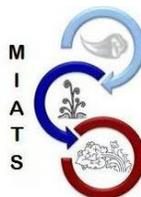




UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL Y TECNOLOGÍAS SUSTENTABLES



REVALORIZACIÓN DE RESIDUOS DE MANEJO ESPECIAL EN UNA
EMPRESA DE ELECTRODOMÉSTICOS CON BASE EN LOS PRINCIPIOS DE
LA ECONOMÍA CIRCULAR

T E S I S

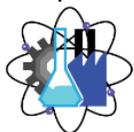
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRA EN INGENIERÍA AMBIENTAL Y TECNOLOGÍAS
SUSTENTABLES

PRESENTA

I.Q.I. LUNA GUTIÉRREZ PAULA VERÓNICA

ASESOR: DRA. CONSTANZA MACHÍN RAMÍREZ

CO-ASESOR: DR. MANUEL SALDAÑA MALDONADO



FCQI-UAEM
Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería

CUERNAVACA, MORELOS

JUNIO, 2022

AGRADECIMIENTO A CONACYT

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca recibida a través del Programa de Becas de Posgrado, la cual me permitió el desarrollo y conclusión de este proyecto.

COMITÉ REVISOR

Dr. Manuel Saldaña Maldonado

Dra. Viridiana Aydeé León Hernández

Dr. Héctor Sotelo Nava

Dra. Loyda Albañil Sánchez

Dr. Roberto Flores Velázquez

HOJA DE VOTOS APROBATORIOS



FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS e INGENIERÍA

Programas educativos de calidad reconocidos por CIEES, CACEI y CONACYT
SGC Certificada en la norma ISO 9001:2015

FORMATO T-2
NOMBRAMIENTO DE COMISIÓN REVISORA
Y DICTAMEN DE REVISIÓN

Cuernavaca, Mor., a 5 de mayo de 2022.

DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ
DR. MANUEL SALDAÑA MALDONADO
DRA. LOYDA ALBAÑIL SÁNCHEZ
DR. ROBERTO FLORES VELÁZQUEZ
DR. HÉCTOR SOTELO NAVA
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 PAULA VERÓNICA LUNA GUTIÉRREZ, titulada: "REVALORIZACIÓN DE RESIDUOS DE MANEJO ESPECIAL EN UNA EMPRESA DE ELECTRODOMÉSTICOS CON BASE EN 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
DIRECTORA DE LA FCQEI

D I C T A M E N

DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ
DIRECTORA 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:

D I C T A M E N

NOMBRE	VOTO	FIRMA
Dra. Viridiana Aydeé León Hernández	APROBADO	
Dr. Manuel Saldaña Maldonado	APROBADO	
Dra. Loyda Albañil Sánchez	APROBADO	
Dr. Roberto Flores Velázquez	APROBADO	
Dr. Héctor Sotelo Nava	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:2022-05-05 15:01:15 | Firmante
NAwHkL7C091DykrgruRUBujSvPLnYWKY1W7gDq80Ofi93IONkmpB0xOOnOLrThpmojlIFZ7WRBwuglW0zWaaO/w2i/IBFXXdXSmaQO1aBIXKYIT01bo+A9C315qXvphHUhEq07I
gjnFt1H3m44xAJmO6MbuTjRgaWtL8suuZyfpRFMRbrxPsMKJlxUvOug20z/ezxau/DoQRVUWxGx0aTaQwspbrNtaAeqV3k/Uml+iVP+wtjX/NxJ1qLz43cQILLeiaJOkldCwBFy+D
k6cnjQ3/tsJcur0zw6iBIFWrdPqXNNvankKPF3QIOce3kuBPx2IPUqaLFly400KQdA==



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

[4NAP6Mcre](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/pFZna0ahJahGsUAIAlpaIGkDXoYKpO0>





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:2022-05-17 19:56:44 | Firmante
y2DvM0wR4yObk+RdhMK8GxVtanbuXxOWaMvYPrms2LS3EdOluwONKLqpywqLGNm22e1UE2Go6qhYwU0P2scedHRITIOKLFofFamQHRZQm840YimPXef4UGqFwBDL
RKyp1FOVysmO7/O0V9vbd9VUEztGn6L62FDZ9q0qjNdhncpz0nj37qrZpzq6OMTPempgZtvcZTQUaSvX0TxGuFQs3EEUlb5CustGtQzUUD2aadY2jVYK79Sj8ZeZdlEg46W7C
WdoCdmvLlvCF15SEAudC6S21o6PtUber+Qx/GnLzdeK4YymdQcADKXxb9qaNCvW4Jkn9NF6CUMS/IA==

LOYDA ALBAÑIL SANCHEZ | Fecha:2022-05-18 06:40:50 | Firmante
PvdCbgL+1AweAKLdQvov1nk1A2CntraQ06ss26kYwLUXsLmRzTRwfkAgd1FK+V5znGxzGNdem26hXldKcAmlKwdszM2e+hD1zz7kr0CP3RPX9WTcbeyEulHjods2g64D08SDj
2AC9y61h5JccteHdSfSIFBZOPmKZAHNVqcS0i70zX0im70LP1Dm1hMR/T+AkvtTxBgykepT7MG02XO4VKWhOUHnLnCbCC8Q6L92XmHVNIRZ907F8064k+bLpJF47vdrV6w
bsT1BxbE3tm9ChJi68Huv4Kf6pmvNoaw0SMla7hmvJNepaGSwoshZ/Oa7woWDullGNd7qw==

VIRIDIANA AYDEE LEON HERNANDEZ | Fecha:2022-05-18 17:21:15 | Firmante
NuNfHphCQY7jisVwSxroT5HtJy58b3HU7NDsER+yWeND/P5yW/kvWPCN2+sJMWxgoa3vgD259vS+LgRrTQFJ5pdCII17/FIPoz57d9TPg2kHQ/mPlh32bZGAhQNCxPtkjraqq9
Bfp83ty7h26Nv8dnvskn0lsb9OegfbYUvo+EI/3N2Blhy5VnmQd1GLDChuk8GU0GFRKedXJkqV/HfzdVJWHEh9sAqSIOS2XlJr2DNpeWRNy4ixf2bcW+n/4juVMkkOho11S80/DCJ
JW5m3YjE6RS3MatczTjpaXwnp9akV6zUYnTIBrIKs80EE3tObI9YDoS5nZAgJnA==

ROBERTO FLORES VELAZQUEZ | Fecha:2022-05-24 16:01:12 | Firmante
e162qvlGLVAI9/xqHjGVUVxpIREIMFod8XpTp2h5hk2dcEqd1EfwWi8vz2bWhcFLcv4CipMdXM2sfOHRCAUJ5XanXoGHrvtHjSwXVSRfYmLICR2YrIcTEeSKgADkiRRo1tU2
gTu2J9eQNSit+Q++kynlSHT4BG5iy5tUXNmFsyMM3XKIgn0liQJ5jo/AHo5G/sqYmXALDC4Oxz9vKL2ZgkGA0c1yER4hpOXxbIKDuKoT28bMK5HLbPaD8Nlh2zsAfyDh5tEJG
qW+LdRzXY8o9PdEoo1SO71gKD8E/aO2YA4IPFIQ+3ZFRt/kujn7ZwSeWG2648CoisIQ==

HECTOR SOTELO NAVA | Fecha:2022-06-09 20:46:17 | Firmante
G/NxVnFIOndiKB2xpXdxQnXrZw5BbnTgPv7L6jVaaDFbl+kx4wb33kLgFet6IPJPP3YHGak5bECz6wGaTISU57E2cajdMgt9sly3WEmQuLWjEopsiCKfBom6nuSLIWP1iykaQ9y+
Kt+5vSTqWpMjSk973U3Bxk3unLlhf3RxU2UdzsAw/o9K6fsMsOy6sN3lq8kguNj93dsYJjiwq6wr2nCcZWhkRQVXG54N4asPXPSOUXXPaMpzKgdncnTtV16stpeiZ6tVJEPMMr
AnK7d3u8j0sDQe0st65d2zr18TqW9MW6WZ4mgck/fkriSmOFBmjuYO6wvvrQsPUNA==

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



gvOHCA4fc

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/6H6SNQH6Zdk86Z9TWIMEZAR7riKX2Bru>



Una universidad de excelencia

RECTORÍA
2017-2023

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a mi familia; a mis padres Eduardo y Mireya por haberme dado el regalo de la vida e inculcado en mí la educación y responsabilidad; a mis hermanos, hermanas y sobrinos, por darme vivencias llenas de alegrías, y a mi pareja Emmanuel Neria por todo su apoyo y cariño incondicional, que cada día con su ejemplo me impulsa a ser mejor persona y profesional.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto fue posible a través del soporte de las siguientes instituciones y personas:

A la Dra. Constanza Machín Ramírez, por su apoyo y asesoría, quien hizo posible que concluya con éxito mi investigación, que además aportó en mi crecimiento como persona y profesional. Mi admiración y gratitud incondicional a usted y su familia. Descanse en paz, seguirá viviendo para siempre en nuestras mentes y nuestros corazones.

A los profesores el Dr. Manuel Saldaña Maldonado, Dr. Antonio Rodríguez Martínez, Dr. Héctor Sotelo Nava, Dr. Roberto Flores Velázquez y a la Dra. Loyda Albañil Sánchez por resolver mis dudas y acompañarme con éxito durante este proyecto.

A mis compañeros de estudio y amigos, Daniela Ponce y Diego González, con quienes compartí mis dudas, alegrías y logros.

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS	12
ÍNDICE DE FIGURAS.....	13
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	15
LISTA DE ABREVIATURAS	16
RESUMEN	18
ABSTRACT	19
INTRODUCCIÓN.....	20
CAPÍTULO 1.	22
1.1. ANTECEDENTES.....	22
1.1.1. ORIGEN DE LA ECONOMÍA CIRCULAR (EC).	22
1.1.2. FUNDAMENTOS HACIA LA DEFINICIÓN DE LA EC.....	22
1.2. MARCO TEÓRICO.	27
1.2.1. EL Y LA HUELLA ECOLÓGICA.....	27
1.2.2. EC.	28
1.2.2.1. Ventajas de la EC vs EL.	28
1.2.2.2. Poder y principios de la EC.....	29
1.2.2.3. Nutrientes biológicos y tecnológicos.	29
1.2.2.4. EC en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).	31
1.2.2.5. Evolución del marco de las 3'R con la EC.	32
1.2.2.6. EC en el mundo y en México en la actualidad.	32
1.2.3. APARATOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS (AEE).	34
1.2.3.1. Categorías de los AEE y sus componentes.	34
1.2.4. RESIDUOS DE APARATOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS (RAEE).	36
1.2.4.1. Obsolescencia programada.....	36
1.2.4.2. Definiciones.	37
1.2.4.3. Cantidad de generación.....	38
1.2.4.4. Clasificación de los RAEE.....	38
1.2.4.5. Toxicidad de los RAEE.	41
1.2.5. NORMATIVIDAD EN MATERIA DE LOS RAEE	42
1.2.5.1. Regulación internacional.....	42
1.2.5.2. Regulación nacional.....	45
1.2.6. MODELOS DE NEGOCIOS EXITOSOS DE AEE CON LA EC.	46

1.2.7. REFRIGERADOR DOMÉSTICO.....	48
1.2.7.1. Origen.....	48
1.2.7.2. Composición de un refrigerador.....	49
1.2.7.3. Industrias de refrigeradores domésticos en el mundo y en México.	50
1.2.8. POLIURETANO (PUR).....	51
1.2.8.1. Origen.....	51
1.2.8.2. Propiedades y usos.	52
1.2.8.3. Impactos ambientales y a la salud por la disposición final de PUR rígido.	53
CAPÍTULO 2.....	55
2.1. JUSTIFICACIÓN.....	55
2.2. OBJETIVO GENERAL.....	56
2.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	56
CAPÍTULO 3.....	57
3.1. DISEÑO EXPERIMENTAL.....	57
3.2. ESTRATEGIA EXPERIMENTAL.....	58
3.2.1. IDENTIFICACIÓN DE MÉTODOS PARA DETERMINAR LOS INDICADORES DE CIRCULARIDAD.	58
3.2.2. RECOLECCIÓN DE DATOS DEL CASO DE ESTUDIO.....	58
3.2.3. IDENTIFICACIÓN DE RESIDUOS DE MAYOR IMPACTO Y DELIMITACIÓN DEL ALCANCE.....	58
3.2.4. EJECUCIÓN DE METODOLOGÍAS DE CIRCULARIDAD.....	59
3.2.5. PROPUESTA DE MEJORA.....	59
3.3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	59
3.3.1. GUÍA PARA DIAGNOSTICAR LA CIRCULARIDAD.....	60
3.3.2. MATERIAL CIRCULARITY INDICATOR (MCI).....	60
3.3.2.1. Cálculo de materia prima virgen	63
3.3.2.2. Cálculo de residuos irrecuperables.....	63
3.3.2.3. Cálculo de la cantidad total de residuos irrecuperables	64
3.3.2.4. Cálculo del Índice de Flujo Lineal	64
3.3.2.5. Cálculo de la Utilidad	64
3.3.2.6. Cálculo del Factor de Utilidad	65
3.3.2.7. Cálculo del Indicador de Circularidad de un Producto	65
3.3.2.8. Ejemplos Ilustrativos.....	65
3.3.3. ANÁLISIS DE CIRCULARIDAD.....	69
3.3.3.1. Fase 1. Análisis de Flujos de Materiales, Recursos y Residuos.....	69

3.3.3.2. Fase 2. Análisis del costo del ciclo de vida.	70
3.3.3.3. Fase 3. Definición de Indicadores de Circularidad – Sostenibilidad.	70
3.3.3.4. Fase 4. Identificación de Oportunidades de Circularidad.	71
3.3.4. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV)	73
3.3.4.1. Definición de objetivos y alcance.	74
3.3.4.2. Análisis del Inventario del Ciclo de Vida (ICV).....	76
3.3.4.3. Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV).	76
3.3.4.4. Interpretación.	80
3.3.5. CIRCULAR ECONOMY TOOLKIT (CET).....	80
CAPÍTULO 4.	84
4.1. RESULTADOS.	84
4.1.1. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA.	84
4.1.2. DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS.	84
4.1.3. DIAGRAMA DE PROCESO.	85
4.1.4. ENTRADA Y SALIDA DE MATERIALES.	86
4.1.5. CÁLCULO DE LA CIRCULARIDAD CON EL MCI.	90
4.1.6. CÁLCULO DE LA CIRCULARIDAD CON EL CET.	94
4.1.7. CÁLCULO DE CIRCULARIDAD CON EL ACV.	95
4.2 DISCUSIÓN	109
4.2.1. ALTERNATIVAS DE MANEJO.	109
CAPÍTULO 5.	118
5.1. CONCLUSIONES.	118
5.2. PERSPECTIVAS.	119
REFERENCIAS.....	120

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Escuelas del pensamiento que definieron a la EC.	24
Tabla 2. Marco propuesto Van Buren sobre el modelo de las 9'R.	32
Tabla 3. Porcentaje de materiales contenidos en los AEE.	34
Tabla 4. Metales empleados en los AEE y su reciclaje.	35
Tabla 5. Definiciones de RAEE por diferentes entidades.	38
Tabla 6. Categorías de los RAEE.	39
Tabla 7. Composición detallada un refrigerador doméstico promedio.	50
Tabla 8. Nomenclatura para el cálculo del Indicador de Circularidad del Material (MCI).	62
Tabla 9. CET.	83
Tabla 10. Datos generales de la empresa.	84
Tabla 11. Insumos consumidos al año.	87
Tabla 12. Producción anual.	87
Tabla 13. Principales RME generados en el periodo 2018-2020.	88
Tabla 14. RME gabinetes y puertas de acero con espuma de PUR.	89
Tabla 15. Entradas y salidas del sistema delimitado.	98
Tabla 16. Funciones de las etapas delimitadas.	99
Tabla 17. Inventario de materia prima utilizada para la formulación de PUR.	100
Tabla 18. Inventario anual de refrigeradores fabricados con la cantidad de PUR y de acero empleados.	100
Tabla 19. Inventario anual de residuos de acero y PUR.	100
Tabla 20. Inventario promedio de materiales por una pieza de refrigerador.	101
Tabla 21. Inventario semanal de consumo de energía.	102
Tabla 22. Inventario anual de materia prima y electricidad.	104
Tabla 23. tCO ₂ e anual.	107
Tabla 24. Alternativas de manejo para el manejo del PUR.	117

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: EL vs EC.	28
Figura 2. Ciclo biológico y técnico.....	30
Figura 3: Ciclos técnicos biológicos y técnicos de la EC.	30
Figura 4: Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).	31
Figura 5: Escasez de metales de la tabla periódica.	35
Figura 6. Diversidad de RAEE en t generados mundialmente en el año 2019.	39
Figura 7. Diversidad de RAEE en t generados mundialmente en los años 2014, 2016 y 2019.....	39
Figura 8. RAEE global generados por continentes en el año 2019.	40
Figura 9. RAEE global recolectado y reciclado en el año 2016 y 2019.	40
Figura 10: ODS relacionados con la gestión de los RAEE.....	45
Figura 11. Componentes principales de un refrigerador.....	49
Figura 12. Principales países exportadores de electrodomésticos en el mundo en el 2013.....	51
Figura 13. Compañías fabricantes de refrigeradores a nivel global y Latam en el 2013.....	51
Figura 14. Ejemplo de reacción de síntesis de poliuretano.....	52
Figura 15. Tipos de PUR.	52
Figura 16. Mercado global de espuma del PUR por aplicación en el 2015.....	53
Figura 17. Diseño experimental para el diagnóstico de circularidad de un proceso.....	57
Figura 18. Representación esquemática de flujos de materiales.....	61
Figura 19. Ecuaciones para determinar el MCI.	63
Figura 20. Fases del Diagnóstico de Circularidad.	69
Figura 21. Mapa de flujos de materiales, recursos y residuos.	70
Figura 22. Estructura de costos según las fases del Ciclo de Vida del Producto.....	70
Figura 23. Etapas de un ACV.	74
Figura 24. Entradas y salidas en el ACV.	77
Figura 25. CEC Software.....	83
Figura 26. Diagrama de proceso de la fabricación de refrigeradores.	86
Figura 27. MCI de los gabinetes y puertas con acero.....	93
Figura 28. MCI del PUR.....	93
Figura 29. Resultados del CET.	94

Figura 30. Ciclo de vida de la fabricación del refrigerador.	96
Figura 31. Ciclo de vida del tren de espumado de gabinetes y puertas con PUR.....	96
Figura 32. Categorías de impacto del PUR y el acero para los gabinetes y puertas, puntuación única.	106
Figura 33. Categorías intermedias de impacto del PUR y el acero para los gabinetes y puertas, ponderación.....	106
Figura 34. Etapas del proceso de adhesivo prensado.....	111
Figura 35. Puntos críticos de fuga de espuma de PUR y ejemplo de piezas modificadas.....	113
Figura 36. Resultados de reducción de fuga de espuma	113

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. RME de gabinetes y puertas con y sin PUR generados en el periodo 2018-2020.....	89
Gráfico 2. Cantidad en kg de RME con espuma de PUR en el 2019.	90

LISTA DE ABREVIATURAS

- ABS:** Acrylonitrile Butadiene Styrene - Acrilonitrilo Butadieno Estireno
- ACV:** Análisis de Ciclo de Vida
- AEE:** Aparatos Eléctricos y Electrónicos
- C2C:** Cradle to Cradle - De la cuna a la cuna
- CET:** Circular Economy Toolkit - Conjunto de herramientas de Economía Circular
- CMAP:** Clasificación Mexicana de Actividades y Productos
- EC:** Economía Circular
- EICV:** Evaluación del impacto del ciclo de vida.
- EL:** Economía Lineal
- EMF:** Ellen MacArthur Foundation - Fundación Ellen MacArthur
- EPS:** Expanded polystyrene - Poliestireno expandido
- ErP:** Energy Related Products - Productos Relacionados con la Energía
- HI-PP:** High Impact Polypropylene - Polipropileno de Alto Impacto
- HI-PS:** High Impact Polystyrene - Poliestireno de Alto Impacto
- ICV:** Inventario de Ciclo de Vida.
- INEGI:** Instituto Nacional de Estadística y Geografía
- ISO:** International Organization for Standardization - Organización Internacional de Normalización
- LGPGIR:** Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos
- MAPAMA:** Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente
- MCI:** Material Circular Indicator - Indicador de Circularidad del Material
- OCDE:** Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
- ODS:** Objetivos de Desarrollo Sostenible
- OIT:** Organización Internacional del Trabajo
- ONU:** Organización de las Naciones Unidas
- PNUMA:** Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente
- PP:** Polypropylene - Polipropileno
- PS:** Polystyrene - Poliestireno
- PUR:** Poliuretano
- PVC:** Policloruro de vinilo

RAEE: Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos

REACH: Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals - Registro, Evaluación, Autorización y Restricción de Sustancias Químicas

RME: Residuos de Manejo Especial

RoHS: Restriction of Hazardous Substances - Restricción de sustancias peligrosas

RPE: Residuos Peligrosos

RSU: Residuos Sólidos Urbanos

SEMARNAT: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales

StEP: Solving the E-waste Problem - Resolviendo el Problema de los Desechos Electrónicos

tCO_{2e}: tonelada dióxido de carbono equivalente

WBCSD: World Business Council for Sustainable Development - Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible

RESUMEN

El estilo de vida moderno y el crecimiento de la población mundial demandan un número mayor de recursos naturales, generando escasez y excesivos residuos. Mundialmente, el consumo de materias primas extraídas, cosechadas y consumidas fue de 92 MMt para 2017, siendo para América y el Caribe 8.5 MMt para 2017 (16.4% > 2010). Según el Banco Mundial, en 2012 globalmente se generaron 1,300 Mt de residuos sólidos, estimando 154.08% más para 2025 y conforme a la SEMARNAT en el 2013 se generaron más de 44 Mt en México y podría aumentar a 65 Mt para el 2030. El tomar, producir, consumir y desechar los recursos de forma ilimitada sin aprovecharlos al máximo se asocia a la Economía Lineal. La Economía Circular surge para transformar este modelo que ha prevalecido desde la Revolución Industrial. Para comenzar a aplicar este nuevo modelo económico, es preciso conocer que tan circular es un proceso, producto y/o servicio. Considerando lo anterior, esta investigación evalúa la circularidad en una empresa mexicana de refrigeradores domésticos en el proceso de espumado, que genera desechos de puertas y gabinetes con espuma de poliuretano en grandes cantidades con el propósito de identificar las oportunidades de mejora y sugerir alternativas de manejo.

ABSTRACT

The modern lifestyle and the world population growth demand a greater number of natural resources, generating scarcity and excessive wastes. Worldwide, the consumption of raw materials extracted, harvested, and consumed was 92 MMt for 2017, being for America and the Caribbean 8.5 MMt for 2017 (16.4% > 2010). According to the World Bank, in 2012 1,300 Mt of solid waste were generated globally and it could be 154.08% more for 2025 and according to the SEMARNAT in 2013 more than 44 Mt were generated in Mexico, and it could increase to 65 Mt by 2030. Taking, producing, consuming, and disposing of resources in an unlimited way without make the most of them is associated with the Linear Economy. The Circular Economy arises to transform this model that has prevailed since the Industrial Revolution. To begin applying this new economic model, it is necessary to know how circular a process, product and/or service is. Considering the above, this project evaluates the circularity at a Mexican company of domestic refrigerators in the foaming process, which generates door and cabinet's wastes with polyurethane foam in large quantities with the purpose of identify improvement opportunities and to suggest management alternatives.

INTRODUCCIÓN.

El estilo de vida moderno y un creciente número de personas demanda cada vez más recursos naturales (División de Población de la ONU, 2019; Global Footprint Network 2019), que por desgracia al considerarlos erróneamente como inagotables, se han generado escasez de recursos y excesivas cantidades de residuos. A nivel mundial el consumo interno de materiales fue de 27 MMt en 1970 y alcanzó los 92 MMt en el año 2017, lo que representa un aumento del 240.7%, siendo para América y el Caribe el consumo de 7.3 MMt en el año 2010 y 8.5 MMt para el 2017, incrementado un 16.4% (PNUMA, 2019; ONU, 2019). Según datos del Banco Mundial, en el año 2012 las ciudades del mundo generaron 1,300 Mt de residuos sólidos al año, volumen que podría superar los 2,003 Mt para el año 2025, un 154.08% más comparado con 2012 (Hoornweg y Bhada-Tata, 2012) y conforme al Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de Residuos publicado en mayo de 2020 de la SEMARNAT, en el 2013 en México se generaron más de 120,128 t/día. (SEMARNAT, 2020)

Hoy en día cada vez es más evidente nuestra dependencia de los Aparatos Eléctricos y Electrónicos, sin embargo, la forma en que los producimos, consumimos y desechamos es insostenible. A nivel mundial en el año 2014 se generaron 44.4 Mt de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos que contribuyen de manera importante en el impacto ocasionado en el ambiente, volumen que fue superado en el año 2016 con 48.2 Mt, que para el 2019 alcanzó a ser de 53.6 Mt, 11.20% más, concluyendo el 2021 se estima que se generarán 57.5 Mt, 7.28% más y se prevé que aumente a 74.7 Mt para el 2030. (Baldé C.P. et al., 2015; MAPAMA, 2015; Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo, 2011; Forti V., Baldé C.P., Kuehr R., Bel G., 2020; Waste Electrical and Electronic Equipment Forum, 2021)

Esta presión a los recursos naturales que los toma, produce y desecha sin medida se asocia a la Economía Lineal, la cual ha desperdiciado materiales valiosos que aún pueden ser empleados. La Economía Circular surge en respuesta a la necesidad de erradicar este modelo económico que ha prevalecido desde la Revolución Industrial. El clásico sistema de extraer recursos naturales, producir, consumir y desechar, no ha sido sostenible, según aumenta la riqueza mundial, los recursos no renovables empiezan a no poder hacer frente a la demanda, y los recursos renovables están agotando su capacidad regenerativa. La transición a una economía más circular requiere cambios a lo largo de las cadenas valor, desde el ecodiseño de productos, la disminución de recursos vírgenes, nuevos negocios y modelos de mercado,

nuevas formas de convertir los desechos en recursos, hasta nuevos modos de comportamiento del consumidor (Comisión Europea, 2014).

Es por eso que la Economía Circular toma un papel crucial para mejorar la gestión integral de los recursos, por lo cual el propósito principal de este proyecto consiste en realizar un diagnóstico de circularidad en la etapa de espumado en una empresa mexicana ubicada en el Bajío que fabrica Aparatos Eléctricos y Electrónicos tipo refrigeradores domésticos, seleccionada esta etapa como caso de estudio ya que genera residuos de manejo especial de puertas y gabinetes con espuma de poliuretano en grandes cantidades, con lo cual el análisis de circularidad permite identificar las oportunidades de mejora y propone alternativas de manejo para incrementar la circularidad.

CAPÍTULO 1.

1.1. ANTECEDENTES.

1.1.1. ORIGEN DE LA ECONOMÍA CIRCULAR (EC).

La conceptualización de la EC tiene unos orígenes profundamente arraigados y no se remonta a una única fecha o un único autor. Sin embargo, sus aplicaciones prácticas, en los sistemas económicos y procesos industriales modernos han cobrado impulso desde finales de la década de los 70, gracias a un pequeño número de académicos, líderes de pensamiento y empresas (EMF, 2013).

La EC fue introducida por los responsables políticos de la Unión Europea y China como una solución a los países, empresas y consumidores para reducir el daño al medio ambiente causado por la Economía Lineal (EL) y la necesidad de lograr un cierre circular al ciclo de vida de los productos para una mejor administración de los recursos naturales (Comisión Europea, 2014; Murray et al., 2017). En el año 2002 China destacó como uno de los primeros actores asiáticos en introducir las políticas de EC a nivel nacional, con una nueva estrategia de desarrollo que alivió el rápido crecimiento económico y la escasez de materias primas y energía (Zhu, 2008, Yuan et al., 2006; Geng y Doberstein, 2008). Por otro lado, en el año 2015, la Comisión Europea adoptó un Plan de Acción de EC, donde los países en Europa como Dinamarca, Francia, Alemania, y el Reino Unido implementaron iniciativas, políticas y medidas que soportan la transición a la EC (European Urban Knowledge Network, 2015). Para el año 2019 se sumaron más países europeos y se generaron nuevos empleos y oportunidades de negocio incrementándose el valor de los residuos reciclados, lo que contribuyó en los avances de los objetivos de la Agenda 2030 (Comisión Europea, 2019).

1.1.2. FUNDAMENTOS HACIA LA DEFINICIÓN DE LA EC.

Debido a las ventajas que conlleva, actualmente la implementación de la EC se volvió una tendencia en diferentes sectores, tanto académicos como industriales, ya que promueve modelos de negocios que son pertinentes con el desarrollo sostenible, definido en el Informe Brundtland (1987) como “aquel que

satisface las necesidades de la generación presente, sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades” (Murray et al., 2017).

