



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN INGENIERIA

**CARACTERIZACIÓN DE SUSTENTABILIDAD
Y ENERGÍA DE PIEZAS PLÁSTICAS
INYECTADAS EN UNA MÁQUINA HÍBRIDA**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

DOCTOR EN INGENIERIA

INGENIERIA MECÁNICA

P R E S E N T A

M. EN I. JAVIER NOÉ ÁVILA CEDILLO

DIRECTOR DE TESIS: DR. VICENTE BORJA RAMÍREZ
PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN INGENIERIA

CIUDAD DE MÉXICO., MARZO 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO

DRA. MAGDALENA TRUJILLO BARRAGAN

DR. VICENTE BORJA RAMÍREZ

DR. ALEJANDRO C. RAMÍREZ REIVICH

DR. MARCELO LÓPEZ PARRA

DR. LEOPOLDO RUÍZ HUERTA

AGRADECIMIENTOS

CONTENIDO

RESUMEN

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE.....	3
2.1 Análisis de ciclo de vida	3
2.2 Herramientas software para el análisis de impactos con un enfoque en el diseño y desarrollo de productos.....	5
2.3 Regionalización como concepto de ACV: Etapa de manufactura, análisis de energía en máquinas de inyección de plástico.....	7
2.4 Trabajos relacionados a la caracterización de sustentabilidad y energía en piezas plásticas inyectadas y otras aproximaciones para enverdecer el proceso de piezas plásticas	8
2.5 Conclusiones del estado del arte.....	13
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.....	15
3.1 Objetivos.....	16
3.2 Hipótesis.....	16
3.3 Aportación	17
3.4 Metodología de investigación.....	17
CAPÍTULO 4 TAXONOMÍA DE DATOS DE IMPACTO DE SUSTENTABILIDAD....	20
4.1 Análisis de datos de impacto de herramientas de software para ACV.....	20
4.2 Taxonomía de datos de impacto ambiental con enfoque en el diseño y desarrollo de productos.....	22
4.3 Herramienta para aplicar ACV con enfoque en el diseño y desarrollo de productos.....	29
4.4 Análisis de ciclo de vida, Caso de estudio.....	35
CAPÍTULO 5 ANÁLISIS DE ENERGÍA DE UNA MÁQUINA HÍBRIDA DE INYECCIÓN DE PLÁSTICO EN MÉXICO.....	37
5.1 Metodología y parámetros utilizados para el análisis de uso de energía.....	38
5.2 Perfil de potencia consumida	39
5.4 Energía específica del proceso.....	43
5.5 Energía utilizada por operación	45

5.6 Estrategias de reducción de energía en el proceso.....	46
5.6 Validación de las estrategias de reducción de energía.....	48
CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO.....	49
6.1 Conclusiones.....	49
6.2 Trabajo a futuro	52
REFERENCIAS.....	52
ANEXOS.....	55

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

A partir de los nuevos retos en el campo de la ingeniería ligados al concepto de sustentabilidad, el rol y la visión de los profesionales de la ingeniería y otros campos relacionados ha cambiado (Colin y Richards, 2008). La evolución de productos desde el punto de vista del diseño y manufactura en un contexto global se encuentra ligada directamente al concepto de competitividad y a la sustentabilidad de sus operaciones y productos. La industria de manufactura mantiene un interés particular por la calidad, el costo y la productividad. La nueva dimensión añadida a estos como una mega-tendencia es la sustentabilidad. La industria necesita un sistema confiable de estrategias y métricas, la ciencia de análisis de datos y un mayor entendimiento del comportamiento de los procesos de manufactura convergen para determinar las métricas y estrategias necesarias y lograr los objetivos con una nueva visión de sustentabilidad.

Partimos de un diseño y una manufactura masificada a principios del siglo XX, pasando por una mejora en la eficiencia de procesos a través de herramientas de manufactura esbelta y reconfigurable y actualmente se está adoptando un modelo de diseño y manufactura sustentable a nivel global (Taisch et al. 2013). Los retos implican cambios que van desde mejorar el tipo de energía utilizada para la producción, y la extracción de materia prima, el tipo y el origen de materia prima, la energía utilizada por unidad manufacturada, la selección de materiales, la toxicidad del producto, el tipo de transporte utilizado en la distribución, el tipo de empaque, el nivel de reciclabilidad, el mejor fin de vida entre otros.

Los desafíos tecnológicos y de sustentabilidad han llevado al desarrollo de procesos más eficientes y limpios. La academia y la industria están desarrollando herramientas y metodologías para abordar estos desafíos. Otros problemas, como las nuevas regulaciones del mercado, la legislación ambiental mundial, la escasez de los recursos y el impacto social son preocupaciones crecientes y, por lo tanto, las empresas se encuentran en un estado de presión para ser más eficientes, limpias y cumplir con la normatividad (Thiede,2012), (Fichter y Pfriem 2007), (Brundtland,1987). La medición y evaluación del impacto ambiental y energético han facilitado esta transición al ofrecer la base de una línea para reducciones

sistemáticas y seguimiento del desempeño. Por lo tanto, es necesario desarrollar más metodologías de medición y análisis para evaluar el impacto ambiental, la eficiencia y el uso de la energía en los procesos de fabricación (Mani et al. 2014) (Freeman et al. 1996). Hasta el momento una de las metodologías que son un referente es el análisis de ciclo de vida (ACV)(Ciambrone, 2018), la cual permite evaluar impactos en diferentes etapas de un producto. Es importante señalar que este tipo de análisis nacen en disciplinas ambientales, sin embargo, desde el punto de vista de la ingeniería es importante desarrollar enfoques para el desarrollo de productos utilizando este enfoque de investigación.

La propuesta de esta disertación doctoral va de la mano de los siguientes conceptos: diseño, manufactura sustentable y análisis de ciclo de vida para aumentar la competitividad, entregar mejores productos al mercado y tomar mejores decisiones desde la etapa de diseño todo a la luz de los conceptos de industria 4.0 (Erol, 2016) y de “*data driven design*” (Yin S. et. al. 2015) en donde el tratamiento de información resulta crucial para la toma de decisiones en el diseño y la manufactura.

El objetivo de este trabajo es contribuir al desarrollo de datos, conocimiento y generar herramientas relacionadas al diseño y la manufactura sustentable utilizando una propuesta metodológica basada en el análisis de ciclo de vida en un caso de estudio. El alcance del trabajo consiste en definir una taxonomía de datos (datos relacionados a los impactos ambientales y sociales de un caso de estudio específico de una pieza manufacturada en un proceso de inyección de plásticos, que sea relevante en sus características para la industria) con un enfoque en el diseño basado en datos (*data driven design*) y en la manufactura de productos sustentable. Este arreglo conjunta los resultados de diferentes herramientas de software utilizados para análisis de sustentabilidad y que el autor propone se pueden acoplar desde el enfoque de diseño de productos. Por otra parte siguiendo la línea de análisis de ciclo de vida en la variable de regionalización se generaran datos correspondientes a la energía que se utiliza en México para la etapa de manufactura del caso de estudio. Se define un perfil de consumo de potencia y los datos de consumo específico de energía. La caracterización permite proponer estrategias de disminución de la energía y de disminución del impacto ambiental en el ciclo de vida del producto.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

2.1 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

La Sociedad de Toxicología y Química Ambiental (SETAC) define el proceso de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) como un proceso para evaluar los impactos asociados a un producto, proceso o actividad mediante la identificación y cuantificación del uso de materiales, energía, así como las cargas ambientales. El ACV se encuentra entre las metodologías más utilizadas disponibles hasta la fecha para investigar el desempeño ambiental de una tecnología, un producto o un servicio en las diferentes etapas de su vida útil (Bala et. al. 2010). Un enfoque que proporciona la base para el estudio de las interacciones entre la industria y el medio ambiente es el proceso de evaluación del ciclo de vida (ACV) (Graedel et al 2005). El ACV se utiliza para estimar los impactos globales de un producto (Taisch et al. 2013). Las etapas para el análisis del ciclo de vida convencional de un producto son las siguientes (1) Extracción de materia prima (2) Manufactura (3) Uso (4) Fin de ciclo de vida y una etapa transversal que puede o no ocurrir durante las etapas la (5) Distribución.

Las entradas de información necesarias para realizar el ACV de un producto o proceso son: materiales utilizados, origen de los materiales utilizados, procesos de fabricación, peso de los materiales, información sobre el final de la vida útil, información de la distribución, y por último los consumibles como agua o energía durante el uso. Los resultados del análisis dependen del método o la metodología empleados pero como puede observarse en la figura 1 la calidad del conjunto de datos va evolucionando conforme las interacciones y la fidelidad de los datos, el inventario puede incluir: emisiones al aire, suelo y agua; toxicidad humana; ecotoxicidad, potencial de calentamiento global, daño de la capa de ozono, smog, daño respiratorio y carcinógenos producidos (Wenzel et al. 1997).

El ACV mantiene una naturaleza iterativa y en cada una de las iteraciones se refinan datos para flujos y procesos (*Figura 1*).

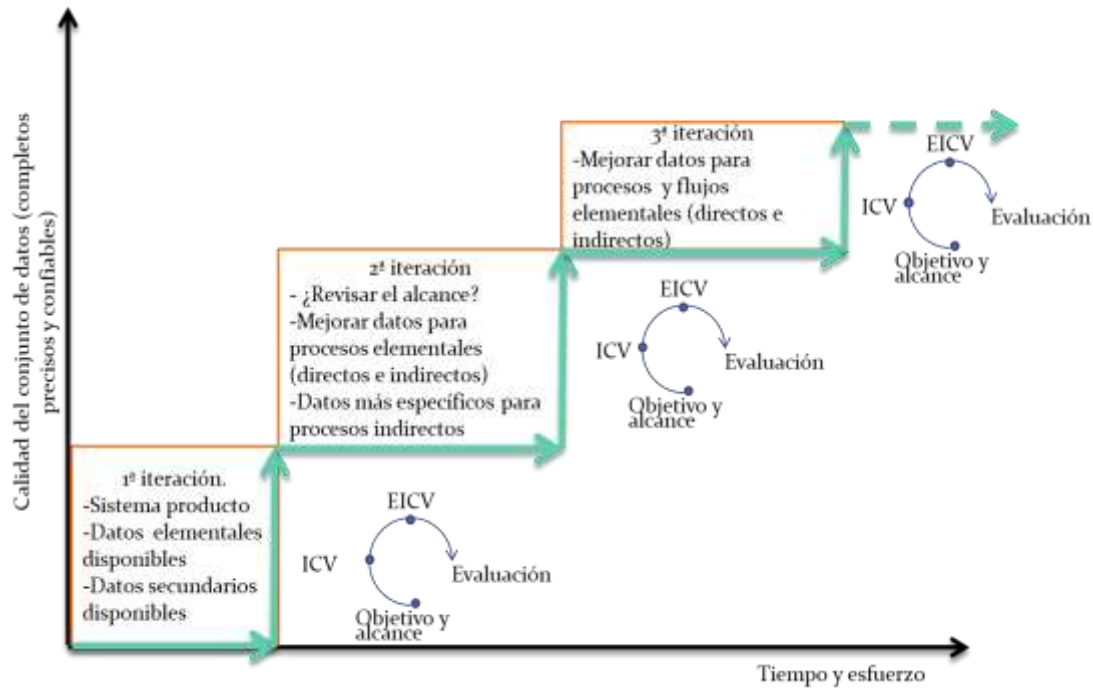


Figura 1 . Esquema de la naturaleza iterativa del ACV (ILCD EC-JRC 2010, adaptado por Hernandez, 2015).

Además del ACV, se han desarrollado otras herramientas para evaluar y establecer procesos tecnológicos. Las más representativas se relacionan con el modelado y la evaluación del ciclo de vida del producto. Chen desarrolló una metodología para analizar estas herramientas y las divide en cuatro enfoques: (1) Aplicabilidad general, (2) Evaluación rápida (3) Aplicación a nivel de planta y (4) Evaluación integral (Chen et al. 2013).

La complejidad para llevar a cabo una evaluación del ciclo de vida es (1) el establecimiento de los límites del sistema, (2) la recopilación de datos (3) la representatividad de los datos y finalmente (4) el correcto análisis de los resultados (Gutowski, 2004).

Los conceptos de Ciclo de Vida más avanzados son los denominados enfoques vinculados a LCA (Por sus siglas en inglés) que incluyen especificaciones para una comprensión más profunda de la dimensión social LCS (Life Cycle Social), la dimensión económica LCC (Life Cycle Cost), así como una integral llamada LCSA (Life Cycle Sustainability Assessment) este último enfoque incluye a la sustentabilidad como la raíz del análisis y de manera transversal. Todos los enfoques se basan en el concepto fundamental de pensamiento del ciclo de vida (LCT) (Zamagni et al. 2013).

Lindow señala que hay varios enfoques orientados a la sustentabilidad, pero no hay ninguno centrado en toda la red de creación de valor de un producto (Lindow et.al. 2012).

El caso del sector manufacturero es relevante pues se hacen ya evaluaciones de sustentabilidad en sus procesos y productos (Koplin et. al. 2007).

2.2 HERRAMIENTAS SOFTWARE PARA EL ANÁLISIS DE SUSTENTABILIDAD CON ENFOQUE EN EL DISEÑO Y LA MANUFACTURA DE PRODUCTOS

La evaluación de la sustentabilidad de los productos se considera una actividad clave y es fundamental definir las herramientas, los métodos y los indicadores correctos para evitar juicios no objetivos (Lane, 2013).

Según el Environment Tools Directory (Aether Ltd., 2011), actualmente existen más de 500 herramientas de contabilidad verde para realizar evaluaciones de sustentabilidad y de impactos ambientales. El volumen de usuarios que utilizan un software se estima en hasta 150,000 usuarios anualmente. Se pueden dividir estos en usuarios para herramientas gratuitas como EIO-LCA u OPEN LCA (Siegenthaler et al., 2005), y usuarios para software comercial, como SimaPro, Gabi, Sustainable Minds (Earthshift, 2011).

Sustainable Minds (SM): es una herramienta a utilizar en la nube. Es usado por la industria, especialmente por empresas manufactureras, por consultorías relacionadas con el diseño y la sustentabilidad, y por el sector académico. SM es un sistema estandarizado que permite la estimación, evaluación y seguimiento del desempeño ambiental, algunos indicadores de la salud humana e indicadores clave ambientales con un enfoque de análisis de ciclo de vida (Sustainable Minds Learning Center, 2013).

El software gestiona la base de datos de la Herramienta para la reducción y evaluación de impactos químicos y otros impactos ambientales (TRACI). Sin embargo, los datos de impacto ambiental utilizados al desarrollar los factores de impacto de SM son genéricos y, por lo tanto, nunca son específicos para un concepto de diseño particular con su cadena de

suministro; también se puede usar para hacer declaraciones externas que se clasifican como declaraciones ambientales de Tipo II, tal como se define en ISO 14021 (Informe de Metodología 2011). SM trabaja con los límites del sistema definidos por Eco-Invent 2.0 y las exclusiones que cubren incluyen mano de obra, gastos generales, bienes de capital, infraestructura, incidentes y accidentes. Los límites básicos del sistema solicitados son los procesos, la etapa de manejo y la etapa final del ciclo de vida.

