



ANÁLISIS DE INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD PARA EL PROCESO DE FABRICACIÓN DE ÁLABES PARA TURBORREACTORES

SHARON TORRES CARRILLO¹, CARLOS VILA PASTOR², HÉCTOR R. SILLER³

¹Tecnológico de Monterrey
Escuela de Ingeniería y Ciencias
Av. Eugenio Garza Sada #2501 Sur, Monterrey, N.L. 64849, México

²Universitat Politècnica de València
Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales.
Camino de Vera, s/n. 46022 Valencia, España

³University of North Texas
Department of Engineering Technology
3940 North Elm St. Denton, Texas 76207 USA

(Recibido 30 de marzo de 2018, para publicación 15 de julio de 2018)

Resumen – Con la evaluación del ciclo de vida, se identificaron y analizaron los indicadores de sostenibilidad del proceso de fabricación de álabes para turborreactores. La evaluación de indicadores sigue la metodología ReCiPe, enfocándose en las emisiones del aire, agua y suelo que emite cada proceso. Los resultados obtenidos aportan información sobre el potencial de toxicidad que afecta a la salud humana y al ecosistema. El estudio concluye con posibles acciones para sustituir aquellas operaciones del proceso con mayor impacto ambiental.

Palabras clave – Fabricación aeroespacial, análisis del ciclo de vida, impacto ambiental, moldeo a la cera perdida, maquinado de precisión.

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento exponencial de la industria aeroespacial exige un esfuerzo en mejorar las piezas en términos de calidad, acabado superficial y en propiedades mecánicas, así como en la mejora del proceso en términos de tiempo y costo. La aplicación de nuevas técnicas y procesos de fabricación han facilitado alcanzar estos objetivos, sin embargo, toda mejora continua debe crecer a la par de las demandas de la sociedad ante los temas de sostenibilidad. En este sentido existe la posibilidad de combinar nuevas tecnologías que ofrezcan un gran potencial en la reducción de emisiones de dióxido de carbono e impacto ambiental sustituyendo ciertas fases de los procesos de fabricación actuales.

En el caso de la fabricación de componentes aeroespaciales entre los principales objetivos medioambientales se encuentran la reducción del consumo energético y la minimización de emisiones de cualquier fase. El análisis de impacto ambiental brinda la oportunidad de dar a conocer el estado actual de los procesos de fabricación para ciertos componentes y los resultados de dicha evaluación pueden ayudar a que las empresas opten por mejorar los procesos convencionales invirtiendo en nuevas tecnologías, métodos o maquinarias que aporten beneficios económicos, sociales y ambientales.

En este trabajo se presenta un caso de estudio con el análisis del ciclo de vida de un álabe para un turbo-reactor. El objetivo del estudio es analizar la información relevante sobre el impacto ambiental de cada operación del proceso de fabricación en indicadores de toxicidad. De esta manera se podrá determinar qué etapa del proceso tiene mayor impacto ecológico, esta información facilitará la toma de decisiones con respecto a qué fases u operaciones de la línea de producción del álabe se deben sustituir.

El trabajo incluye la definición de resultados para la investigación y la evaluación del impacto ambiental desde la extracción de la materia prima hasta que la pieza se ubica en el área de almacenaje, pasando por procesos de moldeo a la cera perdida, tratamientos térmicos, rectificadores, limpieza nítrica y, finalmente, pruebas fluorescentes para la detección de grietas y anomalías. Para el trabajo se han cuantificados

las entradas y salidas de cada etapa del proceso de fabricación con la finalidad de obtener los indicadores de sostenibilidad. Para la obtención de resultados del análisis de ciclo de vida se implementó el software GaBi. Los resultados obtenidos aportan información sobre el potencial de toxicidad del aire, del agua y del suelo en cada etapa analizada. El estudio concluye con posibles acciones futuras para sustituir aquellas técnicas, operaciones o fases del proceso con mayor impacto ambiental.

2. DESARROLLO

El procedimiento de análisis del ciclo de vida (ACV) se ha dividido en cuatro etapas, la Fig. 1 ofrece una representación gráfica de la metodología a seguir. En la primera etapa, es definido el objetivo y el alcance del estudio con el fin de establecer los aspectos básicos del sistema del producto y las razones para realizar el estudio. El análisis del inventario del ciclo de vida (ICV) es la segunda etapa, el cual recopila de manera cualitativa y cuantitativa los datos de entradas y salidas del proceso de fabricación.