El concepto de EC ha sido perfeccionado y desarrollado por diversas escuelas del pensamiento, filosofías y autores que dieron origen de una u otra forma al concepto que actualmente se tiene sobre EC (Prieto-Sandoval et al., 2018; Kirchherr et al., 2017; EMF, 2013):

Autor/ Escuela	Año	Descripción	Referencia
John Lyle	1978	<i>Diseño Regenerativo</i> : se basa en sistemas que podrían organizarse para generar fuentes de materia y energía, que a su vez pueden ser auto consumibles o aprovechados por otros sistemas.	EMF, 2013
Walter Stahel	1986	<i>Economía del Rendimiento</i> : se basa en la importancia de vender servicios en lugar de productos.	EMF, 2013
Robert Frosch y Nicholas Gallopoulos	1989	<i>Ecología Industrial o Eco-industria</i> : “el modelo tradicional de actividad industrial, en el que los procesos de fabricación individuales absorben las materias primas y generan productos para vender, además de los desechos para eliminar, debe transformarse en un modelo más integrado: un ecosistema industrial. El ecosistema industrial funcionaría como un análogo de los ecosistemas biológicos.”	Frosch R. A. et al., 1989
William McDonough y Michael Braungart	1991	<i>Cradle-to-Cradle (C2C) o de la Cuna a la Cuna</i> : “todo el material involucrado en los procesos industriales y comerciales son nutrientes, de los cuales hay dos categorías principales: técnica y biológica.”	Cradle to Cradle Products Innovation Institute, 2016
Janine Benyus	1997	<i>Biomímesis</i> : “Los animales, las plantas, los microbios son los ingenieros consumados. Ellos han descubierto qué funciona, qué es apropiado, y lo más importante, qué perdura aquí en la Tierra” (...) La diferencia de la biomímesis es que no se basa en lo que podemos extraer de los organismos y sus ecosistemas, sino en lo que podemos aprender de ellos.”	Roche, 2010
René Kemp y Peter Pearson	2007	<i>Eco-innovación</i> : “El termino eco-innovación generalmente se entiende que significa la producción, aplicación o explotación de un bien, servicio, proceso de producción, estructura organizacional o método de negocios o gestión que sea novedoso para la empresa o el usuario y que resulte, a lo largo de su ciclo de vida, en una reducción del riesgo ambiental, la contaminación y los impactos negativos del uso de recursos (incluido el uso de energía) en comparación con las alternativas relevantes.”	Kemp R. y Pearson P, 2007

Autor/ Escuela	Año	Descripción	Referencia
Pauli Gunter	2011	<i>Economía Azul</i> : “Una economía baja en emisiones, eficiente en el uso de los recursos y competitiva” (...) “La economía azul demuestra que podemos encontrar maneras de aplicar la física, la química y la biología con materiales renovables y mediante prácticas sostenibles, tal como hacen los ecosistemas” (...) “Utilizando los recursos disponibles en los sistemas en cascada, (...) los residuos de un producto se convierten en la entrada para crear un nuevo flujo de caja”	Gunter Pauli, 2011
Ellen Macarthur Foundation	2012	“Una Economía Circular es un sistema industrial que es restaurativo o regenerativo por intención y diseño. Reemplaza el concepto de ‘final de la vida útil’ con la restauración, se desplaza hacia el uso de energía renovable, elimina el uso de productos químicos tóxicos, que perjudican la reutilización y apunta a la eliminación de desechos a través del diseño superior de materiales, productos, sistemas, y, dentro de esto, modelos de negocio.”	EMF, 2013
Kirchherr J., Reike D. y Hekkert M.	2017	“Un sistema económico que se basa en modelos de negocio que reemplazan el concepto de 'fin de vida útil' con la reducción, alternativamente reutilización, reciclaje y recuperación de materiales en los procesos de producción / distribución y consumo. Opera a nivel micro (productos, empresas, consumidores), meso nivel (parques eco-industriales) y macro nivel (ciudad, región, nación y más allá), con el objetivo de lograr un desarrollo sostenible, creando simultáneamente calidad ambiental, prosperidad económica y equidad social, en beneficio de las generaciones actuales y futuras. Está habilitado por los nuevos modelos de negocio y consumidores responsables.”	Kirchherr et al., 2017

Tabla 1. Escuelas del pensamiento que definieron a la EC.

(Fuente: Elaboración propia a partir de EMF, 2013; Frosch R. A. et al., 1989; Cradle to Cradle Products Innovation Institute, 2016; Roche, 2010; Kemp R. y Pearson P, 2007; Gunter Pauli, 2011 y Kirchherr et al., 2017).

Con base en las definiciones indicadas en la tabla 1, se puede interpretar lo siguiente:

“Los sistemas de EC conservan el valor de los recursos el mayor tiempo posible, evitando su desperdicio y cuando un producto ha llegado al final de su vida útil o un residuo se ha generado, estos puedan ser utilizados una y otra vez y, por lo tanto, se revalorizan”.

A continuación, se describen las escuelas del pensamiento referidas:

Diseño regenerativo

En 1978 John Lyle desarrolló un concepto en el cual todos los sistemas podrían organizarse de forma regenerativa, tal y como ocurre en la naturaleza. Dándose así procesos que podrían renovarse o generar fuentes de materia y energía, que a su vez pueden ser auto consumibles o aprovechados por otros sistemas (EMF, 2013).

Economía del rendimiento.

En 1986, Walter Stahel a lo largo de su trabajo en el Instituto Product Life en Suiza, enfatizó la importancia de vender servicios en lugar de productos, la visión de una economía en bucles o circular y su impacto en la creación de empleo, competitividad económica, ahorro de recursos y prevención de residuos. (EMF, 2013) Sus investigaciones se centraron en cuatro objetivos principales:

- Aumentar la productividad natural de los recursos.
- Eliminación de concepto de residuo imitando el funcionamiento de la naturaleza. Nutrientes
- Servilización. Cambiando la venta por la prestación de servicio
- Reponer, sostener y expandir los ecosistemas para propiciar la abundancia.

C2C (Cradle to Cradle).

El químico y visionario alemán Michael Braungart junto con el arquitecto estadounidense Bill McDonough, formularon el modelo de pensamiento C2C o también conocido como de la cuna a la cuna. Esta filosofía de diseño considera todos los materiales empleados en los procesos industriales y comerciales como nutrientes, de los cuales hay dos categorías principales: los técnicos y biológicos (Cradle to Cradle Products Innovation Institute, 2016).

El diseño C2C 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 residuos equivalen a insumos. Elimina el concepto de residuos, diseñando productos y materiales con ciclos de vida que sean seguros para la salud humana y el medio ambiente y que puedan reutilizarse perpetuamente a través de metabolismos biológicos y técnicos. Crear y participar en sistemas para recoger y recuperar el valor de esos materiales tras su uso.

- Aprovechar la energía del sol. Hacer uso de la energía renovable y maximizar el uso de la energía renovable.
- Celebrar la diversidad. Gestionar el uso del agua para maximizar la calidad, promover ecosistemas saludables y respetar los efectos a nivel local. Orientar las operaciones y las relaciones con las partes interesadas mediante la responsabilidad social.

Ecología industrial.

La ecología industrial es el estudio de los flujos de materiales y de la energía a través de sistemas industriales. Centrándose en las conexiones entre los operadores dentro del ecosistema industrial, este enfoque tiene como objetivo crear procesos de circuito cerrado en el que los residuos sirven de entrada para otro proceso, eliminando la noción de un subproducto no aprovechable (EMF, 2013; Frosch R. A. et al., 1989).

Biomímesis.

Janine Benyus, definió 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. Se basa en tres principios fundamentales (EMF, 2013; Roche, 2010):

- La naturaleza como modelo: imitando formas, procesos, sistemas y estrategias para resolver los problemas humanos.
- La naturaleza como medida: utilizando un estándar ecológico para juzgar la sostenibilidad de nuestras innovaciones.
- La naturaleza como mentor: ver y valorar que la naturaleza no se basa en lo que podemos extraer de ella, sino en lo que podemos aprender del mundo natural.

Economía azul.

Impulsada por Gunter Pauli, empresario belga. Este modelo se centra en utilizar todos los recursos disponibles en el sistema a manera de cascada. Si se genera algún residuo, este último se convierte en material que alimente un nuevo sistema o flujo de caja. (Gunter Pauli, 2011)

1.2. MARCO TEÓRICO.

1.2.1. EL Y LA HUELLA ECOLÓGICA.

Desde la revolución industrial, ha predominado un modelo de producción y consumo lineal basado en tomar materias primas, fabricar, consumir y eliminar, partiendo de la abundancia de recursos naturales. En las últimas décadas, debido a una rápida industrialización de las economías emergentes, se ha presentado un uso elevado y continuo de recursos, siendo que la cantidad de materias primas extraídas, cosechadas y consumidas en todo el mundo aumentó más del triple desde 1970, partiendo de 27 Mt hasta llegar a 92 Mt en 2017, lo que representa un aumento del 240% (PNUMA, 2019; ONU, 2019) y se prevé que alcance los 167 Mt para 2060 (OCDE, 2018). El impacto ambiental ligado al modelo de producción y consumo en la EL de los flujos globales de ocho materias primas (acero, aluminio, plástico, cemento, madera, cultivos y ganado), de acuerdo con el estudio Circular Economy and Environmental Priorities for Business, es del 20% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero, del 95% del uso del agua y del 88% del uso del suelo (WBCSD, 2017). Más aún, el crecimiento demográfico mundial que año tras año asciende, contribuye a la demanda y escasez de los recursos naturales. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas (ONU), para el año 1950 se estimaba una población mundial de 2,500 millones de personas y en la actualidad es de más de 7,000 millones de personas, lo que representa casi el triple de población e incluso se espera que aumente a los 9,700 millones en 2050 (División de Población de la ONU, 2019).

En la década de los 70 también la huella ecológica de la humanidad superó por primera vez la biocapacidad global y lo hace cada año desde entonces. Para 2019, este exceso anual se ha acumulado en una deuda ecológica que excede los 17 años de productividad total de la Tierra, revelando con este déficit ecológico un desequilibrio entre el consumo demandado en comparación a la capacidad que puede renovar nuestro planeta a sus ecosistemas, exigiendo cada vez más a la capacidad biológica del mismo la producción de materiales biológicos y la absorción de los desechos generados. Si se traducen estos datos en cantidad de planetas Tierra consumidas anualmente, el promedio mundial en 1970 fue de 1.0 planeta, hasta alcanzar en la actualidad 1.75. En el mismo año, el indicador del día del rebasamiento de la Tierra fue el 29 de diciembre, lo que figuró un déficit del 0.8% y para el 2019 el 29 de julio, lo que representa un déficit del

42.7%; en el 2020 el día del rebasamiento de la Tierra fue el 22 de agosto de 2020 (Global Footprint Network 2019; Earth Overshoot Day, 2021)

1.2.2. EC.

1.2.2.1. Ventajas de la EC vs EL.

La EL tiene diversas desventajas, en comparación con la EC, las cuales resaltan:

EL

- Consume materias primas vírgenes que provienen de la naturaleza y utiliza fuentes de energía de combustibles fósiles.
- Provoca la escasez de recursos, debilitando el abastecimiento y la cadena de proveedores.
- Genera un número creciente de residuos.

EC

- Evita la extracción de materiales vírgenes sustituyendo los insumos por materias primas recicladas o reutilizadas y promueve el consumo de energía de fuentes renovables.
- Promueve la conservación de recursos, fortaleciendo el abastecimiento y la cadena de proveedores, promoviendo la creación de proveedores y tecnologías sustentables.
- Reduce al máximo la generación de residuos y los reintroduce en el ciclo productivo.

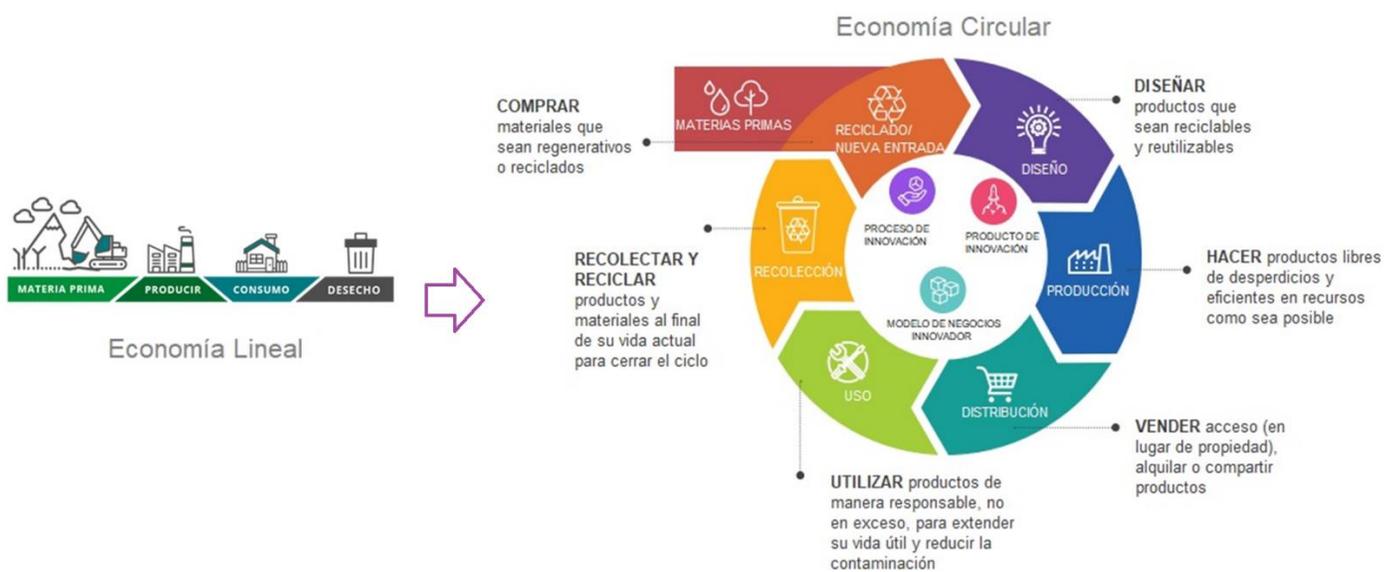


Figura 1: EL vs EC.
(Fuente: Modificado de WBCSD, 2018)

1.2.2.2. Poder y principios de la EC.

La EC se basa en el poder de la circularidad de los recursos, tanto biológicos como técnicos (EMF, 2013):

- Poder del círculo interior: Cuanto más corto es el círculo, menor es el cambio en que se debe someter un producto para poder ser reutilizado, transformado o re-fabricado.
- Poder circular por más tiempo: Maximizar el número de ciclos consecutivos (ya sea reutilización, re-manufactura, o reciclaje) y/o el período de cada ciclo.
- Poder del uso en cascada: Diversificar la reutilización a través de las fases de una cadena de valor.
- Poder de los inputs (entradas) puros: Flujos de materiales no contaminados incrementan la eficiencia en la recolección y redistribución mientras mantienen la calidad, particularmente de los elementos técnicos, que, a su vez, extienden la longevidad del producto, aumentando así la productividad del material.

Igualmente, la EC hace uso de tres principios que abordan retos para su administración y para la economía industrial en que se apliquen (EMF, 2013):

- Principio 1: Preservar y fortalecer el capital natural con la preservación de las existencias finitas de productos no renovables y priorizando la implementación de energías renovables.
- Principio 2: Optimizar el rendimiento de los recursos, diseñando los productos para que sus componentes se puedan mantener circulando dentro de los sistemas contribuyendo a la economía.
- Principio 3: Impulsar la efectividad de los sistemas de producción y uso para reducir sus efectos negativos, como la contaminación de la tierra, el agua o el aire, liberación de sustancias químicas o su impacto en el cambio climático.

1.2.2.3. Nutrientes biológicos y tecnológicos.

Los componentes consumibles en la EC son materiales biológicos y técnicos (EMF, 2013). Los nutrientes biológicos son seguros y beneficiosos, ya sea para biodegradarse naturalmente y restaurar el suelo, o para ser completamente reciclados en materiales de alta calidad para las generaciones posteriores de productos, una y otra vez, los nutrientes técnicos son productos, equipos, sus partes o componentes, los cuales son fabricados con base en un ecodiseño que los hace duraderos, resistentes y fáciles de reparar, reutilizar y reciclar (Cradle to Cradle Products Innovation Institute, 2016).



Figura 2. Ciclo biológico y técnico.
 (Fuente: Cradle to Cradle Products Innovation Institute, 2016)

Ambos materiales pueden retornar de manera segura a la biósfera directamente o en cascada, usando energía al mínimo y la máxima retención de la calidad, la cual da mayores beneficios económicos y ambientales, en comparación con sólo el reciclaje que provoca la reducción de la calidad de los materiales y requiere de una mayor energía, integrando ciclos a la EC se obtiene: (EMF, 2013)

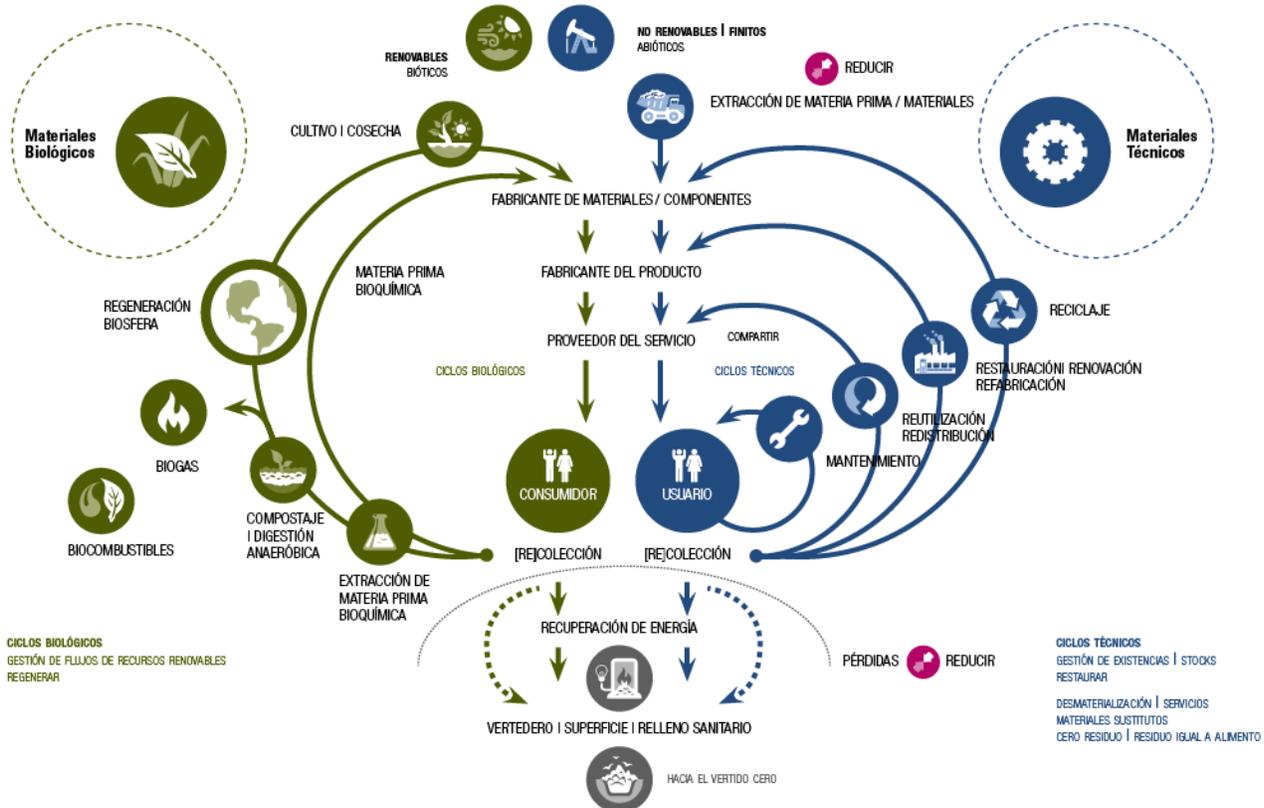


Figura 3: Ciclos biológicos y técnicos de la EC.
 (Fuente: EMF, 2013)

1.2.2.4. EC en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Un avance global para el cambio del modelo hacia la EC se ve reflejado en los ODS surgidos durante la Conferencia de la ONU sobre el Desarrollo Sostenible, celebrada en Río de Janeiro en el año 1992. Los ODS son un llamado universal a la adopción de medidas para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar que todas las personas gocen de paz y prosperidad. Convoca a todos (gobiernos, sector privado y sociedad civil) y marca los retos y la hoja de ruta hasta el año 2030. (ONU, 2019)



Figura 4: Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).
(Fuente: ONU, 2019)

La transición de una EL a una EC se puede apreciar claramente en el ODS 12, referente a la “Producción y consumo responsables”. También existen otros ODS que pueden verse impactados de manera positiva con el cambio de modelo económico, tales como el ODS 6 “Agua limpia y saneamiento”, el ODS 7 “Energía asequible y no contaminante”, el ODS 9 “Industria, innovación e infraestructura”, el ODS 11 “Ciudades y comunidades sostenibles”, el ODS 13 “Acción por el clima”, el ODS 14 “Vida submarina, el ODS" 15 “Vida de ecosistemas terrestres” así como el ODS 17 “Alianzas para lograr los objetivos” (Ruiz. E y Ruiz P., 2018). Aplicando la EC, se deben alcanzar tres objetivos: calidad ambiental, prosperidad económica y equidad social, como parte del fortalecimiento en la implementación de modelos de negocios que buscan un desarrollo sostenible (Murray et al., 2017)

1.2.2.5. Evolución del marco de las 3'R con la EC.

Tal como se cree, el concepto de la EC ha llevado a transitar la filosofía de las 3'R que contempla el reducir, reutilizar y reciclar (Kirchherr et al., 2017) hacia un marco de 9'R (tabla 2) que se integra por: rechazar, reducir, reutilizar, reparar, reformar, re-manufacturar, readaptar, reciclar y recuperar (Reike D. et al., 2018; Van Buren et al., 2016).

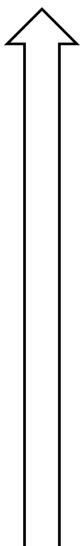
 <p>Economía circular</p> <p>Economía Lineal</p>	Uso y fabricación de productos más inteligentes	R1 Rechazar	Prevenir el uso de materias primas. Rechazar materiales que contaminan o generan más residuos.
	Extender la vida útil del producto y sus partes	R2 Reducir	Eliminar el uso de materias primas. Eliminar la producción de residuos antes de crearlos.
		R3 Reutilizar	Reutilizar el producto (de segunda mano, intercambios de productos)
		R4 Reparar	Reparar y dar mantenimiento a un producto defectuoso.
		R5 Restaurar	Restaurar un producto para ser utilizado en su función original.
		R6 Re-manufacturar	Fabricar productos nuevos a partir de partes de productos antiguos.
	Aplicación útil de materiales	R7 Re-proponer	Reutilizar los productos para un propósito diferente.
		R8 Reciclar	Procesamiento de los productos desechados para extraer materiales de valor.
		R9 Recuperar	Captura de energía de la incineración o biomasa de los desechos.

Tabla 2. Marco propuesto Van Buren sobre el modelo de las 9'R.
(Fuente: Modificado de: Van Buren N. et al., 2016)

1.2.2.6. EC en el mundo y en México en la actualidad.

A nivel global aún falta avanzar en la implementación de la EC; de acuerdo con el estudio titulado The Circularity Gap Report en el 2018 la economía global circular era 9,1% (Wit M. et al., 2018) y para el año 2020 fue de 8.6% que, de acuerdo con este reporte, el descenso fue a causa de las altas tasas de extracción de recursos naturales, la urbanización que acumula la existencia de recursos y las bajas tasas de recuperación de residuos, las cuales son prácticas arraigadas de la EL (Schmidt C. et al., 2018).

En México la EC no había sido promovida formalmente, sino hasta que en el 2019 a nivel federal la SEMARNAT emitió el documento Visión Nacional hacia una Gestión Sustentable: Cero Residuos, en

donde se manifiesta como intención el trabajar integralmente con una visión de la EC para atender el problema de los residuos en el país, transformando los tiraderos a cielo abierto en bancos de materiales para fortalecer el reciclaje y la re-manufactura (SEMARNAT2, 2019); posteriormente en diciembre de 2019, la cámara del senado emitió la Iniciativa con Proyecto de Decreto de la Ley General de Economía Circular, la cual en general promueve a las materias primas de segundo uso y desincentiva la elección de productos limitados a reciclaje o a incorporarse a una cadena económica secundaria (Cámara de senadores, 2019).

Posteriormente, en mayo de 2019 el gobierno de la Ciudad de México lanzó un Plan de Acción para una EC, buscando minimizar la generación y el aprovechamiento de 12,700 t de residuos sólidos generados de forma diaria con objetivos hacia el 2026. Asimismo, otras localidades han llevado acciones, tal es el caso del estado de Quintana Roo que, en junio de 2019 expidió la Ley para la Prevención, Gestión Integral y Economía Circular de los residuos del Estado de Quintana Roo, así como el municipio de Landa de Matamoros de Querétaro en octubre de 2019 emitió el Reglamento Municipal para la Prevención, Gestión Integral y Economía Circular de Residuos del Municipio de Landa de Matamoros, Querétaro (Gobierno de la Ciudad de México, 2019; Congreso de Quintana Roo, 2019).

Sobre iniciativas privadas resalta en el evento de octubre del 2019, en donde la empresa Unilever firmó un acuerdo de compromisos ante el Senado para alcanzarse en el 2025, los cuales son:

1. Todos sus empaques serán reusables, reciclables o compostables.
2. Incrementará un 25% el uso de plástico reciclado en sus empaques.
3. Reducirá el uso de plástico virgen en un 50%.
4. Ayudará a recolectar y procesar más envases de plástico de los que vende.
5. Apoyará a la educación sobre la EC.

Por otro lado, el Sector del plástico en diciembre de 2019 firmó ante el senado un Acuerdo Nacional por una Nueva Economía del Plástico, el cual se comprometió dentro de este acuerdo a:

1. Reducir la producción de plásticos de un solo uso.
2. Aumentar en un 30% el material reciclado en sus productos plásticos al 2030.
3. Incrementar en un 30% la tasa promedio nacional de acopio a 2025. (Cámara de senadores, 2019)

1.2.3. APARATOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS (AEE).

1.2.3.1. Categorías de los AEE y sus componentes.

Según datos del Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente del Gobierno de España (MAPAMA), los AEE son productos muy complejos que incluyen numerosas partes y componentes: piezas metálicas y plásticas variadas, carcasas de plástico, madera o metal, tarjetas de circuitos impresos, tubos de rayos catódicos, pantallas de cristal líquido, cables, pilas, baterías, componentes eléctricos y electrónicos, diversos fluidos, contrapesos de hormigón, cartuchos de impresión, motores eléctricos, etc. (MAPAMA, 2015).

Las principales categorías de AEE y los materiales en porcentaje en peso de los materiales que los componen son los siguientes: (MAPAMA, 2019; Baldé C.P.et al., 2017).

Categoría del AEE	Metales ferrosos	Metales no ferrosos	Vidrio	Plásticos	Otros
Grandes Aparatos	61	7	3	9	21
Pequeños aparatos	19	1	-	48	32
Equipos informáticos	43	-	4	30	20
Telecomunicaciones	13	7	-	74	6
Electrónica de consumo	11	2	35	31	22
Lámparas	2	2	89	2	3

Tabla 3. Porcentaje de materiales contenidos en los AEE.
(Fuente: MAPAMA, 2019; Baldé C.P.et al., 2017)

En muchos casos, la industria de AEE utiliza cada año cantidades notables de estos elementos en los procesos de producción, aunque las cantidades utilizadas en un solo producto pueden ser muy pequeñas, a futuro se pueden plantear retos debido al número total de productos producidos anualmente y la disponibilidad global de elementos individuales. En la siguiente tabla se mencionan el porcentaje de los principales metales empleados en la producción de AEE, los años de reservas que quedan al consumo actual y el porcentaje de consumo alcanzado por materiales reciclados. (PNUMA, 2011; StEP, 2015)

Metal	Uso en electrónica	Producción minera mundial (t/año)	% De demanda de producción de AEE	Años de reservas que quedan al consumo actual	% de consumo alcanzado por materiales reciclados
Plata	Contactos, interruptores, soldaduras sin plomo, conductores, etc.	20,000	30%	29	16%
Oro	Alambre de unión, contactos, etc.	2,500	12%	45	43%
Estaño	Soldadura sin plomo	27,500	33%	40	26%
Cobre	Cables, alambres, conectores, circuito impreso, transformadores	15,000,000	30%	61	31%
Indio	Pantallas planas, semiconductores	480	79%	13	0%

Tabla 4. Metales empleados en los AEE y su reciclaje.
(Fuente: PNUMA, 2011; StEP, 2015)

Por lo tanto, se ha generado en el mundo una escasez global de metales, siendo que sólo 18 de 60 metales se reciclan por arriba del 50% y 34 de 60 metales se reciclan abajo del 1% como se visualiza en la siguiente figura: (PNUMA, 2011; StEP, 2015)

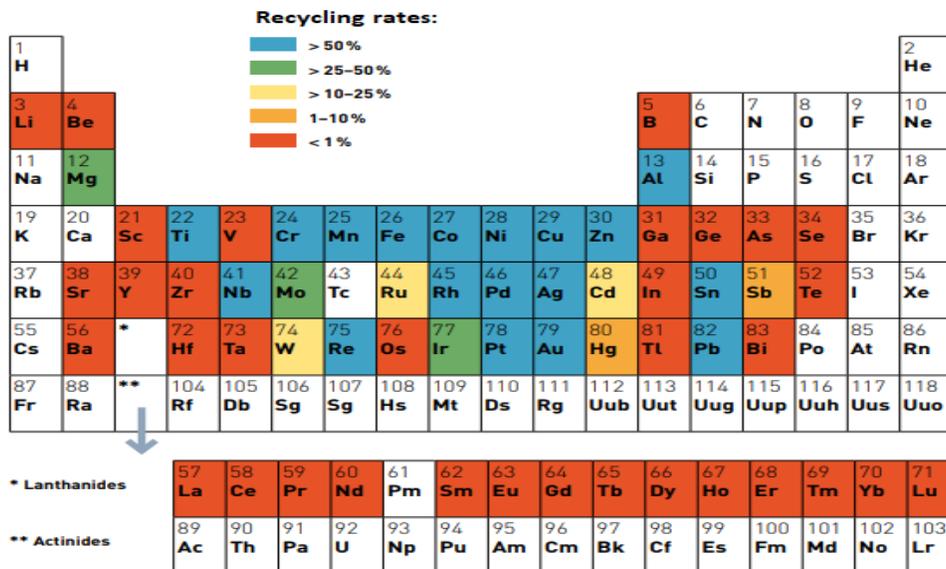


Figura 5: Escasez de metales de la tabla periódica.
(Fuente: PNUMA, 2011; StEP, 2015)

1.2.4. RESIDUOS DE APARATOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS (RAEE).

1.2.4.1. Obsolescencia programada.

En los últimos años se ha multiplicado notablemente la presencia de AEE, ya que proporcionan mayor comodidad, salud y seguridad a nuestra sociedad, y facilitan la adquisición, transmisión e intercambio de información. Los consumidores son uno de los principales actores que deciden el destino final de un AEE, ya que si, por ejemplo, un usuario decide cambiar su dispositivo por un nuevo modelo y al equipo usado destinarlo para su mantenimiento, reutilización o reciclaje, contribuiría a la EC, logrando que los materiales ingresen al ciclo técnico. Sin embargo, si el usuario decide desecharlo, los materiales se perderán y saldrá de la circularidad (Beltrán, 2018).

En el ámbito de la obsolescencia conocida como planeada, programada o anticipada se distinguen tres corrientes fundamentales (Casares, 2013):

- Funcional. Continua aparición de nuevos productos o variaciones tecnológicas de los ya existentes, induciendo el descarte funcional de bienes que perfectamente pueden desarrollar sus cometidos básicos (el teléfono celular obsoleto aún permite hablar, el televisor ver la programación, etc.).
- Cualitativa. Se fabrican productos de escasa duración y que tienen desgaste prematuro. AEE fabricados a costos reducidos de mala calidad, ofertados a precios bajos, que demandan mayor mantenimiento y reparación.
- Psicológica o percibida. Se relaciona con el desenvolvimiento de la moda, la publicidad. Un teléfono celular que sirve para cubrir la necesidad de comunicarse queda fuera del mercado por los imperativos de la moda.

