadores de dudosa utilidad, lista larga de indicadores, toma de datos no realistas, etc.; los cuales pueden ser evitados con una visión con enfoque en los procesos, y no en los departamentos de la compañía.

2.3.5 Índice de Calidad a la Primera (FTQ)

Este índice se refiere a la obtención de productos de primera calidad, en el primer intento. Midiendo en porcentajes la cantidad de productos o servicios que se realizaron de manera correcta, sin retrabajos, ajustes, correcciones, después del inicio de la producción.

Este índice toma una importancia crucial para la reducción de costos e incremento de la eficiencia, permitiendo mejorar la calidad del producto mediante la disminución de costos y residuos; e incrementar la eficiencia de la producción.

El índice de calidad a la primera vez se calcula de la siguiente manera:

$$FTQ = \frac{\text{Producción de primera calidad}}{\text{Producción total}} * 100\%$$

2.3.6 Factores que afectan el FTQ en procesos de manufactura.

De acuerdo con (Balderrabano Briones y Torres, 2018) se pueden considerar como factores que afectan el valor del FTQ, los siguientes:

- Diseño del producto: Un diseño robusto reduce la complejidad de la manufactura, disminuyendo así la posibilidad de defectos. Es decir, la implementación de principios de calidad desde la etapa de diseño es fundamental para garantizar la calidad del producto final

- Selección y gestión de proveedores: la calidad de los materiales impacta directamente en el índice de calidad a la primera vez. Factores como el involucramiento y la flexibilidad de los proveedores son cruciales.
- Capacitación y competencia del personal: la habilidad del personal operativo influye en la precisión y consistencia de la producción. Una formación adecuada, reduce errores.
- Mantenimiento de equipos: la confiabilidad de la maquinaria y equipos es esencial para evitar fallas inesperadas, y tener operaciones estables.
- Ambiente o entorno de trabajo: factores como la iluminación, ruido, vibraciones pueden influir en la calidad de la producción.

En conclusión, según el autor, la adaptación y optimización de estos factores son fundamentales para mejorar el valor del índice. Una estrategia integral permitirá una producción más eficiente y productos de mayor calidad.

2.3.7 Calidad a la primera vez

«Hacerlo bien a la primera», basado en el concepto de calidad sin coste y con cero defectos de Crosby, ayuda a los directivos a obtener beneficios de gestión de la calidad total evitando errores y ejecutando correctamente los procedimientos y las tareas a la primera, se trata de una variable aleatoria que tiene el rango (0, 1).

El FTQ debe identificar los procesos esenciales, mejorar la formación y el entrenamiento del personal, identificar y eliminar los problemas de calidad, establecer normas y fomentar la medición y el análisis. Sin embargo, estas normas no pueden garantizar la calidad.

El índice de FTQ hace hincapié en la corrección de los procesos de producción e identifica los errores humanos para proponer mejoras.

Este índice al mismo tiempo que permite reducir los residuos permite reducir los riesgos de sostenibilidad a las empresas. Los resultados demuestran que los programas de gestión de la calidad aumentan la aplicación de la FTQ y que las actividades de gestión de la calidad incrementan significativamente los beneficios medioambientales de la empresa.

Con un programa de gestión de la calidad y el control, la gestión de la calidad ayuda a desarrollar productos y procesos que se ejecutan correctamente la primera vez, con el consiguiente desperdicio de materias primas y energía y la consecución de los objetivos medioambientales de la empresa.

En conclusión, mediante el uso de estas herramientas de la manufactura esbelta combinadas, se pueden obtener resultados positivos. Sin embargo, es importante concentrar sus recursos y esfuerzos en generar productos de calidad y bajo coste, tratar de reducir los residuos en la medida de lo posible para aumentar los beneficios medioambientales y convertirse en líderes en este ámbito. (Márquez Figueroa et al., 2024)

2.3.8 Relación entre calidad y eficiencia operativa

La calidad y la eficiencia operativa están relacionadas estrechamente, ya que se centran en la búsqueda de la optimización de recursos para la satisfacción de las necesidades del cliente.

Desde la perspectiva de la gestión de calidad, mejorar la calidad permite reducir errores y desperdicios, lo cual repercute directamente en la eficiencia operativa, al impactar en los tiempos de ciclo, el aprovechamiento de los materiales y la satisfacción del cliente (Heizer et al., 2009).

3 Capítulo 3: Metodología De La Investigación

3.1 Diseño De La Investigación

El diseño del estudio es experimental, transversal y documental, ya que no se manipulan variables del proceso y se analiza la información ya existente en un momento - específico de acuerdo con Supo & Cavero (2014).

3.2 Tipo de Investigación

El tipo de estudio será aplicado experimental puesto que se busca mejorar la calidad de la máquina 189 y reducir el impacto ambiental de la empresa SAERTEX México S.A. de C.V. mediante el análisis del ciclo de vida con el software SIMAPRO (Supo & Cavero, 2014).

3.3 Población y Muestra

3.4 Población

Como define López (2004), “una población es el conjunto de personas y objetos de los que se desea investigar” (pp. 69-74).

Por ello, en la presente investigación se considera como población la empresa SAERTEX México S.A. de C.V.; ya que se busca estimar el impacto ambiental de una de sus máquinas de la línea de producción de “Karl Mayer”.

3.4.1 Muestra

La muestra para esta investigación será de tipo no probabilístico, ya que se evaluará el impacto ambiental mediante el análisis de ciclo de vida antes y después de la implementación de herramientas de manufactura esbelta de la máquina 189, por ser la máquina que mayor producto no conforme ha generado durante el año 2024, de las 7 máquinas tejedoras con las que cuenta SAERTEX México S.A. de C.V.

3.5 Desarrollo de los Objetivos Específicos

Como se detalló en el capítulo 2 de la presente investigación, de acuerdo con la ISO 14040, el ACV consta de cuatro fases: objetivo y alcance, análisis de inventario, evaluación de impacto e interpretación del resultado, las cuales se describen a continuación.

3.5.1 Objetivo y alcance

Este estudio se considera un tipo de tejido de fibra de vidrio que se produce en la máquina 189, la cual realiza la transformación de bobinas de fibra de vidrio a tejidos de fibra de vidrio, para la estimación de la energía incorporada en el ciclo de vida, las emisiones y el impacto ambiental.

El tejido de fibra de vidrio consta de un entramado de fibras de vidrio esta formada por 4 capas de fibra de vidrio, las que colocando en un plano XY, se encuentran en dirección 0° , $\pm 45^\circ$ y 90° , por lo que se denomina biaxial, por la dirección de su trama: las cuales se encuentran entramado por hilo de poliéster.

Tiene una longitud es de 138 m, 2.54 m de ancho, y pesa alrededor de 290 kg, el cual se enrolla en tubos de cartón cilíndricos.

Ver Figura 3.1 Rollo de tejido de fibra de vidrio.

Especificaciones del tejido biaxial de fibra de vidrio.

- Ancho: 2.54 m
- Longitud: 138 m
- Peso: 290 kg
- Peso areal nominal: 832 g/m^2
- Estructura textil: tejido biaxial



Figura 3.1 Rollo de tejido de fibra de vidrio.

3.5.2 Límite del sistema de ACV

El límite del sistema ACV para este estudio es *cradle-to-gate* (de la cuna a la puerta); es decir, se toma en cuenta únicamente las entradas/salidas del proceso de tejido, considerando el impacto ambiental desde la extracción de la materia prima a la máquina hasta su salida como producto terminado en rollo de tejido de fibra de vidrio; ya que se tiene como objetivo identificar y cuantificar las cargas ambientales del proceso de la máquina #189, identificando y cuantificando el uso de materia energía y las emisiones al entorno generado por la producción del tejido de fibra de vidrio biaxial, de manera que se pueda determinar estrategias para la reducción de los mismos.

El límite del sistema incluye las etapas consideradas para el estudio de ACV, las cuales se describen de la siguiente manera:

3.5.2.1 Etapa 1: Configuración de la máquina

La etapa de configuración de la máquina comprende todas las actividades necesarias para preparar la máquina 189 antes de iniciar la producción en serie de tejido de fibra de vidrio. Esto incluye la alimentación de la materia prima (bobinas de fibra de vidrio e hilos de poliéster), limpieza de la máquina, el ajuste del núcleo de cartón en el enrollador de la máquina, lubricación de partes móviles y ajuste de parámetros.

El objetivo de esta etapa es asegurar que la máquina esté totalmente lista para la operación continua, minimizando fallas y desperdicios durante la producción. En términos de la manufactura esbelta, esta etapa se asocia con SMED y preparación de máquina, enfocándose en reducir tiempos de preparación y optimizar el flujo de valor agregado.

En este punto, cabe recalcar que las cajas de cartón provenientes de la materia prima se segregan y son dispuestos con una empresa autorizada para su reciclaje, con el objetivo de minimizar el impacto ambiental negativo de la empresa. Así mismo, previo acuerdo entre proveedor-cliente, los tubos de cartón con producto terminado que se envían al cliente se retornan a la planta, para su reúso en nuevo producto terminado, tomando ventaja de la cercanía que existe entre las dos plantas (proveedor y cliente), este procedimiento es viable.

3.5.2.2 Etapa 2: producción

La etapa de producción corresponde al proceso principal en el que la materia prima (fibra de vidrio) se transforma en tejido de fibra de vidrio mediante la operación de la máquina 189. Durante esta etapa, la máquina realiza las funciones de distribución de hilos de fibra de vidrio, consolidación y formación de la trama del tejido, siguiendo los parámetros previamente configurados en la etapa de configuración de la máquina.

Se incluyen todas las actividades que agregan valor al producto, tales como el movimiento y control del material dentro de la máquina, y la supervisión de calidad en línea para detectar defectos o inconsistencias en tiempo real. Esta etapa también considera los consumos de energía eléctrica, insumos auxiliares (como el cambio de agujas por desgaste), generación de residuos (residuos de borra de fibra de vidrio, residuos por defectos de calidad y residuos por pruebas de calidad), los cuales serán incluidos en el ACV para evaluar el impacto ambiental asociado a la transformación de la fibra de vidrio en tejido.

En términos de manufactura esbelta, esta etapa representa el flujo de valor agregado del proceso, donde se produce efectivamente el producto final y se busca minimizar desperdicios (muda) mediante controles en línea y operación estandarizada.

3.5.2.3 Etapa 3: Almacenamiento del producto terminado

La etapa de empaque del producto terminado comprende todas las actividades necesarias para preparar el tejido de fibra de vidrio para su almacenamiento interno o envío, asegurando que llegue en condiciones óptimas al siguiente proceso o al cliente. Esto incluye el corte final de rollos, colocación de etiquetas, empaque y acomodo en tarimas, para su almacenamiento temporal.

En términos de manufactura esbelta, esta etapa representa un proceso de valor agregado final, donde se busca minimizar desperdicios, optimizar el espacio y reducir manipulación innecesaria del producto.

Se consideran los consumos de materiales de empaque (plásticos, cartón, cintas y tarimas), energía de manipulación y los residuos generados durante el embalaje, ya que todos estos factores contribuyen al impacto ambiental total del proceso de producción.

En este punto, cabe recalcar que las láminas de cartón y tarimas que se utilizan para el empaque del producto terminado provienen de las tarimas de materia prima, con el fin de minimizar la cantidad de desperdicios de la empresa.

3.5.3 Unidad funcional (UF)

De acuerdo con la metodología de ACV en la industria de los materiales compuestos, la UF debe definirse en términos de la cantidad de material efectivamente consumido en el producto final (Uddin y Kumar, 2014a).

3.5.4 Datos y estimación

Los datos necesarios para la estimación de la energía incorporada al ciclo de vida, las emisiones y los impactos ambientales del tejido de fibra de vidrio se recopilieron mediante el análisis, verificación de datos técnicos, revisión de ordenes de trabajo y entrevistas en el área productiva de la empresa SAERTEX México, siguiendo las etapas de definición del sistema.

Se realizó la estimación de los datos de entrada (materias primas, energía y transporte) por lote de producción de la empresa, y se extrapolaron datos a la UF definida.

Las cantidades requeridas para la industria de fabricación de materiales componentes fueron estimadas con base en la asignación de masa de los materiales para pala eólica unitaria únicamente se consideró el modo de transporte eléctrico (montacargas, y grúas aéreas). Posteriormente, los datos se incluyen en el software para el ACV.

3.5.5 Análisis del inventario

El proceso de producción de un rollo de fibra de vidrio biaxial consiste en:

- Configuración de la máquina
- Producción
- Almacenamiento temporal de producto terminado

Etapas 1, configuración de la máquina, donde se consideran insumos como energía eléctrica, fibras de vidrio, hilos de PET, acetona, trapos, aceite hidráulico, lubricantes, tape y tubos de cartón; la Etapa 2, correspondiente a la producción, en la que se registra el consumo de energía eléctrica; y la Etapa 3, referente al almacenamiento del producto terminado,

incluyendo insumos como plásticos, tapes, tarimas de madera, cartón B-flauta, retenedores de cartón, etiquetas adhesivas y energía eléctrica. Para cada insumo se especifica la unidad de medida, el inventario total por lote de 66 unidades y el consumo por unidad funcional equivalente a 9 unidades, lo que permite evaluar de manera cuantitativa los flujos de materiales y energía a lo largo del ciclo de vida del producto.

