



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL Y TECNOLOGÍAS SUSTENTABLES



**ANÁLISIS DEL PROCESO DE RECICLADO DE VIDRIO DE UNA EMPRESA
RECICLADORA DEL ESTADO DE MORELOS, BAJO LOS PRINCIPIOS DE
LA ECONOMÍA CIRCULAR.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA AMBIENTAL Y TECNOLOGÍAS
SUSTENTABLES.**

PRESENTA:

I.I DIEGO ALBERTO GONZÁLEZ MENDOZA

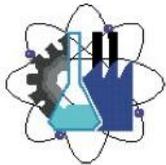
ASESOR: DRA. CONSTANZA MACHÍN RAMÍREZ

CO-ASESOR: DR. ROBERTO FLORES VELÁZQUEZ

DRA. LOYDA ALBAÑIL SÁNCHEZ.

DRA. YOLANDA FLORES VELÁZQUEZ.

DR. MANUEL SALDAÑA MALDONADO.



Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería

CUERNAVACA, MORELOS

MARZO, 2021.

“Este proyecto se realizó en la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, bajo la asesoría de la Dra. Constanza Machín Ramírez y con la Co-asesoría del Dr. Roberto Flores Velázquez con el apoyo financiero del Programa de Becas Nacionales de Posgrado, otorgado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).”

COMITÉ REVISOR.

Asesor: Dra. Constanza Machín Ramírez.

Co-asesor: Dr. Roberto Flores Velázquez.

Dra. Loyda Albañil Sánchez.

Dra. Yolanda Flores Velázquez.

Dr. Manuel Saldaña Maldonado.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería

Cuernavaca, Mor., a 22 de enero de 2021.

DR. ROBERTO FLORES VELÁZQUEZ
DRA. YOLANDA FLORES VELÁZQUEZ
DRA. CONSTANZA MACHÍN RAMÍREZ
DRA. LOYDA ALBAÑIL SÁNCHEZ
DR. MANUEL SALDAÑA MALDONADO
PROFESORES DE LA FCQEI
P R E S E N T E

Por este conducto, me permito informarle que ha sido asignado como integrante de la Comisión Revisora de la tesis que presenta Diego Alberto González Mendoza, titulada: "Análisis del Proceso de Reciclado de Vidrio de una empresa recicladora del Estado de Morelos, bajo los principios de la Economía Circular", realizada bajo la dirección de la Dra. Constanza Machín Ramírez del Programa Educativo de Maestría en Ingeniería Ambiental y Tecnologías Sustentables. Agradezco su valiosa participación en esta Comisión y quedo a sus órdenes para cualquier aclaración o duda al respecto.

A T E N T A M E N T E
Por una humanidad culta

DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ
ENCARGADA DE DESPACHO DE LA DIRECCIÓN DE LA FCQEI

D I C T A M E N

DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ
ENCARGADA DE DESPACHO DE LA DIRECCIÓN DE LA FCQEI
P R E S E N T E

En respuesta a su amable solicitud para formar parte de la Comisión Revisora de la tesis mencionada y una vez realizada la revisión correspondiente, me permito informarle que mi VOTO es:.

DICTAMEN

NOMBRE	VOTO	FIRMA
Dr. Roberto Flores Velázquez	APROBADO	
Dra. Yolanda Flores Velázquez	APROBADO	
Dra. Constanza Machín Ramírez	APROBADO	
Dra. Loyda Albañil Sánchez	APROBADO	
Dr. Manuel Saldaña Maldonado	APROBADO	

Se anexan firmas electrónicas

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

VIRIDIANA AYDEE LEON HERNANDEZ | Fecha:2021-01-22 16:05:11 | Firmante

Xx3iNLBtNnVofsdmhnR0J2CXkurgxyCzeqeahSPSDn+YK6QLRIDDDjoGyCMtitwEJpswGc00fCZgNqzGVWkjAGlx+GVt3EPzISd9nInipmRM7gmH37VhK+cC3yCaeTEgV8Q09JZZ5v50CQrQyYBTWPibCkMskssOVK1Bh7X8MG/37L2WNUop+4b55LwZ9q5iJgo0Rx8HsnSGgXNGYuaEJmxJ6pMxKvJcBEvMBuHhmfKKyRA1eGyPe0iFIVEkVQAiJMAiOsfBwcE4px5Qn9GjsDBtOV6i5estf6qYnQ9EJqhUe3GWxwcbNROIgBukSEjCH1OZbslirctQqTIfypA==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



1zLFba

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/QLR6qpyzrJTAOHdkHj2K3n0EkypxsEFI>



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

MANUEL SALDAÑA MALDONADO | Fecha:2021-01-25 12:07:45 | Firmante

N/m7MBw/eNI+cul2+u0N2Ez/O21XLL2j5b2b33WTF9HsOU4nBxtU+pz+pTn7+3HAGJ+VZwq9D0rDoScEYoJQLku6Qab1IXtXUAgYVmKxr1wIX0pLuZnn7LNdNC+5OExuXNXi hzqpiRjhDRpSR+drijllHQPrY/xxNRhu4twNfO3bzCsGQ5dSM4pNwGTvLVT/j6X2dXRjkCILPnic2NI4OQJXBGRONSy/gh8d7ol8quctW7Mr6Wnle7CaTa263+En56IHVAdSgSK8DmDq NTdV9jzFuAaxP5Eyw/beBbBi9OkLXI2i9PpGxSgBimZaoiMepWKukRUuxTW7INmm8DulZg==

ROBERTO FLORES VELAZQUEZ | Fecha:2021-01-25 12:08:29 | Firmante

mclbRjAlfDz/OviTDN611NOz84uVI5ZpJw9KuaB2ckGbRmvGy1H6CkwV75xb4iA4+SblARPFQbNFf83D1DudYsMv7v4XDKWj0S9lwrOdFdmZDAO+8RjA64OVhovxK3L1G4bkRV UG003oCGVy9DIP5XUZ8gYQNCIm71VMxqcElqxFVssSJHfM/PZlkG9oM3XpGcTMYIHx2fzEJlrTEFgvUa9M/QDEKxQbnRVPngYcQzKPr7XQgen1z36NB2wE23iEc1LGFxfj5ysB zrQLfS0jgh4jnl/oEzxyWYJyqYRdEk3z6XHXTQeeuQr99Wp99KVlpXGsyP7MRropFdQLbvt6fua==

LOYDA ALBAÑIL SANCHEZ | Fecha:2021-01-25 18:59:55 | Firmante

OkL5vC3KcWcjkCQ3PrVAjKT6NfXWkm+AYfHe6vdmamQwoeOUmpjDYUaFHGsTZA35aZA9D6DZni8ALw492YI986ZEfbox6CRVUXAi/YfZPIE8aXUuRC+wnCcQmzloD0a10sA 4u+EgqfU7THVZzgiLGFdJMXvaWlhJNHhp1CAwIPbsMgT64qJgJespiBwLJw5i+Wo+KqjWkHHHDcV0B5SEMhbFPHQOgjrQh3GRcEgtyFR53b/I83eU1kSzigxHAF9iVunPyD0gg IQ0Ro2TuXX/IClnF+16i6zARHK3VLHF0G6uAOeCozy+6FPKjDhX9le6X5Gc1JteVvTsrch9DIDQ==

YOLANDA FLORES VELAZQUEZ | Fecha:2021-01-25 20:32:52 | Firmante

hEVXyGCPqeTTa7oy+uGa+gCNtg5vaSrBfmWrgAx5R3wxsPIJ1bnQ2A3Jzi0e9CpZpCShXB/hPcmS9Obb4iy+kM4IkRtr5hEc5lqs/cCWUemVdqwTI096OKB/K/rVIF3FF7sBo0hVoZ 5jbxTQEX24CT87JTwV923NmYLy+nYfjmdQiR8kHcruKrmF02PmZoYwC2BMcQTQjhrByZh7TsUL6RZ2ooqIRDnWB+JTc/EFUJeij15+nmq5g7QySZRA7h686uV9/oZIE8x7ASzJ pri15WNMQF62eSe8Kma527c0aLYQLRo6BcSC61BntstYxDNTIeAmDJ0by9v63YFrKLyMQ==

CONSTANZA MACHIN RAMIREZ | Fecha:2021-01-29 18:29:54 | Firmante

PKuzv/MAM6RkflimThBUSJIPHHIJZQAWDNp4Piol6QHgBUCJ7SxjmHCgvUfK4x7cgrhUz3DO7m/qchMOmsxk6Ddmws0PtGE6OJ4A5hGSzkwMQNLjugqOGXxlDyostA8SiPnJ eRmTTFs/gO2dgXVZdf//K5GEL3ayFpsuU2xhz+8d3ogDWFqsq6juu1GoOENDa/qYUEiX4LLxxXwrlshU4kcd86czLksabBalwnXJ7GxPwSO1PiwFXUCWAo3C+7Jb1SLw36uz6qIV zBtKAlphvT8/9AEZGUxnsPZcniRafjzuO1YTWffXoIBLeXIQM12krPpi2GthiJS35fvIjB8kg==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



RU75wA

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/MExnIGCS7Y01OYUc6zbHshYI5afhnuH>



DEDICATORIAS.

- A la vida por permitirme llevar a cabo todo este proceso durante 2 años consecutivos.
- A mi abuelita Rosa y Prima Alejandra, quienes son mis ángeles que me apoyan y me incentivan a vivir día con día, un abrazo enorme hasta el cielo.
- A mi familia completa Ángeles, Mara y Deni, quienes me han apoyado en cada una de mis pasiones y especialmente a mi Padre Cándido, quien me incentivó, fue mi maestro y mi más grande amigo, a quien le debo completamente todo lo que soy, este logro es por y para él, aunque su presencia ya no es física siempre vivirá en mi corazón. Te amo Padre.
- A mi mejor amiga Karen, quien me ha ayudado en todo este proceso y me ha brindado la energía necesaria para nunca rendirme a través de las risas y los sueños, su lugar en mi corazón es especial.
- A cada uno de mis sinodales, Dra. Yolanda, Dra. Loyda, Dr. Manuel, quienes me han hecho ver todo lo que se puede aprender dedicando tiempo y esfuerzo en tus pasiones, pero especialmente a la Dra. Constanza y al Dr. Roberto quienes ha sido sumamente pacientes conmigo y maestros de vida y libro, quienes me han enseñado mucho de lo que hoy sé y me han motivado a continuar aprendiendo, mil gracias por todo.

AGRADECIMIENTOS.

Quiero agradecer a la empresa Recicladora Guadalajara S.A de C.V por brindarme todos los recursos y herramientas que fueron necesarios para llevar a cabo el proceso de investigación. No hubiese podido arribar a estos resultados de no haber sido por su incondicional ayuda.

Además, quiero agradecer a L.A. Víctor García quien con sus conocimientos y apoyo me abrió las puertas de la empresa antes mencionada para desarrollar cada una de las etapas de este proyecto y así alcanzar los objetivos planteados.

¡Muchas Gracias!

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1.....	2
1.1 ANTECEDENTES.....	2
1.1.1 La Economía Circular alrededor del mundo.....	2
1.1.2 Publicaciones realizadas sobre Economía Circular. Distribución geográfica.....	5
1.1.3. Experiencias de éxito de la Economía Circular.....	9
1.1.4. Experiencias en México.....	11
1.2. Marco Teórico.....	11
1.2.1. Economía Lineal.....	11
1.2.2. Economía Circular.....	12
1.2.3. Los orígenes del modelo de Economía Circular.....	13
1.2.4. Escuelas de pensamiento de la Economía Circular.....	13
1.2.5. Orígenes de la Economía Circular.....	18
1.2.6 Economía Circular vs Economía lineal.....	18
1.2.7. Esquema General de la Economía Lineal.....	19
1.2.8. Esquema general de la Economía Circular.....	20
1.2.9. Factores por los que es conveniente transitar de una Economía Lineal a una Economía Circular.....	20
1.2.10. Desarrollo de la Responsabilidad Social Corporativa.....	21
1.2.11. Transición hacia una Economía Circular.....	22
1.2.12. Indicadores de la Economía Circular.....	24
1.2.13. Beneficios de aplicar una Economía Circular.....	28
1.2.14. Composición del Vidrio y su reciclaje.....	29
1.2.15 Reciclaje de Vidrio.....	30
1.2.16. Beneficios medioambientales de reciclar vidrio.....	31
1.2.17. Vidrio de seguridad (vidrio laminado).....	31
1.2.18. PVB del vidrio laminado.....	32
1.2.19. Problemática y reciclado de PVB.....	33
CAPÍTULO 2.....	33
2.1. Planteamiento del problema de la investigación.....	33
2.2. Justificación.....	35
2.3 Hipótesis.....	37
2.4 Objetivo General.....	37

2.5 Objetivos específicos.	37
CAPÍTULO 3.	38
3.1 Estrategia experimental.	38
3.2 Materiales y Métodos.	38
3.2.1 Guía para el desarrollo del diagnóstico en Economía Circular.	39
3.2.2 Mapa de Flujo de Materiales y Recursos.	39
3.2.3 Uso de Indicadores de Circularidad	41
3.2.3.1 Índice de circularidad del Material.	41
3.2.3.1.1 Ejemplo Práctico sobre el cálculo del MCI.	44
3.2.3.2 Circular Economy Toolkit.	47
3.2.3.3 Análisis de Ciclo de Vida.	49
3.2.4 Oportunidades de circularidad.	54
CAPITULO 4.	56
4.1 Resultados.	56
4.1.1 Procesos Productivos.	59
4.1.2 Diagramas Analíticos.	62
4.1.3 Entrada y Salida de Materiales.	65
4.1.4 Producción de Vidrio Des-laminado.	65
4.1.5 Vidrio Mixto.	66
4.1.6 Diversidad de clientes (nacional e internacional).	68
4.1.7 Mapa de flujo de Materiales y Recursos.	69
4.1.8 Cálculo del Índice de Circularidad del Material.	69
4.1.9 Aplicación de la herramienta Circular Economy Toolkit.	73
4.1.10 Aplicación del Análisis de Ciclo de Vida.	75
4.1.11 Identificación de Oportunidades de Circularidad.	91
4.2 Discusión.	95
CAPÍTULO 5.	102
5.1 Conclusiones.	102
PERSPECTIVAS.	103
REFERENCIAS.	104
ANEXOS.	107
Anexo 1. Preguntas empleadas en la herramienta Circular Economy Toolkit.	107
Anexo 2. Respuestas a las preguntas empleadas en la herramienta Circular Economy Toolkit.	109
Anexo 3. Artículo Científico.	111

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Resumen de Artículos analizados desde las perspectivas de la Economía Circular.....	5
Tabla 2. Acontecimientos más importantes en la evolución de la Economía Circular.....	18
Tabla 3. Nomenclatura para el cálculo del Indicador de Circularidad del Material (MCI).....	42
Tabla 4. Ecuaciones para el cálculo el Indicador de Circularidad del Material (MCI)	42
Tabla 5. Acciones que realizar en la llegada de los residuos sólidos a las instalaciones para las cuales está solicitando autorización, incluyendo las descargas, pesajes y aquellas que se realicen para su almacenamiento, procesamiento, tratamiento o disposición final. Fuente: Recicladora Guadalajara S.A de C.V	65
Tabla 6. Relación de viajes y producción de vidrio des-laminado en ton durante el año 2019.....	66
Tabla 7. Relación de entradas y salidas de vidrio mixto.....	67
Tabla 8. Relación de entradas y salidas (ton) en función de la deuda generada en la limpieza de vidrio mixto.	67
Tabla 9. Resumen del potencial de mejora en cada subárea contemplada por la herramienta analizada, considerando la información de la Planta Recicladora Guadalajara*.....	75
Tabla 10. Descripción de los elementos y relaciones del proceso productivo de des-laminado.	77
Tabla 11. Inventario de las entradas, salidas y recursos utilizados en el proceso de des-laminado considerando la jornada laboral de 8 horas.....	81
Tabla 12. Inventario de las emisiones por consumo energético en las diversas etapas del proceso de des-laminado.....	81
Tabla 13. Análisis de contribución e influencia para las diversas etapas del proceso de des-laminado en la categoría de calentamiento global.....	88
Tabla 14. Análisis de contribución e influencia para las diversas etapas del proceso de des-laminado en la categoría de escasez de agua.	89
Tabla 15. Comparación de las características principales del proceso actual y el integrado con posibles mejoras.....	92
Tabla 16. Compañías y sus aplicaciones para el aprovechamiento del PVB reciclado en diversos productos.....	93
Tabla 17. Emisiones de CO ₂ eq en diversos sectores de producción en México.	94
Tabla 18. Huella Hídrica para productos de diversa índole.....	95

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Marco integral de la Economía Circular.	17
Figura 2. Economía Circular vs Economía Lineal.....	19
Figura 3. Marco Integral de la Economía Circular.	24
Figura 4. Mapa de flujo de materiales y recursos para un proceso definido caracterizado por operación identificada.....	40
Figura 5. Simulador para la obtención del MCI (Índice de Circularidad del Material).	43
Figura 6. Simulador de los valores de las ecuaciones del Índice de Circularidad del Material (MCI). ..	43

Figura 7. Información relevante para introducir en función del proceso o servicio a evaluar bajo las diferentes subáreas consideradas por la herramienta.	48
Figura 8. Sub-áreas consideradas dentro de la herramienta las cuales son coloreadas por color verde, amarillo o gris en función del potencial de mejora al que se encuentren susceptibles.	48
Figura 9. Fases de análisis de ciclo de vida del producto.	49
Figura 10. Ejemplo representativo del análisis de impacto dentro del análisis de ciclo de vida.	52
Figura 11. Cadena de análisis del ciclo de vida como un esquema general del mismo.	53
Figura 12. Identificación de oportunidades de circularidad considerando las operaciones del proceso definido en sus diversas fases.	55
Figura 13. Imagen satelital del Parque Industrial Cuautla.	57
Figura 14. Imagen satelital de la empresa Recicladora Guadalajara S.A de C.V.	57
Figura 15. Distribución de materiales y zonas de trabajo de la empresa Recicladora Guadalajara S.A de C.V.	59
Figura 16. Diagrama de flujo del proceso de des-laminado donde se han determinado las entradas y correspondientes salidas en cada una de las etapas de este.	69
Figura 17. Ciclo de vida del proceso de parabrisas desde 2 puntos en específico (Saint Gobain y planta recicladora), donde se considera el proceso principal de la empresa (des-laminado), en el cual se recupera de forma parcial el vidrio para su venta posterior. Fuente: elaboración propia.	70
Figura 18. Datos ingresados en el simulador.	71
Figura 19. Resultado de cada una de las variables del simulador.	71
Figura 20. Resultados de las variables implicados en la simulación para el calcín o vidrio reciclado. ..	72
Figura 21. Subáreas coloreadas consideradas dentro de la herramienta en función del potencial de mejora al que se encuentren susceptibles.	74
Figura 22. Ciclo de vida del parabrisas en la planta Recicladora de Vidrio.	76
Figura 23. Etapas del proceso de des-laminado de la Planta Recicladora de Vidrio.	77
Figura 24. Diagrama de flujo del proceso de des-laminado donde se han determinado las entradas y correspondientes salidas en cada una de las etapas de este.	80
Figura 25. Diagrama Sankey del proceso de des-laminado que muestra flujos, entradas y salidas de cada fase del proceso.	82
Figura 26. Información sobre la cantidad de kg eq de CO_2 en el proceso de des-laminado separando el flujo total del vidrio recuperado y el flujo del plástico separado.	83
Figura 27. Resumen de la cantidad de kg eq de CO_2 para cada fase del proceso de des-laminado.	83
Figura 28. Cantidad total de emisiones de kg eq de CO_2 para el flujo del vidrio recuperado y del polímero separado.	84
Figura 29. Comparación de las diversas fases del proceso de des-laminado en función de las diferentes categorías de impacto.	85
Figura 30. Red general del proceso de des-laminado donde se obtuvieron resultados finales del impacto ambiental.	86
Figura 31. Comparación de la categoría escasez de agua para las diversas etapas del proceso de des-laminado.	87
Figura 32. Modificaciones y recomendaciones en las diversas fases del proceso de des-laminado de parabrisas de la empresa Recicladora Guadalajara.	91

LISTA DE ABREVIATURAS.

ABS: Acrilonitrilo butadieno estireno

ACV: Análisis de Ciclo de Vida

C2C: Cradel to Cradel (de cuna a cuna)

CET: Circular Economy Toolkit

CO₂: Dióxido de carbono

EC: Economía Circular

EL: Economía Lineal

EPA: Environmental Protection Agency

ICV: Impactos del Ciclo de Vida

ISO: International Organization for Standardization

Kq eq: Kilogramos equivalentes

kWh: kilo watt hora

L: Litros

MCI: Circular Material Indicator (indicador de circularidad del material)

NO_x: Óxidos de nitrógeno

PA6: Nailon 6 (poliamida 6)

PVB: Butiral de polivinilo

PVC: Policloruro de vinilo

SETAC: Society for Environmental Toxicology and Chemistry

SO₂: Dióxido de azufre

Ton: Tonelada

UE: Unión Europea

WWF: World Wildlife Foundation

RESUMEN.

Actualmente, la economía circular juega un papel fundamental para la conservación y uso sustentable de los recursos en nuestro planeta. Hoy en día, diferentes instituciones, así como gobiernos de diversos países han unido esfuerzos y se han dado a la tarea de buscar nuevas alternativas que permitan alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sustentable de tal forma que, entre otros propósitos, pueda reducirse la problemática que existe respecto a la generación de contaminantes y su impacto al medio ambiente. La Economía Circular, con un enfoque pragmático, da soluciones a la problemática actual del planeta en este sentido.

En el presente proyecto de investigación se realizó la evaluación diagnóstica del proceso de reciclado de parabrisas de una empresa recicladora de vidrio, mediante el uso de 3 herramientas enfocadas en la Economía Circular y el análisis de los resultados obtenidos por su aplicación. La empresa seleccionada presenta una problemática ambiental debido a la gran cantidad de residuo polimérico (PVB) procedente de la separación del vidrio de parabrisas que genera y a su incorrecta disposición final. De ahí la importancia de realizar una evaluación diagnóstica con la finalidad de identificar los índices de circularidad del proceso y las áreas de oportunidad que pueden modificarse para transitar hacia un proceso productivo más circular. Las herramientas utilizadas para ello fueron el Índice de Circularidad del Material, la herramienta Circular Economy Toolkit y el Análisis de Ciclo de Vida. Con el análisis de los resultados obtenidos y con base a los principios de la Economía Circular, se elaboró un informe técnico para la empresa, resaltando las debilidades, áreas de oportunidad del proceso y beneficios que podrían obtenerse en el ámbito económico, social y ambiental.

INTRODUCCIÓN.

La relación entre las industrias y el medio ambiente es crucial para el desempeño empresarial. Debido a las nuevas sociedades de consumo y al sorprendente crecimiento en la actividad industrial, se genera cada vez un mayor número de emisiones al medio ambiente, así como desechos y sustancias contaminantes que ocasionan un impacto y desequilibrio en el planeta cada vez más severo. El crecimiento de la población mundial ha producido un fuerte crecimiento de la demanda de recursos (bienes y servicios) ocasionando a su vez un mayor consumo de recursos naturales. Los recursos de la Tierra son limitados y, por lo tanto, el crecimiento económico y de la población genera un desequilibrio que el planeta no puede soportar. De ahí que sea necesaria la búsqueda de estrategias que permitan sostener el equilibrio natural en el uso de

recursos y, para ello, el control de la generación de desechos es de vital importancia. Actualmente, la sociedad está inmersa en un modelo económico lineal, basado en “tomar-fabricar- consumir-eliminar”, que es agresivo con el medio y agotará las fuentes de suministro, tanto materiales como energéticas (Ruiz Saiz-Aja, et al., 2016).

En este contexto, la Economía Circular es un paradigma que tiene como objetivo primordial el generar prosperidad económica, proteger o mitigar el impacto que se genera sobre el medio ambiente y prevenir la contaminación, facilitando así el desarrollo sustentable.

El creciente interés de gobiernos, industria y sociedad en la implementación de la Economía Circular ha llevado a indagar sobre su conexión directa con el fin último de este modelo: la sustentabilidad. Para ello, en este proyecto, se propone el realizar un análisis y revisión de los artículos científicos y publicaciones en general que se han llevado a cabo sobre este tema, con el propósito de evidenciar las ventajas que tiene su implementación.

De igual forma, se pretende realizar la evaluación del proceso productivo de reciclaje de vidrio de la empresa Recicladora Guadalajara S.A de C.V ubicada en el Parque Industrial Cuautla, mediante la interpretación de los resultados obtenidos del Análisis de Ciclo de Vida del ciclo productivo y el empleo de indicadores de circularidad.

Finalmente, se integrará un documento maestro (ejecutivo) que contenga el diagnóstico y evaluación realizados, así como una propuesta sobre las modificaciones que pueden realizarse en el proceso, que considere los principios fundamentales de la Economía Circular y que impacte de forma sustentable en dicha empresa.

CAPÍTULO 1.

1.1 ANTECEDENTES.

1.1.1 La Economía Circular alrededor del mundo.

La Economía Circular (EC) se propone como la alternativa lógica y viable, que corrige los principales problemas de la Economía Lineal. Los bienes no son ilimitados y generan residuos imposibles de gestionar adecuadamente. La EC pretende conseguir que los productos, componentes y recursos en general, mantengan su utilidad y valor en todo momento, buscando alcanzar la premisa de residuos cero.

El origen de la EC no se remonta a una fecha específica o a un único autor, sino a la contribución de muchos. Desde finales de la década de los 70's las aplicaciones prácticas en los sistemas económicos y procesos industriales modernos han cobrado factura. En 1976, el arquitecto y economista Walter Stahel esbozó en su informe de investigación para la Comisión Europea, escrito junto con Genevieve Reday, la visión de una economía en bucles (o economía circular) y su impacto en la creación de empleo, competitividad económica, ahorro de recursos y prevención de residuos. A. Stahel trabajó en el desarrollo de un enfoque de bucle cerrado para los procesos de producción, fundando además el *Product Life Institute* en Ginebra hace más de 25 años (Alcubilla, 2015).

Durante los últimos años, la EC fue reintroducida a nivel europeo a partir de la influencia ejercida por la *Fundación Ellen MacArthur*, que logró que esta idea fuese aceptada en su totalidad por la Comisión Europea (CE) y las juntas directivas de grandes corporaciones multinacionales. *La Fundación Ellen MacArthur* ha conseguido que se perciba a la EC como el cambio radical que comprende tanto políticas a nivel europeo, ya sean a escala nacional, regional y local, como políticas empresariales, que van desde multinacionales a pequeños negocios. Con ella se puede fomentar el crecimiento económico planeando los retos globales de escasez de los recursos y materias primas, manteniendo o, incluso, incrementando la productividad y los beneficios. Al mismo tiempo, se está desarrollando un cambio de base de pensamiento social, que tiene un efecto tanto en el concepto ciudadano como en el de concepto de consumidor, donde se valora el proceso del producto y no sólo el producto en sí (Martín, 2017).

A pesar de su notable relación con el modelo de las 3R's (reducir, reusar y reciclar) y de desarrollo sustentable, la EC busca ir un paso más adelante a través de una transformación en el que no sólo se crece generando una menor cantidad de residuos, sino que parta del cierre de "ciclos de vida", el cual puede ser aplicado a una gran cantidad de áreas diferentes.

Sus principales defensores sostienen que la EC debe considerarse como una nueva filosofía o modelo y no como un movimiento ecológico, ya que busca la regeneración o restauración por diseño, que trata de que los productos, componentes y materias primas mantengan su utilidad y valor máximo en todo momento (Hernández, 2017).

En las dos últimas décadas, China ha sido uno de los países del mundo con el crecimiento económico más rápido, lo que la ha convertido en apenas 20 años en una de las potencias económicas más grandes del planeta. Sin embargo, su relativa economía también conlleva una serie de problemas que el país se está viendo obligado a afrontar si quiere llevar al cabo un desarrollo sustentable, entre los cuales uno de los

más preocupantes y relevantes en estos momentos es el inmenso deterioro medioambiental que está sufriendo (Aguñaga, 2017).

Con todo ello en mente, las autoridades medioambientales chinas, inspiradas en las Leyes de Economía de Reciclaje japonesas y alemanas, adoptaron el concepto de EC, el cual, alejándose del modelo lineal de materiales (recurso – producto – deshecho), quiere transformarlo en uno circular, donde los productos pueden volver a convertirse en recursos otra vez. Para conseguir este nuevo desarrollo económico basado en reducir los efectos que la presente economía tiene en los recursos naturales, así como el daño que causa a los ambientes naturales, se quieren implementar los principios de reducción, reutilización y reciclaje en todas las fases de producción, consumo y distribución (Ellen Macarthur Foundation, 2017).

La EC en China y en el resto del mundo parece seguir patrones muy diferentes. En China, la EC es el resultado directo de una estrategia política nacional, por lo que se trata de un enfoque de arriba a abajo, y su implementación se estructura siguiendo tanto un enfoque horizontal como vertical. Este enfoque de arriba - abajo de la estrategia nacional china también se refleja en los instrumentos utilizados, que son fundamentalmente de comando y control, para corregir los errores de la economía pasada, tal como sucede en Europa, Japón y Estados Unidos (Cerde, 2016).

Así pues, tanto las empresas estatales como privadas, el gobierno y las infraestructuras privadas, así como los consumidores, tienen un papel en el proceso de conseguir una EC sustentable en China. Dentro de esta estrategia hay 3 niveles básicos de acción. En el nivel de la empresa individual, los gerentes deben buscar la eficiencia a través de los 3 principios básicos, reduciendo el consumo de recursos y emisiones contaminantes y de residuos, reutilizando los recursos y reciclando los subproductos. En el segundo nivel, dentro de los parques eco-industriales e industrias en grupo, es necesario reutilizar y reciclar los recursos, de tal manera que circulen totalmente dentro del sistema de producción local. Finalmente, en el tercer nivel, se tienen que integrar los diferentes sistemas de producción y consumo en las diferentes regiones chinas, pudiendo de esa manera circular los recursos entre las industrias y los sistemas urbanos. Este nivel requiere el desarrollo municipal o regional de sistemas de recolección, almacenaje, procesado y distribución para cada producto. Así mismo, el desarrollo adecuado de los 3 niveles exige empresas de producción más limpias y facilidades públicas para poder aplicar el concepto de EC (Hernandez, et al., 2008).

La Administración Estatal de Protección Ambiental de China (SEPA) mostró gran interés en la EC y se convirtió en una agencia gubernamental que lideró esta filosofía a principios de siglo. La SEPA ha jugado un papel importante en 3 aspectos (Cerde, 2016):

- 1) apoyando estudios sobre EC y movilizándolo a importantes actores implicados para que centren su atención en ella,
- 2) lanzando proyectos piloto sobre producción limpia, parques eco-industriales y construcción de regiones de reciclaje a nivel local y regional.
- 3) haciendo recomendaciones al Consejo de Estado para que se ponga atención a la importancia de la EC.

Hasta la fecha, las acciones emprendidas por el gobierno chino están generando resultados alentadores.

1.1.2 Publicaciones realizadas sobre Economía Circular. Distribución geográfica.

En el año 2016, Lieder et al. (2016) realizó un estudio en el que analizó las investigaciones publicadas a la fecha a nivel mundial, relacionadas con la EC, en el que evaluó la información encontrada en función al alcance de esta en diferentes áreas: escasez de recursos, impacto ambiental y beneficios económicos (tabla 1):

Tabla 1. Resumen de Artículos analizados desde las perspectivas de la Economía Circular.
Modificado de: (Lieder & Rashid, 2016).

Categoría	Aspectos relevantes	Referencias
Escasez de Recursos	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis y comparación de definiciones y descripciones de materiales producidos • Resumen de investigación actual en el área de metales preciosos recuperándolos, usando bioadsorción incluyendo aplicación y uso potencial 	Perk et al,2015; Dodson et al,2015
	<ul style="list-style-type: none"> • Parques de desarrollo eco-industriales en Tianjin,Fuzhou y Xián China • Uso de energía limpia en Jincheng China, incluyendo el potencial, estatus actual y futuro de energía renovable • Fusión del concepto de Economía Circular marina y la Economía de Desarrollo • Examinación del recurso de consumo de material de la construcción de edificaciones chinas 	Shi y Yu,2014; Lu,2104; Change et al,2011; Tu et al,2011; Hara et al,2011; Fernandez,2007
	<ul style="list-style-type: none"> • Aproximación del análisis integral de multi escala del metabolismo social • Concepto del análisis objetivo de parque eco-industrial. • Promoción del concepto genérico de Economía Circular 	Geng et al,2011; Geldermann et al,2010; Leontief et al,1991

Impacto Ambiental	<ul style="list-style-type: none"> • Posibilidades de la industria química y energética para la discusión, entre otros, Economía Circular del CO₂ y su impacto. • Uso del desperdicio de comida proveniente de la manufacturación de la comida 	Ampelli et al,2015; Mirabella et al,2014; Xue et al,2014; Grundmann et al,2013; Huang et al,2009
	<ul style="list-style-type: none"> • Presentación de los cambios durante los diferentes planes de 5 años para el control de las emisiones en China • Resumen de los antecedentes, objetivos y problemas de los más importantes resultados de un proyecto fundado en EU acerca de los riesgos de los químicos • Tecnologías actuales y estado de tratamiento en China. 	Ampelli et al,2015; Mirabella et al,2014; Xue et al,2014; Grundmann et al,2013; Huang et al,2009
	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis del manejo de las prácticas de desperdicio en Inglaterra • Examinación de las razones del reciclaje de acero que es aun relativamente débil en China • Investigación experimental de cenizas para un re-uso efectivo • Caracterización del sistema de reciclaje en Suzhou, China. 	Lu et al,2015; Kamma,2015; Farmer et al,2015; Wubbeke and Heroth,2014; Matus et al,2012; Xi et al,2011
Beneficios Económicos	<ul style="list-style-type: none"> • Cambios en el proceso de tratamiento de agua potable • Características y ventajas heredadas en la Economía Circular, discutiendo que la Economía Circular puede ser acelerada en la política publica • Examinación de la teoría de la Economía Circular y los puntos destacados de las mejores prácticas iniciales • Introducción a algunos principios fundamentales y aproximaciones en la economía ambiental 	Yu et al, 2015 ^a ; Schettters et al,2015; Bonciu,2014; Stahek,2013; Crainer,2013; Webster,2013; Andersen,2007
	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis de tiempo real para la calibración adaptativa y desarrollo de la Economía Circular • Investigación de los diferentes grupos manufactureros en China y su implementación verde en la cadena de suministro • Discusión del estado actual de la Economía Circular y el desarrollo sustentable de los parques eco-industriales 	Ge and Jackson,2014; Ongondo et al,2013; Li et al,2012; Zhu,Geng,Sarkis, et al,2011; Zhu,Geng & La,2011; Mayers et al, 2005

Para realizar el análisis, el autor, desde una perspectiva de la EC, agrupó las publicaciones en 3 categorías, incluyendo artículos, estudios específicos y trabajos de desarrollo. Como se puede observar, la mayor parte de la investigación de EC se realiza desde las perspectivas de escasez de recursos e impacto ambiental. Sin embargo, también hay considerable investigación de la EC que tiene en cuenta los beneficios económicos y el medio ambiente (Lieder & Rashid, 2016).

China es el país que presenta mayor número de publicaciones en este nuevo campo de estudio porque se considera el país pionero en estudios metodológicos de EC. Por ende, en el presente proyecto se realizó una búsqueda a través del buscador académico llamado Google Scholar, donde, se llevó a cabo la

cuantificación del número de publicaciones a partir del año 1995 hasta el 2019, considerando patentes, citas y artículos sobre el tema de estudio (ver gráfico 1).