En este sentido, se ha estimulado un crecimiento exponencial de los RAEE debido a un consumo irresponsable de la sociedad y su baja participación en disponer los RAEE en mecanismos de recuperación desechándose prematuramente equipos que todavía funcionan correctamente o en algunos casos pueden ser fácilmente reparados, promoviendo su rápida sustitución por equipos nuevos, así como la contribución de la obsolescencia programada que ofrece AEE de escasa duración y desgaste prematuro, que limita su funcionamiento después de un tiempo o cierto número de usos para su reemplazo frecuente. (Casares, 2013)

1.2.4.2. Definiciones.

En el año 2004, el Consejo de la ONU desarrolló una iniciativa internacional denominada Solving the E-waste Problem (StEP) con el objetivo de resolver problemas relacionados con los RAEE. Este consejo estableció que el residuo electrónico es un término usado para cubrir todos los artículos de equipos eléctricos y electrónicos, y todas sus partes que han sido descartadas por su propietario, como desechos sin la intención de volver a usarlos (Baldé C.P. et al., 2017). A continuación, se presenta la siguiente tabla en la que muestran las diversas definiciones de diversas entidades internacionales y nacional:

Autor/ Institución	Año	Definición	Referencia
OCDE	2001	“Cualquier equipo que usa energía eléctrica como fuente de alimentación que haya alcanzado el final de su vida útil.”	OCDE, 2001
Red de Acción de Basilea (BAN) Puckett y Smith	2002	“Los residuos electrónicos abarcan una amplia y creciente gama de equipos electrónicos, que van desde grandes aparatos domésticos como refrigeradores, estufas, aires acondicionados, a medianos y pequeños equipos como computadores, impresoras, teléfonos celulares, equipos de música personal y, en general, productos electrónicos de consumo que han sido descartados por sus usuarios.”	Puckett y Smith, 2002
Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo	2012	“todos los aparatos eléctricos y electrónicos (AEE) que pasan a ser residuos...comprende todos aquellos componentes, subconjuntos y consumibles que forman parte del producto en el momento que se desecha” (...) los AEE se definen como: “todos los aparatos que para funcionar debidamente necesitan corriente eléctrica o campos electromagnéticos, y los aparatos necesarios para generar, transmitir y medir tales corrientes y campos, y que están destinados a utilizarse con una tensión nominal no superior a 1,000 voltios en corriente alterna y 1,500 voltios en corriente continua”	Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo, 2012
StEP	2014	“Desechos electrónicos es un término utilizado para cubrir artículos de todo tipo de aparatos eléctricos y electrónicos (AEE) y sus partes que hayan sido desechados por sus propietarios como desperdicios sin la intención de reutilizarlos.”	StEP, 2014
Secretaría del Medio Ambiente y Recursos	2018	“Residuos tecnológicos provenientes de las industrias de la informática, fabricantes de productos electrónicos o de vehículos automotores y otros que, al transcurrir su	SEMARNAT, 2019

Autor/ Institución	Año	Definición	Referencia
Naturales (SEMARNAT)		vida útil, por sus características, requieren de un manejo específico.”	

Tabla 5. Definiciones de RAEE por diferentes entidades.

(Fuente: Elaboración propia a partir de OCDE, 2001; Puckett y Smith, 2002; Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo, 2012; SEMARNAT, 2019)

1.2.4.3. Cantidad de generación.

La generación de RAEE ha aumentado exponencialmente en todo el mundo en las últimas dos décadas. El último informe mundial sobre residuos electrónicos de la Universidad de la ONU estimó a nivel mundial que en 2016 se generaron 48.2 Mt y para el 2019 llegó a ser de 53.6 Mt, 11.20% más, de los cuales el índice de recolección y reciclaje pasó del 20% en el 2016 a 17.4% requiriéndose mayores esfuerzos ante la mayor cantidad generada y la disminución del reciclaje. El 82.6% restante, es decir 44.27 Mt, fueron eliminados mediante incineración o por disposición en vertederos, lo que no implicó procesos de descontaminación ni de recuperación de materias primas, desechándose componentes valiosos.

1.2.4.4. Clasificación de los RAEE.

Las categorías de RAEE son las siguientes: (Baldé C.P. et al., 2017; Forti V., Baldé C.P., Kuehr R., Bel G., 2020)

Categoría de los RAEE	Descripción
Grandes Aparatos	Electrodomésticos. Grandes Aparatos: lavadoras, secadoras, lavavajillas, cocinas eléctricas, grandes impresoras, fotocopiadoras y paneles fotovoltaicos.
Aparatos de intercambio de temperatura.	Refrigeradores, congeladores, aparatos de aire acondicionado y bombas de calor.
Pequeños aparatos.	Aspiradoras, hornos de microondas, tostadoras, hervidores eléctricos, afeitadoras eléctricas, básculas, calculadoras, aparatos de radio, videocámaras, juguetes eléctricos y electrónicos, pequeñas herramientas eléctricas y electrónicas, pequeños dispositivos médicos y pequeños instrumentos de supervisión y control.
Aparatos de informática	Calculadoras de bolsillo, encaminadores, computadoras personales e impresoras.
Telecomunicaciones.	Teléfonos móviles, sistema de posicionamiento global y teléfonos.

Categoría de los RAEE	Descripción
Electrónica de consumo.	Televisores, monitores, computadoras portátiles, microcomputadoras y tabletas.
Lámparas.	Lámparas fluorescentes, lámparas de descarga de alta intensidad y lámparas de diodo emisor de luz.

Tabla 6. Categorías de los RAEE.
(Fuente: Baldé C.P.et al., 2017; Forti V., Baldé C.P., Kuehr R., Bel G., 2020)

En la siguiente gráfica se refleja el desglose global de los RAEE generados en el año 2019 en Mt (Forti V., Baldé C.P., Kuehr R., Bel G., 2020):

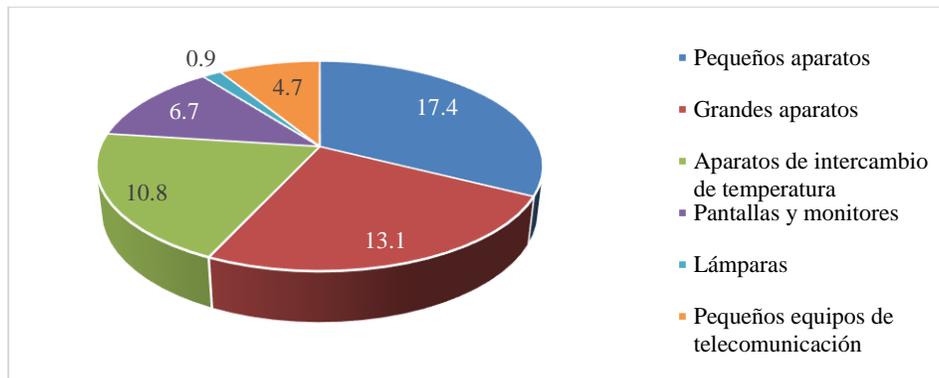


Figura 6. Diversidad de RAEE en t generados mundialmente en el año 2019.
(Fuente: Elaboración propia a partir de Forti V., Baldé C.P., Kuehr R., Bel G., 2020)

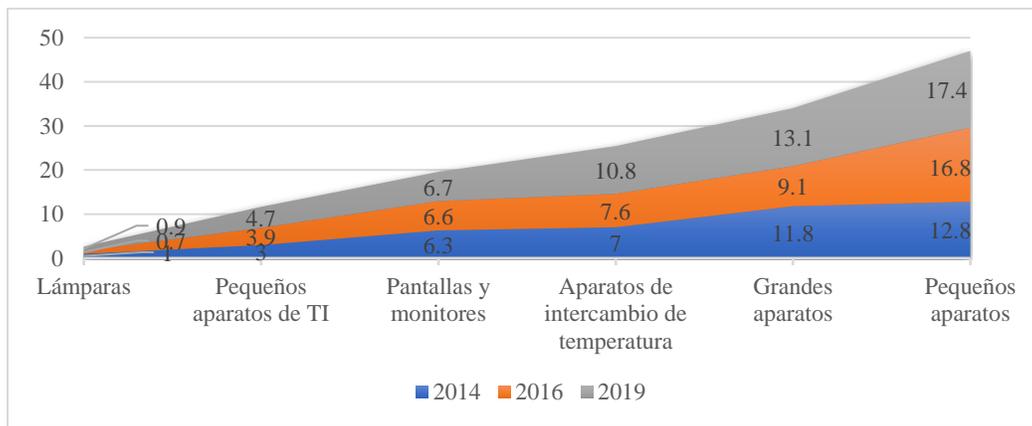


Figura 7. Diversidad de RAEE en t generados mundialmente en los años 2014, 2016 y 2019.
(Fuente: Elaboración propia a partir de Baldé C.P.et al., 2015; Baldé C.P.et al., 2017; Forti V., Baldé C.P., Kuehr R., Bel G., 2020)

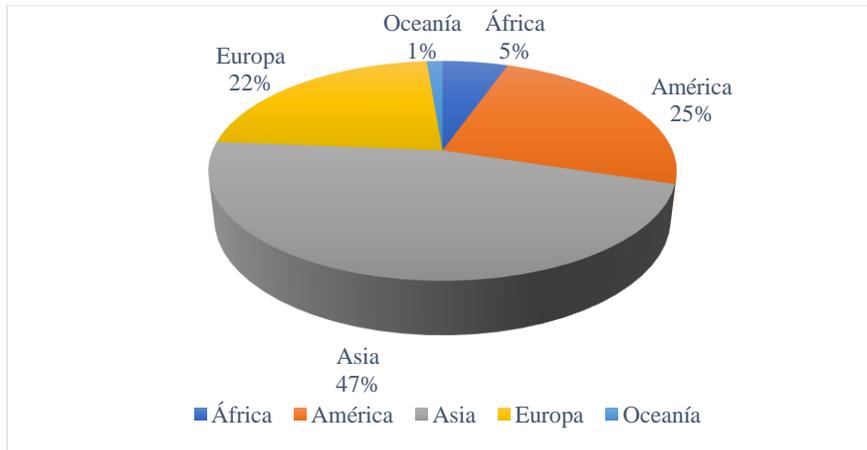


Figura 8. RAEE global generados por continentes en el año 2019.
 (Fuente: Elaboración propia a partir de Forti V., Baldé C.P., Kuehr R., Bel G., 2020)



Figura 9. RAEE global recolectado y reciclado en el año 2016 y 2019.
 (Fuente: Elaboración propia a partir de Baldé C.P.et al., 2017; Forti V., Baldé C.P., Kuehr R., Bel G., 2020)

En el mundo el promedio de kilogramos por habitante de RAEE para el año 2016 fue de 6.1, en América del norte de 11.6, en América Latina de 7.1 y en México de 8.2. En el 2016 en América sólo 1.9 Mt de RAEE se reciclan (16.8 %) y el principal generador de RAEE es Estados Unidos con 6.3 Mt, seguido de Brasil con 1.5 Mt, y en tercero México con 1 Mt de los cuales se recolectó sólo el 36% a través de medios adecuados (Baldé C.P.et al., 2017); de este millón, el 65.12% fue de material con potencial económico, 5.99% contuvo componentes tóxicos y el 28.89% contenía materiales que actualmente no son aprovechados tales como: cerámicos, fibras y otros tipos de plásticos no valorizables. (SEMARNAT, 2020)

1.2.4.5. Toxicidad de los RAEE.

A menudo los RAEE contienen materiales considerados tóxicos, que son potencialmente perjudiciales para el medio ambiente y la salud de las personas (MAPAMA, 2015, Baldé C.P.et al., 2015; StEP,2015):

- Mercurio (Hg): Más del 90% procede de las pilas y sensores de posición con una pequeña contribución por parte de los relés y lámparas fluorescentes. Es uno de los metales más tóxicos que se utiliza ampliamente en los aparatos eléctricos y electrónicos, es un compuesto bio-acumulativo, la exposición a dicho metal puede causar daños cerebrales y hepáticos.
- Plomo (Pb): Más del 90 % en las baterías, con pequeñas contribuciones por parte de las soldaduras para los circuitos impresos, lámparas y tubos fluorescentes. Dicho metal se acumula en el ecosistema pudiendo causar efectos tóxicos en la flora y fauna. La exposición continua puede perjudicar al sistema nervioso, endocrino y cardiovascular del ser humano.
- Óxido de plomo (utilizado en el vidrio): Más del 80% en los tubos de rayos catódicos mientras que el resto procede de las lámparas y los tubos fluorescentes.
- Níquel (Ni): Se emplea principalmente en las baterías Ni-Cd. El níquel se acumula en algunas plantas. Sin embargo, no se acumula en pequeños organismos. Los efectos más graves a la salud por exposición a dicho metal son bronquitis crónica, disminución de la función pulmonar y cáncer de los pulmones.
- Cadmio (Cd): Más del 90 % en las pilas recargables. Se trata de un compuesto bio-acumulativo, persistente y tóxico para el medioambiente. En cuanto a la salud, los principales daños son cáncer de pulmón y perjuicios en los riñones.
- Cromo hexavalente (Cr VI): Se utiliza ampliamente por su alta conductividad y sus características anticorrosivas, inhibidor de corrosión en el sistema de refrigeración de los refrigeradores por absorción. El cromo VI es fácilmente adsorbido por las células y puede provocar efectos tóxicos. La mayoría de los compuestos de cromo VI son irritantes para los ojos, la piel y las membranas. La exposición crónica a dichos compuestos puede causar daños en los ojos y al ácido desoxirribonucleico.
- Retardantes de llama bromados: Ayudan a que los materiales, sobre todo plásticos y textiles, se vuelvan más resistentes a las llamas. Los retardantes de llama más empleados son polibromobifenilos, polibromodifenil éteres y tetrabromobisfenol A. Se tratan de compuestos en cierta medida volátiles, bio-acumulativos y persistentes. La combustión a bajas temperaturas de

materiales que los contienen despiden emisiones tóxicas como dioxinas y furanos que puede causar graves desórdenes hormonales. Son considerados compuestos cancerígenos y neurotóxicos.

- Cloroparafinas: Más del 90% en el policloruro de vinilo (PVC) de los cables.
- Plata, cobre, bario y antimonio.

De acuerdo con la Organización Internacional del Trabajo (OIT), es primordial que, en todas las etapas de la gestión de los RAEE de recolección, almacenamiento, transporte y tratamiento, se realicen en condiciones seguras para evitar la liberación de este tipo de sustancias peligrosas para el medioambiente y la salud humana, así como de combatir además contra las industrias informales del reciclaje que no cuentan con las condiciones seguras ante la exposición de sus trabajadores (OIT, 2014).

1.2.5. NORMATIVIDAD EN MATERIA DE LOS RAEE.

1.2.5.1. Regulación internacional.

En el mundo sólo se tiene datos oficiales de la disposición de los RAEE de 41 países y de 16 países se estiman, derivado de la carencia de legislación de los RAEE, que ocasiona que estos no se dispongan adecuadamente, o de que lo sean a través de un sector no regulado que los manipula sin proteger adecuadamente a sus trabajadores y libera componentes tóxicos al ambiente, desechándose además componentes valiosos que contienen (Baldé C.P.et al., 2017).

En el año 2015 varias organizaciones de la ONU y en colaboración con representantes gubernamentales de América Latina, dieron una visión general de la regulación y gestión de los RAEE en esta región, mostrando que sólo algunos países de Latam tienen actualmente leyes específicas sobre la gestión de RAEE, y que en la mayoría de los casos, están gestionados como residuos peligrosos (RPE) requiriéndose un cambio fundamental y un marco legislativo adecuado, infraestructura de reciclaje y la presencia de sistemas organizados para la gestión de los RAEE (Baldé C.P.et al., 2015).

A partir de 2020, México ha estado redefiniendo las responsabilidades de las partes interesadas involucradas, estableciendo categorías claramente definidas y estableciendo metas obligatorias de recolección, aumentando así los volúmenes recolección y reciclaje de los RAEE (Forti V., Baldé C.P.,

Kuehr R., Bel G., 2020). Por otro lado, México ha suscrito una serie de convenios internacionales entre los que se encuentran el Convenio de Basilea sobre movimientos transfronterizos de RPE y su eliminación, y el Convenio de Estocolmo sobre COP, que a partir de dichos convenios se desprenden una serie de obligaciones relacionadas directa o indirectamente con la gestión y manejo de los RAEE (PNUMA, 2011).

Convenio de Basilea.

Fue creado en el año 1992 a través del PNUMA. El convenio es una regulación internacional basada en el control del flujo transfronterizo de RPE y su eliminación. La intención del acuerdo es la de mantener los RPE en países capaces de manejarlos, evitar la exportación de estos materiales a países de economías emergentes, excepto cuando se haya obtenido el consentimiento informado previo de la nación que acepta. Es por este motivo que el término **Responsabilidad Extendida del Productor** que responsabiliza a los productores por la devolución de los desechos electrónicos, es un concepto central del Convenio de Basilea (BASEL, 2019; OCDE, 2001).

Convenio de Estocolmo.

Fue adoptado en Suecia en el año 2001 y entró en vigor en mayo de 2004; México lo ratificó en febrero 2003. Este convenio es un tratado internacional cuyo principal objetivo es eliminar o restringir la producción y el uso de contaminantes orgánicos persistentes. Unas amplias variedades de compuestos bromados se han utilizado como aditivos en carcasas, tarjetas de circuitos impresos, entre otros componentes de equipos eléctricos y electrónicos. Por lo tanto, su adecuado manejo y reciclaje al final de su vida útil representa un gran reto para los gobiernos (BASEL, 2019).

Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo

Fue creada en 2002 y promulgada en 2003, diseñada para gestionar la electrónica en la Unión Europea, para mejorar la recopilación y la eficiencia del reciclaje de la cadena de los RAEE. La Directiva cubre diez categorías de equipo eléctrico y electrónico, y obliga a los estados de la Unión Europea a recolectar y tratar por separado a estos residuos. Tiene como principal objetivo prevenir la generación de los RAEE, y promover la reutilización, el reciclado y otras formas de tratamiento, con el fin de recuperar materias (Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo, 2012).

Directiva de Restricción de Sustancias Peligrosas (RoHS por sus siglas en inglés).

Fue instaurada para restringir el uso de ciertas sustancias peligrosas en equipos eléctricos y electrónicos y contribuir con la valorización y eliminación correcta de estos residuos. La Directiva RoHS prohíbe la distribución en el mercado europeo de nuevos AEE que contengan niveles superiores a los permitidos de seis materiales específicos: plomo, mercurio, cadmio, cromo hexavalente y dos retardantes de llama añadidos a los plásticos (polibromobifenilos y polibromodifeniléteres) (Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo, 2011).

Directiva de productos que utilizan energía (ErP por sus siglas en inglés).

La entrada en vigor de la Directiva de Ecodiseño ErP (Directiva 2009/125/CE) del Parlamento Europeo fue con el fin de ampliar el marco sobre los requisitos de diseño ecológico hacia todos los productos relacionados con la energía. Estos requisitos contribuyen al desarrollo sostenible, a través del aumento de la eficiencia energética y el nivel de protección del medio ambiente (Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo, 2009).

Iniciativa Reduce, reúsa y recicla (3Rs).

Esta iniciativa fue diseñada en el año 2004 por Japón durante la cumbre G8 de la ONU. Este país promovió el marco de las 3R dentro de su legislación y en el escenario internacional. La prioridad de esta iniciativa es prevenir la generación de residuos (reducir), además de promover tecnologías de reutilización y reciclaje, a través de programas de cooperación internacional y eliminar las barreras al movimiento internacional de materiales para reciclado y re-manufactura.

Iniciativa StEP.

Fue creada por el Consejo de la ONU en el año 2004. Su principal objetivo es mejorar y coordinar los diferentes esfuerzos mundiales en la cadena de logística inversa y la reutilización de materiales reciclados de los RAEE. Esta iniciativa se basa en cinco principios:

- Bases científicas. Se basa en la evaluación científica e incorpora una visión integral de los aspectos sociales, ambientales y económicos de los RAEE.
- Enfoque de ciclo de vida. Lleva a cabo investigaciones sobre el ciclo de vida completo de los AEE y su correspondiente suministro global, proceso y flujo de materiales.

- Solución orientada. Su investigación y proyectos piloto están destinados a contribuir a la solución de problemas de desechos electrónicos.
- Socialmente responsable. Busca fomentar prácticas de reutilización y reciclaje seguras y eco / energéticamente eficientes en todo el mundo de una manera socialmente responsable (StEP, 2015)

Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

La gestión de los RAEE está estrechamente relacionada con el ODS 3 buena salud y bienestar, ODS 6 sobre desechos limpios y saneamiento, ODS 8 sobre trabajo decente y crecimiento económico, ODS 14 sobre la vida submarina, ODS 12 consumo y producción responsable, y ODS 11 ciudades y comunidades sostenibles (Forti V., Baldé C.P., Kuehr R., Bel G., 2020).



Figura 10: ODS relacionados con la gestión de los RAEE.
(Fuente: Forti V., Baldé C.P., Kuehr R., Bel G., 2020)

1.2.5.2. Regulación nacional.

México cuenta con convenios internacionales y un marco jurídico que busca asegurar el manejo integral de residuos y su prevención. Existen diferentes instrumentos que permiten cumplir este objetivo, comenzando por la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. De esta se derivan la Ley General para el Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), la Ley General para la

Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), los reglamentos correspondientes a cada ley, así como las Normas Oficiales Mexicanas que se aplican para todo el país.

LGPGIR.

Esta Ley fue publicada en el Diario Oficial de la Federación el 8 de octubre de 2003, última reforma publicada DOF 19-01-2018, dentro del artículo 19 fracción VIII se define a los residuos tecnológicos como de Residuos de Manejo Especial (RME) (SEMARNAT, 2019).

NOM-161-SEMARNAT-2011.

Establece los criterios para clasificar los residuos de gestión especiales y determinar cuáles están sujetos a un plan de gestión, y determinar cuáles están sujetos a Plan de Manejo; el listado de estos, el procedimiento para la inclusión o exclusión a dicho listado; así como los elementos y procedimientos para la formulación de los planes de manejo. (SEMARNAT, 2019)

Iniciativa con Proyecto de Decreto de la Ley General de Economía Circular.

Esta iniciativa fue publicada el 04 de diciembre de 2019, la cual la Ley cuenta con siete capítulos, los dos primeros se centran en los Principios Generales y en las Reglas de Administración Básicas, en los Capítulos III y IV los principios básicos, y en los Capítulos V y VI las medidas incentivas y las responsabilidades legales. Esta iniciativa promueve a las materias primas de segundo uso y desincentiva la elección de productos limitados a reciclaje o a incorporarse a una cadena económica secundaria. (Cámara de Senadores, 2019)

1.2.6. MODELOS DE NEGOCIOS EXITOSOS DE AEE CON LA EC.

Si la industria de AEE se mueve hacia un modelo de EC, puede retener el valor de las materias primas dentro de los AEE, y económicamente puede ser posible, ya que se estima que el valor potencial de las materias primas de los RAEE generados mundialmente en el año 2016 fue de hasta 55,000 millones de euros, debido a que contienen materiales valiosos y escasos y la recuperación de estos materiales puede reducir la extracción de materiales vírgenes (Baldé C.P.et al., 2017). Sin embargo, en algunos casos, los costos de una adecuada recolección y el reciclaje de RAEE pueden exceder los ingresos generados a partir de los materiales recuperados y esto se debe principalmente a la complejidad del diseño del producto y la

dificultad de separar materiales altamente mezclados (Baldé C.P. et al., 2015). Es por eso por lo que la Comisión Europea llama a aplicar los principios de la EC a la hora de diseñar los AEE, haciéndolos más duraderos, resistentes y fáciles de reparar, reutilizar y reciclar (Comisión Europea, 2016).

Asimismo, extender la vida útil de los AEE es preferible desde una perspectiva del ciclo de vida en algunos productos ya que reduce la huella ecológica a través de una menor producción y facilita la disponibilidad de bienes para los segmentos de la población que no pueden acceder a los últimos modelos (Baldé C.P. et al., 2015). Si se adoptan nuevos modelos de negocio basados en la EC, se podrá lograr una mayor circularidad del producto y un mejor cálculo y aprovechamiento económico de sus residuos.

Existen grandes compañías multinacionales que han adoptado el modelo de EC en sus instalaciones obteniendo diversos beneficios económicos, sociales y ambientales, los cuales se describen a continuación algunas de las acciones que han llevado a cabo:

Apple

El Programa de Reutilización y Reciclaje de Apple consiste en que cada Apple Store acepte los antiguos iPhones de modo gratuito a cambio de un crédito para un nuevo modelo.

- 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.
- Dispone de robots capaces de desmontar 1.2 millones de iPhones al año, para reutilizar aluminio, acero y otros materiales.
- Continúa invirtiendo en nuevos modos de mejorar la reutilización de los materiales y recuperar otros elementos que hasta el momento son más complicados de reciclar.
- Recolectó en el año 2014, 40 mil t de RAEE, lo que representa más del 75% del peso total de los productos vendidos en los 7 años anteriores.

HP

- Realiza la devolución y reciclaje gratuito de cartuchos HP en más de 50 países alrededor del mundo.
- Ofrece productos de bajo consumo de energía eléctrica.

- ❑ Utilizó en el 2015, 15 millones de libras (6.8 millones de kg) de plástico reciclado como materia prima para fabricar nuevos cartuchos HP.
- ❑ Ha reciclado desde 1997 más de 210 millones de cartuchos HP y ha mejorado el reciclaje a través de nuevas líneas de proceso.
- ❑ La huella de carbono de los cartuchos HP reciclados es 33% menor que el de los de plástico nuevo.
- ❑ Utilizó en el 2018, más de 800 t de resina reciclada para producir 7.7 millones de impresoras.

Bundles

Esta empresa emergente de financiación colectiva con sede en Amsterdam, ofrece lavadoras conectadas a Internet a los clientes, que pagan por uso. Reúne a empresas de fabricación, monitoreo de energía, análisis de datos y relaciones con clientes para crear un ecosistema interdependiente con beneficios potenciales para cada participante.

- ❑ Usa un enchufe inteligente conectado a la lavadora que envía datos de uso a la nube y monitorea el uso, identifica patrones y predice la necesidad de servicio o reparación.
- ❑ Ayuda a sus clientes a lograr un mejor rendimiento de lavado al tiempo que reduce el uso de energía, agua y detergente.
- ❑ Con acceso a los datos de uso, los fabricantes tienen incentivos para usar más materiales reciclables en sus productos y aplicar los principios de re-manufactura para reducir el desperdicio.
- ❑ A medida que los clientes pagan por la ropa limpia, no por una lavadora, un electrodoméstico estandarizado con menos funciones distribuidas reduce directamente los inventarios, la logística y los costos de venta.
- ❑ Se reducen el servicio y la sustitución al garantizar un uso óptimo del aparato.

1.2.7. REFRIGERADOR DOMÉSTICO.

1.2.7.1. Origen.

El AEE refrigerador es uno de los electrodomésticos de la línea denominada blanca que permite el almacenamiento y conservación de los alimentos por periodos prolongados de tiempo, satisfaciendo así la necesidad de ingerir alimentos inocuos. A lo largo de la historia han sido de gran utilidad y en 1803 el estadounidense Thomas Moore inventó el primer armario-nevera que dio las bases al electrodoméstico

que hoy conocemos (Montesinos V., 2013). En el 2013, hubo cerca de mil millones de refrigeradores y congeladores domésticos en uso en el mundo (Marques A.C. et al., 2014). En Europa, se ha determinado un promedio de saturación de 106%, esto significa que algunos hogares tienen más de 1 equipo (Jara N., 2018). Tan sólo en México, en el 2013 el 80% de los hogares poseen al menos un refrigerador, lo cual suma más de 23 millones de refrigeradores domésticos en uso (INEGI, 2012), para el 2018 pasó a ser el 88%, es decir 28.9 millones lo que representa 125.7% más (INEGI, 2018).

1.2.7.2. Composición de un refrigerador.

Los principales componentes de un frigorífico son: el evaporador principal, fluido refrigerante, línea de descarga, condensador, placa fría o evaporador secundario, tubo capilar, compresor, repisas compartimentos, termostato, aislante, entre otros (figura 11). Aunado a lo anterior, estos dispositivos, que en su mayoría funcionan de acuerdo con el ciclo de compresión del refrigerante, se hallan entre los electrodomésticos que más cantidad de energía consumen, por lo que cualquier impacto en el consumo de energía, éste se multiplicará (Belman-Flores J.M et al., 2015).

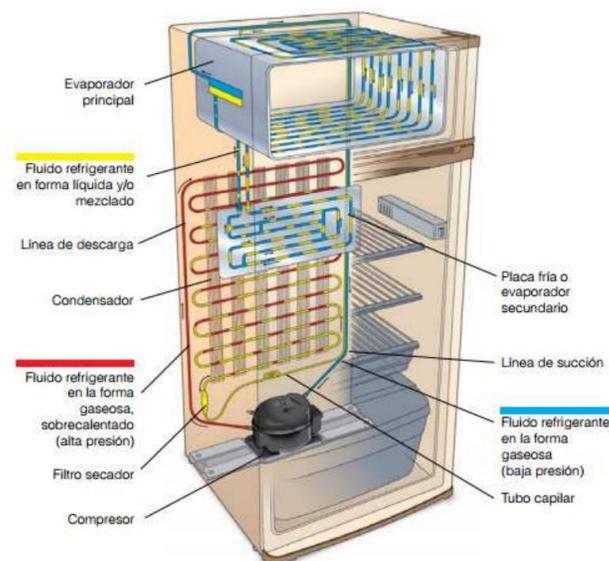


Figura 11. Componentes principales de un refrigerador.
(Fuente: Jara N., 2018)

La composición detallada de los materiales que tiene un refrigerador doméstico promedio es:

Componente	Peso (kg)	Porcentaje (%)	Reciclable/ Reusable	Ubicación Componente
Acero laminado en frío (chatarra mixta)	25.8	36.8	Si	Carcasas y rejillas
PUR (con agente espumante)	11.3	16.12	No	Aislamiento en paredes
Plástico molido mezclado	8.50	12.13	No	
Vidrio plano	7.40	10.56	Si	Estantes
Plástico HI-PS/PS	5.80	8.27	Si	Revestimiento interior
Plástico PP/HI-PP	3.30	4.71	Si	Bandejas
Plástico ABS	2.10	3.00	No	Bandejas
Plástico EPS	1.90	2.71	Si	Aislamiento en paredes
Plástico PVC	1.10	1.57	No	Carcasa superior
Aluminio	1.00	1.43	Si	Carcasa
Tarjeta electrónica	0.80	1.14	Si	Detrás de la cubierta
Cable de cobre mixto	0.60	0.86	Si	Cables
Cobre de segunda	0.50	0.71	Si	Compresor y carcasa
Total	70.10	100%		

Tabla 7. Composición detallada un refrigerador doméstico promedio.
(Fuente: Larraín P. et al., 2021)

1.2.7.3. Industrias de refrigeradores domésticos en el mundo y en México.

El mercado global de la línea blanca es de cerca de 200,000 millones de dólares, alrededor del 10% corresponde a Latam, en donde México ocupa un volumen de 4 mil millones, Colombia de mil millones y Ecuador de 400 millones de dólares. En el 2013, el principal exportador de electrodomésticos en el mundo fue China. México fue el principal exportador de América Latina y el sexto a nivel mundial (figura 12) (Jara N., 2018).