3.5.6 Evaluación del impacto

Se realiza la evaluación del impacto ambiental mediante el software SIMAPRO versión 9.0.0.48, utilizando el método ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.00, que muestran el perfil de impacto ambiental asociado a la producción de 9 rollos de fibra de vidrio biaxial para la fabricación de una pala eólica.

Así mismo, se evalúan 3 escenarios con diferentes consumos de acuerdo con el índice de calidad a la primera vez promedio por año, que se presenta en la Tabla 3.1 Valor del Índice de calidad a la primera vez promedio para los años 2023 y 2025.

Tabla 3.1 Valor del Índice de calidad a la primera vez promedio para los años 2023 y 2025.

IDEAL	2023	2025
IC 100%	IC (97.14%)	IC (98.82%)

El primer valor representa un proceso de producción ideal, sin desperdicios por defectos de mala calidad.

El valor del 2023 representa el primer valor medido por la empresa de producción primera calidad a la primera vez (97.14%).

El valor del 2025 representa el valor promedio actual producción de primera calidad a la primera vez (98.82%), valor que se obtiene después de dos años de medición, seguimiento, e implementación de mejoras continuas en base a los resultados mensuales que se midieron en este desde el 2023 hasta la fecha.

El análisis se realizó considerando las etapas antes mencionadas, con exclusión de procesos de infraestructura y emisiones a largo plazo.

El software considera las siguientes categorías para la evaluación del impacto ambiental:

- Calentamiento global
- Toxicidad humana no carcinogénica
- Escasez de recursos fósiles
- Uso del suelo
- Agotamiento de ozono estratosférico
- Eutrofización de agua dulce
- Escasez de recursos minerales

Asimismo, se realizó la evaluación con el método CML-IA baseline V3.04 / World 2000, que permite identificar los principales impactos ambientales asociados a la fabricación de 1 hélice de fibra de vidrio, considerando las etapas de producción, configuración de la máquina y almacenamiento. En este caso, se excluyen procesos de infraestructura y emisiones a largo plazo, y se reportaron los indicadores en su fase de caracterización.

Para este caso, los resultados muestran las siguientes categorías:

- Depleción abiótica (combustibles fósiles)
- Ecotoxicidad acuática marina
- Calentamiento global (GWP100a)
- Agotamiento abiótico de minerales
- Agotamiento de la capa de ozono
- Formación fotoquímica de ozono
- Toxicidad humana
- Ecotoxicidad acuática de agua dulce
- Acidificación
- Eutrofización

4 Capítulo 4: Resultados Y Discusiones

4.1 Límite del sistema de ACV

Véase la Figura 4.1 Limite de sistema establecido para el estudio.

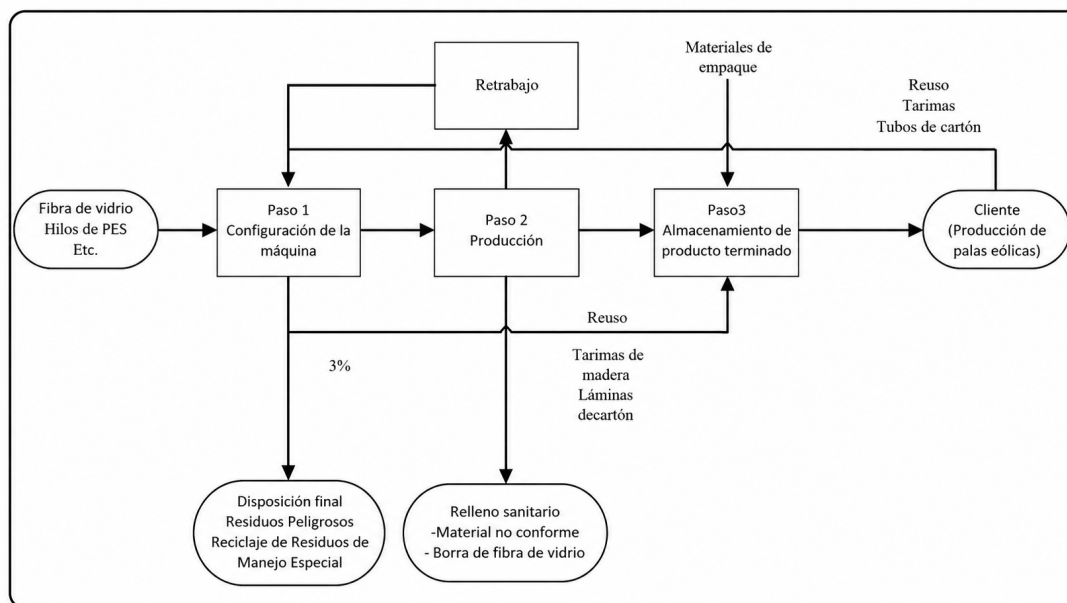


Figura 4.1 Limite de sistema establecido para el estudio.

El límite del sistema incluye las etapas consideradas para el estudio de ACV, las cuales se describen de la siguiente manera:

4.2 Unidad funcional (UF)

La UF adoptada en esta investigación es la cantidad de tejido biaxial de fibra de vidrio consumida para la fabricación de una pala eólica, equivalente a 2.5 t (2458 kg lo equivalente a 9 rollos/piezas).

Para la comparación con otros estudios, se presentarán los resultados por 1kg de tejido.

4.3 Datos y estimación

Se realizó la estimación de los datos de entrada (materias primas, energía y transporte) por lote de producción de la empresa, y se extrapolaron datos a la UF definida, de acuerdo con el diagrama de proceso, Figura 4.2 Proceso productivo de tejido de fibra de vidrio.

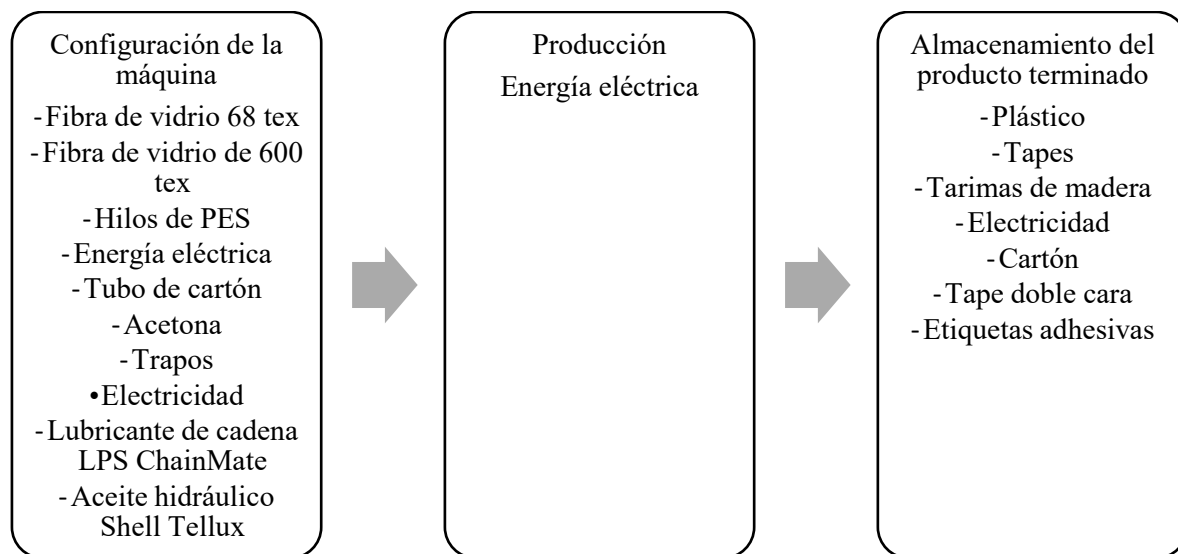


Figura 4.2 Proceso productivo de tejido de fibra de vidrio.

Las cantidades requeridas para la industria de fabricación de materiales componentes fueron estimadas con base en la asignación de masa de los materiales para pala eólica unitaria únicamente se consideró el modo de transporte eléctrico (montacargas, y grúas aéreas). Posteriormente, los datos se incluyen en el software para el ACV.

4.4 Análisis del inventario

En la Tabla 4.1 Inventario por etapas del proceso, se presenta el inventario de materiales y consumos energéticos utilizados en el proceso productivo de tejido de fibra de vidrio, desglosado por etapas y expresado tanto por lote de producción como por unidad funcional.

Se excluyeron los siguientes insumos de inventario:

- Repuestos de partes de la maquinaria, como son: agujas, navajas de corte, baleros, placas, entre otros; debido a su insignificante impacto ambiental en relación con el sistema general, y su dispersión a lo largo de su vida útil.
- Se excluyen aquellas emisiones derivadas del mantenimiento de las instalaciones.
- Se excluyeron lubricantes para partes móviles de la maquinaria por su impacto insignificante, debido a las pequeñas cantidades utilizadas en el proceso productivo de la máquina.

Tabla 4.1 Inventario por etapas del proceso.

Compuesto principal	Insumo	Unidad	Inventario por lote de producción (72u)
Configuración de la máquina			
NA	Energía Eléctrica	kWh	110.88
E-Glass Fiber, Generic E-Glass Fiber, Generic	Fibra de vidrio 68 tex	kg	655.3
Polyethylene terephthalate, Unreinforced	Fibra de vidrio 600 tex	kg	21409.1
Acetona	Hilos de PES	kg	151.3
Polyethylene Terephthalate (PET), Unreinforced	Acetona	L	3.0
NA	Trapos	Kg	5.0
NA	Aceite hidráulico Shell Tellux	L	200.0
NA	Lubricante de cadena LPS Chain Mate	g	312.0
Low Density Polyethylene (LDPE), Film Grade	Tape doble cara	g	720.0
laminated cardboard	Tubos de cartón	g	960.0
Producción			
NA	Energía Eléctrica	kWh	1061.8776
Almacenamiento			
Low Density Polyethylene (LDPE), Film Grade	Plástico	g	4950
Low Density Polyethylene (LDPE), Film Grade	Tapes	g	1980
Low Density Polyethylene (LDPE), Film Grade	Tarimas de madera	kg	2160
B-flute card board	Carton	g	7200
B-flute card board	Retenedores de cartón	g	7200
Adhesive paper	Etiquetas adhesivas	g	720
	Energía Eléctrica	kWh	198

Nota: Elaboración propia para la producción de tejido biaxial, Máquina Karl Mayer (1998).

El consumo eléctrico depende de la velocidad de la máquina tejedora; Stiller (1999) reporta que operar a 1000 rpm para la producción de 1 m² de tejido de fibra de vidrio, se requiere en promedio alrededor de 0.11 kWh/m².

A este valor, se puede añadir el consumo energético asociado al acondicionamiento de las instalaciones industriales. Y aún considerando estos requerimientos, la producción de tejidos de fibra de vidrio requiere menor energía en comparación con la producción de tejidos convencionales. Ver Tabla 4.2 Entradas para la producción de tejido de fibra de vidrio.

Tabla 4.2 Entradas para la producción de tejido de fibra de vidrio.

Entradas	Fibra de vidrio	Unidad
Electricidad	0.1093	kWh/m ²
Vapor	0.8	Kg/m ²
Gas	0.0188	m ³ /m ³
Electricidad (mobiliario)	0.09	kWh/m ²

Nota: Extraído de (Stiller, 1999), fuente: CS-Interglass, 1997.

4.5 Evaluación del impacto

A continuación se presentan los resultados obtenidos en el software SIMAPRO 9.0.0.48, los análisis se realizaron utilizando los métodos CML-IA baseline v3.04 / EU25 y ReCiPe Midpoint (H), con el fin de comparar el impacto ambiental de la máquina 189 de SAERTEX México en tres casos: el primer caso medido con un índice de calidad ideal del 100%: el segundo caso con un índice de calidad del 97.14%, valor promedio que se tenía durante el año 2023, año en el que se implementó esta medición para la mejora continua de la producción; y finalmente con un valor igual a 98.82%, que es el valor obtenido en el 2025 después de casi 3 años de haber monitoreado este KPI y haber implementado diferentes mejoras en base a los resultados que se fueron recolectando mes con mes.

4.5.1 Método ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.00

De acuerdo con los resultados obtenidos, mediante el método ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.00, en términos generales, el mayor impacto ambiental se atribuye al proceso de configuración de la máquina, representando alrededor de 70% del total del impacto, seguido por el almacenamiento de producto terminado, y finalmente la producción, que presentan impactos significativamente menores, debido a su bajo requerimiento de energía.