La tercera etapa es la evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV), en esta sección los resultados de la recopilación de datos son clasificados a categorías de impactos ambientales y caracterizados a indicadores potenciales. Para la conversión de datos se implementó el software GaBi, este programa cuenta con una amplia base de datos de recursos, sustancias y emisiones, la cual permite que los datos recopilados del ICV alimenten el Software GaBi, y se obtenga la EICV.

Finalmente, en la última etapa, los resultados son mostrados junto con sus respectivas conclusiones. Las conclusiones obtenidas por la interpretación de datos deberán ser consistentes con el objetivo y el alcance del estudio.

2.1. Definición de objetivo y alcance del estudio

El objetivo del estudio de investigación es analizar la información relevante sobre el impacto ambiental de cada operación del proceso de fabricación en indicadores de sostenibilidad. De esta manera se podrá determinar qué etapa del proceso tiene mayor impacto ecológico, esta información facilitará la toma de decisiones con respecto a qué fases u operaciones sustituir en la línea de producción del álabe para turborreactor.

El análisis de ciclo de vida se limitará a las entradas y salidas del proceso de fabricación, así como a los factores técnicos relacionados con cada operación. Los factores como el mantenimiento de maquinaria, el capital humano, el transporte y la distribución de materia prima, y la producción de materiales secundarios están fuera del alcance del estudio y no serán contemplados. El sistema del producto comprendido

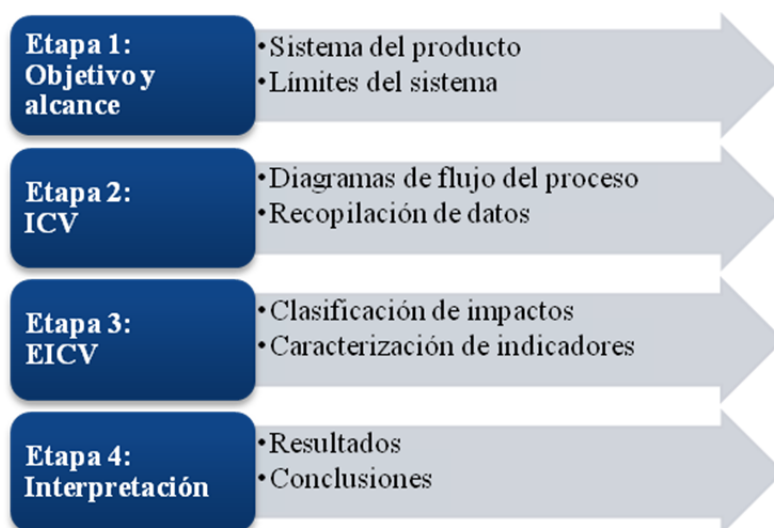


Fig. 1. Metodología del análisis de ciclo de vida.