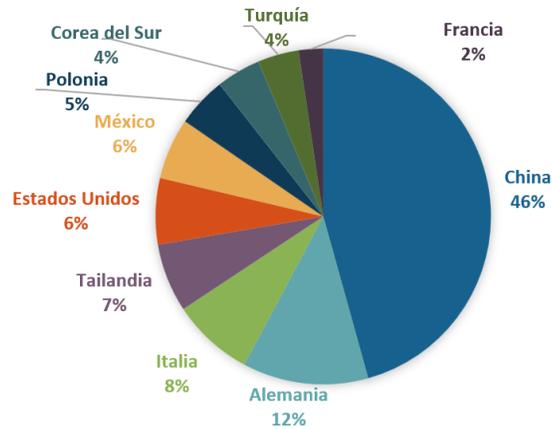


Figura 12. Principales países exportadores de electrodomésticos en el mundo en el 2013.
(Fuente: Modificado de Jara N., 2018)

De estos electrodomésticos, en el 2014 México fue el primer exportador de refrigeradores con congelador con puertas exteriores separadas a nivel Latam. (Secretaría de Economía, 2014)

Cinco compañías de refrigeradores abarcan los mayores porcentajes de participación en el mercado financiero en el mundo y en Latam, predominando en Latam la compañía Whirlpool, Electrolux en segundo lugar, y en tercer lugar Mabe (figura 13) (Jara N., 2018).

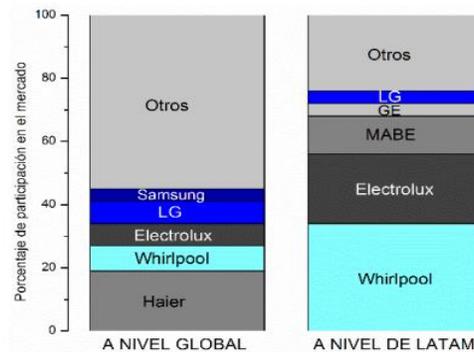


Figura 13. Compañías fabricantes de refrigeradores a nivel global y Latam en el 2013.
(Fuente: Jara N., 2018)

1.2.8. POLIURETANO (PUR).

1.2.8.1. Origen.

Las espumas de PUR fueron descubiertas por el investigador alemán Otto Bayer en 1937, pero no fue hasta los años 50 que el material comercializó en gran escala pasando a ser uno de los más empleados y versátiles actualmente. El nombre de PUR viene de la presencia de enlaces de uretano en la cadena principal. Puede ser de dos tipos, termoestables o termoplásticos, dependiendo de la cantidad relativa de

los grupos hidroxilo que contenga. La mayoría de los PUR son termoestables y estos pueden ser espumas flexibles o rígidas, siendo el rígido caracterizado por tener cadenas poliméricas entrecruzadas, formando una red tridimensional que no se funde, de altas densidades que comúnmente se obtiene cuando reacciona diisocianato con polioli (Garrido, María A., 2017; González M. y Rivada M., 2016).

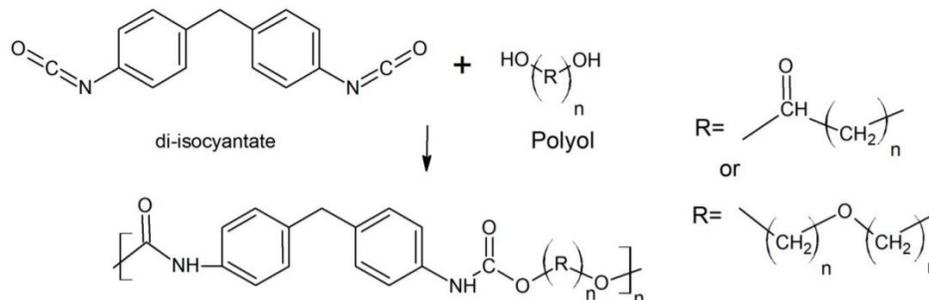


Figura 14. Ejemplo de reacción de síntesis de poliuretano.
(Fuente: Kemona A., et al., 2020)

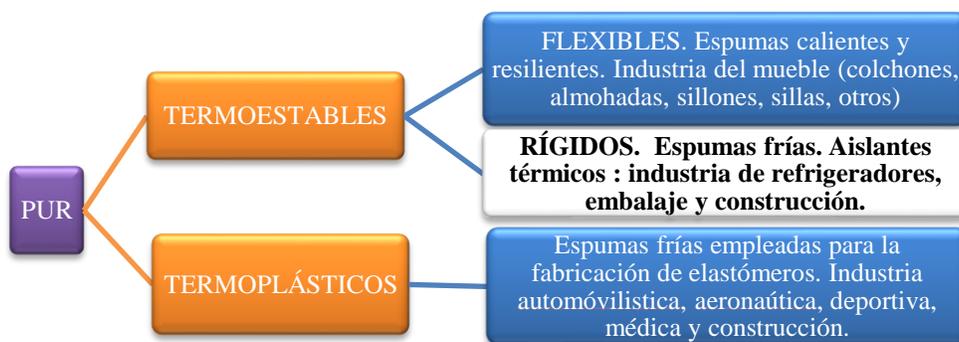


Figura 15. Tipos de PUR.
(Fuente: modificado de Garrido, María A., 2017)

1.2.8.2. Propiedades y usos.

Las principales propiedades de los PUR son las siguientes:

- Poseen un coeficiente de transmisión de calor muy bajo, mejor que el de los aislantes tradicionales, lo cual permite usar espesores mucho menores.
- Tienen una excelente adherencia a los materiales normalmente usados en la construcción sin necesidad de adhesivos.
- Tiene alta resistencia a la absorción de agua.
- Muy buena estabilidad dimensional entre rangos de temperatura desde 200°C a 100°C.

- Tienen muy buena resistencia al ataque de ácidos, álcalis, hidrocarburos, agua dulce y salada. No obstante, no se pueden encoger, al ponerlos en contacto con hidrocarburos clorados, acetonas o ácidos concentrados.
- Aislante acústico.
- Resistencia a la compresión mayor o igual a 200 kPa. (Garrido, María A., 2017)

Debido a estas variadas propiedades se emplea en una amplia gama de productos comerciales, desde neveras y congeladores, en los que se utiliza como aislante, hasta colchones, componentes de automóviles, suelas de calzado, muebles, aislantes para la construcción, recubrimientos de cables, suelos y paredes, sellantes, automóviles, electrónicos, empaque, impermeabilizantes, entre otros (figura 15) (González M. y Rivada M., 2016; Gómez-Rojo R., et al., 2019; IndustryARC, 2021).

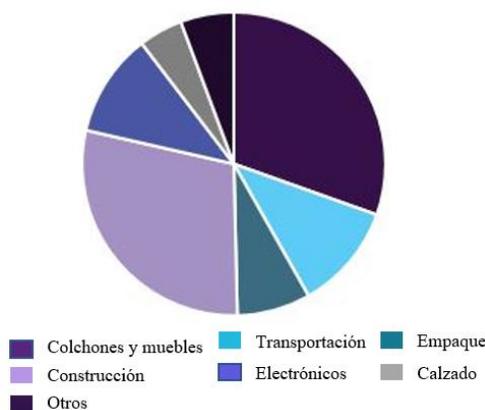


Figura 16. Mercado global de espuma del PUR por aplicación en el 2015.
(Fuente: IndustryARC, 2021)

En este contexto, la espuma rígida de PUR es el material aislante de refrigeradores y congeladores más extendido en todo el mundo ya que su estructura celular interna garantiza la estabilidad del producto a lo largo del tiempo y el mantenimiento conservándose el aislamiento térmico.

1.2.8.3. Impactos ambientales y a la salud por la disposición final de PUR rígido.

Los residuos de PUR constituyen un importante problema medioambiental debido a que el depósito en rellenos sanitarios o tiraderos es la opción más común y a su vez la más desaconsejable cuando se obtienen residuos de este material, y es que el PUR al ser un material termoestable, una vez moldeado no puede

volver a cambiar su forma, ya que no se ablanda cuando se calienta. En el 2017 en el mundo se generaron de PUR 15 Mt; en Europa, Medio Oriente y África se produjeron más de 6.47 Mt, la mayor parte de esta producción fue de Europa Occidental con 3.6 Mt. Por otro lado, en el 2003 los consumidores de Europa generaron 2.1 Mt de residuos de PUR, de los cuales 0.9 Mt se enviaron a vertederos, 0.7 Mt a incineración y 0.5 Mt a reciclaje; además, la cantidad de residuos de espuma de poliuretano generada durante el proceso de producción en el 2003 fue de 10,000 toneladas (Kemon A., et al., 2020; Datta J., et al., 2018) y en México se estima que en el 2017 se desecharon aproximadamente 660.7 t/día de PUR, es decir 241,157 t/año (SEMARNAT, 2020). Por su elevado volumen y baja biodegradabilidad no los hace los más adecuados para depositarlos en vertederos (Gómez-Rojo R., et al., 2019). Otra opción de disposición menos frecuente ha sido la incineración para la producción de energía o el reciclaje, dando un segundo uso al plástico, pero con los efectos a la salud y al medio ambiente por la degradación térmica que produce gases tóxicos, no la hace la mejor opción a elegir. (Jiao, L. et al., 2013; Stec A.A. y Hull T. R., 2011). Distintas alternativas del reciclaje del PUR no son consideradas tan viables debido a su dificultad técnica y el poco retorno de inversión (Yang W. et al., 2012).

Se debe de evitar la degradación térmica del PUR, ya que a partir de los 200°C se rompen sus enlaces y los agentes espumantes se liberan produciéndose la emisión de segmentos de isocianatos (principalmente) y polioles en forma de humo amarillento. Cuando la temperatura incrementa, los segmentos de polioles que quedan sin degradar comienzan a descomponerse en éteres y alcoholes alifáticos, y arriba de los 300-350°C el residuo final se descompone en volátiles como dióxido de carbono, vinil éteres, aminas primarias y secundarias (Jiao L. et al., 2013) contaminando el aire y suelo.

Con respecto a la salud, los isocianatos ingresan en el cuerpo humano por la ingestión, la piel, y la ruta de ingreso principal es la inhalación por los vapores y aerosoles procedentes de la degradación térmica de compuestos de PUR, los cuales son gases orgánicos irritantes no asfixiantes. (Stec A.A. y Hull T. R., 2011). Numerosos estudios han señalado el asma como resultado de la exposición ocupacional del isocianato puro y la degradación térmica de productos de PUR con isocianato a exposiciones crónicas, manifestándose casos ocasionalmente a exposiciones agudas elevadas (Rubio et al., 2019).

CAPÍTULO 2.

2.1. JUSTIFICACIÓN.

Es posible transitar a la EC ya que, de acuerdo con el World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), a nivel global se ha estimado que una reducción de tan solo un 1% en el consumo de recursos, podría suponer un ahorro de aproximadamente 840 Mt de metales, combustibles fósiles, minerales y biomasa anualmente, así como de 39,2 trillones de litros de agua. Esta reducción en el consumo de materias primas podría traducirse en un ahorro potencial de casi 80 billones de dólares para la economía global (WBCSD, 2018) y en una disminución más que significativa en la mitigación de los impactos ambientales ocasionados por la EL.

A nivel global aún falta avanzar en la implementación de la EC y en México no había sido promovida formalmente hasta el 2019, con esta investigación se busca impulsar este modelo.

Como ya se ha mencionado anteriormente, a nivel global sólo el 17.4% de RAEE generados se recicló a través de canales adecuados y el 82.6% fueron eliminados mediante incineración o por disposición en vertederos, lo que no implicó procesos de descontaminación ni de recuperación de materias primas, desperdiciando materiales valiosos que aún pueden ser empleados, que si se recuperaran podrían reducir la extracción de materiales vírgenes y por lo tanto también podrían reducir la huella ecológica nacional y mundial.

Dentro de la industria de AEE, se deben de romper los paradigmas lineales de producción y crecimiento actuales, mediante cambios inmediatos en modelo de negocio. La EC es una estrategia que puede contribuir para alcanzar un desarrollo sostenible que provee beneficios económicos, sociales y ambientales.

Con fundamento a lo anteriormente expuesto, el objetivo de esta investigación es identificar establecer estrategias para minimizar los impactos ambientales dentro una empresa mexicana ubicada en la zona del Bajío dedicada a la fabricación de refrigeradores de uso doméstico, a través de la promoción de los principios de la EC para evitar la generación de los residuos y reincorporarlos para mejorar la circularidad

de sus líneas de proceso. Obteniendo el diagnóstico de circularidad se pretende proponer alternativas de solución a la problemática que presenta la empresa, la cual dispone en el relleno sanitario, grandes cantidades espuma de PUR generado en la etapa de proceso de espumado, ocasionando contaminación en las diferentes esferas ambientales, debido a que el PUR tiene baja degradación en el ambiente por sus características de composición, sus materias primas provienen de la explotación de hidrocarburos y al exponerse a estas, causan efectos a la salud, y la disposición de PUR genera grandes volúmenes en los rellenos sanitarios.

2.2. OBJETIVO GENERAL.

- Analizar y evaluar el proceso de espumado que genera el residuo de PUR dentro de una empresa mexicana ubicada en El Bajío que fabrica refrigeradores de uso doméstico para identificar su circularidad y plantear alternativas con base en los principios de la EC.

2.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Hacer la búsqueda de los instrumentos metodológicos apropiados para realizar la evaluación de circularidad del proceso productivo con potencial para revalorizar sus residuos.
- Determinar la circularidad de un proceso dentro de una empresa mexicana ubicada en El Bajío que fabrica refrigeradores de uso doméstico mediante las metodologías de circularidad determinadas.
- Realizar el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de un proceso dentro de una empresa mexicana ubicada en El Bajío que fabrica refrigeradores de uso doméstico, utilizando la metodología de la norma ISO 14040 e ISO 14044, para obtener los impactos ambientales.
- Identificar las áreas de oportunidad del proceso que son susceptibles a mejorarse con base en los principios de la EC.
- Proponer alternativas circulares de acuerdo con los principios de la EC.

CAPÍTULO 3.

3.1. DISEÑO EXPERIMENTAL.

El presente trabajo, se desarrollará bajo el siguiente diseño experimental (figura 17).

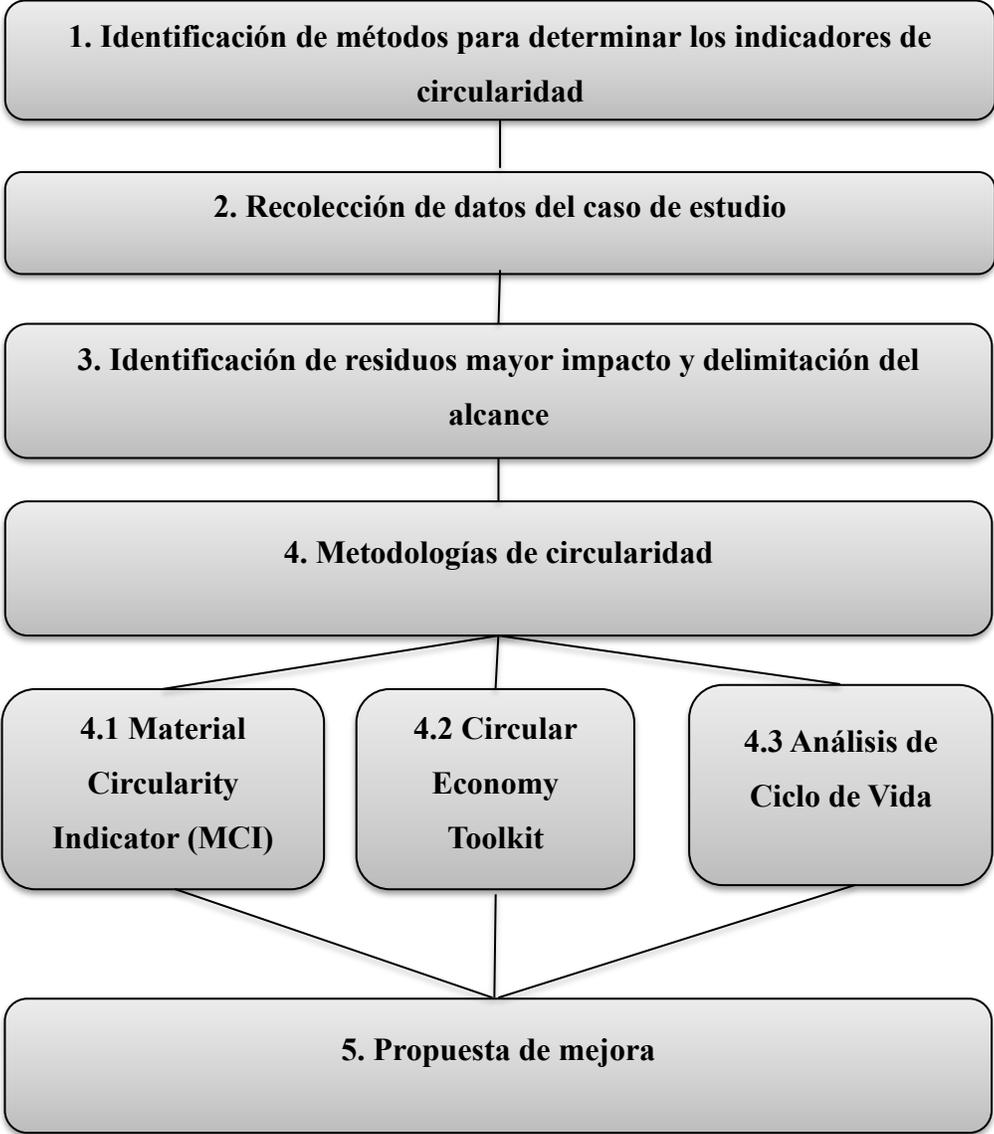


Figura 17. Diseño experimental para el diagnóstico de circularidad de un proceso. (Fuente: Elaboración propia)

3.2. ESTRATEGIA EXPERIMENTAL.

3.2.1. IDENTIFICACIÓN DE MÉTODOS PARA DETERMINAR LOS INDICADORES DE CIRCULARIDAD.

Se realizó la revisión tomando en cuenta los aspectos generales de cada herramienta, con el objetivo de utilizarlas como guía metodológica descrita en el apartado de Materiales y Métodos, tomando en cuenta los puntos principales de cada una.

Estos puntos incluyen: las definiciones utilizadas para determinar la circularidad, la metodología para diagnosticar la circularidad de los procesos, así como los requisitos generales para el desarrollo. Los puntos particulares por considerar son los inventarios de las materias primas con su porcentaje de procedencia de compuestos vírgenes, reciclados o reutilizados, inventario de residuos generados y destinados a reciclaje, reutilización o a vertederos, tiempo de vida del producto y el promedio de vida de este o similar producto en el mercado.

3.2.2. RECOLECCIÓN DE DATOS DEL CASO DE ESTUDIO.

Realización de visitas de campo y revisión documental para conocer el proceso productivo a detalle para identificar en cada una de las etapas del proceso horas y días laborados, descripción general de actividades, materiales consumidos y sus orígenes (virgen, reutilizado o reciclado), después de la manufactura los materiales destinados a reciclaje, reutilización, desecho o a vertederos, equipos empleados, sus características y horas trabajadas, consumo de agua y energía. Se realizarán entrevistas, balances de materias para obtener los datos directos y estimados de flujos de masa y energéticos para obtener los datos indirectos.

3.2.3. IDENTIFICACIÓN DE RESIDUOS DE MAYOR IMPACTO Y DELIMITACIÓN DEL ALCANCE.

Identificar las líneas de proceso o productos en las etapas para la fabricación de refrigeradores de uso doméstico que generen mayor cantidad y desperdicio de residuos.

Una vez limitadas las líneas de proceso o productos, se realizará la trazabilidad de los materiales y residuos, verificando flujos de entradas y salidas de forma documental a través de inventarios, recibos, manifiestos, indicadores de mermas, material reciclado, recuperado o reusado, así como en los recorridos durante las visitas de campo.

3.2.4. EJECUCIÓN DE METODOLOGÍAS DE CIRCULARIDAD.

Con los datos obtenidos para poder determinar la circularidad, se aplican las herramientas de circularidad definidas en el apartado Materiales y Métodos.

3.2.5. PROPUESTA DE MEJORA.

Resaltar los factores identificados que añaden circularidad en las líneas de proceso o productos delimitados y los factores que al ser lineales requieren de modificarse para aumentar su índice de circularidad. Entre las recomendaciones posibles, se encuentra el uso de materias primas recicladas o reutilizadas por completo o en porcentajes, sistema de recirculación de residuos en las líneas productivas o como materia prima para otra empresa y acciones para la minimización de los impactos ambientales identificados.

Exponer una propuesta que contenga recomendaciones de controles de administrativos o de ingeniería para la revalorización de los residuos seleccionados.

Difundir en dado caso de detectarse mejoras en el producto, la actividad de ecodiseño del producto para obtener mayor durabilidad, facilidad en la reparación, renovación y re-fabricación y reciclaje del producto.

Fomentar el marco de las 9'R (rechazar, reducir, reutilizar, reparar, restaurar, re-manufacturar, readaptar, reciclar y recuperar) conforme a los lineamientos del Ecodesign Working Plan 2016-2019 de la Comisión Europea. (Comisión Europea, 2016) y la Iniciativa StEP (StEP, 2015)

3.3. MATERIALES Y MÉTODOS.

El presente proyecto se llevará a cabo en una empresa mexicana ubicada en El Bajío que tiene una problemática en generación de desechos derivados de su proceso de fabricación de refrigeradores de uso doméstico, ya que, al ser una empresa grande con una alta producción de alrededor de 2 millones de piezas

anuales, genera una enorme cantidad de residuos que destina al relleno sanitario, como lo son las puertas y gabinetes con PUR rígido. A pesar de que al interior la empresa tiene un proveedor de residuos encargado de gestionarlos, el porcentaje del PUR reciclado es muy bajo, requiriéndose desarrollar alguna estrategia para generar valor a este residuo.

Para el análisis del proceso se contempla seguir la Guía para Diagnosticar la Circularidad.

3.3.1. GUÍA PARA DIAGNOSTICAR LA CIRCULARIDAD.

Al ser la EC una propuesta reciente, aún no se cuenta con una ruta definida y accesible para determinar la circularidad en una empresa (s), proceso (s) o productos (s). Sin embargo, instituciones privadas como la Fundación Ellen MacArthur (EMF por sus siglas en inglés) instituida en el año 2010, Fundación Cajanavarra y la compañía de diseño global IDEO desarrollaron herramientas para poder obtener la medición de la circularidad con base en lo siguiente:

- Material Circularity Indicator (MCI) de la EMF, el cual consta de ser una hoja de Excel donde se ingresan los datos de la empresa para poder obtener la medición de la circularidad del producto (s) (EMF1, 2015; EMF2, 2015; EMF3, 2015).
- Circular Economy Toolkit (CET) del Instituto de Manufactura de la Universidad de Cambridge, consta de un cuestionario que contempla la apreciación alta, media o baja de la circularidad de un producto (Evans J. y Bocken N, 2013).
- Análisis de Circularidad de la Fundación Cajanavarra, la cual consiste en 4 fases para el desarrollo del autodiagnóstico de circularidad de una empresa. (CAJANAVARRA, 2017; SUSTAINN, 2016), el cual incluye la metodología estandarizada de ACV.

3.3.2. MATERIAL CIRCULARITY INDICATOR (MCI)

Entre los criterios a considerar están la dimensión de las etapas identificadas anteriormente, nivel de madurez de los sistemas de gestión de materiales y residuos, porcentaje de material no renovable y virgen usado, empleo o no de otros recursos (agua y energía) y disponibilidad de la información.

El indicador de circularidad del material, en inglés Material Circularity Indicator (MCI), asigna un puntaje entre 0 y 1 a un producto o compañía que evalúa qué tan restaurativo o lineal es el flujo de los materiales

para el producto (s) de la compañía y qué tan largo e intenso se usa el producto (s) de la compañía a producto (s) similares promedio de la industria (EMF2, 2015).

El Indicador de circularidad de material (MCI) desarrollado en este documento, por lo tanto, se centra en la restauración de los flujos de material a nivel de producto y de empresa y se basa en los siguientes cuatro principios:

El MCI se construye esencialmente a partir de una combinación de tres características del producto: la masa de materia prima virgen utilizada en la fabricación (V), la masa de desechos irre recuperables que se atribuye al producto (W) y un factor de utilidad (X) que explica la longitud e intensidad del uso del producto.

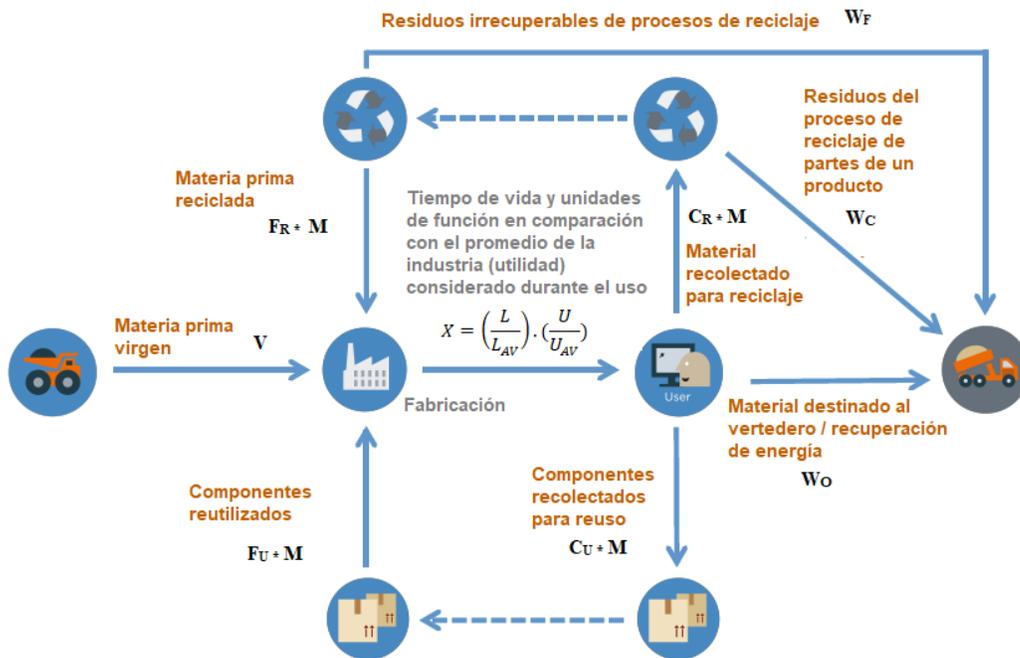


Figura 18. Representación esquemática de flujos de materiales.
(Fuente: EMF2, 2015)

Símbolo	Definición
M	Masa del producto terminado.
FR	Fracción de masa de materia prima de un producto de fuentes recicladas
FU	Fracción de masa de materia prima de un producto de fuentes reutilizadas
V	Masa de materia prima virgen usada en el producto
CR	Fracción de masa de un producto recolectado para ir dentro del proceso de reciclaje
CU	Fracción de masa de un producto dentro de un componente de reuso
EC	Eficiencia del proceso de reciclaje para la porción de un producto recolectado para reciclaje
EF	Eficiencia del proceso de reciclaje usado para producir materia prima reciclada para un producto
W	Masa de residuos irrecuperables asociados con el producto
Wo	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 ya no son recuperables
Wc	Masa de residuos irrecuperables generados en el proceso de reciclaje de partes de un producto
Wf	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 8. Nomenclatura para el cálculo del Indicador de Circularidad del Material (MCI).
(Fuente: Modificado de: EMF2, 2015)

$$\begin{aligned}
 V &= M(1 - F_R - F_U) \\
 W_0 &= M(1 - C_R - C_U) \\
 W_C &= M(1 - E_C)C_R \\
 W_F &= M \frac{(1 - E_F)F_R}{E_F} \\
 W &= W_0 + \frac{W_F + W_C}{2} \\
 LFI &= \frac{V + W}{2M} \\
 X &= \left(\frac{L}{L_{AV}} \right) \cdot \left(\frac{U}{U_{AV}} \right) \\
 F(X) &= \frac{0.9}{X} \\
 MCI^*p &= (1 - LFI) * F(X)
 \end{aligned}$$

Figura 19. Ecuaciones para determinar el MCI.
(Fuente: EMF2, 2015)

3.3.2.1. Cálculo de materia prima virgen

Considere un producto en el que F_R representa la fracción de materia prima derivada de fuentes recicladas y F_U representa la fracción de fuentes reutilizadas. La fracción de materia prima de las fuentes vírgenes son entonces $(1 - F_R - F_U)$ y la masa de material virgen viene dada por:

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

Donde M es la masa del producto terminado.

3.3.2.2. Cálculo de residuos irrecuperables

Si C_R representa la fracción de la masa del producto que se recolecta para reciclar al final de su fase de uso y C_U la fracción de la masa del producto que entra en la reutilización de componentes, la cantidad de desechos que va al vertedero o la recuperación de energía es:

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

Si E_C es la eficiencia del proceso de reciclaje utilizado para reciclar el producto al final de su fase de uso, la cantidad de residuos generados en el proceso de reciclaje viene dada por:

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

También se generarán desechos para producir cualquier contenido reciclado utilizado como materia prima. Esto es dado por:

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

donde E_F es la eficiencia del proceso de reciclaje utilizado para producir la materia prima reciclada.

3.3.2.3. Cálculo de la cantidad total de residuos irre recuperables

Este enfoque asigna el 50% de W_F al producto (s) de donde provino la materia prima reciclada, y 50% de W_C al producto que utilizará el material que se recolecta y recicla.

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

donde W_0 Masa de residuos irre recuperables a través del material de un producto.

3.3.2.4. Cálculo del Índice de Flujo Lineal

El índice de flujo lineal, en inglés Linear Flow Index (LFI) mide la proporción de material que fluye de manera lineal, es decir, procedente de materiales vírgenes que terminan como desecho irre recuperable. Se calcula dividiendo la cantidad de material que fluye de manera lineal por la suma de las cantidades de material que fluye de manera lineal y restauradora:

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

El **LFI** puede tomar un valor entre 1 y 0, donde 1 indica un flujo completamente lineal y 0 un flujo completamente restaurador.

3.3.2.5. Cálculo de la Utilidad

La utilidad X tiene dos componentes: uno que representa la duración de la fase de uso del producto (vida útil) y otro para la intensidad de uso (unidades funcionales)

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

donde L es el promedio de vida actual de un producto, L es Promedio de vida actual de un producto, L_{AV} es el Promedio de vida actual de un producto de la industria del mismo tipo, U es el promedio del

número actual de unidades funcionales logradas durante la fase de uso de un producto U_{AV} es el promedio actual del número de unidades funcionales logradas durante la fase de uso de un producto de la industria del mismo tipo.

3.3.2.6. Cálculo del Factor de Utilidad

El Factor de utilidad $F(X)$ se elige de tal manera que las mejoras en la utilidad de un producto (por ejemplo, al usarlo por más tiempo) tengan el mismo impacto en su MCI como al reuso de componentes que conducen a la misma cantidad de reducción del uso de material virgen y residuos irrecuperables en un período de tiempo dado.