CES EDUPACK, herramienta Ecoaudit: La herramienta Ecoaudit del programa CES Edupack, es un software de selección de materiales, básicamente utilizado para permitir que los usuarios interactúen con recursos de información de materiales y procesos de manufactura; permite trazar, comparar y aplicar la información a la selección de Materiales. La herramienta de auditoría ecológica presenta a los usuarios conceptos clave en los procesos de manufactura e ingeniería de materiales. La herramienta eco-audit se encuentra disponible en todas las ediciones CES Edu-Pack para un nivel 3 de complejidad (definido por el mismo programa), el modelo combina entradas definidas por el usuario con datos extraídos de bases de datos de energía incorporada de materiales, energías de procesamiento y tipo de transporte para crear el desglose final de consumo de energía. La herramienta también calcula la huella de carbono en CO₂eq. Genera gráficas de barra con las variables de impacto y alenta la exploración de escenarios '¿qué pasaría si?', por ejemplo, explorar el impacto en la sostenibilidad del producto de un material o proceso y su sustitución. (<http://www.grantadesign.com/education/software.htm>).

SimaPro: SimaPro es una herramienta desarrollada por PRé Consultants. Permite a los usuarios modelar productos y sistemas desde la perspectiva del ciclo de vida bajo un esquema metodológico y análisis estadístico y se puede utilizar para modelos y productos complejos. Utiliza diferentes métodos para evaluar y proporciona una base de datos completa y una interfaz descriptiva. Ecoinvent es la base de datos principal para esta herramienta de software (Menke et al 1996). Se pueden calcular la incertidumbre del resultado y proporciona resultados de forma gráfica o bien de forma estadística. Utiliza la normalización de la Sociedad de Toxicología Ambiental y Química SETAC. SimaPro genera resultados utilizando diferentes métodos ReCiPe, USEtox, IPCC 2007, CML IA, Traci 2, BEES, EDIP, Varios métodos de huella hídrica, Indicador ecológico 99, Impacto 2002 y EPS 2000.

El estado del arte de las herramientas de software así como una comparación se informan en (Chen et.al. 2013), desde el enfoque de ACV se hace también una evaluación de las herramientas para evaluación de ACV en (Menke et.al. 1996) y una comparativa en (Ness et.al. 2007) y en (Morbidoni et. al. 2011) el objetivo de Morbidoni es analizar y comparar los resultados proporcionados por dos herramientas Gabi Software y Solid Works software de sostenibilidad, otra comparación se otros trabajos relevantes relacionados se encuentran en (Dornfeld et al. 2012) el trabajo tiene como objetivo informar una comparación de resultados para aplicaciones de empaquetado utilizando: GaBi 4, SimaPro 7.3.3, el Modelado de paquetes de Wal-Mart Stores Inc., ("Wal-Mart Scorecard"), Sustainable Minds, y COMPASS versión 2.0.

En otros trabajos relacionados al análisis comparativo de herramientas se define el concepto herramientas que se complementan (Taisch et.al. ,2013); esto permite proponer complementos de las herramientas es decir tomar datos relevantes de algunas de ellas y conjuntarlas.

2.3 OTROS ENFOQUES PARA MEJORAR LA SUSTENTABILIDAD DE LOS PROCESOS Y PRODUCTOS

Existen varios enfoques para mejorar la sustentabilidad de los procesos y productos. Las definiciones y enfoques representativos se resumen a continuación.

- **Indicador:** los indicadores son medidas simples, generalmente cuantitativas, que representan un estado de desarrollo económico, social y / o ambiental en una región definida. Hay dos tipos de indicadores: (1) integrados y (2) no integrados. Los indicadores e índices reúnen la primera parte de las herramientas de evaluación de sostenibilidad, son eficientes y fáciles de usar (Taisch et. Al. 2013)
- **Evaluaciones relacionadas con el producto:** estas evaluaciones se centran en los flujos relacionados con la producción y el consumo de bienes y servicios. Evalúan el uso de los recursos y los impactos ambientales a lo largo de la cadena de producción o durante el ciclo de vida de un producto (desde la cuna hasta la tumba).Estas

herramientas no integran los sistemas naturaleza-sociedad, ya que se enfocan principalmente en aspectos ambientales. Sin embargo, las herramientas de cálculo de costos del ciclo de vida pueden integrar dimensiones ambientales y económicas (Ness et al 2007). Estas evaluaciones incluyen: la herramienta de evaluación del ciclo de vida (LCA), la herramienta de cálculo de costos del ciclo de vida (LCC), el análisis de flujo de material del producto y el análisis de energía del producto.

- Evaluaciones integradas: este tipo de evaluaciones se utiliza para respaldar decisiones relacionadas con una política o un proyecto en una región específica. Muchas de estas herramientas de evaluación integradas se basan en el análisis de sistemas abarca e integra aspectos de naturaleza y sociedad.
- Herramienta: un conjunto de pasos o procesos para desarrollar o implementar y evaluar que ayuda a los usuarios a definir y comprender los objetivos que intentan alcanzar. Las herramientas pretenden evaluar diversos flujos entre productos y consumos.
- Criterio: una forma de evaluar los atributos de un sistema que debe ser fácil de medir y monitorear, según la información disponible. Deben ser aplicables en una amplia gama, ser robustos y fáciles de entender.
- Herramienta de criterios múltiples: un conjunto de criterios enfocados a un propósito común que muestra un resultado global de lo que están evaluando.

2.4 REGIONALIZACIÓN COMO CONCEPTO PARA MEJORAR LA SUSTENTABILIDAD EN LA ETAPA DE MANUFACTURA: ANALISIS DE ENERGÍA EN MÁQUINAS DE INYECCIÓN DE PLÁSTICO

Los análisis de uso de energía son de particular interés para la industria de moldeo por inyección de plástico, que actualmente tiene un valor de 300 mil millones de euros en Europa (Plastics Europe, 2015) y 300 mil millones de dólares en los Estados Unidos (SPI,2009). Estos análisis pueden conducir a acciones que producen importantes ahorros de costos.

Existe una tendencia en la investigación del consumo de energía en las operaciones de las máquinas de inyección de plásticos con el objetivo de proponer nuevas metodologías para la optimización del uso de la energía en el proceso. Los análisis de energía disponibles para los procesos de moldeo por inyección cubren menos del 2% de los materiales utilizados para aplicaciones de inyección de plástico y la regionalización es clave ya que se tienen datos en Europa, Asia y Estados Unidos (Thiriez y Gutowski, 2006), (Kanungo y Swan, 2008).

Se han reportado análisis de los tres tipos de máquinas de inyección (eléctricas, hidráulicas e híbridas) que utilizan diferentes moldes y materiales. Sin embargo, existe la necesidad de aumentar el número de estudios para cubrir la amplia variedad de materiales existentes en el mercado, el número de aplicaciones como factor de regionalización, el tamaño de muestra experimental reportado en estudios previos, la complejidad de las interacciones parte-material-máquina y la variabilidad de las condiciones ambientales. Estudios como los presentados en (Thiriez, and Gutowski, 2006), (Ribeiro et al. 2012), (Li et al.2015), (Qureshi et al. 2012) han proporcionado datos valiosos a los fabricantes y proveedores de inyección de plástico respecto a consumo energético, perfiles de potencia y consumos específicos de energía.

Algunos de los resultados que reportan los estudios mencionados anteriormente son: el consumo de energía específico (SEC) y el perfil de uso de energía (PUP). SEC refiere a la energía por unidad de masa utilizada en el proceso y PUP al gráfico que representa la energía consumida por ciclo de inyección. La disponibilidad de análisis de uso de energía para proporcionar información de SEC y PUP en los procesos de inyección sigue siendo escasa, principalmente debido a que la cantidad y variedad de materiales de polímero siguen aumentando en todo el mundo. Se identificaron vertientes en el trabajo previo en dos grupos, (1) análisis empíricos y (2) análisis teóricos; estudios empíricos llevaron a cabo experimentos en diferentes máquinas utilizando una variedad de materiales en donde algunos propusieron un modelo para predecir el consumo de energía para máquinas y materiales similares o simplemente se centraron en validar el modelo que utilizaron. Los estudios empíricos por otra parte pueden generar un modelo de predicción de energía o no, mientras que los modelos

teóricos que se basan en ecuaciones que rigen los fenómenos y los modelos se validan mediante el uso de metadatos extraídos del análisis empírico previo.

Al alimentar datos empíricos en modelos teóricos, se ha respaldado con éxito el esfuerzo por desarrollar predicciones de consumo de energía más precisas. También se ha ayudado a cumplir con la divulgación limitada de información en nombre de los fabricantes de máquinas herramienta (Qureshi et.al. 2012) y la generación de metadatos para mejorar la confiabilidad en modelos aplicados en más materiales y tipos de máquinas. Esta última tendencia abre una oportunidad para más análisis empíricos que podrían ayudar a ampliar el número de modelos teóricos y empíricos precisos. El principal detonador para ambos clusteres es la reducción del consumo de energía.

Thiriez y Gutowski inician la investigación sobre energía y análisis ambiental del proceso de moldeo por inyección. Su trabajo informó las diferencias en el rendimiento ambiental y el uso de energía entre máquinas hidráulicas y eléctricas; también mostraron las diferencias dentro del PUP de una máquina híbrida y totalmente eléctrica, ambas ejecutando la misma pieza con un tiempo de ciclo de 14 segundos (Thiriez, and Gutowski, 2006). El PUP que reportan fue proporcionado por una compañía que lo generó utilizando un analizador de energía sin tratamiento estadístico o numérico (Figura 2). Ribeiro, Pecas y Henriques presentaron un análisis de energía de una máquina de moldeo de inyección hidráulico con dos cañones de calentamiento utilizando partes de polipropileno y caucho, los autores también obtuvieron los perfiles de consumo de energía de los componentes de la máquina proporcionados por un software de análisis de energía los autores también reportaron un gráfico de la energía consumida por los componentes de la máquina y la SEC para los materiales usados, así como un modelo de termodinámica que estima, en una fase temprana de diseño, la energía necesaria para la manufactura utilizando los dos materiales (Ribeiro et. al. 2012).

Li, Kara y Qureshi caracterizaron la energía y la ecoeficiencia de un proceso de moldeo por inyección. Su trabajo tuvo como objetivo obtener la relación entre el consumo de energía y los parámetros del proceso a partir de observaciones experimentales y una metodología DOE para máquinas hidráulicas. Reportaron el PUP y el SEC basados en ecuaciones (Li et. al.

2015) (Figura 3). En otro trabajo, Li, Kara y Qureshi informaron un experimento que se realizó en una máquina de moldeo por inyección hidráulica que producía una pieza inyectada de poliestireno (Qureshi et. al. 2012), el PUP que obtuvieron se muestra en la Figura 4. Madan presentó una evaluación del rendimiento energético de procesos de inyección (Madan et.al. 2014); Kanungo y Swan informaron sobre las ventajas y desventajas de las máquinas totalmente eléctricas en comparación con las máquinas hidráulicas e híbridas, los parámetros del proceso que afectan el consumo de energía y la comparación del consumo de energía de las máquinas totalmente eléctricas sobre las hidráulicas (Kanungo and Swan 2008) . Chen y Dornfeld introdujeron un modelo semi-empírico de la energía consumida durante el proceso de moldeo por inyección basado en el modelado termo-mecánico y el meta-análisis para la comparación con modelos teóricos (Chen and Dornfeld, 2013).

Otros trabajos representativos relacionados con la energía y la máquina de moldeo por inyección son: (Mattis,1996) quien presentó un método para vincular las decisiones de diseño, los parámetros y el consumo de energía para el diseño de piezas de moldeo. En un trabajo reciente, Spiering informó sobre un sistema de control de apoyo para el diseño de productos y procesos que considera las evaluaciones de sostenibilidad de los productos inyectados de plástico y la predicción del consumo de energía (Spiering et.al.2013)

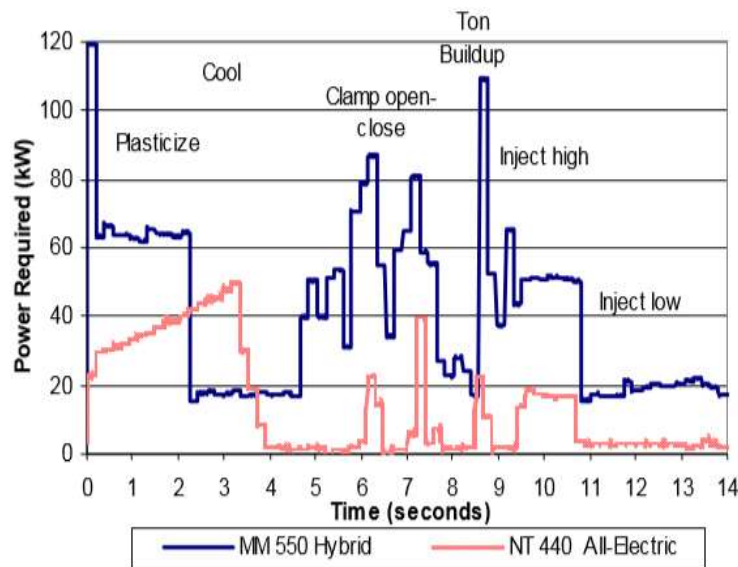


Figura 2. PUP reportado por Thiriez and Gutowski (2006)

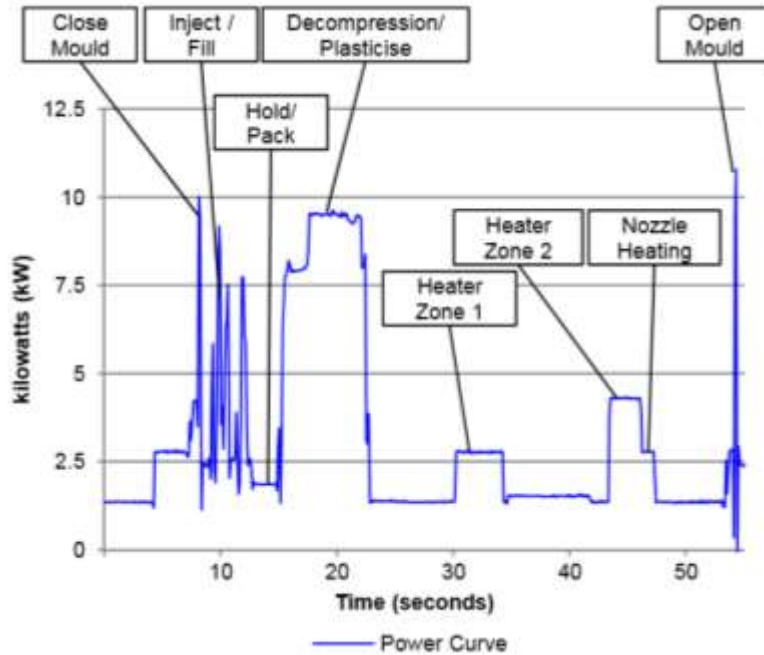


Figura 3. PUP reportado por Li, Kara, (Qureshi and Herrman 2012)

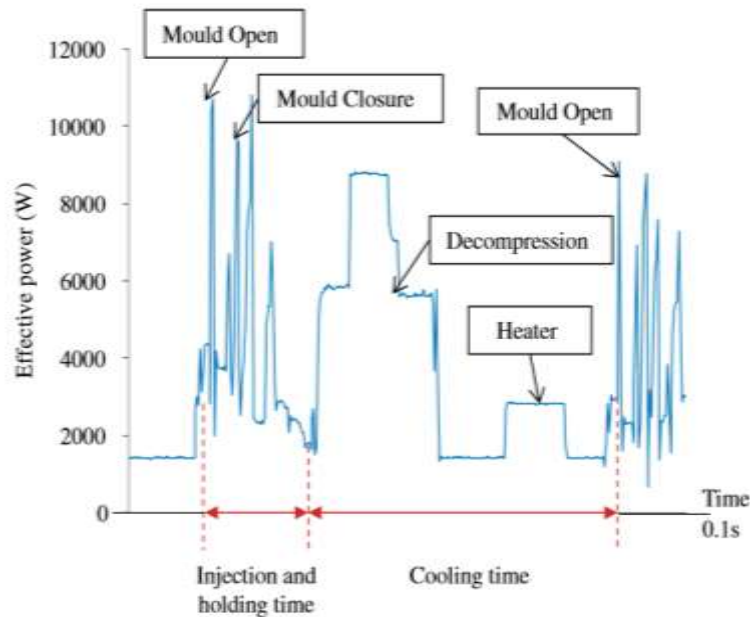


Figura 4. PUP reportado por Li, Kara, and Qureshi (2015)

Es importante resaltar que los PUP y el SEC se han utilizado para que muchos autores caractericen el comportamiento energético de los procesos de moldeo por inyección y que la mayoría de los autores han informado PUP para diferentes máquinas, materiales y moldes. Por otra parte, otras propuestas para enverdecer el procesamiento de piezas plásticas y relacionados con la caracterización de sustentabilidad y energía son (Schiffers et.al. 2016) en

el artículo se propone un control adaptativo para compensar las desviaciones de viscosidad que se tienen en cada carga de material al alimentador principal de la máquina de inyección de plástico manteniendo una viscosidad constante en el proceso.