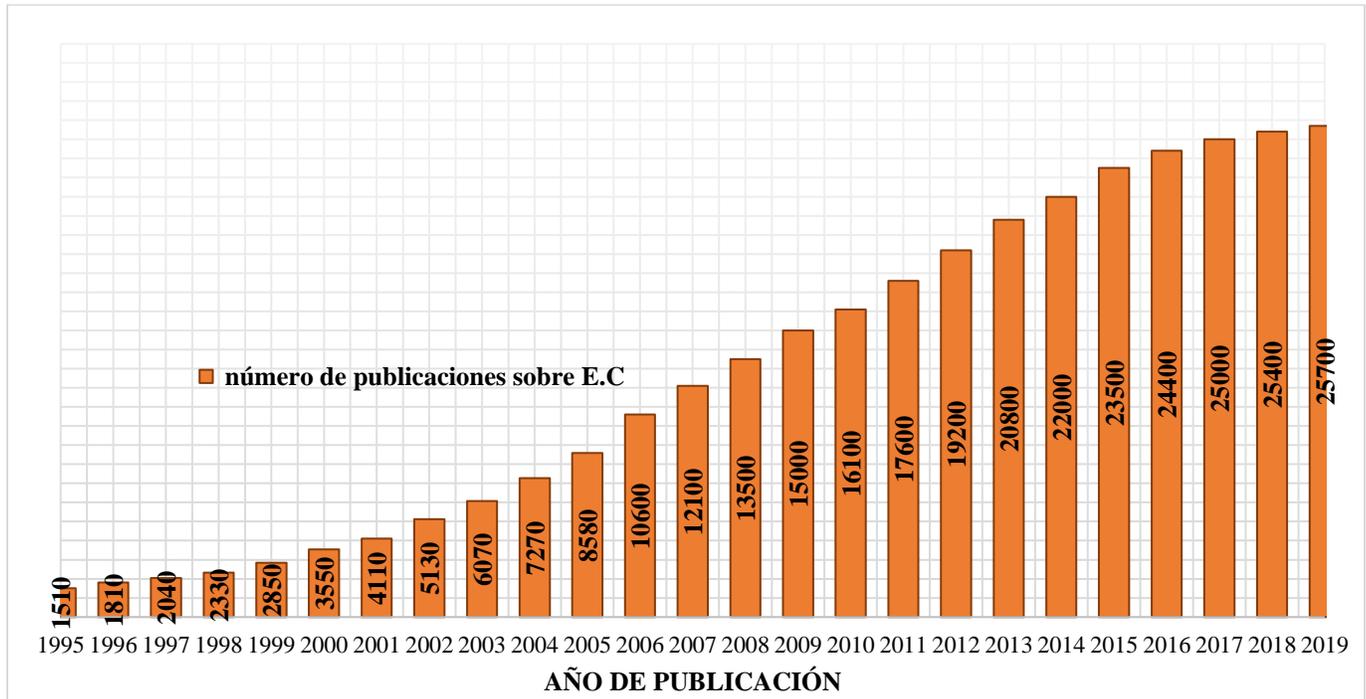


Gráfico 1. Número de publicaciones sobre Economía Circular cuantificadas a través del buscador Google Scholar entre los años 1995 y 2019.
Fuente: elaboración propia

Actualmente la EC está siendo implementada en el mundo real en muchos ámbitos y lugares diferentes y el recorrido que tiene por delante es inmenso. En el año 2015 han visto la luz importantes contribuciones sobre EC, entre las que se destacan las siguientes: los libros de Webster y de Lacy y Rutqvist, los trabajos de EMF y McKinsey y de Wijkman y Skanberg (auspiciado por el Club de Roma), referidos a la Unión Europea (UE), y de U.S. Chamber of Commerce Foundation, centrado en los Estados Unidos para el mismo año. Además, en diciembre de 2015 la Comisión Europea publicó su Plan de Acción para la EC. En el Congreso Nacional de Medio Ambiente de 2016, que se celebró en Madrid del 28 de noviembre al 1 de diciembre, la EC aparece como uno de los principales retos ambientales del país. Además, del 15 al 17 de noviembre del mismo año se celebró en Barcelona una cumbre europea sobre EC.

En diciembre de 2015 la Unión Europea publicó la comunicación de la Comisión Europea, titulada “Cerrar el círculo: un plan de acción de la UE para la economía circular”. Se trata de un documento de 24 páginas, más un anexo de 5 páginas, que constituye una estrategia que se propone apoyar la transición a una EC en la UE.

El plan de acción se centra en medidas a escala de la UE con un elevado valor añadido. Como señala el documento, hacer realidad la EC exige un compromiso a largo plazo a todos los niveles, desde los Estados miembros a las regiones y las ciudades, pasando por las empresas y los ciudadanos. Tras la introducción, el documento contiene los ocho apartados siguientes:

- Producción.
- Consumo.
- Gestión de residuos.
- Impulso del mercado de materias primas secundarias y de la reutilización del agua.
- Áreas prioritarias: plásticos, residuos alimentarios, materias primas críticas, construcción/demolición y biomasa.
- Innovación, inversión y otras medidas horizontales.
- Seguimiento de los avances hacia una Economía Circular.
- Conclusión.

Los avances en tecnología crean oportunidades cada vez mayores para apoyar la circularidad de los modelos de economía de negocios. Las tecnologías de la información y la industria están llegando en línea o desplegándose a escala, lo que permite la creación de negocios de EC con enfoques que antes no eran posibles. Estos avances permiten una mayor eficiencia, colaboración e intercambio de conocimientos, un mejor seguimiento de los materiales, mejoras en el avance e inversión en las configuraciones de logística, es decir, el diseño inicial del producto y la innovación de materiales a la perfección unida a un procesamiento posterior de flujos de materiales secundarios y un mayor uso de energías renovables. Ejemplos de tecnologías emergentes en esta área, que están incorporando ya los principios de la EC son (Ellen Macarthur Foundation, 2017):

- a) Smartphones:** las suscripciones de teléfonos inteligentes móviles han aumentado a nivel mundial desde 0.5 mil millones en 2009 a 2.6 mil millones en 2014 (aumento del 500%) y se espera que el incremento sea más del doble nuevamente para 2020. Esta tecnología ha sido crítica en algunos servicios de intercambio a pedido como Uber y plataformas de registro y reventa de productos como Stuffstr.
- b) El "internet de las cosas":** ABI Research dice que ya hay más "cosas" conectadas a Internet que personas: más de 16 mil millones de dispositivos en 2014, un 20% de aumento a partir de 2013. Según la misma fuente, se espera que este número crecerá a más de 40 mil millones para 2020. Las conexiones de hoy vienen en forma de dispositivos de TI (tecnología de la información) para

el hogar y la oficina, como PC y portátiles, dispositivos inteligentes móviles y nuevos negocios conectados y dispositivos de fabricación. En el futuro, es probable que todo esté conectado, desde buques portacontenedores y edificios, hasta agujas, libros, vacas, corrales, árboles y zapatos. Esta interconexión permite un seguimiento eficiente y mantenimiento predictivo que antes era inconcebible.

- c) **Tecnologías avanzadas de fabricación y procesamiento:** estas tecnologías abren paradigmas completamente nuevos para adoptar operaciones circulares a niveles de más bajos costo. Por ejemplo, la impresión 3D reduce sustancialmente los residuos en la fabricación, proceso en sí mismo, que permite la reducción del inventario de productos al pasar a sistemas “orden”, sistemas que a menudo son llamados de "fabricación contra stock", debido a que se utilizan ampliamente en la reelaboración de recambios.
- d) **Disminución de costos de las energías renovables:** los costos del panel solar han caído un 80% desde 2008 y los precios de los aerogeneradores han bajado casi un tercio. Esto está propiciando la generación de una mayor cantidad de energía limpia a la que se ha agregado más capacidad renovable nueva cada año desde 2013. Su uso sustituye el empleo de carbón, el gas natural y el petróleo combinados, según el Grupo de investigación Bloomberg New Energy Finance.

1.1.3. Experiencias de éxito de la Economía Circular.

La EC pretende instaurar un nuevo paradigma en el modo en que se produce y se consume para encontrar un modelo económico sustentable y responsable. Para hacerlo es necesario dejar atrás las aplicaciones económicas más clásicas consistentes en extraer materias primas, transformarlas en bienes mediante un proceso productivo, utilizar estos bienes y tirarlos, en el mejor de los casos, al final de su vida útil, o, mayoritariamente, cuando quedan obsoletos por la salida al mercado de un nuevo modelo mejorado del producto, hecho que genera grandes cantidades de residuos (Marcet, et al., 2018).

Ya existen ejemplos de negocios que dan pasos en esta dirección. Los que lo consiguen con éxito se verán en una situación privilegiada frente a los que decidan continuar explorando el modelo lineal hasta sus últimas consecuencias. Entre algunos ejemplos se tiene:

1. Philips.

La empresa tecnológica Philips decidió en 2012 integrar la EC en su misión y visión estratégica. Estaban convencidos de que las compañías que apostaran por un nuevo modelo que tuviera en cuenta la escasez de recursos serían más competitivas y los resultados que han obtenido les dan la razón.

El CEO de Philips explica que la crisis económica y el avance tecnológico les hicieron apostar por la iluminación como un servicio. Ello ha hecho que la compañía holandesa haya llegado a un nuevo acuerdo con los clientes: pagan por la luz, no por el aparato, y Philips se encarga del riesgo tecnológico y de la inversión. En otros casos, la empresa retira y se lleva el equipo de iluminación cuando es el momento óptimo para reciclar los materiales o para hacer una mejora de las prestaciones para su reutilización. Philips continúa en su proceso de rediseño de productos buscando el modo de capturar su valor residual, y, además, está cambiando su cultura para enfocarse a largo plazo y cooperar con proveedores y clientes.

2. Apple.

Apple lo diseña todo, desde grandes pantallas hasta los cables más pequeños pensando en utilizar menos materiales y tener una larga duración. Proporciona nuevas características sin la necesidad de comprar un nuevo dispositivo, por lo cual es fácil actualizar las aplicaciones, el software y sus sistemas operativos completos.

Cada Apple Store acepta los antiguos productos de modo gratuito. El programa Apple Renew permite a los clientes de distintos países llevar los dispositivos más viejos a cambio de un crédito para un nuevo modelo. La compañía opera o participa en programas de reciclaje en el 99 % de los países en los que vende sus productos, incluyendo el envío gratis en el reciclaje y en las devoluciones, y promueve acontecimientos de recolección y programas de devolución en curso con los gobiernos y las universidades.

Apple trabaja con expertos de restos electrónicos para entender mejor el impacto de estos programas. Al ver la cantidad de aluminio, acero y otros materiales que han sido recogidos y recuperados para reutilizar, la compañía continúa invirtiendo en nuevos modos de mejorar la reutilización de los materiales.

3. Renault.

Es una de las compañías automovilísticas que más está apostando por la EC. Lo hace desde distintos puntos de vista. La planta que tiene cerca de París, por ejemplo, se dedica a re-manufacturar motores, transmisiones, bombas de inyección y otros componentes para revenderlos.

4. Unilever.

La empresa de consumo masivo Unilever empezó su proyecto cero residuos peligrosos en vertederos (ZNHWTL) en 2008. La compañía estableció un objetivo, como parte de su compromiso del plan de sustentabilidad, para mantener el nivel de residuos existentes en los vertederos a pesar del objetivo de la duplicación de crecimiento del volumen de negocio

1.1.4. Experiencias en México.

En México la EC no ha tenido el auge que tiene en otros países. Existe muy poca información respecto a su implementación a nivel industrial a la fecha. De acuerdo con la revisión bibliográfica que se ha realizado hasta el momento solo se ha encontrado una publicación de implementación de dicha metodología, publicada el día del 13 de mayo del 2019 por parte de la Doctora María Daniela Córdova Pizarro de la Escuela de Ingeniería y Ciencias del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, bajo el tema titulado: “*La economía circular en la industria electrónica en México: Mapeo de flujo de Materiales en Teléfonos celulares*”.

Lo anterior permite comprender que México se encuentra muy por detrás en la etapa de incorporación de este nuevo modelo económico y permite visualizar el enorme potencial que puede tener su implementación en los procesos productivos del país, de tal forma que sean más sustentables y que contribuyan a combatir la problemática ambiental actual.

1.2. Marco Teórico.

1.2.1. Economía Lineal.

La Economía Lineal (EL) es un modelo económico que se encarga de convertir los recursos naturales y materias primas, por medio de los procesos de producción, en bienes y servicios destinados a diferentes usos, propiciando consecuentemente la generación de diversos residuos. Esto ocasiona un potencial deterioro del medio ambiente, que básicamente puede impactar de 2 formas: 1) eliminando el capital natural del medio ambiente (por medio de la extracción o cosecha insostenible) y 2) reduciendo el valor del capital natural ocasionado por la contaminación por parte de los residuos (García López & Ortega Hernández, 2015).

La EL, basada en “el tomar, hacer, desechar” es el modelo de producción por el cual hoy por hoy se rigen los sistemas económicos a nivel global. Existen diferentes posturas en torno a su aplicación (las cuales son debatibles) pero es evidente que este modelo genera un gran impacto en el ambiente, que en conjunto

podría denominarse “*Daño ambiental*”. La huella ecológica que el ser humano está ocasionando en la naturaleza tiene dimensiones inconmensurables y el daño podría incluso ser irreversible (García López & Ortega Hernández, 2015).

Un claro ejemplo de ese modelo, lo reflejan las siguientes cifras: en 2013 se generaron en la Unión Europea aproximadamente 2500 millones de toneladas de residuos, de las que sólo se aprovecharon 900, es decir, un 36%. Las estimaciones realizadas ponen de manifiesto que es posible aprovechar aún 600 millones de toneladas más. El no hacerlo, supone que se están desaprovechando los recursos disponibles, en un contexto en el que las materias primas son cada vez más escasas y costosas (Ruiz Saiz-Aja, et al., 2016).

Existe una gran cantidad de alternativas que van desde los programas medioambientales actuales hasta la ola reciente del desarrollo sustentable, los cuales están poniendo en la mesa de debate de un sinfín de organismos el repensar la manera en la que se produce, vende y consume.

La actual EL es reflejo de una época en que los recursos, la energía y el crédito se creían ilimitados y eran fáciles de obtener, sin tener conciencia de las graves consecuencias medioambientales que esto podría ocasionar. Se negaba o se minimizaba el discurso de alerta de muchos ecologistas (Alcubilla, 2017).

1.2.2. Economía Circular.

La EC es un modelo económico que tiene como objetivo generar prosperidad económica, proteger el medio ambiente y prevenir la contaminación, facilitando así el desarrollo sustentable. El creciente interés de gobiernos, industria y sociedad en su implementación ha llevado a indagar sobre su conexión directa con la sustentabilidad. De acuerdo con diversos autores se concluye que la EC es un paradigma de actuación que ha evolucionado a partir del concepto de sostenibilidad y su aplicación en la economía, la sociedad, y el cuidado necesario del medio ambiente. Así, la EC se ha convertido en un paradigma que busca el desarrollo sustentable, proponiendo diferentes estrategias en toda la cadena de producción y uso de los productos y servicios (Prieto Sandoval & Ormazabal, 2017).

Por definición, la EC es reparadora y regenerativa, y pretende conseguir que los productos, componentes y recursos en general mantengan su utilidad y valor en todo momento.

Mirando más allá del actual modelo industrial extractivo de residuos, una EC apunta a redefinir el crecimiento, centrándose en los beneficios positivos para toda la sociedad. Implica separar gradualmente la actividad económica del consumo de recursos finitos y diseñar los residuos del sistema. Apuntado por

una transición a fuentes de energía renovables, el modelo circular construye capital económico, natural y social. Se basa en tres principios:

- Diseño de residuos y contaminación.
- Mantener los productos y materiales en uso.
- Regenerar sistemas naturales.

Tal como la imaginan sus creadores, la economía en este modelo consiste en un ciclo continuo de desarrollo positivo que conserva y mejora el capital natural, optimiza el uso de los recursos y minimiza los riesgos del sistema al gestionar una cantidad finita de existencias y unos flujos renovables. Además, funciona de forma eficaz en todo tipo de escala (Leader & Rashid, 2015).

Entre los diferentes estudios relacionados con esta filosofía, es importante destacar que no hay una definición establecida de EC, pero una de las más aceptables es la siguiente: (Ruiz Saiz-Aja, et al., 2016).

“La EC es aquella economía en la que se maximizan los recursos disponibles, tanto materiales como energéticos, para que éstos permanezcan el mayor tiempo en el ciclo productivo. La economía circular aspira a reducir todo lo posible la generación de residuos y a aprovechar al máximo aquellos cuya generación no se haya podido evitar”.

1.2.3. Los orígenes del modelo de Economía Circular.

La noción de circularidad tiene profundos orígenes históricos y filosóficos. La idea de la retroalimentación, de los ciclos en los sistemas del mundo real es antigua y tiene eco en diversas escuelas de Filosofía. Disfrutó de un renacimiento en los países industrializados después de la Segunda Guerra Mundial, cuando el surgimiento de los estudios computarizados de sistemas no lineales reveló la naturaleza compleja, interrelacionada y, por lo tanto, impredecible del mundo en que vivimos, más parecido al metabolismo que a la máquina. Con los avances actuales, la tecnología digital tiene el poder de respaldar la transición a una EC al aumentar radicalmente la virtualización, la desmaterialización, la transparencia y la inteligencia basada en la retroalimentación.

1.2.4. Escuelas de pensamiento de la Economía Circular.

El concepto de EC tiene orígenes muy arraigados y no se puede rastrear a una fecha o autor específico. Sin embargo, sus aplicaciones prácticas a los sistemas económicos modernos y los procesos industriales

han cobrado impulso desde el final de la década de los 70, liderados por un pequeño número de académicos, líderes de opinión y empresas.

El modelo de EC sintetiza grandes escuelas de pensamiento. Incluyen la Economía de Servicio Funcional (Economía de Rendimiento) de Walter Stahel; la filosofía de diseño Cradle to Cradle de William McDonough y Michael Braungart; la Biomimética articulada por Janine Benyus; la Ecología Industrial de Reid Lifset y Thomas Graedel; el Capitalismo Natural de Amory y Hunter Lovins y Paul Hawken; y el enfoque de Sistemas de Economía Azul descrito por Gunter Pauli (Ellen Macarthur Foundation, 2017). A continuación, se describen cada una de ellas:

Cuna a la Cuna (Cradle to Cradle).

El químico y visionario alemán Michael Braungart desarrolló, junto con el arquitecto estadounidense Bill McDonough, el concepto y proceso de certificación Cradle to Cradle. Esta filosofía de diseño considera que todo el material involucrado en los procesos industriales y comerciales son nutrientes, de los cuales hay 2 categorías principales: técnica y biológica. El marco Cradle to Cradle se enfoca en el diseño para la efectividad en términos de productos con impacto positivo y reduciendo los impactos negativos del comercio a través de la eficiencia.

El diseño de Cradle to Cradle percibe los procesos seguros y productivos del "metabolismo biológico" de la naturaleza como un modelo para desarrollar un flujo de "metabolismo técnico" de materiales industriales. Los componentes del producto pueden diseñarse para una recuperación y reutilización continuas como nutrientes biológicos y técnicos dentro de estos metabolismos (McDonough, 2002).

Walter Stahel, arquitecto y analista industrial, esbozó en su informe de investigación de 1976 a la Comisión Europea *"El potencial para sustituir la mano de obra por energía"* (Lieder & Rashid, 2016), en coautoría con Genevieve Reday, la visión de una Economía en Bucles (o Economía Circular) y su impacto sobre la creación de empleo, competitividad económica, ahorro de recursos y prevención de residuos. Stahel trabajó en el desarrollo de un enfoque de "ciclo cerrado" para los procesos de producción y creó el **Product Life Institute** en Ginebra hace más de 25 años. Persigue 4 objetivos principales: extensión de la vida útil del producto, bienes de larga duración, actividades de reacondicionamiento y prevención de residuos. También insiste en la importancia de vender servicios en lugar de productos, una idea conocida como la *"economía funcional del servicio"*, ahora más ampliamente incorporada a la noción de *"economía del desempeño"*. Stahel sostiene que la EC debe considerarse un marco: como una noción genérica, basada

en varios enfoques más específicos que gravitan en torno a un conjunto de principios básicos (Ellen Macarthur Foundation, 2017).

Biomimetismo.

Janine Benyus, autora de *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*, define su enfoque como "una nueva disciplina que estudia las mejores ideas de la naturaleza y luego imita estos diseños y procesos para resolver problemas humanos". Estudiar una hoja para inventar una mejor célula solar es un ejemplo. Ella lo considera como "innovación inspirada en la naturaleza". La biomimética se basa en 3 principios clave (Pietrulla & Geisendorf, 2017):

- La naturaleza como modelo: estudia los modelos de la naturaleza y emula estas formas, procesos, sistemas y estrategias para resolver problemas humanos.
- La naturaleza como medida: utilice un estándar ecológico para juzgar la sostenibilidad de nuestras innovaciones.
- La naturaleza como mentor: ve y valora la naturaleza no basándose en lo que podemos extraer del mundo natural, sino en lo que podemos aprender de él.

Ecología Industrial.

La Ecología Industrial es el estudio de flujos de materiales y energía a través de sistemas industriales. Al centrarse en las conexiones entre operadores dentro del "ecosistema industrial", este enfoque apunta a crear procesos de circuito cerrado en los que los desechos sirven como insumos, eliminando así la noción de un subproducto indeseable. La Ecología Industrial adopta un punto de vista sistémico, diseñando los procesos de producción de acuerdo con las limitaciones ecológicas locales mientras observa su impacto global desde el principio, e intenta configurarlos para que funcionen lo más cerca posible de los sistemas vivos (Pietrulla & Geisendorf, 2017).

Capitalismo Natural.

Se refiere a las existencias mundiales de activos naturales que incluyen el suelo, el aire, el agua y todos los seres vivos. En su libro "Capitalismo natural: Creando la próxima revolución industrial", Paul Hawken, Amory Lovins y L. Hunter Lovins describen una economía en la que los negocios y los intereses ambientales se superponen, reconociendo las interdependencias que existen entre la producción y el uso

del capital creado por el hombre y los flujos de capital natural (Hawken, et al., 2013). Los siguientes 4 principios sustentan el capitalismo natural:

- Aumentar radicalmente la productividad de los recursos naturales: a través de cambios radicales en el diseño, la producción y la tecnología, los recursos naturales pueden durar mucho más de lo que lo hacen actualmente. Los ahorros resultantes en costos, inversión de capital y tiempo ayudarán a implementar los otros principios.
- Cambiar a modelos y materiales de producción de inspiración biológica: el capitalismo natural trata de eliminar el concepto de desperdicio al modelar sistemas de producción de ciclo cerrado en diseños de la naturaleza donde cada salida se devuelve al ecosistema como un nutriente de manera inofensiva, o se convierte en un insumo para otro proceso de fabricación.
- Pasar a un modelo de negocio de "servicio y flujo": proporcionar valor como un flujo continuo de servicios en lugar del modelo tradicional de venta de bienes alinea los intereses de proveedores y clientes de una manera que recompensa la productividad de los recursos.
- Reinvertir en capital natural: a medida que aumentan las necesidades humanas y aumenta la presión sobre el capital natural, aumenta la necesidad de restaurar y regenerar los recursos naturales.

Economía Azul.

Iniciada por el ex CEO de Ecover y el empresario belga Gunter Pauli, Blue Economy es un movimiento de código abierto que reúne estudios de casos concretos, compilados inicialmente en un informe homónimo entregado al Club de Roma. Como se indica en el manifiesto oficial, "utilizando los recursos disponibles en sistemas en cascada, el desperdicio de un producto se convierte en el insumo para crear un nuevo flujo de efectivo". Basada en 21 principios fundamentales, la Economía Azul insiste en que las soluciones estén determinadas por su entorno local y sus características físicas y ecológicas, poniendo el énfasis en la gravedad como la principal fuente de energía. El informe, que se duplica como el manifiesto del movimiento, describe "100 innovaciones que pueden crear 100 millones de empleos dentro de los próximos 10 años", y proporciona muchos ejemplos de proyectos de colaboración Sur-Sur ganadores, otra característica original de este enfoque con la intención de promover su enfoque práctico (Ellen Macarthur Foundation, 2017).

Diseño Regenerativo.

En los EE. UU., John T. Lyle comenzó a desarrollar ideas sobre diseño regenerativo que podrían aplicarse a todos los sistemas, es decir, más allá de la agricultura, para lo cual el concepto de regeneración ya se había formulado anteriormente. Podría decirse que sentó las bases del marco de la EC, que en particular se desarrolló y ganó notoriedad gracias a McDonough (que había estudiado con Lyle), Braungart y Stahel. Hoy en día, el Centro Lyle para Estudios Regenerativos ofrece cursos sobre el tema.

Economía Circular.

El concepto de EC no es nuevo, fue introducido por primera vez por David Pearce y Kerry Turner en su libro sobre “Economía de los recursos naturales y el medioambiente” (Hidalgo, 2017). En términos generales, la EC consiste en mantener los recursos en uso durante el mayor periodo posible, sacar su máximo valor mientras se están usando y aprovechar los residuos que genere al final de su vida útil (ver Figura 1) (Rodríguez, 2017).

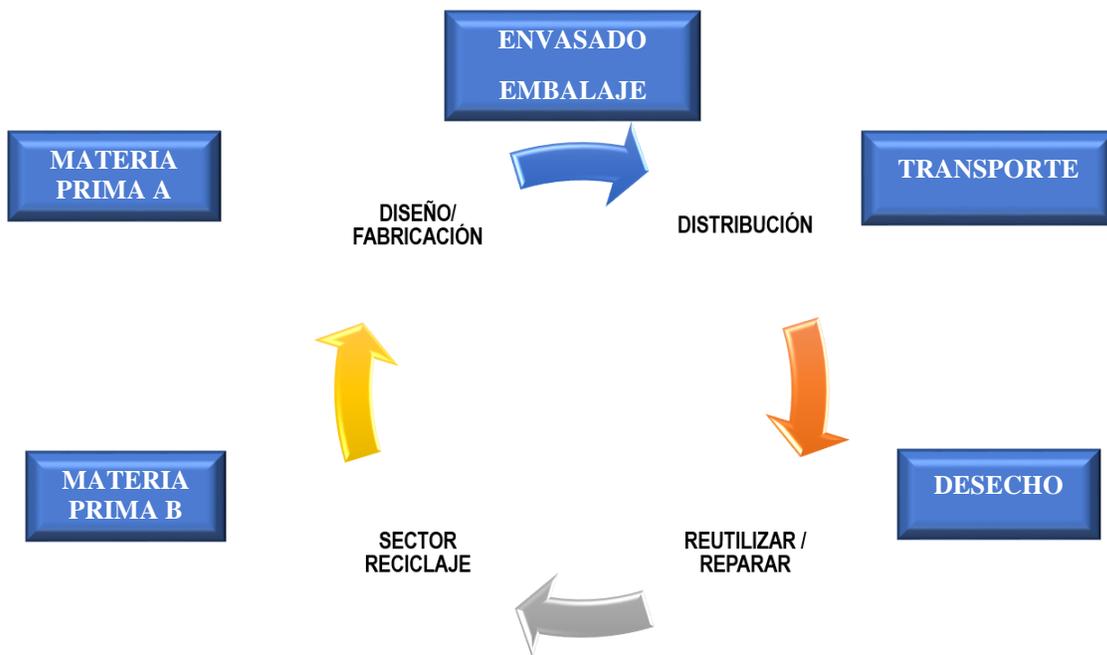


Figura 1. Marco integral de la Economía Circular.
Modificado de: (Rodríguez, 2017).

1.2.5. Orígenes de la Economía Circular.

Lo multidisciplinario de los enfoques de pensamiento sobre EC robustece dicho modelo económico a través de sus aportaciones prácticas y teóricas. La EC es un marco general que articula diversas perspectivas y enfoques más específicos que gravitan alrededor de los principios básicos. En la tabla 2 se presentan los acontecimientos más relevantes que han contribuido al desarrollo de la EC (Scheel & Aguiñaga, 2017).

Tabla 2. Acontecimientos más importantes en la evolución de la Economía Circular.
Modificado de: (Scheel & Aguiñaga, 2017).

Año	Acontecimiento
1937	Ludwing Von Bertalanffy desarrolla un primer esbozo de lo que sería la <i>Teoría General de Sistemas</i> publicada formalmente en 1969.
1950	La metodología de Dinámica de Sistemas es desarrollada por Jay Forrester en el MIT.
1966	Kanneth Boulding propone una economía de flujos circulares.
1968	Garret Hardin publica <i>la tragedia de los comunes</i> .
1970	John.T.Lyle sentó las bases del <i>diseño regenerativo</i> .
1972	El reporte liderado por Donella H.Meadows y Denis Meadows, <i>los límites del crecimiento</i> argumenta a favor del reuso y reciclaje de productos.
1976	Walter Stahel propone la extensión de la vida útil de productos haciendo énfasis en los residuos generados al final de su uso, así mismo desarrolla el concepto de <i>economía de rendimiento</i> .
1980	William McDonough y Michael Braungart discuten la idea de una economía basada en bucles (circular).
1989	Frosch y Gallopoulos desarrollan el concepto de <i>ecología industrial</i>
1990	David Pierce y Kerry Turner acuñan el concepto de <i>economía circular</i>
2000	Marian Chertow establece las bases del estudio de la <i>simbiosis industrial</i> , la cual analiza la recuperación de recursos para su reutilización
2003	Janine Benyus publica su libro <i>Biomímesis</i> el cual habla sobre la emulación de los sistemas naturales
2010	Nace la fundación Ellen MacArthur con el fin de acelerar la transición hacia una economía circular
2010	Gunter Pauli publica su libro <i>la Economía Azul</i> exponiendo conceptos como los flujos de efectivo múltiples y los negocios en cascada

1.2.6 Economía Circular vs Economía lineal.

Se vive en un mundo en el que se piensa que habrá una oferta constante de los recursos de los que se podrá hacer un uso ilimitado. Un pensamiento equívoco, ya que para fabricar u obtener muchos de los bienes y servicios que se utilizan diariamente es necesario extraer recursos naturales del medio ambiente, muchos de ellos no renovables. Sin embargo y afortunadamente el ímpetu en dejar de lado la EL para transitar a una EC y el uso de las 3R (reducir-reutilizar-reciclar), o multi R's, está creciendo cada vez más (figura 2).

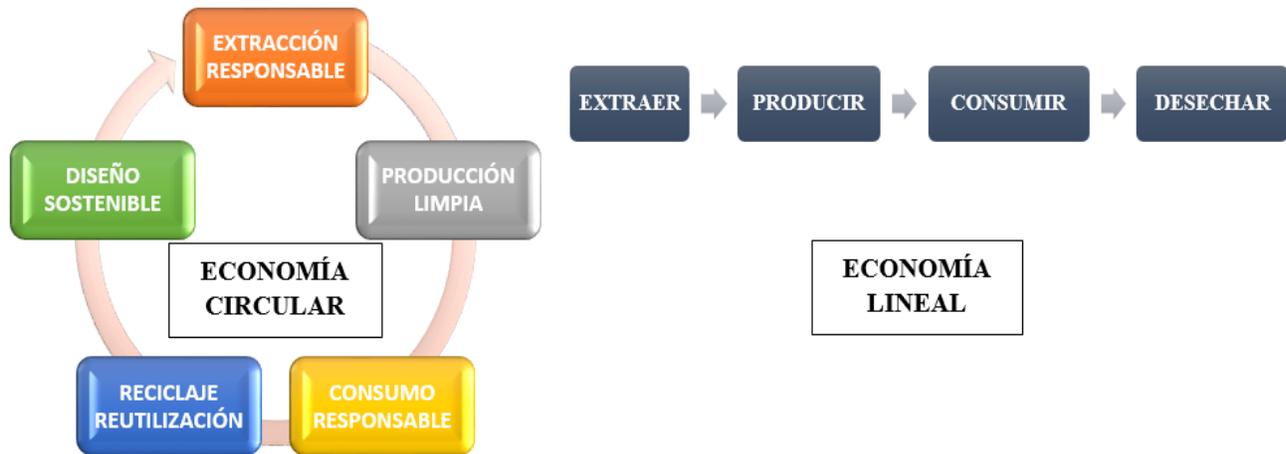


Figura 2. Economía Circular vs Economía Lineal
Modificado de: (González Ordaz & Vargas Hernández, 2017).

La diferencia más notable entre ambos modelos es que en el modelo de EL se repite el esquema: extracción - producción - consumo – desecho en forma intermitentemente y se caracteriza como un sistema donde el ciclo de vida de un producto concluye al mismo tiempo en que es consumido, convirtiéndose en un desecho (cuna a basurero), mientras que en el modelo de Economía Circular las actividades, desde la extracción hasta su comercialización y uso están organizadas de manera tal que los desechos generados se conviertan en los recursos o materias primas para reiniciar el proceso o para llevar a cabo otro nuevo (cuna a la cuna).

Es por ello por lo que se considera como una economía de la recuperación y la reutilización, ya que transforma las cadenas de producción, así como los hábitos de consumo, y disocia el crecimiento del PIB de las extracciones a la naturaleza.

Dentro de un sistema de Economía Circular perfecto se debe mantener el valor de los productos y materiales el mayor tiempo posible, reduciendo los residuos al mínimo y conservando los recursos dentro de la economía, aunque un producto haya llegado al final de su vida útil para reutilizarlos constantemente y así seguir generando valor (González Ordaz & Vargas Hernandez, 2017).

1.2.7. Esquema General de la Economía Lineal.

La EL se fundamenta en 2 grandes principios:

1. Un crecimiento económico permanente y el consiguiente deterioro medioambiental.
2. Un consumo constante.

Este modelo no es el único posible y, de hecho, la EC se presenta como una clara alternativa que puede sustituirlo.

1.2.8. Esquema general de la Economía Circular.

Si se toma como referencia un producto (por ejemplo, un vehículo, un teléfono móvil, un pantalón o una computadora) la aplicación de esta propuesta sería la siguiente:

- 1) El consumidor no se desprende del producto que en su día adquirió cuando decide comprar uno nuevo, sino que repara el producto (por ejemplo, introduciendo en él un nuevo chip o cualquier otra actualización).
- 2) Como consecuencia del punto número 1 se producen menos residuos y, por otra parte, la compañía fabricante no tiene que fabricar más productos y por lo tanto se ahorra dinero en la producción.
- 3) Como consecuencia del punto número 2, la compañía fabricante no tiene necesidad de conseguir tantas materias primas.
- 4) Si el producto se puede reparar, el coste de la reparación es inferior a comprarse uno nuevo.

El modelo descrito más arriba es menos contaminante que el lineal, genera beneficios económicos a partir de la innovación y no implica un aumento de precios para el consumidor final. Se trata de un modelo circular porque los residuos que se generan no se eliminan totalmente, sino que regresan al proceso de producción para fabricar nuevos productos o para otros fines (Navarro, 2018).

La propuesta de una EC se encuentra actualmente en una etapa crucial. En cualquier caso, se trata de un sistema que se puede aplicar a todo tipo de sectores empresariales. Para muchos economistas, la EC podría ser una solución para frenar la contaminación del planeta.

1.2.9. Factores por los que es conveniente transitar de una Economía Lineal a una Economía Circular.

A continuación, se detallan los factores más representativos que inducen a generar un cambio directo de EL a EC (Aguñaga, 2017).

- **Pérdida económica y residuos estructurales:** el modelo lineal actual, crea valor económico a costa de la generación de grandes cantidades de residuos.
- **Riesgo de precios:** el incremento súbito de precios y su volatilidad crea incertidumbre para las empresas.

- **Riesgo de Suministro:** muchas regiones deben importar materias primas, dado que poseen muy pocos depósitos de recursos naturales no renovables.
- **Deterioro de los sistemas naturales:** el cambio climático y la pérdida de la biodiversidad, entre otros, son indicadores alarmantes de la pérdida de capital natural.
- **Evolución de la normatividad:** las regulaciones ambientales se han incrementado exponencialmente, evidenciando la insostenibilidad del modelo actual.
- **Avances en tecnología:** la virtualización provocada por las TIC'S son clave en la generación de nuevos modelos de negocio y nuevas formas de obtener valor.
- **Aceptación de modelos de negocios alternativos:** auge de nuevos modelos de negocios basados en el uso y no en la propiedad de los productos.
- **Urbanización:** más de la mitad de la población mundial vive en zonas urbanas, lo cual acarrea nuevos retos en la utilización, distribución y uso de los recursos.