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

Factor de utilidad construido como una función de la utilidad X de un producto.

3.3.2.7. Cálculo del Indicador de Circularidad de un Producto

El indicador de circularidad de un producto MCI_p , se puede obtener considerando el índice de flujo lineal del producto LFI y un factor $F(X)$. La ecuación utilizada para calcular el ICM de un producto es:

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

Sin embargo, en la obtención del LFI , su valor puede ser negativo para productos con flujos principalmente lineales ($LFI \approx 1$) y una utilidad baja que un producto promedio ($X < 1$). Para evitar esto, el indicador de circularidad material se calcularía como:

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

3.3.2.8. Ejemplos Ilustrativos

EMF dentro de la guía *Circularity Indicators: An Approach to Measuring Circularity. Non-Technical Case Studies* (EMF3, 2015) ejemplifica el siguiente ejemplo:

Una compañía produce tabletas electrónicas portátiles, la cual está considerando diseños más circulares. La típica tableta electrónica portátil que pesa 0,68 kg utiliza materiales 100% vírgenes y, en promedio, se

desecha en el vertedero después de 2 años de uso. La tableta tiene una carcasa de polímero y un vidrio frontal sensible al tacto que cubre la pantalla de cristal líquido. Después de una evaluación cuidadosa de la tableta actual, se encontró:

- La principal contribución a la huella de carbono y al riesgo de la cadena de suministro provienen de los componentes electrónicos.
- Los metales preciosos y de tierras raras utilizados en la placa de circuito impreso y otros componentes electrónicos tienen la mayor variación de precio de las materias primas.
- Las concentraciones más altas de sustancias reguladas por el reglamento de Registro, Evaluación, Autorización y Restricción de Sustancias Químicas (REACH por sus siglas en inglés) se utilizan en los plásticos utilizados para la caja de la tableta y el aislamiento del cable. Además, debido a la presencia de un retardante de llama, la caja no se puede reciclar después de su uso.

Los componentes electrónicos no pueden cambiarse fácilmente, por lo que se busca mejorar la carcasa y la cubierta de vidrio frontal. Después de sesiones con expertos en materiales y su equipo de diseño, se decide sustituir el material de la carcasa por una aleación de aluminio y modificar el diseño de la pantalla para permitir una reutilización más fácil de la cubierta de vidrio frontal. Los cálculos muestran que esta solución mejora la circularidad del producto. También reduce la presencia de sustancias enumeradas en el reglamento REACH porque el nuevo material evita el uso del retardante de llama que está presente en la carcasa de plástico que cae en la lista de sustancias candidatas REACH de muy alta preocupación.

Las características básicas en términos de materiales, origen y destino del diseño antiguo y nuevo son:

	<i>Tableta de referencia</i>	<i>Tableta rediseñada</i>
Lista de materiales	Carcasa de plástico	Carcasa de aluminio
	Cubierta de vidrio frontal	Cubierta de vidrio frontal
	Componentes electrónicos	Componentes electrónicos
Masa	0.68 kg	0.74 kg
Materias primas	100% materiales vírgenes	58.3% materiales vírgenes
	0% materiales reciclados	0% materiales reciclados
	0% de componentes reutilizados	41.7% de componentes reutilizados

Destino después de usar	100% a vertedero 0% a reciclaje 0% para reutilizar	58.3% a vertedero 0% a reciclaje 41.7% para reutilizar
-------------------------	--	--

En términos de la notación usada en la metodología esto significa:

Tableta de referencia

Tableta rediseñada

Fracción de masa de la materia prima del producto de fuentes recicladas:

$$F_{R()} = 0$$

$$F_{R()} = 0$$

Como no existe fracción de la materia prima del producto de fuentes reusadas

$$F_U = 0$$

$$F_U = 0.417$$

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

$$V = 0.68 (1 - 0 - 0) = 0.68$$

$$V = 0.74 (1 - 0 - 0.417) = 0.431$$

Fracción de masa del producto recolectado para ir dentro del proceso de reciclaje:

$$C_R = 0$$

$$C_R = 0$$

Fracción de masa del producto dentro de un componente de reúso:

$$C_U = 0$$

$$C_U = 0.417$$

Eficiencia de la tasa de reciclaje:

$$E_C = 0$$

$$E_C = 0$$

La cantidad de residuos irrecuperables a través del material de un producto que va al basurero:

$$W_o = 0.68(1 - 0) = 0.68$$

$$W_o = 0.74(1 - 0.417) = 0.431$$

La cantidad de residuos generados en el proceso de reciclaje está dada por:

$$W_c = 0.68(1 - 0) 0 = 0$$

$$W_c = 0.71(1 - 0) 0 = 0$$

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

$$W_f = 0$$

$$W_f = 0$$

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

$$W = 0.68 + \frac{0 + 0}{2} = 0.68$$

$$W = 0.431 + \frac{0 + 0}{2} = 0.431$$

Índice de flujo lineal:

$$LFI = \frac{0.68 + 0.68}{1.36 + \frac{0 - 0}{2}} = 1$$

$$LFI = \frac{0.431 + 0.431}{1.48 + \frac{0 - 0}{2}} = 0.583$$

Un LFI igual a 1 indica que es un flujo completamente lineal, es decir, proceden de materiales vírgenes y termina como un residuo irrecuperable, la tableta rediseñada se acerca a ser más regenerativa.

En la utilidad no hay medición adecuada de unidades funcionales para los dispositivos electrónicos, solamente el tiempo de vida, el cual es tomado en cuenta:

$$X = \frac{2}{2} = 1$$

$$X = \frac{2}{2} = 1$$

Factor de Utilidad:

$$F(X) = \frac{0.9}{1} = 0.9$$

$$F(X) = \frac{0.9}{1} = 0.9$$

Finalmente, se calcula el indicador de circularidad de los productos:

$$MCI^*p = 1 - (1 * 0.9) = 0.1$$

$$MCI^*p = 1 - (0.583 * 0.9) = 0.47$$

El cálculo del indicador de circularidad del material de la tableta rediseñada da un valor de 0.47 en comparación con 0.10 para la versión de referencia, lo que significa que las acciones hacia un nuevo ecodiseño le brindan mayor circularidad al nuevo producto. A continuación, se puede encontrar un resumen de esta comparación entre los dos diseños para el indicador de circularidad material y algunos de los indicadores complementarios de riesgo e impacto examinados para los dos diseños:

	<i>Tableta de referencia</i>	<i>Tableta rediseñada</i>
MCI	0.10	0.47
Huella de carbono (CO ₂ eq)	20 kg	19.6 kg
REACH Art. 13 Obligaciones	Sustancia de mayor riesgo 1.3% en peso	Sustancia de mayor riesgo 0.53% en peso
Variación promedio anual de precios en los últimos 5 años	± 30% del precio promedio	± 30% del precio promedio
Riesgo de suministro de material - materiales en conflicto	22 partes que contienen elementos con alto riesgo	22 partes que contienen elementos con alto riesgo

El nuevo diseño ofrece una menor proporción de sustancias de alto riesgo, así como una disminución marginal de su huella de carbono. Aunque el aluminio utilizado para el estuche en el nuevo diseño tiene una mayor huella de carbono en comparación con el plástico, esto se compensa en exceso por la reutilización del estuche que disminuye la cantidad de material virgen necesario.

3.3.3. ANÁLISIS DE CIRCULARIDAD.

De acuerdo con la Fundación Cajanavarrá para determinar la circularidad de una empresa se debe emplear la metodología Análisis de Circularidad (en inglés Circularity Assessment) que consiste en 4 fases para el desarrollo del autodiagnóstico (CAJANAVARRA, 2017; SUSTAINN, 2016):

- Fase 1. Análisis de Flujos de Materiales, Recursos y Residuos.
- Fase 2. Análisis del Costo del Ciclo de Vida
- Fase 3. Definición de Indicadores de Circularidad - Sostenibilidad
- Fase 4. Identificación de Oportunidades de Circularidad



Figura 20. Fases del Diagnóstico de Circularidad.
(Fuente: CAJANAVARRA, 2017)

3.3.3.1. Fase 1. Análisis de Flujos de Materiales, Recursos y Residuos.

Análisis de las diferentes operaciones a lo largo del ciclo de vida (fabricación, transporte, operación y mantenimiento, desmantelamiento) para construir el mapa de los flujos de materiales, recursos (agua, energía, otros) y residuos.

1. Materias Primas y Materias Auxiliares: Analizar y cuantificar las materias primas y auxiliares que se consumen en cada operación del ciclo de vida.
2. Recursos (energía, agua, otros): Analizar y cuantificar el consumo de energía (eléctrica, gas, etc.) y agua que se consume en cada operación del ciclo de vida.
3. Residuos: Analizar y cuantificar los diferentes tipos de residuos que se generan en cada operación del ciclo de vida, tales como Residuos Sólidos Urbanos (RSU), RME y RPE.
4. Vertidos: Analizar y cuantificar los vertidos que se generan en cada operación del ciclo de vida.
5. Emisiones de ruido: Analizar y cuantificar las emisiones (confinadas, difusas) y el ruido que se generan en cada operación del ciclo de vida.

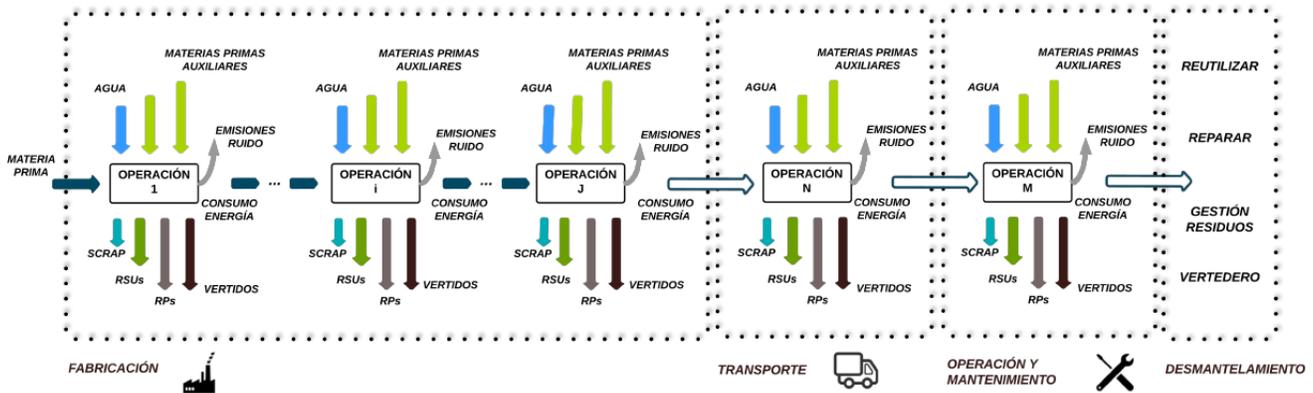


Figura 21. Mapa de flujos de materiales, recursos y residuos.
(Fuente: CAJANAVARRA, 2017)

3.3.3.2. Fase 2. Análisis del costo del ciclo de vida.

Se describen los pasos para construir el modelo del costo del ciclo de vida del producto (costo acumulado de un producto en su ciclo de vida), analizando todas las fases de su ciclo de vida: concepción, diseño y desarrollo, fabricación, transporte e instalación, operación, mantenimiento y desmantelamiento. A continuación, se describen las partidas del costo a desarrollar:

CONCEPTO, DISEÑO Y DESARROLLO	LISTA DE MATERIALES	FABRICACIÓN	TRANSPORTE	INSTALACIÓN	OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	DESMANTELAMIENTO
<ul style="list-style-type: none"> Costos de la concepción, especificación y definición del producto, así como del proyecto de diseño, desarrollo y validación del producto y proceso. 	<ul style="list-style-type: none"> Costos de compra de materiales, componentes y piezas que componen el producto. 	<ul style="list-style-type: none"> Costos de los procesos de fabricación, incluyendo amortización de equipos y maquinaria, utensilios y personal 	<ul style="list-style-type: none"> Costos de transporte puesto en marcha del producto al destino final 	<ul style="list-style-type: none"> Costos de instalación y puesta en marcha. 	<ul style="list-style-type: none"> Costos durante la operación y mantenimiento (energía, control de calidad, mantenimiento preventivo, correctivo, predictivo) 	<ul style="list-style-type: none"> Costos del desmantelamiento o del producto (desinstalación, transporte, reciclaje, disposición, etc.)

Figura 22. Estructura de costos según las fases del Ciclo de Vida del Producto.
(Fuente: CAJANAVARRA, 2017)

3.3.3.3. Fase 3. Definición de Indicadores de Circularidad – Sostenibilidad.

Con la información obtenida en el mapa de flujos de materiales, recursos y residuos, y en el análisis del costo del ciclo de vida del producto, se definen indicadores en las siguientes áreas, para medir el estado actual de la empresa respecto a sostenibilidad e implementación de la EC:

1. Económicos. Indicadores relativos a los costos ambientales (incluye costos de gestión de residuos), la volatilidad del costo de las materias primas principales y el impacto de ambos en el costo del ciclo de vida.
2. Eficiencia en el uso de materiales y recursos. Indicadores relativos a la eficiencia en el uso de materiales y recursos (energía, agua), así como el uso de energías renovables:
 - Huella hídrica
 - % reutilización de agua
 - Consumo de energía (kWh)
 - % consumo de energías renovables
 - % embalajes retornables
 - Toneladas de plástico de un solo uso
 - % de materiales reciclos (materiales que provienen de ciclos de reparación, renovación y reciclaje, ya sea interna o externamente y que no son extraídos de la naturaleza de fuentes no renovables).
3. Impacto ambiental. Indicadores relativos al impacto ambiental de la empresa a lo largo del ciclo de vida completo de los residuos, vertidos y emisiones:
 - ACV. Con base en las NORMAS ISO 14040:2006 Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida e ISO 14044:2006 Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Requisitos y directrices.
 - Huella de carbono
 - % emisiones compensadas
 - Carga de contaminantes vertidos, residuos en toneladas generados por características, reciclados y con destino final hacia el vertedero.

Los indicadores se deberán adaptar al sector y el alcance de la actividad de la empresa, las particularidades del proceso de fabricación y los materiales y recursos utilizados a lo largo del ciclo de vida.

3.3.3.4. Fase 4. Identificación de Oportunidades de Circularidad.

Se representan los pasos que la empresa debe seguir para la identificación de oportunidades de mejora de competitividad y nuevos modelos de negocio hacia la sostenibilidad y EC teniendo en cuenta el ciclo de vida completo del producto:

1. Análisis Tendencias Legislativas.
2. Análisis Tendencias Sostenibilidad y EC.
3. Estrategia y Modelo de Negocio.
4. Ecodiseño.
5. Suministros Circulares.
6. Procesos Ecoeficientes.
7. Energía y Agua.
8. Residuos, Vertidos y Emisiones.

A continuación, se describen estos 8 pasos.

1. Análisis Tendencias Legislativas. Analizar 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.
2. Análisis Tendencias Sostenibilidad y EC. Analizar las tendencias en sostenibilidad y EC, especialmente en aquellas materias primas, recursos y procesos que tengan un impacto mayor en el coste del Ciclo de Vida del Producto.
3. Estrategia y Modelo de Negocio. Incorporar líneas estratégicas de sostenibilidad y eco-innovación en los planes estratégicos de la empresa, para el desarrollo de modelos de negocio circulares y la mejora de los indicadores de sostenibilidad y EC definidos.
4. 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-manufactura
 - Diseño para reciclaje
5. Suministros Circulares. Investigar alternativas a las materias primas con materiales circulares:
 - Renovables
 - Reciclables
 - Biodegradables
 - Con contenido reciclado

6. Procesos Eco-eficientes. Investigar procesos que reduzcan el consumo de energía, agua y materiales y reduzcan los costes de proceso:
 - Tecnologías eco-eficientes y mejores técnicas disponibles en el sector.
 - Mantenimiento predictivo de instalaciones y equipos.
 - Maquina / herramienta como un servicio.
7. Energía y Agua. Investigar oportunidades para:
 - Mejorar la eficiencia energética
 - Desarrollo de instalaciones Net-Energy
 - Recirculación de agua
 - Recuperación y reaprovechamiento de energía de procesos
8. Residuos, Vertidos y Emisiones.
 - Analizar desde el diseño de producto y proceso las opciones para eliminar, reducir, valorizar (interna o externamente) o eliminar residuos, vertidos y emisiones, para optimizar los costes ambientales.

3.3.4. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV)

Los primeros ACV no fueron mostrados al público y se enfocaron en la demanda de energía en los sistemas productivos. El primer estudio fue hecho por la compañía Coca-Cola en el año 1969 se denominó Análisis de Perfil Ambiental y de Recursos (en inglés Resource and Environmental Profile Analysis), que fue desarrollado por el Midwest Research Institute y dirigido por Harry Teasley ejecutivo del departamento de empaque en la compañía, el cual catalogó diversas consecuencias ambientales de los empaques de las bebidas gaseosas de la compañía (Elmore B. J.,2016). Algunos argumentan que la razón más destacada para el nacimiento y el crecimiento del ACV en la década de 1970 fue la crisis de petróleo de esa época y el crecimiento de la población en ese momento. Más estudios se crearon durante los años 70s, donde grupos como Franklin Associates Ltd., junto al Midwest Research Institute realizaron más de 60 análisis usando métodos de balance de entradas/ salidas y cálculos de energía.

En la actualidad existen más estudios de ACV accesibles realizados con base en la International Standard Organization (ISO), no obstante, algunos autores consideran que la técnica aún está en una etapa temprana de desarrollo y que además requiere integrar el enfoque económico y social para orientarlo al desarrollo sostenible (Klöpffer, W., 2005). Varios ACV realizados sólo practican la fase de inventario y son

enfocados al sector de envases, seguidos de la industria química, plástico, materiales de construcción, sistemas energéticos, entre otros (Colwill & Rahimifard, 2012).

El ACV permite identificar, cuantificar y caracterizar los diferentes impactos ambientales potenciales asociados a cada una de las etapas del ciclo de vida del sistema de un proceso o servicio (esto es, de la cuna a la tumba). Obtener los impactos ambientales que genera un sistema de un proceso o servicio, desde las materias primas hasta su fin de vida, permite tener presente el conocimiento de los efectos que se ocasiona en cada etapa, y con los resultados derivados de la evaluación brinda a la industria, servicio o producto valorado, un diagnóstico que debe detonar en diversos mecanismos de reacción para la mitigación y control de los impactos ambientales resultantes. (ISO1, 2016; ISO2, 2016)

De acuerdo con la norma internacional ISO 14044:2006, el ACV considera cuatro etapas:

- Definición de objetivos y alcance.
- Análisis del Inventario de Ciclo de Vida (ICV).
- Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV).
- Interpretación.

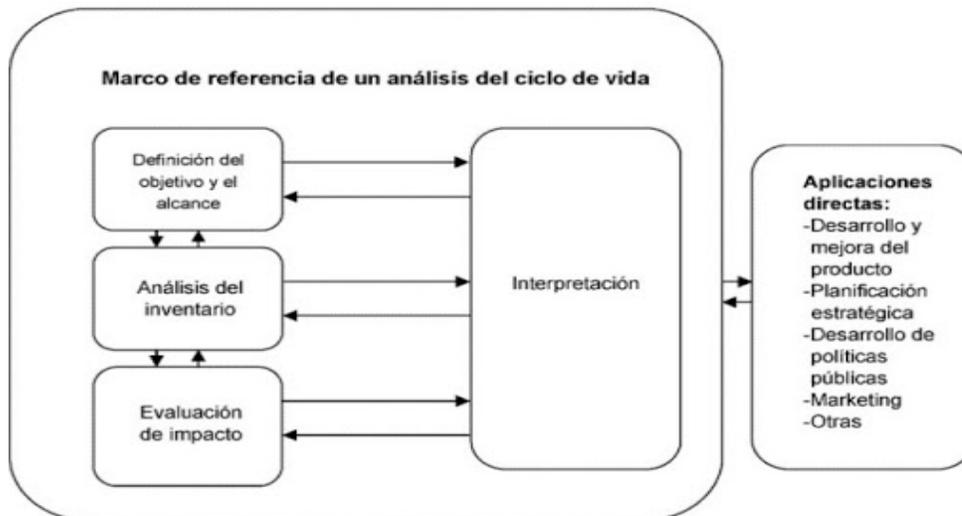


Figura 23. Etapas de un ACV.
(Fuente: ISO2, 2016)

3.3.4.1. Definición de objetivos y alcance.

Al definir el objetivo, se deben indicar los siguientes elementos:

- La aplicación destinada o propósito del estudio.

- La razón para llevar a cabo el estudio.
- La audiencia prevista, es decir, a quién se le pretende comunicar los resultados del estudio.
- Si los resultados están destinados a ser utilizados en afirmaciones comparativas o destinados a ser revelados al público.

Al definir el alcance, se deben considerar y describir los siguientes elementos:

- El sistema del producto a estudiar.
- Las funciones del sistema del producto o, en el caso de estudios comparativos, los sistemas.
- La unidad funcional. Debe ser consistente con el objetivo y el alcance del estudio, claramente definida y medible. Uno de los propósitos principales de una unidad funcional es proporcionar una referencia a la cual se normalizan los datos de entrada y salida.
- El límite del sistema. Se determina qué procesos unitarios se incluirán dentro del ACV de acuerdo con el objetivo del estudio. Se deben identificar y explicar los criterios utilizados para establecer el límite del sistema y la decisión de omitir las etapas del ciclo de vida, los procesos, las entradas o las salidas, explicando las razones e implicaciones de la omisión;
- Los procedimientos de asignación;
- La metodología del EICV y tipos de impactos. Determinar qué categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos de caracterización se incluyen en el ACV;
- La interpretación a ser utilizada;
- Los requerimientos de datos;
- Los supuestos;
- Las opciones de valor y elementos opcionales;
- Las imitaciones;
- Los requisitos de calidad de datos;
- El tipo de revisión crítica, si la hay;
- El tipo y formato del informe requerido para el estudio.

En algunos casos, el objetivo y el alcance del estudio pueden modificarse debido a las limitaciones imprevistas o como resultado de la información adicional. Dichas modificaciones, junto con su justificación, deben documentarse.

3.3.4.2. Análisis del Inventario del Ciclo de Vida (ICV)

Fase del ACV que implica la recopilación y cuantificación de las entradas y salidas de un sistema de producto durante su ciclo de vida.

- Recopilación de datos. Para cada proceso unitario dentro de los límites del sistema (entradas de energía, entradas de materia prima, entradas auxiliares, otras entradas físicas, productos, coproductos y residuos, emisiones al aire, descargas al agua y al suelo, y otros aspectos ambientales);
- Dibujar los diagramas de flujo de proceso;
- Describir los procesos;
- Cálculo de datos;
- Validación de los datos recopilados. Verificar la validez de los datos durante el proceso de recopilación de datos para confirmar y proporcionar (por ejemplo: balances de masa, balances de energía y / o comparativos);
- La relación de los datos con los procesos unitarios, y la relación de datos con el flujo de referencia de la unidad funcional;
- Refinar los límites del sistema;
- Asignación de flujos y liberaciones. Identificación de procesos con linealidad de entradas y salidas de materias primas o procesos que producen más de un producto y reciclan productos intermedios o productos desechados como materias primas.

3.3.4.3. Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV).

Es la fase del ACV dirigida a conocer y evaluar la magnitud y cuán significativos son los impactos ambientales potenciales de un sistema del producto a lo largo de todo el ciclo de vida del producto. Incluye los siguientes elementos:

- Selección de categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos de caracterización;
- Asignación de resultados del ICV a las categorías de impacto seleccionadas (clasificación). Se asignan los datos procedentes del inventario a cada categoría de impacto según el efecto ambiental esperado;
- Cálculo de los resultados del indicador de categoría (caracterización). Modelización, mediante los factores de caracterización, de los datos del inventario para cada una de las categorías de impacto.



Figura 24. Entradas y salidas en el ACV.
(Fuente: ISO2, 2016)

Categorías de impacto

Algunas de las categorías de impacto que considera la EICV son: (Humbert S. et al., 2012):

La categoría de impacto CALENTAMIENTO GLOBAL considera la cantidad de radiación absorbida por los gases de efecto invernadero en la atmósfera que provoca el calentamiento de la Tierra por el aumento promedio de la temperatura de la atmósfera cerca de la superficie de la Tierra y en la troposfera. El calentamiento es causado por los gases de efecto invernadero que son principalmente el vapor de agua y el dióxido de carbono y otros gases como metano, óxido de nitrógeno, y clorofluorocarbonos. El indicador se expresa como indicador de cambio climático y su unidad de medida es kilogramos de CO₂.

La categoría de impacto ACIDIFICACIÓN es la concentración creciente de iones de hidrógeno (H⁺) dentro de un entorno local. Esto puede ser el resultado de la adición de ácidos como por ejemplo ácido nítrico y ácido sulfúrico, al medio ambiente, o por la adición de otras sustancias por ejemplo amoníaco, que aumentan la acidez del medio ambiente debido a diversas reacciones químicas y/o actividad biológica, o por circunstancias naturales como el cambio en las concentraciones del suelo debido al crecimiento de especies de plantas locales. Las sustancias acidificantes son a menudo emisiones al aire, que pueden viajar cientos de millas antes de la deposición húmeda como lluvia ácida, niebla o nieve o deposición seca como polvo o partículas de humo en el suelo o el agua. El dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno de la combustión de combustibles fósiles han sido los mayores contribuyentes a la lluvia ácida.

Las sustancias que causan acidificación pueden dañar los materiales de construcción, las pinturas y otras estructuras construidas por humanos, lagos, arroyos, ríos y diversas plantas y animales. La sensibilidad de varios ambientes puede depender de una serie de factores que incluyen: la capacidad de amortiguación local, las especies de plantas y animales locales y la acidez existente en el ambiente.

La categoría de impacto AGOTAMIENTO DE LA CAPA DE OZONO considera la disminución de la capa de ozono provocado por el incremento de la cantidad de radiación ultravioleta que llega a la tierra. La capa de ozono está presente en la estratosfera y actúa como filtro absorbiendo la radiación ultravioleta. La mayoría de los cloruros y bromuros, procedentes de compuestos fluoro carbonados, clorofluorocarbonos y otras fuentes reaccionan en presencia de las nubes estratosféricas polares, emitiendo bromuros y cloruros activos que bajo la acción catalizadora de los rayos ultravioleta provocan la descomposición del ozono. Este se expresa como indicador de agotamiento de la capa de ozono y su unidad de medida es kilogramos de clorofluorocarbonos.

Categoría de impacto LLUVIA ÁCIDA. La principal fuente de acidez natural es el gas de dióxido de carbono el cual se disuelve dentro de las gotas de agua de la atmósfera formando ácido carbónico. Por otra parte, el gas de dióxido de azufre, liberado principalmente por la quema de combustibles fósiles (especialmente carbón y petróleo), es oxidado a trióxido de azufre que a su vez reacciona con vapor de agua para formar ácido sulfúrico. Para caracterizar el efecto de diferentes sustancias sobre la lluvia ácida, se establece la capacidad de cada sustancia a formar protones (acidez) en el medio receptor. Esta capacidad se expresa en relación con la capacidad del dióxido de azufre. Por ejemplo, los óxidos de nitrógeno tienen un efecto potencial sobre la lluvia ácida de 0.7 kg equivalentes de SO₂ por kg de NO_x.

Categoría de impacto EUTROFIZACIÓN. La eutrofización es el enriquecimiento de un ecosistema acuático con nutrientes (nitratos, fosfatos) que aceleran la productividad biológica (crecimiento de algas y malezas) y una acumulación indeseable de biomasa de algas. Cuando se incrementa la concentración de nutrientes a una velocidad mayor a la que son degradados, provocan un rápido crecimiento de desintegradores aerobios, que rápidamente agotan el oxígeno disponible. El potencial de una sustancia para generar eutrofización se calcula a partir de la cantidad de nitrógeno y/o fósforo. Aunque el nitrógeno y el fósforo juegan un papel importante en la fertilización de tierras agrícolas y otra vegetación, las liberaciones excesivas de cualquiera de estas sustancias pueden producir efectos no deseados en las vías fluviales por las que viajan y su destino final. Si bien el fósforo generalmente tiene un impacto más negativo en los lagos y arroyos de agua dulce, el nitrógeno a menudo es más perjudicial para los entornos costeros.

Algunas de las principales sustancias que tienen un papel en esta categoría de impacto son difíciles de caracterizar, incluidas las emisiones de: plantas de tratamiento de aguas residuales, plantas de pulpa y papel vegetal en descomposición, plantas de procesamiento de alimentos y fertilizantes utilizados en ubicaciones agrícolas, comerciales y domésticas individuales. Por ejemplo, la mayoría del fertilizante (cuando se utiliza correctamente) proporciona los beneficios por los que se compró. Sin embargo, dependiendo de la pendiente de los campos, la precipitación y la volatilización del fertilizante, parte de este producto puede ir más allá de los límites previstos originalmente y causar consecuencias no deseadas río abajo.

Categoría de impacto TOXICIDAD. En los procesos industriales se emplean sustancias peligrosas para las personas y el medio ambiente. Ésta dependerá de las características de la sustancia, la vía de administración o exposición, dosis, etc. Los contaminantes en concentraciones bajas se pueden acumular a niveles críticos o letales hasta biomagnificarse, así la emisión de partículas, radiaciones nucleares, y campos electromagnéticos, también son factores de toxicidad. La toxicidad se distingue entre aguda (efectos en un corto plazo) y crónica (efectos en un largo plazo).

Categoría de impacto TOXICIDAD. En los procesos industriales se emplean sustancias peligrosas para las personas y el medio ambiente. Ésta dependerá de las características de la sustancia, la vía de administración o exposición, dosis, etc. Los contaminantes en concentraciones bajas se pueden acumular a niveles críticos o letales hasta biomagnificarse, así la emisión de partículas, radiaciones nucleares, y campos electromagnéticos, también son factores de toxicidad. La toxicidad se distingue entre aguda (efectos en un corto plazo) y crónica (efectos en un largo plazo).

Categoría de impacto AGOTAMIENTO DE RECURSOS. Los recursos naturales (materia y energía procedentes del ambiente) son el origen básico de todos los bienes materiales. De ellos, los no renovables son aquellos que se renuevan mediante en ciclos naturales extremadamente lentos (combustibles fósiles) o se renuevan en ciclos naturales (depósitos minerales). El agotamiento de los recursos es debido al crecimiento de la población, aumento de consumo per cápita y mala gestión. Dentro del ACV, se mide el efecto relativo al consumo de recursos sobre el agotamiento de estos teniendo en cuenta su escasez relativa y el horizonte temporal en que se creen que se agotarán, es decir, la relevancia ambiental del consumo de un recurso e inversamente proporcional a su abundancia.