(Motiva et.al.2013) proponen un método para la mejora del reciclaje al incorporar cantidades menores de polímero virgen en presencia de compatibilizadores esto resulta en la obtención de mejores propiedades mecánicas cuando se compara con polímero de desecho. Por ejemplo el mezclar PLA con PET reciclado ha dado buenos resultados ya que la estabilidad térmica que se alcanza es similar a la de PET virgen.

(Kengkhetkit and Amornsakchai, 2013) propone el uso de materiales compuestos para reducción de la energía utilizada en la obtención de la materia prima por ejemplo cascara de piña con polipropileno para reforzar plásticos donde la cantidad de energía utilizada para la producción de esta materia prima es de 2.27 MJ/kg y comparado con la materia prima virgen de fibra de vidrio es de 100 MJ/kg.

2.5 CONCLUSIONES DEL ESTADO DEL ARTE

La cantidad de análisis para la caracterización de sustentabilidad y energía para el proceso de inyección de plástico son limitados, es pertinente generar análisis de sustentabilidad y energía en más materiales, geometrías y tipos de máquinas de inyección utilizando dos enfoques: el de regionalización y el enfoque del análisis de ciclo de vida. Por otra parte, es necesario analizar el uso de energía sistemáticamente de tal manera que se ayude a comprender las variables de los sistemas de manufactura para mejorar la eficiencia y el ahorro en todos los niveles, dadas las interacciones existentes entre elementos, parámetros y variables.

Es necesario aumentar la fidelidad de los Perfiles de Uso de Potencia (PUP) y conocer la energía específica de más materiales y dado el enfoque de regionalización proponer piezas relevantes para el país a fin de tomar mejores decisiones durante el diseño y la manufactura. Existen más de 500 herramientas que permiten realizar evaluaciones de sustentabilidad y de impactos ambientales de manera teórica, el análisis de ciclo de vida es el método de evaluación más utilizado a nivel mundial; el tiempo que se dedica a un análisis de ciclo de

vida va de la mano con el alcance y el objetivo del análisis, existe la posibilidad de utilizar resultados de diferentes herramientas. La calidad del conjunto de datos generados evoluciona conforme las interacciones y la fidelidad de los datos; para los desarrolladores de productos es importante identificar que herramientas son afines a los objetivos y al alcance del análisis y cuál de estas proporcionan información para una mejor toma de decisiones.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

Evaluar los impactos de sustentabilidad de productos y procesos es una actividad trascendental para la academia y la industria debido a los cambios incrementales en las regulaciones en productos y procesos a nivel mundial (Dornfeld, 2012). La cantidad de análisis para la caracterización de sustentabilidad y energía para el proceso de inyección de plástico son limitados, es pertinente generar investigación en sustentabilidad y energía en más casos de estudio de plásticos inyectados utilizando dos enfoques: el de regionalización y el enfoque del análisis de ciclo de vida.

Es necesario analizar el uso de energía sistemáticamente de tal manera que se ayude a comprender las variables del proceso de manufactura para proponer estrategias de menor consumo energético, dadas las interacciones existentes entre elementos, parámetros y variables. Las estrategias y métricas que se definirán en esta disertación doctoral refieren a variables dinámicas directamente ligadas a los impactos energéticos y ambientales de un caso de estudio a lo largo de su ciclo de vida. Bajo el enfoque de regionalización es importante destacar el tipo de piezas que se producen en el país, las piezas que se inyectan en México en un mayor volumen son aquellas de 300 cm² a 800 cm², considerando lo anterior en esta investigación se decidió trabajar en piezas de 500 cm².

Es necesario realizar y aumentar la fidelidad de Perfiles de Uso de Potencia (PUP) en más materiales y máquinas a fin de conocer la energía específica de más materiales y el comportamiento de la potencia y la distribución de la energía con respecto al tiempo ciclo, basados en el enfoque de regionalización proponer piezas relevantes para el país a fin de tomar mejores decisiones durante el diseño y la manufactura.

Por último, es importante identificar que herramientas son afines a los objetivos y al alcance de los desarrolladores de productos y cuál de estas proporcionan información relevante para una mejor toma de decisiones tomando como una oportunidad de investigación el

complementar los resultados de estas herramientas a través de taxonomías de datos específicas a los perfiles de los analistas y al alcance del estudio.

3.1 OBJETIVO

El objetivo de esta disertación doctoral es caracterizar indicadores de sustentabilidad y energía en piezas plásticas inyectadas de ABS de 500 cm² utilizando una máquina de inyección híbrida con un enfoque en las etapas del ciclo de vida de piezas plásticas inyectadas.

3.2 ALCANCE

Para esta caracterización, se definirá un arreglo de datos que incluye impactos ambientales del producto con un enfoque en el diseño basado en datos (*data driven design*) y en la manufactura de productos sustentable. Este arreglo conjunta los resultados de diferentes herramientas de software utilizadas para análisis de sustentabilidad. Para la caracterización de la energía se definirá un experimento utilizando una parte de ABS de 500 cm² y una máquina de inyección híbrida y se obtendrá un perfil de consumo de potencia y los datos de consumo específico de energía utilizada durante la inyección en una máquina híbrida, ambas caracterizaciones permitirán proponer estrategias de disminución de la energía y de disminución del impacto ambiental en el ciclo de vida de este producto y de otros productos que utilicen como proceso la inyección de plásticos.

3.3 HIPÓTESIS

- 1) Es posible definir un perfil de consumo de potencia y los datos de consumo específico de energía utilizada durante el proceso de inyección de piezas de ABS de 500 cm² en una máquina híbrida y proponer estrategias de disminución de la energía.
- 2) Es posible definir métricas y estrategias que ayuden a la toma de decisiones para el diseño y la manufactura de productos plásticos inyectados que tengan un menor consumo de energía y un menor impacto ambiental.

- 3) Es posible definir una taxonomía de datos que permita caracterizar los impactos de un producto a partir de los resultados de diferentes herramientas de software para el análisis de ciclo de vida con un enfoque en el diseño y desarrollo de productos.

3.4 APORTACIÓN

1. Obtención y análisis del perfil de consumo de potencia y los datos de consumo específico de energía utilizada durante la inyección de piezas de ABS de 500 cm² en una máquina híbrida.
2. Identificación de métricas y estrategias para el diseño y manufactura de productos plásticos inyectados que reduzcan el consumo de energía y el impacto ambiental.
3. Definición de una taxonomía de datos para conjuntar resultados del análisis de ciclo de vida de diferentes herramientas de software y definición de las métricas de ACV para productos de plástico inyectados.

3.6 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

La metodología de investigación utilizada para obtener estrategias y métricas para la disminución de consumo de energía y de impactos ambientales en piezas plásticas inyectadas consiste en elaborar el análisis de ciclo de vida de un caso de estudio relevante y para sustentar, caracterizar y evaluar, estas métricas se considerarán dos mecanismos: (1) la evaluación del ciclo de vida (ACV) del producto utilizando herramientas de software y (2) un enfoque de regionalización para la obtención de datos energéticos reales en la etapa de manufactura en México.

Actividades complementarias en la metodología de investigación fueron: (1) Uso y evaluación de las herramientas de software para el modelado de ciclo de vida en diferentes casos de estudio para definir la taxonomía de datos de impacto, (2) Búsqueda del socio tecnológico y del caso de estudio, (4) Creación de una herramienta basada en una hoja de cálculo para el desarrollo de la taxonomía de datos.

El propósito del análisis de energía es generar el perfil de uso de energía (PUP) de un ciclo de inyección de dos partes inyectadas diferentes con una superficie proyectada similar, utilizando ABS. Además, se estima el consumo específico de energía (SEC, por sus siglas en inglés) por unidad fabricada, y se representan los perfiles de la distribución de energía

desglosados en cada operación del proceso. El método utilizado para llevar a cabo el análisis se presenta en la Figura 5. Se definió un experimento para cumplir los objetivos del análisis. El experimento se llevó a cabo en las instalaciones de un socio tecnológico ubicado en la región central de México bajo condiciones ambientales de 24° C a 28 °C y de 20% a 28% de humedad relativa. Se seleccionaron dos partes representativas de ABS del catálogo del colaborador para el experimento con un área proyectada de 500 cm² y un espesor de 2 mm. Los moldes para estas piezas eran de producción de alto volumen, una sola cavidad con canales de enfriamiento y sistema de eyección. La máquina híbrida de inyección del colaborador cumplió con los requisitos de presión y tamaño para producir cada pieza.

El protocolo del experimento se muestra en la Figura 6. Esto incluyó los instrumentos y condiciones para la medición de la temperatura y humedad ambiental, la definición de los parámetros de inyección para producir las piezas y las condiciones e instrumentos necesarios para la recopilación de datos de consumo de energía.

Se utilizó la producción por lotes de 156 partes en función de la capacidad de la tolva de la máquina para cada experimento de estudio de caso. La recolección de datos de energía se realizó para dos operaciones, para el ciclo de arranque y para el ciclo regular de inyección, usando un analizador de calidad de energía. Los datos obtenidos durante el experimento se analizaron utilizando dos métodos: la regla trapezoidal y los límites superior e inferior.

Para obtener el PUP, se utilizaron los criterios estadísticos de modo, y para el SEC y la distribución de energía en un nivel de operación, se empleó el método numérico de la regla trapezoidal. La energía consumida por las operaciones fue procesada y presentada en diagramas de Sankey para facilitar la visualización de la distribución de la energía.

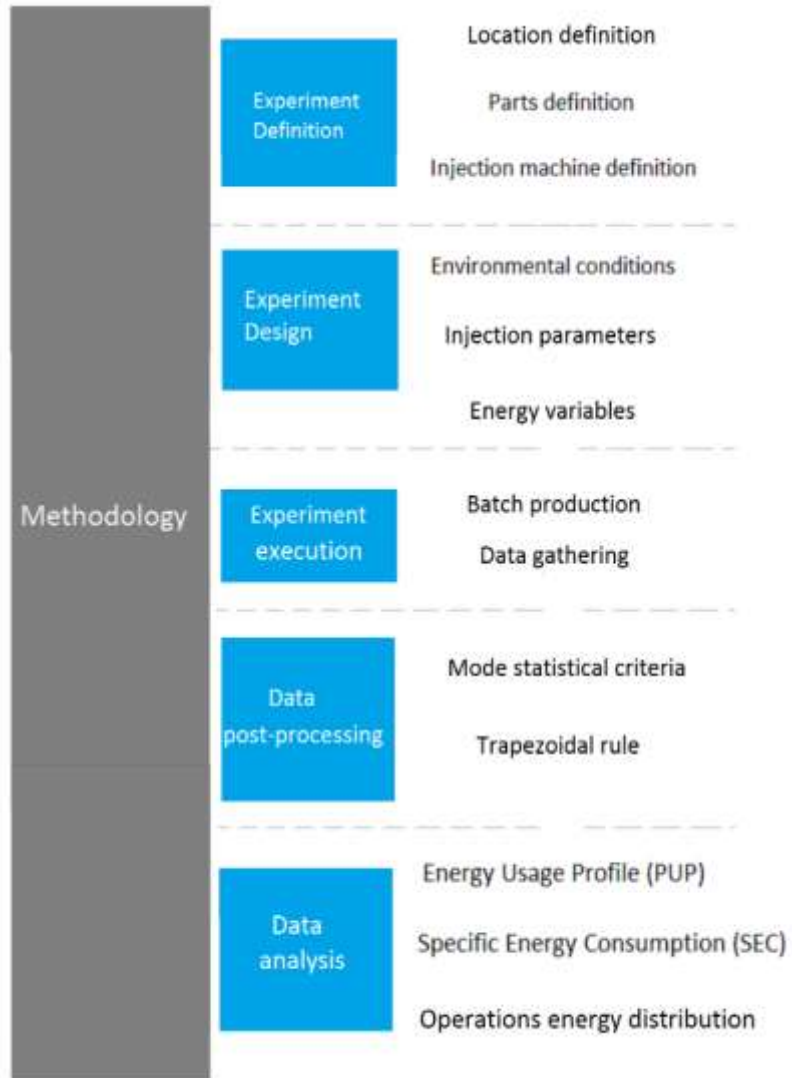


Figura 5. Metodología para el análisis de energía en sitio (Ávila et.al. 2017)

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA: TAXONOMÍA DE DATOS DE IMPACTO, HERRAMIENTA ACV, APLICACIÓN DE CASO DE ESTUDIO

4.1 Análisis de datos de impacto de herramientas de software para ACV

La disponibilidad y el alcance de las herramientas existentes para evaluar la sostenibilidad de los productos está creciendo para satisfacer las necesidades de la industria. Para aquellos relacionados con el diseño de productos y el diseño de la cadena de suministro en las universidades y la industria, la cantidad de características y capacidades de las herramientas actuales de ACV no están vinculadas directamente a las decisiones de diseño de manufactura y de la cadena de suministro. El objetivo de este capítulo es reportar los indicadores y los impactos de las cargas ambientales que arroja el Análisis de Ciclo de Vida ACV de una pieza plástica inyectada de 500 cm². El enfoque seguido por el autor fue bajo el concepto *Rapid-LCA* el cual complementa los resultados de tres herramientas de ACV y los conjunta en una taxonomía desarrollada por el autor para poder verter los datos y visualizar los datos del inventario de cargas ambientales para la posterior toma de decisiones. Las herramientas generan resultados específicos de acuerdo al propósito de estudio y de alcance del análisis (Ávila et.al.2014). La tabla 1 muestra los resultados que proporcionan herramientas software seleccionadas por su relación al análisis de impacto desde un enfoque del diseño y el desarrollo del producto.

Tabla 1. Indicadores de sustentabilidad considerados por distintas herramientas software

	Herramienta 1	Herramienta 2	Herramienta 3
Huella de Carbono emitida en la extracción de materia prima	X		
Huella de carbono emitida en la etapa de manufactura	X		
Huella de carbono emitida en el Uso	X		
Huella de carbono emitida en la distribución		X	
Huella de carbono emitida durante el desecho	X		
Huella de carbono total		X	X
Energía Utilizada en extracción de materia prima	X		
Energía Utilizada en la etapa de manufactura	X		
Energía utilizada en la etapa de desecho	X		
Energía total utilizada en el producto final		X	
Agua utilizada en la extracción de materia prima	X		
Agua utilizada en la manufactura	X		
Suelo erosionado			X
Toxicidad		X	X
Carcinogenos		X	X
Impactos al sistema respiratorio		X	X

Los indicadores de sustentabilidad que cada una de las herramientas puede proporcionar al usuario se muestran en la primera columna. La tabla permite a los usuarios determinar que indicadores puede obtener de acuerdo al alcance y al objetivo del ACV realizado con cada herramienta en particular. Como se puede observar con ninguna de las herramientas se obtienen todos los indicadores posibles.