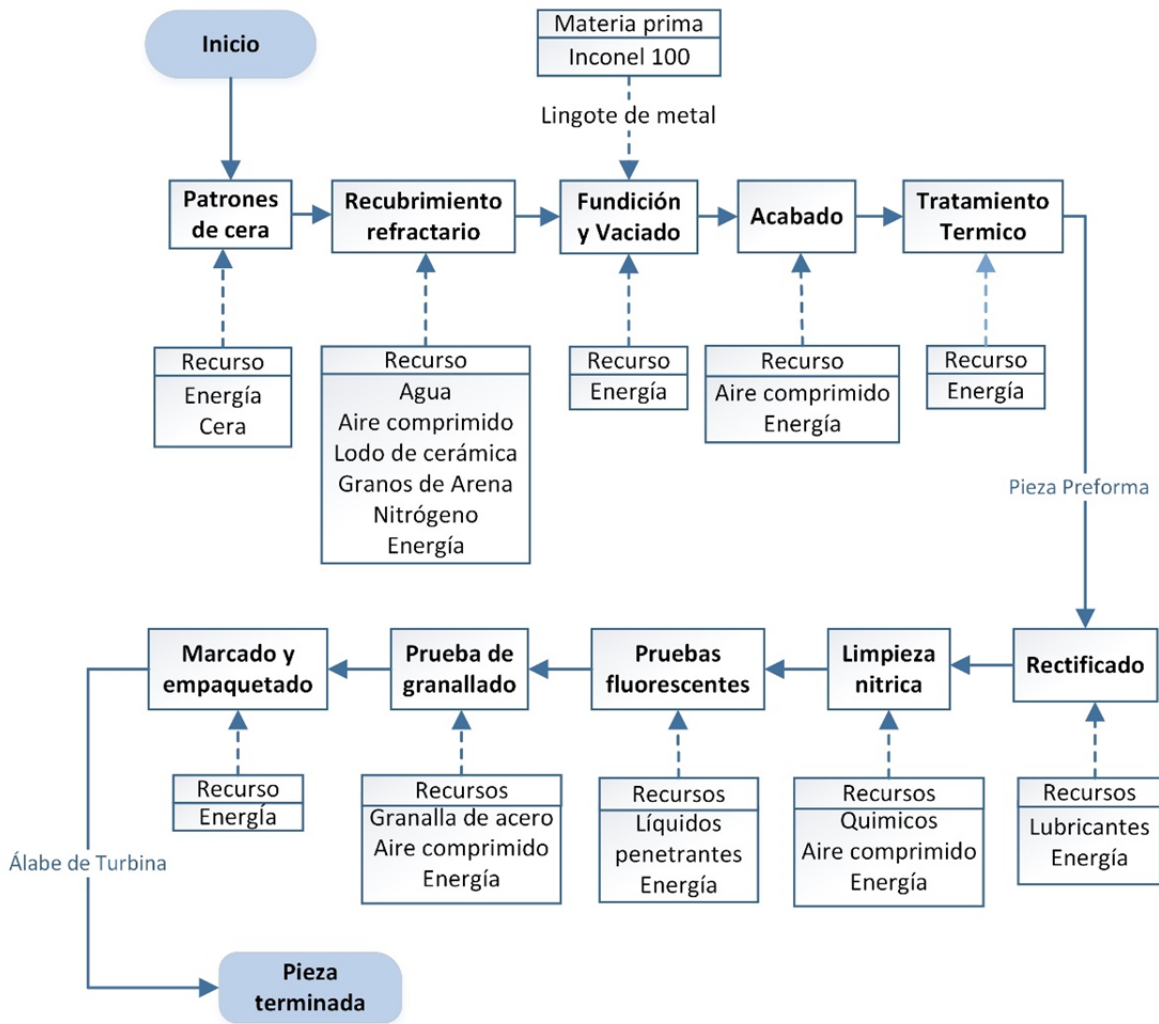


Fig. 2. Sistema del Producto (Proceso de fabricación de álabes para turborreactores).

desde la etapa de moldeo a la cera perdida hasta la etapa de maquinado a precisión del proceso de fabricación es representado en la Fig. 2.

2.2. Análisis del inventario

2.2.1. Cualitativo

A través de los procesos industriales, los modelos de entrada y salida han demostrado ser útiles para el análisis de sostenibilidad, el análisis de flujo de materiales y el análisis de energía [1-3]. En el trabajo presente, los modelos de análisis de flujo de materiales deben identificarse y cuantificarse para su análisis de evaluación. Todos los flujos de entrada (energía, materiales y fluidos) y de salida (emisiones y desechos) del proceso de fabricación de álabes para turborreactores se muestran en la tabla 1, dicha información obtenida deberá identificarse cualitativamente para tener una perspectiva del sistema del producto. Los datos obtenidos para el ICV del Moldeo a la cera perdida provienen de literatura, y ciertas operaciones del proceso fueron estimadas con los datos técnicos de maquinaria similar. La estimación del metal fundido en la etapa de vertido se obtuvo de un informe de Energía y Medio Ambiente de la industria de fundición de metal [4]. De la misma manera, los datos de la fabricación de materia prima (metal en forma de barras) se tomaron de literatura especializada [3]. La recopilación de datos de las áreas de rectificado, pruebas de inspección, limpiezas nítricas y empaquetado fueron obtenidos con base en cálculos de datos reales de una empresa aeroespacial.

Tabla 1. Resultados de las categorías de impactos ambientales.