3.3.4.4. Interpretación.

Se resumen y discuten los resultados del ICV o de la EICV o de ambos como base para las conclusiones, recomendaciones y toma de decisiones de acuerdo con el objetivo y alcance definidos. Para la interpretación, se debe considerar el uso de las siguientes técnicas:

- Comprobación de integridad. Garantizar que toda la información y los datos necesarios para la interpretación estén disponibles y completos;
- Comprobación de sensibilidad. Resultados del análisis de sensibilidad y análisis de incertidumbre;
- Comprobación de consistencia. Determinar si los supuestos, métodos y datos son consistentes con el objetivo y el alcance.

3.3.5. CIRCULAR ECONOMY TOOLKIT (CET)

CET es una herramienta creada por la EMF y la compañía de diseño global IDEP, es una herramienta compuesta de diversas preguntas que contempla la apreciación alta, media o baja de la circularidad de una empresa manufacturera considerando las siguientes etapas: (Evans J. y Bocken N, 2013)

- Diseño, fabricación y distribución.
- Uso (por parte del cliente)
- Reparación / Mantenimiento del producto.
- Reutilización / Redistribución del producto.
- Re-manufactura / Readaptación de producto o pieza
- Productos como servicio
- Reciclaje de productos al final de la vida útil

ALTA CIRCULARIDAD	ETAPA	BAJA CIRCULARIDAD
No se utiliza material en exceso, el producto está totalmente desmaterializado.	Diseñar, fabricar y distribuir	Alto desperdicio de material podría reducirse mediante el rediseño
100% biodegradable		Alto porcentaje de materiales técnicos no biodegradables
100% Materiales reciclados utilizados		Alto porcentaje de materiales vírgenes no reciclados

No se utilizan materiales escasos en el producto		Materiales escasos en el producto, p. Antinomia, cobalto, galio, geranio, indio, platino, paladio, niobio, neodimio y tantalio
Los materiales son altamente ecoeficientes (bajo consumo de energía y emisiones de carbono para producir)		Los materiales utilizados tienen poca ecoeficiencia
Sin materiales tóxicos en el producto		Exceso de materiales tóxicos en el producto
Fábrica de residuos cero; todos los desechos se utilizan como entrada a otro proceso / fábrica.		Desechos significativos enviados a los vertederos desde la fábrica.
Las fallas del producto raramente ocurren	Uso (por parte del cliente)	Las fallas del producto son frecuentes
El producto tiene una vida útil muy larga		El producto tiene una vida útil corta
El producto no utiliza o tiene una potencia mínima teórica		El producto consume energía y recursos
El costo de reparación es pequeño en comparación con el costo del producto	Reparación / Mantenimiento del producto	El costo de reparación supera con creces el costo del producto
Servicio de mantenimiento / reparación adecuado ya ofrecido (podría incluir reparación, servicio, repuestos, diagnóstico, soporte técnico, instalación y garantía)		No se ofrece servicio de mantenimiento / reparación
Fácil acceso a trabajos internos		Difícil acceso a trabajos internos
Trabajos simples, fáciles de entender.		Trabajos complejos, difíciles de entender
No hay componentes, conectores, módulos o cables estandarizados		Todos los componentes, conectores, módulos y cables están estandarizados
Fácil de encontrar falla		Difícil de encontrar falla
Buen mercado para ventas de segunda mano		No hay mercado para ventas de segunda mano

Ya se ofrecen ventas completas de segunda mano	Reutilización / Redistribución del producto.	Actualmente no se ofrecen ventas de segunda mano
El producto tiene una vida útil muy larga		El producto tiene una vida útil corta
Costos baratos de readaptación / re-fabricación	Re-manufactura / Readaptación o renovación producto o pieza	Costos elevados de re-adaptación / re-fabricación
Costos de recolección costosos para devolver el producto a la fábrica		Costos de recolección baratos para devolver el producto a la fábrica
Todos los productos se devuelven y restauran / re-manufacturan.		Actualmente no se realiza ninguna restauración o re-manufactura.
Difícil de desmontar		Fácil de desmontar
No hay daño causado al producto o parte al desmontar		Daño significativo causado al producto o parte durante el desmontaje
Fácil identificar piezas una vez desmontadas		Imposible identificar piezas una vez desmontadas
Muchas piezas son modulares, lo que permite cambiar el interruptor de entrada y salida		No hay piezas modulares, lo que evita que el interruptor entre y salga
Posible actualizar partes		Imposible actualizar partes
Pocas conexiones mecánicas		Muchas conexiones mecánicas, p. soldaduras, tornillos, remaches, etc.
Pocas herramientas necesarias para desmontar		Muchas herramientas necesarias para desmontar
Buen mercado para vender productos como servicio	Productos como servicio	No hay mercado para vender productos como servicio
Todos los productos ya se venden como servicio		No hay productos vendidos actualmente como servicio
Pocas combinaciones de materiales utilizadas en el producto.	Reciclaje de productos al	Gran cantidad de combinaciones de materiales utilizadas en el producto.

Sin materiales encerrados (por ejemplo, si los materiales son fáciles de separar en el reciclaje)	final de la vida útil	Muchos materiales encerrados
---	-----------------------	------------------------------

Tabla 9. CET.
(Fuente: Evans J. y Bocken N, 2013)

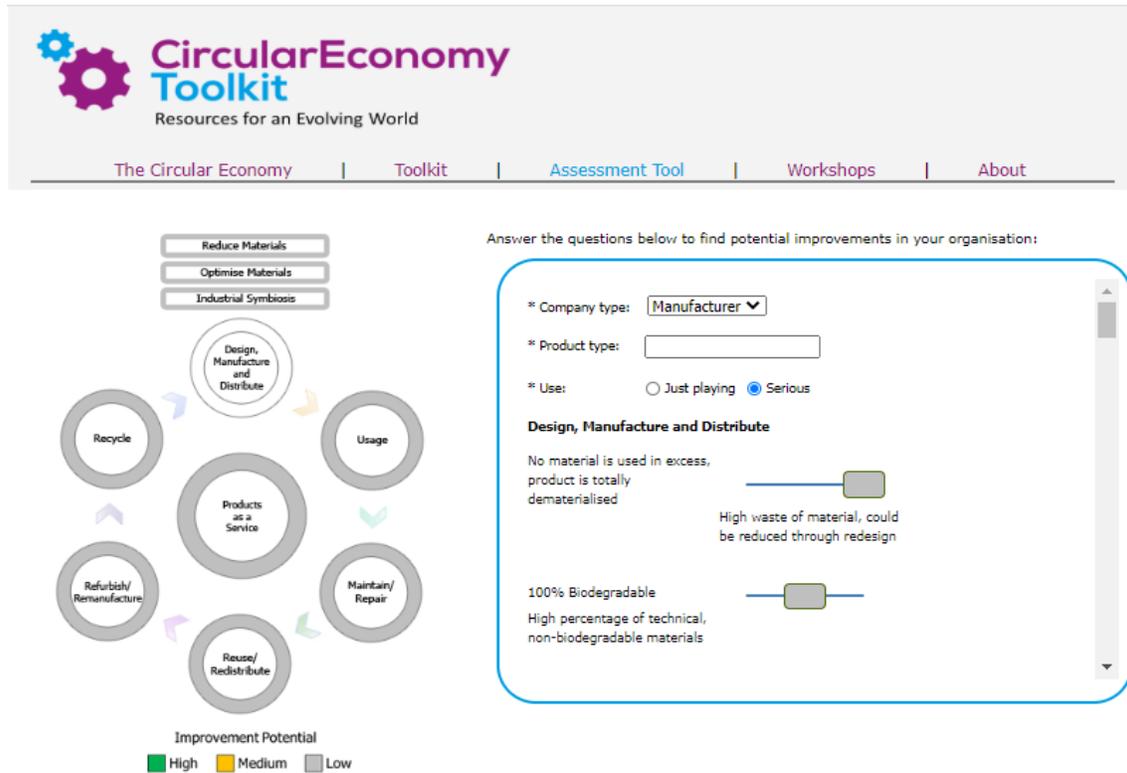


Figura 25. CEC Software.
(Fuente: Evans J. y Bocken N, 2013)

CAPÍTULO 4.

4.1. RESULTADOS.

4.1.1. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA.

La empresa que se eligió para este proyecto de investigación se encuentra ubicada en El Bajío y su principal actividad económica consiste en la fabricación de aparatos de línea blanca (refrigeradores). A continuación, se muestra una tabla con las características de la empresa:

Actividad productiva principal	Fabricación de aparatos de línea blanca
Clave de la Clasificación Mexicana de Actividades y Productos (CMAP)	CMAP 99: 383312 Producción de refrigeradores de uso doméstico
Definición de empresa	Grande empresa
Superficie	440 mil m ²
Área construida	220 mil m ²
Número de trabajadores	3 mil
Localización	Bajío
Productos	Refrigeradores
Capacidad de producción instalada	2 millones de piezas
Producción anual	1.7 millones de piezas
Maquinaria y equipo:	
Extrusora de plástico, termoformadora, troqueladora, dobladora, prensas, laminadoras	

Tabla 10. Datos generales de la empresa.

La empresa se encuentra en una zona industrial donde colinda con industrias de diversos giros, no se encuentra localizada en un Área Natural Protegida y su uso de suelo es de actividades comerciales, industriales o de servicio.

4.1.2. DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS.

Los procesos productivos de esta empresa son los siguientes:

En el área de extrusión se extruye el plástico Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) para formar láminas de ABS, después se pasa al área de termoformado en donde se calienta para obtener la forma del gabinete o la puerta del refrigerador con vacío y moldes. Posteriormente las piezas de ABS termoformadas se les

inserta el cableado, mangueras y otros accesorios. Una vez que las piezas que formarán el gabinete estén listas pasan al tren del gabinete para insertar la lámina galvanizada y pre-pintada.

En el área de corte de lámina, en donde diversas máquinas cortan la lámina galvanizada y pre-pintada para el proceso de puertas o gabinetes, así como para el proceso de respaldo y cavidad de la unidad refrigerante. La lámina galvanizada y pre-pintada pasa a los trenes de gabinete donde se troquela y dobla para formar el gabinete y a este se le insertan un marco de acero y las piezas ABS termoformadas. Asimismo, para las puertas del refrigerador se envía lámina galvanizada y pre-pintada a las prensas, laminadoras y troqueladoras de puertas.

Por otro lado, las piezas de ABS termoformadas que forman parte del forro de la puerta del refrigerador y el gabinete se preparan con la inserción de partes (arneses, conectores, respaldo y la cavidad de la unidad refrigerante) para enviarse al área de espumado. Ahí, las puertas y gabinetes se les agrega una mezcla de polioli e isocianato con el catalizador ciclopentano, para obtener el PUR rígido, que servirá como aislante térmico del refrigerador, variando las proporciones de las sustancias según el modelo.

Una vez obtenido el gabinete en el área de sub-ensamble se monta y ensamblan los accesorios que van dentro del refrigerador como son: anaqueles, cajoneras, soportes, bandejas, máquina de hielo y el despachador de agua, dependiendo de los modelos de refrigeradores. En el ensamble final se monta y ensamblan las puertas y el compresor.

Posteriormente pasa a la línea de producción en donde se hace el vacío del circuito del refrigerador para evitar obstrucciones de los tubos y después se realiza la carga del aceite al compresor y del gas refrigerante. Finalmente, el refrigerador armado pasa al área de calidad para ser sometidas a pruebas térmicas.

4.1.3. DIAGRAMA DE PROCESO.

En la siguiente figura se muestra el diagrama de proceso:

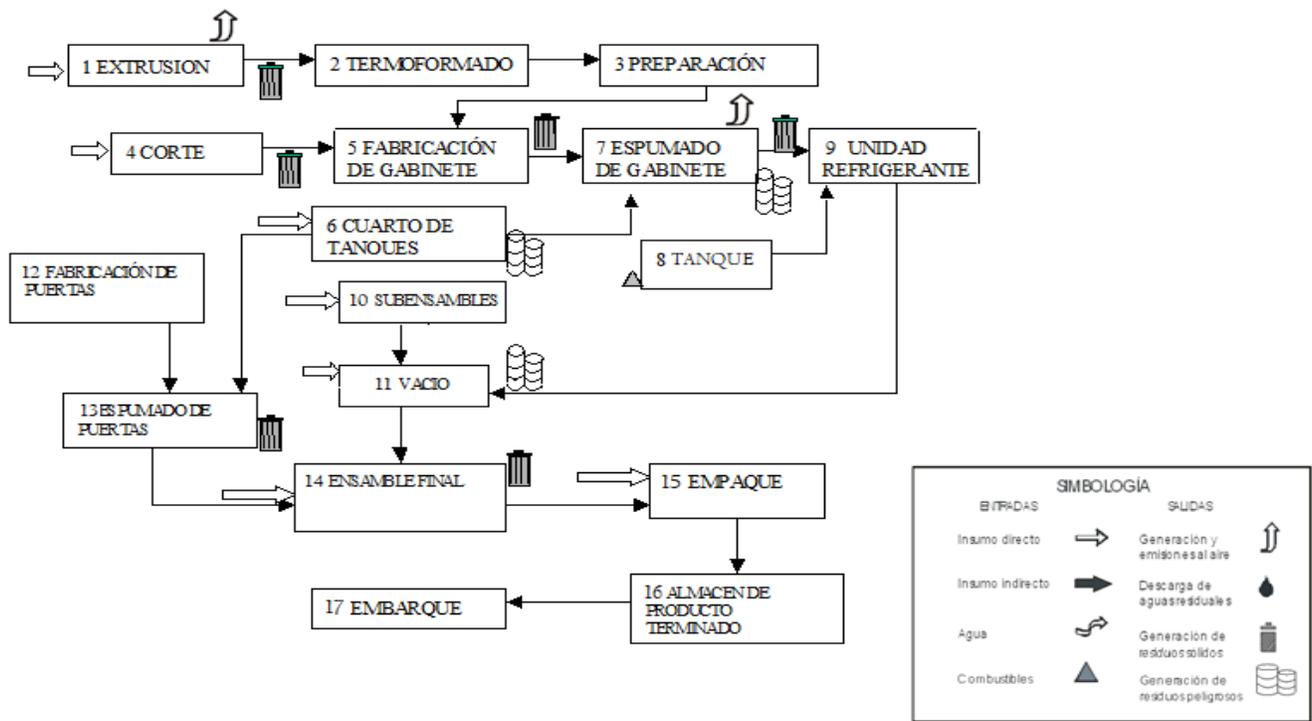


Figura 26. Diagrama de proceso de la fabricación de refrigeradores.
(Fuente: Elaboración propia)

4.1.4. ENTRADA Y SALIDA DE MATERIALES.

En las siguientes tablas se detallan los insumos, producción anual y generación de residuos más sobresalientes de la empresa de refrigeradores de uso doméstico.

Proceso	Nombre Insumo		Estado Físico	Forma de Almacenamiento	Consumo anual (t)
	Comercial	Químico			
Extrusión y Termoformado	Plástico ABS	Acrilonitrilo butadieno estireno	Sólido	Contenedor metálico	7,000
Fabricación de gabinete	Acero	Acero	Sólido	Bajo techo	36,000
Espumado	Isocianato	Disocianato de difenil metano	Líquido acuoso	Tanques	13,000
Espumado	Poliol	Poliol	Líquido acuoso	Tanques	8,000
Espumado	Ciclopentano	Ciclopentano	Líquido acuoso	Tanques	1,000
Unidad refrigerante	R-600	Isobutano	Líquido acuoso	Tanques	18
Unidad refrigerante	R-134	1,1,1,2 Tetrafluoroetano	Líquido acuoso	Tanques	196
Extrusión y Termoformado	Plástico HIPS	Poliestireno de alto impacto (HIPS)	Sólido	Contenedor metálico	6,000

Tabla 11. Insumos consumidos al año.
(Fuente: Elaboración propia)

Nombre del producto o subproducto	Capacidad de producción instalada	Producción anual	
		Cantidad	Unidad
Refrigeradores	1 millón	700 mil	pzas

Tabla 12. Producción anual.
(Fuente: Elaboración propia)

RME	Tipo de generador (área/proceso/servicio)	Cantidad anual 2018 [Kg]	Cantidad anual 2019 [Kg]	Cantidad anual 2020 [Kg]
Plástico (ABS, HIPS)	Área de extrusión y termoformado	815 mil	908 mil	823 mil
Puerta de acero con espuma	Área de tren de gabinetes y puertas	380 mil	228 mil	180 mil
Puerta de acero sin espuma		288 mil	247 mil	219 mil
Gabinete de acero con espuma		1 millón 124 mil	1 millón 76 mil	693 mil
Gabinete de acero sin espuma		1 millón 120 mil	1 millón 50 mil	509 mil
Chatarra (Fierro)		1 millón 175 mil	1 millón 87 mil	1 millón 5 mil

Tabla 13. Principales RME generados en el periodo 2018-2020.
(Fuente: Elaboración propia)

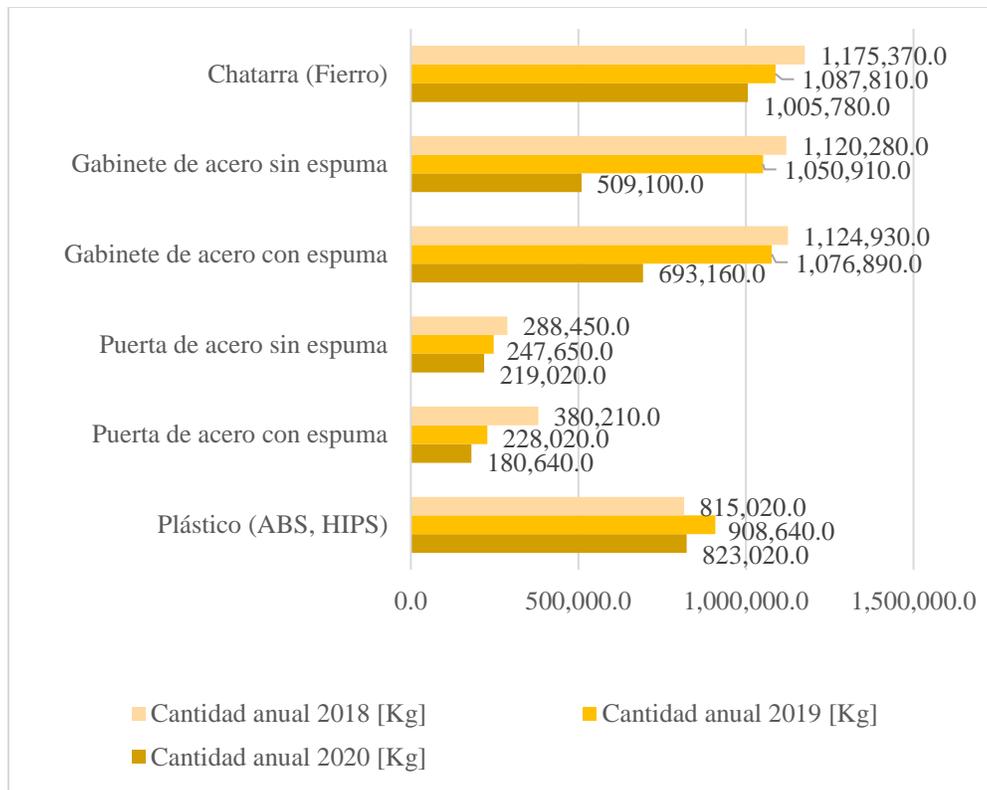


Gráfico 1. RME de gabinetes y puertas con y sin PUR generados en el periodo 2018-2020.
(Fuente: Elaboración propia)

RME	Generación 2019	
	Cantidad	Unidad
Gabinete de acero espumado	1 millón 76 mil	kg
Puerta de acero con espuma	228 mil	kg

Tabla 14. RME gabinetes y puertas de acero con espuma de PUR.
(Fuente: Elaboración propia)



Gráfico 2. Cantidad en kg de RME con espuma de PUR en el 2019.

(Fuente: Elaboración propia)

Se puede concluir con lo anteriormente mostrado, que se requieren buscar alternativas para la reducción en la generación del residuo de gabinete con espuma de PUR.

4.1.5. CÁLCULO DE LA CIRCULARIDAD CON EL MCI.

Se realizó el cálculo de circularidad utilizando el indicador de circularidad del material MCI para los residuos de gabinetes y puertas de acero, y el PUR rígido dentro de la etapa de espumado para la fabricación de refrigeradores de uso doméstico. Al residuo de PUR la empresa no se le realiza ningún tratamiento final, disponiéndolo al relleno sanitario.

Las características en términos de materiales, origen y destino son:

	<i>Gabinetes y puertas de acero</i>	<i>PUR</i>
Masa	1 kg	1 kg
Materias primas	100% materiales vírgenes	100% materiales vírgenes
	0% materiales reciclados	0% materiales reciclados
	0% de componentes reutilizados	0% de componentes reutilizados
Destino después de usar	0% a vertedero	100% a vertedero
	100% a reciclaje	0% a reciclaje
	0% para reutilizar	0% para reutilizar

100% tasa de reciclaje

0% tasa de reciclaje

En términos de la notación usada en la metodología esto significa:

Gabinetes y puertas de acero

PUR

Fracción de masa de la materia prima del producto de fuentes recicladas:

$$F_{R()} = 0$$

$$F_{R()} = 0$$

Como no existe fracción de la materia prima del producto de fuentes reusadas

$$F_U = 0$$

$$F_U = 0$$

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

$$V = 1(1 - 0 - 0) = 1$$

$$V = 1(1 - 0 - 0) = 1$$

Fracción de masa del producto recolectado para ir dentro del proceso de reciclaje:

$$C_R = 1$$

$$C_R = 0$$

Fracción de masa del producto dentro de un componente de reúso:

$$C_U = 0$$

$$C_U = 0$$

Eficiencia de la tasa de reciclaje:

$$E_C = 1$$

$$E_C = 0$$

La cantidad de residuos irrecuperables a través del material de un producto que va al basurero:

$$W_o = 1(1 - 1 - 0) = 0$$

$$W_o = 1(1 - 0 - 0) = 1$$

La cantidad de residuos generados en el proceso de reciclaje está dada por:

$$W_c = 1(1 - 1) = 0$$

$$W_c = 1(1 - 0) = 0$$

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

$$W_f = 1 \frac{(1 - 0)0}{0} = 0$$

$$W_f = 1 \frac{(1 - 0)0}{0} = 0$$

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

$$W = 0 + \frac{0 + 0}{2} = 0$$

$$W = 1 + \frac{0 + 0}{2} = 1$$

Índice de flujo lineal:

$$LFI = \frac{1 + 0}{2 + \frac{0 - 0}{2}} = 0.5$$

$$LFI = \frac{1 + 1}{2 + \frac{0 - 0}{2}} = 1$$

Un LFI igual a 1 indica que es un flujo completamente lineal, es decir, proceden de materiales vírgenes y termina como un residuo irrecuperable.

En la utilidad no hay medición adecuada de unidades funcionales para los dispositivos electrónicos, solamente el tiempo de vida, el cual es tomado en cuenta:

$$X = \frac{2}{2} = 1$$

$$X = \frac{2}{2} = 1$$

Factor de Utilidad:

$$F(X) = \frac{0.9}{1} = 0.9$$

$$F(X) = \frac{0.9}{1} = 0.9$$

Finalmente, se calcula el indicador de circularidad de los productos:

$$MCI^*p = 1 - (0.5 * 0.9) = 0.55$$

$$MCI^*p = 1 - (1 * 0.9) = 0.1$$

El cálculo del indicador de circularidad del material de los gabinetes y puertas de acero da un valor de 0.55 en comparación con 0.1 para el PUR, lo que significa que el PUR tiende a ser completamente lineal y el MCI de los gabinetes y puertas de acero está en un punto medio de la circularidad y la linealidad, lo que con esta metodología sugiere la utilización de materias primas con componentes reciclados y reutilizados para ambos y que adicionalmente para el PUR se requiere modificar la disposición final hacia el relleno sanitario con alternativas para emplearse como materia prima en el mismo proceso o de uno distinto.

Para comprobar lo anteriormente descrito, en la siguiente figura se verifica mediante la herramienta de la EMF el análisis de ambos casos tomando en consideración los datos previamente mencionados obteniéndose:

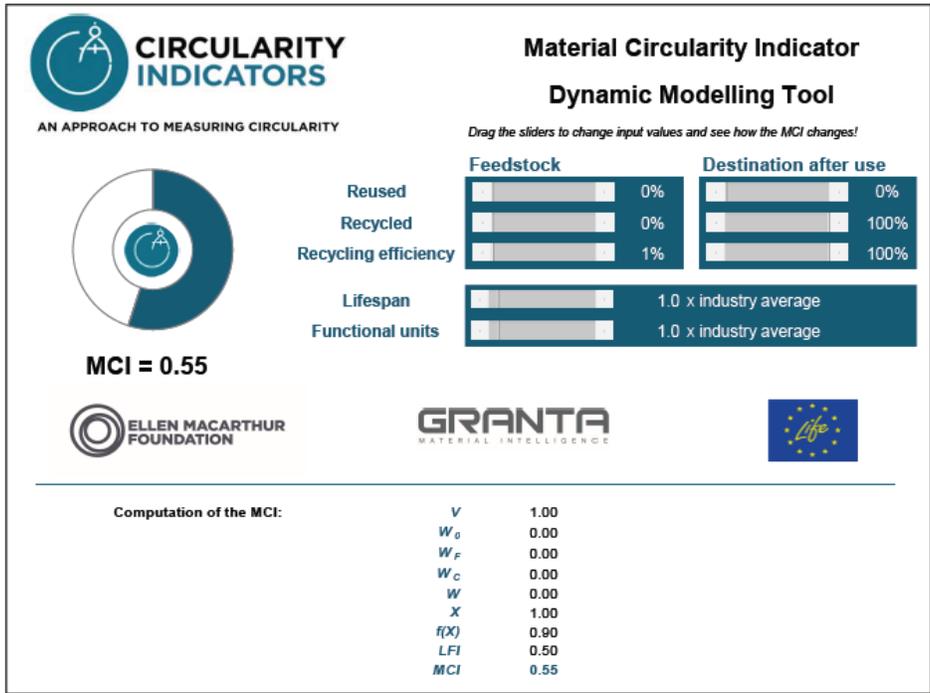


Figura 27. MCI de los gabinetes y puertas con acero.
(Fuente: Elaboración propia)

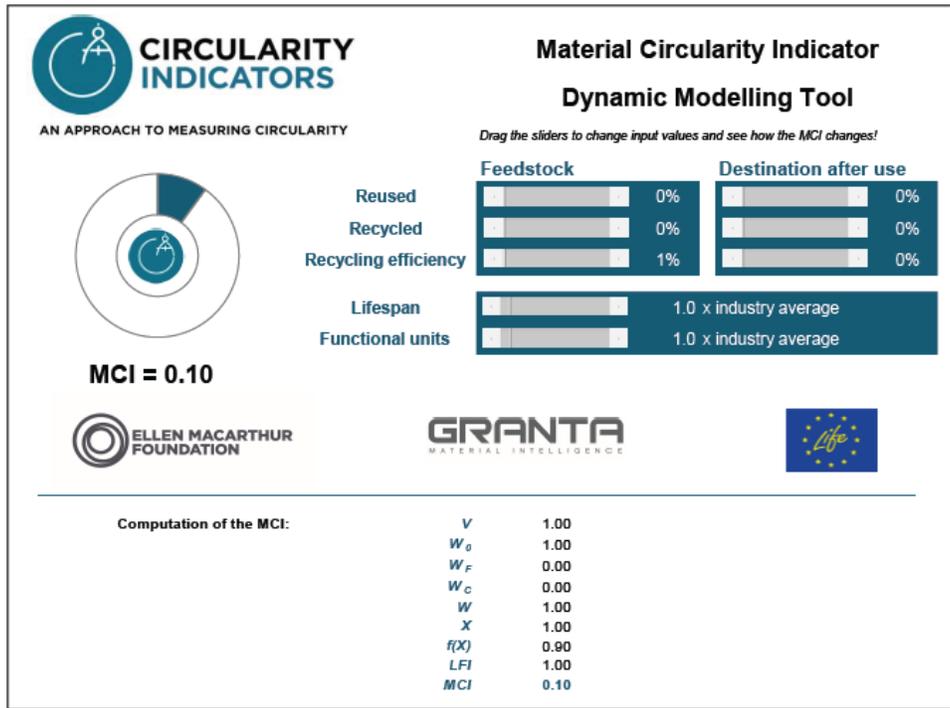


Figura 28. MCI del PUR.
(Fuente: elaboración propia)

4.1.6. CÁLCULO DE LA CIRCULARIDAD CON EL CET.

Del mismo modo, se realizó el cálculo de circularidad utilizando el CET del producto refrigerador doméstico en las diversas, obteniéndose un POTENCIAL ALTO DE MEJORA en las fases de reciclaje, re-manufactura/renovación, mantenimiento/repación y producto como servicio; POTENCIAL MEDIO DE MEJORA en las fases de uso y reúso, lo anterior con base en los autores Evans J. y Bocken N (2013).

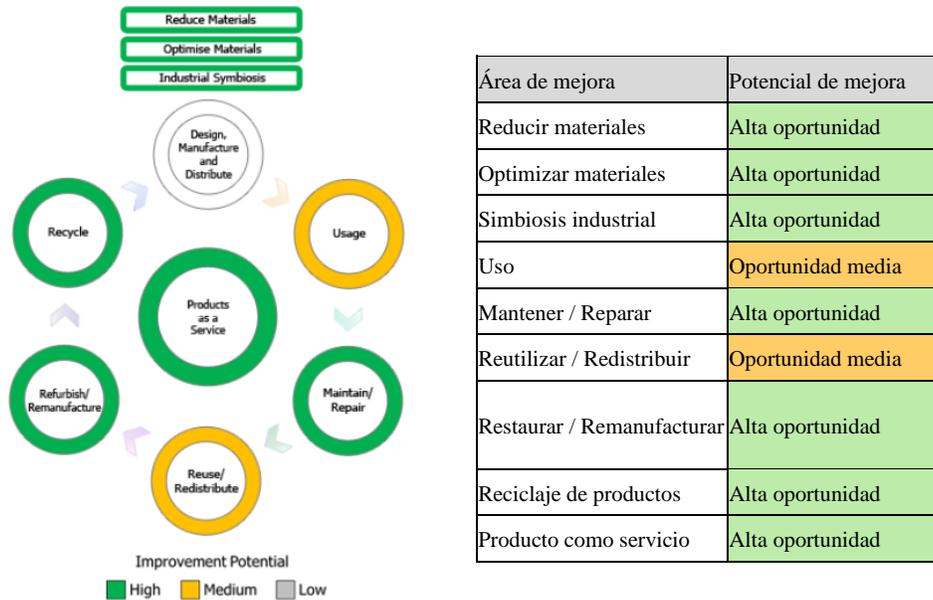


Figura 29. Resultados del CET.
(Fuente: Elaboración propia)

Como se puede visualizar en la imagen anterior, evaluando la circularidad del producto refrigerador con el CET se obtuvo POTENCIAL ALTO DE MEJORA en las áreas de: 1 reducción de materiales, debido a que la empresa consume una gran cantidad de materias primas que además estas son vírgenes; 2 optimización de materiales, en virtud de que se generan grandes cantidades de residuos y que en el caso del PUR se envía al relleno sanitario; 3 simbiosis industrial, ya que esta aún no se aplica teniéndose como oportunidad el brindar a los residuos para ser utilizados como materia prima de otra empresa; 4 mantenimiento/repación, en vista de que el fabricante brinda diversos modelos de refrigeradores las refacciones no están estandarizadas lo que dificulta la compra de las refacciones y la repación, sin embargo el fabricante ofrece garantía y cuenta con centros de servicio de repación en donde se puede solicitar el servicio en línea; 5 re-manufactura/restauración, debido a que la empresa aún no ha implementado líneas de re-manufactura o restauración que permiten reincorporar en sus procesos partes

de los refrigeradores desechados, 6 reciclaje de producto, en virtud de que existen bajas tasas de reciclaje de los refrigeradores desechados, 7 y finalmente la etapa de producto como servicio, debido a que ni el fabricante de refrigeradores u otra empresa en México ofrecen el producto refrigerador doméstico en un esquema de renta para su constante renovación para evitar su obsolescencia.