4.2 TAXONOMÍA DE DATOS DE IMPACTO CON ENFOQUE EN EL DISEÑO Y DESARROLLO DE PRODUCTOS

La principal contribución de esta taxonomía de datos es el complemento de la información sobre los indicadores surgidos en las herramientas de software y el vínculo con las decisiones del diseño y manufactura con un enfoque basado en el ACV. Los resultados incluyen indicadores como: uso de energía, eficiencia, impactos ambientales y toxicidad humana.

La primera sección de datos es el relacionado a la Información General del Análisis (Figura 6), esta sección tiene como propósito el depositar datos del objetivo y el alcance del análisis, los límites funcionales del análisis es decir lo que incluye y lo que excluye, a quien esta dirigido y si existen consideraciones especiales al análisis.

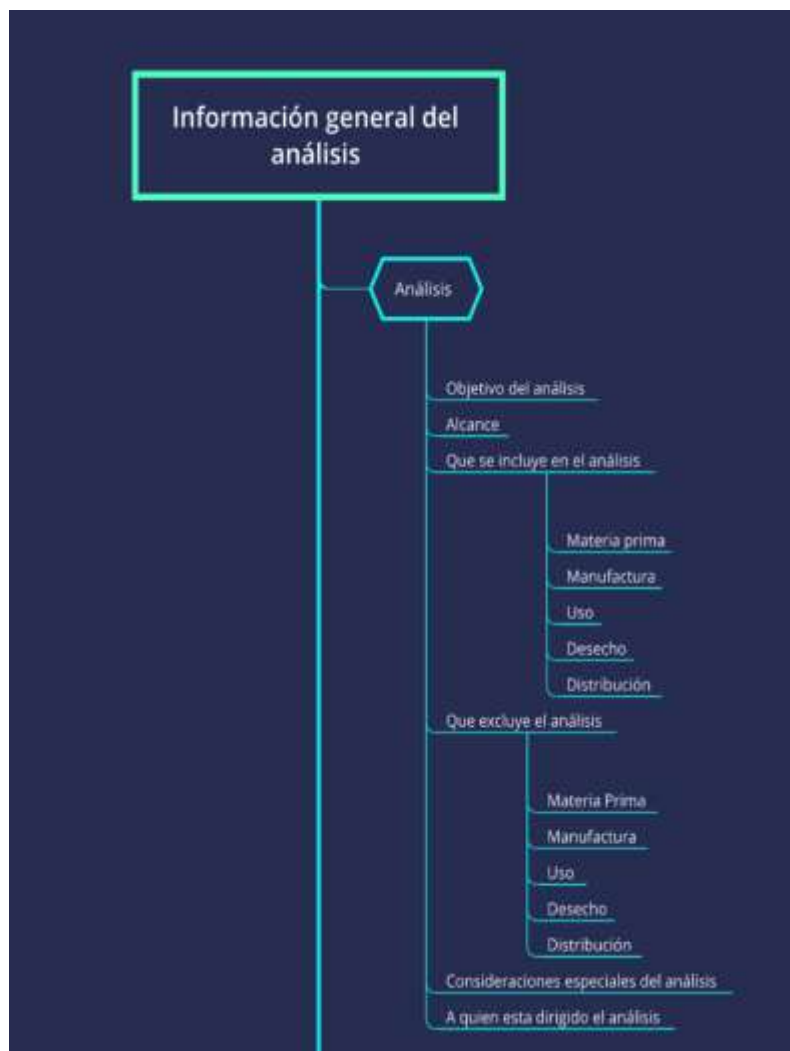


Figura 6. Taxonomía, Información general del análisis-Análisis

En el siguiente arreglo de información se tienen datos relacionados a la empresa que está desarrollando el análisis (Figura 7), esta sección permite delimitar los alcances ambientales de la empresa, se delimita la fidelidad de los datos de la cadena de proveeduría y las políticas ambientales con las que cuenta la empresa.

El siguiente arreglo de información está relacionado con el producto (Figura 7), se describe en lo general el producto a analizar, los componentes que conforman el producto, el tiempo de vida para el que el producto fue diseñado, la función principal, el volumen de producción y el costo general del producto.

Por último como se puede ver en la (Figura 7) se describe a la Unidad Funcional, la unidad funcional permite delimitar las fronteras del producto, La unidad funcional es una medida del desempeño del producto en este caso la información requerida es Descripción de la Unidad Funcional y la Métrica de la Unidad Funcional.



Figura 7. Taxonomía, Información general del análisis: Empresa-Producto-Unidad Funcional

La siguiente sección es la relacionada a los componentes del producto (Figura 8), en esta sección se define el inventario de impacto y los indicadores de impacto a nivel componente. En el primer arreglo de datos se definen los datos generales del componente y sus características. El siguiente arreglo de datos esta relacionada con la extracción de materia prima que incluye información de la obtención de la materia prima, los procesos que se utilizaron en la extracción, la energía que se utiliza, la cantidad de agua utilizada, los impactos al aire emitidos, los impactos al suelo y los impactos a la salud.

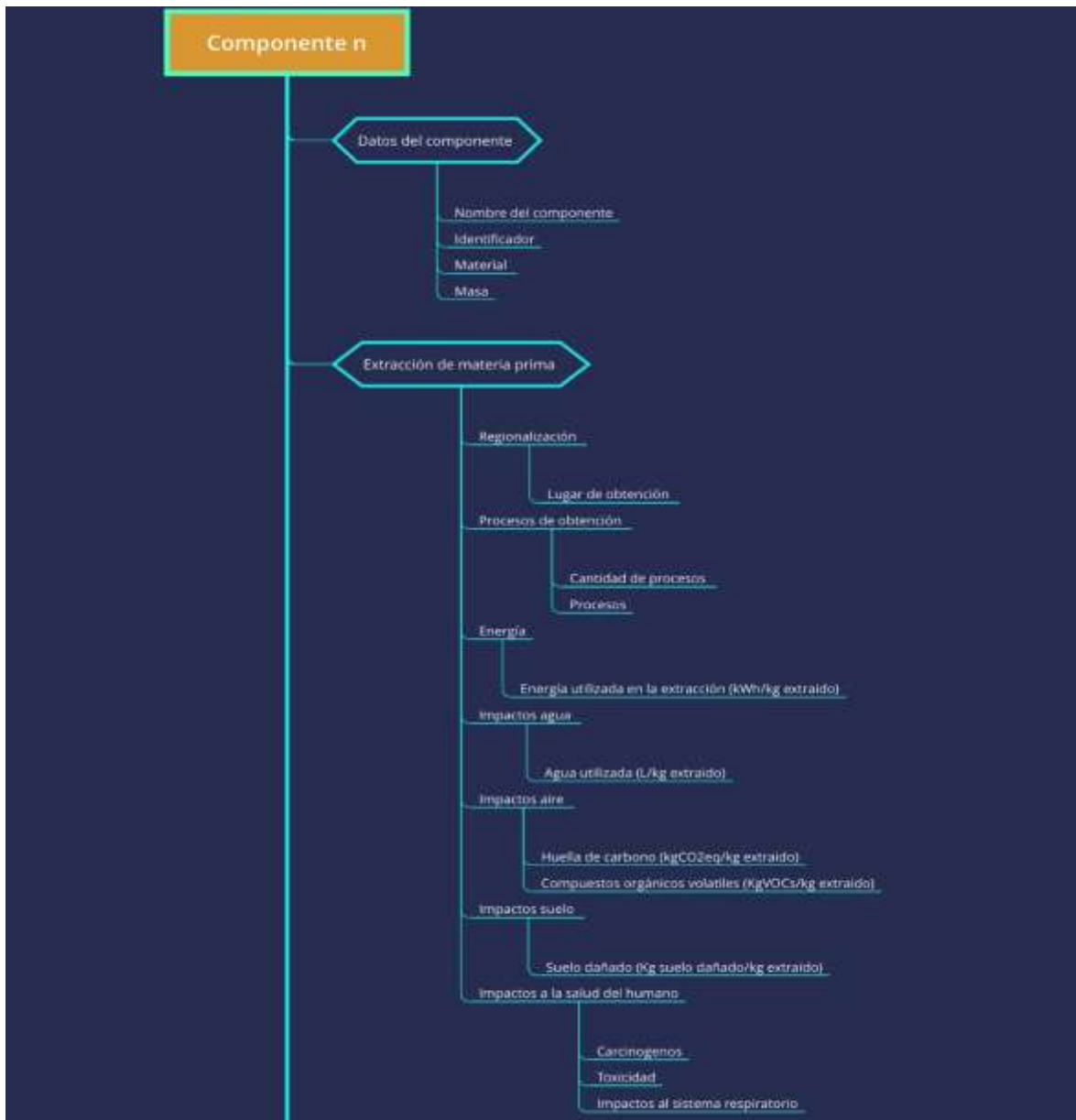


Figura 8. Taxonomía, Análisis de impactos a nivel componente: Datos del Componente, Extracción de materia prima

El siguiente arreglo de datos en la sección de componentes del producto es el relacionado a los impactos generados durante la manufactura del componente (Figura 9), se define el lugar en donde se realiza la manufactura dado el enfoque de regionalización de la taxonomía y la trazabilidad de los datos, se definen los procesos de manufactura, la energía utilizada en los procesos de manufactura, los impactos al agua, los impactos al aire, los impactos al suelo y los impactos a la salud del humano.

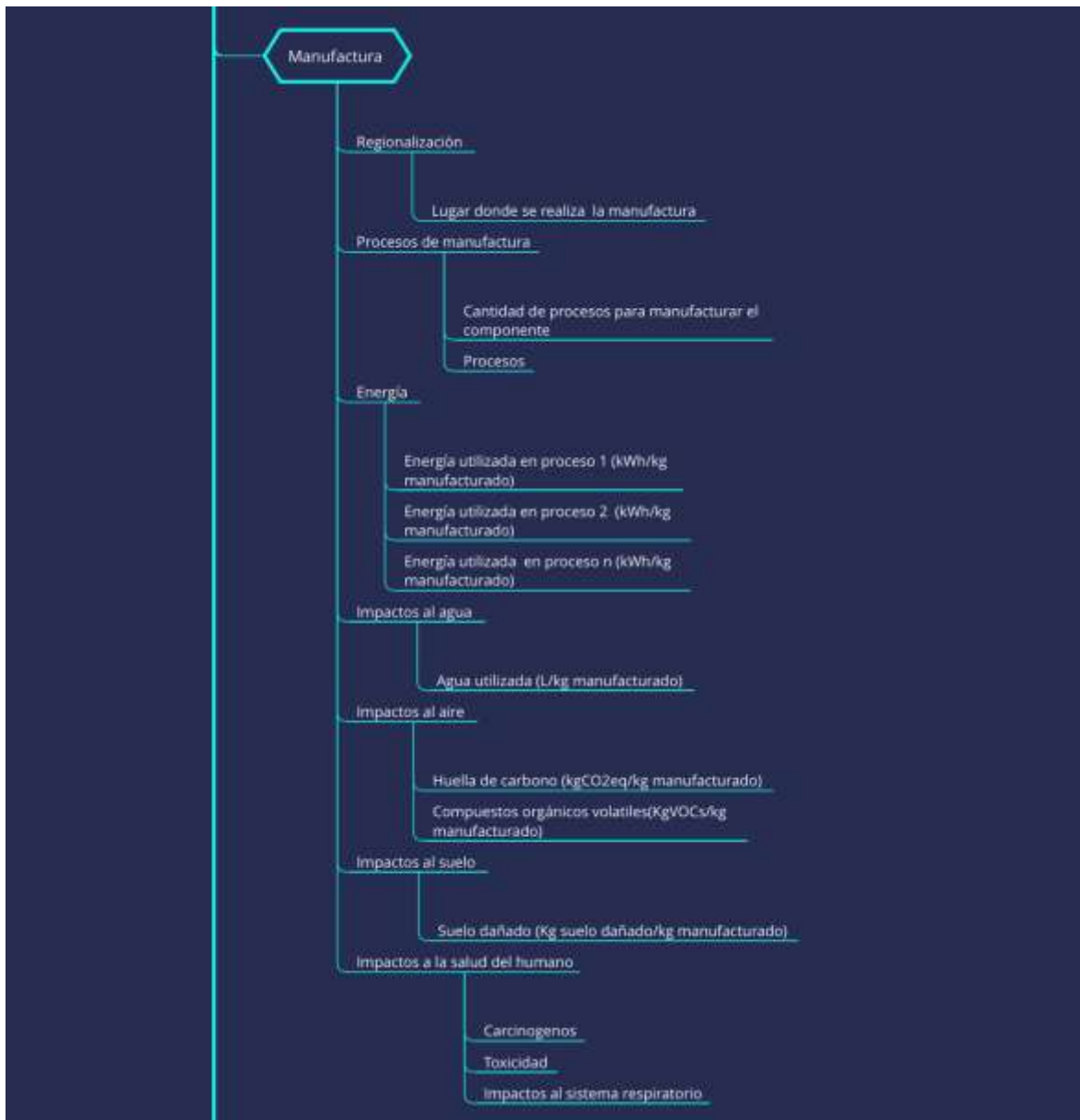


Figura 9. Taxonomía, análisis de impactos a nivel componente -Manufactura

El siguiente arreglo de datos en la sección de componentes del producto es el relacionado a los impactos generados durante el uso del componente (Figura 10), se define el tiempo de vida para el que fue diseñado, el lugar en donde se utiliza, la energía utilizada durante el uso del componente, los impactos al agua, los impactos al aire, los impactos al suelo.

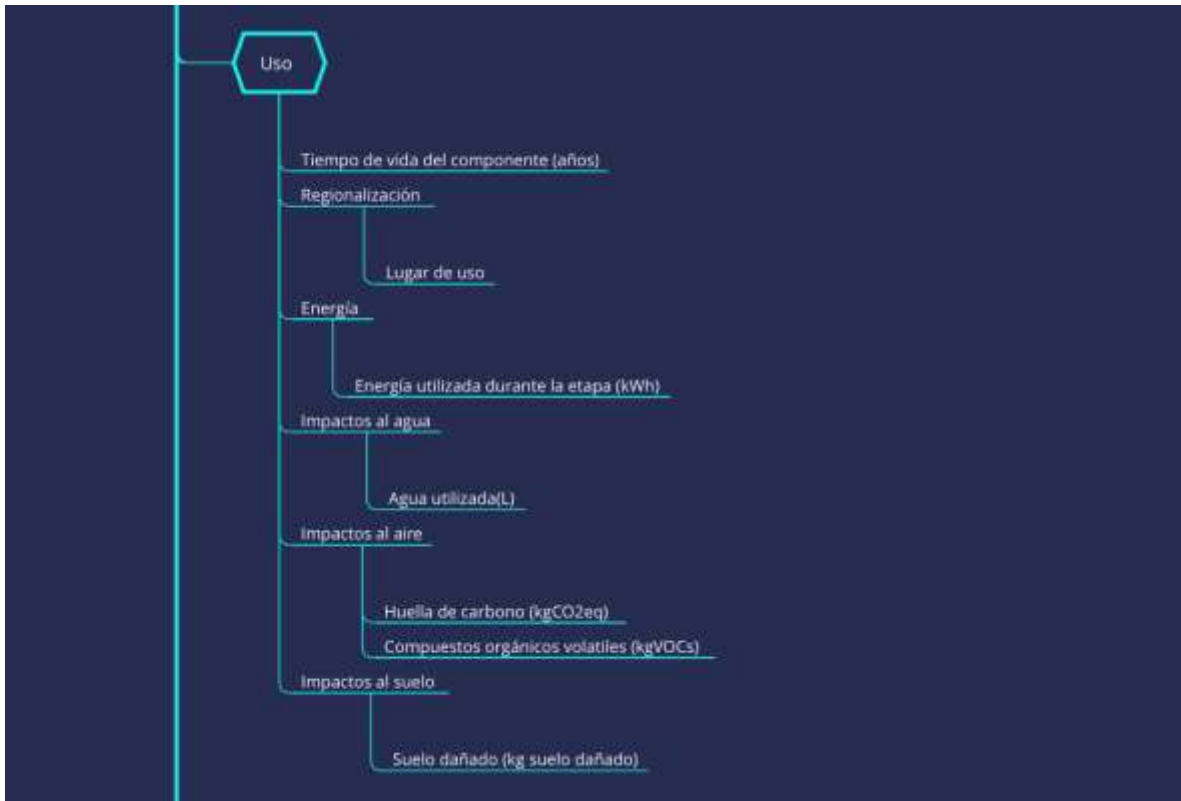


Figura 10. Taxonomía, análisis de impactos a nivel componente -Uso

El siguiente arreglo de datos en la sección de componentes del producto es el relacionado a los impactos generados durante el desecho del componente (Figura 11), se define el lugar de desecho para fines de trazabilidad y regionalización, se definen dos opciones para fin de ciclo, el fin de ciclo de vida real y una opción ideal, esta opción proporciona desde el punto de vista de diseño opciones para la mejora del producto y el potencial diseño del siguiente ciclo de vida, otro indicador importante dentro de esta etapa es el relacionado a la energía ya que dependiendo de la opción de desecho se utiliza o se recupera energía del componente, esto permite al diseñador tomar mejores decisiones para un mejor fin de ciclo de vida, se definen los impactos al agua, al aire y al suelo.