El proceso con menor impacto se considera la producción, se refleja principalmente en la categoría de impacto de calentamiento global (29,512.72 kg CO₂ eq), toxicidad humana no cancerígena (8744.37 kg 1,4-DBC eq) y agotamiento de recursos fósiles (8115.50 kg oil eq).

Las principales categorías de impacto que muestran una reducción general de los impactos ambientales comparados entre un proceso con un índice de calidad de hacerlo bien a la primera con valor de 97.14% (2023) vs 98.82% (2025).

Las principales categorías que se han visto afectadas son: acidificación terrestre, formación de ozono fotoquímico y consumo de agua, indicando que las mejoras implementadas de manufactura esbelta contribuyen a un proceso más sustentable. Asimismo, la categoría de deplección abiótica (energía fósil) refleja la dependencia del proceso respecto al uso de recursos no renovables.

4.5.1.1 EIA para un índice de calidad del 100%

Tabla 4.3 Evaluación de Impacto Ambiental para un índice de calidad del 100%.

Categoría de impacto	Unidad	Total	Producción	Configuración de la máquina	Almacenamiento
Calentamiento global	kg CO ₂ eq	28768.83	75.11	26229.82	2463.91
Agotamiento del ozono estratosférico	kg CFC11 eq	0.03	0.00	0.02	0.00
Radiación ionizante	kBq Co-60 eq	75.14	0.55	56.92	17.67
Formación de ozono, Salud humana	kg NO _x eq	52.40	0.14	46.19	6.07
Formación de partículas finas	kg PM2.5 eq	30.56	0.23	26.30	4.02
Formación de ozono, Ecosistemas terrestres	kg NO _x eq	54.30	0.14	47.93	6.23
Acidificación terrestre	kg SO ₂ eq	89.98	0.35	79.81	9.81
Eutrofización de agua dulce	kg P eq	0.50	0.00	0.34	0.16
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DCB e	4.83	0.03	2.90	1.90
Ecotoxicidad del agua dulce	kg 1,4-DCB e	17.31	0.04	13.22	4.05
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DBC e	33.01	0.11	23.36	9.54
Toxicidad cancerígena humana	kg 1,4-DBC e	152.60	0.07	137.06	15.47
Toxicidad no cancerígena humana	kg 1,4-DBC e	24000.68	66.91	8744.37	15189.40
Uso de la tierra	m ² a crop eq	2209.74	0.90	257.51	1951.33
Escasez de recursos minerales	kg Cu eq	17.08	0.01	8.81	8.26
Escasez de recursos fósiles	kg oil eq	8847.97	24.04	8115.51	708.42
Consumo de agua	m ³	607.62	0.17	586.10	21.35

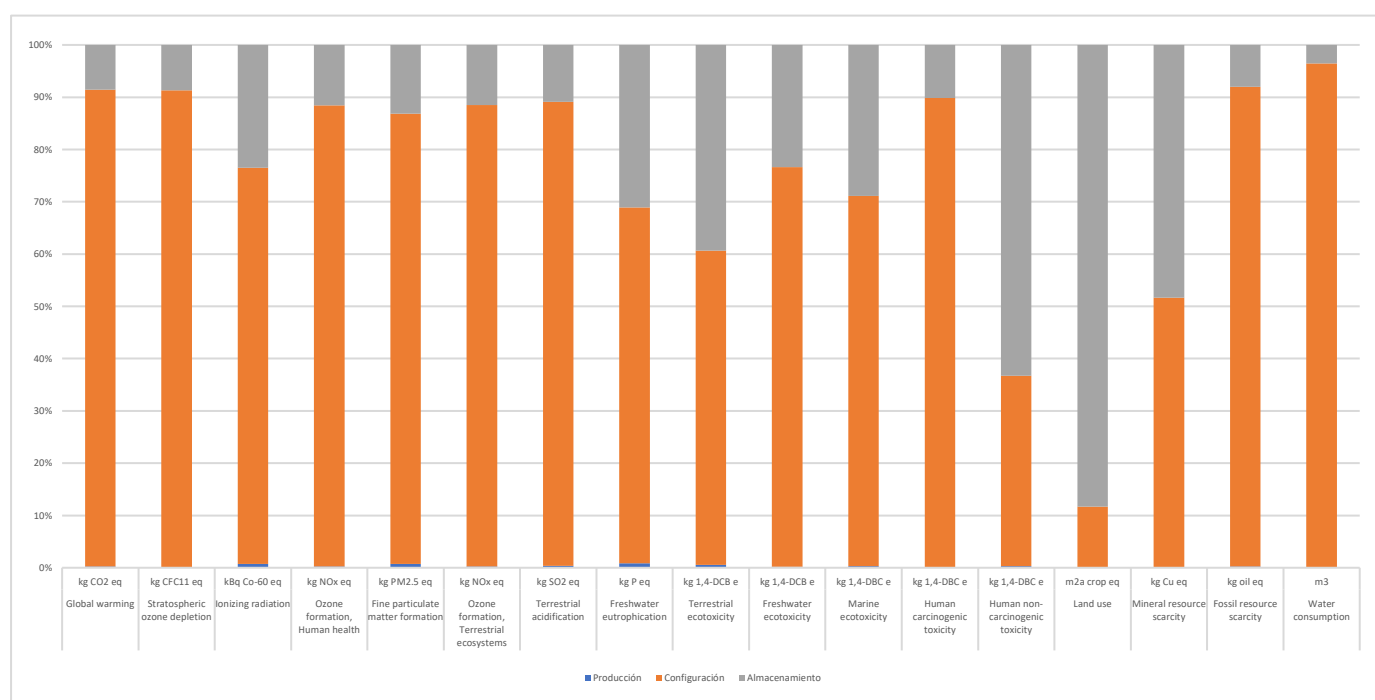


Figura 4.3 Evaluación De Impacto Ambiental (Ic=100%).

4.5.1.2 EIA para un índice de calidad del 97.14%

Tabla 4.4 Evaluación de Impacto Ambiental para un índice de calidad del 97.14%.

Categoría de impacto	Unidad	Total	Producción	Configuración de la máquina	Almacenamiento
Calentamiento global	kg CO2 eq	29075.95	75.99	26535.66	2464.30
Agotamiento del ozono estratosférico	kg CFC11 eq	0.03	2.88e-5	0.02	2.24e-3
Radiación ionizante	kBq Co-60 eq	75.72	0.56	57.48	17.68
Formación de ozono, Salud humana	kg NOx eq	52.93	0.14	46.72	6.07
Formación de partículas finas	kg PM2.5 eq	30.86	0.23	26.61	4.03
Formación de ozono, Ecosistemas terrestres	kg NOx eq	54.86	0.15	48.48	6.23
Acidificación terrestre	kg SO2 eq	90.90	0.36	80.73	9.81
Eutrofización de agua dulce	kg P eq	0.51	4.31e-3	0.35	0.16
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DCB e	4.86	0.03	2.93	1.90
Ecotoxicidad del agua dulce	kg 1,4-DCB e	17.46	0.04	13.37	4.05
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DBC e	33.27	0.11	23.62	9.54
Toxicidad cancerígena humana	kg 1,4-DBC e	154.20	0.07	138.65	15.47
Toxicidad no cancerígena humana	kg 1,4-DBC e	24094.85	67.70	8837.40	15189.75
Uso de la tierra	m2a crop eq	2212.72	0.91	260.47	1951.33
Escasez de recursos minerales	kg Cu eq	17.18	7.97e-3	8.91	8.26
Escasez de recursos fósiles	kg oil eq	8939.65	24.32	8206.77	708.55
Consumo de agua	m3	614.50	0.17	592.99	21.35

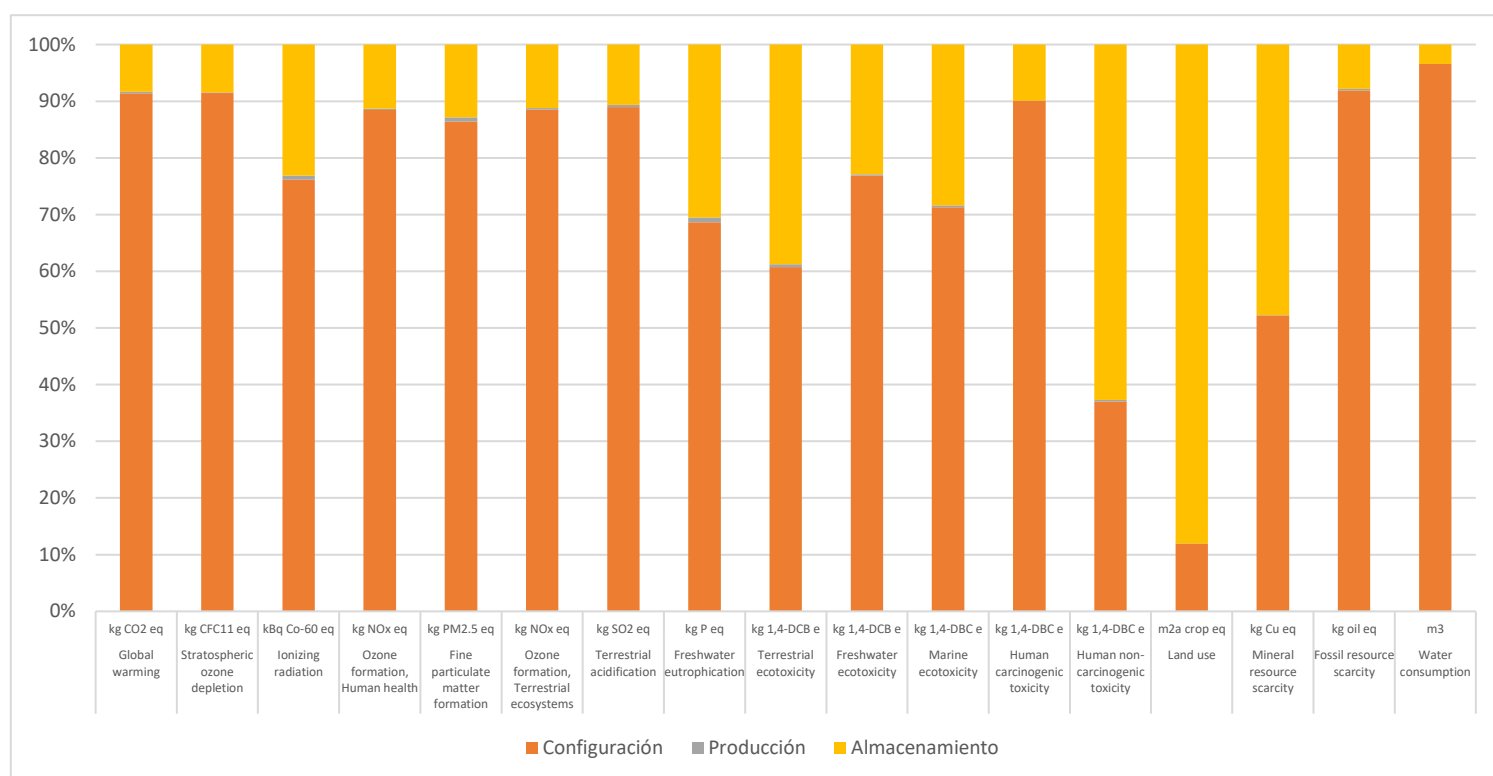


Figura 4.4 Evaluación De Impacto Ambiental IC=97.14%.