Por otro lado, se obtuvo POTENCIAL MEDIO DE MEJORA en las áreas de: 1 uso, debido a que el consumo de energía varía de acuerdo con el modelo seleccionado y en algunos refrigeradores ofrecidos al consumidor no cuenta con el modo de ahorro; 2 reutilización/ redistribución en virtud de que el mercado de segunda mano no es formal y requiere de estructura.

4.1.7. CÁLCULO DE CIRCULARIDAD CON EL ACV.

Objetivo:

Obtener por medio de la metodología del ACV (ISO1, 2016; ISO2, 2016), la identificación de los impactos ambientales potenciales ocasionados por la generación de los residuos de PUR en la etapa de espumado en la manufactura de refrigeradores de uso doméstico de una empresa ubicada en El Bajío, que derivado de este, se pueda realizar una propuesta de mejora para la empresa de los impactos ambientales detectados.

Alcance:

Estudio Gate to Gate, lo que significa que se evaluará el proceso desde una etapa intermedia hasta otra. De acuerdo con el objetivo establecido, lo incluido dentro del sistema son todas las corrientes de entrada y salida delimitadas en el diagrama del ciclo de vida de la fabricación del refrigerador siguiente:

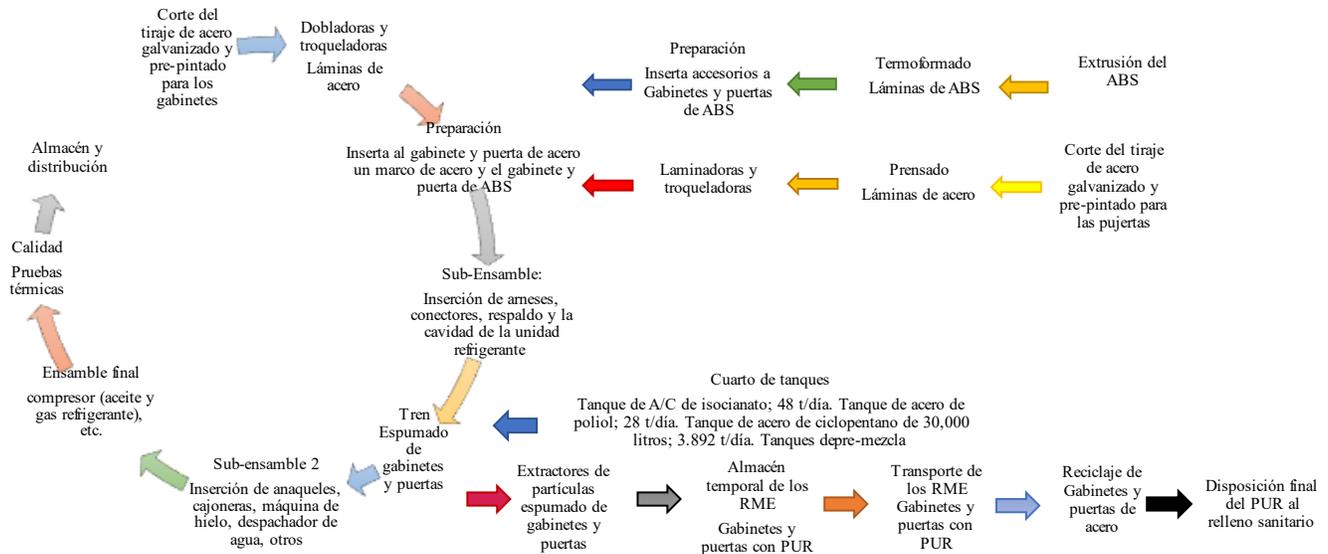


Figura 30. Ciclo de vida de la fabricación del refrigerador.
(Fuente: Elaboración propia)

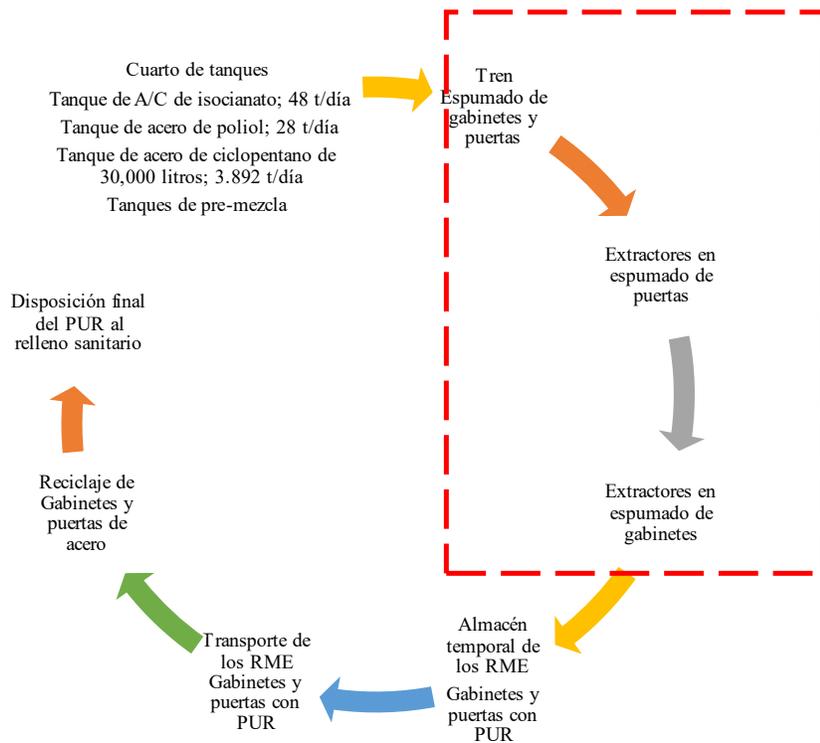


Figura 31. Ciclo de vida del tren de espumado de gabinetes y puertas con PUR.
(Fuente: Elaboración propia)

Función del sistema estudiado.

El residuo de PUR generado a la salida del tren de espumado.

Límites del sistema.

La industria genera otros residuos que están fuera del alcance del estudio. Los límites del sistema incluyen las materias primas y los flujos de energía asociadas a todas las etapas delimitadas. Los datos corresponden al periodo de fabricación del año 2020.

Las entradas y salidas del sistema son las siguientes:

ENTRADAS	ETAPA DEL PROCESO	SALIDAS
Electricidad Isocianato Poliol Ciclopentano	Cuarto de tanques	Pre-mezcla de PUR
Pre-mezcla de PUR Gabinets y puertas de acero Electricidad	Tren Espumado de gabinetes y puertas con PUR	Gabinets y puertas de acero con espuma de PUR RME Gabinetes y puertas con espuma
Electricidad	Extractores de espumado de gabinetes	Emisión al aire (partículas)
Electricidad	Extractores de espumado de puertas	Emisión al aire (partículas)
Residuos de manejo especial	Almacén temporal de los RME Gabinetes y puertas con PUR	Residuos de manejo especial

Tabla 15. Entradas y salidas del sistema delimitado.
(Fuente: Elaboración propia)

Etapa	Función	Material/ Sustancia	Uso de	
			Electricidad	Combustible
Cuarto de tanques	Se almacenan en tanques de acero al carbón al Polioliol, Isocianato, Ciclopentano y pre-mezclas para la fabricación de PUR utilizados en la etapa de	Polioliol	Si	No
		Poliuretano		
		Ciclopentano		

	espumado de gabinetes y puertas			
Tren Espumado de gabinetes y puertas	Estaciones de espuma de PUR con máquinas tipo rotativo, las cuales rellenan el cuerpo de las puertas y gabinetes de acero con una mezcla para espuma de PUR. La máquina tipo rotativo se compone de chasis, bastidor giratorio, marco de molde de espuma, controlador de dispositivo, sistema de apertura y cierre, sistema de carga de inyección, y está equipado sistema hidráulico, sistema de control eléctrico, entre otros.	Gabinetes de acero Puertas de acero Pre-mezcla de PUR Aceite hidráulico	Si	No
Extracción de espumado de gabinetes	Extraer las partículas suspendidas generadas en el proceso de espumado de gabinetes	N/A	Si	No
Extracción de espumado de puertas	Extraer las partículas suspendidas generadas en el proceso de espumado de puertas	N/A	Si	No
Almacén temporal de los RME Gabinetes y puertas con PUR	Almacenar los RME de gabinetes y puertas de acero con espuma de PUR	RME de gabinetes y puertas con PUR	Si	Si

Tabla 16. Funciones de las etapas delimitadas.
(Fuente: Elaboración propia)

Unidad funcional.

Kilogramos de residuo PUR generado por la fabricación de un refrigerador, es decir, 0.286 kg de residuo de PUR /pza. de refrigerador.

Análisis del ICV

Los datos que a continuación se presentan, se obtuvieron de las bitácoras de operación y el reporte anual que presenta la empresa ante la autoridad.

Materia prima	Cantidad	Unidad de medida	%
Ciclopentano materia prima	1,008,430	kg/año	4.55%
Poliol materia prima	8,187,984	kg/año	36.90%
Isocianato materia prima	12,990,859	kg/año	58.55%
PUR materia prima	22,187,273	kg/año	100%

Tabla 17. Inventario de materia prima utilizada para la formulación de PUR.
(Fuente: Elaboración propia)

Producto	Cantidad	Unidad de medida
Refrigeradores fabricados	1,738,704	piezas/año
Acero materia prima	36,125,645	kg/año
PUR materia prima	22,187,273	kg/año

Tabla 18. Inventario anual de refrigeradores fabricados con la cantidad de PUR y de acero empleados.
(Fuente: Elaboración propia)

Residuos	Cantidad	Unidad de medida
RME Gabinete de acero con espuma	1,076,890	kg/año
RME Puerta de acero con espuma	228,020	kg/año
RME Gabinete de acero sin espuma	1,050,910	kg/año
RME Puerta de acero sin espuma	247,650	kg/año
RME Acero en total	2,106,969	kg/año
RME PUR en total	496,500	kg/año

Tabla 19. Inventario anual de residuos de acero y PUR.
(Fuente: Elaboración propia)

Consumos por una pieza de refrigerador	Cantidad	Unidad de medida
Acero promedio por refrigerador (gabinetes y puertas)	20.78	kg/pza.
PUR promedio por refrigerador	12.76	kg/pza.
Ciclopentano promedio por refrigerador	0.57	kg/pza.
Poliol promedio por refrigerador	4.71	kg/pza.
Isocianato promedio por refrigerador	7.47	kg/pza.
RME Acero por refrigerador	1.21	kg/pza.
RME PUR por refrigerador	0.27	kg/pza.
Energía consumida en la etapa de espumado por refrigerador	2.805	kWh/pza.

Tabla 20. Inventario promedio de materiales por una pieza de refrigerador.
(Fuente: Elaboración propia)

Proceso	Equipo	Potencia (kW)	Cantidad de equipos (unidad)	Consumo de electricidad (kWh/semanal)
Cuarto de tanques	Bomba tanque de isocianato	6.77	2	711.34
Cuarto de tanques	Bomba tanque de polioliol	6.39	2	671.38
Cuarto de tanques	Bomba tanque de premezcla	6.01	8	631.42
Cuarto de tanques	Bomba tanque de catalizador	0.53	1	55.95
Espumado	Tornamesa	22.53	1	2,352.59
Espumado	Maquina espumadora tipo rotativo	19.03	14	1,986.73
Espumado	Volteador	5.40	3	472.90
Espumado	Enfriador	13.93	6	1,454.29
Extracción de partículas en espumado de PUR	Extractor de gabinetes	20	11	2,280.00

Extracción de partículas espumado de PUR	de en Extractor de puertas	20	9	2,280.00
--	----------------------------	----	---	----------

Tabla 21. Inventario semanal de consumo de energía.
(Fuente: Elaboración propia)

ETAPA	ENTRADAS			SALIDAS		
	Material/ Electricidad	Cantidad anual	Unidad	Material/ Electricidad	Cantidad anual	Unidad
Cuarto de tanques	Isocianato	12,990.86	t	Pre-mezcla de PUR	22,187.27	t
	Poliol	8,187.98	t			
	Ciclopentano	1,008.43	t			
	Electricidad de Bombas tanque de isocianato	73.98	MWh			
	Electricidad de Bombas tanque de polioliol	69.82	MWh			
	Electricidad de Bombas tanque de pre-mezcla	262.67	MWh			
	Electricidad de Bomba tanque de catalizador	2.91	MWh			
Espumado	Pre-mezcla de PUR	22,187.27	t	Gabinetes y puertas de acero con PUR	55,709.45	t
	Gabinetes y puerta de acero	36,125.65	t	RME Puertas de acero con PUR	228,020	t
	Electricidad de Tornamesa	122.33	MWh	Puertas de acero sin PUR	247,650	t
	Electricidad de Maquinas espumadoras tipo rotativo	1,446.34	MWh	Gabinetes de acero con PUR	1,076,890	t

	Electricidad de	73.77	MWh			
	Volteadores					
	Electricidad de	453.74	MWh	Gabinetes de	1,050.91	t
	Enfriadores			acero sin PUR		
Extracción de partículas en espumado de PUR	Electricidad de extractores de espumado de gabinetes	1,304.16	MWh	Emisión al aire (partículas suspendidas totales)	2.58 1,724	mg/m ³ kg/año
Extracción de partículas en espumado de PUR	Electricidad de extractores de espumado de puertas	1,067.04	MWh	Emisión al aire (partículas suspendidas totales)	4.15 1,240	mg/m ³ kg/año

Tabla 22. Inventario anual de materia prima y electricidad.
(Fuente: Elaboración propia)

EICV

Una vez que se obtuvo el inventario del sistema de producto, se realizaron escenarios para la etapa de espumado para obtener los impactos del PUR y de los gabinetes y puertas de acero, utilizando el software SimaPro versión 9.1.1.1 que es un software analítico utilizado para medir la huella ambiental de productos y servicios de una manera objetiva, construido y mejorado a lo largo de 30 años, por líderes en ACV que han contribuido a los principales desarrollos de investigación y políticas públicas. SimaPro permite ver redes de suministro completas y proporciona una visión total de las bases de datos y los procesos unitarios, esto brinda plena capacidad para analizar y modificar las elecciones y suposiciones, indispensable para la investigación de calidad, para educar a los profesionales de ACV, y para su uso empresarial.

Para la evaluación del impacto, dentro de SIMAPRO se seleccionó el método IMPACT 2002+ V2.15, la cual es una metodología que se desarrolló originalmente en el Instituto Federal Suizo de Tecnología de Lausana (EPFL), Suiza. IMPACT 2002+ que propone una implementación factible de un enfoque

combinado de punto medio / daño, vinculando todos los tipos de resultados del inventario del ciclo de vida (flujos elementales y otras intervenciones) a través de varias categorías de punto medio para varias categorías de daños. Un punto medio expresa el punto ubicado en algún intermedio entre los resultados del LCI y el daño producido (o punto final) en el impacto.

Para IMPACT 2002+ se han desarrollado nuevos conceptos y métodos, especialmente para la evaluación comparativa de la toxicidad humana y la ecotoxicidad, así como la inclusión de los impactos de las turbinas de agua y la evaluación de la extracción y el consumo de agua. Considera varias categorías intermedias, a saber, efectos cancerígenos de toxicidad humana, efectos no cancerígenos de toxicidad humana (estas dos categorías a veces se agrupan en una categoría: toxicidad humana), efectos respiratorios (debidos a sustancias inorgánicas), radiación ionizante, ozono agotamiento de capas, oxidación fotoquímica, ecotoxicidad acuática, ecotoxicidad terrestre, acidificación acuática, eutrofización acuática, acidificación / fortificación terrestre, ocupación del suelo, turbinación de agua, calentamiento global, consumo de energía no renovable, extracción de minerales, extracción de agua y consumo de agua. Todas las puntuaciones medias se expresan en unidades de una sustancia de referencia y se relacionan con las cuatro categorías de daños: salud humana, calidad del ecosistema, cambio climático y recursos.

Impactos ambientales en la etapa de espumado

Aplicando el software SimaPro se obtuvo como resultado que los impactos ambientales en las cuatro categorías de daños de salud humana, calidad del ecosistema, cambio climático y recursos son mayores en comparación con el acero utilizado en los gabinetes y puertas para el cuerpo del refrigerador doméstico.

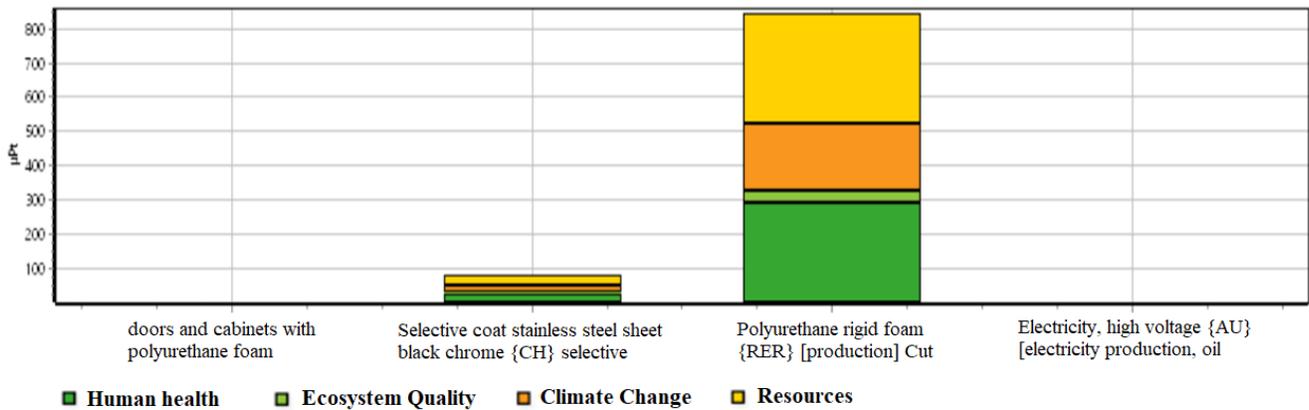


Figura 32. Categorías de impacto del PUR y el acero para los gabinetes y puertas, puntuación única.
(Fuente: Elaboración propia)

Obteniendo la gráfica de evaluación del daño se puede observar que las categorías intermedias como energía no renovable, calentamiento global, acidificación / fortificación terrestre, ecotoxicidad terrestre, efectos respiratorios debidos a sustancias inorgánicas, sustancias cancerígenas y no cancerígenas son mayores del PUR con respecto al acero.

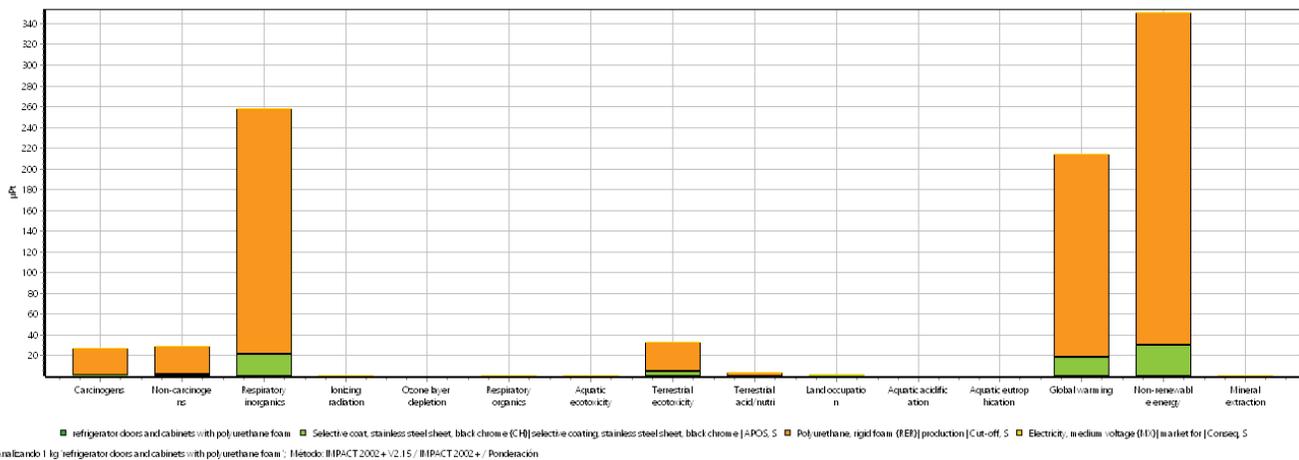


Figura 33. Categorías intermedias de impacto del PUR y el acero para los gabinetes y puertas, ponderación.
(Fuente: Elaboración propia)

Con respecto a las emisiones, considerando el factor de emisión del sistema eléctrico nacional se pudo obtener el cálculo de las emisiones indirectas de gases de efecto invernadero por consumo de electricidad en unidades de toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂e):

Etapa	Equipo	Consumo MWh/año	tCO₂e¹
Espumado	Tornamesa	122.33	60.43
	Maquinas espumadoras tipo rotativo	1,446.34	714.49
	Volteadores	73.77	36.44
	Enfriadores	453.74	224.15
Extracción de partículas espumado de PUR en gabinetes	Extractores de espumado de gabinetes	1,304.16	644.26
Extracción de partículas espumado de PUR en puertas	Extractores de espumado de puertas	1,067.04	527.12
		Total	2,206.89

Tabla 23. tCO₂e anual.
(Fuente: Elaboración propia)

Interpretación del ACV

De acuerdo con la guía de usuario IMPACT 2002+, al calcular los impactos ambientales se deben considerar que el cambio climático y el consumo de recursos están en general correlacionados, excepto cuando se ha utilizado mucha energía nuclear, lo que aumenta el impacto del consumo de recursos en comparación con el cambio climático. En términos generales, las incertidumbres sobre el calentamiento global y los recursos son bajas en comparación con las incertidumbres en la salud humana y la calidad de los ecosistemas. (Humbert S. et al., 2012)

¹ Se utilizó el factor de emisión del sistema eléctrico nacional 2020 de 0.494 tCO₂e/MWh (SEMARNAT, 2021)

Con la ejecución del ACV se pudo lograr identificar que, dentro de la etapa de espumado, el PUR tiene mayor impacto ambiental con respecto al acero utilizado para los gabinetes y puertas del refrigerador, en las cuatro categorías de daños de salud humana, calidad del ecosistema, cambio climático y recursos, que específicamente sería en las categorías intermedias de energía no renovable, calentamiento global, acidificación / fortificación terrestre, ecotoxicidad terrestre, efectos respiratorios (debidos a sustancias inorgánicas), sustancias cancerígenas y no cancerígenas. Al ser el PUR el que mayor impacto genera es el que requiere la mayor cantidad de mejoras posibles para reducir los efectos al ambiente.

Con respecto a las emisiones de CO₂e, el cálculo de las emisiones indirectas de gases de efecto invernadero por consumo de electricidad son realmente altas obteniendo un total de 2,207 de toneladas de CO₂e del total del consumo anual de energía para la fabricación de total de piezas de refrigeradores domésticos en un año, razón por la cual resalta la categoría calentamiento global. Al ser la etapa de espumado un proceso que consume grandes cantidades de energía que emite de indirectamente emisiones de CO₂e, se recomienda el uso de energías renovables.

4.2 DISCUSIÓN

4.2.1. ALTERNATIVAS DE MANEJO.

Derivado de los resultados obtenidos de las metodologías de circularidad CET, MCI y el ACV, es primordial valorar alternativas de mejora para el PUR, por lo que se realizó una revisión bibliográfica, obteniéndose las siguientes alternativas:

Reciclaje

El reciclaje químico consiste en romper la molécula larga del polímero en segmentos más cortos mediante una reacción química. Se utiliza el reciclaje químico de residuos de poliuretano debido a la reversibilidad de la polimerización. El reciclaje de la materia prima puede conducir a la recuperación de poliol mediante varios métodos, como acidólisis, glicólisis, hidrólisis y pirólisis:

- Glicólisis es el método más utilizado para el reciclaje químico del PUR como lo ha sido en el proyecto Foam2Foam en España y consta de llevar las partículas de PUR (6 mm) molidas a altas temperaturas adicionando un glicol de alto punto de ebullición, a temperaturas entre 180 a 220°C durante varias horas, con el objetivo de recuperar el poliol. La estructura de poliuretano se degrada por reacciones de transesterificación del enlace uretano con glicoles. El glicol usualmente utilizado es el dietilenglicol junto y el agente catalizador octoato de estaño. Una temperatura mayor o menor a las anteriormente nombradas pueden desencadenar la generación de aminas o subproductos no deseados o una baja actividad del catalizador, respectivamente. En esta reacción se puede generar como productos no deseados 4,4, metilendianilina, el cual puede ser cancerígeno y altamente reactivo en la reacción del poliol. Muchos estudios se han basado en la búsqueda del otro reactivo eficaz y económicamente viable para que esta clase de compuestos no se genere. Para las PUR flexible se hizo efectivo la mezcla de sorbitol / glicerina / agua como agente. Últimamente, se ha reportado en la literatura la utilización de glicerol crudo y glicerina; la aplicación del agente de descomposición glicerina cruda o residual subproducto de la producción de biodiesel junto con el acetato de potasio como catalizador a una temperatura de 225-230 ° C a presión atmosférica, permite obtener el poliol recuperado de manera similar a la reacción de glicólisis (Corredor D., 2013; Datta J., et al., 2018; Márquez M., 2019; Martínez O., 2014).
- Hidrólisis es un proceso en el cual se hace reaccionar el PUR en presencia de agua o vapor de agua a temperatura y presión elevada con hidróxido de metal alcalino como catalizador degradando en poliol poli éter, diamina y CO₂. Esta técnica se lleva a cabo mediante altas temperaturas alrededor

de 300°C y a presiones alrededor de 15 atmósferas. En este tipo de proceso la temperatura es un factor importante y se debe garantizar que esta no sea demasiado alta, ya que puede reducir la recuperación del polioliol y si es muy baja, los polioliol recuperados generarán espumas inestables con mala calidad. Las aminas son un producto de la reacción, no deseadas, como lo son 4,4 diaminodifenilmetano o 2,4 y 2,6 diaminas toluenos, las cuales son cancerígenas y además afectan la calidad del polioliol reciclado aumentando su viscosidad. En la técnica de la hidrólisis, los polioliol reciclados pueden ser utilizados como un monómero en la formación de la PUR y las aminas intermedias se pueden volver a utilizar para producir otros componentes de PUR, por ejemplo, isocianatos (Corredor D., 2013; Martínez O., 2014).

- Pirólisis es un proceso de descomposición térmica de la cadena polimérica de PUR a cenizas, líquidos y gases, en un ambiente libre de oxígeno, temperatura y presión elevada. La pirolisis se lleva a cabo a temperaturas entre 250 a 1200°C. A unos 250°C se comienza a perder masas y a 300°C esta pérdida es del 80 % y el enlace de uretano se rompe dando lugar a isocianatos, mientras que el 20 % de la masa restante no se descompone hasta que la temperatura llega a 500°C descomponiéndose el polioliol formándose cenizas. Un humo líquido viscoso de color amarillo se produce en la primera etapa, seguido por la lenta descomposición del líquido en productos gaseosos; cantidades significativas de monóxido de carbono, metano, cianuro de hidrógeno, amoníaco y monóxido de nitrógeno son liberados. Los productos obtenidos con la pirolisis son entre un 5 a 25% en peso de carbón, 10 a 45% en peso de líquidos y menos de un 40% en peso de gases (Corredor D., 2013; Kemon A., et al., 2020; Martínez O., 2014).

Otras alternativas son el reciclaje mecánico tales como:

- Molienda que consiste en triturar o moler el PUR hasta obtener partículas muy finas de 0.1 a 0.2 mm de diámetro mediante un proceso de pulverización a través de un molino de dos rodillos y posteriormente añadir polioliol e isocianato para obtener nuevamente PUR. Durante el proceso de pulverización no se presenta degradación térmica en la reducción del tamaño de las partículas. Las desventajas de este reciclaje es que las propiedades físicas de la mezcla se pueden ver afectadas debido al tiempo de espuma y carga de relleno y el costo de inversión en la maquinaria (Corredor D., 2013; Datta J., et al., 2018; Martínez O., 2014).
- Presando con adhesivo consiste transformar en pequeñas partículas a los residuos de PUR por un proceso de granulación, que posteriormente se recubren con un adhesivo aglutinante, llevándose a

un curado en una prensa con determinada presión y calor. Este proceso es aplicable tanto para PUR flexible como para PUR rígido. Mediante esta técnica se pueden generar productos como alfombras, pisos para canchas de fútbol y elementos para aislamientos acústicos en los automóviles (Corredor D., 2013; Datta J., et al., 2018).

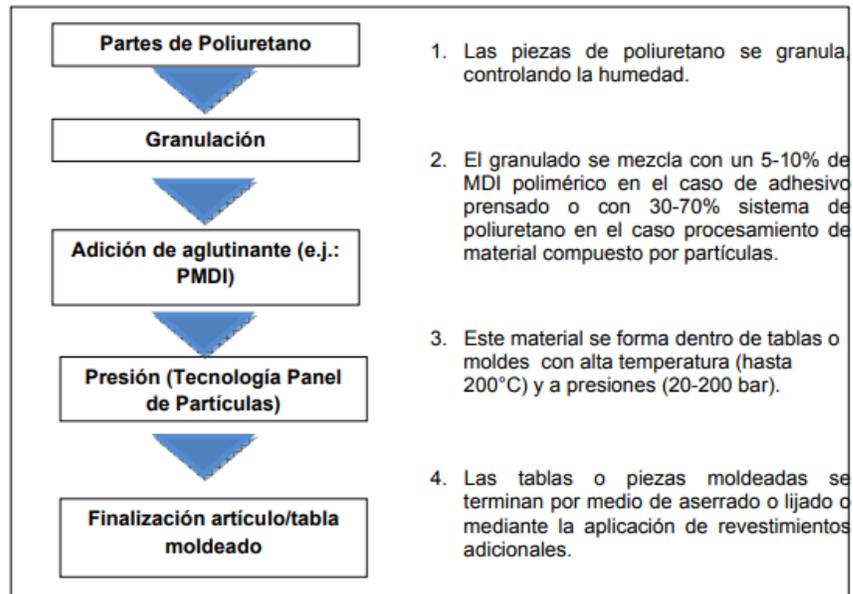


Figura 34. Etapas del proceso de adhesivo prensado.
(Fuente: Corredor D., 2013)

- Prensando sin adhesivo a una temperatura entre 150 a 220 °C para ablandar y auto adherir bajo calor y presión el PUR. Los residuos compuestos de espuma de poliuretano producidos en la producción de revestimientos para techos de automóviles se prensaron para convertirlos en cartón artificial. El tablero formado a una temperatura de más de 150 ° C tiene una resistencia a la flexión de 15 a 28 MPa, una capacidad de absorción de agua de 0 a 2% y una densidad de 1.0 a 1.2 g/cm similar a la del tablero de fibra de densidad media (Kemon A., et al., 2020).