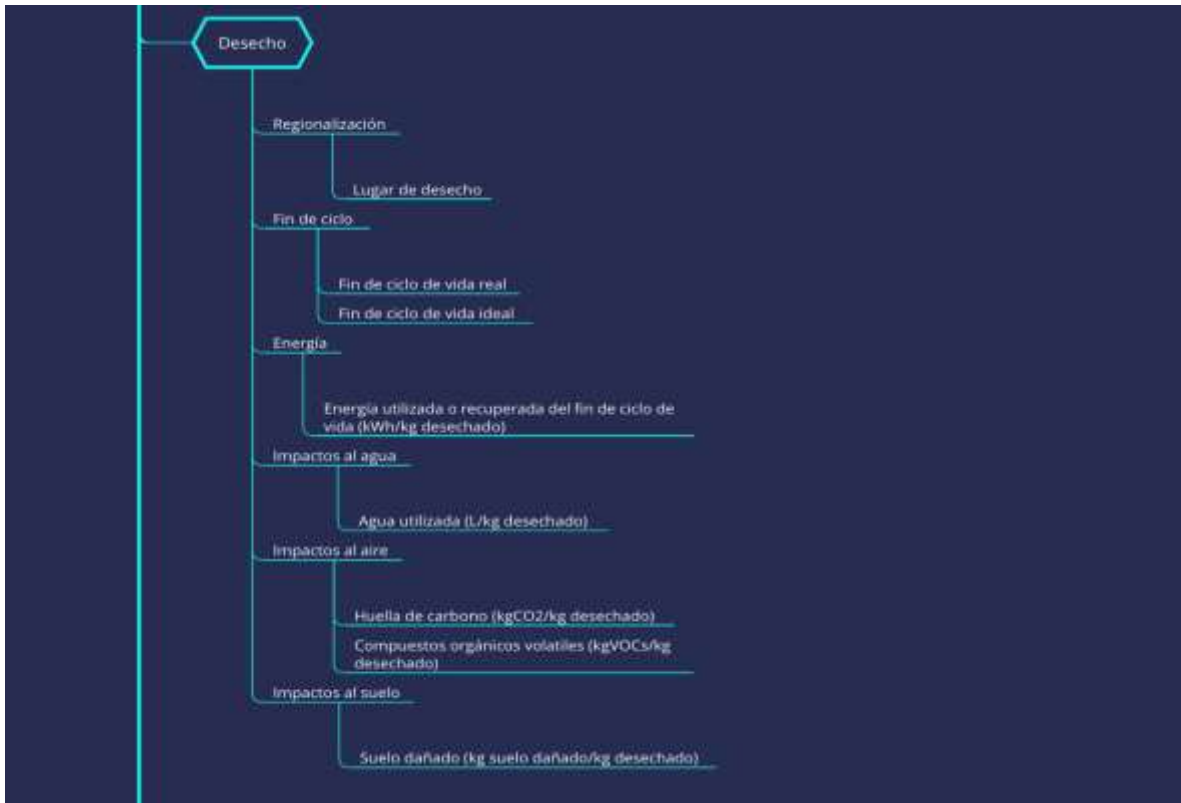


Figura 11. Taxonomía, Análisis de impactos a nivel componente -Desecho

El siguiente arreglo de datos en la sección de componentes del producto es el relacionado a los impactos generados durante la distribución del componente (Figura 12), esta etapa es transversal ya que implica el transporte del componente, se definen los impactos al aire emitidos por el transporte a lo largo de todo su ciclo desde la extracción hasta desecho.



Figura 12. Taxonomía, análisis de impactos a nivel componente -Distribución

4.3 HERRAMIENTA PARA APLICAR ACV CON ENFOQUE EN EL DISEÑO Y DESARROLLO DE PRODUCTOS

La herramienta generada para aplicar ACV con enfoque en el diseño y desarrollo de productos toma como base la taxonomía generada en la sección 4.3, se toman indicadores de tres herramientas software principalmente ya que son las que cumplen con el enfoque de diseño y desarrollo de productos y se puede conocer más acerca de estas en la sección 2.2, en la primera sección “*Información General del Análisis*” se pide al usuario completar la información general del objetivo y los alcances del ACV (Figura 13).

The screenshot shows a software interface for 'Información General del Análisis'. The form is set against a light gray grid background. It features the following elements:

- INFORMACIÓN GENERAL** (Section Header)
- ¿Qué producto estamos evaluando en el análisis?** (Text input field)
- ¿En donde se lleva a cabo el análisis?** (Text input field)
- Sector** (Text input field)
- Encargado de elaborar el análisis** (Text input field)
- Objetivo del análisis** (Text input field)
- ¿Qué se incluye en el análisis?** (Text input field, highlighted with a green border)
- ¿Qué se excluye en el análisis?** (Text input field)

At the bottom, a navigation bar contains the following tabs and controls:

- ▶ **Información General del Análisi** (Active tab)
- Información del producto
- Unidad Funcional
- Componente 1
- ... ⊕
- ⏪

Figura 13. Herramienta ACV, Información General del Análisis

La siguiente ventana “*Información del producto*” (Figura 14) tiene como finalidad dar información de las características principales del producto, la trazabilidad, la cantidad de componentes, el volumen de producción, esta sección permite escalar los resultados una vez que se tiene el resultado del impacto a nivel componente y permite calcular el impacto del total de la producción.

La siguiente ventana “Componente 1” (Figura 17) tiene como finalidad definir el inventario y los indicadores de impacto del componente 1, en primera instancia se define información del peso del componente y el nombre del componente, se proporcionan datos relacionados con la extracción de materia prima (Figura 17) que incluye información de la obtención de la materia prima, el peso de la materia prima, los procesos que se utilizaron en la extracción, la energía que se utiliza, la cantidad de agua utilizada, la huella de carbono, otros impactos al aire como partículas volátiles y por último, los impactos al suelo.

1								
2		Componente 1 (nombre)			Peso del componente (gsl)			
3								
4								
5								
6								
7								
8		Imagen						
9								
10								
11		Materia Prima						
12		Material	Peso	Lugar de obten	Procesos de obten	Energía utilizada para la obtención de la ma	Impactos Agua	Huella de carbono
13								Otros impactos al Impactos Suelo
14	Métricas absolutas			Cantidad de procesos	kwh		Litros de agua	TonCO ₂ e emitidas
15								VOC's
16								Toneladas métricas de suelo erosionado
17	Métricas relativas				kwh/kgmp extraido		kg agua/kgmp extraido	TonCO ₂ e/kgmp extraido
18								VOC's/kgmp extraido
19								
20						¿Qué herramienta de software utilizaste para obtener los resultados para materia prima?		
21		¿Cuál fue el método de asignación de material?						
22								
23								
24								
25								
26								

Figura 17. Herramienta ACV, Componente 1- Materia Prima

En la siguiente etapa se proporcionan datos relacionados con la manufactura del componente 1 (Figura 18) que incluye información de la cantidad de procesos, la energía utilizada en los procesos, el lugar donde se realiza la manufactura, los impactos al agua, la huella de carbono y otros impactos al aire y por último los impactos al suelo, se considera también si se excluye algún proceso y los motivos de la exclusión, se determinan las métricas absolutas y las métricas relativas de los impactos.

Manufactura							
Múmero de procesos necesarios para manufacturar el	Procesos	Energía utilizada en el proceso(s)	Lugar donde se realiza la manufactura	Impactos Agua	Huella de carbono	Otros impactos al	Impactos Suelo
		kWh		Litros de agua	TonCO ₂ e q emitidas	TonVOC's	Toneladas métricas de suelo erosionado
		kWh/m ² m ³		Lg/m ³ k/m ³ m ³	TonCO ₂ e q/m ³ m ³ m ³	VOC's/m ³ m ³ m ³	
			¿Qué herramienta de software utilizaste para obtener los resultados para manufactura?				
			¿Estas excluyendo algún proceso en los resultados? ¿Cuáles es el motivo de la exclusión?				
Uso							

Figura 18. Herramienta ACV, Componente 1- Manufactura

En la siguiente etapa se proporcionan datos relacionados con el uso del componente 1 (Figura 19) que incluye información del tiempo de vida que dura el producto en uso, la energía utilizada en el componente en el caso de que se conecte o bien consuma combustible durante su uso, la cantidad de agua para el funcionamiento del componente, la huella de carbono y otros impactos al aire como partículas volátiles, los impactos al suelo, el lugar de uso y los impactos al humano provocados por el uso del componente.

Uso							
Tiempo de vida para uso	Energía utilizada durante la etapa de uso	Cantidad de agua utilizada durante la etapa de uso	Huella de carbono	Otros impactos al aire	Impactos al suelo	Lugar de uso (Loc. Geográfica)	Impactos al humano
Método utilizado para calcular el tiempo de vida			¿Qué herramienta de software utilizaste para obtener los resultados para uso?				

Figura 19. Herramienta ACV, Componente 1- Uso

En la siguiente etapa se proporcionan datos relacionados con el desecho del componente 1 (Figura 20) que incluye información se define el lugar de desecho para fines de trazabilidad y regionalización, se definen dos opciones para fin de ciclo, el fin de ciclo de vida real y una opción ideal, se tienen dos opciones para el uso de energía si se utiliza energía o bien si se obtiene energía a partir del proceso de desecho, se definen impactos al agua, impactos al aire, impactos al suelo e impactos al humano.

Desecho								
Fin de vida ideal	Fin de vida real	¿En dónde se lleva a cabo el	Energía utilizada durante el desecho	Energía obtenida durante el	Impactos Agua	Impactos Aire	Impactos Suelo	Impactos al humano
Método para determinar el fin de vida ideal		Método para determinar el fin de vida real			¿Existe un escenario para obtener un producto de alto valor agregado a partir del desecho?			

Figura 20. Herramienta ACV, Componente 1- Desecho

En la siguiente etapa se proporcionan datos relacionados con la distribución del componente 1 (Figura 21) que incluye información del transporte utilizado entre etapas, se divide por tipo de transporte, la distancia recorrida, el tipo de combustible, la energía utilizada, la huella de carbono emitida, los impactos al agua, los impactos al humano y otros impactos ambientales o sociales. Esta herramienta considera a los centros de distribución.

Distribución							
Tipo de transporte	Distancia	Combustible	Energía utilizada durante la distribución	Huella de carbono	Impactos al agua	Impactos al humano	Otros impactos
Avion							
Barco							
Tren							
Trailer							
Camión							
Camioneta							
Considera todo el ciclo de vida para asignar distancias							
¿Existe un centro de distribución entre la manufactura y la etapa de uso?							

Figura 21. Herramienta ACV, Componente 1- Distribución

Durante el llenado de información, la herramienta toma la información definida en la taxonomía y la muestra como ayuda específica u opciones para que el usuario elija la opción adecuada Figura 22 y Figura 23.

The screenshot shows a form with several input fields. A dropdown menu is open for the 'Objetivo del análisis' field, displaying three options: 'Académico', 'Industrial (interno o externo)', and 'Energético de menor impacto'. A red arrow points to the 'Industrial (interno o externo)' option. Other fields include 'Sector', '¿Qué se incluye en el análisis?', and 'Energético de menor impacto'.

Figura 22. Herramienta ACV, Opciones/Ayuda

The screenshot shows a more complex interface with a table and dropdown menus. A dropdown menu is open for the question '¿Cuál fue el método de asignación de material?', showing options: 'Certificado de laboratorio (específica)', 'Literatura (específica)', 'Información general de internet (específica)', and 'Información del proveedor o de la empresa'. A red arrow points to the 'Literatura (específica)' option. The table below has columns for 'Número de procesos necesarios para manufacturar el componente', 'Procesos', 'Lugar donde se realiza la manufactura', 'Impactos Agua', 'Huella de carbono', 'Otros impactos al aire', and 'Impactos'. The bottom of the screen shows a navigation bar with 'Unidad Funcional', 'Componente 1', 'Componente 2', 'Componente 3', and 'Componente 4'.

Figura 23. Herramienta ACV, Opciones/Ayuda 2

4.4 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA, CASO DE ESTUDIO

Objetivo del análisis

Conocer los principales impactos ambientales y de energía para proponer estrategias de disminución del uso de energía y mejorar el impacto ambiental.

Alcance

El análisis incluye las siguientes etapas: Materia Prima, Manufactura, Uso, Desecho

Unidad Funcional

Pieza de 166 gramos, inyectada con ABS de alta resistencia (Figura 24) con modulo de Young de 2 GPa con propiedades dieléctricas con una resistencia dieléctrica de 15 MV/m y una constante dieléctrica de 3 inyectada en una máquina de inyección híbrida en la Ciudad de México.



Figura 24. Caso de estudio, Pieza de ABS de 500 cm²

INVENTARIO

Materia Prima

Material	Peso	Lugar de obtención	Procesos de obtención	Impactos Agua
ABS	166.66 gr	Corea del Sur	Polimerización	29 litros

Impactos Aire	Impactos al humano	Energía utilizada
0.612 kg C02 Eq	Carcinogenos y efectos respiratorios	15.78 MJ

Manufactura

Número de procesos necesarios para manufacturar el componente	Procesos	Energía medida utilizada en el proceso para producir la pieza	Lugar donde se realiza la manufactura
1	Inyección de plásticos en una maquina híbrida	2.98 MJ	Ciudad de México

Impactos Agua	Impactos aire	Impactos Suelo	Impactos al humano
2.49 litros	0.2158 kg CO ₂ eq	0	Carcinogenos y efectos respiratorios

Uso

Tiempo de vida	Impactos agua	Impactos aire	Impactos suelo
25 años	0	0	0

Energía requerida para su operación	Lugar de uso(Loc.Geográfica)	Impactos al humano
0	México, Chile, Sur America	0

Fin de ciclo de vida

Fin de vida ideal	Fin de vida real	Localización (donde se desecha)	Impactos Agua
Incineración	Relleno sanitario	México, Chile, Sur América	0

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE ENERGÍA EN SITIO DEL PROCESO DE MANUFACTURA

Realizar un análisis de energía para el proceso de inyección de plásticos conlleva procesar un cruce de variables e interacciones complejas entre la pieza que se inyecta, el material de fabricación, la máquina de inyección, los parámetros del proceso y las condiciones ambientales.