1.2.10. Desarrollo de la Responsabilidad Social Corporativa.

En la actualidad las empresas están tomando cada vez más consciencia de la necesidad de desarrollar Responsabilidad Social Corporativa. De hecho, los impactos ambientales están siendo regulados a nivel local, nacional e internacional. El objetivo de la EC es reducir tanto la entrada de los materiales como la producción de desechos. Existen empresas que, por ejemplo, adquieren sus recursos en zonas cercanas a su ubicación. Esto supone un impacto menor para el medio ambiente ya que, el medio de transporte que hará entrega del material recorrerá una distancia menor y, por tanto, emitirá una menor cantidad de gases perjudiciales para la atmósfera. Por otro lado, la EC, no solo es verde, también es sustentable. En el caso anterior, además de emitir menos residuos tóxicos para el planeta, generará empleo en la región. Otra opción es reutilizar aparatos electrónicos cuya vida útil aún no haya llegado a su fin, como teléfonos móviles, pantallas, computadoras, etc. (Andalucía, 2019).

Si se toma como referencia un bien de consumo determinado, éste presenta normalmente un proceso de tipo lineal. Así, primero se extraen materias primas, luego dichas materias se modifican o refinan, posteriormente se fabrica un producto de manera industrial y, finalmente, el producto es adquirido por un consumidor. El proceso no termina aquí, ya que el consumidor deja de utilizar el producto adquirido, el cual se convierte en un residuo. Este sistema es como una línea con un principio y un fin.

1.2.11. Transición hacia una Economía Circular.

Una EC es un modelo económico global que apunta hacia el crecimiento económico y desarrollo a partir del consumo de recursos finitos. Cada vez más, las empresas ven gran oportunidad en este modelo, ya que no solo les permite capturar valor adicional de sus productos y materiales, sino también para mitigar los riesgos de la volatilidad de los precios de los materiales y suministro de insumos.

En una EC, la actividad económica construye y reconstruye la salud general del sistema. El concepto reconoce la importancia de la economía que necesita trabajar de manera efectiva en todas las escalas, para empresas grandes y pequeñas, para organizaciones e individuos, global y localmente (Ellen Macarthur Foundation, 2017).

La transición a una EC no solo equivale a ajustes dirigidos a reducir los impactos negativos de la EL. Más bien, representa un cambio sistémico que construye resiliencia a largo plazo, genera oportunidades comerciales y económicas, y proporciona beneficios ambientales y sociales.

Durante la última década, el consumo de materias primas ha alcanzado un ritmo que comprometerá la capacidad del planeta si no se consigue frenar o cambiar el actual modelo lineal de producción y consumo.

Actualmente, nuestra civilización necesita 1,75 planetas para sobrevivir con los consumos actuales de bienes naturales que no tienen la capacidad de recuperarse y si China quiere alcanzar los estándares de vida de los EE. UU. se necesitarán 2 planetas para surtir los bienes naturales necesarios para este desarrollo. También para tener estos niveles de vida, la sociedad necesitará en total 3 planetas (Organización de las Naciones Unidas, 2019).

“El planeta ha perdido su resiliencia, es incapaz de recuperar su estado anterior después de una crisis (grandes sequedades, enormes inundaciones, agua contaminada, epidemias, acidez de los océanos, tierras áridas o quemadas, reducción de la biodiversidad, etc.) y actualmente parece que los desequilibrios son cíclicos y permanentes y se repiten con más frecuencia” (Aguñaga, 2017).

Este es el verdadero problema del desarrollo actual. No hay un diseño sustentable y sistémico de crecimiento de las regiones, para recuperar el daño (ambiental y social), mejorar la calidad de vida de la población mundial y simultáneamente crecer económicamente, en forma ascendente, principalmente para las economías emergentes del planeta. Si se sigue creciendo como ahora y aún bajo un escenario optimista, con los influyentes cambios tecnológicos, el abuso de recursos naturales será para el 2030 del 15% y para el 2050 del 75% (Bilitewski, 2012).

Esto significa que se seguirán consumiendo los propios recursos a tasas mucho más rápidas de lo que estos recursos se pueden regenerar por la Naturaleza, en sus ciclos normales.

Esta preocupación por la disponibilidad de los recursos y la calidad del medio ambiente no es nueva, ha sido ampliamente impulsada por ambientalistas como Rachel Carson desde los años 60 y por los gobiernos desde el final de los años 80 con el reporte de Brundtland, donde se definió por primera vez el concepto de desarrollo sustentable (Hidalgo, 2017).

La EC se ha convertido en una filosofía que busca el desarrollo sustentable, proponiendo diferentes estrategias en toda la cadena de producción y uso de los productos y servicios. Para este propósito se proponen 5 campos de acción concretos y se presentan estrategias de diseño para conseguir la circularidad en los procesos, permitiendo la producción y consumo sustentable (Leader & Rashid, 2015).

La EC permite responder a los desafíos del crecimiento económico y productivo actual porque promueve un flujo cíclico para la extracción, transformación, distribución, uso y recuperación de los materiales y la energía de productos y servicios disponibles en el mercado. La EC tiene como objetivo generar prosperidad económica, proteger el medio ambiente y prevenir la contaminación, facilitando así el desarrollo sustentable. Es por eso por lo que este modelo se apoya en el principio de las 3 R's (reducir, reusar, reciclar), aplicable a todo el ciclo de vida de los productos y en estrategias de diseño sustentable. La figura 3 ilustra un marco integral para la EC basado en estas 3 perspectivas, incluyendo sus relaciones (Ellen Macarthur Foundation, 2017):

Principio 1:

Preservar y mejorar el capital natural mediante el control de las existencias finitas y el equilibrio de los flujos de recursos renovables. Resolver las palancas: generar, virtualizar, intercambiar.

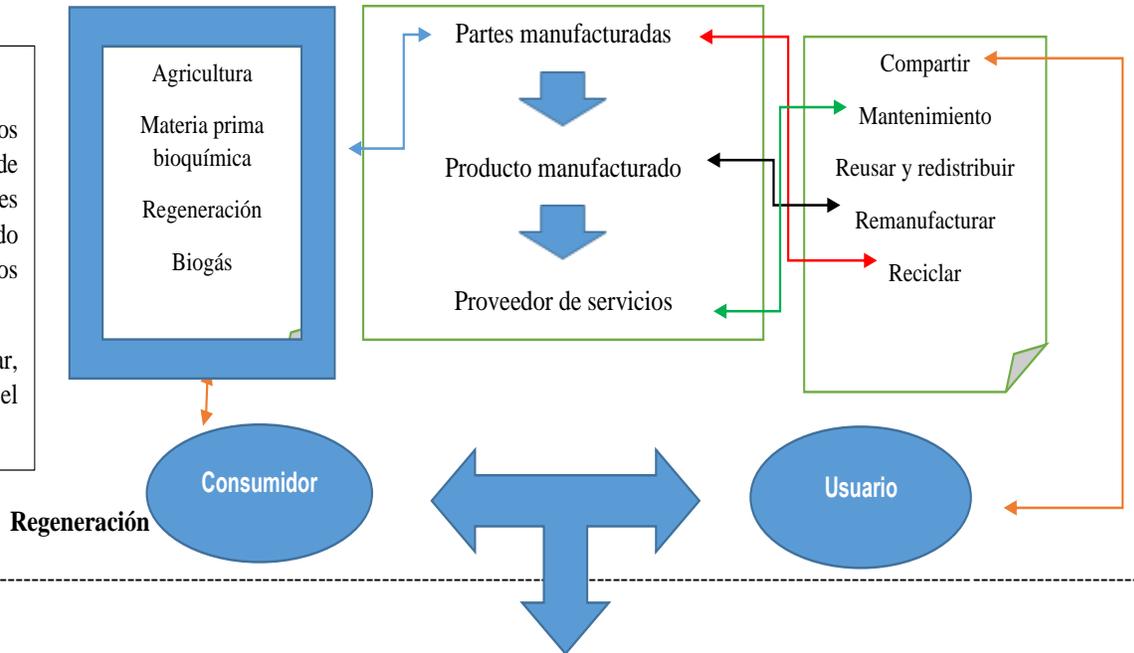


Gestión de flujos renovables

Principio 2:

Optimizar los rendimientos de los recursos mediante la circulación de productos, componentes y materiales en uso, con la mayor utilidad en todo momento, tanto en ciclos técnicos como biológicos.

Resolver las palancas: generar, compartir, optimizar, completar el ciclo.



Principio 3:

Fomentar la efectividad del sistema al revelar y diseñar externalidades negativas.

Figura 3. Marco Integral de la Economía Circular. Modificado de: (Ellen MacArthur Foundation, 2017).

1.2.12. Indicadores de la Economía Circular.

De acuerdo con la *Fundación Ellen MacArthur*, existe un indicador de circularidad que permiten denotar y analizar si un producto en determinadas condiciones puede presentar un modelo de sustentabilidad para un mejor re-uso y aprovechamiento de la mayor cantidad de sus partes.

Los indicadores pueden ser usados como una herramienta para los diseñadores, pero también pueden ser utilizados para otros propósitos entre los que se encuentran la toma de decisiones y evaluación de las compañías.

Indicador de Circularidad del Material.

El propósito de la metodología de los indicadores de circularidad es obtener a partir de ecuaciones específicas el cálculo del Indicador de Circularidad del Material (MCI por sus siglas en inglés).

Para poder entender dicha metodología es importante definir los 2 tipos de ciclos que la EC toma como referencia (Ruiz Saiz-Aja, et al., 2016):

- **Ciclos biológicos:** en los cuales los materiales no tóxicos son restaurados en la biósfera mientras se reconstruye en capital natural, después de ser utilizados en diferentes aplicaciones.
- **Ciclos técnicos:** en los cuales, los productos, componentes y materiales son reincorporados en el mercado con la calidad más alta posible y por un tiempo de vida prolongado, todo ello a través del re-uso, re-manufacturación, mantenimiento y reciclado.

El MCI para un producto mide el alcance para el cual el flujo lineal ha sido minimizado y el flujo restauración maximizado para sus componentes materiales y por cuanto tiempo e intensivamente es usado para comparar a un producto similar de una industria. Por ende, un MCI debe estar en un rango de 0 a 1, donde la mayor proximidad a 1 indicará una mayor circularidad del producto (Ellen Macarthur Foundation, 2017).

Circular Economy Toolkit.

Mediante esta herramienta se puede realizar un análisis que permite proveer información acerca de cómo una compañía puede empezar a obtener beneficios al transitar hacia la EC. Además, es una herramienta que pretende determinar áreas sujetas a mejorarse tales como: reducción del material en uso, optimización de materiales y simbiosis industrial o reciclaje. El análisis se encuentra en función de la asignación de preguntas que pueden ser respondidas por datos previos o información con la que se cuenta. Además de las áreas de mejora, el indicador permite asignar colores a las subáreas que se contemplan (Toolkit, 2019).

Análisis de Ciclo de Vida.

Finalmente, para una aproximación más detallada del valor circular que puede tener un producto o proceso es el uso del **Análisis de Ciclo de Vida** (ACV).

El ACV es un procedimiento de evaluación de las cargas ambientales correspondientes a un proceso o actividad mediante el inventario de materiales y recursos propios de un sistema o producto, Cabe mencionar que dicha metodología se realiza en el ciclo de vida seleccionado incluyendo las etapas de este: extracción y tratamiento de materias primas, fabricación, transporte, distribución, uso, reciclado, reutilización y disposición final (Garraín, et al., 2008).

El ACV estudia los aspectos ambientales y potenciales a lo largo del ciclo de vida de un producto, proceso productivo o servicio, es decir, desde su origen como materia prima hasta su final como residuo, teniendo en cuenta todas las fases intermedias como el transporte y preparación de materias primas, manufactura, transporte y distribución a mercados, uso, etc. Es un método mediante el cual las cantidades de contaminantes generados y de recursos consumidos en la cadena de valor pueden valorarse en términos de sus impactos correspondientes, considerando las categorías generales que se deseen analizar (Garraín, et al., 2008). Algunas categorías de impacto son las siguientes (Guinée, et al., 2002):

- **Calentamiento Global:** definido como el impacto de las emisiones humanas sobre la atmosfera. La mayoría de estas emisiones la temperatura superficial de la tierra (efecto invernadero) generando efectos adversos para la salud humana, y los entornos natural y antropogénico.
- **Agotamiento de recursos abióticos:** Los recursos abióticos son recursos naturales considerados no vivos, como mineral de hierro, el viento o el petróleo. La manera en cómo estimar este impacto ambiental es todavía muy debatida, existe una gran variedad de métodos para caracterizar las contribuciones a esta categoría las cuales reflejan las diferentes definiciones posibles del problema: puede hacer referencia únicamente al agotamiento de recursos naturales en función de reservas físicas, o reservas económicas o incluir las tasas de extracción de recursos.
- **Agotamiento de la capa de Ozono:** Este impacto se refiere al adelgazamiento de la capa de ozono estratosférico como resultado de emisiones antropogénicas. Esto causa que una mayor fracción de radiación solar ultravioleta alcance la superficie terrestre con impactos sobre la salud humana, los recursos naturales, el entorno natural y el entorno antropogénico.
- **Acidificación:** Los compuestos acidificantes tienen una amplia variedad de impactos sobre el suelo, el agua del subsuelo, aguas superficiales, organismos biológicos, ecosistemas y edificaciones. Ejemplos de impactos son la muerte de peces, daño a los bosques y cultivos (lluvia ácida) y el deterioro de edificios. Los mayores acidificantes son: dióxido de azufre SO_2 y óxidos de nitrógeno NO_x .

- **Eutrofización:** se define como el alto impacto derivado de los altos niveles ambientales de macronutrientes, siendo el nitrógeno y el fósforo las sustancias más importantes. El exceso de nutrientes puede causar un cambio indeseable en la población de las especies y elevar la producción de biomasa en ecosistemas terrestres y acuáticos. Además, altas concentraciones de nutrientes pueden contaminar el agua superficial hasta hacerla no apta para el consumo humano.

Al hablar de ACV se necesita conectar dos definiciones relevantes en su estudio. Los conceptos de huella ecológica y huella hídrica surgen como un papel fundamental en la interpretación de las cargas ambientales de un sistema o proceso. La huella de carbono representa la cantidad de gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera derivados de las actividades de producción o consumo de bienes y servicios (Pandey, et al., 2010). La huella hídrica es un indicador de uso de agua que tiene en cuenta tanto el uso directo como indirecto por parte de un consumidor o productor, es decir, el volumen total de agua dulce que se utiliza para producir los bienes y servicios consumidos por el individuo o comunidad (Estévez, 2016).

Las herramientas de análisis de la metodología ACV arrojan los valores correspondientes para ambas huellas contemplando el inventario y etapas que se evaluarán.

A través de los estudios de ACV, es posible llegar a conclusiones acerca de qué impacto es más significativo, o qué etapa del ciclo de vida es la más contaminante. Esta metodología puede utilizarse también para contrastar varios materiales o procesos alternativos que realizan la misma función y evaluar cuál de ellos es más ecoeficiente al proponer recomendaciones que están sujetas a poder implementarse en las áreas de oportunidad.

La evolución del Análisis de ciclo de vida (ACV) puede dividirse en dos períodos: el primero desde los años sesenta hasta finales de los 80 y el segundo, desde 1990 hasta nuestros días. Los primeros estudios, en los años 60, se centraban en el cálculo del consumo energético necesario para la producción de sustancias químicas intermedias y finales (Gutiérrez, 2013).

Entre el año 1975 y comienzos de los ochenta, disminuyó el interés por el tema, aumentando otra vez a inicios de los ochenta. Hay que destacar dos hechos importantes:

- La fundación de la Society for Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) en 1979, cuyo objetivo es el desarrollo de la metodología y los criterios de ACV y que actualmente lidera este tema.

- Debido a que en la población se incrementó la preocupación por el Medio Ambiente, tanto las industrias como la administración pusieron énfasis en el ACV. Las industrias lo hicieron con la intención de incrementar sus ventas definiendo su producto como más respetuoso con el Medio Ambiente y la administración con el interés de desarrollar normativas o criterios que permitieran clasificar los productos en función de su carga medioambiental.

La segunda etapa de desarrollo del ACV comienza en 1990, cuando se proyectó el tema a nivel internacional, con la organización de tres seminarios sobre ACV: el primero en Washington, organizado por World Wildlife Foundation (WWF) y patrocinado por la EPA Environmental Protection Agency (EPA), el segundo en Vermont, organizado por la SETAC y el tercero, en Lovaina organizado por Procter & Gamble.

En 1993 se creó en la International Organization for Standardization (ISO) el Comité Técnico 207 (ISO/TC 207), con el objetivo de desarrollar normativas internacionales para la gestión medioambiental. El Subcomité SC 5 desarrolla la normalización referente al Análisis del Ciclo de Vida: la serie de normas ISO 14040.

1.2.13. Beneficios de aplicar una Economía Circular.

Es importante identificar que la EC no solamente trae consigo beneficios económicos sino también beneficios ambientales o referentes a la sustentabilidad, por ello a continuación se detalla las ventajas de implementar una EC (Ruiz Saiz-Aja, et al., 2016):

- Disminución de la escasez de recursos.
- Mitigar el impacto ambiental mediante medidas de reutilización y re-uso.
- Optimización de materia prima en las industrias.
- Creación de empleos.
- Surgimiento de la Eco Innovación.
- Alargamiento de la vida útil de los productos.
- Reducción del contenido de sustancias nocivas en materiales y productos, mediante el Ecodiseño y Eco innovación.
- Reducción de los impactos adversos en todas las esferas, así como en la salud humana y el medio ambiente, de los residuos generados.
- Reincorporación de materiales reutilizados al mercado.

- Crecimiento económico derivado del reciclaje y reutilización.
- Reducción de gases de efecto invernadero.
- Reducción de la volatilidad del suministro y de los precios, con efectos en la reducción de costes.
- Disponibilidad en el mercado de productos más duraderos, sostenibles y menos tóxicos que permitan ahorrar dinero.
- Menor dependencia de las importaciones.
- Mejora de la competitividad de los sectores clave como la manufactura, la gestión de residuos y el reciclaje.
- Programas de evaluación económica ambiental.

1.2.14. Composición del Vidrio y su reciclaje.

El vidrio es un silicato que se funde a 1200 °C. Es un material hecho de materias primas 100% naturales como arena rica en sílice, carbonato de calcio y carbonato de sodio.

El vidrio cuenta con múltiples ventajas. Desde el punto de vista comercial, su transparencia le otorga calidad al producto, ya que esto permite al consumidor verificar con exactitud qué es lo que está comprando. Otra característica es que es un material que resulta muy higiénico, además se puede lavar a temperaturas de 90 °C o incluso con el uso de vapor hasta 500 o 600 °C, sin perder sus cualidades y propiedades (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 1993).

El vidrio se clasifica como industrial y doméstico, el primero de ellos es aquel que no es utilizado como envase para productos alimenticios (almacenamiento de productos químicos, biológicos, vidrio plano: ventanas, cristales blindados, fibra óptica, bombillas etc.). El segundo de ellos es aquel que se emplea para almacenar productos alimenticios, aunque de manera general, es el vidrio cotidiano que las personas depositan en los contenedores destinados a este fin (Mata & Galvéz, 2014).

Existe una caracterización de este material de acuerdo con su color:

- Verde (60%). Utilizado en botellas de vino, licores, cerveza etc.
- Claro (25%). Usado en bebidas gaseosas, medicinales, perfumería y alimentación.
- Extra claro (10%). Aplicado en cervezas y algunas botellas de laboratorio.
- Opaco o ámbar (5%). Aplicado en cervezas y botellas de laboratorio.

1.2.15 Reciclaje de Vidrio.

El vidrio recogido es, en su mayor parte, de procedencia doméstica, y es conducido en transportes especiales a las plantas de tratamiento, en donde, debidamente seleccionado, se procede a su tratamiento para el reciclado. La recuperación de vidrio se encuentra documentada inicialmente en Alemania y Suiza, aunque fueron los daneses los pioneros en este campo, comenzando en 1962. La recolección selectiva de envases de vidrio es la primera que se inició en España en los años 80 (Mata & Galvéz, 2014).

Generalmente, cuando este material es adquirido contiene un gran número de impurezas, como tapones de plástico y metálicos, corchos, piedras, papeles, plásticos, etc. En estas condiciones, es difícil la fabricación de nuevos envases, ya que estos materiales anexos a él crean defectos en el vidrio nuevo, por lo que, durante una fase del proceso, el vidrio se funde a altas temperaturas para eliminar estos residuos que quedan en la superficie (Industrial, 2011).

Para que el vidrio pueda ser reutilizado en la fabricación de nuevos envases, el requisito más importante es que esté separado por colores, distinguiendo principalmente tres de estos: verde, transparente y opaco o ámbar. Una vez tratado y seleccionado por tamaño, color y tipo, es depositado en los silos para posteriormente suministrarlo a los fabricantes de vidrio que, con esta materia prima denominada “calcín” fabrican los diversos productos derivados de dicho material (Ecovidrio, 2017).

El vidrio se recicla al 100% y puede ser reciclado una y otra vez de por vida, siendo el principal destino del vidrio recuperado la fabricación de nuevos envases que tienen exactamente las mismas características de calidad que los originales. Además, se emplea también en la fabricación de otros productos, como azulejos o pinturas reflectantes (Industrial, 2011).

Es importante señalar que el reciclaje de vidrio necesita un 26% menos de energía que la producción original, en la que para crear un kilo de vidrio se necesitan unas 4.200 kilocalorías de energía. Además, el material generado por reciclaje reduce en un 20% la contaminación atmosférica y disminuye en un 40% la contaminación de agua. La energía que se ahorra del procesamiento de una botella de cristal puede mantener encendida una bombilla de 100 watts durante 4 horas lo que plasma el factor sustentable de aplicación en dichos procesos (Mata & Galvéz, 2014).

La solución a esta paradoja de reciclaje radica en la efectividad del procedimiento de tratamiento para eliminar la mayor cantidad de impurezas en el vidrio y obtener el calcín (vidrio reciclado) para hacer más circular su proceso.

1.2.16. Beneficios medioambientales de reciclar vidrio.

El reciclaje del vidrio tiene los siguientes beneficios ambientales que ayudan a promover el desarrollo sustentable (Ortega, 2017):

- El reciclaje de vidrio necesita un 26% menos de energía que la producción del original.
- Disminuye el volumen de residuos municipales.
- Disminuye la contaminación atmosférica un 20% y en las aguas un 40%.
- Ahorro de recursos naturales.
- El coste de reciclaje de vidrio es inferior al de cualquier otro material.
- Evita emisiones de CO_2 climático. Durante su reproceso se evitan emisiones de CO_2 a la atmósfera, uno de los principales causantes del calentamiento global.

El vidrio es un material que puede ser reciclado al 100% y tiene infinitos ciclos de vida. Por ello al depositar los envases de vidrio en el contenedor verde evita el uso de nuevas materias primas como la arena de sílice, carbonato de sodio y arena caliza. Al reciclar vidrio se está evitando la degradación del suelo (Ecovidrio, 2017).

1.2.17. Vidrio de seguridad (vidrio laminado).

El vidrio laminado está constituido por un montaje de dos o más hojas de vidrio entre las que se encuentra una o varias películas de PVB (butiral de polivinilo) un polímero que ofrece características muy importantes. Si el vidrio se rompe, la mayor parte de los fragmentos y astillas permanecen pegados a la hoja, manteniendo el cristal en su lugar (Greenglass S.L, 2012).

Esta lámina, puede ser traslúcida o transparente; puede tener colores; o puede incluir dibujos, diodos, etc. En caso de choque o de impacto estas láminas o films mantienen a los vidrios unidos: el vidrio se rompe, pero en trozos que permanecen unidos a las láminas de PVB (Ssg Climalit, 2016).

El proceso de laminado garantiza la resistencia mecánica del vidrio y ofrece, en función de la estructura, diferentes tipos de protección y diversos grados de aislamiento Acústico (Greenglass S.L, 2012).

Es importante mencionar que este tipo de producto contempla funciones con características únicas, entre las que se encuentra (Glasstech, 2019):

- **Seguridad.** Barrera ante impactos humanos, armas de mano y fuego, vientos fuertes y desastres naturales según su composición.
- **Aislación Acústica.** El polímero PVB tiene la capacidad de disminuir ruidos exteriores según su composición.
- **Diseño.** Disponible en una amplia gama de colores.
- **Control Solar.** El polímero PVB el 99% de los rayos ultravioleta, logrando retardar la decoloración y el envejecimiento del mobiliario interior.

Las aplicaciones que este tipo de producto ofrece son diversas, muchas de las cuales se utilizan como, muros cortina, vitrinas, cubiertas, balcones, antepechos, pisos vidriados, grandes ventanales y cualquier vidrio sujeto al riesgo de impacto humano, lo que propicia a entender que sus características físicas y composición aseguran la calidad que al cliente se le busca ofrecer, logrando alcanzar no solo el ámbito social sino también el ámbito humano (Greenglass S.L, 2012).

El diseño actual de edificios, tanto de oficinas como residencias, lugares dedicados al comercio, industrias, se basa fundamentalmente en criterios funcionales, estéticos y económicos. La utilización del vidrio como un material estructural es cada día más popular, ya que sólo el vidrio puede combinar belleza, durabilidad y transparencia, cumpliendo con los requerimientos estéticos y funcionales de diseño de las obras modernas que cada día están evolucionando para satisfacer las necesidades de las personas (Comercial Felman, 2019).

1.2.18. PVB del vidrio laminado.

El butiral de polivinilo (PVB) es un compuesto químico resultado de mezclar alcohol de polivinilo con butiraldehído. El material resultante es un polímero de gran adherencia y durabilidad, utilizado principalmente en la industria del vidrio. Este material se utiliza como una lámina con variadas propiedades de adherencia y transparencia y por eso, es fundamental para la unión de hojas de vidrio que contienen los parabrisas (Esteve, 2012).

Particularmente, el polímero es esencial en los vidrios de seguridad en ventanas, las lunas de vehículos y todos aquellos vidrios que por su uso puedan poner en riesgo la seguridad de las personas. Sirve para que,

si el vidrio sufre un impacto, la lámina impida el desprendimiento de cientos de fragmentos que puedan provocar cortes y con ello causar daños físicos (Sgg Climalit, 2018).

Dicho material presenta propiedades físicas y químicas, entre las que se encuentra (Montero, 2016):

- Resistente a la radiación ultravioleta
- Transparencia
- Resistente al desgarro
- Dureza 80 Shore A
- Baja temperatura de transformación, a partir de 150°C
- Miscible con PVC y PA6
- Densidad $1,1 \text{ g/cm}^3$
- Plastificantes aprox. 30% (sin ftalatos)
- Transición vítrea $T_g \approx 40 - 65^\circ\text{C}$
- Índice de Fluidez (Norma ISO 1133) $230^\circ\text{C}/2,16 \text{ Kg} = 4 \text{ gr}/10 \text{ min.}$

1.2.19. Problemática y reciclado de PVB.

La fabricación de parabrisas es el proceso industrial que consume más lámina de PVB y uno de los que más genera su residuo con el fin de vida de los vehículos. Cabe resaltar que actualmente se calcula que entre 6 y 7 millones de vehículos son desechados cada año en Europa y que en España esta cifra alcanza los 680.000 vehículos al año que hasta 2010 tenía un incremento anual del 6% (Sánchez, 2016).

Reciclar este plástico tiene una importancia muy significativa. Después de la descontaminación de los vehículos en centros autorizados para ello, se generan grandes cantidades de vidrio laminado compuesto del mismo y del PVB. Debido a la gran adherencia del polímero, éste al romperse el parabrisas no se logra separar el vidrio del plástico de forma completa. Si se consigue separar obteniendo los dos productos con una pureza tal que puedan ser devueltos otra vez a la industria, se puede contribuir a un aumento de la cantidad de vidrio y a la disminución del PVB virgen al usar el reciclado ya que la mayoría de él va directo a los basureros y es por eso que en la actualidad son pocos los estudios relevantes que hay sobre el reciclado del mismo (Esteve, 2012).

CAPÍTULO 2.

2.1. Planteamiento del problema de la investigación.

El modelo económico actual se rige bajo un sistema de mercado en donde los individuos intercambian bienes y servicios para satisfacer sus necesidades, bajo un modelo de EL. Las empresas que forman parte del sistema económico capitalista dependen de los recursos naturales para hacerse de su materia prima, la cual es transformada, procesada y transportada a los centros de consumo para ser comercializada. Este

sistema lineal de la actividad económica pretende ser eterno y sigiloso, sin embargo, la extracción de recursos a nivel mundial es enorme, lo que está poniendo en riesgo la vida de todas las especies en el planeta.

Esto ha conducido a que la sociedad se deshumanice ya que ha restado valor a otras especies para satisfacer sus niveles exorbitantes de consumo; de ahí que muchos ecosistemas se están extinguiendo a causa de la idea egoísta de un sistema que promueve un consumo inmoderado (García López & Ortega Hernández, 2015).

Además, el sistema económico se ha olvidado de los desechos que genera y considera que los recursos pueden ser sustituidos ininterrumpidamente. Sin embargo, la ilusión de un sistema que pretendía resolver el desasosiego de la crisis económica y la hambruna está causando peores malestares de los que pretendía resolver. Sólo un grupo reducido de países se han beneficiado del sistema capitalista, otros por su inserción tardía se encontraron vulnerables y quedaron en desventaja para poder competir, mientras que los más pobres han tenido que sacrificar sus recursos para poder sobrevivir. Hoy día queda claro que este sistema realmente no resolvió los problemas económicos de la sociedad, debido a que muchos se encuentran con enormes deudas y problemas de crecimiento, la desigualdad social continúa y los beneficios siguen siendo para unos pocos; la contaminación se ha multiplicado a raíz del constante bombardeo por parte del sistema privado para consumir sus productos, fórmula que ha sido promovida por los gobiernos para rescatar la economía de la crisis.

Actualmente, la contaminación se encuentra en sus niveles más altos, la destrucción de los ecosistemas es totalmente tangible y los problemas de desigualdad social continúan. Como prueba está la infertilidad de los suelos, la escasez del agua, la extinción de las especies, el cambio climático, entre otros; éstos son solo algunos ejemplos de los desequilibrios y representan la otra cara de la moneda que el sistema económico actual ha decidido eludir con medidas poco convencionales. Es necesario atender al malestar medio ambiental, social y económico para contrarrestar los desperfectos del sistema económico actual y entrar en equilibrio con el planeta y las especies. Los países latinoamericanos son particularmente vulnerables ante este hecho (González Ordaz & Vargas Hernandez, 2017).

México es claro ejemplo de la inequidad social, el rezago económico, la falta de competitividad, la contaminación y la sobreexplotación del medio ambiente, por lo que es necesario atender a estos problemas con medidas pertinentes y estrategias bien definidas, para alcanzar el bienestar de todas las especies y de las generaciones presentes y futuras.

De acuerdo con esta problemática se busca encontrar alternativas y dar soluciones que permitan utilizar los recursos de manera sustentable, minimizar la generación de residuos y lograr su reincorporación a los procesos productivos o la incorporación en cadenas productivas diferentes, como lo concibe el modelo de la EC.

En el municipio de Cuautla, en el estado de Morelos, se encuentra la empresa “Recicladora Guadalajara S.A de C.V” la cual se encarga de llevar a cabo el proceso de reciclado de vidrio proveniente de empresas externas quienes son proveedores directos de dicho material. Actualmente se encuentra con una problemática ambiental debido a que en el proceso que realizan se genera un residuo plástico proveniente del proceso de reciclado del vidrio empleado para parabrisas. Es importante mencionar que no se cuantifica la cantidad de desecho, ya que al no saber o tener el conocimiento de cómo disponer de manera correcta de dicho material la solución inmediata de la empresa es dirigirlo al basurero municipal, donde, se vuelve una “basura más”.

Es por ello por lo que es importante realizar una evaluación y diagnóstico sobre el proceso productivo de la empresa antes mencionada empleando instrumentos e indicadores de circularidad, que permitan plantear estrategias innovadoras y proponer tanto alternativas como modificaciones viables con base a los principios de la EC. Con relación a los residuos de plástico generados, únicamente se pretende proponer algunas posibles aplicaciones que podrían tener, de acuerdo con sus características y propiedades fisicoquímicas.

2.2. Justificación.

Si bien la EC ha sido aplicada con éxito en algunos países desarrollados, particularmente del continente asiático, como China y Japón, no ha tenido el mismo auge y aceptación en otras naciones. La Unión Europea actualmente está pugnando por su implementación, pero el avance ha sido paulatino.

En México, por lo que se sabe hasta la fecha, no existen empresas que hayan decidido optar por la EC para cumplir la normatividad ambiental o mitigar el impacto ambiental de sus procesos. Es indudable, que, tanto a nivel mundial como en nuestro país, se tiene la necesidad de establecer e implementar estrategias que permitan alcanzar los 18 objetivos de Desarrollo Sustentable signados por los países miembros de la ONU en el año 2015 y cumplir con la Agenda 2030 para el desarrollo sustentable. (Organización de las Naciones Unidas, 2019).

Bajo esta premisa, se deben de romper los paradigmas lineales de producción y crecimiento actuales, mediante cambios inmediatos en los modelos económicos y de consumo. La EC es una estrategia que puede contribuir para alcanzar tales objetivos.

Como ya se ha mencionado anteriormente se desconoce hasta la fecha la existencia de alguna empresa que haya implementado la EC en México, por lo tanto, se busca incorporar dicha metodología para alcanzar el desarrollo sustentable.

Por ende, en el presente proyecto se pretende realizar la aplicación de diferentes instrumentos e indicadores que emplea la EC para evaluar y realizar un diagnóstico sobre la circularidad de una empresa en nuestro Estado y proponer alternativas que puedan impactar en sus procesos productivos.

En este contexto, la EC se presenta como una alternativa viable y de vanguardia para responder a los desafíos del crecimiento económico y productivo actual y para minimizar la explotación de recursos y generación de residuos, porque promueve un flujo cíclico para la extracción, transformación, distribución, uso y recuperación de los materiales y la energía para la obtención de productos y servicios disponibles en el mercado. Todo ello conlleva además a la mitigación del daño ambiental causado al planeta (Prieto, 2017).

Para desarrollar este proyecto de investigación, se aplicarán principios básicos de la EC, para evaluar y analizar el proceso productivo de reciclaje de vidrio de la empresa Recicladora Guadalajara S.A de C.V localizada en Parque Industrial Cuautla, en el estado de Morelos. En este proyecto no se pretende encontrar una solución a la problemática que presenta la empresa por la generación y manejo del residuo polimérico, mismo que ocasiona la contaminación de las diferentes esferas ambientales debido a que los residuos únicamente se confinan en el basurero municipal. Sin embargo, con base a la revisión bibliográfica correspondiente, se emitirán una serie de recomendaciones sobre el potencial uso que pueden tener dichos residuos.

El objetivo final de la propuesta que se genere servirá para implementar un proceso basado en la EC en el que la producción se caracterice por su sustentabilidad y por la reducción de la huella medioambiental.

2.3 Hipótesis.

Es posible aplicar los principios de la Economía Circular a los procesos productivos de la empresa Recicladora Guadalajara S.A de C.V, mediante el uso de indicadores de circularidad y el análisis de ciclo de vida, para realizar una evaluación y diagnóstico que permita identificar áreas de oportunidad susceptibles a modificarse.