4.5.1.3 EIA para un índice de calidad del 98.82%

Tabla 4.5 Evaluación de Impacto Ambiental para un índice de calidad del 98.82%

Categoría de impacto	Unidad	Total	Producción	Configuración de la máquina	Almacenamiento
Calentamiento global	kg CO ₂ eq	29075.95	75.99	26535.66	2464.30
Agotamiento del ozono estratosférico	kg CFC11 eq	0.03	2.88e-5	0.02	2.24e-3
Radiación ionizante	kBq Co-60 eq	75.72	0.56	57.48	17.68
Formación de ozono, Salud humana	kg NO _x eq	52.93	0.14	46.72	6.07
Formación de partículas finas	kg PM2.5 eq	30.86	0.23	26.61	4.03
Formación de ozono, Ecosistemas terrestres	kg NO _x eq	54.86	0.15	48.48	6.23
Acidificación terrestre	kg SO ₂ eq	90.90	0.36	80.73	9.81
Eutrofización de agua dulce	kg P eq	0.51	4.31e-3	0.35	0.16
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DCB e	4.86	0.03	2.93	1.90
Ecotoxicidad del agua dulce	kg 1,4-DCB e	17.46	0.04	13.37	4.05
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DBC e	33.27	0.11	23.62	9.54
Toxicidad cancerígena humana	kg 1,4-DBC e	154.20	0.07	138.65	15.47
Toxicidad no cancerígena humana	kg 1,4-DBC e	24094.85	67.70	8837.40	15189.75
Uso de la tierra	m ² a crop eq	2212.72	0.91	260.47	1951.33
Escasez de recursos minerales	kg Cu eq	17.18	0.01	8.91	8.26
Escasez de recursos fósiles	kg oil eq	8939.65	24.32	8206.77	708.55
Consumo de agua	m ³	614.50	0.17	592.99	21.35

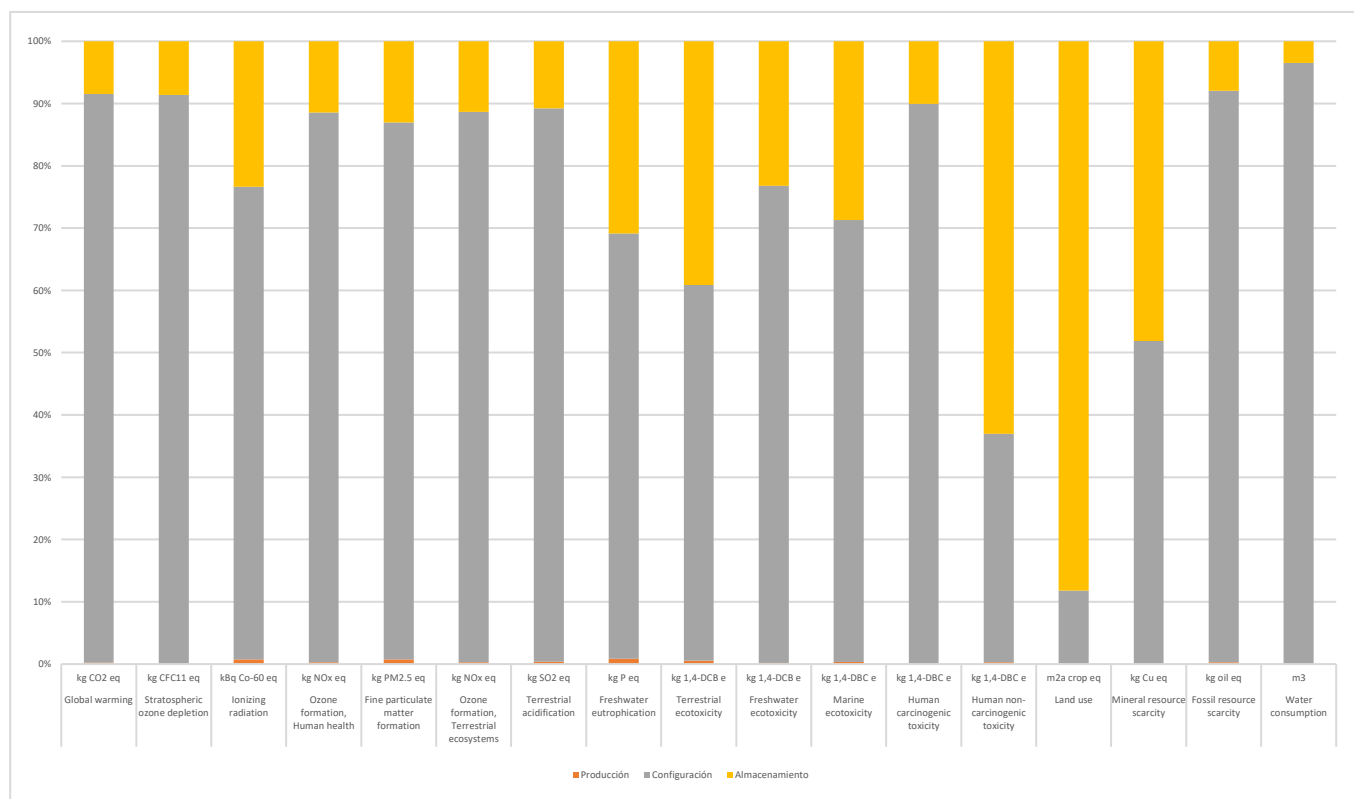


Figura 4.5 Evaluación De Impacto Ambiental (IC=98.82%)

4.5.2 Método CML-IA baseline V3.04 / EU25

El método CML-IA baseline v3.04 / EU25 se basa en una evaluación de tipo midpoint, es decir, mide los impactos ambientales intermedios asociados a categorías específicas como el calentamiento global, acidificación, eutrofización y toxicidad.

Este enfoque permite identificar qué procesos y sustancias contribuyen más a los impactos ambientales sin traducirlos aún a efectos finales sobre salud o ecosistemas.

Al igual que con el método ReCiPe 2016, el proceso que mayor impacto genera en la mayoría de las categorías de impacto es en la configuración de la máquina alrededor del 70% del impacto, para los tres escenarios simulados.

Esto se debe a que se consume más energía fósil (MJ), altas emisiones de CO₂ (calentamiento global), además del impacto de toxicidad marina y terrestre.

Las categorías más afectadas fueron, calentamiento global (CO₂ eq), debido al principal contribuyente, asociado a las emisiones de CO₂ emitidas en la producción y el transporte de la materia prima, que está relacionado con el uso de recursos energéticos no renovables; ecotoxicidad acuática marina, vinculado al manejo de sustancias químicas y residuos industriales.

Por el contrario, las categorías con menor contribución relativa fueron agotamiento de la capa de ozono y ecotoxicidad terrestre, representando menos del 1 % del impacto total.

El escenario con un índice de calidad a la primera vez 98.82%, presenta una reducción en los impactos ambientales de alrededor de 1 al 2% en la mayoría de las categorías.

El escenario ideal (IC=100%), obtiene reducciones adicionales alrededor del 4% para el calentamiento global, del 3% para la categoría de toxicidad y el uso de recursos fósiles alrededor del 2%, demostrando un potencial de mejora la optimización de la máquina y demás procesos productivos de SAERTEX México.

Este método permitió identificar con precisión las fuentes específicas del impacto, facilitando la priorización de estrategias de mitigación de impacto ambiental de la planta

4.5.2.1 EIA para un índice de calidad del 100%

Tabla 4.6 Evaluación de Impacto Ambiental para un índice de calidad del 100%

Categoría de impacto	Unidad	Total	Producción	Configuración de la máquina	Almacenamiento
Agotamiento abiótico	kg Sb eq	0.04	3.82e-7	0.01	0.03
Agotamiento abiótico (combustibles fósiles)	MJ	403974.03	1095.48	370668.32	32210.23
Calentamiento global (GWP100a)	kg CO ₂ eq	28029.10	74.55	25544.42	2410.13
Agotamiento de la capa de ozono (ODP)	kg CFC-11 eq	8.51e-4	6.07e-6	6.38e-4	2.07e-4
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	2351.12	8.22	1652.88	690.02
Ecotoxicidad acuática de agua dulce.	kg 1,4-DB eq	360.84	1.05	240.41	119.38
Ecotoxicidad acuática marina	kg 1,4-DB eq	5280351.29	15035.19	3796820.29	1468495.81
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	42.12	0.04	9.13	32.95
Oxidación fotoquímica	kg C ₂ H ₄ eq	5.43	0.02	4.77	0.64
Acidificación	kg SO ₂ eq	110.46	0.43	98.59	11.44
Eutrofización	kg PO ₄ ³⁻ eq	17.71	0.03	15.34	2.33

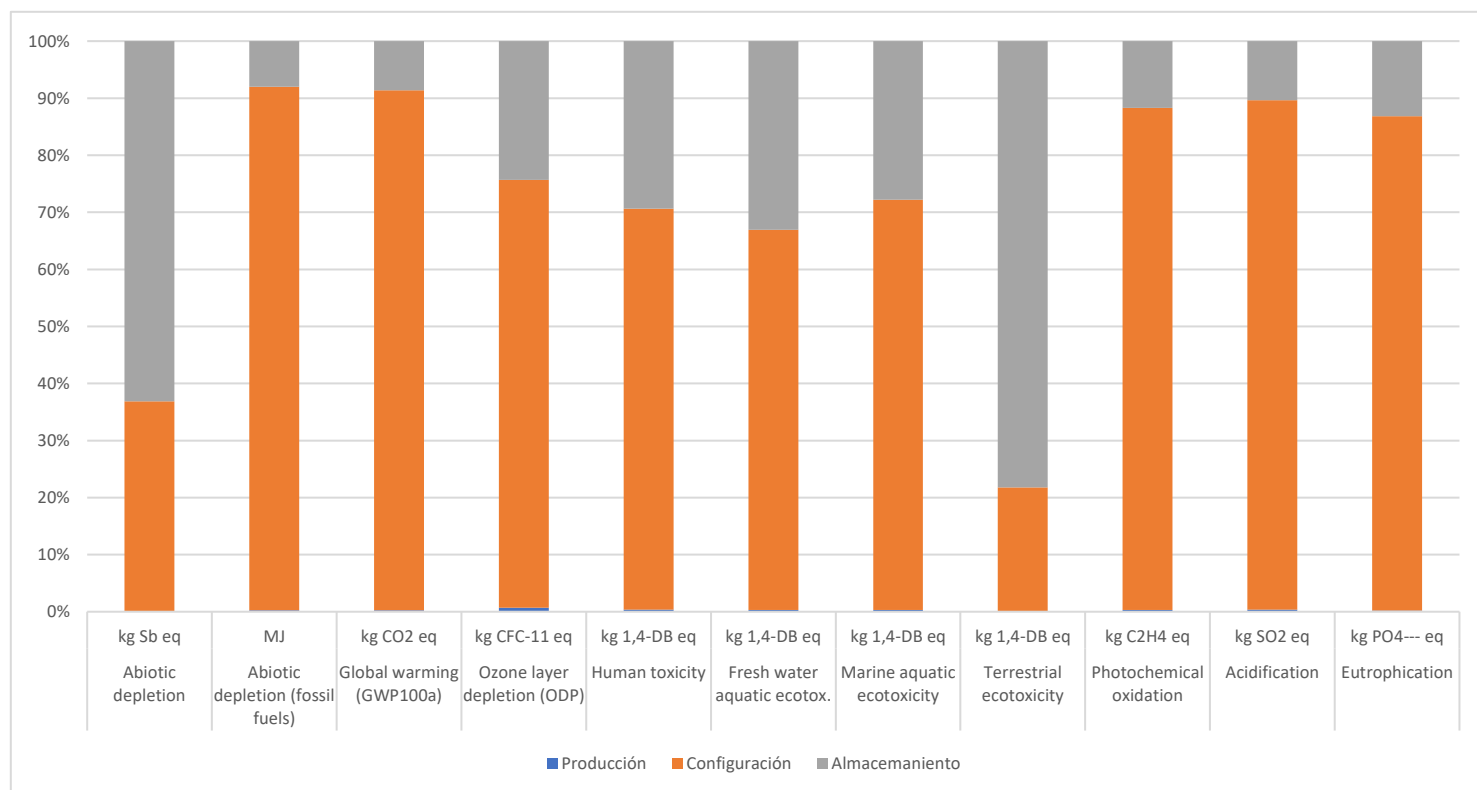


Figura 4.6 Evaluación De Impacto Ambiental (IC=100%)

4.5.2.2 EIA para un índice de calidad del 97.14%

Tabla 4.7 Evaluación de Impacto Ambiental para un índice de calidad del 97.14%.