La disponibilidad de análisis de uso de energía estandarizados con post-procesamiento de datos en lotes industriales que incluyen información sobre materiales específicos y tipos de máquinas, es limitada. Este capítulo reporta y analiza el perfil de uso de energía (PUP), el consumo de energía específico (SEC) y la distribución de energía a nivel de operación de dos diferentes piezas inyectadas hechas de ABS y producidas en una máquina de moldeo por inyección híbrida. (Referir el artículo de la revista)

La metodología empleada por los autores incorpora un experimento que se desarrolló en una instalación industrial con lotes de producción reales. Se utiliza un tamaño de muestra de $n=156$ y procesos de adquisición de datos y postproceso para obtener un PUP y SEC con una gráfica suavizada. Se discute un desglose de la energía consumida por el proceso de moldeo por inyección de las piezas estudiadas a nivel de operación. Los resultados del estudio se utilizan para identificar estrategias para reducir la energía consumida por los procesos. La metodología empleada podría utilizarse en el futuro para aplicarse con otras piezas de plástico, independientemente del material y la máquina utilizada.

5.1 Metodología y parámetros utilizados para el análisis de uso de energía

Las especificaciones de la máquina de inyección híbrida (HIMM) utilizada en el experimento se muestran en la Tabla 1. Las especificaciones de las piezas de plástico utilizadas en el estudio (Figura 25 y Figura 26) se presentan en la Tabla 2.

Tabla 1. Especificaciones HIMM

1.Screw diameter	40 [mm]	6.Injection pressure	192[MPa]
2.Injection weight	195 [g]	7.Plasticizing capacity	55.44[Kg/h]
3.Injection rate	144 [g/s]	8.Screw speed	272 rpm
4. Max. Mold Height	450 [mm]	9.Clamping forcé	1200 [kN]
5.Hopper capacity	25 [kg]	10. Mold	1 Cavity

Tabla 2. Piezas inyectadas

Part	Material	Mass [g]	Injection Cycle [s]	Injection Pressure (PSI)	Surface Area [cm ²]	Wall Thickness [mm]
1	ABS	166	39	110	508.99	2
2	ABS	88	28.25	100	511.85	2

El analizador de calidad de energía Fluke-435 se utilizó para medir el uso de energía. El protocolo para recopilar y analizar datos se dividió en dos partes: arranque y configuración de parámetros y el ciclo de inyección.

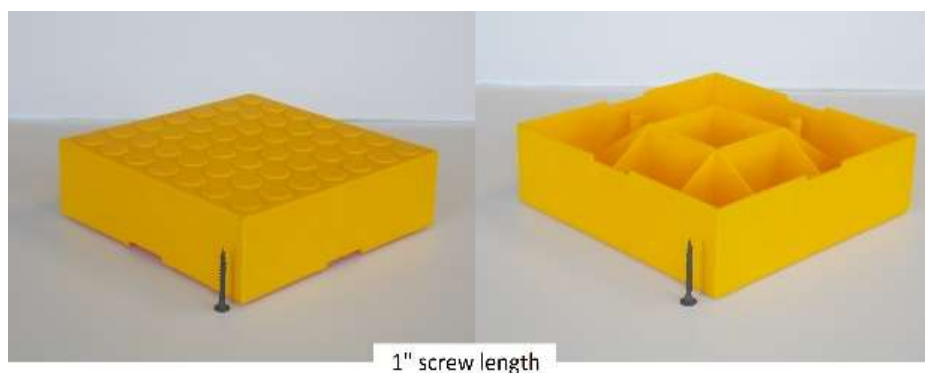


Figura 25. Parte inyectada 1, ABS, área superficial 508 cm²

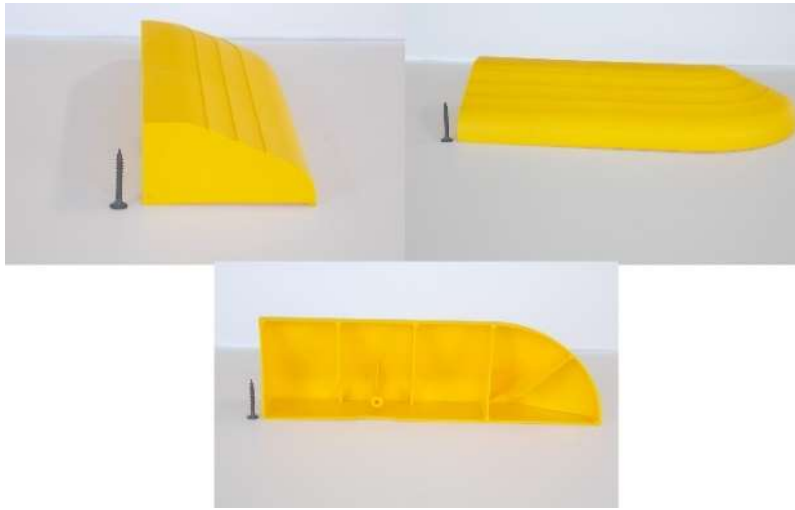


Figura 26. Pieza inyectada 2, ABS, área superficial 511.85 cm²

Encendido de la maquina

- (1) Medición durante el tiempo de encendido de HIMM utilizando el analizador de energía.

Ciclo de inyección

- (1) Se midieron 156 ciclos de inyección de cada estudio de caso con una resolución de salida de 0,25 [s]; el analizador de energía estaba conectado en el centro de carga que alimenta la máquina.
- (2) Las partes se examinaron con una prueba visual y todas cumplieron con las especificaciones de calidad del productor

5.2 Perfil de Uso de Potencia

Los datos recolectados directamente del analizador de energía se visualizaron utilizando la herramienta de software Power Log V 4.2. La figura 27 muestra la gráfica de un ciclo de inyección de la pieza 1 correspondiente a un perfil de potencia inicial y un patrón inicial. La herramienta de software Power Log V4.2 funciona principalmente como una interfaz para exportar datos y permite a los usuarios visualizar la potencia (kW) a lo largo del tiempo (minutos) e interactuar en el período de medición en el gráfico. La figura 28 muestra los

perfiles iniciales de las 156 mediciones del ciclo de inyección de la pieza 1. En esta figura, los perfiles se puede visualizar el desfase de grupos, uno con los valores de potencia más altos y el otro correspondiente a los valores de potencia más bajos. Esta diferencia en los valores fue causada por el funcionamiento del sistema de refrigeración, en el primer grupo en que el enfriador estaba encendido y en el segundo en el que estaba apagado. Es importante resaltar que esta operación del sistema de enfriamiento es común en las condiciones de fabricación industrial.

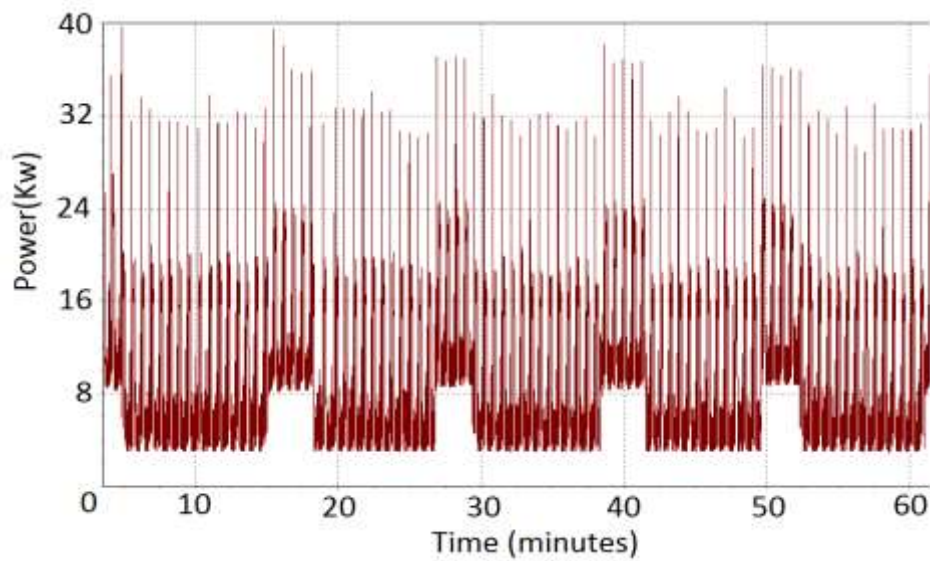


Figura 27. Visualización inicial del ciclo de medición, Power Log V4.2

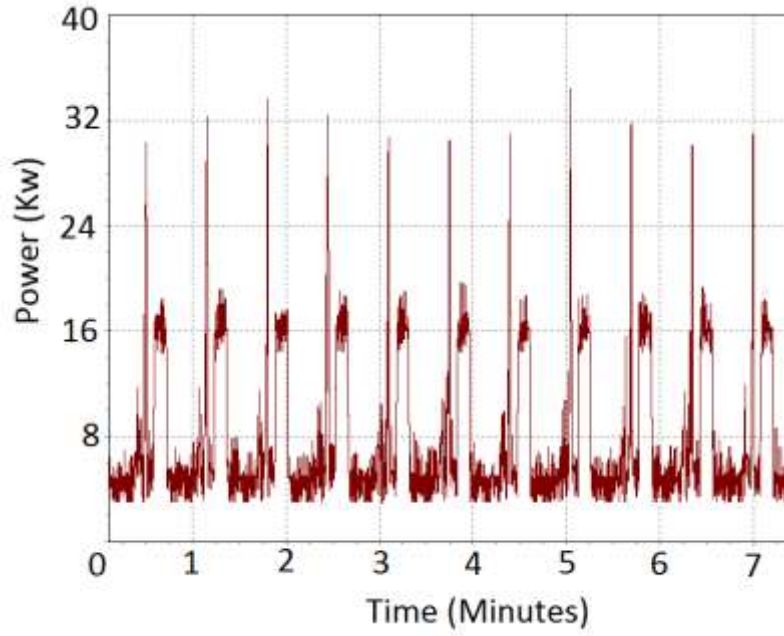


Figura 28. Visualización de los perfiles de potencia de los ciclos de inyección en un lapso de 7 minutos , Power Log V4.2

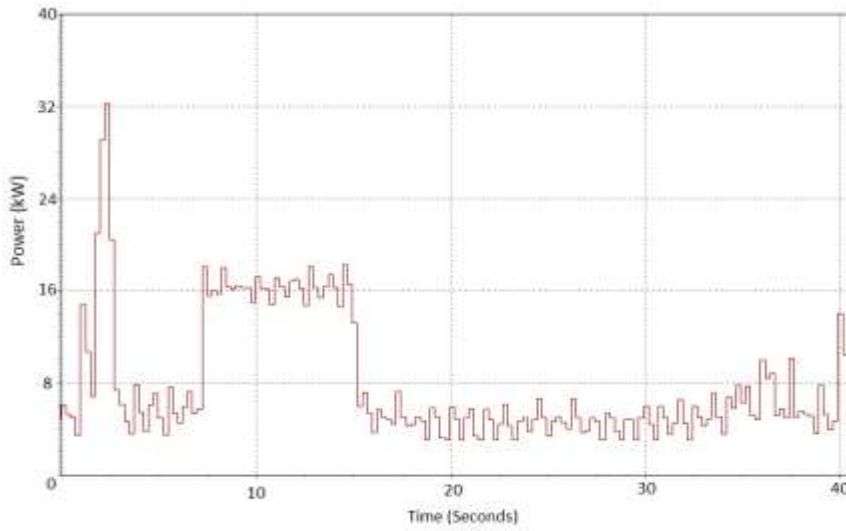


Figura 29. Perfil inicial correspondiente a un ciclo de inyección de la pieza inyectada 1, Visualización en Power Log V4.2

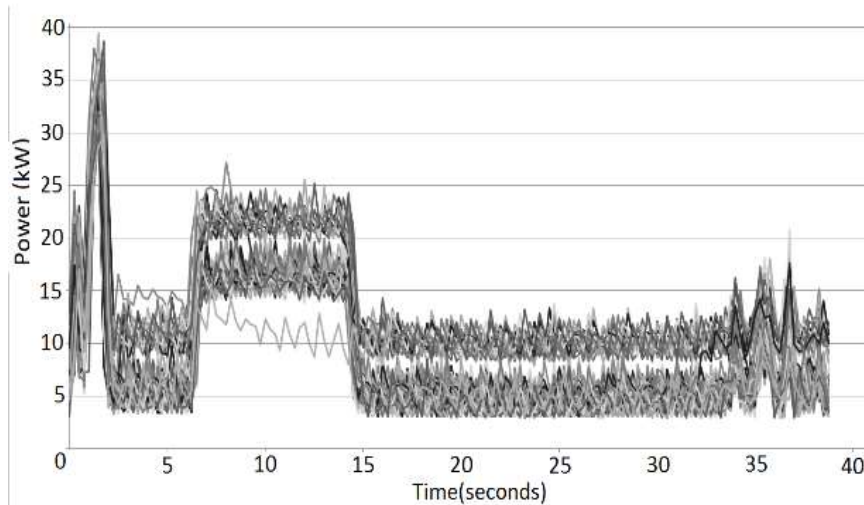


Figura 30. 156 ciclos de potencia para la pieza inyectada 1

Los datos de potencia se exportaron de Power Log V 4.2 a Microsoft Excel para su procesamiento: (1) se realizó un filtrado de datos para cada ciclo de inyección utilizando los perfiles iniciales y se definió un punto de referencia para todos los ciclos; (2) se generó una gráfica de 156 ciclos de inyección; (3) para limpiar los datos, se utilizó el estadístico moda y se obtuvo la gráfica correspondiente ; (4) se estableció un valor medio para cada ciclo de inyección, una desviación estándar y se definieron los límites inferior y superior para garantizar la fiabilidad de los datos a un 96% para garantizar valores de tiempo de ciclo de inyección regulares (figura 28); (5) se definieron PUPs para las piezas de inyección 1 y 2 (figura 29 y figura 30). Los gráficos muestran el comportamiento de potencia de las operaciones a lo largo del ciclo de inyección: la primera operación corresponde a la operación de inyección, la demanda de potencia alcanza 32 kW para la parte 1 y 13 kW para la parte 2; la siguiente operación es sostenimiento y disminuye la cantidad de energía consumida a 6 kW en ambas piezas; la etapa de plastificación/enfriamiento aumentó la potencia a 17 KW en la parte 1 y parte 2; en la etapa de enfriamiento, la potencia disminuye, sin embargo, el tiempo que requiere es la más larga de todas las operaciones; el funcionamiento de la apertura de abrazadera alcanza un pico de potencia de 8 kW, luego la eyección del pico aumenta el valor a 10 kW en ambas partes, es importante mencionar que en el caso de la parte 2, esta operación se repite dos veces; finalmente, la operación de cierre de abrazadera reduce la potencia a 7 kW.

5.3 Consumo de Energía Específico (SEC)

Para obtener el consumo de energía específico se aplicó un método numérico denominado regla trapezoidal utilizando los datos generados en los PUP. Este método permitió el tratamiento de los datos de energía en intervalos, por lo tanto, se estimaron las distribuciones de energía para las operaciones y se documentaron en diagramas de Sankey (Figuras 31 y 32) y Tabla 3.

Al integrar el PUP de la figura 9 con la regla trapezoidal, la energía total consumida para producir el componente 1 fue de 122,94 [Wh] (0,442 MJ) durante un ciclo de inyección de 39 segundos.