2.4 Objetivo General.

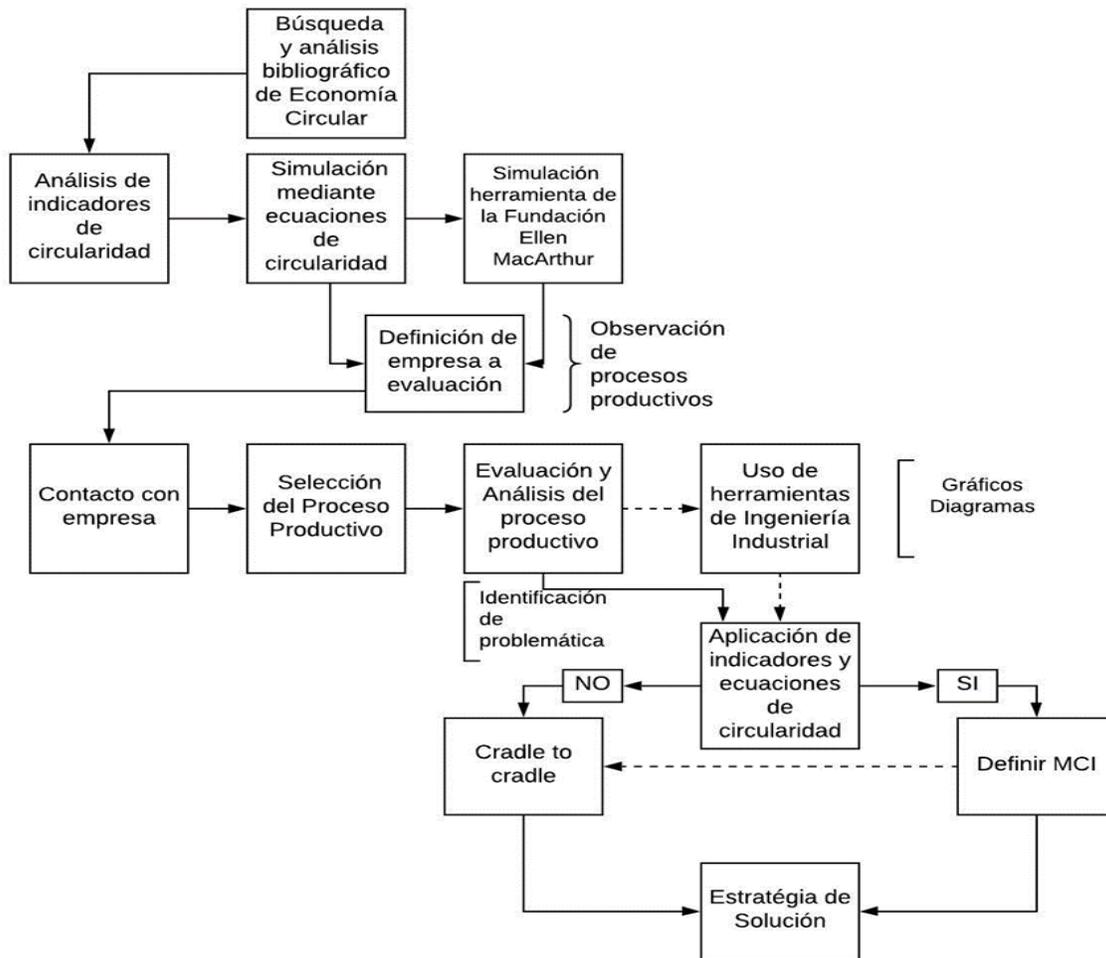
Analizar y evaluar el proceso productivo de reciclado de vidrio de la empresa Recicladora Guadalajara S.A de C.V localizada en el Parque Industrial Cuautla ubicada en el Estado de Morelos para elaborar un diagnóstico en relación con el consumo de recursos y materiales, generación de residuos e impacto ambiental y proponer un modelo basado en los principios de la EC para mejorarlo.

2.5 Objetivos específicos.

- 1) Seleccionar los instrumentos metodológicos apropiados para realizar el diagnóstico sobre el proceso productivo en función de su modelo económico ya implementado.
- 2) Realizar el análisis de ciclo de vida (ACV) para el proceso de reciclado de vidrio, utilizando software especializado, para hacer la comparación de las cargas ambientales asociadas a cada uno.
- 3) Identificar las áreas de oportunidad del proceso que son susceptibles a mejorarse con base en los principios de la Economía Circular (EC) y proponer sus posibles modificaciones.
- 4) Elaborar la propuesta (plan maestro) para el proceso de reciclaje de vidrio, que incorpore los beneficios que podrían obtenerse, en el ámbito económico, social y ambiental.

CAPÍTULO 3.

3.1 Estrategia experimental.



3.2 Materiales y Métodos.

El presente proyecto se llevará a cabo en la empresa Recicladora Guadalajara S.A de C.V ubicada en el Parque Industrial Cuautla, en el estado de Morelos. Actualmente la empresa tiene una problemática en la generación de residuos de plástico (PVB) derivados de su proceso de reciclado de vidrio. Estos residuos no han tenido un manejo adecuado y la solución por parte de dicha empresa es enviarlos al basurero municipal debido a que no han podido comercializarlos o valorizarlos por las características que presenta el polímero al concluir el proceso. Para la aplicación de la metodología y análisis del proceso es necesario seguir una Guía de desarrollo para el diagnóstico en Economía Circular, la cual se describe a continuación (Fundación Cajanavarra, 2016).

3.2.1 Guía para el desarrollo del diagnóstico en Economía Circular.

El diagnóstico está orientado a maximizar la eficiencia en el uso de materiales y recursos, así como a minimizar la generación de residuos, con el objetivo final de obtener productos y servicios económica, social y ambientalmente sustentables que permitan resolver la problemática que se presente a nivel industrial poniendo énfasis en el uso de las herramientas adecuadas para alcanzar los objetivos de la EC y en manejo considerable de las consecuencias que generan la producción constante (Fundación Cajanavarra, 2016). Por ende, lo que se busca alcanzar es plantear ciertos objetivos con dichas herramientas de apoyo, entre los cuales destacan:

- 1) generar un mapa de flujo de materiales, recursos y residuos a lo largo de la vida del producto.
- 2) definir la estructura del costo del análisis de ciclo de vida.
- 3) definir los indicadores de circularidad.
- 4) facilitar la adaptación de las tendencias legislativas relativas a los principios de EC.
- 5) identificar oportunidades de circularidad y mejora, orientadas a la reducción de residuos y generación de modelos de negocio.

Para propiciar el diagnóstico correspondiente en el presente proyecto es necesario establecer 3 etapas fundamentales:

- 1) Mapa de flujos materiales y recursos.
- 2) Indicadores de circularidad.
- 3) Oportunidades circulares.

3.2.2 Mapa de Flujo de Materiales y Recursos.

Análisis de las diferentes operaciones a lo largo del ciclo de vida (fabricación, transporte, operación y mantenimiento, desmantelamiento) para obtener el mapa de los flujos de materiales, recursos (agua, energía) y residuos. En esta fase es esencial analizar los siguientes puntos (Fundación Cajanavarra, 2016):

- **Materias primas y materiales auxiliares:** Analizar y cuantificar las materias primas y auxiliares que se consumen en cada operación.
- **Recursos Energía –Agua:** Analizar y cuantificar el consumo de energía (eléctrica, gas, etc.) y agua que se consume en cada operación.

- **Residuos:** Analizar y cuantificar los diferentes tipos de desperdicios y residuos que se generan en cada operación. (Residuos sólidos, residuos peligrosos).
- **Vertidos:** Analizar y cuantificar los vertidos que se generan en cada operación.
- **Emisiones y Ruido:** Analizar y cuantificar las emisiones (confinadas, difusas) y el ruido que se generan en cada operación.

La figura 4 muestra en forma general el proceso de generación del mapa de flujo de materiales y recursos.

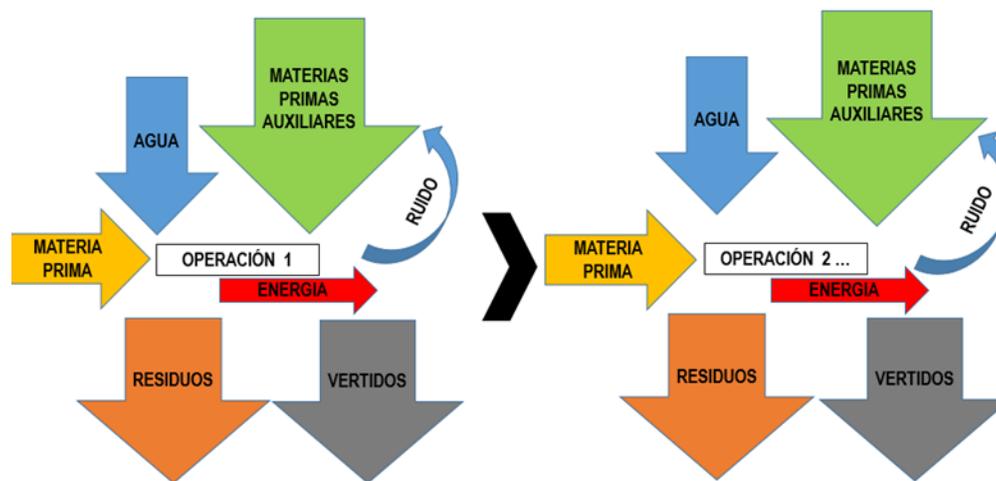


Figura 4. Mapa de flujo de materiales y recursos para un proceso definido caracterizado por operación identificada. Modificado de: (Fundación Cajanavarra, 2016)

La figura anterior muestra el mapa de flujos para el proceso productivo señalado, es importante verificar el número de operaciones que se llevan a cabo en dicho proceso para conseguir y plasmar las modificaciones pertinentes.

Es necesario dimensionar las fases, ya que dentro de esta metodología de EC se puede realizar un diagrama de flujo de las operaciones del proceso productivo.

Sin embargo, si no se integran las entradas y salidas de materiales y recursos dentro de dicho diagrama éstos pueden ser inventariados dentro de otra etapa de análisis, como lo puede ser el ACV, ya que en dicha evaluación es necesario realizar un inventario de entradas, salidas y recursos.

3.2.3 Uso de Indicadores de Circularidad

Con la información obtenida en el mapa de flujos de materiales, recursos y residuos, se definen indicadores, para medir el estado actual de la empresa respecto a sustentabilidad e implementación de la Economía Circular. En esta etapa el primer indicador es el índice de circularidad del material (MCI) para definir qué tanta circularidad se presenta en el bien y además de la asignación de otros indicadores (ACV y Circular Economy Toolkit) que se han encontrado en base a la revisión bibliográfica pertinente ,los cuales se describen a continuación (Fundación Cajanavarra, 2016):

3.2.3.1 Índice de circularidad del Material.

Para poder evaluar el índice de circularidad de un proceso productivo, se pueden utilizar diferentes instrumentos diseñados para determinar la circularidad en función de sus características. Uno de los más utilizados, es el propuesto por la *Fundación Ellen Mac Arthur*, que es empleado ampliamente en forma particular en la Unión Europea. Estos instrumentos se basan en la aplicación de modelos matemáticos definidos por diferentes ecuaciones y utilizan una nomenclatura específica para su aplicación. Uno de los indicadores más empleados es el MCI, que valora el índice de circularidad de los materiales que intervienen en un proceso productivo específico. Es relevante destacar la nomenclatura para el uso de las ecuaciones que permiten encontrar el MCI (ver Tabla 3). Las ecuaciones que se emplean para realizar los cálculos específicos para obtener el MCI se muestran en la tabla 4.

Tabla 3. Nomenclatura para el cálculo del Indicador de Circularidad del Material (MCI).
Modificado de: Ellen Macarthur Foundation, 2017

Símbolo	Definición
M	Masa del producto
F _R	Fracción de masa de materia prima de un producto de fuentes recicladas
F _U	Fracción de masa de materia prima de un producto de fuentes reusadas
V	Masa de materia prima virgen usada en el producto
C _R	Fracción de masa de un producto siendo recolectado para ir dentro del proceso de reciclaje
C _U	Fracción de masa de un producto dentro de un componente de reúso
E _C	Eficiencia del proceso de reciclaje para la porción de un producto recolectado para reciclaje
E _F	Eficiencia del proceso de reciclaje usado para producir materia prima reciclada para un producto
W	Masa de residuos irrecuperables asociados con el producto
W ₀	Masa de residuos irrecuperables a través del material de un producto que va al basurero, gasto de energía y otro tipo de procesos donde los materiales son ya no recuperables
W _C	Masa de residuos irrecuperables generados en el proceso de reciclaje de partes de un producto
W _F	Masa de residuos irrecuperables generados cuando se produce el reciclaje de materia prima para un producto
LFI	Índice de flujo lineal
F(X)	Factor de utilidad construido como una función de la utilidad X de un producto
X	Utilidad de un producto
L	Promedio de vida actual de un producto
L _{AV}	Promedio de vida actual de un producto de la industria del mismo tipo
U	Promedio del número actual de unidades funcionales logradas durante la fase de uso de un producto
U _{AV}	Promedio actual del número de unidades funcionales logradas durante la fase de uso de un producto de la industria del mismo tipo
MCI _p	Indicador de circularidad de un producto

Tabla 4. Ecuaciones para el cálculo el Indicador de Circularidad del Material (MCI)
Modificado de: (Ellen Macarthur Foundation, 2017).

Ecuaciones para determinar MCI

$$v = M(1 - F_R - F_U)$$

$$W_0 = M(1 - C_R - C_U)$$

$$W_C = M(1 - E_C)C_R$$

$$W_F = M \frac{(1 - E_F)F_R}{E_F}$$

$$W = W_0 + \frac{W_F + W_C}{2}$$

$$LFI = \frac{V + W}{2M}$$

$$X = \left(\frac{L}{L_{AV}}\right) \cdot \left(\frac{U}{U_{AV}}\right)$$

$$F(X) = \frac{0.9}{X}$$

$$MCI^*p = 1 - LFI * F(X)$$

$$MCI_p = \max(0, MCI^*p)$$

La **Fundación Ellen MacArthur** ha desarrollado y propuesto ejemplos significativos para poder entender dichas ecuaciones, su uso y forma de aplicación. Partiendo de ello, en el presente proyecto se pretende tomar como referencia la aplicación de dichos índices para verificar la circularidad del producto específico del proceso productivo seleccionado.

Para realizar los cálculos correspondientes, existe una herramienta particular desarrollada por dicha fundación en el programa Excel que permite introducir los valores de algunas ecuaciones para poder determinar el MCI (ver Figuras 5 y 6) del producto de interés:

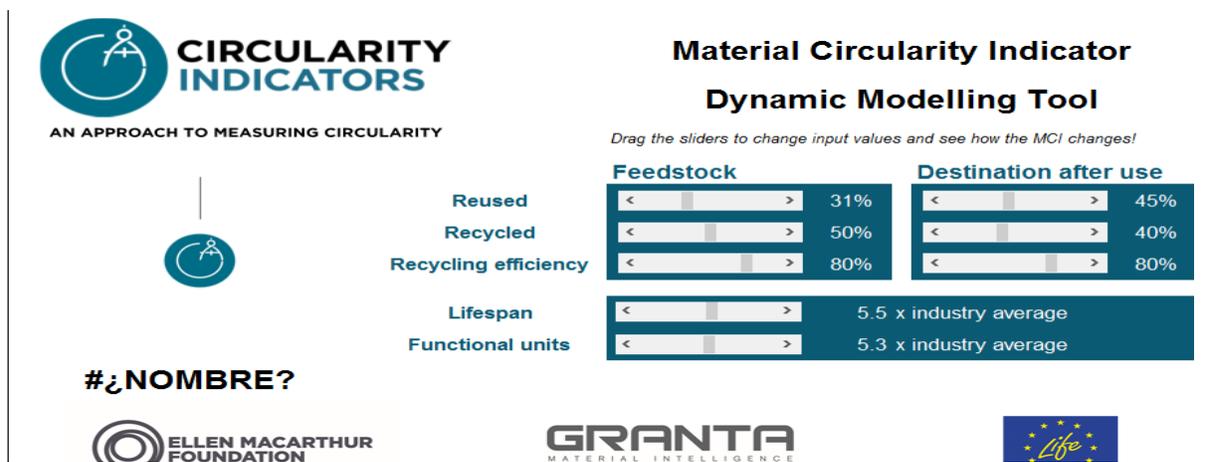


Figura 5. Simulador para la obtención del MCI (Índice de Circularidad del Material).
Fuente: (Ellen Macarthur Foundation, 2017)

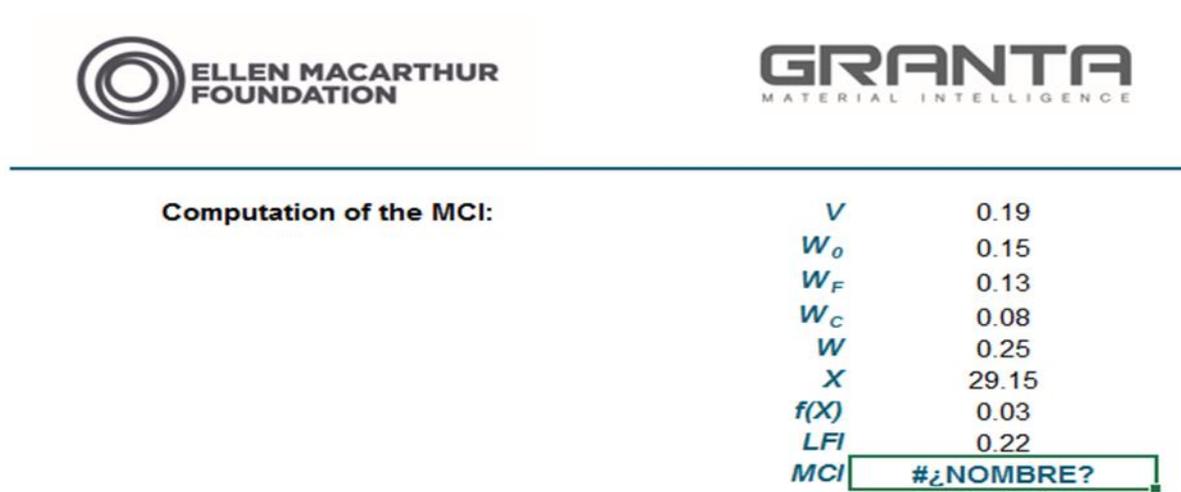


Figura 6. Simulador de los valores de las ecuaciones del Índice de Circularidad del Material (MCI).
Fuente: (Ellen Macarthur Foundation, 2017).

3.2.3.1.1 Ejemplo Práctico sobre el cálculo del MCI.

Con la finalidad de mostrar la aplicación de dicho instrumento en el cálculo del MCI, se presenta el siguiente ejemplo, aplicado a una empresa que fabrica componentes electrónicos.

WIDGET STORE es una compañía que produce dispositivos electrónicos y productos asociados. Tienen un rango de dichos dispositivos, uno estándar SW_d y el Premium PW_b y quieren comparar su circularidad.

Lista de materiales:

SW_d :

Componente	Material	Masa (kg)
Componente 1	Aluminio	2.0
Componente 2	ABS	8.0

*ABS=Acrilonitrilo butadieno estireno

PW_b :

Componente	Material	Masa (kg)
Componente 1	Aluminio	8.0
Componente 2	ABS	2.0

Materia prima virgen:

El material ABS que la compañía usa viene de fuentes vírgenes. El aluminio es fuente de un proveedor que usa 50% de este material reciclado y 50% material virgen. En términos de la notación usada en la metodología esto significa:

$F_{R(ABS)}=0.5$ y $F_{R(AL)}=0$ Como el re-uso no ocurre, tenemos: $F_{u(ABS)} = F_{u(AL)} = 0$

Para obtener la masa de materia prima virgen usada en el producto tenemos:

SW_d :

$V_{(AL)} = 2*(1-0.5) = 1$ y $V_{(ABS)} = 8*(1-0) = 8$

PW_b :

$V_{(AL)} = 8*(1-0.5) = 4$ y $V_{(ABS)} = 2*(1-0) = 2$

Residuos irre recuperables:

La recopilación de datos por las que las tiendas de la compañía operan muestran que la tasa de reciclaje para ABS es de 25% ($C_{R(ABS)}=0.25$) mientras que el 75% de aluminio usualmente termina en reciclaje ($C_{R(AL)}=0.75$). La eficiencia de la tasa de reciclaje para el aluminio es $E_{C(AL)} = E_{F(AL)}=0.9$ y para ABS es $E_{C(ABS)}=E_{F(ABS)}=0.4$

*La baja eficiencia de reciclaje para ABS es debido a que será destinado a un flujo genérico de residuos de reciclaje y la dificultad de detectarlo y separarlo de otros plásticos.

Para el producto SW_d:

$$W_{0(AL)}=2*(1-0.75)=0.5 \text{ y } W_{0(ABS)}=8*(1-0.25)=6$$

La cantidad de residuos generados para SW_d en el momento de su recolección es:

$$W_0 = W_{0(AL)} + W_{0(ABS)} = 6.5$$

La cantidad de residuo generado en el proceso de reciclaje está dada por:

$$W_C = W_{C(AL)} + W_{C(ABS)} = 2*(1-0.9)*(0.75) + 8*(1-0.4)*(0.25) = 1.35$$

La cantidad de residuo generado para producir el contenido de reciclaje es:

$$W_F = W_{F(AL)} = 2 * \frac{(1-0.9)-0.5}{0.9} = \frac{1}{9}$$

La cantidad total de residuo irre recuperable para el producto está dada por:

$$W = W_0 + \frac{W_F + W_C}{2} = 6.5 + \frac{\frac{1}{9} + 1.35}{2} = 7.23$$

Similarmente para el producto PW_b:

$$W = W_0 + \frac{W_F + W_C}{2} = 3.5 + \frac{\frac{4}{9} + 0.97}{2} = 4.17$$

Índice de flujo lineal:

Para el producto SW_d:

$$LFI = \frac{V + W}{2M + \frac{W_F - W_C}{2}} = \frac{9 + 7.23}{20 + \frac{1/9 - 1.35}{2}} = 0.84$$

Factor de Utilidad

Encuestas a clientes han mostrado que los dispositivos electrónicos estándar usualmente son usados por 8 años, mientras que los Premium son más duraderos y tardan un promedio de 12 años. El promedio de vida para dichos productos en la industria es de 10 años. No hay medición adecuada de unidades funcionales para los dispositivos electrónicos, así que solamente el tiempo de vida es tomado en cuenta en la utilidad.

Para el producto SW_d:

$$X = \frac{L}{L_{AV}} = 0.8 \text{ y } F(X) = \frac{0.9}{0.8} = 1.125$$

: Para el producto PW_b:

$$X = \frac{L}{L_{AV}} = 1.2 \text{ y } F(X) = \frac{0.9}{1.2} = 0.75$$

Indicador de Circularidad del Material

Finalmente, se calcula el MCI:

Para el producto SW_d:

$$MCI_p = \max (0.1 - 1.125 * LFI) = 0.06$$

Para el producto PW_b:

$$MCI_p = \max (0.1 - 0.75 * LFI) = 0.61$$

El dispositivo electrónico Premium tiene considerablemente un MCI más alto comparado con el producto estándar. Esto es debido al reemplazo de ABS, el cual no viene de fuentes recicladas y tiene una tasa baja de reciclaje y eficiencia, contrario al aluminio, el cual proviene de fuentes combinadas y tiene un alto índice de reciclaje y eficiencia. También el alto promedio de vida del producto Premium incrementa su indicador de circularidad.

3.2.3.2 Circular Economy Toolkit.

Tal y como se habló con anterioridad, dicho indicador permite encontrar áreas de mejora para lo cual establece para su análisis colores que están definidos de la siguiente manera (Toolkit, 2019):

- Verde; representa un alto potencial de mejora.
- Amarillo; presenta un potencial medio de mejora.
- Gris; representa un potencial bajo de mejora.

Las subáreas se encuentran representadas por:

- Diseño, manufactura y distribución.
- Uso.
- Reusó y distribución.
- Re manufactura y renovación.
- Reciclaje.
- Reparación y mantenimiento.

La herramienta evalúa tales áreas de acuerdo con 2 tipos de conceptos como el tipo de compañía y el tipo de producto. En el primero de ellos, se puede seleccionar diferentes tipos de empresas de acuerdo con el proceso que realizan. En segundo aspecto, se puede introducir el nombre del servicio o proceso de análisis (ver figura 7 y 8). Posteriormente, es necesario contestar 30 preguntas relacionadas con las subáreas antes mencionadas, donde, cada una de las preguntas debe ser respondida de acuerdo con la información obtenida del proceso productivo a evaluar. El tipo de respuestas varían de acuerdo con la subárea permitiendo obtener conclusiones que arrojaran de manera esquematizada, un diagrama de los potenciales de mejora de las áreas correspondientes.

Answer the questions below to find potential improvements in your organisation:

* Company type:

* Product type:

* Use: Just playing Serious

Design, Manufacture and Distribute

No material is used in excess, product is totally dematerialised High waste of material, could be reduced through redesign

100% Biodegradable High percentage of technical, non-biodegradable materials

100% Recycled materials used High percentage of virgin, non-recycled materials

Figura 7. Información relevante para introducir en función del proceso o servicio a evaluar bajo las diferentes subáreas consideradas por la herramienta.
Fuente: tomado de: (Toolkit, 2019)

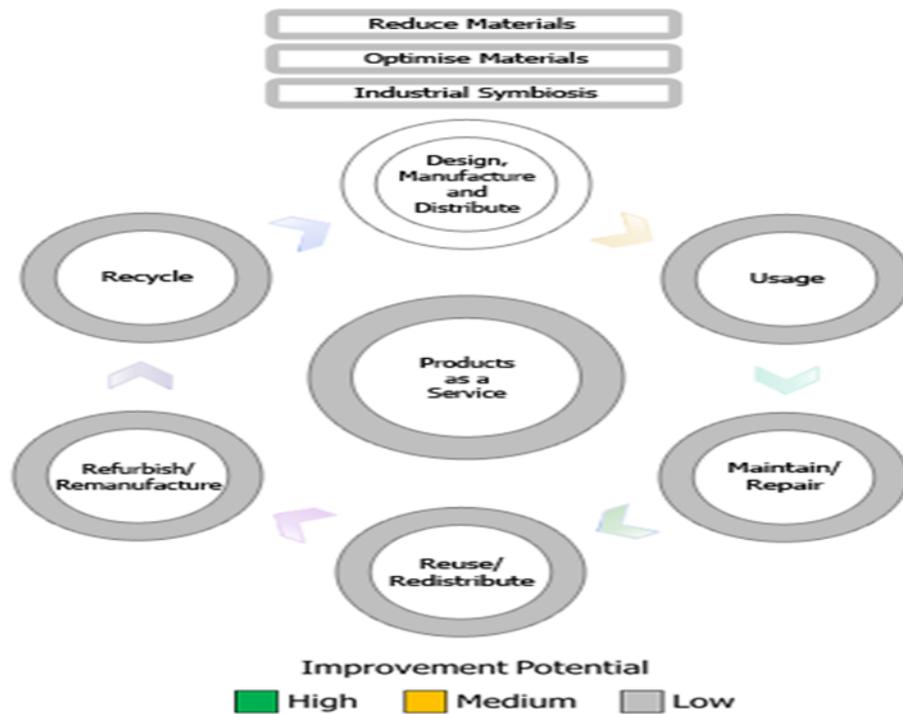


Figura 8. Sub-áreas consideradas dentro de la herramienta las cuales son coloreadas por color verde, amarillo o gris en función del potencial de mejora al que se encuentran susceptibles.
Fuente: tomado de (Toolkit, 2019).

Como se indica en los objetivos de este proyecto, uno de los indicadores a tomar en cuenta será el análisis de ciclo de vida que se explicará a detalle en el capítulo siguiente:

3.2.3.3 Análisis de Ciclo de Vida.

En un análisis de ciclo de vida (ACV) se atribuye a los productos todos los efectos ambientales procedentes del consumo de materias primas y de energías necesarias para su manufactura, las emisiones y residuos generados en el proceso de producción, así como los efectos ambientales procedentes del fin de vida del producto cuando este se consume o no se puede utilizar. Por ende, este tipo de metodología parte desde la adquisición de los recursos hasta el fin último del producto considerando dentro de este los procesos principales en su producción (Norma ISO 14040, 1997):

Un ACV puede dividirse en 4 fases (ver figura 9), entre las cuales se encuentran las siguientes:

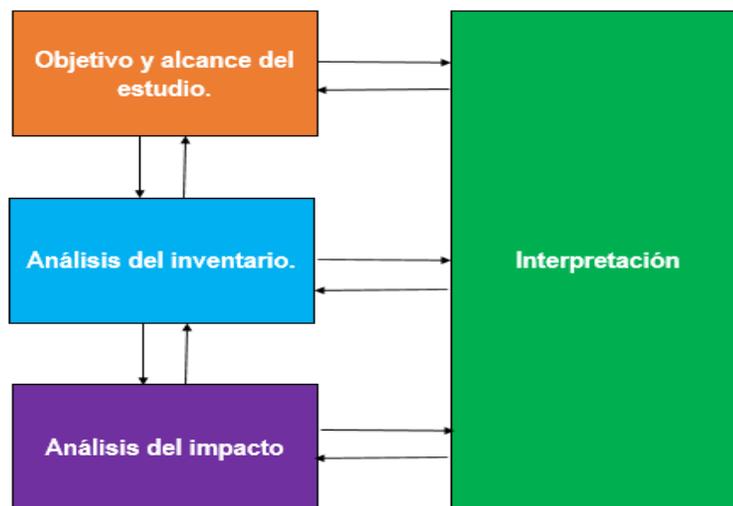


Figura 9. Fases de análisis de ciclo de vida del producto.
Modificado de: (Norma ISO 14040, 1997)

1) Objetivos y alcance del estudio:

En esta fase se deben incluir las razones que han llevado a la realización del estudio; la información que se espera obtener de él, cómo va a usarse y si va a hacerse pública o no. Debido al tipo de proceso, un estudio de ACV podría ser inacabable por su extensión; por lo tanto, deben ponerse los límites del alcance

de este. Varios factores determinan los límites como la aplicación del estudio, la hipótesis, los datos, las limitaciones económicas etc. (Ruiz, 2014).

Definición del objetivo. La definición del objetivo del análisis debe ser clara y coherente con la aplicación que se va a dar al estudio. La definición de objetivos debe incluir (Finkbeiner, et al., 2006):

- Identificación del realizador del estudio.
- Razones para realizar el estudio y tipo de información que se espera obtener de él.
- Aplicación prevista del estudio y uso que va a hacerse de los resultados.
- Destinatario previsto del estudio (es decir, si será un informe interno, si se hará público y a quién).
- Si procede, el uso del ACV en aseveraciones comparativas.

Definición del alcance del ACV. Esta etapa debe reflejar claramente la extensión del estudio lo cual implica, la consideración y descripción de los siguientes puntos:

- Sistema del producto a estudiar.
- Funciones del sistema del producto.
- Selección de la unidad funcional.
- Establecimiento de los límites del sistema.
- Establecimiento de las reglas de asignación de cargas ambientales, tipos de impacto por evaluar, metodología de evaluación e interpretación.
- Tipos y fuentes de datos: requisitos que deben cumplir los datos del inventario.
- Requisitos de calidad de los datos.

El alcance también debe incluir el tipo de revisión crítica a efectuar, si ésta es necesaria de acuerdo con los objetivos del estudio y el tipo.

2) Análisis de inventario:

Esta fase consiste en la cuantificación de las entradas y salidas del sistema en estudio, en la que se incluye el uso de recursos (materias primas y energía), las emisiones a la atmósfera, los vertidos al suelo y aguas y la generación de residuos. Los datos obtenidos en esta fase son el punto de partida para la Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida. Siempre que sea posible, es recomendable utilizar datos directamente obtenidos del proceso en estudio, a través de (Finkbeiner, et al., 2006):

- Medidas “*in situ*”.
- Balances de materia y energía.
- Entrevistas, fuentes bibliográficas, ...

El inventario, a fin de dar una visión global del producto/proceso al que corresponde, además de los datos cuantificados debe constar de:

- Diagramas de flujo que dejen claro el sistema en estudio, así como las relaciones que tienen lugar dentro del mismo.
- Descripción detallada de cada unidad de proceso, listando la categoría de los datos asociados con cada una de ellas.
- Desarrollo de una lista donde se especifiquen las unidades de medida de cada parámetro.
- Descripción de los métodos empleados para recoger los datos y de las técnicas de cálculo empleadas para cada categoría de datos.
- Instrucciones informando claramente de fuentes documentales para casos especiales, irregularidades, o cualquier otra circunstancia asociada con la recogida de datos.

Se deben documentar todos los procedimientos de cálculo, que deben ser coherentes a lo largo de todo el estudio, y explicar las suposiciones realizadas. Es necesario validar los datos recopilados. La validación puede implicar, por ejemplo, realizar balances de materia, balances de energía y/o análisis comparativos de los factores de emisión y vertido.

Asimismo, hay que relacionar los datos con los procesos unitarios y con la unidad funcional. Como resultado, todos los datos de entrada y salida deben estar referenciados a la unidad funcional. A partir de los datos obtenidos puede ser necesario ajustar los límites del sistema. Para ello, se lleva a cabo un análisis de sensibilidad que puede determinar:

- La exclusión de etapas del ciclo de vida o de procesos unitarios cuando el análisis de sensibilidad pueda demostrar que carecen de importancia,
- La exclusión de entradas o salidas que carezcan de importancia,
- La inclusión de nuevos procesos unitarios, entradas y salidas que el análisis de sensibilidad haya demostrado que son importantes.

En el caso de considerar más de un producto, se deben especificar los criterios de asignación de los datos.

3) Análisis del impacto:

La finalidad de la fase de evaluación de impactos del ciclo de vida (EICV) es la de interpretar el inventario, analizando y evaluando los impactos producidos por las cargas ambientales identificadas en éste tomando en cuenta la categoría de impactos, la clasificación y su respectiva caracterización, la figura 10 muestra un ejemplo representativo. La evaluación de impacto (cualitativa o cuantitativa) debe formar parte de todo ACV para identificar las partes del sistema que influyen más en el resultado final y que, por tanto, deben ser estudiadas más profundamente (Norma ISO 14040, 1997).

mi: cantidad de recurso utilizado.

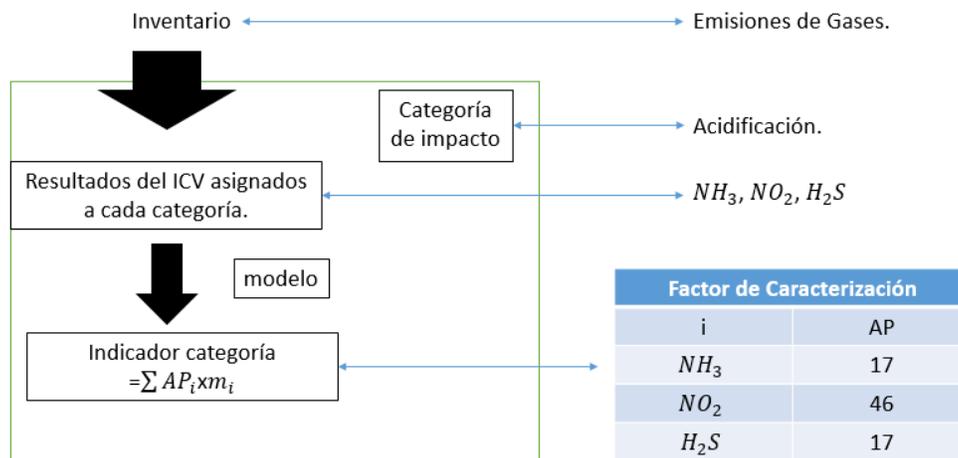


Figura 10. Ejemplo representativo del análisis de impacto dentro del análisis de ciclo de vida. Modificado de: (Norma ISO 14040, 1997)

4) Interpretación:

Con la finalidad de extraer, de acuerdo con los objetivos y alcance del estudio, conclusiones y recomendaciones que permitan la toma de decisiones, se aplica un procedimiento de evaluación de los resultados del ACV. Las etapas de definición del objetivo y el alcance y de interpretación del ACV constituyen el marco de referencia para generar información sobre el sistema del producto (Díaz, 2011).

Para poder generar la metodología anterior es importante notificar que todo su funcionamiento se basa en normas, las cuales son (Díaz, 2011):

- UNE-EN ISO 14040:2006. Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Principios y marco de referencia. AENOR.
- UNE-EN ISO 14044:2006. Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Requisitos y directrices. AENOR.

Como se ha especificado anteriormente un ACV permite evaluar los impactos medioambientales en los procesos de fabricación, identificando y cuantificando los consumos de energía y materias primas, así como los residuos y emisiones de los diversos gases contaminantes que tienen lugar a lo largo de todo el análisis para su correcta interpretación tal como se presenta en la figura 11 (Díaz, 2011):



Figura 11. Cadena de análisis del ciclo de vida como un esquema general del mismo.
Modificado de: (Díaz, 2011)

Como se ha mencionado previamente las 4 fases permitirán realizar y obtener resultados que permitan identificar las cargas ambientales y para ello es necesario identificar las implicaciones de los métodos utilizados, suposiciones hechas, categorías de impacto e indicadores de categoría. Los resultados obtenidos se pueden clasificar y priorizar por porcentajes, los cuales son valores que imponen la normatividad pertinente y con ello se podrá identificar si los datos obtenidos son significativos, relevantes, importantes o de menor importancia. Finalmente, un ACV permitirá otorgar recomendaciones en los procesos de fabricación del producto e identificar las limitaciones para la empresa a la cual se realiza el estudio (Leiva, 2016).