Categoría de impacto	Unidad	Total	Configuración de la máquina	Producción	Almacenamiento
Agotamiento abiótico	kg Sb eq	0.04	0.02	3.92e-7	0.03
Agotamiento abiótico (combustibles fósiles)	MJ	414114.45	380771.63	1126.81	32216.01
Calentamiento global (GWP100a)	kg CO2 eq	28753.61	26266.40	76.68	2410.52
Agotamiento de la capa de ozono (ODP)	kg CFC-11 eq	8.65e-4	6.51e-4	6.25e-6	2.07e-4
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	2396.57	1698.05	8.46	690.06
Ecotoxicidad acuática de agua dulce.	kg 1,4-DB eq	367.62	247.16	1.08	119.38
Ecotoxicidad acuática marina	kg 1,4-DB eq	5386425.50	3902385.20	15465.19	1468575.10
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	42.37	9.38	0.05	32.95
Oxidación fotoquímica	kg C2H4 eq	5.56	4.91	0.02	0.64
Acidificación	kg SO2 eq	113.24	101.35	0.44	11.44
Eutrofización	kg PO4 ³⁻ eq	18.14	15.78	0.04	2.33

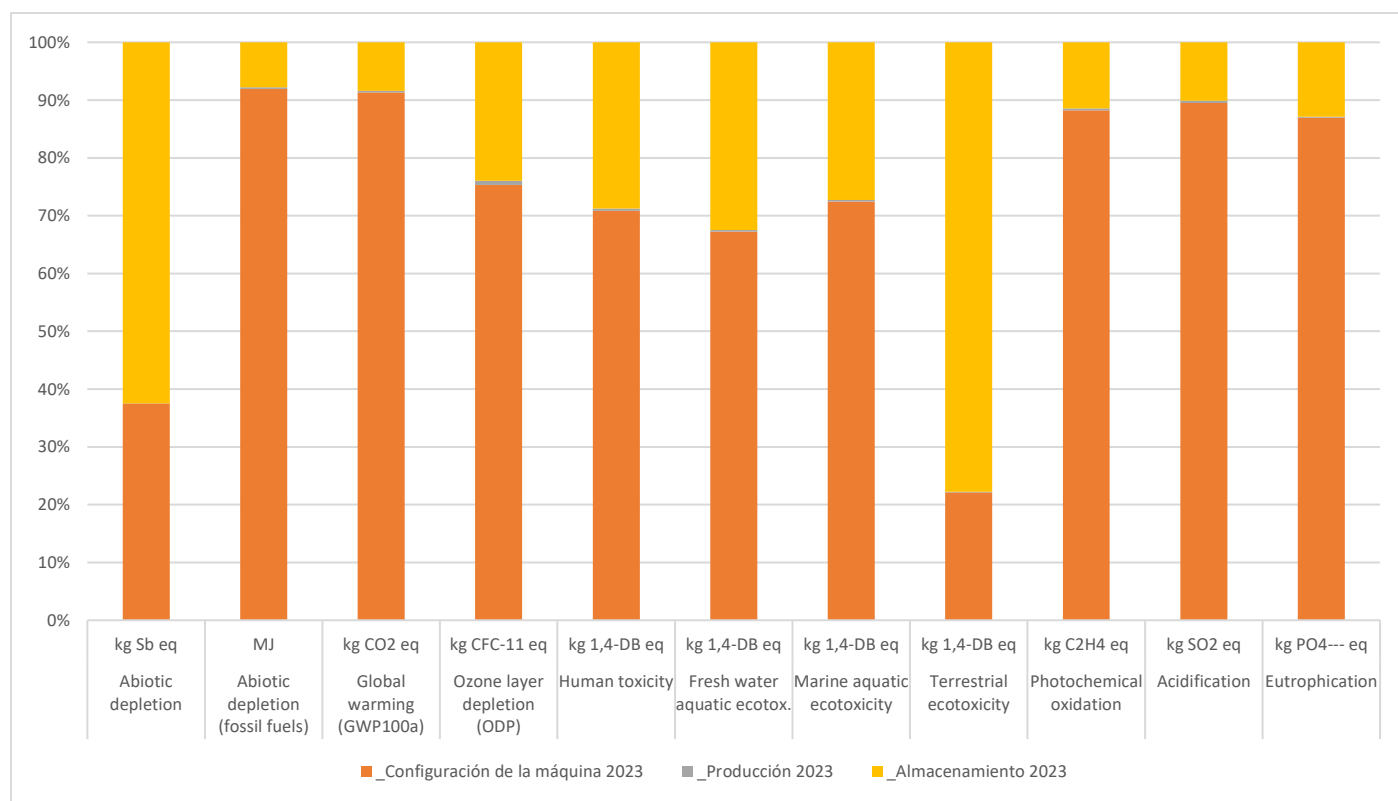


Figura 4.7 Evaluación De Impacto Ambiental (IC:97.14%)

4.5.2.3 EIA para un índice de calidad del 98.82%

Tabla 4.8 Evaluación de Impacto Ambiental para un índice de calidad del 98.82%

Categoría de impacto	Unidad	Total	Producción	Configuración de la máquina	Almacenamiento
Agotamiento abiótico	kg Sb eq	0.04	3.86e-7	0.01	0.03
Agotamiento abiótico (combustibles fósiles)	MJ	408160.46	1108.40	374836.06	32216.01
Calentamiento global (GWP100a)	kg CO2 eq	28328.22	75.43	25842.27	2410.52
Agotamiento de la capa de ozono (ODP)	kg CFC-11 eq	8.57e-4	6.14e-6	6.43e-4	2.07e-4
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	2369.90	8.32	1671.51	690.06
Ecotoxicidad acuática de agua dulce.	kg 1,4-DB eq	363.64	1.06	243.19	119.38
Ecotoxicidad acuática marina	kg 1,4-DB eq	5324155.35	15212.50	3840367.75	1468575.10
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	42.23	0.04	9.24	32.95
Oxidación fotoquímica	kg C2H4 eq	5.48	0.02	4.83	0.64
Acidificación	kg SO2 eq	111.61	0.44	99.73	11.44
Eutrofización	kg PO4--- eq	17.89	0.03	15.52	2.33

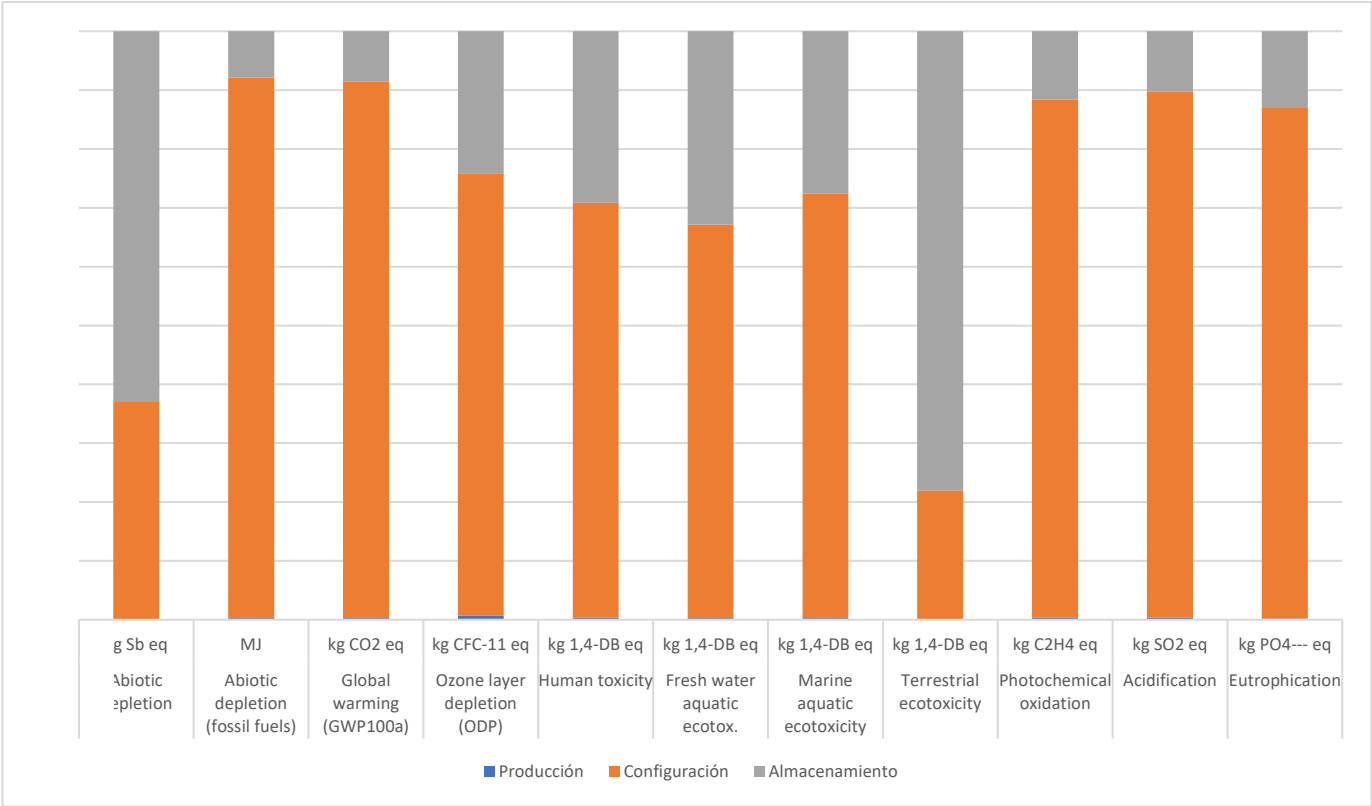


Figura 4.8 Evaluación De Impacto Ambiental (IC=98.82%)

Los resultados muestran una reducción por categoría de impacto en este caso, de acuerdo con el incremento en 1.68% del índice de calidad a la primera vez.

4.6 Interpretación de resultados

Es en la etapa de configuración de la máquina, que se evidencia mayor impacto ambiental, proveniente del consumo de grandes cantidades de materia prima (fibra de vidrio), Uddin y Kumar (2014), reportaron que la producción de componentes para palas eólicas a base de fibra de vidrio presenta una huella ambiental, asociado al alto consumo energético durante la fusión y procesamiento del vidrio, generando altas emisiones de CO₂.

Stiller (1999), indica que la cadena de producción de la fibra de vidrio empieza con el minado de los minerales usados para la fusión del vidrio: arena de vidrio, la arcilla caolín, el borato o colemanita, la piedra caliza, el flúor y los sulfatos; los que en general, se funden en hornos con gas natural o electricidad, donde se ha visto que este último reduce significativamente la demanda energética final.

Se muestra una variación de consumo energético de 10500 MJ de gas natural, y 0.58 MWh de electricidad por tonelada de fibra de vidrio, mientras el mayor consumo corresponde a una planta alemana, con 28080 MJ y 1.2 MWh, e incluso dentro de los datos de una misma compañía se encuentran variaciones considerables.

Es decir, el impacto en la etapa de configuración no proviene de los tiempos de configuración, ni del consumo eléctrico por los movimientos de la materia prima, etc. Es decir, los resultados obtenidos para SAERTEX México, reflejan una evaluación comparable con otras industrias composites.

Además, cabe señalar que en el presente estudio se consideraron los impactos ambientales involucrados en la comercialización de la materia prima, que es importada desde el país de Bahrain, hacia El Paso y posteriormente a Ciudad Juárez. Incrementándose de esta manera las cantidades de emisión de dióxido de Carbono a la atmosfera.

El método ReCipE y CML, ofrecen enfoques complementarios, uno muestra los impactos ambientales en el consumidor final, mientras que el otro se enfoca en el impacto al medio ambiente.

Dado que la fibra de vidrio es el material principal para los tejidos biaxiales, su impacto ambiental no es posible de eliminar, pero si se puede reducir mediante la implementación de diferentes medidas, entre las principales recomendaciones para la empresa se tiene:

- Mantener e incrementar el índice de calidad a la primera vez, con el fin de reducir el volumen de material desperdiciado.
- El seguimiento al mantenimiento preventivo a la maquina 189, reducirá aún más el material no conforme y retrabajos.
- Promover el reciclaje del desperdicio de fibra de vidrio y tejido de fibra de vidrio, entre empresas que procesen este tipo de residuos, para la extensión del ciclo de vida de estos residuos.
- Considerar prácticas de compensación de CO₂ o proyectos de eficiencia energética para mitigar el impacto indirecto de la fibra de vidrio.

En conjunto, estas acciones fortalecerían la estrategia de sostenibilidad de SAERTEX México, enfocándose no solo la eficiencia operativa, sino también en la cadena de suministro y el uso responsable de materiales de alto impacto ambiental, de esta manera se asocia con los principios de economía circular y manufactura sustentable; respondiendo con las expectativas de los clientes.

Asimismo, la calidad de los datos representa una limitación, ya que provienen de los registros de la empresa, los cuales no han mantenido el mismo criterio de evaluación desde el 2023 al 2025, ya que se han ido modificando dependiendo de las necesidades de la empresa; así mismo, se hace uso de inventarios genéricos obtenidos de Ecoinvent; estas suposiciones pueden influir en la precisión de los resultados, aunque estos supuestos, garantizan la validez comparativa.

Véase a Figura 4.9 Evolución del índice de Calidad a la primera vez 2023-2025, donde se observa que el índice de calidad a la primera vez ha evolucionado con tendencia positiva a lo largo del tiempo, desde el 2023 hasta el 2024, la empresa mantuvo como objetivo la obtención el 97%; sin embargo, al observarse una tendencia alcista desde junio del 2024, se sube la meta hasta el 99% de producción de calidad en el primer intento.