Aplicando el mismo método al PUP de la figura 10, la energía consumida para producir la parte 2 fue de 81.18 [Wh] (0.292 MJ) con un tiempo de ciclo de inyección de 28.75 segundos. Tomando los valores de masa de la Tabla 2 y dividiéndolos por la energía consumida anteriormente mencionada, la SEC para la parte 1 es de 2,66 MJ / kg y para la parte 2 es de 3,318 MJ / kg.

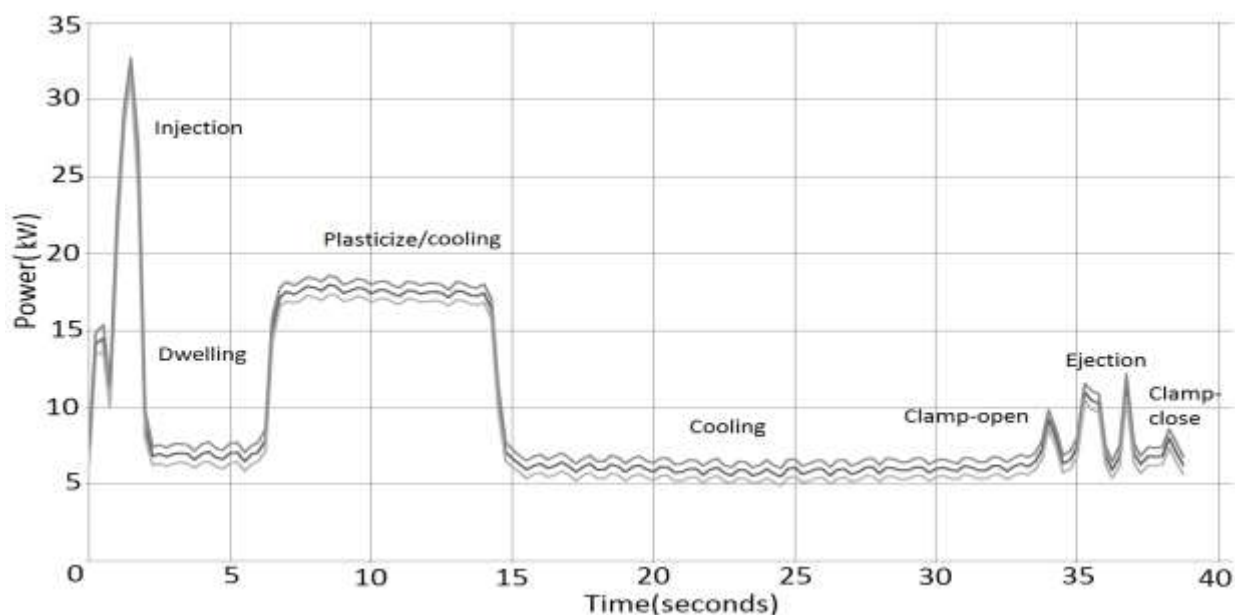


Figura 31. Perfil de Uso de Potencia (PUP), Pieza 1. "Potencia promedio, límite inferior y límite superior"

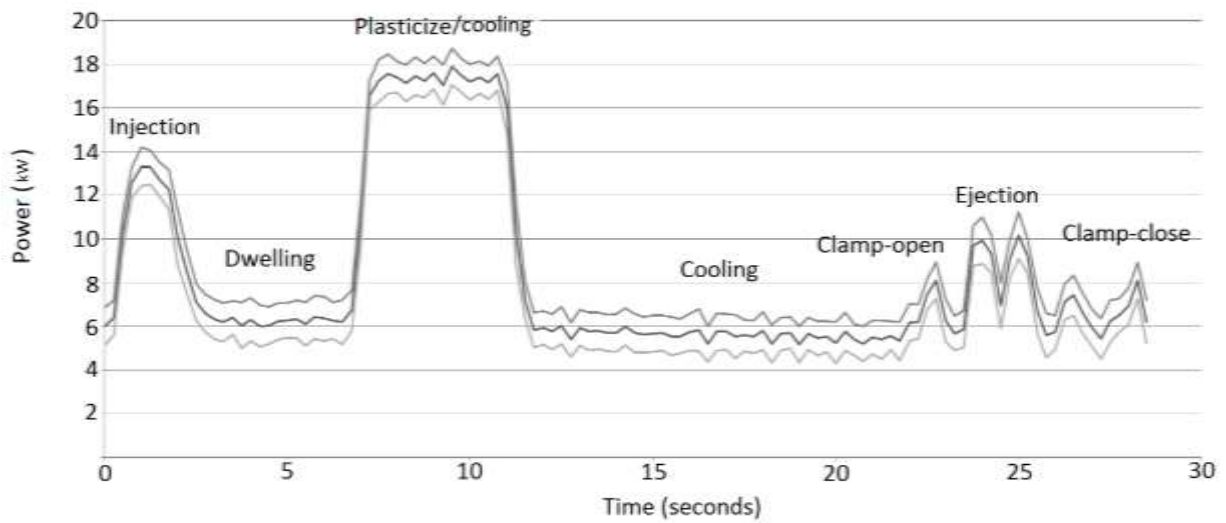


Figura 32. Perfil de Uso de Potencia (PUP),Pieza 2. “Potencia promedio, límite inferior y límite superior

La energía consumida durante la configuración de la máquina fue de 6,004.3 Wh y el tiempo utilizado fue de 2.142 segundos. La figura 33 proporciona la potencia medida a lo largo del tiempo de configuración.

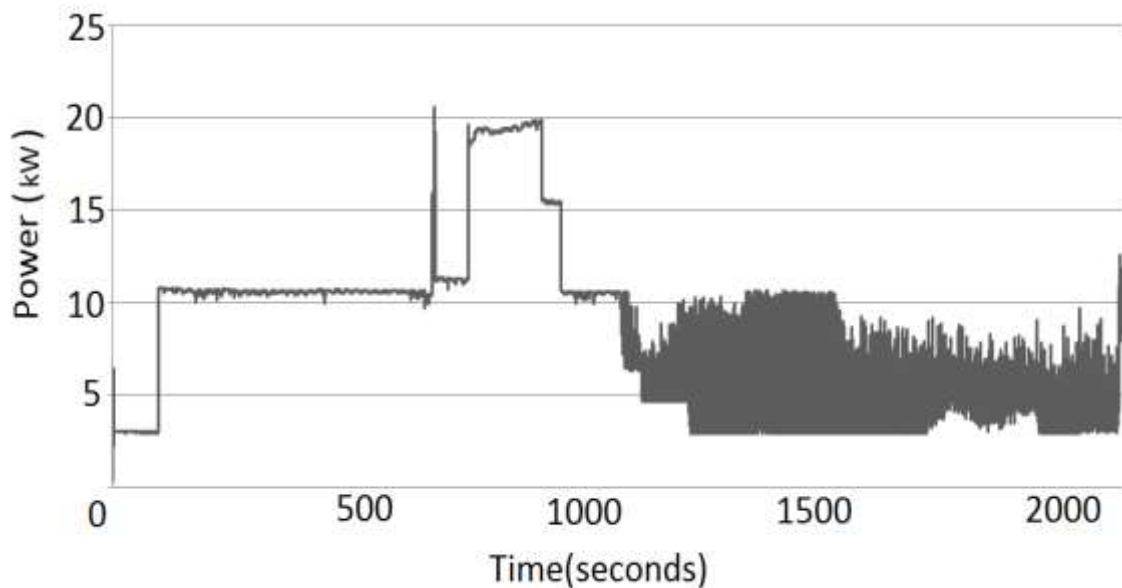


Figura 33. Potencia consumida durante el arranque de la maquina

5.4 Energía utilizada en las operaciones del proceso

Como se mencionó anteriormente, el uso de energía durante el ciclo de inyección se distribuyó en las siguientes operaciones: inyección, retención, plastificación/enfriamiento, enfriamiento, apertura de molde, expulsión de la pieza y cierre de molde. El uso de energía se muestra en los diagramas de Sankey para ambas partes (Figura 34 y Figura 35).

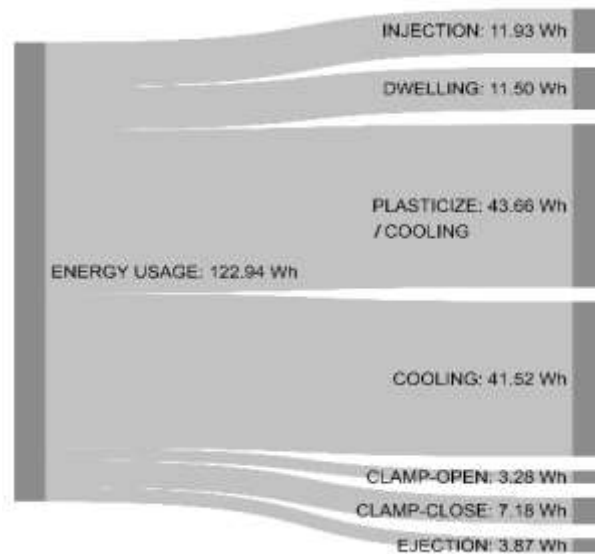


Figura 34. Pieza 1 Distribución del Uso de Energía en las Operaciones del Proceso

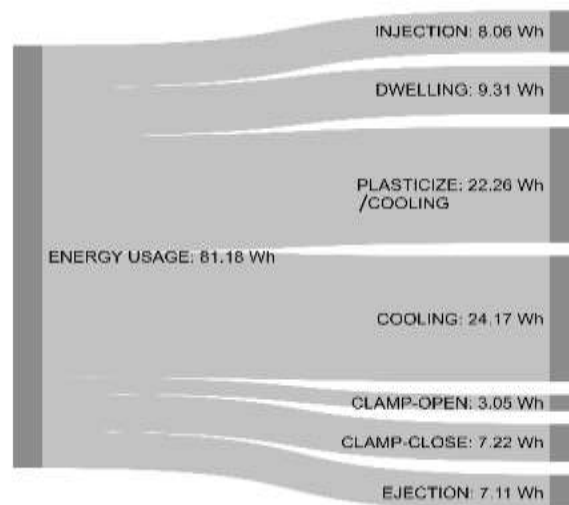


Figura 35. Pieza 2, Distribución del Uso de Energía en las Operaciones del Proceso

Tabla 3. Distribución de la Energía en las Operaciones del Proceso de Inyección

Operaciones	Pieza 1 (Wh)	%	Pieza 2 (Wh)	%
Inyección	11.93	9.7	8.06	9.92
Retención	11.50	9.35	9.31	11.46
Plastificación/enfriamiento	43.66	35.51	22.26	27.42
Enfriamiento	41.52	33.77	24.17	29.77
Apertura de molde	3.28	2.66	3.05	3.75
Expulsión de la pieza	3.87	3.14	7.11	8.75
Cierre de molde	7.18	5.84	7.22	8.89

Basado en las figuras 34 y 35, se construye la Tabla 3. Como se muestra en la Tabla 3, las etapas de inyección y de retención representan un promedio del 20% del uso total de energía. El consumo de las etapas de plastificación y refrigeración es superior al 55% del consumo total de energía (pieza 1, 69.28% y para la pieza 2, 57.19%). El consumo de energía para las operaciones de sujeción es similar en ambas partes (la pieza 1 de apertura de molde es de 3.28 Wh, y para la pieza 2 3.05 Wh; la pieza 1 en la operación de cierre de molde es de 7.18 Wh, y para la pieza 2 la operación de cierre de molde es 7.22Wh) pero el porcentaje respecto a la energía total varía. La energía para la operación de expulsión es 3.87 Wh para la pieza 1 y 7.11 Wh para la pieza 2, que utiliza dos ciclos de expulsión.

5.5 Propuesta de estrategias para la reducción del uso de energía en el proceso de inyección de plásticos

De acuerdo con los diagramas de distribución de energía y la Tabla 3, las etapas de plastificación y enfriamiento consumen conjuntamente más del 55% del consumo total de energía del ciclo de inyección para ambas partes. Además, la energía consumida para la operación de expulsión es del 3% por golpe. Algunas estrategias para reducir el consumo de energía en el proceso de inyección se pueden deducir de estos resultados y del análisis de los PUP:

- La obtención de un PUP ayuda a representar el comportamiento energético del proceso y, por lo tanto, se convierte en una base importante para las reducciones de energía.
- Reducir al mínimo el tiempo de enfriamiento, produce el mayor impacto para la reducción de energía; Es importante verificar que la calidad de la pieza sea preservada. Compruebe si hay contracciones al reducir el tiempo de enfriamiento.
- Al reducir al mínimo la etapa de plastificación, al aumentar la velocidad de dosificación, disminuye el tiempo de operación y, por lo tanto, la energía consumida.
- Utilizar un solo golpe para expulsar la pieza para la operación de expulsión. En los casos reportados, la parte 2 utiliza dos golpes en el proceso de expulsión (Fig. 11). Para cambiar esto, se puede requerir una modificación de los parámetros del proceso, y también puede necesitar una modificación de la pieza y el molde.
- Verifique que los valores más altos de potencia del PUP no pongan en riesgo la instalación eléctrica de la máquina utilizada. La etapa de inyección produce el valor pico más alto en la pieza 1 y la etapa de plastificación/enfriamiento en la pieza 2.

Se obtuvieron diferentes valores de SEC para cada parte: 2.66 MJ/kg para la pieza 1 y 3.318 MJ/kg para la pieza 2. Esto indica que la combinación de parámetros de proceso, máquina, material, características de la pieza (por ejemplo, geometría y masa) y molde son más eficiente con respecto al consumo de energía para la pieza 1 que para la pieza 2. Para mejorar la SEC de la pieza 2, las estrategias presentadas anteriormente podrían aplicarse para mejorar los parámetros del proceso, es decir, el tiempo de enfriamiento. Otras alternativas pueden incluir mejorar el diseño del sistema de enfriamiento del molde (es decir, aumentar la eficiencia de la transferencia de calor para enfriar la pieza) o, si es posible, el diseño de la pieza (es decir, reducir el grosor de algunas secciones). En cualquier caso, se debe prestar atención al mantenimiento de la calidad de la pieza.

5.6 Validación de las estrategias de reducción del uso de energía en el proceso de inyección de plásticos

Con el fin de validar la utilidad de las estrategias presentadas en la sección anterior, se realizó una nueva serie de experimentos. Se produjeron 150 piezas de la pieza 1 en condiciones ambientales y de manufactura similares a los primeros experimentos. Los resultados se presentan a continuación:

- a) Con el fin de reducir la energía consumida, el tiempo de enfriamiento se redujo en un 15% verificando que se obtuviera la calidad de la pieza, no se produjeron contracciones, estructuralmente la pieza mantiene sus propiedades, las piezas son aptas para comercializarse de acuerdo a los estándares de calidad del socio tecnológico.
- b) Se redujo al mínimo el tiempo utilizado en la etapa de plastificación, al aumentar la velocidad de dosificación al máximo disponible en el control de la máquina, se disminuyó el tiempo de operación en un 35.75%.
- c) Se utilizó un solo golpe para expulsar la pieza en la operación de expulsión
- d) Al implementarse estas estrategias, el tiempo ciclo se redujo a 30.8 segundos, la energía utilizada para producir la pieza fue de 97.34 Wh; se logró un ahorro de energía del 20.82% por pieza producida.
- e) La tabla 4 muestra la energía utilizada en la validación de las estrategias de reducción del uso de energía, el total de energía utilizado.

Tabla 4. Energía consumida en la pieza 1 utilizando las estrategias de reducción de energía propuestas.

Etapa	Total Wh
	Inyección
Retención	7.64
Plastificación/enfriamiento	28.01
Enfriamiento	35.46
Apertura del molde	3.28
Expulsión de la pieza	3.88
Cierre del molde	7.18

CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

CONCLUSIONES

Se caracterizaron indicadores de sustentabilidad y energía en piezas plásticas inyectadas de ABS de 500 cm² utilizando una máquina de inyección híbrida con un enfoque en las etapas del ciclo de vida de piezas plásticas inyectadas.