Por ende, para la realización de esta investigación se utilizará software especializado “SIMAPRO Y UMBERTO” para determinar las fases previamente explicadas y obtener resultados y conclusiones preliminares.

3.2.4 Oportunidades de circularidad.

Como se ha descrito previamente, el ACV permite obtener conclusiones que sirven para poder encontrar áreas de mejora dentro del proceso productivo, producto o servicio analizado. Por ende, cuando se desea plasmar todos estos vínculos correspondientes a la “identificación de oportunidades” es necesario plasmar todas las recomendaciones dentro de un esquema o documento para una mayor comprensión por parte de la persona encargada de analizarlo.

A continuación, se describen 4 pasos para la identificación de oportunidades de mejora de competitividad y nuevos modelos de negocio hacia la sustentabilidad y EC teniendo en cuenta el ciclo de vida completo del producto. Cabe mencionar que, dependiendo el proceso de análisis, la implementación de las oportunidades de circularidad queda sujetas a las características de los indicadores previamente mencionados (Fundación Cajanavarra, 2016):

- **Análisis de tendencias legislativas:**

Se analizan las tendencias y nuevos desarrollos legislativos que afecten a la actividad de la empresa, especialmente en aquellas materias primas, recursos y procesos que tengan un impacto mayor en el costo del Ciclo de Vida del Producto. Es recomendable desarrollar un servicio de vigilancia para el análisis del impacto de los requisitos legales en la actividad de la empresa.

- **Análisis de tendencia de sustentabilidad y Economía Circular:**

Se analizan aquellas materias primas, recursos y procesos que tengan un impacto mayor en el costo del Ciclo de Vida del Producto.

- **Estrategia y modelos circulares:**

Incorporar líneas estratégicas de sustentabilidad y eco-innovación en los planes estratégicos de la empresa, para el desarrollo de modelos circulares y la mejora de los indicadores de sustentabilidad y economía circular definidos.

- Ecodiseño

Introducir criterios de ecodiseño dentro de los procesos de diseño de productos y componentes:

- Diseño para durabilidad / Diseño para reparación / Diseño para renovación/Re-fabricación / Diseño para reciclaje.

Para poder realizar modificaciones o recomendaciones dentro del proceso productivo para lograr detallar el Plan Maestro es necesario que identifiquen las oportunidades de mejora de competitividad hacia la EC en los procesos que contempla el producto, priorizando en aquellas operaciones que se vean afectadas por las tendencias legislativas, que tengan un mayor impacto en el costo del ciclo de vida o en el mismo ACV del producto.

El mismo enfoque se puede aplicar en las fases de operación y mantenimiento, desmantelamiento y gestión del producto al final de su vida útil tal como lo muestra la figura 12.

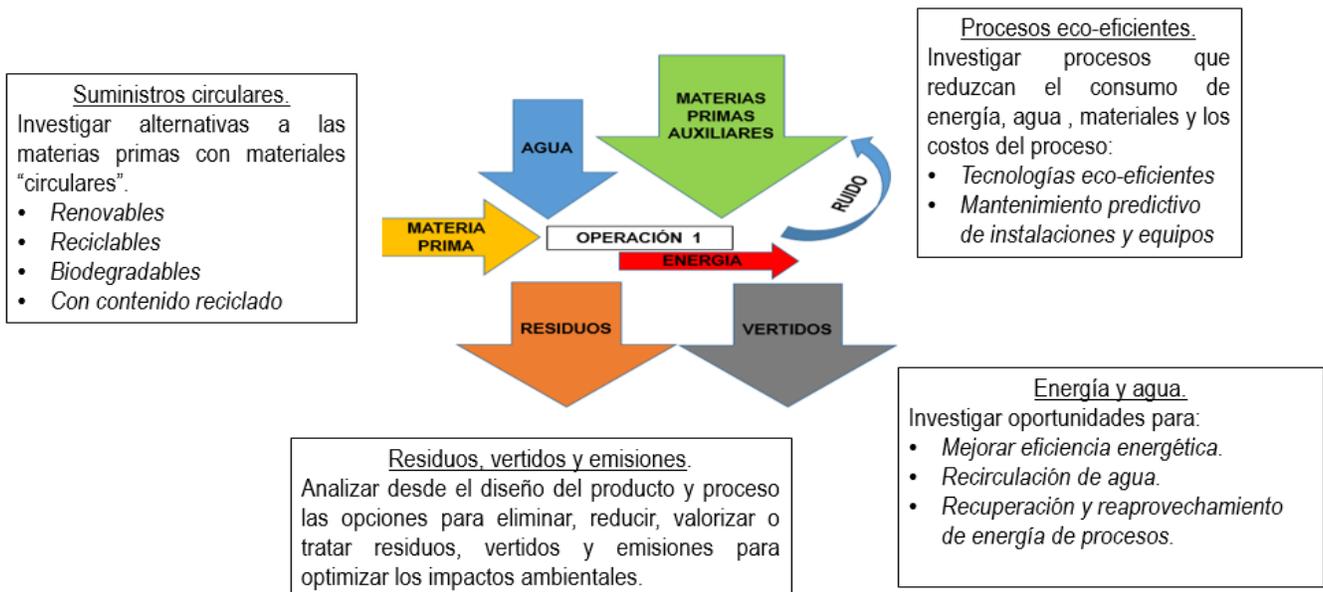


Figura 12. Identificación de oportunidades de circularidad considerando las operaciones del proceso definido en sus diversas fases.

Modificado de: (Fundación Cajanavarra, 2016).

La aplicación de las oportunidades circulares puede quedar sujetas a las recomendaciones propuestas en el ACV, lo que conlleva a plantear conclusiones sobre el estudio realizado partiendo de la idea de generar

menor impacto o reducirlo. Por ende, el esquema de la figura 12 puede ser substituido por las mismas sugerencias y conclusiones preliminares de los indicadores implementados.

CAPITULO 4.

4.1 Resultados.

La empresa que se seleccionó para el proyecto de investigación se encuentra ubicada en el Municipio de Cuautla, en el Estado de Morelos y su principal actividad económica comprende el proceso de reciclaje de vidrio de parabrisas y de vidrio mixto. A continuación, se muestra una tabla con las características de la empresa:

Nombre de la empresa	Recicladora Guadalajara S.A de C. V
Razón social	Recicladora Guadalajara S.A de C. V
Giro Industrial	Empresa de manejo y tratamiento del proceso y renovación del reciclado de Vidrio.
Definición de empresa	Pequeña empresa
Número de trabajadores	17
Dirección web	http://www.recicladoragdl.com/
Información General, Planta Guadalajara, Jalisco. (sede matriz)	Opochtli 4701. Col. Nueva España. Guadalajara Jalisco Tel:(33)31350969 Correo electrónico: info@recicladoragdl.com
Información General, Planta Cuautla, Morelos. (sucursal)	Av Galeana Mza 4 lote 1. Parque Industrial Cuautla. Ayala Morelos. Tel:(735)53556375 Email: recdgl@hotmail.com
Ubicación Geográfica Planta Cuautla	Longitud (dec): -98.909722 Latitud (dec): 18.751389 La localidad se encuentra a una mediana altura de 1295 metros sobre el nivel del mar.
Certificación	Certificación DC-3 en el manejo de residuos y seguridad en el trabajo.
Productos que se comercializan:	
<ul style="list-style-type: none"> • Envases para diversos sectores industriales, cosméticos, farmacéuticos. • Vidrio Flotado para diversas finalidades en el ramo de la construcción. • Automotriz Original vidrios laminados, templados y encapsulados con el mejor desempeño en las pruebas de seguridad, resistencia y calidad más exigentes de la industria. • Automotriz de Repuesto. Amplia variedad de productos: parabrisas, laterales y medallones. 	
Maquinaria y equipo:	
Maquinaria IS, moldes, fundición, equipos de inspección y automatización. Además, se cuenta con herramientas tecnológicas de punta que contribuyen a una mejor productividad y a disminuir los costos de los clientes.	

Dicha empresa forma parte del Parque Industrial Cuautla, donde se pueden encontrar diversas compañías distribuidas en la zona. En la siguiente figura se muestran imágenes satelitales de la ubicación de la Recicladora Guadalajara S.A de C.V.



Figura 13. Imagen satelital del Parque Industrial Cuautla.
Fuente: Google Maps



Figura 14. Imagen satelital de la empresa Recicladora Guadalajara S.A de C.V.
Fuente: Google Maps

La empresa Recicladora Guadalajara S.A de C.V posee dos procesos productivos principales: el primer proceso consiste en la limpieza que se lleva a cabo en la banda de inspección y en el cual todo el material utilizado proviene de la empresa SAINT GOBAIN S.A de C.V planta Cuautla. El objetivo principal es

limpiar el vidrio y eliminar todas aquellas sustancias ajenas al material, de tal forma que el producto limpio pueda ser comercializado con los diferentes clientes de la empresa.

El segundo proceso es llamado procedimiento de molido de parabrisas o des-laminado, donde la materia prima proveniente de parabrisas es procesado para su recuperación y poder venderlo como producto final, es importante mencionar que al término de dicho proceso se genera un residuo plástico que compone al parabrisas y aun no se encuentra una metodología para poder utilizarlo , ya que una vez que se encuentra separado del vidrio y almacenado en el contenedor respectivo, éste va de forma directa al basurero municipal.

Además, existe un proceso anexo que, pese a que no es 100% utilizado, ayuda a una mayor limpieza del vidrio. Cabe mencionar que dicho proceso se encuentra con procedimientos de modificación, lo cual no posibilita que trabaje de manera continua como los demás y, por ende, su utilización es de muy poca frecuencia.

En la figura 15 se muestra la distribución de la empresa, donde, se puede verificar las medidas y colocación de los materiales y recursos disponibles:

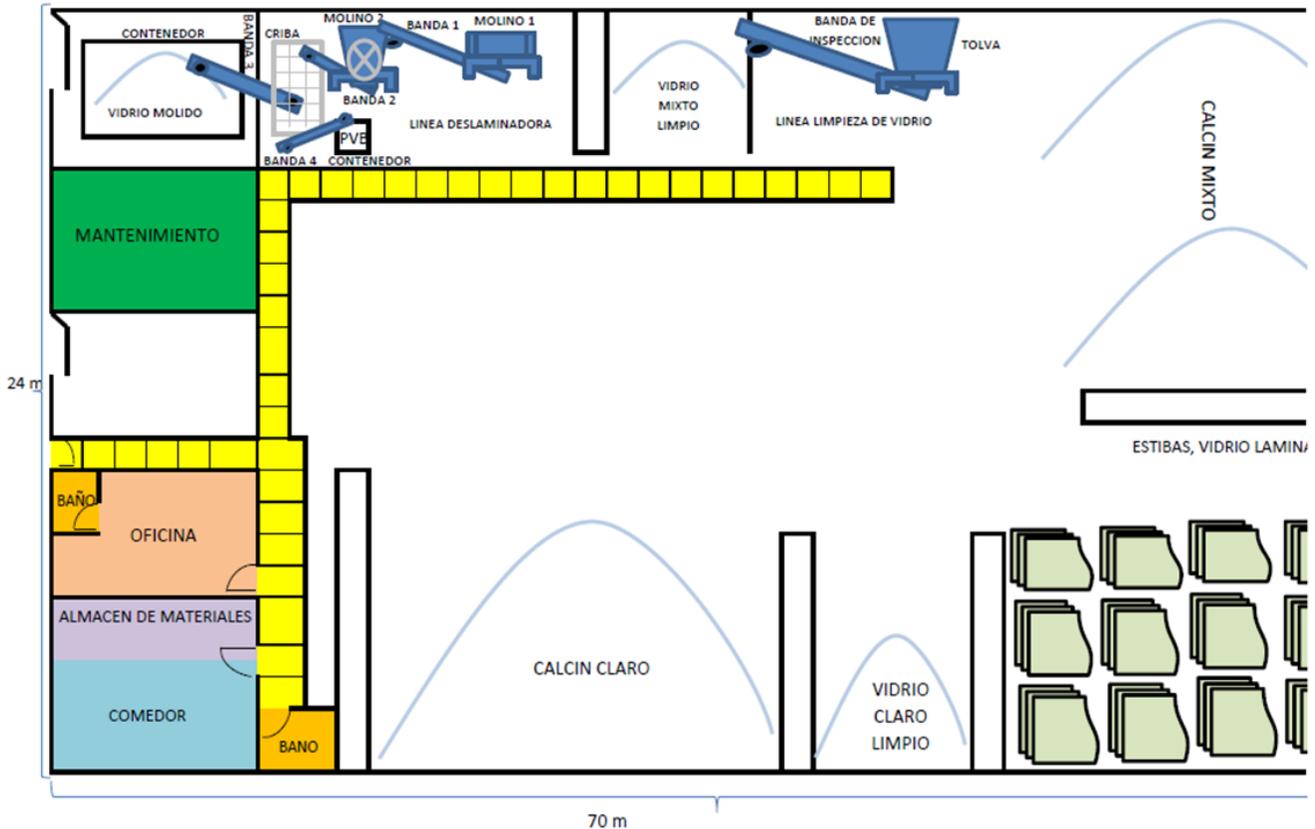


Figura 15. Distribución de materiales y zonas de trabajo de la empresa Recicladora Guadalajara S.A de C.V.
Fuente: Recicladora Guadalajara S.A de C.V.

4.1.1 Procesos Productivos.

A continuación, se detallan los procesos productivos que realiza la empresa y los diagramas analíticos de los mismos para poder verificar y analizar de forma específica el proceso productivo.

PROCESO 1: PROCEDIMIENTO DE LIMPIEZA EN LA BANDA DE INSPECCIÓN	
Paso y descripción	Figura
<p>1.-Llenado de Tolva.</p> <p>Con ayuda del bobcat se colocan de 5 a 6 cucharones llenos del tipo de vidrio a revisar, cuidando de no rebasar el límite de la tolva, para evitar desbordamientos de material.</p>	

2.-Limpieza e inspección.

Cuando el material fluya por la banda los operadores realizaran una inspección visual buscando contaminantes como pueden ser papel, cartón, metales, plásticos o piedras. Los empleados pueden hacer uso de sus manos para facilitar la revisión, mientras tengan puesto el equipo de protección personal (EPP).



3.-Almacenamiento.

El vidrio limpio cae en la zona de almacenamiento, el operador con ayuda del bobcat mantendrá el vidrio en la zona de almacenamiento con capacidad para 40 ton.



PROCESO 2: PROCEDIMIENTO DE MOLIDO DE PARABRISAS.

1.- Abastecimiento de parabrisas en mesa.

Con ayuda del bobcat colocar pacas de parabrisas en la mesa de inicio, con una altura de 1 metro



2.-Corte de parabrisas.

El operador 1 toma un parabrisas de la estiba y lo coloca en la rampa del primer molino para que éste lo corte en 3 tiras.



3.- Separación y alimentación del molino.

El operador 2 separa las tiras que salen del molino uno y las deja sobre la banda de una por una para que sean molidas, con una separación de 1 metro entre cada una.



4.-Molido.

Las tiras pasan al molino de una por una. Durante el proceso se separa el vidrio del plástico llamado PVB y la mezcla sale del molino hacia una banda que lo conduce al siguiente proceso.



5.-Cribado del Material.

El material procedente del molino se incorpora a una criba que por medio de vibración segrega el plástico molido del vidrio molido, enviándolos a dos bandas que los conducen a sus respectivos contenedores.



6.-Disposición del plástico molido PVB.

El plástico molido y separado del vidrio pasa a un tambo donde se almacena para posteriormente darle su respectiva disposición final.



6.1.-Almacenado de vidrio molido.

El vidrio molido es colocado en una banda en un contenedor para su almacenamiento temporal hasta que llegue al límite de su capacidad para su posterior disposición final (cliente).



Proceso extra.

Si es necesaria una mayor limpieza proveniente del proceso 6 el material se introduce en la máquina pulverizadora donde se separa completamente el plástico del vidrio.



4.1.2 Diagramas Analíticos.

Una de las maneras más sencillas y completas de recopilar la información de los diversos sucesos en un proceso productivo es mediante un diagrama que incorpore las operaciones, transportes, esperas, inspecciones y almacenamientos de una cadena productiva. A continuación, se presenta el diagrama analítico de los dos procesos que realiza la empresa Recicladora Guadalajara S.A de C.V considerando a detalle las fases en cada uno de ellos:

DIAGRAMA ANALÍTICO

PROCESO		Lugar		RESUMEN					
LUGAR		Recicladora Guadalajara		ACTIVIDAD			ACTUAL		
ELABORADO POR:		OPERACIÓN							
<i>DIEGO ALBERTO GONZÁLEZ MENDOZA</i>		TRANSPORTE							
FECHA DE ELABORACIÓN:		ESPERA							
APROBADO POR:		INSPECCIÓN							
		ALMACENAMIENTO							
FECHA DE APROBACIÓN:		DISTANCIA							
		TIEMPO							
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	DISTANCIA (m)	TIEMPO (min)	SIMBOLOS					OBSERVACIONES
									
Pesado en báscula Saint-Gobain.				*					
Transporte a bodega de recicladora.					*				
Descarga en zona de vidrio mixto.				*					
Almacenamiento Temporal.								*	
Transporte de vidrio a tolva.					*				
Limpieza e inspección.							*		Papel, cartón, metales, plásticos y piedras.
Almacenamiento Final.								*	Almacenamiento hasta compra final

DIAGRAMA ANALÍTICO

DIAGRAMA ANALÍTICO								
PROCESO	Molido de parabrisas			RESUMEN				
LUGAR	Recicladora Guadalajara			ACTIVIDAD		ACTUAL		
ELABORADO POR:				OPERACIÓN				
<i>DIEGO ALBERTO GONZÁLEZ MENDOZA</i>				TRANSPORTE				
FECHA DE ELABORACIÓN:				ESPERA				
APROBADO POR:				INSPECCIÓN				
FECHA DE APROBACIÓN:				ALMACENAMIENTO				
				DISTANCIA				
				TIEMPO				
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	DISTANCIA (m)	TIEMPO (min)	SIMBOLOS			OBSERVACIONES	
								
Pesado en báscula Saint-Gobain.				*				
Transporte a bodega de recicladora.				*				
Descarga en zona de vidrio laminado				*				
Limpieza e inspección de componentes							*	Papel y metal.
Estivado y almacenamiento Temporal.							*	
Transporte de parabrisas							*	
Colocación de pacas en mesa de trabajo				*				
Corte de parabrisas en molino				*				
Separación de tiras				*				
Transporte a banda de cada tira				*				
Molido de tira				*				
Separación de vidrio con plástico PVB.				*				
Cribado de vidrio				*				
Envío de plástico y vidrio a contenedores				*				
Almacenamiento de vidrio temporal							*	
Carga de vidrio molido				*				
Trasporte a instalaciones de Saint-Gobain Glass				*				
Pesaje de vidrio en bascula de Saint-Gobain Glass				*				
Descarga en patios de Saint-Gobain Glass				*				

*El tiempo en cada proceso se ha considerado despreciable porque ambos trabajan de manera constante, rápida y simultánea.

4.1.3 Entrada y Salida de Materiales.

En la tabla 5 se detallan los procesos de entradas y salidas de materiales que maneja la Recicladora Guadalajara S.A de C.V y lo cual es la base para la realización de sus procesos productivos, además se anexa las toneladas de producción del vidrio des-laminado:

Tabla 5. Acciones que realizar en la llegada de los residuos sólidos a las instalaciones para las cuales está solicitando autorización, incluyendo las descargas, pesajes y aquellas que se realicen para su almacenamiento, procesamiento, tratamiento o disposición final. Fuente: Recicladora Guadalajara S.A de C.V

Vidrio Mixto	Vidrio Medallones	Vidrio Laminado
1.-Pesado en báscula de Saint-Gobain Glass.	1.-Pesado en bascula de Saint-Gobain Glass.	1.-Pesado en báscula de Saint-Gobain Glass.
2.-Transporte a bodega de recicladora.	2.-Transporte a bodega de recicladora.	2.-Transporte a bodega de recicladora.
3.-Descarga en zona de vidrio mixto.	3.-Descarga en zona de vidrio claro.	3.-Descarga en zona de vidrio laminado.
4.-Almacenamiento temporal.	4.-Almacenamiento temporal.	4.-Retiro de componentes (plástico y metal).
5.-Limpieza de vidrio en banda de inspección.	5.-Limpieza de vidrio manual con ayuda de retro excavadora.	5.-Estivado y almacenamiento temporal.
6.-Almacenamiento temporal de vidrio limpio.	6.-Almacenamiento temporal de vidrio limpio.	6.-Molido de vidrio para su separación del PVB.
7.-Carga de vidrio limpio.	7.-Carga de vidrio limpio a camión externo.	7.-Almacenamiento temporal de vidrio molido.
8.-Transporte a instalaciones de Saint-Gobain Glass.	8.-Transporte de vidrio a cliente.	8.-Carga de vidrio molido.
9.-Pesaje de vidrio en báscula de Saint-Gobain Glass.	9.-Envío de peso por parte del cliente.	9.-Transporte a instalaciones de Saint-Gobain Glass.
10.-Descarga en patios de Glass.		10.-Pesaje de vidrio en báscula de Saint-Gobain Glass.
		11.-Descarga en patios de Glass.

4.1.4 Producción de Vidrio Des-laminado.

En la siguiente tabla se pueden verificar la cantidad en toneladas y el número de viajes que durante el periodo enero-diciembre del 2019 ha producido la empresa en su proceso de reciclaje de vidrio de parabrisas, cabe mencionar que dicha información fue proporcionada por la empresa mediante sus registros pertinentes:

Tabla 6. Relación de viajes y producción de vidrio des-laminado en ton durante el año 2019.
Fuente: Recicladora Guadalajara S.A de C.V

Mes	Viajes	Ton.
Enero	12	205.43
Febrero	8	142.23
Marzo	8	137.21
Abril	10	172.59
Mayo	13	178.14
Junio	7	121.96
Julio	9	139.31
Agosto	6	164.87
Septiembre	6	99.79
Octubre	7	105.22
Noviembre	6	93.43
Diciembre	1	17.2

La producción en cada uno de los meses se cuantificó y lo que permite observar es el tonelaje producido durante el periodo de enero-diciembre:

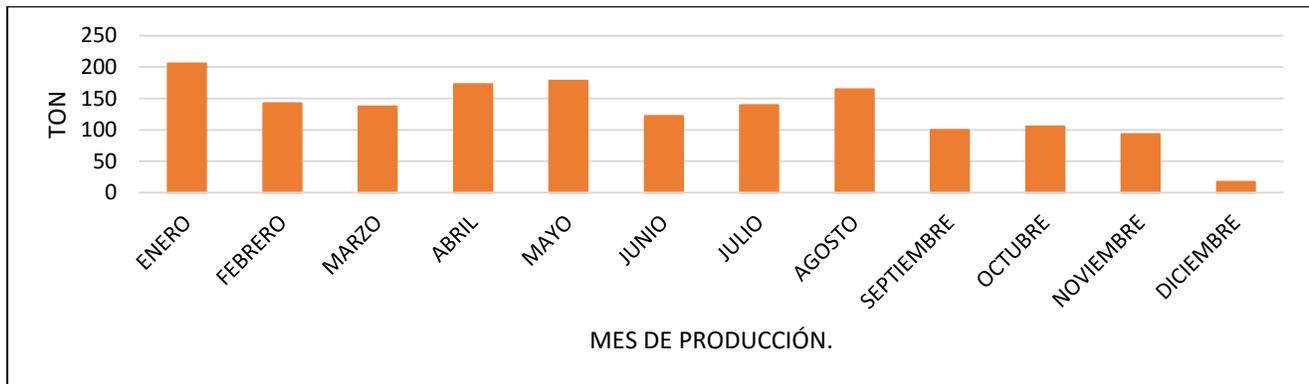


Gráfico 2. Producción de vidrio des-laminado en el periodo enero-diciembre 2019. Fuente: elaboración propia.

4.1.5 Vidrio Mixto.

En la siguiente tabla se pueden verificar la cantidad en toneladas y la relación de entradas y salidas que durante el periodo enero-septiembre del 2019 ha producido la empresa en su proceso de limpieza de vidrio de mixto. Cabe mencionar que dicha información fue proporcionada por la empresa mediante los registros correspondientes.

Tabla 7. Relación de entradas y salidas de vidrio mixto.
Fuente: Recicladora Guadalajara S.A de C.V

2019	Salida	Entrada
Enero	402.41	493.15
Febrero	364.15	413.97
Marzo	434.5	352.38
Abril	371.95	244.51
Mayo	315.21	344.77
Junio	355.39	325.91
Julio	278.17	213.03
Agosto	296.45	633.31
Septiembre	287.92	292.86
Octubre		
Noviembre		
Diciembre		

En la siguiente tabla se muestra la relación de entrada y salida de vidrio mixto con un concepto de deuda en la que se refiere a aquel vidrio que aún sigue almacenado y que no ha entrado al proceso de limpieza.

Tabla 8. Relación de entradas y salidas (ton) en función de la deuda generada en la limpieza de vidrio mixto.
Fuente: Recicladora Guadalajara S.A de C.V

DIFERENCIA		
Mes	Salida Mixto	Entrada Mixto
DEUDA 2019	285.01	3457.03
Enero	402.41	493.15
Febrero	364.15	413.97
Marzo	434.5	352.38
Abril	371.95	244.51
Mayo	315.21	344.77
Junio	355.39	325.91
Julio	278.17	213.03
Agosto	296.45	633.31
Septiembre	287.92	292.86
Octubre	65.87	28.11
Noviembre		
Diciembre		
Total anual	3172.02	3342
	Diferencia anual	169.98
	DEUDA GEN.	115.03

La producción de la limpieza de vidrio mixto en cada uno de los meses se cuantificó lo que permite observar la relación de entradas y salidas durante el periodo de enero-octubre:

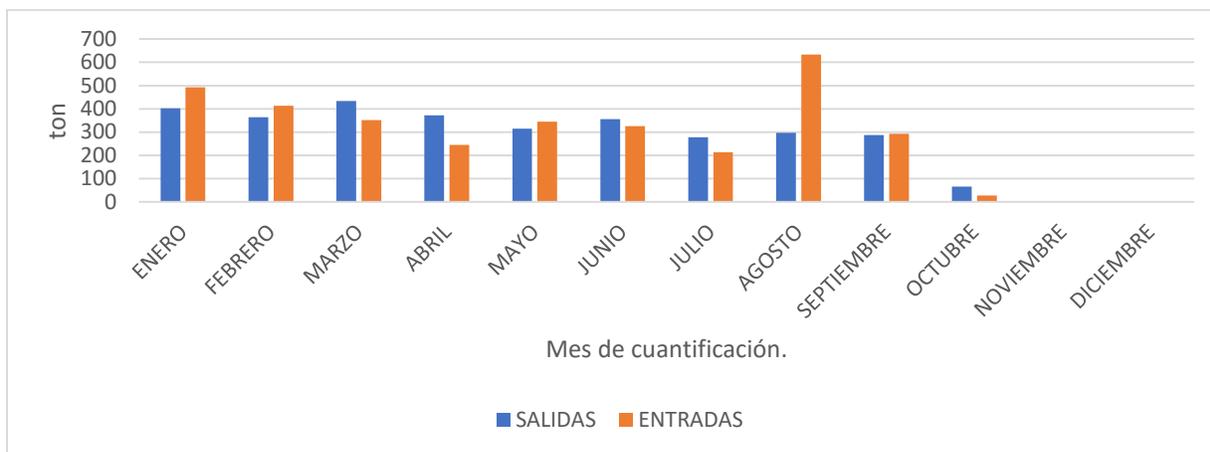


Gráfico 3. Relación de entradas y salidas de vidrio mixto en el periodo enero-octubre 2019.
Fuente: elaboración propia.

4.1.6 Diversidad de clientes (nacional e internacional).

A continuación, se presenta la cartelera de clientes a los que se les vende el vidrio reciclado, es importante destacar que la venta se realiza a nivel local y a nivel estatal, generando gran cantidad de recurso económico, por lo cual, la empresa Recicladora presenta gran rentabilidad.

VITRO S.A. DE C. V
Keramos 225
Monterrey N.L.
vit800328hb5
* Viaje de cullet limpio parabrisas

OWENS CORNING MEXICO S. DE R.L. DE C.V.
Av. Acueducto #459 col. Zacatenco
Delg. gustavo a. madero d.f.
ocm570520541
*Viaje de cullet para reciclar (negro)
*Viaje de cullet para reciclar claro (mixto)

IRMA GONZALEZ RAMIREZ
Puerto Campeche no 95
col Casas Aleman
CDMX

BALLOTINI PANAMERICANA S. DE R.L. DE C.V.
Rio Lerma 55
Estado de México
bpa670823bm9
* Viaje de cullet clasificado (bodega mixto)
*Viaje de v.salt. (saltillo).

O-I MEXICO
km 21 Tecamachalco los Reyes la Paz
Edo de México
* Viaje de vidrio plano

4.1.7 Mapa de flujo de Materiales y Recursos.

Mediante la información obtenida y analizando los procesos productivos, el mapa de flujo de las entradas y salidas correspondientes al proceso seleccionado para su evaluación pertinente se encuentra detallado en la figura siguiente:

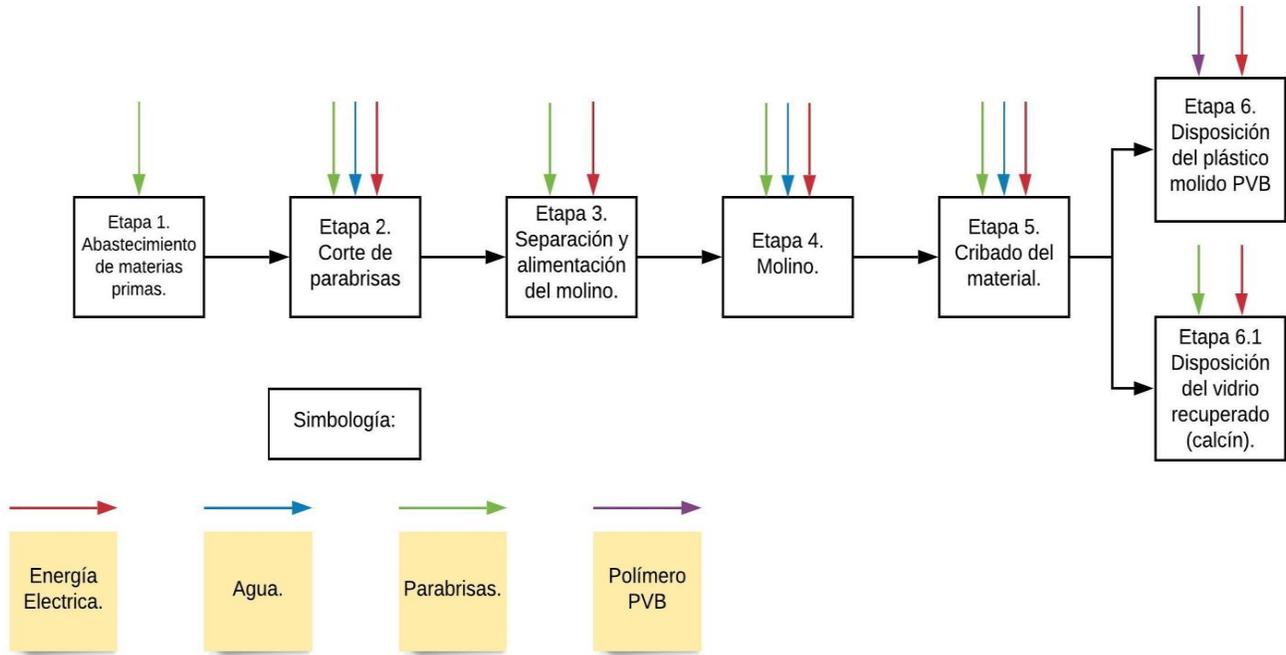


Figura 16. Diagrama de flujo del proceso de des-laminación donde se han determinado las entradas y correspondientes salidas en cada una de las etapas de este.

Fuente: elaboración propia

4.1.8 Cálculo del Índice de Circularidad del Material.

Como uno de los objetivos planteados en la presente investigación se realizó el análisis del índice de circularidad del material (MCI por sus siglas en inglés) el cual se analizó en función de todo el proceso de ciclo de vida del parabrisas (ver figura 17).

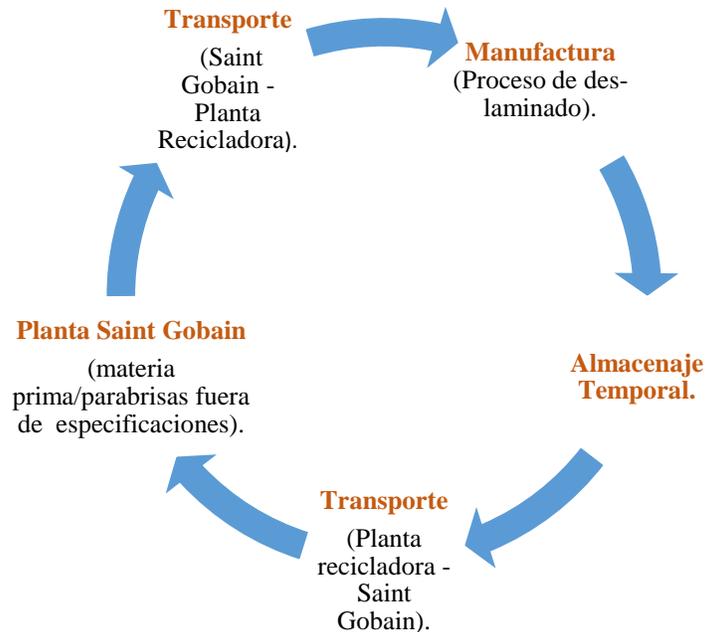


Figura 17. Ciclo de vida del proceso de parabrisas desde 2 puntos en específico (Saint Gobain y planta recicladora), donde se considera el proceso principal de la empresa (des-laminado), en el cual se recupera de forma parcial el vidrio para su venta posterior. Fuente: elaboración propia

La problemática principal del proceso de reciclaje de la Planta Recicladora Guadalajara es que al plastificante separado no se le realiza ningún tratamiento final, ya que las características que posee no le permiten a la empresa poder incorporarlo a sus procesos productivos, además de que su tasa de reciclaje es muy baja, ya que como se ha investigado, hay muy poca información sobre este material en función de su reciclaje. Por ende, para la presente obtención del índice se tomaron diferentes elementos como:

- Porcentaje de re-uso de materia prima y destino final.
- Porcentaje de reciclado de materia prima y destino final.
- Eficiencia de reciclado.
- Tiempo de vida.
- Unidades funcionales.

En la figura 18 y 19 se verifica mediante la herramienta de la **Fundación Ellen Macarthur** el análisis del material (parabrisas) tomando en consideración los elementos previamente mencionados y realizando un primer análisis para el polímero:

AN APPROACH TO MEASURING CIRCULARITY



MCI = 0.00

Drag the sliders to change input values and see how the MCI changes!