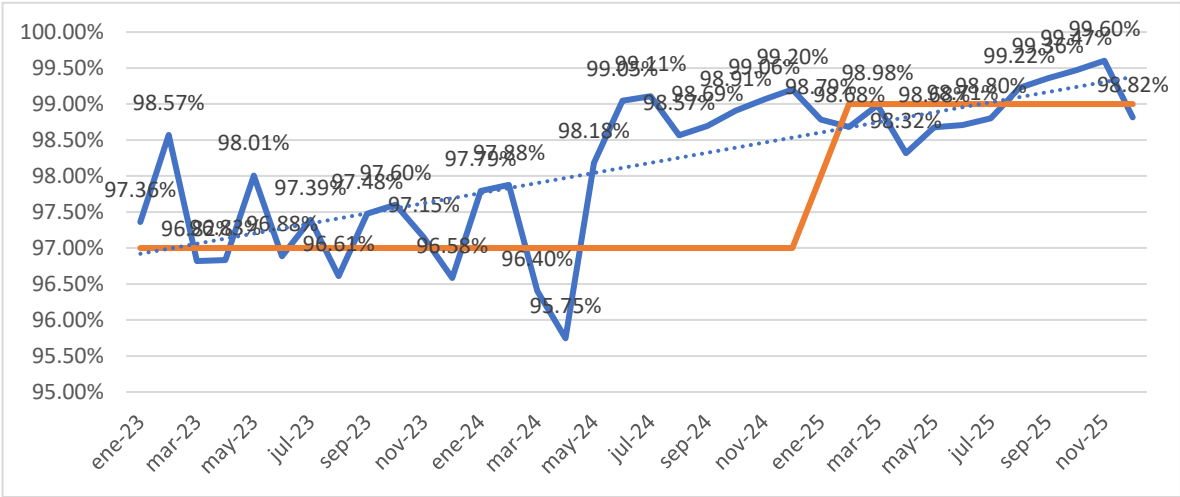


Figura 4.9 Evolución del índice de Calidad a la primera vez 2023-2025

Esta investigación se realiza de *cradle to gate*, y los resultados son viables para el análisis del proceso, evaluando la eficiencia operativa de la maquina 189; sin embargo, limita

la compresión del impacto ambiental total de una pala eólica a lo largo de su ciclo de vida completo, por lo que esta evaluación es solo una parte del análisis de la *cradle to grave* de esta industria.

Por lo tanto, se puede confirmar la hipótesis planteada al inicio del estudio, la implementación de la herramienta de Manufactura Esbelta de hacer bien a la primera vez tiene un efecto en la sustentabilidad ambiental de la máquina 189 de la empresa SAERTEX México S.A. de C.V.

4.7 Discusiones

4.7.1 Análisis Económico-Ambiental

SAERTEX México, incremento su producción total en un 44% en el año 2025, en comparación con el 2024, lo que conlleva a un incremento de la cantidad de residuos, y por lo tanto el gasto por su disposición, como se puede ver en la Figura 4.10 Costos de disposición de residuos vs Producción.

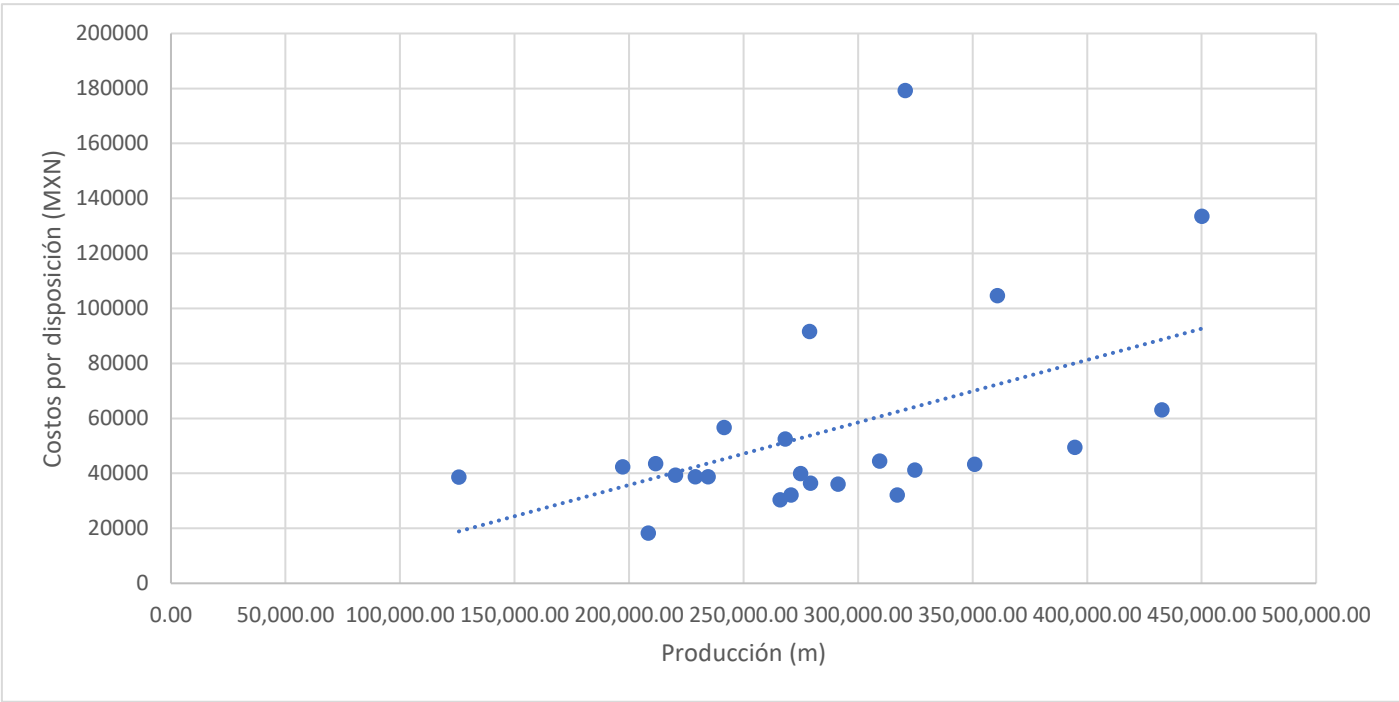


Figura 4.10 Costos de disposición de residuos vs Producción.

Por otro lado, durante el año 2024, SAERTEX México generó 58.28 toneladas de producto de segunda calidad. El desperdicio derivado de defectos en el proceso fue enviado al relleno sanitario, alcanzando 344.25 toneladas, lo que representó tanto una pérdida económica como un impacto ambiental relevante. La fibra de vidrio, al ser un material no biodegradable, dificulta su gestión y contribuye a la saturación de los sitios de disposición final.

Y en el 2025, SAERTEX México generó un total de 2,200 toneladas de residuos de manejo especial, de las cuales 916 toneladas correspondieron a residuos de tejido y viruta de fibra de vidrio, lo que representa un incremento del 23% respecto a 2023 y del 200% en comparación con 2024. De este total, 11.78 toneladas de producto terminado no conforme fueron generadas por la máquina 189 y enviadas directamente al relleno sanitario, equivalentes al 0.5% del total de residuos generados por la empresa. De esta manera, la participación de la máquina 189 en la generación total de residuos pasó del 29.40% en 2024 al 0.5% en 2025.

Definitivamente se ha observado una tendencia a la disminución de residuos que se generan en esta máquina. Teniendo como valores máximos de 5.26 ton en marzo del 2024, y valores mínimos de 25 kg en noviembre del 2025 equivalente al 0.01% de la producción total del mes de noviembre.

En la Figura 4.11 Residuos de Manejo Especial dispuestos al relleno sanitario., se observa la cantidad de residuos de manejos especial que se han dispuesto en el relleno sanitario desde enero del 2023, hasta diciembre del 2025.

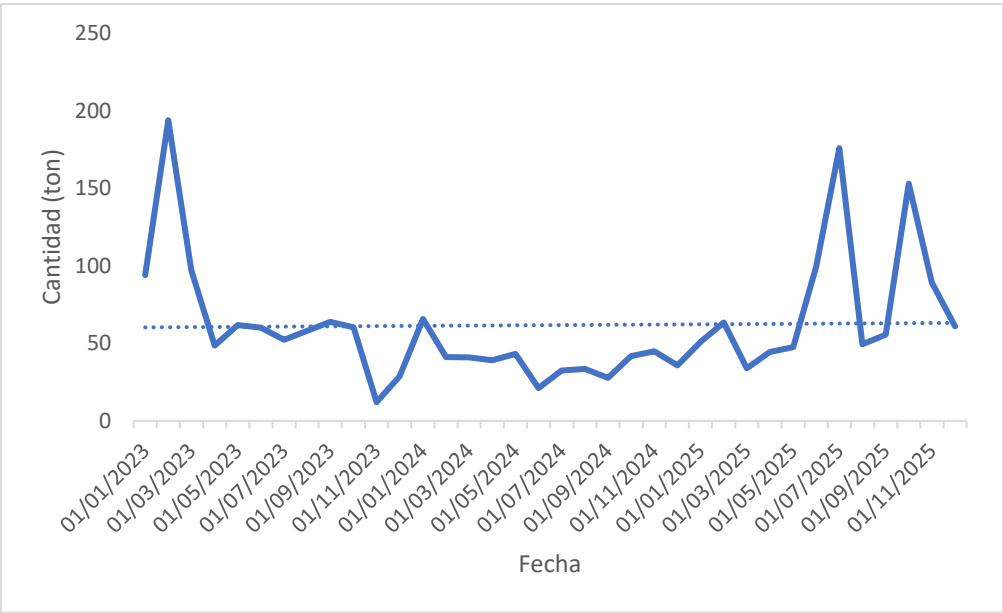


Figura 4.11 Residuos de Manejo Especial dispuestos al relleno sanitario.

Por otro lado, en la Figura 4.12 Material no conforme generado por la M189, 2024-2025, se observa la cantidad de material no conforme generado por la maquina 189, durante el año 2024 y 2025, se puede observar una clara tendencia a la reducción con un máximo alcanzado en el mes de marzo del 2024, y un mínimo en el mes de noviembre del 2025. Además, es de importancia señalar que alrededor del 88% del producto no conforme generado por esta máquina se utilizó como pre-producto en las máquinas de corte longitudinal y latitudinal; donde, mediante retrabajo se transformó material no conforme en un nuevo material de primera calidad para el cliente, disminuyendo así la cantidad final de residuos que se disponen al relleno sanitario por defectos de calidad.

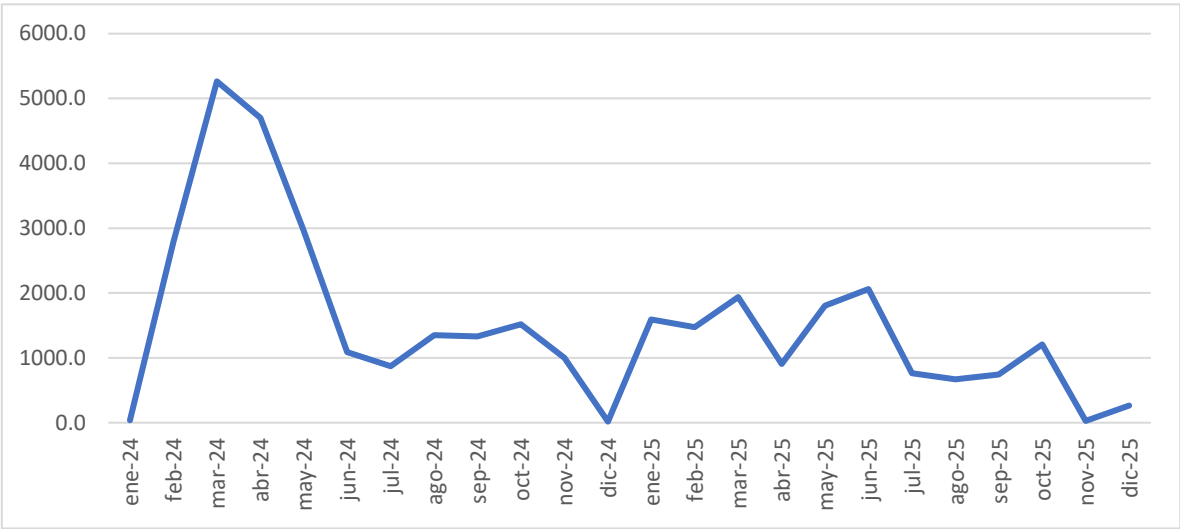


Figura 4.12 Material no conforme generado por la M189, 2024-2025.

Esta reducción fue posible debido a las medidas correctivas y preventivas de manufactura esbelta que se fueron implementando en la M189 durante el 2025, en base a los resultados obtenidos cada mes por los registros del índice de calidad a la primera vez, los cuales se presentan en la Tabla 4.10 Plan de acción 2025, M189, de acuerdo con la leyenda presentada en la Tabla 4.9 Leyenda de plan de acción.

Tabla 4.9 Leyenda de plan de acción.

ID	Priorización
1. Auditorías internas	1
2. Auditorías externas	2
3. Mejora continua	3
4. Revisión de la gestión	
5. Reclamos	
6. Juntas	

Tabla 4.10 Plan de acción 2025, M189.