Reutilización

- Placas de yeso-PUR, de acuerdo con el Congreso de Jóvenes Investigadores en Polímeros organizados por la Universidad de Burgos, el grupo de investigadores de Gómez-Rojo R., et al. (2019) abordaron la problemática de la gestión del PUR mediante el uso de técnicas novedosas para su reducción y reutilización. Obtuvieron la alternativa de incorporar el PUR como materia prima a través de la fabricación de nuevos materiales de construcción de placas de yeso-PUR, con el fin de prolongar la vida útil y evitar su disposición final, obteniendo resultados positivos en diversos tipos de residuos de PUR y mejores propiedades como resistencia mecánica adecuada, reducción de la conductividad térmica en un 33% y reducción en el peso del material de construcción en un 31%. A finales del 2017 se creó el proyecto LIFE-REPOLYUSE, el cual se espera concluya en septiembre de 2020 apoyado a través del consorcio en el que participan las empresas Exergy Ltd, TECSA y Yesyforma Europa. (Servicio de Información y Noticias Científicas, 2019) Los beneficios en la aplicación de esta nueva alternativa son varios como lo son la reducción del 30 % en el consumo de energía, el 17 % en el consumo de agua del proceso de construcción, y la rebaja del 18 % en los costos de la construcción, en comparación con los productos existentes en el mercado (Gómez-Rojo R., et al., 2019).
- Recubrimiento anticorrosivo en las estructuras de acero hidráulicas con PUR para evitar exposición y oxidación de la estructura de acero. Con patrones de erosión de varios recubrimientos anticorrosivos viscoelásticos bajo diferentes tiempos de erosión, velocidad de flujo de arena y concentraciones de sedimento bajo flujo de arena el grupo de investigadores de Yang W., et al. (2012) obtuvieron resultados que muestran que la cantidad de abrasión de los recubrimientos está correlacionada logarítmicamente con el tiempo de erosión y exponencialmente correlacionada con la velocidad del flujo de arena concluyendo que la abrasión del revestimiento de poliuretano es menor que la del revestimiento de asfalto epoxi (Yang W., et al. 2012).
- Sustituto de arena para concreto, este método ha sido implementado por la empresa constructora Dow la cual obtuvo el financiamiento internacionalmente ante la Acción Nacionalmente Apropiada de Mitigación que consiste en reducir el PUR a partículas entre 0 a 2 mm para sustituir la arena de concreto. Se realizaron diversas pruebas en diferentes porcentajes en volumen de residuo de PUR, obteniendo buenos resultados en la comprensión del material de concreto. Adicionalmente la empresa Dow elabora paneles de poliuretano que contribuyen a la eficiencia

energética y optimizan el uso de sistemas de refrigeración, como el aire acondicionado (Dow, 2021).

Minimización

Una de las causas de su generación del residuo de PUR en la etapa de espumado de gabinetes de refrigeradores domésticos en la empresa Samsung Electronics México S.A. de C.V., de acuerdo con el autor López D. (2018) es causado por la fuga de espuma aislante en el sistema de refrigeración por el mal dimensionamiento o ensamble de las piezas. Para erradicar esta fuga, el autor implementó en la empresa pruebas con piezas rediseñadas, mejorando el diseño y optimizando del sistema de refrigeración que redujo la fuga de PUR hasta en un 80% dependiendo del modelo del refrigerador. (López D., 2018)

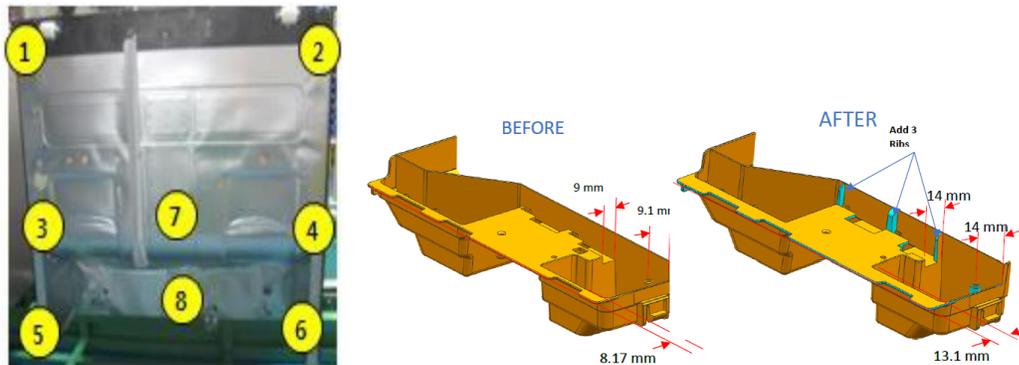


Figura 35. Puntos críticos de fuga de espuma de PUR y ejemplo de piezas modificadas (Fuente: López D., 2018)

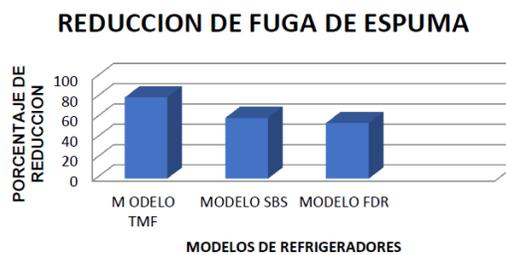


Figura 36. Resultados de reducción de fuga de espuma (Fuente: López D., 2018)

En resumen, las alternativas de manejo para el PUR pueden ser:

Tipo	Proceso	Descripción	Ventajas	Desventajas	Autor
Reciclaje físico	Molienda	Se añade poliol e isocianato para obtener nuevamente PUR al residuo de PUR triturado en partículas muy finas.	Bajo consumo de energía vs técnicas químicas. Método simple.	PUR de baja calidad.	Corredor D., 2013; Datta J., et al., 2018; Martínez O., 2014
Reciclaje físico	Prensado con adhesivo	Se recubre con un adhesivo aglutinante el PUR granulado curándose en una prensa a determinada presión y calor.	Bajo consumo de energía vs técnicas químicas. Método simple.	PUR de baja calidad. Rompimiento de celdas al fracturar los residuos. Disminuye la calidad de la espuma con el tiempo.	Corredor D., 2013; Datta J., et al., 2018
Reciclaje físico	Prensado con calor	Se prensa a una temperatura de 150 a 220 °C para ablandar y auto adherir bajo calor y presión el PUR	Método simple.	PUR de baja calidad.	Kemona A., et al., 2020
Reciclaje químico	Glicólisis	Adición de glicol a punto de ebullición junto con un agente catalizador con el	Se recupera poliol con propiedades de material virgen.	si no se controla la temperatura o se presenta una baja	Corredor D., 2013; Datta J., et al., 2018; Márquez

		objetivo de recuperar el polioli	Consume menos energía que la hidrólisis y pirólisis.	actividad del catalizador, Se desprenden aminos o subproductos no deseados	M., 2019; Martínez O., 2014
Reciclaje químico	Hidrólisis	Se hace reaccionar el PUR en presencia de agua o vapor de agua a temperatura y presión elevada, degradando en polioli poli éter, diamina y CO ₂ .	Se recupera la materia prima polioli.	Aminas pueden aumentar la viscosidad del polioli reciclado. Diaminas aromáticas cancerígenas, no se puede producir isocianato. El polioli no se purifica fácilmente.	Corredor D., 2013; Martínez O., 2014
Reciclaje químico	Pirólisis	Descomposición térmica de PUR a cenizas, líquidos y gases, en un ambiente libre de oxígeno, temperatura y presión elevada.	Los líquidos y gases obtenidos pueden ser utilizados en otro proceso. Pequeña generación de residuos.	Puede generarse subproductos tóxicos debido a las altas temperaturas.	Corredor D., 2013; Kemon A., et al., 2020; Martínez O., 2014

				No se recupera el poliol.	
Reutilización	Placas de yeso-PUR	El proceso consiste en integrar el PUR en la fabricación de placas de yeso.	Resistencia mecánica adecuada. Reducción de la conductividad térmica. Reducción en el peso del material de construcción.	No se recupera el poliol.	Servicio de Información y Noticias Científicas, 2019; Gómez-Rojo R., et al., 2019
Reutilización	Recubrimiento anticorrosivo	Recubrimiento en las estructuras de acero hidráulicas con PUR para evitar exposición y oxidación de la estructura de acero.	Abrasión del revestimiento de PUR menor que el revestimiento epoxi.	No se recupera el poliol.	Yang W., et al. 2012
Reutilización	Sustituto de arena para concreto	Se reducir el PUR a partículas entre 0 a 2 mm para sustituir la arena de concreto.	Buenos resultados en la comprensión del material de concreto. Se utiliza menos agua.	No se recupera el poliol.	Dow, 2021
Minimización	Re-diseño	Modificación de piezas del gabinete para disminuir la fuga de PUR en la	Disminución de la fuga de PUR hasta en un 80%.	Cambios en los procesos	López D., 2018

		etapa de espumado por el mal dimensionamiento o ensamble de las piezas			
--	--	--	--	--	--

Tabla 24. Alternativas de manejo para el manejo del PUR.

(Fuente: elaborado a partir de Corredor D., 2013; Datta J., et al., 2018; Dow, 2021; Gómez-Rojo R., et al., 2019; Kemona A., et al., 2020; López D., 2018; Márquez M., 2019; Martínez O., 2014; Servicio de Información y Noticias Científicas, 2019; Yang W., et al. 2012)

CAPÍTULO 5.

5.1. CONCLUSIONES.

Con la metodología de la EMF se obtuvo un MCI de 0.55 para los gabinetes y puertas de acero y de 0.1 para la espuma de PUR, lo que significa que el PUR tiende a ser completamente lineal y los gabinetes y puertas de acero están en un punto medio entre la circularidad y la linealidad.

Evaluando la circularidad del producto refrigerador con el CET se obtuvo POTENCIAL ALTO DE MEJORA en las áreas de reducción de materiales, optimización de materiales, simbiosis industrial, reciclaje, re-manufactura/renovación, mantenimiento/repación, reciclado de producto, producto como servicio y de POTENCIAL MEDIO DE MEJORA en las áreas de uso y reúso/ redistribución.

El ACV permitió identificar que el PUR tiene mayor impacto ambiental con respecto al acero utilizado para los gabinetes y puertas del refrigerador, en las 4 categorías de daños: salud humana, calidad del ecosistema, cambio climático y recursos, que específicamente sería en las categorías intermedias de energía no renovable, calentamiento global, acidificación / fortificación terrestre, ecotoxicidad terrestre, efectos respiratorios, y sustancias cancerígenas y no cancerígenas. Al ser el PUR el que mayores impactos genera es el que requiere la mayor cantidad de mejoras posibles para reducir los efectos al ambiente.

El cálculo de las emisiones indirectas de gases de efecto invernadero por consumo de electricidad fue de 2,207 toneladas de CO₂e para la fabricación de puertas y gabinetes con PUR en un año, razón por la cual resalta la categoría de calentamiento global. Al ser la etapa de espumado un proceso que consume grandes cantidades de energía que emite indirectamente CO₂, se recomienda el uso de energías renovables.

Debido a que se presentan fugas de PUR en la etapa de espumado de puertas y gabinetes, se generan grandes cantidades de residuos del polímero y de acero, por lo que una de las alternativas posibles para minimizar las fugas, es realizar un nuevo diseño de las piezas del cuerpo del refrigerador, que es una de las alternativas de manejo propuestas.

Si bien existen diversas alternativas para el reciclaje de PUR, la más viable es la glicólisis, debido a que esta permite obtener el polioliol con propiedades de materia prima virgen que el fabricante podrá integrarlo

a su proceso contribuyendo a la economía circular. Este método de reciclaje aún no se ha ejecutado en México, por lo que representa un área de oportunidad de negocio.

La EC demanda cambios profundos en los modelos negocios, razón por la cual este estudio impulsa el camino a trazar en esta empresa de refrigeradores para alcanzar una mayor circularidad, así como insta el surgimiento de nuevos negocios que, si en un futuro se llegasen a aplicar, contribuirán al desarrollo sostenible.

5.2. PERSPECTIVAS.

- Para aumentar la circularidad de los gabinetes y puertas de acero y el PUR, es necesario implementar las alternativas propuestas y volver a hacer el diagnóstico de circularidad confirmando además la disminución de los impactos ambientales.
- Aplicar las alternativas de manejo propuestas para los residuos de PUR, gabinetes y puertas de acero apoyará a la gestión de estos residuos dentro de la empresa.

REFERENCIAS.

1. Baldé C.P., Forti V., Gray V., Kuehr R., Stegmann P., (2017). The global E-waste monitor 2017: quantities, flows and resources. Bonn/Geneva/Vienna, United Nations University, International Telecommunication Union e International Solid Waste Association.
2. Baldé C.P., Magalini F., Kuehr R (2015). E-waste en América Latina: análisis estadístico y recomendaciones de política pública. GSMA/ United Nations University.
3. BASEL (2019). [En línea]. Disponible en: <http://www.basel.int/> [Último día de acceso: 30 de agosto de 2021]
4. Belman-Flores J.M., Barroso-Maldonado J.M., Rodríguez-Muñoz A.P., Camacho-Vázquez G. (2015). Enhancements in domestic refrigeration, approaching a sustainable refrigerator – a review. Elsevier.
5. Beltrán, C.P., (2018). Gestión y prevención de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos: una propuesta para promover la Economía Circular. Actualidad Jurídica Ambiental, número 84, ISSN-e1989-5666, pp. 6-36, noviembre. Fundación Dialnet.
6. Cámara de Senadores (2019). [En línea]. Disponible en: https://www.senado.gob.mx/64/gaceta_del_senado/documento/101326 [Último día de acceso: 30 octubre de 2020]
7. Casares, J. (2003). El nuevo paisaje del consumo. Distribución y Consumo. Universidad Complutense de Madrid.
8. Comisión Europea, (2014). Towards a circular economy: a zero-waste programme for Europe. 398 final, pp. 1-14, julio, Bruselas, Bélgica. Comisión Europea.
9. Comisión Europea, (2016). Ecodesign Working Plan 2016-2019. 773 final, pp. 1-10, noviembre, Bruselas, Bélgica. Comisión Europea.
10. Comisión Europea, (2019). On the implementation of the Circular Economy Action Plan. 190 final, pp. 1-11, marzo, Bruselas, Bélgica. Comisión Europea.
11. Congreso de Quintana Roo (2019). [En línea]. Disponible en: <https://www.congresoqroo.gob.mx/leyes/199/> [Último día de acceso: 30 agosto de 2021]
12. Corredor D. (2013). Evaluación de alternativas para determinar la mejor disposición final del poliuretano rígido. Universidad Libre de Colombia.

13. Cradle to Cradle Products Innovation Institute, (2016). Cradle to cradle certified product standard version 3.1. McDonough Braungart Design Chemistry. Cradle to Cradle Products Innovation Institute.
14. Datta J., Kopczyńska P., Simón D., Rodríguez J.F., (2018). Thermo-chemical decomposition study of polyurethane elastomer through glycerolysis route with using crude and refined glycerine as a transesterification agent. *J Polym Environ* 26, 166–174. CrossMark
15. Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo, (2009). Directiva 2009/125/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 21 de octubre de 2009 por lo que se insta un marco para el establecimiento de requisitos de diseño ecológico aplicables a los productos relacionados con la energía (refundición). *Diario Oficial de la Unión Europea*.
16. Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo, (2011). Directiva 2011/65/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 8 de junio de 2011 sobre restricciones a la utilización de determinadas sustancias peligrosas en aparatos eléctricos y electrónicos. *Diario Oficial de la Unión Europea*.
17. Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo, (2012). Directiva 2012/19/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 4 de julio de 2012 sobre RAEE (refundición). *Diario Oficial de la Unión Europea*.
18. División de Población de la ONU, (2019). *World Population Prospects 2019*. Department of Economic and Social Affairs. United Nations Publications.
19. Dow (2021). Alternativas para la gestión de espumas de poliuretano rígido-retos y oportunidades. Dow Colombia.
20. Earth Overshoot Day, (2021). Past earth overshoot days. [En línea]. Disponible en: <https://www.overshootday.org/newsroom/past-earth-overshoot-days/> [Último día de acceso: 04 de octubre de 2021]
21. Elmore B. J. (2016). *Citizen coke: the making of Coca-Cola capitalism*. ISBN: 978-0-393-35334-1. W.W. Norton.
22. EMF, (2013). *Towards the circular economy 1: economic and business rationale for an accelerated transition*. EMF Publications.
23. EMF1, (2015). *Circularity Indicators: an approach to measuring circularity. Project overview*. EMF Publications.
24. EMF2, (2015). *Circularity Indicators: an approach to measuring circularity. Methodology*. EMF Publications.

25. EMF3, (2015). *Circularity Indicators: an approach to measuring circularity. Non-technical case studies.* EMF Publications.
26. European Urban Knowledge Network, (2015). *The circular city: lessons from Europe.* European Urban Knowledge Network.
27. Evans J., Bocken N. (2014). *Sustainable design and manufacturing.* Instituto de Manufactura de la Universidad de Cambridge.
28. Forti V., Baldé C.P., Kuehr R., Bel G. (2020). *The global E-waste monitor 2020: quantities, flows and the circular economy potential.* Bonn/Geneva/Rotterdam, ISBN Digital: 978-92-808-9114-0. United Nations University, United Nations Institute for Training and Research, SCYCLE Programme, International Telecommunication Union e International Solid Waste Association.
29. Frosch R. A., Gallopoulos N.E., (1989). *Strategies for manufacturing: waste from one industrial process can serve as the raw materials for another, thereby reducing the impact of industry on the environment.* Volumen 261, número 3, pp. 144–152. Scientific American.
30. Fundación Cajanavarra (2017). *Guía para el desarrollo de autodiagnósticos en economía circular en la industria navarra.* Cámara Navarra.
31. Garrido, María A. (2017). *Descomposición térmica y briquetado de residuos de espumas de poliuretano.* Universidad de Alicante.
32. Geng Y., Doberstein B., (2008). *Developing the circular economy in China: challenges and opportunities for achieving leapfrog development.* Volumen 15, pp. 231-239. International Journal of Sustainable Development & World Ecology.
33. Global Footprint Network, (2019). *National Footprint and Biocapacity Accounts 2019 Public Data Package 2003-2019.* Global Footprint Network. Disponible en: <https://data.world/footprint> [Último día de acceso: 30 octubre de 2020]
34. Gobierno de la Ciudad de México (2019). *Plan de Acción de la Ciudad de México para una Economía Circular.* Gobierno de la Ciudad de México
35. Gómez-Rojo, R., Alameda, L., Rodríguez, A., Calderón, V., & Gutiérrez-González, S. (2019). *Characterization of polyurethane foam waste for reuse in eco-efficient building materials.* Polymers 11, número 2: 359. Polymers.
36. González M., Rivada M. (2016). *Caracterización de la espuma rígida de poliuretano expandido como impermeabilizante de cubiertas.* ISSN 1990-8830, volumen 10, número 2. Revista Arquitectura e Ingeniería.

37. Gunter P., (2011). La Economía Azul: 10 años, 100 innovaciones, 100 millones de empleos. Primera edición, ISBN 978-607-421-254-9, pp. 1-334, España. Tusquets Editores.
38. Hoornweg D. & Bhada-Tata P. (2012). What a waste: a global review of solid waste management. Urban Development Series Knowledge Papers. World Bank.
39. Humbert S., Schryver A., Bengoa X., Margni M., Jolliet O., (2012). IMPACT 2002+: user guide. ResearchGate
40. IndustryARC (2021). Polyurethanes Market-Forecast (2021-2026). [En línea]. IndustryARC. Disponible en: https://www.industryarc.com/Report/11682/polyurethanes-market-analysis.html?gclid=Cj0KCQjwrIf3BRD1ARIsAMuugNtnIfF3opVQXqeoNI6tfvN7YTi_4E5GdtMl_gTxFf7V_joIG0lp7soaAkpkeALw_wcB [Último día de acceso: 04 de octubre de 2021]
41. INEGI (2012). [En línea]. Volumen y valor de producción por clase de actividad y producto. Fabricación de aparatos eléctricos de uso doméstico. Centro Nacional de Población y Vivienda. Disponible en: www.inegi.org.mx/ [Último día de acceso: 30 de agosto de 2021]
42. INEGI (2018). Primera Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares. [En línea]. Comunicado de prensa No. 541/18. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2018/EstSociodemo/ENCEVI2018.pdf> [Último día de acceso: 30 de agosto de 2021]
43. ISO1 (2006). ISO 14044:2006 Environmental management — life cycle assessment - requirements and guidelines. ISO
44. ISO2 (2006). ISO 14040:2006 Environmental management — life cycle assessment — principles and framework. ISO
45. Jara N. (2018). Impacto de las políticas energéticas en la industria de la fabricación de refrigeradores domésticos en Latinoamérica: caso México, Colombia y Ecuador. Universidad Pontificia Bolivariana.
46. Jiao, L., Xiao, H., Wang, Q., & Sun, J. (2013). Thermal degradation characteristics of rigid polyurethane foam and the volatile products analysis with TG-FTIR-MS. 98(12). Polymer Degradation and Stability.
47. Kemon A., Piotrowska M., (2020). Polyurethane recycling and disposal: methods and prospects. Polymers 12, número 8: 1752. Polymers.
48. Kemp R., Pearson P., (2007). Final report MEI project about measuring eco-innovation. Numero de Proyecto 044513. Measuring ECO Innovation

49. Kirchherr, J., Reike, D., Hekkert, M., (2017). Conceptualizing the circular economy: an analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, volumen 127, pp. 221-232. Elsevier.
50. Klöpffer, W. (2005). Life cycle assessment as part of sustainability assessment for chemicals. *Environmental Science and Pollution Research*.
51. Larraín P., Morel A., Becerra, M. (2021). Análisis de la gestión ambientalmente responsable de refrigeradores y congeladores de uso doméstico en Chile. Ministerio del Medio Ambiente del Gobierno de Chile/ Fundación Chile/ Superintendencia de Electricidad y Combustibles.
52. Liqin Z., Mingwei L., Linjian W., Chao Z., Erdi A., (2020). Erosion characteristics of viscoelastic anticorrosive coatings for steel structures under sand flow. *Construction and Building Materials*, volume 258, 120360, ISSN 0950-0618. Elsevier.
53. López D. (2018). Rediseño de piezas para la reducción de fuga de espuma aislante en el sistema de refrigeración en el área de gabinetes. Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.
54. MAPAMA (2015). Real Decreto 110/2015 sobre Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos. ISSN: 0212-033X, febrero, sección I, pp. 14211-14312. Boletín Oficial del Estado.
55. MAPAMA (2019). ¿Qué materiales y componentes tienen los RAEE? Ministerio para la Transición Ecológica.
56. Marques A.C., Davies G.F., Evans J.A., Maidment G.G., Wood I.D. (2014). Novel design and performance enhancement of domestic refrigerators with thermal storage. *Applied Thermal Engineering*. Elsevier.
57. Márquez M. (2019). Economía circular de espumas de poliuretano vía reciclado químico. Publicaciones Dyra.
58. Martínez O., (2014). Reciclado por glicólisis de residuos de poliuretano. Estudio de las condiciones de operación. Universidad del País Vasco.
59. McDonough W., Braungart M., (2002). *Cradle to cradle: remaking the way we make things*. Douglas & McIntyre Ltd.
60. Montesinos V. (2013). Una aproximación a la historia de la nevera en España. ISSN-e 2255-2057. Volumen 2, número 2, pp. 157-167. *Revista internacional de investigación en mobiliario y objetos decorativos*.
61. Murray A., Skene K., Haynes K. (2017). The circular economy: an interdisciplinary exploration of the concept and its application in a global context. *Journal of Business Ethics*. Volumen 140, número 3, pp. 369-380. Springer Science and Business Media LLC.

62. OCDE (2001). *Extended producer responsibility: a guidance manual for governments*. Paris, Francia. OCDE Publications Service.
63. OCDE (2017). *Estudios Económicos de la OCDE, México*. Paris, Francia. OCDE Publishing.
64. OCDE (2018). *Global Material Resources Outlook to 2060: economic drivers and environmental consequences*. Paris, Francia. OCDE Publishing.
65. OCDE (2020). *Steel Market Developments Q2 2020*. OCDE Publishing.
66. OIT (2014). *Combatiendo la informalidad en la gestión de residuos eléctricos y electrónicos: El potencial de las empresas cooperativas*. ISBN 9789-2232-9101-3, Ginebra. OIT
67. ONU (2019). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2019*. ISBN: 978-92-1-047889-2, New York. United Nations Publications.
68. PNUMA (2011). *Recycling rates of metals*. ISBN: 978-92-807-3161-3. International Resource Panel.
69. PNUMA (2019). *Global Resources Outlook (2019). Natural resources for the future we want*. ISBN: 978-92-807-3741-7, Paris. International Resource Panel.
70. Prieto-Sandoval V., Jaca C., Ormazabal M., (2018). *Towards a consensus on the circular economy*. *Journal of Cleaner Production*, volumen 179, ISSN 0959-6526, abril, pp. 605-615. San Sebastian, España. Elsevier Ltd.
71. Puckett J. y Smith T., (2002). *Exporting harm: the high-tech trashing of Asia*. The Basel Action Network. Seattle. Silicon Valley Toxics Coalition.
72. Reike D., Walter J.V., Vermeulen, Witjes S., (2018). *The circular economy: new or refurbished as CE 3.0? - exploring controversies in the conceptualization of the circular economy through a focus on history and resource value retention options*. *Resources, conservation, and recycling*, volumen 135, agosto, pp. 246-264. Elsevier.
73. Rocha E., (2010). *Biomimética: de la naturaleza a la creación*. *Revista Ciencias UNAM*.
74. Rubio L., Salinas R. D., Enrique P. (2019). *Biomarcadores involucrados en el asma ocupacional, revisión de la literatura del año 2009 al 2019*. Universidad del Rosario en Bogotá.
75. Ruiz. E y Ruiz P., (2018). *Cerrar el círculo: el business case de la economía circular*. Grupo de Acción Economía Circular ISBN: 978-84-09-02346-2, Julio, pp. 1-36. San Sebastian, España. Forética.

76. Schmidt C., Begin G. V., Houten F. V., Close C., McGinty D.V., Rachna A., Potočník J., Ishii N., Bakker P., Kituyi M., Sijbesma F., Wijkman A., (2020). The Circularity Gap Report 2020. Circle Economy.
77. Secretaría de Economía (2015). La industria de electrodomésticos en México. Unidad de Inteligencia de Negocios. Secretaría de Economía
78. SEMARNAT (2019). Leyes y normas del sector medio ambiente. [En Línea]. SEMARNAT. Disponible en: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/leyes-y-normas-del-sector-medio-ambiente/> [Último día de acceso: 30 de agosto de 2021]
79. SEMARNAT (2020). Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos. [En Línea]. SEMARNAT. Disponible en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/554385/DBGIR-15-mayo-2020.pdf> [Último día de acceso: 30 de agosto de 2021]
80. SEMARNAT (2021). Factor de emisión del sistema eléctrico nacional. [En Línea]. SEMARNAT. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/630693/Aviso_FEE_2020.pdf [Último día de acceso: 30 de agosto de 2021]
81. SEMARNAT2 (2019). Visión nacional hacia una gestión sustentable: cero residuos. [En Línea]. SEMARNAT. Disponible en: https://www.mexicoambiental.com/wp-content/uploads/2019/02/Vision_Nacional_Cero_Residuos_1_FEB_2019.pdf [Último día de acceso: 30 de agosto de 2021]
82. Servicio de Información y Noticias Científicas (2019). El poliuretano encuentra una segunda vida útil como material de construcción. [En línea]. Servicio de Información y Noticias Científicas. Disponible en: https://www.agenciasinc.es/Noticias/El-poliuretano-encuentra-una-segunda-vida-util-como-material-de-construccion?fbclid=IwAR1N5Hv3pII2c1_FZ03NR9VfJYzU2b0UaIIWIQDDhLwsHR2G2Q9EE_zOUhU [Último día de acceso: 30 de agosto de 2021]
83. Stec A.A., Hull T. R. (2011). Assessment of the fire toxicity of building insulation materials. Elsevier.
84. StEP, (2014). One global definition of E-waste. ISSN: 2071-3576. United Nations University/ Step White Paper Series.
85. StEP, (2015). E-waste prevention, take-back system design and policy approaches. ISSN: 2071-3576. United Nations University/ StEP Green Paper Series.

86. SUSTAINN (2016). 5 pasos para descubrir oportunidades de negocio en la economía circular. [En línea]. Mayo, España. SUSTAINN. Disponible en: <http://www.wearesustainn.com/2016/05/5-steps-to-circular-economy-business-opportunities/> [Último día de acceso: 30 de agosto de 2021]
87. Van Buren N., Demmers M., Van der Heijden R., Witlox F. (2016). Towards a circular economy: the role of dutch logistics industries and governments. *Sustainability*, volumen 8, número 7. MDPI Journals.
88. Waste Electrical and Electronic Equipment Forum, (2021). International e-waste day -14 october 2021: consumer is the key to circular economy. [En línea]. Disponible en: <https://weee-forum.org/iewd-about/>
89. WBCSD (2017). Circular Economy and Environmental Priorities for Business. ECOFYS, número de proyecto SISNL17428, Geneva. WBCSD
90. WBCSD (2018). The new big circle: achieving growth and business model innovation through circular economy implementation. WBCSD
91. Wit M., Hoogzaad J., Ramkumar S., Friedl H., & Douma A., (2018). The circularity gap report: an analysis of the circular state of the global economy. Circle Economy.
92. Yang W., Dong Q., Liu S., Xie H., Liu L., Li J. (2012). Recycling and disposal methods for polyurethane foam wastes. *Procedia Environmental Sciences*. Elsevier.
93. Yuan Z., Bi J., and Moriguchi Y., (2006). The circular economy: a new development strategy in China. Massachusetts Institute of Technology and Yale University, volumen 10, número 1–2, pp. 4-8. *Journal of Industrial Ecology*.
94. Zhu D., (2008). Background, pattern, and policy of China for developing circular economy. Research Institute of Governance for Sustainable Development Under Tongji University, volumen 6, número 4, pp. 1-6. Shanghai, China. *Chinese Journal of Population, Resources and Environment*.