Figura 18. Datos ingresados en el simulador.
Fuente: (Ellen Macarthur Foundation, 2017)

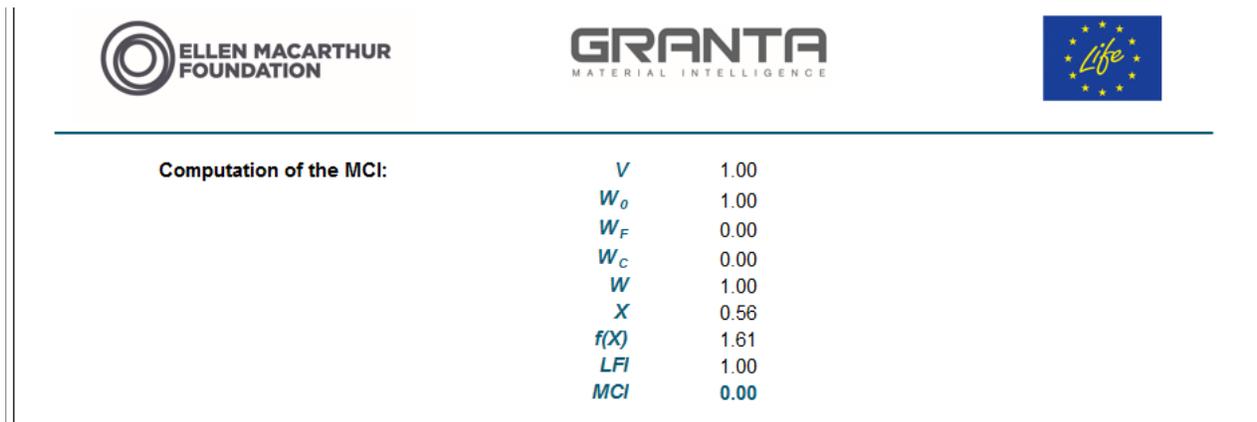


Figura 19. Resultado de cada una de las variables del simulador.
Fuente: (Ellen Macarthur Foundation, 2017).

El valor del índice de circularidad obtenido para el polímero es de **0**, lo que indica que el material se encuentra en un punto de alta linealidad.

El polímero (PVB) presenta porcentajes de 0% en las categorías de “materias primas reusadas” y la existencia de “re-uso después del uso” porque el material polimérico no proviene de materiales reusados que funcionan como fuente primordial, es decir, que cada uno de sus componentes procede de materiales vírgenes. A su vez, tal material no tiene un reusó después del proceso de des-laminado de acuerdo con las condiciones e información observada y notificada por la empresa.

En función de la materia prima proveniente de “materiales reciclados” y la existencia de “reciclaje después del uso”, los valores de los porcentajes son 0, debido a que los materiales usados en el PVB son vírgenes

y no existe reciclaje posterior al procesamiento del parabrisas. Además, debido a estas condiciones la eficiencia del reciclaje presenta los valores mínimos por la consecuente falta de dicho proceso.

Con base a lo anterior, se ha considerado que el tiempo de vida sea a partir de la jornada laboral que son 8 horas. La correspondiente unidad funcional está definida por las 1.7 ton que se logra separar de polímero respecto a las 8 ton que se procesan.

Por lo que queda abierta la posibilidad de proponer alternativas que incrementen su circularidad.

Esto concuerda con el hecho de que existen hasta la fecha pocos reportes referentes al reciclaje o segundo uso del plastificante incorporado al parabrisas.

Lo antes analizado permitió definir la circularidad del ciclo de vida del parabrisas. Como segunda evaluación se analizó el MCI para el calcín (vidrio reciclado) tomando en cuenta únicamente del proceso de des-laminado, es decir, se analiza desde la entrada del parabrisas a dicho proceso de manufactura hasta la obtención del vidrio reciclado ya separado del polímero. Con los elementos que considera la herramienta de la Fundación Ellen MacArthur el índice de circularidad obtenido es el siguiente (ver figura 20):

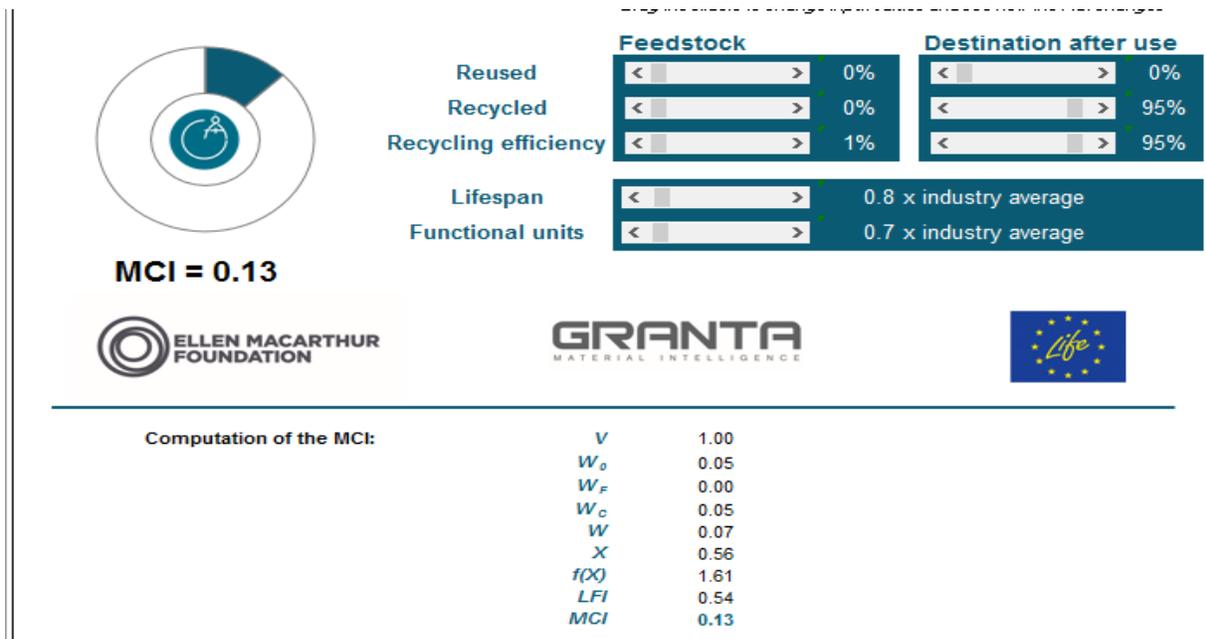


Figura 20. Resultados de las variables implicados en la simulación para el calcín o vidrio reciclado.

Fuente: (Ellen Macarthur Foundation, 2017).

Como se puede observar el IMC es 0.13 lo que quiere decir que ese proceso presenta una linealidad muy alta debido a que solamente se considera esta etapa (des-laminado) como el análisis de circularidad.

En este segundo análisis los porcentajes de 0% en “materias primas reusadas” y la existencia de “re-uso después del uso” representan tal valor porque el parabrisas no proviene de materiales reusados que funcionan como materia fuente principal para el proceso, es decir, que cada uno de sus componentes procede de materiales vírgenes.

En función de la materia prima proveniente de “materiales reciclados” y la “existencia de reciclaje después del uso”, los valores de los porcentajes son 0 y 95, debido a que los materiales usados en el parabrisas son vírgenes y el reciclaje tiene un alto valor debido a que todo el material recuperado se vende para su aprovechamiento en otra planta. Además, debido a estas condiciones la eficiencia del reciclaje presenta valores altos por la recuperación y posterior venta del calcín.

Con base a lo anterior, se ha considerado que el tiempo de vida sea a partir de la jornada laboral que son 8 horas. La unidad funcional corresponde a las 6.3 ton que se obtiene de vidrio respecto a las 8 ton que se procesan.

Lo anterior permite identificar que si bien, el material se puede reciclar no quiere decir que vaya a presentar índices de circularidad altos y esto es debido a que solo existe reciclaje para dicho material.

4.1.9 Aplicación de la herramienta Circular Economy Toolkit.

Al aplicar la herramienta Circular Economy Toolkit bajo las condiciones que se presentan en la Planta Recicladora Guadalajara se identificaron áreas que son susceptibles a mejorarse y algunas presentan una alta eficiencia debido a las etapas en las que se desempeñan.

Como se puede observar en la figura 21, se encuentran coloreadas las áreas y subáreas respectivas de acuerdo con los potenciales de mejora correspondientes a la evaluación con las características de la empresa seleccionada, mismos que a continuación son brevemente explicados para un mayor entendimiento de los resultados obtenidos.

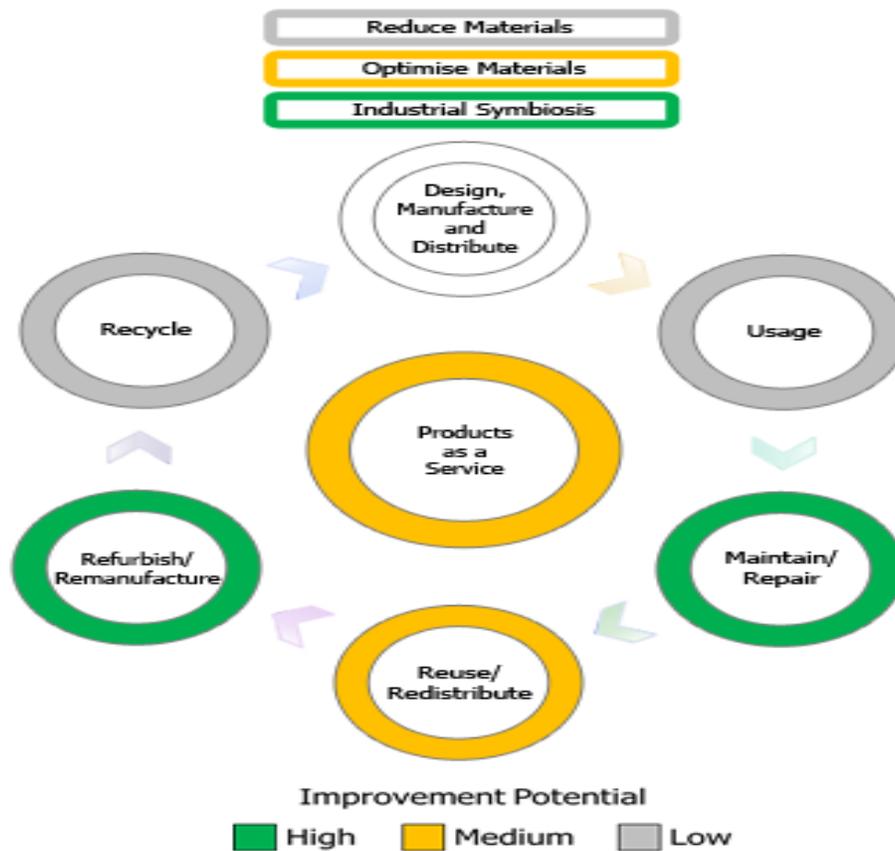


Figura 21. Subáreas coloreadas consideradas dentro de la herramienta en función del potencial de mejora al que se encuentren susceptibles.
Fuente: tomado de (Toolkit, 2019).

Dentro del color verde que representa un alto potencial de mejora se encuentra la remanufactura y la reparación, subetapas que están ligadas directamente a la simbiosis industrial donde se busca desarrollar procesos amigables y que se establezcan planes para la recuperación de recursos para su reutilización. En potenciales medios de mejora se encuentra la redistribución del producto, debido a la compra establecida que mantiene con sus clientes. Además, se puede verificar que el producto se mantiene con mejora media al ser considerado como un servicio, esto es debido a las interacciones y venta del vidrio reciclado, ya que, de acuerdo con las características de la empresa, el calcín es vendido cuando se logra recuperar del parabrisas. Lo anterior tiene un consecuente impacto el área de optimización de materiales porque al poder implementar mejoras a la distribución y el producto final se puede incrementar la efectividad del re-uso del producto. En color gris representado con un potencial de mejora bajo se encuentra el reciclaje y uso del producto y/o sus materiales. Estos resultados son bajos debido a que el proceso recupera parte del

vidrio del parabrisas, pero realmente no es un proceso de reciclaje por sí mismo sino únicamente de recuperación y separación de vidrio respecto al material polimérico. Por ende, respecto al uso correspondiente, la alternativa de la empresa es la venta del calcín y el desecho inmediato del PVB. El impacto se distingue en el área de reducción de materiales porque es inevitable el uso continuo del material del parabrisas y el posterior envío del polímero a vertedero.

La tabla 9 muestra a detalle el análisis pertinente de la herramienta aplicada:

Tabla 9. Resumen del potencial de mejora en cada subárea contemplada por la herramienta analizada, considerando la información de la Planta Recicladora Guadalajara*.

Fuente: modificado de (Toolkit, 2019).

Área de Mejora.	Potencial de Mejora.
Reducción de Materiales.	Oportunidad Baja.
Optimización de Materiales.	Oportunidad Media
Simbiosis Industrial.	Oportunidad Alta
Uso.	Oportunidad Baja
Mantenimiento/Reparación.	Oportunidad Alta
Re-uso/Redistribución.	Oportunidad Media
Renovar/Re-manufactura.	Oportunidad Alta
Reciclaje del Producto.	Oportunidad Baja
Producto como un Servicio.	Oportunidad Media.

*Para una mayor comprensión de las respuestas asignadas en esta herramienta, ver la tabla de anexo de “Respuestas a las preguntas la herramienta Circular Economy Toolkit”.

4.1.10 Aplicación del Análisis de Ciclo de Vida.

Etapa 1. Objetivo y Alcance del ACV.

✓ Objetivo.

El público al que se prevé comunicar los resultados del estudio está conformado por los directivos de la empresa Recicladora.

El objetivo para realizar el estudio fue analizar el proceso de reciclado de vidrio de parabrisas, donde se aplicará la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV), utilizando software especializado, para hacer la comparación de las cargas ambientales asociadas al proceso seleccionado.

La aplicación prevista es utilizar los resultados para poder visualizar las áreas que son susceptibles a modificarse dentro del proceso.

✓ **Alcance.**

El ciclo de vida del producto representa las etapas en las cuales se ve involucrado el parabrisas y es fundamental definir que se ha establecido que para el análisis de ciclo de vida el estudio se realizó a partir de dicho proceso (ver figura 22).

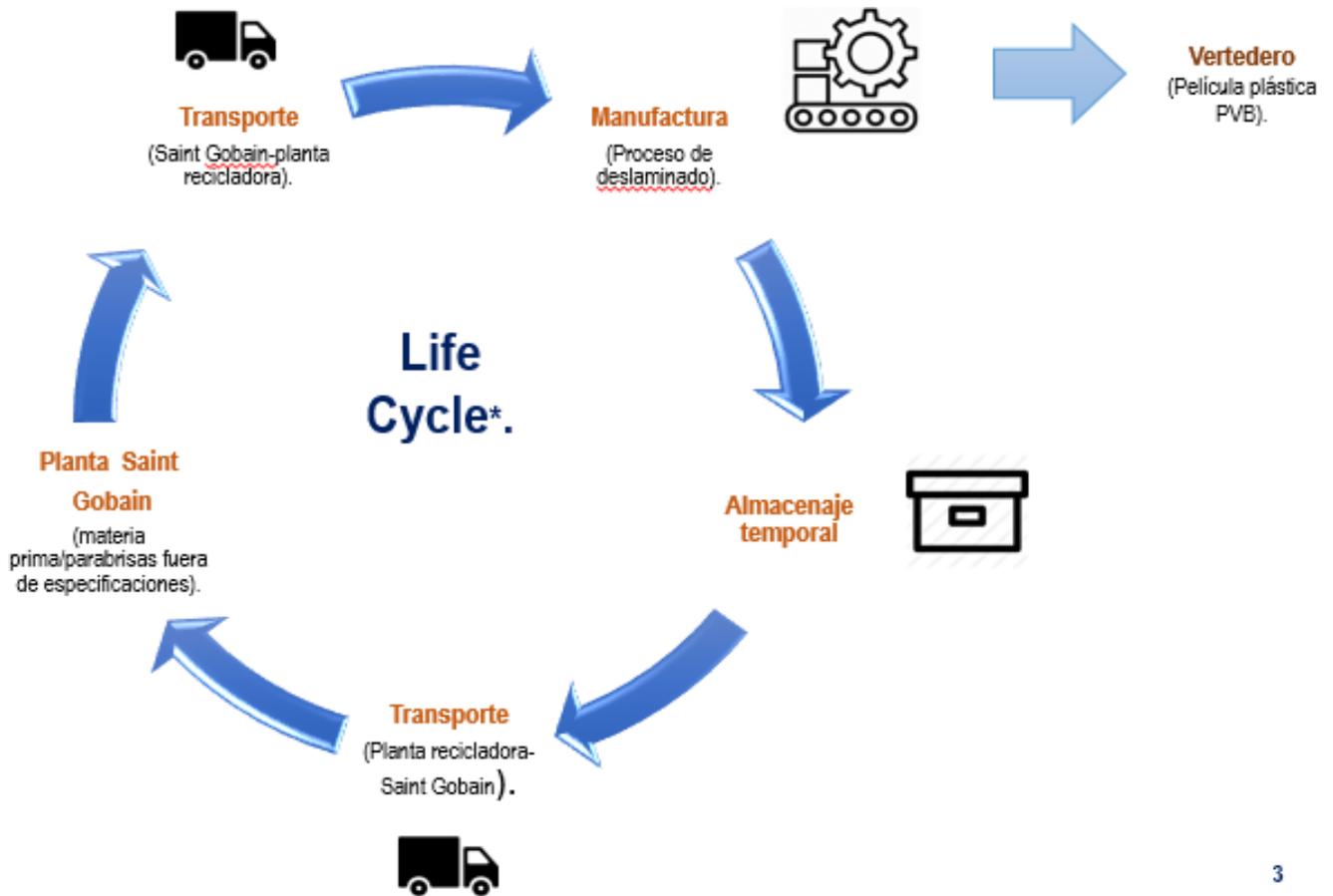


Figura 22. Ciclo de vida del parabrisas en la planta Recicladora de Vidrio.
Fuente: elaboración propia

Dentro de la limitación de dicha evaluación, se ha definido que el ACV se realizará en la etapa de manufactura (des-laminado) en la cual se separa el vidrio del parabrisas y el polímero PVB, el cual se encuentra unido a las placas de vidrio del producto. Cabe mencionar que se ha considerado desde la llegada de la materia prima hasta la obtención del vidrio separado. La empresa Recicladora cuantifica aproximadamente 14 ton de material de entrada, de las cuales se tiene el dato estimado de producción de

6.3 ton de vidrio que se recupera en una jornada laboral continua de 8 horas. A continuación, se detallan las etapas del proceso de des-laminado.



5

Figura 23. Etapas del proceso de des-laminado de la Planta Recicladora de Vidrio.

Fuente: elaboración propia

✓ Unidad Funcional.

Para el establecimiento de la métrica es fundamental definir los elementos necesarios del proceso productivo adjuntando las relaciones entre ellos para poder establecer la unidad funcional, la tabla 10 presenta la relación de lo antes mencionado.

Tabla 10. Descripción de los elementos y relaciones del proceso productivo de des-laminado.

Fuente: elaboración propia

Elementos	Relaciones	Funciones
Camión incorpora los parabrisas a la empresa.	Transporte de materia prima (etapa 1)	El camión llega a la empresa donde deja los parabrisas para su uso posterior.
Uso de bobcat para estibas	Transporte y disposición de parabrisas (etapa 2) posterior a la etapa 1	El bobcat introduce los parabrisas a la planta y coloca en estibas para incorporarlos al proceso productivo.
Incorporación de parabrisas a proceso	Manufactura del parabrisas (etapa 3) posterior a la etapa 2	El parabrisas es incorporado al proceso donde la fase de manufactura (Des-laminado) separa parcialmente el vidrio (calcín) del polímero.
Almacenaje de vidrio reciclado (calcín)	Almacenaje (etapa 4) posterior a la etapa 3	El calcín obtenido es almacenado para su venta a empresas externas.
Vertedero PVB	Almacenaje (etapa 5) durante la realización de la etapa 4	El polímero al ser separado llega a su etapa final, ya que la empresa no le tiene asignada una función específica.

De acuerdo con la información anterior y a la relación de todos los elementos, se ha definido que la unidad funcional de este estudio es la recuperación de *6.3 ton de vidrio reciclado (calcín) respecto a la cantidad de polímero que se logra separar.*

✓ **Tipos de Impacto Por Evaluar.**

El proceso de des-laminado utiliza mucha energía eléctrica, por lo tanto, la generación de los motores libera gases de efecto invernadero y el más preciso en este proceso es el Dióxido de Carbono (CO_2). Por ende, se ha establecido que para este estudio se analicen los impactos del calentamiento global y escasez de agua como un análisis adicional.

Para la presente evaluación se utilizará software especializado como lo es UMBERTO y SIMAPRO.

✓ **Limitaciones técnicas y etapas excluidas del análisis.**

Los límites del sistema determinan cuáles son los procesos unitarios que deben incluir dentro del ACV. La selección de los límites del sistema y la exclusión de etapas deben ser coherentes con los objetivos del estudio. Por lo tanto:

- Se han excluido todas las etapas restantes del ciclo de vida del parabrisas, solamente se seleccionó la fase de manufactura.
- Los datos que se obtendrán y expondrán en la siguiente etapa del ACV son información estimada, lo que se traduce en que el estudio pueda tener variaciones en los resultados.
- No se incluye dentro del estudio el combustible que utiliza el bobcat (minicargador) para la etapa 1 del proceso productivo.
- No se considera la energía proporcionada para el suministro de agua en la etapa de corte y molido de parabrisas, ya que es una bomba a la cual no se tiene acceso y se encuentra a distancia alejada del proceso de des-laminado.

✓ **Requisitos de calidad de los datos.**

Los datos obtenidos son estimaciones que se llevaron a cabo dentro de la planta, ya que mucha de la información no se encuentra disponible o es limitada.

✓ **Fuentes de los datos.**

Los datos obtenidos en función de entradas, salidas y cuantificación de energía son una recopilación de información tomada *in situ*, donde se han realizado entrevistas con los ingenieros que supervisan el proceso, así como de la información con la que se encuentra en el archivo de la compañía.

✓ **Suposiciones.**

Como se mencionó con anterioridad, existe información muy limitada para la implementación de la metodología de ACV en función del vidrio de parabrisas, por lo que se debe partir de ciertas suposiciones, entre las que se pueden resaltar las siguientes:

- Las estimaciones de las entradas y salidas son datos recopilados por experiencia del personal que supervisa el proceso.
- El consumo de energía dentro del proceso productivo es grande debido a la cantidad y potencia de los motores que utiliza.
- La cantidad de agua utilizada por los aspersores en las etapas de corte, molido y cribado es un flujo constante durante la jornada laboral, por lo cual se ha estimado que el consumo de cada aspersor sea a partir de las características de fábrica.
- No se ha encontrado bibliografía referente al ACV en procesos semejantes de reciclado de vidrio de parabrisas ni en la separación del polímero PVB.

Etapas 2. Inventario del Análisis del Ciclo de Vida.

Dentro de esta etapa se han definido las entradas y salidas del proceso que se ha evaluado. A continuación, se detallan las etapas mediante un diagrama de flujo donde se distinguen los recursos y materiales (ver figura 24).

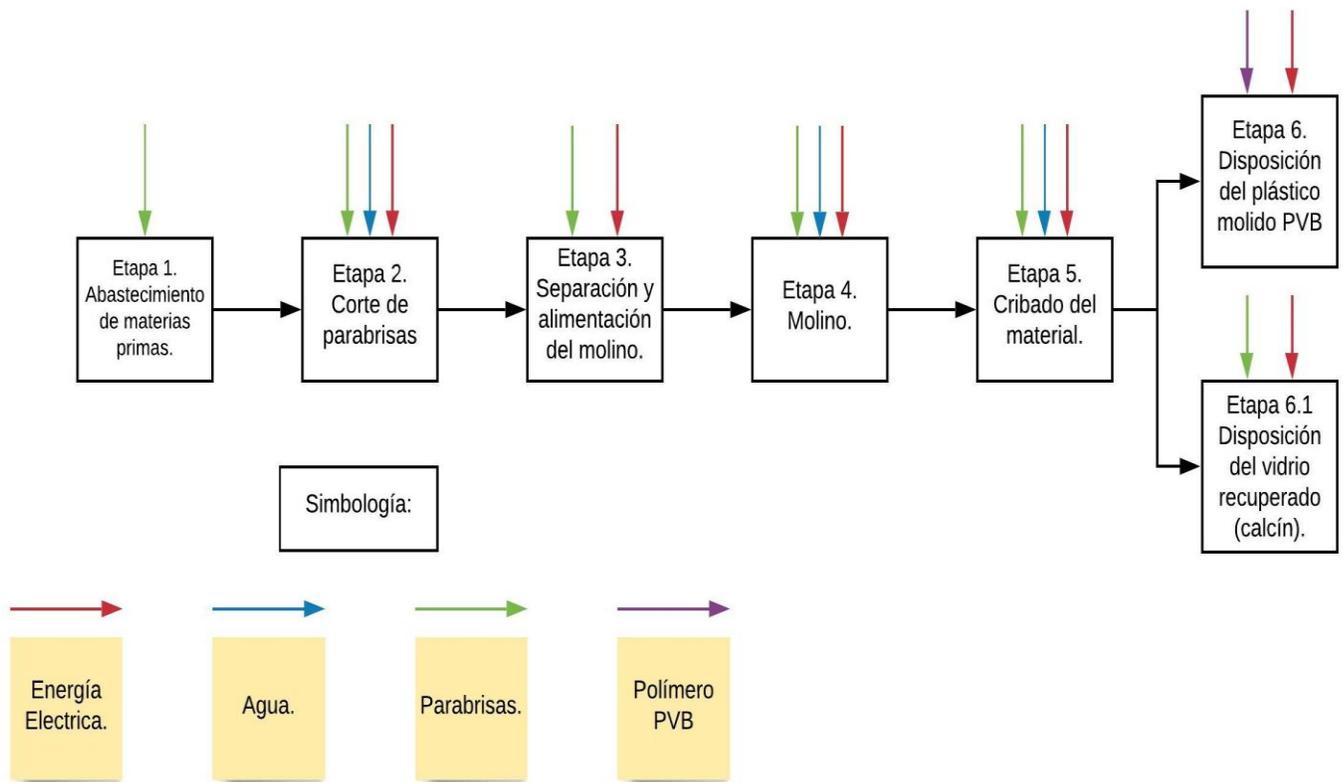


Figura 24. Diagrama de flujo del proceso de des-laminado donde se han determinado las entradas y correspondientes salidas en cada una de las etapas de este.

Fuente: elaboración propia

En la tabla 11 se presentan las etapas del ciclo productivo donde se han cuantificado los recursos necesarios con base en la unidad funcional que son necesarios para el análisis:

Tabla 11. Inventario de las entradas, salidas y recursos utilizados en el proceso de des-laminado considerando la jornada laboral de 8 horas.

Fuente: elaboración propia

Etapa	Energía en una hora	Energía en 8 horas.	Agua en una hora	Agua en 8 horas	Parabrisas	Polímero
Abastecimiento de materia prima	nula	nula	nula	nula	8 ton	nula
Corte de parabrisas.	1.622 kWh	12.976 kWh	18 L	144 L	8 ton	nula
Separación y alimentación del molino.	0.803 kWh	6.424 kWh	nula	nula	8 ton	nula
Molino	3.1636 kWh	25.308 kWh	12 L	96 L	8 ton	nula
*Banda de distribución	0.75 kWh	6 kWh	nula	nula	8 ton	nula
Cribado del material	0.462 kWh	3.696 kWh	6 L	48 L	8 ton	nula
Disposición del plástico PVB	0.349 kWh	2.798 kWh	nula	nula	nula	1.7 ton
Disposición del vidrio recuperado	0.561 kWh	4.488 kWh	nula	nula	6.3 ton	nula

*Se ha considerado este punto porque es una banda de distribución que utiliza un motor para darle movimiento.

Para las emisiones que genera cada motor, se ha investigado a partir del consumo que establece el gobierno mexicano que por cada kWh se generan 0.458 kg de CO_2 (Jiménez, 2017).

En la tabla 12 se detallan las emisiones de CO_2 en las etapas que se consume energía eléctrica.

Tabla 12. Inventario de las emisiones por consumo energético en las diversas etapas del proceso de des-laminado.

Fuente: elaboración propia

Etapa	Energía en 8 horas (kWh)	Emisiones en kg de CO_2
Corte de parabrisas.	12.976	5.94
Separación y alimentación del molino.	6.424	2.94
Molino.	25.308	11.59
Banda de distribución.	6	2.74
Cribado del material.	3.696	1.69
Disposición del plástico PVB.	2.798	1.28
Disposición del vidrio recuperado.	4.488	2.05

Etapa 3. Evaluación del impacto del ciclo de vida.

Para la evaluación del impacto del ACV se ha realizado una comparación de resultados respecto al software UMBERTO y SIMAPRO, los cuales permiten evaluar y realizar cálculos respecto a las categorías de impacto que se han seleccionado y al mismo tiempo verificar datos como huella de carbono, huella hídrica y las emisiones correspondientes.

En el presente proyecto, se ha iniciado el estudio utilizando el software UMBERTO en el cual se detalla un diagrama Sankey que es en esencia un flujo que contiene las fases o etapas del proceso de des-laminado y las entradas y salidas de éstas. Para este particular estudio, se ha identificado que la sustancia contaminante es el CO_2 , mismo que al ser un gas de efecto invernadero genera un gran impacto en el ambiente y contribuye al calentamiento global (ver figura 25).

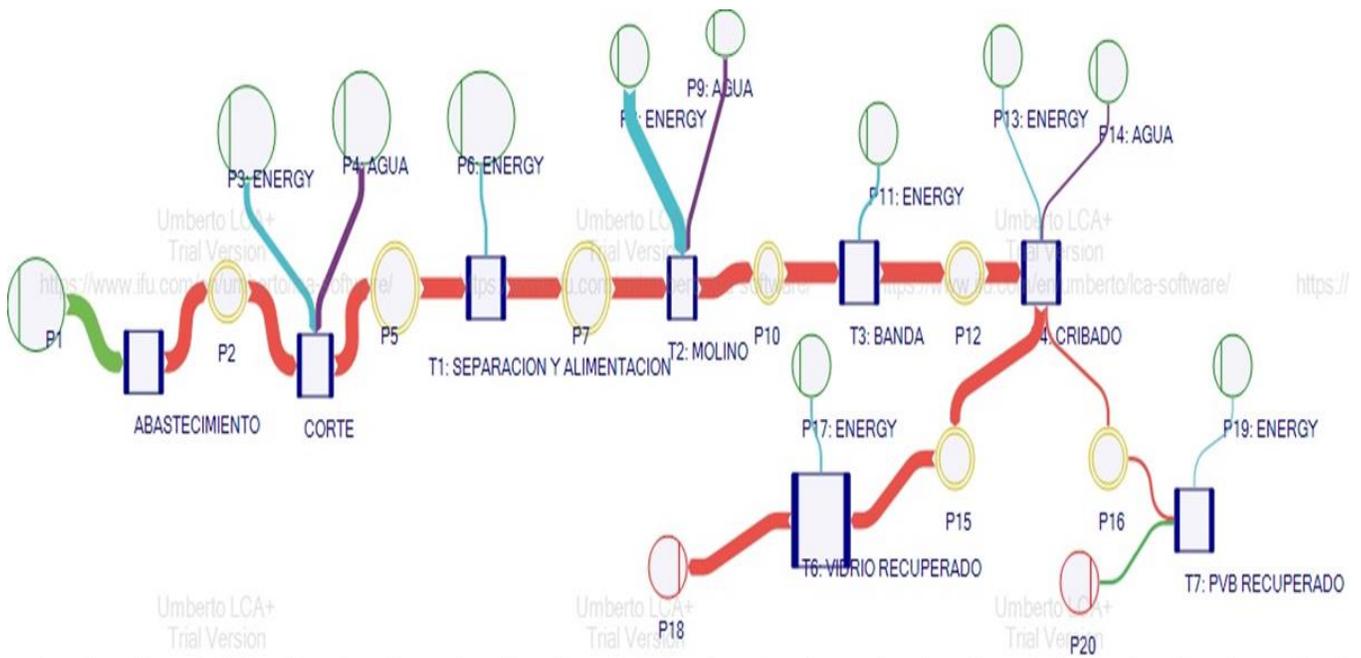


Figura 25. Diagrama Sankey del proceso de des-laminado que muestra flujos, entradas y salidas de cada fase del proceso.
Fuente: tomado de (Umberto, 2020).

La figura 25 presenta las entradas y salidas del proceso de des-laminado, en el que la energía eléctrica es la que permite hacer funcionar el sistema. Existen etapas dentro del mismo en las que se usa agua para mitigar los polvos provocados por las máquinas. Para esta primera aproximación en las figuras 26.27 y 28 se detallan los impactos generados en el proceso y la respectiva huella de carbono que genera:

Ph	Phase	Quantity	Unit	Share
Product: PRODUCT [A26 (T6 -> P18)] (6,300.00 kg): 21.68 kg CO2-Eq				
▶	Other	21.68	kg CO2-Eq	100 %
Product: PVB [A29 (T7 -> P20)] (1,700.00 kg): 6.58 kg CO2-Eq				
▶	Other	6.58	kg CO2-Eq	100 %



Figura 26. Información sobre la cantidad de kg eq de CO_2 en el proceso de des-laminado separando el flujo total del vidrio recuperado y el flujo del plástico separado.
Fuente: tomado de (Umberto, 2020).