Pr.	Tipo	Claim no.	Queja / Error / Recomendación	Causa raíz	Medidas	Responsable	Fecha de vencimiento	Fecha de Implementación
1	P	NA	Compra de bancos para surtido de material	Desgaste de bancos anteriores	Compra e instalación	Compras	20/03/2025	20/03/2025
3	OFI	NA	Reemplazo de escáner de las máquinas	Desgaste operacional	Compra e instalación	Compras	05/04/2025	05/04/2025
1	P	NA	Mantenimiento de rodillo de Carrier M189	Desgaste operacional	Revisión y ajuste	Mantenimiento	05/04/2025	05/04/2025
1	P	NA	Eslingás para Beam	Mejora continua del proceso	Revisión e instalación	Calidad	12/05/2025	12/05/2025
1	C	NA	Cambio de empalmadoras	Desgaste operacional	Revisión y reemplazo	Producción	09/06/2025	09/06/2025
1	C	NA	Compra de ventiladores M189	Desgaste operacional	Compra e instalación	Mantenimiento	09/06/2025	09/06/2025
1	P	NA	Retirar uso de navajas	Mejora continua del proceso	Revisión y ajuste	Mantenimiento	6/30/2025	6/30/2025
1	OFI	NA	Reforzar la capacitación y supervisión a líderes y técnicos de mantenimiento sobre la correcta firma y llenado diario del checklist de inspección para	Mejora continua del proceso	Revisión e instalación	Producción	15/08/2025	04/08/2025

1	OFI	NA	segurar el registro adecuado de las actividades y hallazgos. Retirar las tijeras naranjas con punta encontradas en la máquina para eliminar riesgos de seguridad y cumplir con las normas internas de manejo de herramientas.	Mejora continua del proceso	Revisión e instalación	Producción	15/08/2025	11/08/2025
1	AC	--	Gauge de Carrier C dañada después de 1 día	Material y/o Especificación De gauge no cubiertas	Revisión de especificaciones de gauge con proveedor y mantenimiento	Compras	11/10/2025	11/20/2025

Nota: Obtenido el 03/02/2026, de la empresa SAERTEX México.

De todas las herramientas de manufactura esbelta potenciales (5S, SMED, AMEF, TPM), la herramienta TPM (Mantenimiento Preventivo) es la que ha brindado mayor impacto en el incremento del FTQ del 97.14% al 98.82% por la reducción de paros, y el Poka-yoke que mejor control visual ha brindado por la implementación de sensores que detectan riesgos críticos de calidad como son faltan de hilos y/o fibras.

4.7.2 Benchmarking industrial

En el presente estudio se determinó que la producción de tejido biaxial genera un potencial de calentamiento global de 12 kg CO₂-eq por kilogramo de tejido biaxial, bajo un límite *cradle-to-gate*.

Al compararse con referencias internacionales, como el informe titulado *Life cycle assessment of open mesh products*, elaborado en el marco de un proyecto de TECH-FAB Europe, cuyo objetivo es desarrollar evaluaciones de ciclo de vida a nivel sectorial de productos clave de textiles técnicos. El análisis, con alcance de “cradle to gate”, fue realizado por PwC y representa aproximadamente el 95% de las condiciones de producción europeas de mallas abiertas de fibra de vidrio. Desde la extracción de materias primas hasta la salida de fábrica, la producción de 1 kg de tejido abierta en Europa genera, en promedio, 2.17 kg de CO₂ equivalente y una demanda de energía primaria de 48 MJ, es decir, bajo un enfoque *cradle-to-gate*.

La interpretación entre SAERTEX México y referencias europeas, debe interpretarse con cautela debido a:

- Diferencias en alcance (biaxial vs mesh respectivamente).
- Composición matriz energética

Un análisis de sensibilidad muestra que si SAERTEX adoptara la matriz energética sueca (85% renovables), la intensidad de emisiones reduciría a ~6.5 kg CO₂-eq/kg,. La brecha remanente sugiere oportunidades en: rediseño de matriz de suministro, investigación en fibras de vidrio recicladas.

4.7.3 Análisis de Factibilidad de Mejoras

Se presenta un plan de acción de acuerdo con el análisis de causa raíz, de las desviaciones reportada durante el periodo 2025.

Se presentan de acuerdo con la prioridad de acciones (1=prioridad alta, 2=prioridad media, 3=prioridad baja), según relación impacto/costo.

Tabla 4.11 Plan de acción para la mejora continua de la máquina 189.

Pr.	Tipo	Queja / Error / Recomendación	Causa raíz	Medidas	Responsable	Fecha venc.	Costo (MXN)	Factibilidad	Recursos necesarios	KPI's de seguimiento
1	C	Falla sistema detección rotura hilos	Sensores descalibrados	Calibración e inclusión en MP	Mantenimiento	25/02/2026	18,000	Alta	Técnico mantenimiento, sensores, checklist	Paros por rotura, OEE, % cumplimiento MP
1	C	Calidad deficiente beam	Falta criterios aceptación	Estándar + AQL recepción	Calidad / Compras	05/04/2026	38,000	Media	Procedimiento, inspector, auditoría proveedor	% rechazo beam, reclamos internos
2	P	Desgaste Agujas	Vida útil excedida	Control horas y cambio preventivo	Mantenimiento	10/03/2026	22,000	Alta	Stock agujas, formato control horas	Paros por agujas, MTBF
2	P	Procedimiento subestándar doffing	IT desactualizada	Actualizar y capacitar	Ing. / Producción	20/03/2026	12,000	Alta	Tiempo capacitación, instructivo visual	Scrap por doffing, FTQ turno
3	P	Desgaste Rewinder	MP reactivo	MP trimestral + vibración	Mantenimiento	30/03/2026	55,000	Media	Analizador vibración, técnico	Paros rewinder, MTTR, OEE
3	OFI	Descuido operador	Falta cultura calidad	Capacitación FTQ y supervisión	Prod. / RH	25/03/2026	10,000	Media	Tiempo capacitación, supervisor	FTQ por operador, retrabajos
3	OFI	Ruteo fibras sub-estándar	Variabilidad entre turnos	Estandarizar y validar	Producción	22/03/2026	14,000	Alta	Layout visual, capacitación	Scrap por mala alineación, FTQ %
3	P	Desgaste carrier A, B	Sin análisis criticidad	Clasificación ABC refacciones	Mantenimiento/Compras	12/03/2026	15,000	Alta	Análisis inventario, stock crítico	disponibilidad refacciones, paros

Nota: Los costos asociados al plan de mejora fueron estimados con base a análisis internos de horas-hombre, y precios promedio del mercado de piezas, servicios, etc.

4.7.3.1 Proyección de beneficios de alcanzar 99% o 100%

A continuación se realiza el análisis costo beneficio para la implementación de las medidas que se deberían de implementar para obtener un 100%, establecidas en la Tabla 4.11 Plan de acción para la mejora continua de la máquina 189, y en base a los datos de producción actual:

- Producción mensual estimada: 150,000 kg
- Producción anual: 1,800,000 kg
- FTQ actual: 98.12 %
- Scrap actual: 1.88 %
- Costo de producción: 1.67 USD/kg
- Inversión total del proyecto: 10,823 USD
- Proyección de escenarios futuros (2026-2028)

En base a estos se realiza el cálculo del costo actual del scrap :

Tabla 4.12 Costo actual de scrap.

Concepto	Valor mensual	Valor anual
Producción total (kg)	150,000	1,800,000
Scrap (%)	1.88 %	1.88 %
Scrap (kg)	2,820	33,840
Costo scrap (USD)	4,709	56,508

Para estimar beneficios se consideran escenarios conservadores para un FTQ igual a 99% y 99.5%:

Tabla 4.13 Estimación ROI y payback.

Escenario	Ahorro anual (USD)	ROI	Payback
99.5 %,	41,484.00	283 %	3.1 meses
99.8 %	50,496.00	336 %	2.6 meses

Respecto al potencial de emisiones de dióxido de carbono asociado a estos nuevos índices de calidad, se proyectan las siguientes reducciones de emisiones a la atmosfera.

Tabla 4.14 Proyección de emisiones CO₂eq anual.

Escenario	Reducción anual (kg)	CO₂-eq evitado (t/año)
99.5 %	24,840	298 t
99.8 %	30,240	363 t

Este análisis nos muestra impacto económico considerable, convirtiendo el proyecto en una inversión estratégica desde la perspectiva financiera y ambiental.

4.7.4 Competitividad y Cumplimiento Normativo

De acuerdo con el reglamento Delegado (UE) 2021/2139 de la Comisión de 04 de Junio 2021:

“La industria manufacturera emite aproximadamente el 21 % de las emisiones directas de GEI en la Unión Europea. Siendo el sector que ocupa el tercer lugar entre los principales generadores de emisiones en la Unión, puede desempeñar un papel fundamental en la mitigación del cambio climático [...]. Por lo tanto, en relación con la industria manufacturera, deben especificarse criterios técnicos de selección tanto en relación con las actividades de fabricación asociadas a los niveles más altos de emisiones de gases de efecto invernadero como con la fabricación de productos y tecnologías hipocarbónicos”.

Así mismo; como se menciona en el artículo 10, apartado 2, del Reglamento (UE) 2020/852:

“Las actividades de fabricación para las que no existen alternativas hipocarbónicas viables desde los puntos de vista tecnológico y económico, pero que favorecen la transición a una economía climáticamente neutra, deben considerarse actividades económicas de transición, con vistas a fomentar la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, deben fijarse en un nivel que solo puedan alcanzar los fabricantes con el mejor desempeño de cada sector; en la mayoría de los casos sobre la base de las emisiones de gases de efecto invernadero por unidad producida”.

De acuerdo con, el consumo de energía para la producción de un metro cuadrado de tejido de fibra de vidrio es de alrededor 0.038 kWh/m² resultados comparables con los resultados obtenidos en el presente estudio 0.0358 KWh/m².

Ya que la ISO 14001 es una Norma Internacional que se encarga de la certificación de los Sistemas de Gestión Ambiental, no establece valores de desempeño de emisiones de CO₂, ni de desempeño por lo tanto el valor obtenido en el presente modelo no impide una certificación ambiental. Para ello se debe demostrar la identificación de los aspectos ambientales significativos (GEI), evaluación de riesgos y oportunidades, establecimiento de riesgos y oportunidades, y el establecimiento de objetivos, seguimiento a indicadores entre otros.

4.7.5 Validación y limitaciones del Estudio

4.7.5.1 Calidad de datos

En un Análisis de Ciclo de Vida, la calidad de los resultados (representatividad y confiabilidad) dependerá directamente de la calidad de los datos ingresados al modelo.

En el presente estudio se ingresaron datos primarios correspondientes a la información obtenida directamente de la operación de la máquina 189, incluyendo: consumo energético real, producción mensual, índice FTQ, consumos de materia prima, y registros internos de mantenimiento y operación.

En este aspecto se considerar como limitaciones la variabilidad operacional mensuales, y la dependencia de la exactitud de los registros internos.

Así mismo, se incluyen datos secundarios relacionado al impacto ambiental de los procesos que se incluyen en la producción de la materia prima y/o materiales. Datos como el consumo eléctrico y emisiones para el transporte de la fibra de vidrio, se integran de la base de datos del software SIMAPRO.

En este aspecto al tener una metodología y datos verificación, existe una amplia aceptación internacional de estos valores; aunque como cualquier otra base de datos generales, no representa con exactitud información geográfica, diferencias tecnologías, etc., lo que puede desencadenar una posible sobrestimación o subestimación del impacto real.

La calidad de los datos empleados en el presente estudio se fundamenta en la integración de información primaria y secundaria. Los datos primarios fueron obtenidos directamente del proceso productivo de la máquina 189, lo que asegura una alta representatividad de las condiciones reales de operación. Por su parte, los datos secundarios se obtuvieron mediante el software SIMAPRO, haciendo uso de bases de datos reconocidas internacionalmente como Ecoinvent.

La base de datos Ecoinvent se caracteriza por proporcionar información detallada y estandarizada sobre procesos industriales, flujos de materiales y consumo energético, siendo una de las principales fuentes utilizadas en estudios de Análisis de Ciclo de Vida a nivel mundial. De acuerdo con Wernet et al., 2016, Ecoinvent versión 3 incorpora mejoras metodológicas significativas, incluyendo la integración de diferentes enfoques de modelado, la regionalización de datos y la actualización constante de inventarios, lo que permite una representación más precisa de las cadenas de suministro globales y facilita la comparación entre estudios.

Asimismo, esta base de datos permite modelar sistemas complejos mediante distintos enfoques (como asignación y sistemas consecuenciales), lo que amplía la flexibilidad y aplicabilidad del ACV en distintos contextos industriales. Sin embargo, los autores también señalan que, aunque estos datos son robustos y ampliamente validados, pueden estar basados en promedios regionales o condiciones genéricas, lo que implica que no siempre reflejan con exactitud las condiciones específicas de un proceso particular.

En consecuencia, si bien el uso de SIMAPRO y la base de datos Ecoinvent aporta rigor metodológico, confiabilidad y consistencia al análisis, los resultados obtenidos presentan un grado inherente de incertidumbre. Por ello, deben interpretarse como estimaciones representativas del desempeño ambiental, considerando las limitaciones propias del uso de datos secundarios en estudios de ciclo de vida.