Se obtuvo el perfil de consumo de potencia y los datos de consumo específico de energía utilizada durante la inyección de piezas de ABS de 500 cm² en una máquina híbrida. Estos resultados se reportaron en un artículo publicado en el International Journal of Sustainable Engineering (Avila et. al. 2018)

Se definieron métricas y estrategias para el diseño y manufactura de productos plásticos inyectados que permiten la reducción del consumo de energía y el impacto ambiental.

Se definió una taxonomía de datos para conjuntar resultados del análisis de ciclo de vida de diferentes herramientas de software y se definieron métricas de ACV para productos de plástico inyectados.

Se definió un arreglo que conjunta los resultados de diferentes herramientas de software utilizadas para análisis de sustentabilidad y se aplicó en un caso de estudio (Capítulo 4). Para la caracterización de la energía se definió un experimento utilizando un caso de estudio, una pieza de ABS de 500 cm² y una máquina de inyección híbrida (Capítulo 5). Se obtuvo un perfil de consumo de potencia (Sección 5.3) y los datos de consumo específico de energía (Sección 5.4) utilizada durante la inyección en una máquina híbrida, se propusieron estrategias de disminución de la energía (Sección 5.5) y se validaron en la sección 5.6.

Conclusiones a la metodología de investigación

La metodología de investigación utilizada para obtener estrategias y métricas para la disminución de consumo de energía y de impactos ambientales en piezas plásticas inyectadas consistió en elaborar el análisis de ciclo de vida de un caso de estudio relevante y para

sustentar, caracterizar y evaluar, estas métricas se considerarán dos mecanismos:(1) la evaluación del ciclo de vida (ACV) del producto utilizando herramientas de software y (2) un enfoque de regionalización para la obtención de datos energéticos reales en la etapa de manufactura en México. La metodología arrojó resultados que puede ser repetibles en condiciones similares y para diferentes procesos de manufactura.

Conclusiones al análisis de energía

El autor del presente trabajo encontró que los PUP basados en tamaño de datos representativos procesados estadísticamente y numéricamente permiten una descripción precisa de la demanda de potencia y el comportamiento energético del proceso, incluidos el tiempo de operación y los picos de energía. Esta información es valiosa para estimar la energía consumida por cada operación de moldeo por inyección e identificar estrategias de reducción de energía.

La mayoría de los autores toman directamente los PUP del software del analizador de energía sin procesamiento de datos (Fig. 1, 2, 3). Además, es importante señalar que la mayoría de los autores informan las operaciones de inyección como etapas separadas, a pesar de que algunas de ellas se superponen, esta es sin duda una de las grandes aportaciones de la investigación.

Los perfiles del ciclo de inyección de la pieza 1 y la pieza 2 obtenidos son consistentes con los resultados que se han generado en máquinas similares informadas por la academia y la industria (Thiriez and Gutowski 2006; Qureshi et. al. 2012;Li,Kara and Qureshi 2015) (Fig. 1, 2 y 3) los PUP presentados en la Figura 31 y la Figura32 representan con precisión el comportamiento energético del proceso en condiciones de fabricación industrial, ya que se considera el funcionamiento común de todos los sistemas en una producción normal.

Se reporta un análisis empírico de potencia y energía para el proceso de moldeo por inyección en una máquina híbrida. Los perfiles de uso de energía (PUP) (Figura 31 y 32), el Consumo de energía específico (SEC) y la distribución de energía a nivel de operación (Figura 33 y 34) para dos partes inyectadas con un área proyectada de superficie promedio de 500 cm² y un espesor de 2 mm fabricado en ABS.

Las figuras 31 y 32 presentan los perfiles de uso de potencia que muestran la variación de la potencia utilizada durante el ciclo de inyección. El PUP es una herramienta que describe el comportamiento de las operaciones de la máquina. Facilita la visualización de los patrones de la operación, se puede utilizar para comparar el comportamiento de las operaciones para identificar oportunidades para mejorar los parámetros del proceso. Las mejoras podrían afectar el consumo de energía, el tiempo del ciclo e incluso la prevención de picos de energía que podrían afectar la instalación eléctrica y el equipo.

La precisión del PUP genera un patrón con una mayor fidelidad, facilita la identificación de la transición y la demanda de energía de las operaciones, proporciona el tiempo por operación y el valor del consumo de energía, lo que permite una cuantificación SEC más precisa.

Los PUP muestran la forma característica del proceso de inyección de plástico para piezas de ABS inyectadas en una máquina de moldeo por inyección híbrida. Los dos PUP mantienen una forma similar, y es posible identificar las operaciones demostrando la utilidad del método propuesto.

El método numérico de integración utilizado calcula el consumo de energía por operación para elaborar los diagramas de Sankey (Fig. 33 y 34). La Tabla 3 se construyó con la información de estos diagramas, para comprender mejor el comportamiento y la importancia relativa de cada operación con respecto al consumo de energía.

La precisión del PUP de un proceso específico de moldeo por inyección depende de la cantidad de ciclos (n) medidos para desarrollarlo. En los casos reportados en este documento, los perfiles obtenidos con $n = 30$ tuvieron un error estadístico de demanda de potencia del 40%, $n = 100$ tuvieron un error del 10% y $n = 156$ tuvieron un error del 5%.

Incluso existen superposiciones entre las operaciones identificadas en los PUP, claramente en las etapas de plastificación y enfriamiento; los autores han seguido el estilo de notación de operaciones de trabajos anteriores en el área, algunos de los cuales se han resumido en la sección 2. S

TRABAJO A FUTURO

- 1) Es necesario utilizar la herramienta en más casos de estudio para validar la usabilidad de esta y proponer mejoras.
- 2) Con respecto al análisis de energía en procesos de inyección de plástico, se necesita más investigación en la superposición en las operaciones.
- 3) Se debe hacer más investigación para obtener el modelo general de una SEC para estimar la energía requerida para producir una pieza de ABS con una máquina híbrida.

REFERENCIAS

Avila J, Borja V, López-Parra M, Ramírez-Reivich A.(2018) “Energy consumption analysis of ABS plastic parts injected in a hybrid injection moulding machine” International Journal of Sustainable Engineering DOI:10.1080/19397038.2018.1521881

Avila J, Borja V, López-Parra M, Ramírez-Reivich A. (2017) “Energy and GHG Emissions assessment in a plastic injection process at machine component level: A case study of ABS plastic part produced in a hybrid injection molding machine”ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Volume 2:Advanced Manufacturing,DOI:10.1115/IMECE2017-72283

Avila J, Borja V, López Parra M, Ramírez-Reivich A (2014) “Sustainability assessment of products:A comparative study of sustainability assessment tools” ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Volume 11:Systems,Design and Complexity,DOI:10.1115/IMECE2014-39449

Bala A, Raugei M, Benveniste G, Gazulla C, Fullana P. (2010) “ Simplified tools for global warming potential evaluation: When ‘good enough’ is best” International Journal of Life Cycle Assessment 15:489-4.

Brundtland, G.H., and World Commission on Environment and Development.(1987) Our Common Future Report of the World Commission on Environment and Development. Oxford University.

Chen D, Schudeleit T, Posselt G, Thiede S. (2013) “A state of the art and review and evaluation of tools for factory sustainability assessment” 2nd CIRP Global Web Conference.

Ciambrone, D. (1997). Environmental Life Cycle Analysis: CRC Press, Taylor and Francis <https://doi.org/10.1201/9780203757031>

Chen, J. M., & Dornfeld, D. (2013). Semi-empirical modeling of the energy consumed during the injection molding process. In Re-engineering Manufacturing for Sustainability (pp. 297-302). Springer, Singapore.

Dornfeld D, Simon R, Rice E, Kingsbury T (2012), “A comparison of life cycle assessment LCA software in packaging applications”. Laboratory for Manufacturing and Sustainability LMAS University of California, Berkeley. A report.

Erol, S., Schumacher, A., & Sihm, W. (2016). Strategic guidance towards Industry 4.0—a three-stage process model. In International conference on competitive manufacturing (Vol. 9, pp. 495-501).

Fichter, K., Pfriem, R.,(2007) “Leading innovations to sustainable future markets” in Innovations towards sustainability pp 103-116 Physician-Verlag HD.

Hamad, K., Kaseem, M., & Deri, F. (2013). Recycling of waste from polymer materials: An overview of the recent works. *Polymer degradation and stability*, 98(12), 2801-2812.

ILCD-JRC- EC (2010) European Commission – Joint Research Center- Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System(ILCD) Handbook- General guide for Life Cycle Assessment. EUR 24708 EN Luxembourg.

Kanungo, A., Swan, E., (2008). All electric injection molding machines: How much energy can you save? Proceedings from the Thirtieth Industrial Energy Technology Conference 2008, May 6-9, 2008, New Orleans, LA.

Kengkhetkit, N., & Amornsakchai, T. (2014). A new approach to “Greening” plastic composites using pineapple leaf waste for performance and cost effectiveness. *Materials & Design*, 55, 292-299.

Madan, J., Mani, M., Lee, J. H., & Lyons, K. W. (2015). Energy performance evaluation and improvement of unit-manufacturing processes: injection molding case study. *Journal of Cleaner Production*, 105, 157-170.

Mani, M., Madan, J., Lee, J., Lyons, K.W., Gupta, S., 2014 “Sustainability characterization for manufacturing processes”. *International Journal Production Research*.

Mattis, J., Sheng, P., DiScipio, W., & Leong, K. (1996, May). A framework for analyzing energy efficient injection-molding die design. In Proceedings of the 1996 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment. ISEE-1996 (pp. 207-212). IEEE.

Menke D, Davis G, Vigon B.(1996) “Evaluation of Life Cycle Assessment Tools” Report of the University of Tennessee Center for Clean Products and Clean Technologies and Strategic Environmental Management.

Morbidoni A, Favi C, Germany M,.2011. “ CAD Integrated LCA Tool: Comparison with dedicated LCA Software and Guidelines for the Improvement Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering.

Ness B, Uriel E Anderberg S, Olson L(2007) “Categorizing tools for sustainability assessment” *Ecological Economics Journal*.

OECD, (2011) Sustainable manufacturing toolkit: seven steps for environmental excellence.

Plastics Europe, Plastics the facts 2014-2015, 2015, <http://www.plasticseurope.org> Accessed 30/12/2015

Qureshi, F., Li, W., Kara, S., & Herrmann, C. (2012). Unit process energy consumption models for material addition processes: a case of the injection molding process. In *Leveraging technology for a sustainable world* (pp. 269-274). Springer, Berlin, Heidelberg.

Schiffers, I. R., Holzinger, G. P., & Huster, G. (2016) Adaptive process control for stabilizing the production process in injection moulding machines.

SPI, Plastics Fact Sheet, 2009

Spiering, T., Kohlitz, S., & Sundmaeker, H. (2013). Advanced Product and Process Design Through Methodological Analysis and Forecasting of Energy Consumption in Manufacturing. In *Advances in Sustainable and Competitive Manufacturing Systems* (pp. 29-43). Springer, Heidelberg.

Taisch M, Sade V, May G, Stahl B (2013) “Sustainability assessment tools state of research and gap analysis. *Advances in Production and Management Systems 2013. Part II. IFIP AICT 415 426-434 2013.*

Thiede, S. (2012), “Energy efficiency in manufacturing systems”, Springer-Verlag.

Thiriez, A., Gutowski, T., “An environmental analysis of injection molding”. In *Proceedings of the 2006 IEEE international symposium on electronics and the environment, Scottsdale, AZ, USA, pp 195–200, 2006.*

Westkämper, E. (2008). *Manufuture and sustainable manufacturing. Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier*, 11-14.

Yin S, Li X, Gao H, Kaynak O. (2015). Data-based Techniques Focused on Modern Industry: An overview in *IEEE Transactions on Industrial Electronics* (Volume 62; Issue 1) DOI:10.1109/TIE.2014.2308133

ANEXOS



Energy consumption analysis of ABS plastic parts injected in a hybrid injection moulding machine

Javier Ávila-Cedillo, Vicente Borja, Marcelo López-Parra & Alejandro C. Ramírez-Reivich

To cite this article: Javier Ávila-Cedillo, Vicente Borja, Marcelo López-Parra & Alejandro C. Ramírez-Reivich (2018): Energy consumption analysis of ABS plastic parts injected in a hybrid injection moulding machine, International Journal of Sustainable Engineering, DOI: [10.1080/19397038.2018.1521881](https://doi.org/10.1080/19397038.2018.1521881)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/19397038.2018.1521881>



Published online: 09 Oct 2018.



Submit your article to this journal [↗](#)



View Crossmark data [↗](#)



Energy consumption analysis of ABS plastic parts injected in a hybrid injection moulding machine

Javier Ávila-Cedillo^a, Vicente Borja^a, Marcelo López-Parra^b and Alejandro C. Ramírez-Reivich^a

^aFacultad de Ingeniería, Centro de Diseño Mecánico e Innovación Tecnológica, Universidad Nacional Autónoma de México; ^bUnidad de Alta Tecnología, Mexico City, México

ABSTRACT

The energy analysis of injection moulding processes is influenced by complex interactions amongst the moulded part, its material, the injection machine, the process parameters and the environmental conditions. The availability of energy usage analyses that comprehend information on specific materials and machine kind is limited. This paper reports a study that estimates and analyses the power usage profile (PUP), the specific energy consumption (SEC), and the energy distribution at an operation level of two different injected parts made of acrylonitrile-butadiene-styrene and produced in a hybrid injection moulding machine. The methodology followed by the authors incorporates an experiment carried out in an industrial facility. A large sample size, and data-acquisition and data post-processing processes to obtain an accurate PUP and SEC are used. A breakdown of the energy consumed by the injection moulding process of the parts studied at an operation level using Sankey diagrams is discussed. The study results are used to identify strategies to reduce the energy consumed by the processes. The methodology employed, and the strategies reported could be used with other plastic parts regardless of the material and machine used. The results reported are new experimental data useful input for theoretical models.

ARTICLE HISTORY

Received 5 June 2017
Accepted 11 July 2018

KEYWORDS

Power usage profiles;
specific energy
consumption; energy
behaviour; power
consumption; ABS parts;
hybrid injection moulding
machine

1. Introduction

Technological and sustainability challenges have led to the development of more efficient and clean processes. Academia and industry are developing tools and methodologies to address these challenges. Other issues such as new market regulations, global environmental legislation, resource depletion and social impact are growing concerns and, thus, companies have been under pressure to become more efficient and cleaner (Brundtland 1987; Fichter and Pfriem 2007; Thiede 2012). Energy and environmental impact measurement and assessment have facilitated this transition since they offer the basis of a baseline for systematic reductions and performance tracking. Therefore, the development of more measurement and analysis methodologies to evaluate the environmental impact, efficiency and energy usage in manufacturing processes is necessary (Freeman 1996; Mani et al. 2014).

should also include relevant input and output flows, energy usage and an understanding of the interactions among components, operations, environment and hardware.

Energy usage analyses are of particular interest for the plastic injection moulding industry, worth 300 billion euros in Europe (Plastics Europe 2015) and 300 billion dollars in the USA (Plastics Europe 2009). These analyses may lead to actions producing important cost-savings.

There is a trend in researching energy consumption in moulding machine operations aiming at proposing new methodologies for the optimisation of energy usage in the process. The energy analyses available for injection moulding processes cover less than 2% of the materials used for plastic injection applications (Thiriez and Gutowski 2006; Kanungo and Swan 2008). Analyses of the three types of injection machines (electric, hydraulic and hybrid) using different moulds and materials have been reported. However, there is a need to increase the number of studies to cover the extensive variety of materials existing in the market, the