Phase: Other: 21.68 kg CO2-Eq			
Type: Indirect Emissions of Resources and Energy Consumption: 21.68 kg CO2-Eq			
▲	ENERGIA	1.33	kg CO2-Eq T4: CRIBADO
▲	ENERGIA	4.68	kg CO2-Eq CORTE
▲	ENERGIA	2.32	kg CO2-Eq T1: SEPARACION Y ALIME
▲	ENERGIA	9.13	kg CO2-Eq T2: MOLINO
▲	ENERGIA	2.16	kg CO2-Eq T3: BANDA
▲	ENERGIA	2.06	kg CO2-Eq T6: VIDRIO RECUPERADO
Product: PVB [A29 (T7 -> P20)] (1,700.00 kg)			
Phase: Other: 6.58 kg CO2-Eq			
Type: Indirect Emissions of Resources and Energy Consumption: 6.58 kg CO2-Eq			
▲	ENERGIA	1.26	kg CO2-Eq CORTE
▲	ENERGIA	0.63	kg CO2-Eq T1: SEPARACION Y ALIME
▲	ENERGIA	2.46	kg CO2-Eq T2: MOLINO
▲	ENERGIA	0.58	kg CO2-Eq T3: BANDA
▲	ENERGIA	0.36	kg CO2-Eq T4: CRIBADO
▲	ENERGIA	1.28	kg CO2-Eq T7: PVB RECUPERADO

Figura 27. Resumen de la cantidad de kg eq de CO_2 para cada fase del proceso de des-laminado.
Fuente: tomado de (Umberto, 2020)

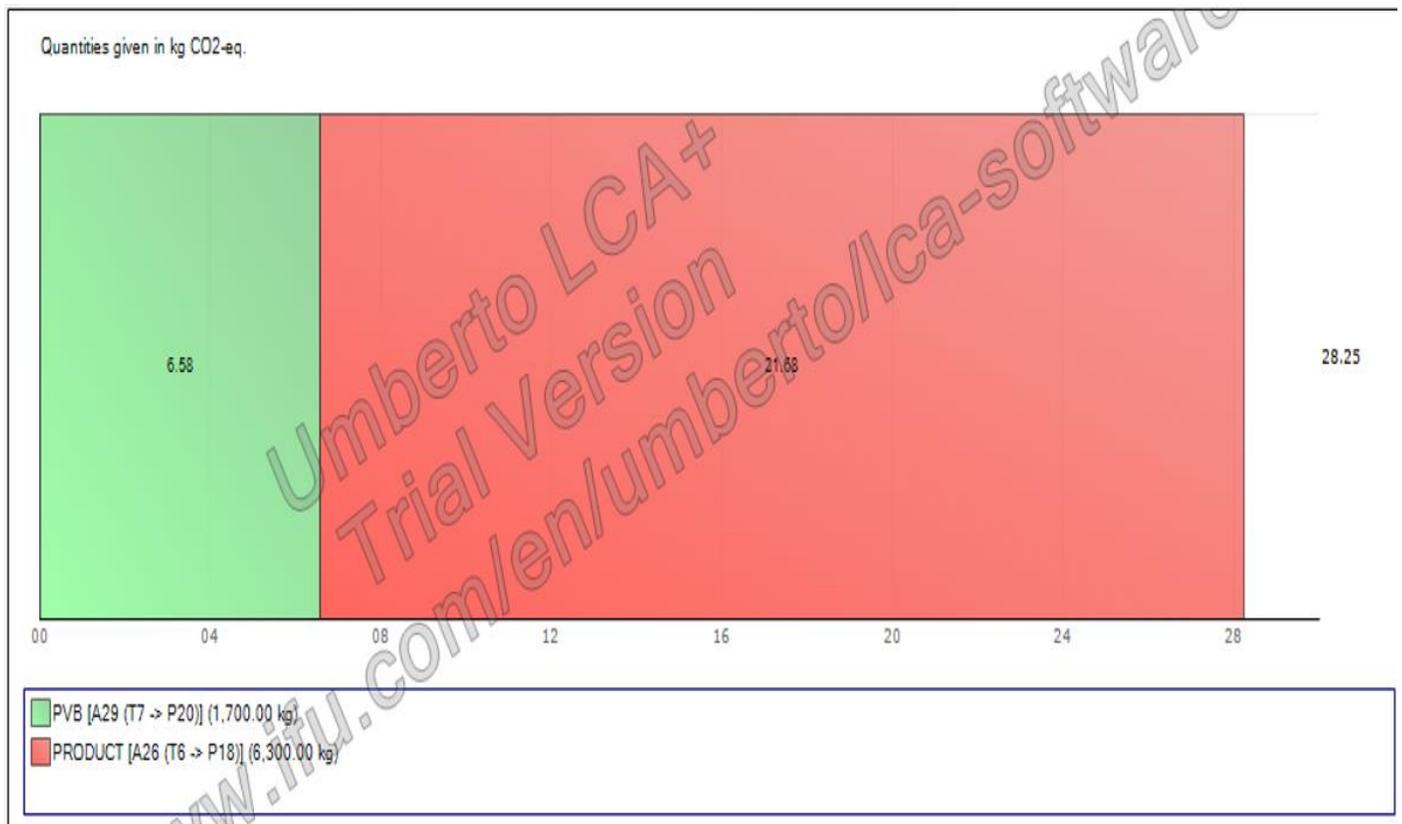
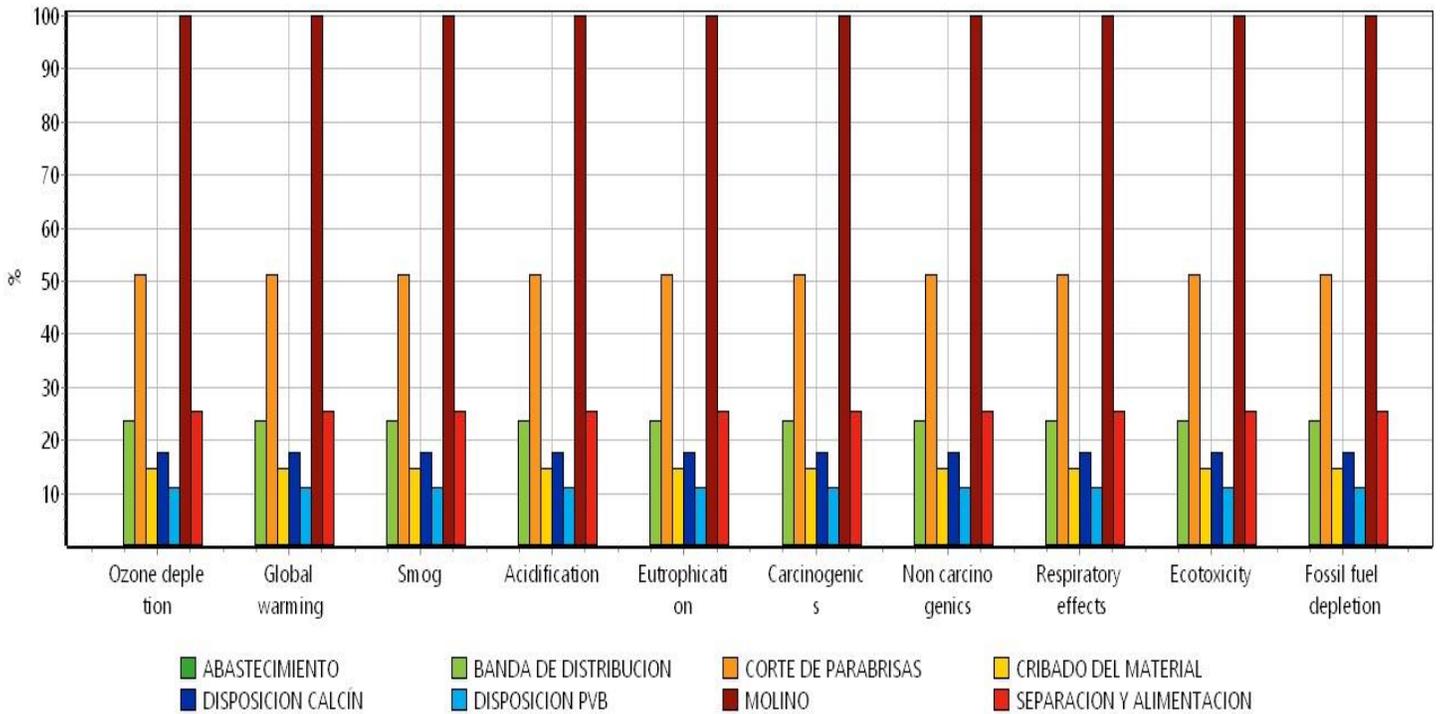


Figura 28. Cantidad total de emisiones de kg eq de CO_2 para el flujo del vidrio recuperado y del polímero separado.
Fuente: tomado de (Umberto, 2020)

Posteriormente se realizó una segunda aproximación con el software SIMAPRO el cual permite tener un enfoque más aproximado sobre las categorías de impacto. Mediante este software se logró la obtención de los cálculos para calentamiento global y la escasez de agua mediante las bibliotecas disponibles en el programa.

La figura 29 muestra los resultados en porcentaje de las categorías de impacto con las cuales se realizó una comparación para las diferentes fases que comprende el proceso de des-laminado.



Comparando procesos; Método: TRACI 2.1 V1.05 / Canada 2005 / Caracterización / Excluyendo procesos de infraestructura / Excluyendo emisiones a largo plazo

Figura 29. Comparación de las diversas fases del proceso de des-laminado en función de las diferentes categorías de impacto.

Fuente: tomado de SIMAPRO 9.0.

Posterior a la obtención de los resultados para las comparaciones entre las diversas fases del proceso seleccionado, se realizó una red general que comprende el análisis de todas las entradas y salidas del proceso conjuntas donde se detalla la cantidad de energía utilizada y la cantidad de CO_2 equivalente, tal como lo muestra la figura 30:

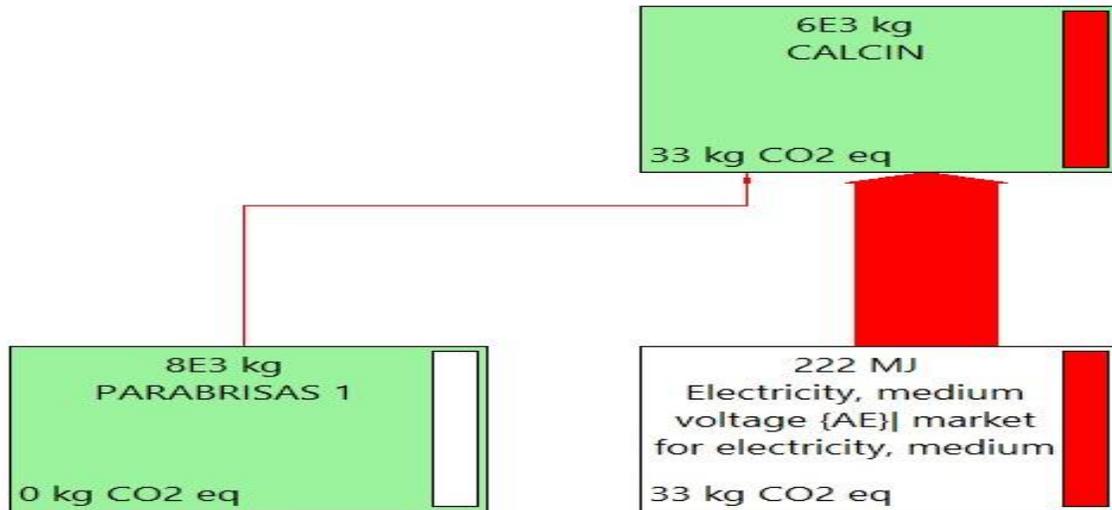
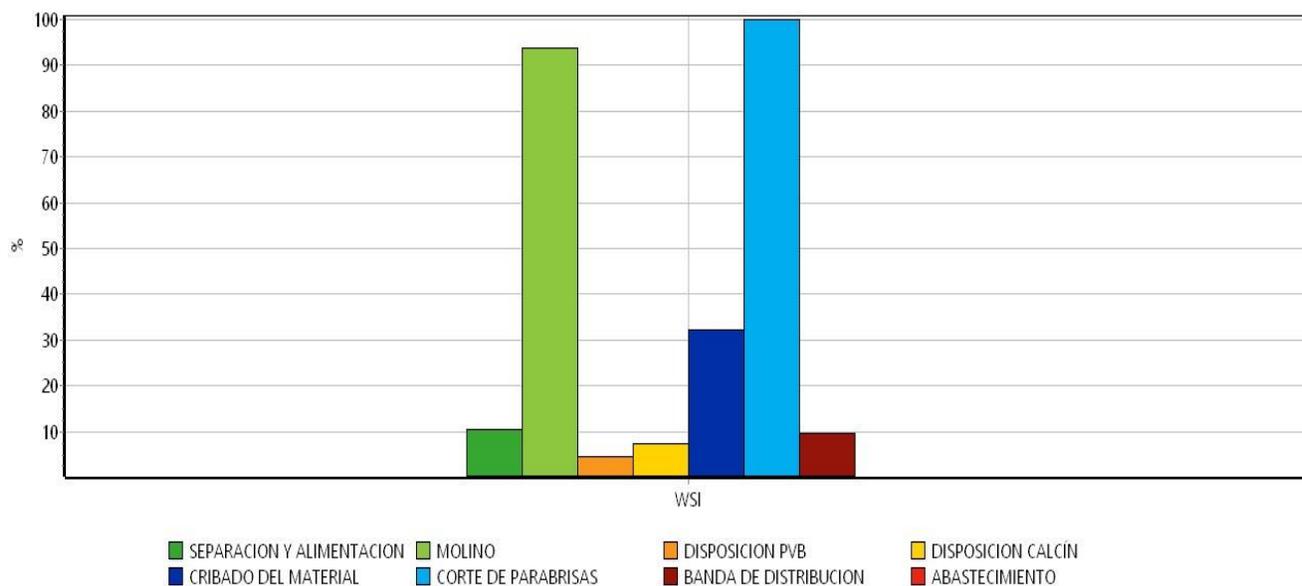


Figura 30. Red general del proceso de des-laminado donde se obtuvieron resultados finales del impacto ambiental.
Fuente: tomado de SIMAPRO 9.0

Como se muestra en el inventario del proceso de des-laminado parte de este utiliza agua para poder evitar ciertos desprendimientos de vapores debido al vidrio cortado o molido, por lo tanto, se realizó una evaluación tomando en cuenta la categoría de escasez de agua correspondiente a la huella hídrica, tal como se muestra en la figura 31:



Comparando procesos; Método: Boulay et al 2011 (Water Scarcity) V1.02 / Caracterización / Excluyendo procesos de infraestructura / Excluyendo emisiones a largo plazo

Figura 31. Comparación de la categoría escasez de agua para las diversas etapas del proceso de des-laminado.
Fuente: tomado de SIMAPRO 9.0.

Etapa 4. Interpretación del Análisis del Ciclo de Vida.

✓ Identificación de aspectos significativos.

Para la determinación de los aspectos significativos se realizó un análisis de contribución e influencia donde se pretende clasificar y priorizar los resultados de acuerdo con la siguiente ponderación (Leiva, 2016).

- A, contribución mayor a 50% influencia significativa.
- B, entre 25 y 50 % influencia relevante.
- C, entre 10% y 25% influencia bastante importante.
- D, entre 2.5 y 10% influencia menor.
- E, contribución menor a 2.5% influencia despreciable.

El grado de control se puede interpretar como la capacidad que tiene la compañía para modificar sus procesos actuales. La influencia implica el grado de impacto ambiental pero además la consecuente posibilidad de realizar mejoras en dicha fase.

De acuerdo con los datos proporcionados por el software SIMAPRO, los cuales arrojan datos ponderados para la realización del análisis de contribución, las conclusiones preliminares se resumen en las siguientes tablas, en las cuales se presentan las contribuciones y las influencias para las diversas categorías de impacto:

Tabla 13. Análisis de contribución e influencia para las diversas etapas del proceso de des-laminado en la categoría de calentamiento global.

Fuente: elaboración propia

Etapas	Ponderación	Contribución	Influencia
Abastecimiento	0%	E	Despreciable
Corte de parabrisas	52%	A	Significativa
Separación y alimentación.	25%	B	Relevante
Molino	100%	A	Significativa
Banda de distribución	24%	C	Importante
Cribado	14%	C	Importante
Disposición Calcín	18%	C	Importante
Disposición PVB	12%	C	Importante

La tabla anterior detalla un resumen conciso de las influencias en cada una de las etapas del proceso de des-laminado. La etapa “Corte de parabrisas” y “Molino” presentan influencias significativas respecto a la categoría de Calentamiento Global, esto es debido a que presentan mayor grado de impacto por la cantidad de CO_2 emitido, ya que la maquinaria y la energía utilizada durante estas fases del proceso son mayores respecto a las otras fases. Además, se puede verificar que existen otras etapas dentro del proceso las cuales tienen una influencia importante, lo que permite identificar áreas de oportunidad que podrían estar sujetas a recomendaciones para modificar su impacto respecto a la categoría correspondiente. La etapa “Separación y alimentación” presenta una influencia relevante, lo que se conlleva a que esta fase se encuentra próxima a modificación. Lo anterior implica que dependiendo de las características y cantidad de emisiones se deben plantear las estrategias correspondientes para generar posibles soluciones más amigables con el ambiente en las etapas correspondientes. Por ende, tanto las influencias relevantes como significativas son las que deben estar sujetas a modificaciones primordiales. Aquellas etapas con influencias despreciables no necesitan de modificaciones posteriores debido a que su impacto es mínimo.

Tabla 14. Análisis de contribución e influencia para las diversas etapas del proceso de des-laminado en la categoría de escasez de agua.

Fuente: elaboración propia

Etapas	Ponderación	Contribución	Influencia
Abastecimiento	0%	E	Despreciable
Corte de parabrisas	100%	A	Significativa
Separación y alimentación.	10%	B	Relevante
Molino	96%	A	Significativa
Banda de distribución	10%	C	Importante
Cribado	32%	B	Relevante
Disposición Calcín	6%	D	Menor
Disposición PVB	2%	E	Despreciable

De acuerdo con la tabla 14 en la categoría de escasez de agua se identifican 2 fases con influencia significativa (Corte de parabrisas y Molino) las cuales utilizan la mayor cantidad de agua ya que para la consecuente eliminación de polvos producidos en dichas fases es necesario el uso del recurso hídrico para poder contrarrestarlos. La etapa con influencia relevante (Cribado) al igual que las anteriores, son las que deben estar sujetas a un mayor control y observación para definir las como etapas de modificación primordial, esto es debido al uso de agua recurrente que utilizan. Las otras fases del proceso, tanto las de influencia importante, menor y despreciable, no presentan impactos significativos, pero queda a consideración de la empresa la realización de modificaciones o posibles estrategias de mayor circularidad.

✓ **Conclusiones preliminares y recomendaciones del ACV.**

A continuación, se describen las recomendaciones y conclusiones preliminares de acuerdo con el análisis previamente realizado:

Conclusiones preliminares:

- La etapa de molido y corte de parabrisas son las que presentan mayor impacto e influencia en la categoría de calentamiento global debido a la cantidad de energía eléctrica consumida durante la jornada establecida.
- Al identificar etapas del proceso con influencia significativa y relevante (Molido, Corte de parabrisas, Separación y alimentación) dentro de la categoría de calentamiento global son las que están sujetas a una mayor cantidad de mejoras posibles para reducir sus efectos al ambiente.

- Las fases de “Corte y Molido de parabrisas” presentan el mayor consumo de agua, lo que se refleja en una influencia significativa en la categoría de escasez de agua. A su vez, la etapa de cribado, con una influencia relevante está sujeta como las fases antes mencionadas a posibles estrategias de mejora.
- La utilización y comparación del software UMBERTO y SIMAPRO permiten obtener resultados variados que son susceptibles a interpretarse en diversos contextos, esto es debido a las librerías disponibles dentro de cada software.

Recomendaciones:

- Se recomienda la realización de un análisis más extenso contemplando el uso y consumo de combustibles dentro del proceso al considerar el transporte de la entrada al área de proceso de deslaminado de parabrisas, el cual es realizado por un bobCat.
- El uso de fuentes de energía renovables, como la utilización de paneles solares para el suministro energético dentro de la planta pueden generar una reducción en los efectos al ambiente una vez comparándolo con los datos actuales. Esto a su vez, está influenciado para la incorporación de dichas estrategias dentro de las etapas con influencia significativa y relevante
- El uso de otras fuentes que reduzcan las emisiones por vapor que son contrarrestadas por el agua son fuente de análisis e investigación para la posible implementación de materiales que sustituyan el uso del recurso hídrico.
- Las mejoras dentro del proceso son de difícil implementación actual por la falta de estudios referentes a estos temas dentro de la planta (energías renovables). Actualmente la empresa está modificando el proceso para incrementar el grado de productividad de este, lo que indica que, al finalizar las modificaciones de este, se pueda realizar otro análisis de ciclo de vida para verificar si existen mejoras significativas que permitan aprovechar los materiales al máximo y reducir la emisión de CO_2 y el consumo de agua.
- Estrategias para el uso del PVB después de su procesamiento está sujeta a investigación para hallar estrategias de su uso al poder aplicar “Simbiosis Industrial” o alguna otra estrategia de circularidad que incorpore dicho “residuo” en otros procesos o sirva para poder ser “redestinado” con otra función en específico.

- La cuantificación del calcín y PVB, además de las entradas al proceso quedan sujetas a mejora mediante la compra de una báscula propia y la realización de un inventario consistente que permita contemplar toda la información necesaria.

4.1.11 Identificación de Oportunidades de Circularidad.

Ante el desarrollo y aplicación de los diferentes análisis e indicadores correspondientes a la evaluación del proceso de reciclado de parabrisas de la empresa Recicladora Guadalajara, se han plasmado, dentro de un diagrama (figura 32), las oportunidades circulares identificadas en el proceso, considerando cada una de las recomendaciones y resultados obtenidos hasta el momento. Además, se han tomado en cuenta las mejoras que en la actualidad la empresa está llevando a cabo para aumentar la productividad del proceso.

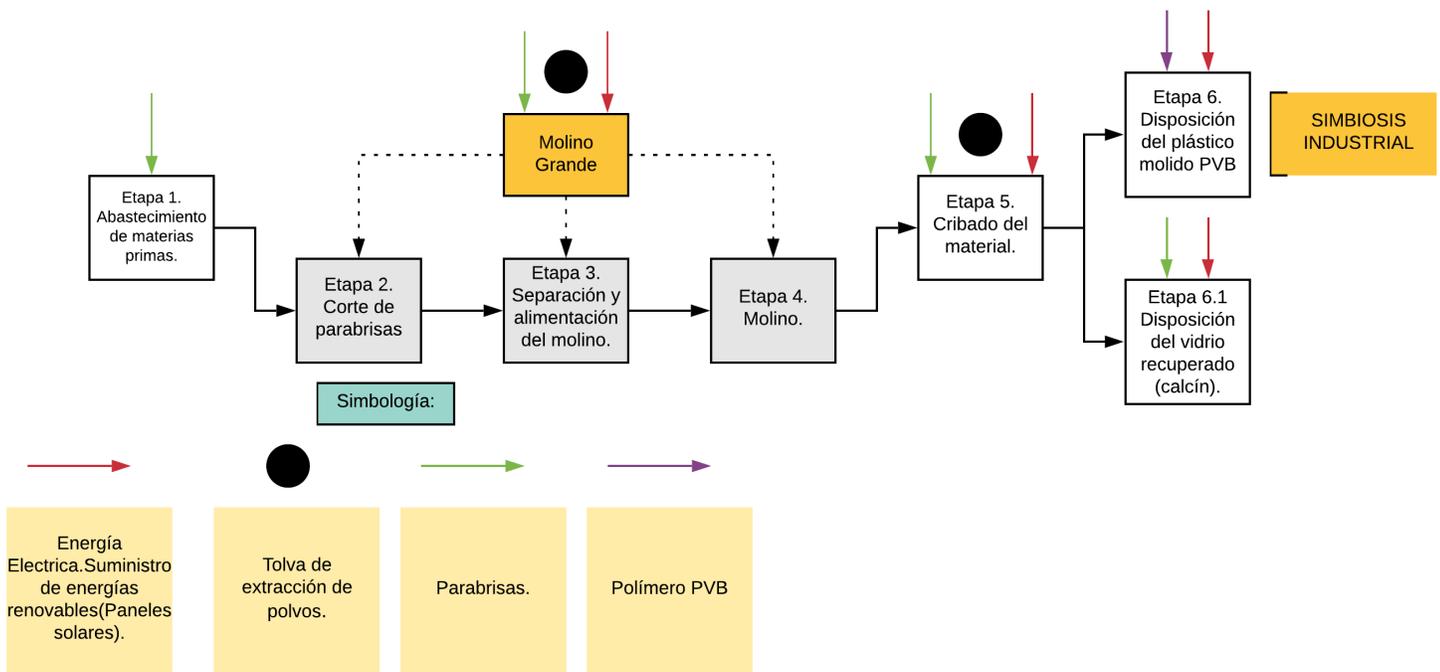


Figura 32. Modificaciones y recomendaciones en las diversas fases del proceso de des-laminado de parabrisas de la empresa Recicladora Guadalajara.
Fuente: elaboración propia.

En el diagrama anterior se observa la incorporación de mejoras que tentativamente provocarían un mayor aprovechamiento de los materiales del proceso, el aumento de la productividad de este y la posible incorporación de estrategias circulares al implementar una reestructuración del proceso donde se haga uso de energías renovables que permitan suministrar energía a cada una de las etapas de producción, logrando

así evitar la menor cantidad de emisiones al ambiente. Primeramente, la empresa a reevaluado el proceso, tratando de aplicar mejoras en el mismo, ha incorporado un molino de mayor potencia y capacidad lo que provoca que el parabrisas se introduzca de manera completa sin la necesidad de un corte previo, es por ello por lo que esta nueva modificación ha sustituido 3 etapas (Corte de parabrisas, Separación y alimentación del molino y Molino anterior). En segundo plano, otra de las modificaciones es la incorporación de una tolva de extracción de polvos dentro de esta “nueva” etapa de molido y en el cribado. Esta incorporación evita el uso del recurso hídrico, lo que se traduce en eliminar de manera completa, dentro del proceso, el consumo de agua.

Es importante mencionar que de acuerdo con estimaciones realizadas para la evaluación en función de la cantidad de Kg eq de CO_2 para las nuevas modificaciones planteadas y al considerar la misma cantidad de calcín obtenido, se ha analizado que el proceso mejorado obtiene la misma cantidad de vidrio recuperado en un tiempo estimado de 1.75 horas, mismo que el proceso actual obtiene en 8 horas, lo que quiere decir que la eficiencia del proceso mejorado es mucho mayor respecto al actual. Lo anterior permite determinar que la huella correspondiente para el proceso con mejoras es de 25 kg eq de CO_2 en un tiempo de 1.75 horas. Sí se comparan las huellas de carbono, esta es relativamente más baja respecto al proceso actual, lo que quiere decir que hay un mejoramiento en función de la productividad e impacto ambiental. Es preciso definir que si se estima el valor de la huella de carbono para las 8 horas correspondientes esta es elevada respecto a las 8 horas del proceso actual, lo cual es debido a dicho tiempo de producción y el mayor consumo por parte del molino que ha sido asignado como mejora. La tabla 15 resume la comparación de las diversas características del proceso actual y con mejoras.

Tabla 15. Comparación de las características principales del proceso actual y el integrado con posibles mejoras.
Fuente: elaboración propia.

Proceso	proceso actual	proceso con mejoras	proceso con mejoras
Características			
Tiempo de producción	8 h	1.75 h	8 h
Calcín obtenido	6.3 ton	6.3 ton	24.9 ton
Consumo energético	61.69 kWh	54 kWh	216 kWh
Huella de Carbono	28 kg eq de CO_2	25 kg eq de CO_2	100 kg eq de CO_2

Además, se ha analizado la incorporación de la introducción de energías renovables, que son a través de materiales que permiten asignar energía para evitar el uso de electricidad procedente de combustibles

fósiles. La posible implementación al proceso del uso de paneles solares jugará un papel fundamental, ya que además de un ahorro económico considerable por parte de la empresa, su huella de carbono se reduciría considerablemente, ya que el objetivo principal de los paneles solares es captar luz solar para suministrar energía de forma natural. Se ha estimado que son necesarios 66 paneles solares (de acuerdo con la potencia que suministra el panel que es 320 Watts y el consumo del proceso) para hacer funcionar el proceso con las mejoras previamente mencionadas.

Finalmente, dentro de algunas investigaciones, en la etapa de disposición del PVB se ha determinado la estrategia de “Simbiosis Industrial” la cual pretende que el plastificante sea usado o incorporado en otra cadena productiva, ya que, dentro del proceso mismo de la empresa Recicladora, no existe el aprovechamiento de este material por sus características particulares. Por ende, las empresas que puedan hacer uso eficiente de dicho material están sujeta a investigación, ya que al menos en México no existe sector industrial alguno que aproveche dicho polímero. De acuerdo con lo anterior, algunas empresas, principalmente europeas, ya han empezado a trabajar en el aprovechamiento del PVB para incorporarlos en diversas cadenas productivas para la obtención y fabricación de diversos productos, la tabla 16 muestra algunas compañías que tienen el objetivo de aprovechar dicho material polimérico.

Tabla 16. Compañías y sus aplicaciones para el aprovechamiento del PVB reciclado en diversos productos.

Compañía	Aplicación	Referencia
Laxmi Polymers	Uso de fragmentos de PVB para productos como: zapatos, pintura, componentes para moldes de inyección y tapetes para carro.	Rathi, A. (2004). Windshield PVB Recycling Laxmi Polymers. Obtenido de www.windshield-pvb-recycling.com
Recycled PVB	Uso secundario de PVB para manufactura de vidrio laminado.	Lurederra, T. C. (2009). RECYCLED-PVB. Obtenido de http://www.recycled-pvb.eu
Interface	Uso de PVB para losetas de alfombra.	Interface. (2008). <i>Interface</i> . Obtenido de www.interface.com
Sibelco	Uso de PVB para sustratos de alfombra, pinturas, textiles y materiales para construcción.	SIBELCO. (2020 de Agosto de 2020). <i>SIBELCO</i> . Obtenido de www.sibelco.com
Rivta	Uso de PVB para fabricación de bolsas para cosméticos.	Professional, R. (2019). Obtenido de Rivta Professional: https://rivta-factory.com/

Las nuevas incorporaciones dentro del proceso podrán estar sujetas a un nuevo ACV una vez que se finalice la reestructuración del proceso.

Ante estas estrategias de modificación es importante hacer una comparación del impacto ambiental de la empresa Recicladora Guadalajara respecto a otros sectores, en la siguiente tabla se resumen los valores en kg eq de CO_2 por año emitidos por diversos sectores en México en el año 2017:

Tabla 17. Emisiones de CO_2 eq en diversos sectores de producción en México.
Fuente: (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2018)

Sector	Subsector	Gg eq CO_2	Kg eq CO_2
Procesos Industriales y Uso de Productos.	Producción de cemento	19728.88978	1.9×10^{10}
	Producción de cal	3831.045291	3.8×10^9
	Producción de vidrio	558.2512295	5.5×10^8
Residuos.	Incineración de residuos peligrosos industriales y biológico infeccioso	120.87	1.2×10^8
	Quema a cielo abierto de residuos sólidos	706.51	7.06×10^8
Energía.	Sustancias químicas	8795.845937	8.7×10^9
	Pulpa, papel e imprenta	2794.274358	2.7×10^9
	Procesamiento de alimentos, bebidas y tabaco	1787.871163	1.7×10^9
	Equipo de transporte	464.957619	4.6×10^8
	Minería (con excepción de combustibles) y cantería	14284.88405	1.4×10^{10}
	Construcción	814.7823171	8.1×10^8

La tabla anterior muestra las cantidades por año resultantes de las emisiones generadas por diversos sectores en México, el valor generado anualmente por la empresa Recicladora (10080 kg eq CO_2 por año) no es significativamente elevado ni de gran impacto respecto a los resultados antes mostrados, esto debido a que la empresa utiliza como fuente principal la energía eléctrica que provoca un impacto de 33 kg eq CO_2 durante la jornada laboral y cuya cantidad es mínima comparada con las emisiones en otros subsectores.

Además, el proceso utiliza gran cantidad de agua por lo que es necesario comparar su huella hídrica con la cantidad de litros necesarios para el procesamiento y producción de diversos productos tal como lo muestra la siguiente tabla:

Tabla 18. Huella Hídrica para productos de diversa índole.
Fuente: (Arreguín Cortés, et al., 2013)

Producto	Huella Hídrica (litros)
Playera de algodón 250 gramos	2700
Mezclilla de 1 kg	1100
Azúcar 1 kg	1500
Chocolate 100 gramos	2400
Café 1 kg	21000
Vaso de cerveza 250 ml	75
1 par de zapatos (piel bovina)	8000

La tabla anterior muestra la cantidad de litros utilizados para producir diversos productos, mismos que de acuerdo a dichos valores, resultan en un uso considerable de agua y que al ser comparados con la cantidad que necesita la empresa Recicladora para generar el tonelaje correspondiente este es mínimo si se considera la obtención de 1 solo kg de calcín, lo que quiere decir que el volumen de agua utilizado en la jornada laboral de 8 horas es de 288 L para las 6.3 ton de vidrio recuperado y solo se necesitarían de 22 L para la obtención de 1 kg de vidrio recuperado.

4.2 Discusión.

La implementación de los principios de la EC permite fomentar y fortalecer los principios básicos de la sustentabilidad. En el presente estudio, hasta el momento, se ha encontrado que el proceso de reciclado de vidrio presenta muchas ventajas ambientales debido a la reducción de los gases contaminantes, lo que se traduce en sistemas más amigables con el planeta, ya que en los procesos de generación de vidrio la cantidad de emisiones es enorme comparado con su reciclaje. Comparando las alternativas del uso de este medio, se han definido ciertas estrategias en el uso fundamental de los procesos de reciclaje de los derivados del vidrio. No cabe duda de que las ventajas de implementar mejoras que conlleven a generar grandes oportunidades en el uso y aprovechamiento del vidrio son de tal magnitud que hasta la fecha se han hecho ciertos avances en el re-uso de dicho material.

Tal como se ha definido durante el análisis del proceso productivo de des-laminado de la empresa Recicladora, la problemática principal reside en la eliminación del polímero que forma parte del parabrisas. Hasta la fecha, según los trabajos de Michael Tupý y colaboradores en su artículo presentado

llamado “*PVB Sheet Recycling and Degradation*” se presentan algunos métodos que se han trabajado para el tratamiento de degradación de dicho polímero considerando características específicas del material.

Además, se ha desarrollado una patente del proyecto implementado por el Centro Tecnológico L´Urredera en Navarra en colaboración con la empresa GreenGlass Vidrio S.L donde se detalla una técnica en la que se utilizan procesos químicos y de lavado para poder eliminar todas las impurezas de vidrio contenidas en la película de PVB, la cual al final de dicho proceso presenta características para poder reutilizarse nuevamente, y es congruente con uno de los puntos clave de la EC que consiste en mantener los materiales en uso, tratando de generar alternativas innovadoras que sean amigables con el ambiente para poder gestionarse como áreas de oportunidad con influencia significativa.

Los indicadores de circularidad, como ya se ha mencionado a lo largo de todo este proyecto, permiten obtener conclusiones referentes a los niveles de “circularidad” de un proceso, producto o servicio, así como la identificación de oportunidades de mejora que pueden ser implementadas dentro de las áreas susceptibles a modificaciones. Particularmente, para el primer indicador utilizado dentro de este proyecto de investigación (índice de circularidad del material), se realizaron 2 simulaciones, la primera de ellas enfocada en el Calcín, el cual es el producto final obtenido dentro de dicho proceso. El valor arrojado por la simulación fue de 0.13 lo cual indica la presencia de una alta linealidad, lo que define que el material es de poca circularidad para ese proceso en específico, ya que las etapas consecutivas dentro del mismo sólo permiten separar el vidrio del plastificante adherido al parabrisas. Además, existen otras razones que son las causas de dicho valor tan bajo de circularidad. La primera de ellas está plasmada por los porcentajes de “re-uso”, mismos que son de 0 % porque no existe la realización de esta estrategia en la utilización de la materia prima que provenga de materiales reusados o a su vez que el calcín tenga un re-uso dentro del proceso mismo cuando es obtenido como producto final. En segundo plano, se encuentran los porcentajes de reciclaje, los cuales dentro de la materia prima corresponden al 0 % dado que el material utilizado proviene de materiales vírgenes. El reciclaje después del uso es del 95 % ya que el aprovechamiento y obtención de calcín fluctúa en estos porcentajes debido a la gran eficiencia del proceso para lograr separar el material del polímero y porque es mínima la cantidad de vidrio no separado del plastificante. Dentro de esta simulación se encuentra la presencia del tiempo de vida del material, que es representado por las 8 horas laborales de la empresa y la incorporación de la unidad funcional que está definida por la cantidad de vidrio obtenido respecto a la cantidad que se procesa, es decir, las 6.3 ton respecto a las 8 procesadas

La segunda simulación está representada por el PVB, el cual tiene un valor de 0 lo que indica una linealidad alta, traducida como una circularidad inexistente. Las causas primordiales por las cuales este valor es bajo es debido a que los porcentajes de re-uso son 0, dado que los materiales usados como materia prima no provienen de materiales reusados y con la separación del plastificante la estrategia de re-uso no se encuentra presente una vez que es obtenido. Lo anterior conlleva a que los porcentajes de reciclaje, así como los valores de la eficiencia en el mismo sean 0 % debido a la inexistencia de este tipo de estrategia, la solución inmediata de la empresa es la disposición a vertedero de dicho material polimérico. Es por ello por lo que se ha mantenido el valor del tiempo de vida que es el mismo que en la simulación anterior. Con respecto al valor de la unidad funcional, éste se ve modificado por las 1.7 ton de PVB obtenido respecto a las 8 ton procesadas de parabrisas.

Las simulaciones descritas anteriormente son primeras aproximaciones del uso que proporciona la herramienta desarrollada por la Fundación Ellen MacArthur. Es importante señalar que para la utilización de esta herramienta es necesario contar con el acceso a la información del proceso o producto, ya que esto servirá para la obtención de resultados más satisfactorios que podrán ser interpretados de mejor manera.