4.7.5.2. Comparación Cradle to Gate VS Cradle to Grave

El presente estudio se desarrolló bajo un enfoque *cradle to gate*, centrado exclusivamente en las etapas operativas de la máquina 189 dentro del proceso productivo. Por ello, no es posible realizar una comparación directa y completa con enfoques *cradle to grave*, ya que estos consideran un alcance más amplio que incluye desde la extracción de

materias primas hasta la disposición final de las palas eólicas considerando su vida útil de 25 años.

En términos relativos, el análisis realizado representa únicamente una fracción del impacto ambiental total asociado a una pala eólica. Esta proporción no puede cuantificarse con precisión debido a la falta de integración de datos correspondientes a etapas previas y posteriores (transporte, uso y fin de vida). No obstante, se reconoce que el proceso de fabricación de los materiales compuestos constituye una etapa relevante dentro del ciclo de vida, por lo que los resultados obtenidos aportan información valiosa a nivel operativo.

Y aunque esta investigación no alcanza el enfoque cradle to grave, la literatura sugiere que el uso de una pala eólica por 25 años genera alrededor de 300MWh de electricidad, evitando aproximadamente 150 tons de dióxido de carbono, por lo tanto , los impactos de manufactura del tejido de fibra de vidrio, representan solo el 20% del ciclo de vida total.

5 Recomendaciones

Con el fin de evaluar de manera integral los impactos ambientales asociados a toda la cadena de valor de la pala eólica, se recomienda extender el enfoque del Análisis de Ciclo de Vida hacia esquemas *cradle to grave*, donde la integración de datos específicos de proveedores también contribuiría a una mayor representatividad del análisis, esto permitirá una mejor comprensión del impacto total del producto y facilitará la comparación con estándares internacionales.

Para lo cual es fundamental fortalecer la recolección de datos primarios mediante la estandarización de registros operativos y ambientales dentro de la empresa. Asimismo, se recomienda mantener consistencia en los criterios de medición a lo largo del tiempo, con el fin de reducir la incertidumbre y mejorar la precisión de los resultados.

Se sugiere incorporar análisis de incertidumbre y sensibilidad en futuros estudios, con el objetivo de evaluar la robustez de los resultados ante variaciones en los datos de entrada. Esto permitirá identificar las variables críticas del sistema y mejorar la confiabilidad en la toma de decisiones.

Dado que la etapa de configuración de la máquina concentra aproximadamente el 70% del impacto ambiental, se recomienda enfocar los esfuerzos de mejora en esta fase, mediante la reducción del consumo de materia prima, la optimización de parámetros operativos y la implementación de tecnologías más eficientes energéticamente. Por lo que se recomienda evaluar la incorporación de fuentes de energía renovable y tecnologías de eficiencia energética en el proceso productivo, especialmente en las etapas de mayor consumo. Asimismo, considerar estrategias de compensación de emisiones de CO₂ como parte de la gestión ambiental corporativa.

Se recomienda continuar con el seguimiento y mejora del indicador FTQ, estableciendo metas progresivas cercanas al 100%. La evidencia del estudio demuestra que el incremento en este indicador reduce tanto los costos de mala calidad como los impactos ambientales asociados a reprocesos y desperdicios, se sugiere implementar estrategias de economía circular, como el reciclaje o reutilización de residuos de fibra de vidrio, mediante alianzas con empresas especializadas. Esto permitirá reducir la disposición en relleno sanitario y disminuir el impacto ambiental del proceso.

El modelo desarrollado puede ser replicado en otras máquinas, procesos o plantas del corporativo, con el objetivo de estandarizar la evaluación ambiental y generar indicadores comparables que apoyen la toma de decisiones a nivel estratégico. Incorporar el Análisis de Ciclo de Vida como una herramienta permanente dentro de la gestión de la empresa, vinculándolo con indicadores operativos y de calidad, permite orientar proyectos de mejora continua con un enfoque integral

Estas recomendaciones buscan consolidar la relación entre eficiencia operativa y desempeño ambiental, contribuyendo al desarrollo de procesos más sostenibles y competitivos dentro de la industria de materiales compuestos.

6 Conclusiones

6.1 Primer Objetivo

Se concluyo el inventario detallado para el límite del sistema *cradle to gate* de las principales entradas (electricidad: 1370 KWh, 22 ton de fibra de vidrio, 2300 kg de materiales de empaque y 200 lubricantes necesarios para el funcionamiento de la máquina) y salidas (producto terminado, residuos de fibra de vidrio equivalente al 5% del total de fibra de vidrio suministrada a la máquina, un incremento de 2-3% de producción debido al material no conforme rechazado por defectos de calidad, para la producción de un lote de tejido de fibra de vidrio biaxial, equivalente 18.965 ton.

6.2 Segundo Objetivo

El análisis ambiental realizado con los métodos ReCiPe y CML del software SIMAPRO, haciendo uso de datos primarios recolectados de la planta, y secundarios como es EcoInvent que viene incluido en el software; demuestra que el proceso de configuración de la máquina es la etapa más representativa de impacto ambiental (70%), donde las categorías de impacto principales fueron: el calentamiento global, agotamiento de combustibles fósiles, y ecotoxicidad acuática, los que se relacionan directamente con el consumo energético del proceso de producción del tejido de fibra de vidrio y el proceso productivo de la producción de fibra de vidrio del proveedor asiático.

En el presente estudio se determinó que la producción de tejido biaxial en SAERTEX México presenta un potencial de calentamiento global de 12 kg CO₂-eq por kilogramo de tejido bajo un enfoque *cradle to gate*. Este valor supera significativamente los referentes internacionales reportados en Europa, los cuales se sitúan en un rango aproximado de 2 a 3 kg CO₂-eq/kg. Esta brecha evidencia una mayor intensidad de carbono en el proceso productivo analizado, lo que representa un riesgo para la competitividad de la empresa en mercados donde la huella ambiental es un criterio clave de evaluación. Asimismo, se resalta la necesidad de implementar estrategias de reducción de emisiones que permitan alinear el desempeño ambiental con estándares internacionales y fortalecer su posicionamiento en la industria.

6.3 Tercer Objetivo

La evaluación del FTQ evidenció que su mejora de 97.14% a 98.82% generó una reducción aproximada del 10% en los costos de mala calidad, equivalente a un ahorro estimado de 100,000 USD anuales. Estos resultados confirman que la mejora de la calidad no solo tiene beneficios operativos, sino que representa una estrategia económicamente viable con impacto directo en la rentabilidad del proceso. En el contexto actual, donde la industria de energías renovables exige cadenas de suministro más sostenibles, minimizar la huella ambiental no solo responde a criterios ambientales, sino que se convierte en un factor clave para la permanencia y competitividad de la empresa en el mercado a futuro.

6.4 Cuarto Objetivo

Los resultados obtenidos mediante el análisis de ciclo de vida en el software SimaPro, así como el análisis de la información de las principales causas de los defectos de calidad de la máquina 189, permitieron elaborar un plan de trabajo orientado a la mejora del índice de calidad a la primera vez, se establecieron acciones concretas estableciendo una matriz de priorización y un presupuesto básico para la toma de decisiones. Los resultados del análisis costo-beneficio para los escenarios proyectados muestran que alcanzar niveles de 99.5% y 99.8% podría generar ahorros de hasta 50,496 USD anuales, con retornos de inversión superiores al 300% y periodos de recuperación menores a 3 meses.

7 Bibliografía

Achibat, F. E., Lebkiri, A., Aouane, E. mahjoub, Lougraimzi, H., Berrid, N., y Maqboul, A. (2023). ANALYSIS OF THE IMPACT OF SIX SIGMA AND LEAN MANUFACTURING ON THE PERFORMANCE OF COMPANIES. *Management Systems in Production Engineering*, 31(2). <https://doi.org/10.2478/mspe-2023-0020>

Afanador, L. (2015). ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA COMPARATIVO DEL SUMINISTRO DE AGUA, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

Balderrabano Briones, J., y Torres, X. H. (2018). CALIDAD E INNOVACIÓN EN LOS PROCESOS PRODUCTIVOS. www.redibai.org

Botti, L., Mora, C., y Regattieri, A. (2017). Integrating ergonomics and lean manufacturing principles in a hybrid assembly line. *Comput. Ind. Eng.*, 111, 481–491. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.05.011>

Carnerero, R. (2019). Analisis_de_Ciclo_de_Vida. DEGREN. <http://www.degren.eu/>

Cuggia-Jiménez, C., Orozco-Acosta, E., Mendoza-Galvis, D., Cuggia-Jiménez, C., Orozco-Acosta, E., y Mendoza-Galvis, D. (2020). Lean manufacturing: a systematic review in the food industry. *Información Tecnológica*, 31(5), 163–172. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642020000500163>

De Souza, J., y Alves, J. (2018). Lean-integrated management system: A model for sustainability improvement. *Google scholar*, 2667–2682.

Deshmukh, G., Patil, C., y Deshmukh, M. (2017). Manufacturing industry performance based on lean production principles. 2017 International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE), 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICNTE.2017.7947977>

Fullerton, R., Kennedy, F., y Widener, S. (2014). Lean manufacturing and firm performance: The incremental contribution of lean management accounting practices. *Journal of Operations Management*, 32, 414–428. <https://doi.org/10.1016/J.JOM.2014.09.002>

Gonzales Salas, D. P. (2018). UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA.

Gupta, S., y Jain, S. (2013). A literature review of lean manufacturing. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 8, 241–249. <https://doi.org/10.1080/17509653.2013.825074>

Heizer, Jay., Murrieta Murrieta, J. Elmer., y Render, Barry. (2009). *Principios de administración de operaciones*. Pearson.

Hernández, J., y Vizán, A. (2013). *Lean Manufacturing: Conceptos, técnicas e implantación*. Escuela de organización industrial. Perú. Obtenido de https://www.eoi.es/sites/default/files/savia/documents/EOI_LeanManufacturing_2013.pdf

Hodge, G. W., Ross, K. G., Joines, J., y Thoney, K. (2011). Adapting lean manufacturing principles to the textile industry. *Production Planning y Control*, 22, 237–247. <https://doi.org/10.1080/09537287.2010.498577>

Holloway, L., y Hall, A. (1997). Principles of Lean Manufacturing. *Industry and Higher Education*, 11, 241–245. <https://doi.org/10.1177/095042229701100410>

Jha, P. D. (2011). Wind Turbine Blade Design Requirements,» de *Wind Turbine Technology*. *Wind Turbine Technology*, 111-134.

Kishawy, H. A., Hegab, H., y E. S. (2018). Design for Sustainable Manufacturing: Approach, Implementation, and Assessment. *Sustainability*, 10, 10. doi:<https://doi.org/10.3390/su10103604>

Márquez Figueroa, L. J., García Alcaraz, J. L., Díaz Reza, J. R., y Gil López, J. A. (2021). Significance of Total Quality Management and Doing Right First Time in Promoting Environmental Sustainability. *Memoria Investigaciones En Ingeniería*, (27), 76–90. <https://doi.org/10.36561/ING.27.6>

Ontiveros, M. Á. L., González, M. H., Alvarado, L. W. R., Quijada, J. L., y Sosa, J. V. G. (2018). APLICABILIDAD DE LA MANUFACTURA ESBELTA EN PROBLEMAS DE PRODUCCIÓN: EL CASO DE LA LICENCIATURA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL DE LA UAM-AZC (APPLICABILITY OF LEAN MANUFACTURING IN PRODUCTION PROBLEMS: A CASE STUDY OF INDUSTRIAL ENGINEERING DEGREE IN THE UAM-AZC). <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:198485824>

Romero Rodríguez, B. I. (2003). ACV_GA (1). Tendencias Tecnológicas, 91–98.

Salazar, V., y Alejandro, G. (2010). Propuesta de mejora basada en el modelo de manufactura esbelta de los procesos productivos en la fábrica de confecciones Pinto S.A. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:131886292>

Secretaria Central de ISO. (2006). ISO 14044:2006 (traducción oficial). www.iso.org/standard/14044.html

Stiller, H. (1999). Material intensity of advanced composite materials: Results of a study for the Verbundwerkstofflabor Bremen e.V. Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy. <https://hdl.handle.net/10419/49096>

Supo, F., y Cavero, H. (2014). Fundamentos teórico y procedimentales de la investigación científica en ciencias sociales. Lima: Biblioteca Nacional del Perú.

Uddin, M. S., y Kumar, S. (2014a). Energy, emissions and environmental impact analysis of wind turbine using life cycle assessment technique. Journal of Cleaner Production, 69, 153–164. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.073>

Uddin, M. S., y Kumar, S. (2014b). Energy, emissions and environmental impact analysis of wind turbine using life cycle assessment technique. Journal of Cleaner Production, 69, 153–164. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.073>

Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., y Weidema, B. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. International Journal of Life Cycle Assessment, 21(9), 1218–1230. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>