Como segundo indicador se utilizó la herramienta CIRCULAR ECONOMY TOOLKIT, que proporciona alternativas consecuentes y específicas en determinadas áreas que son de fundamental importancia en la EC. A su vez, dicha herramienta permite la obtención de resultados evaluados en 3 niveles: alto, medio y bajo, así como en áreas que pudiesen ser susceptibles a mejorarse o modificarse. Al aplicar la herramienta dentro de este proyecto de investigación los resultados obtenidos han sido fuentes importantes para determinar posibles modificaciones que podrían llevarse a cabo dentro del proceso. Como ya se ha señalado dentro de la descripción de la herramienta en capítulos anteriores, existen diversas preguntas a contestar para obtener los resultados de los potenciales de mejora por área. En la etapa de “Diseño, Manufactura y Distribución” el potencial de mejora fue bajo por diversos motivos. En primer lugar, el proceso no presenta desperdicios considerables de material en su etapa de manufactura, ya que se aprovecha casi en su totalidad. Las características del parabrisas hacen que sea un producto con altos porcentajes de “material técnico” (no degradable) y esto contribuye a que durante su proceso de creación se utilicen materiales vírgenes. Además, la tecnicidad por parte de dichos materiales implica que exista una cantidad significativa de residuos que son enviados al basurero municipal. La etapa de “Uso” (por el cliente) se encuentra en un potencial bajo porque fallas en el producto raramente ocurren y el tiempo de vida del vidrio es muy largo. Dentro de la “Reparación o Mantenimiento del Producto” el potencial es alto

debido a que el costo de reparación es pequeño comparado al costo del producto, así como la accesible facilidad para reparar los materiales o maquinaria dentro del proceso y la rápida identificación de alguna falla si es que se encuentra presente. La etapa de “Re-uso y Redistribución del Producto” está definida por un potencial medio debido a que el calcín es un buen mercado para ventas de segunda mano y las características del material presentan tiempo de vida largo. La siguiente etapa “Re-manufacturaación o Renovación del producto o sus partes” se encuentra en un potencial alto de mejora. Las razones asociadas a este resultado están identificadas por los costos medios de re-manufacturaación ya que el proceso no necesita muchos. A su vez, los costos de recolección para regresar el producto a la fábrica no son relativamente altos porque el transporte utilizado para trasladar el material no tiene un costo significativo en la logística o uso de combustible. Las partes del parabrisas, vidrio y PVB, son fáciles de separar mediante el proceso que actualmente realiza la empresa, lo que permite definir que no existen problemas de separación considerables de dichos materiales. El “Producto como un Servicio” mantiene un potencial de mejora medio causado por la falta de mercado para vender el producto obtenido como un servicio ya que su venta es por ton y no representa un alquiler o renta para otra empresa. La siguiente etapa “Reciclaje del producto al final de vida” presenta un potencial de mejora bajo ya que las características del proceso señalan que los materiales son fáciles de separar para el reciclaje y así poder darles un uso eficiente. Todas estas implicaciones y resultados obtenidos por las características observadas dentro de la empresa Recicladora implican que dentro de otros resultados se encuentre el bajo potencial para reducir los materiales, el potencial medio para optimizar los materiales y finalmente el potencial alto de simbiosis industrial. Si se analizara cada una de estas características y se asociaran a los resultados previamente obtenidos se lograría comprender la relación que guardan. En primera instancia, el uso y reciclaje de los materiales obtenidos (calcín y PVB) y procesados (parabrisas) no pueden ser sustituidos, ya que la finalidad primordial del proceso es la separación del componente del parabrisas, lo que implica que no se puedan reducir los materiales dentro del mismo. En segundo plano se encuentra la “optimización de los materiales” que es un área de gran oportunidad debido a que con la tecnología actual se podrían implementar mejoras en el proceso para poder incrementar su mejora continua y lograr la efectividad y productividad deseada. Finalmente, como tercer punto se encuentra la Simbiosis Industrial como una estrategia relevante para crear valor dentro del proceso. Es fundamental la creación de conexiones empresariales que están sujetas a poder ser oportunidades de negocio circular. Un ejemplo de ello es el calcín obtenido, que es vendido a otra empresa cuando es separado del polímero. El único inconveniente dentro de dicha estrategia actual para la empresa Recicladora es que no mantiene relación externa con

alguna compañía que aproveche el PVB dentro de sus cadenas de suministro, lo que complica en gran medida la utilización de dicho material.

El tercer indicador aplicado a la investigación fue el ACV, el cual permitió la obtención de resultados de las cargas ambientales que están presentes en el proceso de des-laminado y que, además, al final de dicha evaluación se propusieron algunas recomendaciones a considerar para hacer de tal proceso un factor de mejora sustentable. En primer lugar, se detallaron y establecieron los valores de los recursos presentes, los cuales fueron difíciles de obtener por la falta de información que la empresa tenía respecto a sus materiales, entradas y salidas respectivas. La adquisición de la información fue obtenida *in situ*, pero los valores obtenidos presentan ciertas variaciones debido al equipo utilizado. Ante la falta de una báscula por parte de la empresa, las mediciones realizadas fueron aproximaciones para poder estimar las cantidades de las entradas y salidas de los materiales, así como la medición de la potencia y la cantidad de energía eléctrica consumida dentro de cada una de las etapas del proceso. Dentro de esta metodología implementada, el papel de la unidad funcional juega un papel totalmente relevante. Se encuentra definida por la cantidad de vidrio recuperado (6.3 ton de calcín) respecto a la cantidad de material procesado (8 ton de parabrisas que son ingresadas al proceso durante la jornada de 8 horas). Definida la unidad funcional se seleccionaron las categorías de impacto que están enfocadas en la cantidad de energía eléctrica consumida relacionada con las emisiones de CO_2 (Calentamiento Global) y la escasez de agua definida por la cantidad de recurso hídrico (agua) utilizado durante el proceso. Cabe mencionar que durante la etapa de obtención de información (Inventario) se registraron los valores aproximados correspondientes al agua utilizada, consumo energético y la introducción de la cantidad de CO_2 emitido por cada Kwh. Posteriormente, los datos se ingresaron a la herramienta UMBERTO la cual permitió la obtención de un diagrama de Sankey que detalla en gran medida las etapas del proceso con sus correspondientes entradas y salidas de materiales, recursos etc. Aunado al diagrama, el resultado obtenido respecto a la categoría de Calentamiento Global fue de 28 Kg de CO_2 lo que representa el impacto o la huella de carbono implicada en el proceso de des-laminado de parabrisas. Además, dicho valor permite deducir que el proceso en sí mismo no genera cantidades significativas de emisiones al ser comparado con otros procesos productivos. La herramienta mencionada previamente para la aplicación de ACV solo permite la obtención de la huella de carbono que se encuentra relacionada con la categoría de Calentamiento Global, debido a que es una versión de prueba y no contiene en su totalidad las librerías correspondientes para un análisis más profundo.

Ante la falta del análisis de la otra categoría de impacto seleccionada, fue necesario la incorporación y uso de una herramienta extra para obtener los resultados correspondientes. Se seleccionó la herramienta SIMAPRO cuyas librerías se encuentran con toda la información disponible. Al llevar a cabo la evaluación correspondiente a las 2 categorías de impacto, el valor respecto a Calentamiento Global fue de 33 kg de CO_2 lo que al ser comparado con la herramienta UMBERTO permite verificar que su resultado se encuentra por encima del primer valor obtenido. La variación de dichos valores es consecuencia de los softwares utilizados y las librerías con las que disponen. El análisis comparativo respecto a las etapas que generan un mayor impacto al ambiente está influenciado por la cantidad de energía eléctrica utilizada en cada una de las fases correspondientes del proceso. La etapa de molido y corte de parabrisas representan las fases de mayor consumo energético debido a que el uso de energía eléctrica es significativo respecto a las otras. La observación y la información respectiva detallan las áreas de oportunidad que están sujetas a poder ser modificadas para hacer el proceso más sustentable y circular.

La segunda categoría evaluada (Escasez de Agua) arrojó valores significativos de consumo de agua en 3 etapas (molido, corte de parabrisas y cribado). El agua utilizada en la fase de Corte de parabrisas es la de mayor relevancia, ya que implica un valor de 144 L durante toda la jornada laboral, esto se traduce en que el recurso hídrico esté siendo utilizado constantemente. Desde el punto de vista genérico, la cantidad de agua implicada de manera total es de 288 L, mismos que si son comparados con otros procesos productivos, son relativamente insignificantes, pero no menos importantes al ser traducidos como impactos al ambiente. Por ende, y al igual que en la categoría analizada anteriormente, las etapas que impactan de manera significativa en el proceso en función del recurso hídrico son las que deben ser contempladas de manera primordial para poder implementar mejoras y a su vez poder identificar las oportunidades circulares a las que pueden ser acreedoras.

Los indicadores previamente utilizados han permitido identificar oportunidades circulares dentro del proceso. Cabe mencionar que actualmente el proceso ha sufrido modificaciones respecto a sus etapas y material utilizado. Se ha realizado la sustitución de 3 etapas del proceso (Corte de parabrisas, separación y alimentación y molido) al incorporar una fase de molido con maquinaria que, por observación, es de mayor consumo energético y la forma de procesar el parabrisas es con una productividad mayor. Dentro de esta nueva etapa se ha añadido una tolva de extracción de polvos derivados del molido del parabrisas, la cual pretende sustituir el uso del recurso hídrico al poder ser una estrategia que permita la absorción de residuos provenientes de dicha fase. Es importante mencionar que el proceso aún no se encuentra 100%

implementado, por ende, realizar una evaluación con las metodologías antes mencionadas están sujetas a poder ser implementadas cuando se culmine el proceso modificado con los detalles antes mencionados.

Finalmente, las recomendaciones postuladas dentro del proceso son la incorporación de energías renovables que pueden ser mediante el uso de paneles solares que permitan suministrar la energía eléctrica dentro del proceso, lo que permitirá reducir considerablemente la huella de carbono sí se considera la misma producción generada ya que al comparar las huellas de carbono obtenidas respecto al tiempo de producción para obtener la misma cantidad de vidrio recuperado, los valores son relativamente similares, lo que quiere decir que hay una mejora en función de la reducción de CO_2 , misma que al considerar 8 horas del proceso mejorado esta se incrementa considerablemente por la duración del mismo. La cantidad de paneles solares necesarios para funcionar como energía renovable son 66 de acuerdo con las estimaciones realizadas al considerar la potencia de estos, así como el consumo energético del proceso con mejoras. Sí bien, dichos materiales amigables con el ambiente implican gran inversión monetaria, la gran ventaja que trae consigo es generar procesos más amigables con el ambiente en los cuales la inversión, en función de los pagos realizados a la empresa que suministra la energía procedente de energías renovables, es beneficiosa porque la duración de dichos materiales es de aproximadamente 25 años, lo que se traduce en una reducción en los pagos referentes a consumo eléctrico general.

Además, se pretende añadir una estrategia de Simbiosis Industrial para poder encontrar una solución parcial a la problemática de la empresa que está relacionada con el residuo polimérico (PVB). Actualmente no existe una empresa mexicana que haga un uso de dicho material, por lo que la búsqueda de empresas extranjeras que puedan incorporarlo está sujeta a investigación.

Lo antes mencionado permite adentrar al proceso con mejoras a evaluaciones futuras, tales como el ACV donde se puede considerar analizar el proceso mediante la incorporación de los paneles solares considerando los materiales para su colocación, cantidad de energía suministrada y los materiales implicados en las tolvas de extracción, lo cual permitirá obtener nuevas conclusiones del proceso para identificar si existe una mejora en función del impacto ambiental del mismo.

Como ya se mencionó, las mejoras en el proceso están siendo realizadas por la empresa, mismas que han sido expuestas como áreas de oportunidad para hacer del proceso productivo su transición hacia la Economía Circular.

CAPÍTULO 5.

5.1 Conclusiones.

- Empleando el simulador de Circularidad de la fundación Ellen McArthur y de acuerdo con la información proporcionada por la empresa sobre las condiciones del proceso, se calculó el índice de circularidad para el parabrisas, obteniendo un valor de 0.13 para el calcín, lo que puede interpretarse como un proceso altamente lineal.
- Evaluando el proceso productivo mediante el indicador de circularidad del material con las características e información proporcionada e investigada se obtuvo un valor de 0 para el polímero, lo que define que se presenta una linealidad muy alta, la cual se encuentra sujeta a poder modificarse mediante la implementación de mejoras dentro de cada fase del proceso.
- Potenciales de mejora dentro de la herramienta CIRCULAR ECONOMY TOOLKIT arrojaron altos valores dentro de las áreas de mantenimiento, reparación y re-manufactura. Los valores medios se presentaron dentro de las fases de re-uso o redistribución y el producto como un servicio. Finalmente, se obtuvieron valores bajos en el diseño, uso y reciclaje lo que se puede atribuir a las características mismas del proceso que se encuentra estandarizado por una metodología ya implementada y por los materiales utilizados en específico.
- Analizando el ciclo de vida del proceso, los resultados obtenidos dentro de las categorías de impacto seleccionadas indican que existe un gran impacto al ambiente con un valor respectivo de 28 kg eq de CO_2 durante el turno de 8 horas al utilizar la herramienta UMBERTO y un valor de 33 kg eq de CO_2 mediante la herramienta SIMAPRO lo que indica que dicho proceso genera una huella de carbono baja comparada con otros procesos productivos de distinta índole.
- La huella hídrica total del proceso es de 288 L de agua utilizados durante la jornada laboral. El uso de agua es constante durante todo el tiempo del proceso. Al ser comparado con otros procesos este valor no es significativo, pero no de menor impacto al ambiente, lo que quiere decir que puede ser modificado o reemplazado por otro tipo de alternativas.
- El proceso de des-laminado se encuentra siendo modificado por el personal de la empresa para poder incrementar su productividad. Algunas modificaciones contemplan la incorporación de un molino de mayor capacidad y potencia que permite sustituir 3 etapas consecutivas del proceso anterior. Además, se ha incorporado una tolva de extracción de polvos para eliminar el uso del recurso hídrico durante el proceso.

- Las recomendaciones hacia el proceso pueden ser un pilar fundamental para poder implementarse a futuro, buscando obtener un proceso más sustentable. Las estrategias parten desde la modificación de determinadas fases del proceso, así como la incorporación de energías renovables que permitan sustituir y disminuir el consumo eléctrico actual.
- En relación con el uso potencial del polímero PVB, se encontró que diferentes entidades, principalmente empresas recicladoras situadas básicamente en Europa, están a la búsqueda de alternativas para su re-uso o reciclado ya que hasta la fecha su reincorporación al proceso no es viable. A este respecto, existe una patente en trámite para su recuperación libre del vidrio de parabrisas.

PERSPECTIVAS.

- Incorporar energías renovables (paneles solares) están sujetas a un mayor estudio para poder verificar las limitaciones y alcances que tienen para el proceso y a su vez poder ser implementadas.
- Un estudio relevante pendiente de realizar cuando el proceso de des-laminado se encuentre modificado en su totalidad es la aplicación de la metodología de ACV para poder verificar las cargas ambientales asociadas al proceso y si el impacto de las nuevas modificaciones (considerando los materiales usados en los mecanismos de implementación de paneles solares) es menor a las del proceso actual.
- El uso de los indicadores de circularidad (MCI y CET) para un segundo análisis mediante la incorporación de las nuevas modificaciones permitirá comparar los resultados previamente obtenidos del proceso para poder analizar si se incrementa la circularidad de este.
- La integración de nuevos indicadores de circularidad para análisis posteriores son fuentes de estudio para permitir la obtención de nuevas conclusiones y robustecer las evaluaciones previas.
- Para la mayor incorporación de estrategias circulares para el aprovechamiento del polímero PVB es necesario la realización de una caracterización de dicho material para el surgimiento de ideas y propuestas para su incorporación en otras cadenas productivas mediante planes estratégicos circulares.

REFERENCIAS.

Aguñaga, E., 2017. Economía Circular, una alternativa a los límites del crecimiento lineal.. En: Nuevo León: s.n., pp. 19-43.

Alcubilla, L., 2015. *El país*. [En línea] Available at: https://elpais.com/elpais/2015/10/30/alterconsumismo/1446190260_144619.html [Último acceso: 15 Febrero 2019].

Alcubilla, L., 2017. *El país*. [En línea] Available at: https://elpais.com/elpais/2015/10/30/alterconsumismo/1446190260_144619.html [Último acceso: 15 Febrero 2019].

Andalucía, R., 2019. *raee ANDALUCIA*. [En línea] Available at: <https://www.raeeandalucia.es/actualidad/economia-circular-vs-economia-lineal> [Último acceso: 15 febrero 2019].

Arreguín Cortés, F., López Pérez, M., Marengo Mogollón, H. & Tejeda González, C., 2013. Agua Virtual en México. *Ingeniería Hidráulica en México*, XXII(4), pp. 121-132.

Bilitewski, B., 2012. The circular economy and its risks. En: *Waste manage*. s.l.:s.n., pp. 15-22.

Cerda, E., 2016. *Economía Circular, estrategia y competitividad empresarial*., Barcelona: s.n.

Comercial Felman, 2019. *Felman*. [En línea] Available at: <https://felman.es/que-es-el-vidrio-laminado-y-cuales-son-sus-ventajas/> [Último acceso: 13 Octubre 2019].

Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 1993. *Evaluación Técnico- Económica de los procesos de reciclaje de desechos domésticos: los casos del vidrio, papel y plástico*.. Santiago de Chile: s.n.

Ecovidrio, 2017. *Hablando de vidrio*. [En línea] Available at: <https://hablandoenvidrio.com/economia-circular-el-ciclo-de-la-vida-frente-al-usar-y-tirar/> [Último acceso: 2019 Octubre 08].

Ecovidrio, 2017. *hablando en vidrio*. [En línea] Available at: <https://hablandoenvidrio.com/que-es-el-calcin/> [Último acceso: 2019 Octubre 08].

Ellen Macarthur Foundation, 2017. *Circularity indicators an approach to measuring circularity*. Primera ed. s.l.:Granta.

Ellen Macarthur Foundation, 2017. *Ellen Macarthur Foundation*. [En línea] Available at: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/es/economia-circular/concepto>

Ellen Macarthur Foundation, 2017. *Ellen Macarthur Foundation*. [En línea] [Último acceso: 16 Febrero 2019].

Ellen Macarthur Foundation, 2017. *The Ellen Macarthur Foundation*. [En línea] Available at: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/concept/schools-of-thought>

Esteve, J., 2012. *Reciclaje Verde , el blog sobre reciclaje y medioambiente*.. [En línea] Available at: <https://reciclajeverde.wordpress.com/2012/06/29/pvb-el-reciclaje-de-un-plastico-poco-conocido/> [Último acceso: 14 Octubre 2019].

Estévez, R., 2016. *Ecointeligencia*. [En línea] Available at: <https://www.ecointeligencia.com/2016/03/huella-hidrica/> [Último acceso: 06 Junio 2020].

García López, M. G. & Ortega Hernández, A., 2015. *Reparable, actualizable y reciclable. La Economía Circular como nuevo modelo económico sustentable en México*. Guanajuato: s.n.

Garraín, D., Vidal, R., Franco, V. & Martínez, P., 2008. Análisis de ciclo de vida del reciclado de polietileno de alta densidad. *Residuos*, Issue 104, pp. 58-63.

Glasstech, 2019. *Cristales Laminados*. México: s.n.

González Ordaz, G. I. & Vargas Hernandez, J. G., 2017. *La Economía Circular como factor de responsabilidad social*. Jalisco: s.n.

Greenglass S.L., 2012. [En línea] Available at: <https://mariamarc.com/page/1/> [Último acceso: 13 Octubre 2019].

Guinée, J., Gorrée, M. & Heijungs, R., 2002. *Handbook of Life Cycle Assessment: Operational guide to the ISO standards*. Leiden: Kluwer.

Gutiérrez, F. A. P., 2013. *Análisis del Ciclo de Vida Comparativo de una Mermelada de Naranja Ecológica y no Ecológica*. Valladolid: s.n.

Hawken, P., Lovins, A. & Lovins, H., 2013. *Capitalismo Natural, creando la siguiente revolución industrial*. Primera ed. Boston: Back Bay.

Hernández, D. A. O., 2017. *Reparable, actualizable y reciclable. La Economía Circular como nuevo modelo económico sustentable en México*, Guanajuato: s.n.

Hernandez, L., Ruiz Galan, J. L. & Junyent, R., 2008. *Nueva ley de Economía Circular*, Shanghai: s.n.

Hidalgo, M., 2017. *Un nuevo impulso hacia la Economía Circular*. s.l.:s.n.

Industrial, O. O. P. R. d. R. y. c. d. l. d. m. d. p., 2011. *Reciclaje: máquina recicladora de vidrio*. Madrid: s.n.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2018. *Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 1995-2015*. Primera ed. Ciudad de México: s.n.

Leader, M. & Rashid, A., 2015. Towards Circular Economy Implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry. En: *Cleaner Production*. s.l.:Cross Mark, pp. 36-48.

Lieder, M. & Rashid, A., 2016. *Towards Circular Economy Implementation: a comprehensive review in context of manufacturing Industry*. Sweden: Croosmark.

Marcet, J., Marcet, M. & Vergés, F., 2018. *Qué es la Economía Circular y Por qué es importante para el territorio*. Barcelona: s.n.

Martín, A., 2017. *Ovacen*. [En línea] Available at: <https://ovacen.com/economia-circular/> [Último acceso: 15 Febrero 2019].

Mata, A. & Galvéz, C., 2014. *Reciclaje de vidrio*. Guadalajara: s.n.

Mcdonough, B., 2002. *Cradle to Cradle: remaking the way we make things*. New York: s.n.

- Montero, J., 2016. *Laboratorio de Plástico Reciclado*. [En línea] Available at: <https://www.monterolab.com/single-post/2015/10/19/Recuperaci%C3%B3n-de-PVB-procedente-de%C2%A0parabrisas-y-vidrio-laminado> [Último acceso: 14 Octubre 2019].
- Navarro, J., 2018. *Definicion Abc*. [En línea] Available at: <https://www.definicionabc.com/negocios/economia-circular-lineal.php> [Último acceso: 15 Febrero 2019].
- Organización de las Naciones Unidas, 2019. *ONU*. [En línea] Available at: <https://www.un.org/es/>
- Ortega, L. M., 2017. *El vidrio en la edificación. Propiedades, aplicaciones y estudios de fracturas en casos reales*. Barcelona: s.n.
- Pandey, D., Agrawal, M. & Pandey, J. S., 2010. Carbon Footprint: current methods of estimation. *Environmental Monitoring and Assessment*, Issue 178, pp. 135-160.
- Pietrulla, F. & Geisendorf, S., 2017. *The Circular Economy and circular economic concepts-a Literature analysis and redefinition*. Alemania: s.n.
- Prieto Sandoval, J. C. & Ormazabal, M., 2017. s.l.:s.n.
- Prieto, V., 2017. Economía Circular: relación con la evolución del concepto de sostenibilidad y estrategias para su implementación. En: *Memoria e Investigación en Ingeniería*. s.l.:s.n., pp. 85-95.
- Rodríguez, M., 2017. Absolescencia de los productos y consumo responsable. En: *Distribución y Consumo*. s.l.:s.n., pp. 96-101.
- Ruiz Saiz-Aja, M. y otros, 2016. La Economía Circular. *Ambienta*, Issue 117, pp. 4-22.
- Sánchez, R. D., 2016. *Rdsolutions3D*. [En línea] Available at: <http://rds077.blogspot.com/2016/02/buscando-aplicaciones-sostenibles-que.html> [Último acceso: 14 Octubre 2019].
- Scheel, C. & Aguiñaga, E., 2017. *Economía Circular, una alternativa a los límites del crecimiento lineal*. Monterrey: s.n.
- Sgg Climalit, 2018. *Por mi ventana*. [En línea] Available at: <https://climalit.es/blog/proteger-muebles-desgaste-sol/> [Último acceso: 14 Octubre 2019].
- Sgg Climalit, 2016. *Por mi ventana*. [En línea] Available at: <https://climalit.es/blog/el-vidrio-laminado/> [Último acceso: 13 Octubre 2019].
- Toolkit, C. E., 2019. *Circular Economy Toolkit*. [En línea] Available at: <http://circulareconomytoolkit.org/design-manufacture-distribute.html> [Último acceso: 27 Febrero 2020].

ANEXOS.

Anexo 1. Preguntas empleadas en la herramienta Circular Economy Toolkit.

Company:

Producto type:

DESIGN MANUFACTURE AND DISTRIBUTE		
No material is used in excess,producto is totally dematerialised	Medium	High waste of material,could be reduced through redesign
100% biodegradable	Medium	High percentage of technical, non-biodegradable materials
100% recycled materials used.	Medium	High percentage of virgin,non-recycled materials
No scarce materials used in product	Medium	Scarce materials in product e.g antimony, cobalt,gallium,indium,platinum,Palladium,niobium,neodymium
Materials are highly eco-efficient (low energy and carbon emissions to produce)	Medium	Materials used have poor eco-efficiency
No toxic materials in product	Medium	Excess toxic materials in product
Zero waste factory;all waste is used as input to another process/factory	Medium	Significant waste sent to landfill from factory
USAGE (BY THE CUSTOMER)		
Product failures rarely occur	Medium	Product failures are frequent
Product has a very long lifetime	Medium	Product has a short lifetime
Product uses no,or closet or theoretical minimum power	Medium	Product is energy and resource wasteful
REPAIR/MAINTENANCE OF THE PRODUCT		
Cost of repair far outweighs cost of product	Medium	Cost to repair is small in comparison to the producto cost
Suitable maintenance/repair service already offered(could include repair,servicing,spare parts,diagnostics,technical support,installation and warranty)	Medium	No maintenance/repair service offered
Difficult to get Access to internal workings	Medium	Easy to get Access to internal workings
Complex workings,difficult to understand	Medium	Simple workings,easy to understand
No components,connectors,modules or leads are standardised	Medium	All components,connectors,modules and leads are standardised
Dificult to find fault	Medium	Easy to find fault
REUSE / REDISTRIBUTION OF THE PRODUCT		
No market for second hand sales	Medium	Good market for second hand sales
Comprehensive second hand sales already offered	Medium	No second hand sales offered currently
Product has a very long lifetime	Medium	Product has a short lifetime
REMAUFACTURING/REFURBISHMENT OF PRODUCT OR PART		
Expensive refurbishment/remanufacturing costs	Medium	Cheap refurbishment/remanufacturing costs

Expensive collection costs to return product to factory	Medium	Cheap collection costs to return product to factory
All products are returned and refurbishment/remanufactured	Medium	No refurbishing or remanufacturing currently undertaken
Difficult to disassemble	Medium	Easy to disassemble
Significant damage caused to product or part when disassembling	Medium	No damage caused to product or part when disassembling
Impossible to identify parts once disassembled	Medium	Easy to identify parts once disassembled
No parts are modular, preventing switch in-switch out	Medium	Many parts are modular, allowing switch in-switch out
Impossible to upgrade parts	Medium	Possible to upgrade to parts
Many mechanical connections, eg. welds, screws, rivets, etc.	Medium	Few mechanical connections
Many tools required to disassemble	Medium	Few tools required to disassemble
PRODUCT AS A SERVICE.		
No market to sell products as a service	Medium	Good market to sell products as a service
All products already sold as a service	Medium	No products currently sold as a service
PRODUCT RECYCLING AT THE END OF LIFE		
Few material combinations used in the product	Medium	High number of material combinations used in the product
No encased materials (e.g if materials are easy to separate at recycling)	Medium	Many encased materials

Anexo 2. Respuestas a las preguntas empleadas en la herramienta Circular Economy Toolkit.

Cada cuadro de la respuesta elegida se encuentra coloreado en azul, así como el resaltamiento de las palabras contenidas en el.

Company: Manufacturer.

Producto type: Glass.

DESIGN MANUFACTURE AND DISTRIBUTE		
No material is used in excess,producto is totally dematerialised	Medium	High waste of material,could be reduced through redesign
100% biodegradable	Medium	High percentage of technical, non-biodegradable materials
100% recycled materials used.	Medium	High percentage of virgin,non-recycled materials
No scarce materials used in product	Medium	Scarce materials in product e.g antimony, cobalt,gallium,indium,platinum,Palladium,niobium,neodymium
Materials are highly eco-efficient (low energy and carbon emissions to produce)	Medium	Materials used have poor eco-efficiency
No toxic materials in product	Medium	Excess toxic materials in product
Zero waste factory;all waste is used as input to another process/factory	Medium	Significant waste sent to landfill from factory
USAGE (BY THE CUSTOMER)		
Product failures rarely occur	Medium	Product failures are frequent
Product has a very long lifetime	Medium	Product has a short lifetime
Product uses no,or closet or theoretical minimum power	Medium	Product is energy and resource wasteful
REPAIR/MAINTENANCE OF THE PRODUCT		
Cost of repair far outweighs cost of product	Medium	Cost to repair is small in comparison to the producto cost
Suitable maintenance/repair service already offered(could include repair,servicing,spare parts,diagnostics,technical support,installation and warranty)	Medium	No maintenance/repair service offered
Difficult to get Access to internal workings	Medium	Easy to get Access to internal workings
Complex workings,difficult to understand	Medium	Simple workings,easy to understand
No components,connectors,modules or leads are standardised	Medium	All components,connectors,modules and leads are standardised
Dificult to find fault	Medium	Easy to find fault
REUSE / REDISTRIBUTION OF THE PRODUCT		
No market for second hand sales	Medium	Good market for second hand sales
Comprehensive second hand sales already offered	Medium	No second hand sales offered currently
Product has a very long lifetime	Medium	Product has a short lifetime

REMAUFACTURING/REFURBISHMENT OF PRODUCT OR PART		
Expensive refurbishment/remanufacturing costs	Medium	Cheap refurbishment/remanufacturing costs
Expensive collection costs to return product to factory	Medium	Cheap collection costs to return product to factory
All products are returned and refurbished/remanufactured	Medium	No refurbishing or remanufacturing currently undertaken
Difficult to disassemble	Medium	Easy to disassemble
Significant damage caused to product or part when disassembling	Medium	No damage caused to product or part when disassembling
Impossible to identify parts once disassembled	Medium	Easy to identify parts once disassembled
No parts are modular, preventing switch in-switch out	Medium	Many parts are modular, allowing switch in-switch out
Impossible to upgrade parts	Medium	Possible to upgrade to parts
Many mechanical connections, eg. welds, screws, rivets, etc.	Medium	Few mechanical connections
Many tools required to disassemble	Medium	Few tools required to disassemble
PRODUCT AS A SERVICE.		
No market to sell products as a service	Medium	Good market to sell products as a service
All products already sold as a service	Medium	No products currently sold as a service
PRODUCT RECYCLING AT THE END OF LIFE		
Few material combinations used in the product	Medium	High number of material combinations used in the product
No encased materials (e.g if materials are easy to separate at recycling)	Medium	Many encased materials

Anexo 3. Artículo Científico.

← [JART] Submission Acknowledgement

 Traducir mensaje a: Español | No traducir nunca de: Inglés

 Dr. Gabriel Ascanio <superadministrador@icat.unam.mx>    

Vie 05/02/2021 07:00 PM

Para: GONZALEZ MENDOZA DIEGO ALBERTO; Constanza Machin <machin@uaem.mx>

Hello,

Roberto Flores has submitted the manuscript, "Analysis of the recovery process of the calcine contained in damaged windshields under the principles of circular economy" to Journal of Applied Research and Technology.

If you have any questions, please contact me. Thank you for considering this journal as a venue for your work.

Dr. Gabriel Ascanio

The following message is being sent from the Journal of Applied Research and Technology.

1 **Analysis of the recovery process of the calcine contained in damaged windshields under the**
2 **principles of circular economy**

3
4 by

5
6 Diego A. Mendoza, Constanza Machin, Roberto Flores*

7 Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, Av.
8 Universidad No. 1001, Col. Chamilpa, Cuernavaca, Morelos, 62209, Mexico

9
10
11 Submitted to

12
13 *Journal of Applied Research and Technology*

14
15 February 2021

16
17
18

19 **Abstract**

20 The Circular Economy (CE) plays a fundamental role, being a relatively new concept, in the vigor of
21 sustainability. Nowadays, institutions, as well as governments, have been looking for new alternatives to
22 achieve their objectives of reducing the generation and disposal of pollutants. Therefore, the CE seeks to
23 be a new methodology to provide solutions to the current problems in the world. In this work, it is analyzed
24 the process of recovering calcine by the delamination process of damaged windshields in a recycling
25 company. Three tools focused on the EC are used in this study: The Material Circularity Indicator (MCI),
26 the Circular Economy Toolkit (CET) and the Life Cycle Assessment (LCA). Currently, the company has
27 a delamination process for recovering calcine which consist of mechanically separating the glass from a
28 polymeric material called polyvinyl butyral (PVB). By using these tools and the principles of the CE,
29 conclusions were obtained about the environmental impact of the process, and areas were identified to
30 propose modifications in order to improve the production cycle and reduce the enviromenral damage.

31

32 **Keywords:**

33 circular economy, windshield, calcine, polyvinyl butyral, Life Cycle Assessment, Material Circularity
34 Indicator, Circular Economy Toolkit

35

36

37 **Introduction**

38 Today, the world lives with anthropogenic changes in the environment that bring many challenges
39 associated with generating strategies to avoid, reduce or mitigate current pollution problems (Sauvé,
40 Bernard, & Sloan, 2016). While the use of the planet's resources is increasing at relatively high rates,
41 human activities are becoming less sustainable and must be reduced immediately (Hass, Krausmann,
42 Wiedenhofer, & Heinz, 2015). Furthermore, due to the new consumer societies and the surprising growth
43 in industrial activity, an increasing number of emissions into the environment are generated, as well as
44 waste and pollutants that cause a severe impact and imbalance on the planet (Wautelet, 2018). The Earth's
45 resources are limited and, therefore, economic growth and population progress generate an imbalance that
46 the planet cannot support (Moscoso Paucarchuco, Rojas León, & Beraún Espíritu, 2019). Hence, it is
47 necessary to search for strategies that allow sustaining the natural balance in the use of resources and that
48 is why the control of waste generation is of vital importance (Ruiz Saiz-Aja, & others, 2016).

49 Searching for a combination of strategies by companies and governments to install a model that allows to
50 deep in the productive sectors, the Circular Economy (CE) has emerged. Its model is based on the
51 reduction of resources that are wasted through the design and implementation of materials, products and
52 processes that improve their efficiency, incorporating procedures such as recycling, reuse, recovery, etc.
53 In fact, the EC aims to implement sustainability indicators such as water and carbon footprint, among
54 others, in order to reduce the environmental impacts generated by anthropogenic activities.

55 Furthermore, the EC aims to be an economic system that seeks to replace the concept of end of life by
56 defining its implementation at the micro, meso or macro level in order to achieve

Anexo 4. Formato de Entrega de Informe Técnico.



FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS e INGENIERÍA
Programas educativos de calidad reconocidos por LIEES, CACEL y CONACYT
ISO 9001:2015 certificado en la norma ISO 9001:2015



Cuernavaca, Morelos, 16 de febrero, 2021.

L.A. Victor Garcia Arriaga,
Representante Legal de
Recicladora Guadalajara, S.A. de C.V.
P R E S E N T E.

Estimado Lic. Garcia:

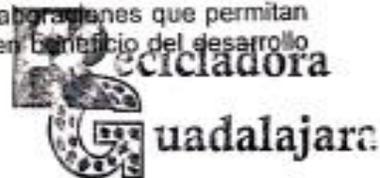
Espero que se encuentre muy bien, al igual que toda su familia.

Por este conducto y mediante un archivo adjunto, me permito hacerle la entrega formal del Informe Técnico del proyecto titulado "ANÁLISIS DEL PROCESO DE RECICLADO DE VIDRIO DE UNA EMPRESA RECICLADORA DEL ESTADO DE MORELOS, BAJO LOS PRINCIPIOS DE LA ECONOMÍA CIRCULAR", en cumplimiento al compromiso adquirido con base en nuestro acuerdo de colaboración, celebrado en el mes de febrero del año 2019.

Es muy importante mencionar que la realización y conclusión de este proyecto innovador no hubiera podido llegar a su fin en forma exitosa sin el apoyo incondicional que recibimos de su parte y de su empresa, por lo que queremos agradecer infinitamente la apertura, apoyo técnico, asesoría y las innumerables atenciones recibidas durante su desarrollo y solicitarle que lo haga extensivo a todo su personal.

Espero que los resultados obtenidos puedan tener un gran impacto y ser de gran utilidad para mantener las fortalezas e identificar las debilidades y las áreas de oportunidad que tiene su empresa en el ámbito de los principios de la Economía Circular. De igual forma, deseo que esta experiencia nos permita establecer futuras colaboraciones que permitan fortalecer los vínculos de la Academia con el Sector Privado, en beneficio del desarrollo de nuestra sociedad y de nuestro país.

Agradeciendo todo el apoyo brindado, le saludo cordialmente



ATENTAMENTE

"Por una humanidad-culta"

Constanza Machin Ramirez
Dra. Constanza Machin Ramirez.
Responsable del Proyecto.

Recibir informe
tecnico

EEG 0010

Av. Universidad 1001 Col. Chamilpa, Cuernavaca Morelos, Mexico. 62209
Tel: (777) 329-70-00 Ext. 7039 / foqe@uaem.mx

**UA
EM**

Una universidad de excelencia

RECTORIA
2020-2021