Moldeo a la cera perdida	Entradas	Salidas
Metal aleación níquel	Material	Rebaba
Materiales refractarios	Material	Desecho de material
Cera	Material	Desecho de material
Electricidad, producción mezclada	Energía	Emisiones de gas
Agua (desionizada o destilada)	Fluido	Agua contaminada
Aire Comprimido	Fluido	Emisiones de gas
Nitrógeno	Fluido	Emisiones de gas
Maquinado de precisión	Entradas	Salidas
Pieza preforma	Material	Rebaba
Electricidad, producción mezclada	Energía	Emisiones de gas
Luz Incandescente	Energía	Emisiones de gas
Luz Fluorescente	Energía	Emisiones de gas
Agua (desionizada o destilada)	Fluido	Agua contaminada
Líquidos Penetrantes	Fluido	Agua contaminada
Lubricantes	Fluido	Agua contaminada
Químicos	Fluido	Agua contaminada

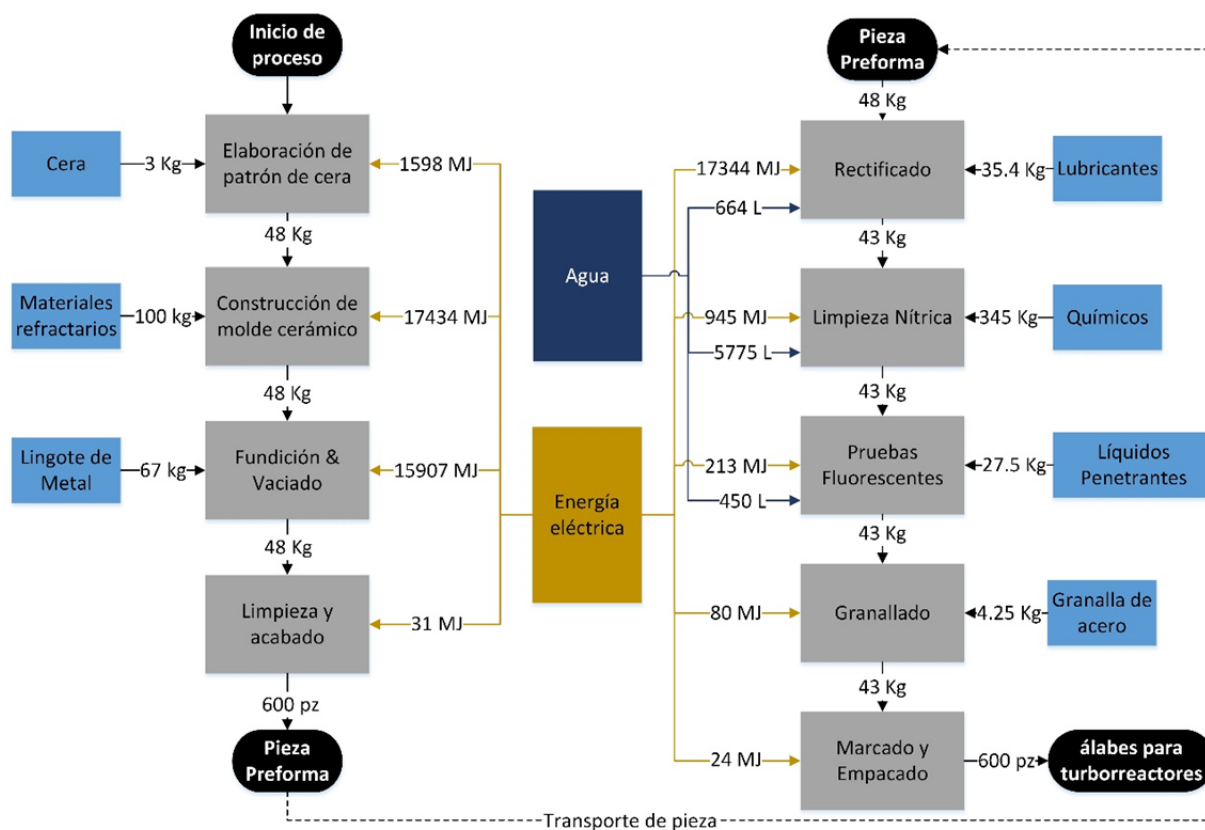


Fig. 3. Diagrama cuantitativo del proceso de fabricación.

2.2.2. Cuantitativo

Los datos cuantitativos implican una colección de información numérica en los procedimientos del sistema de producción [5]. Los principales flujos de entrada, como la energía, el material sólido y los líquidos (fluidos) se muestran en la siguiente figura. El diagrama de la Fig. 3 muestra dos secciones, divididas por un transporte de la materia prima (pieza preforma), la primera sección corresponde a las operaciones del moldeo a la cera perdida y la segunda sección, a las operaciones del área de maquinado de precisión.

2.3. Evaluación del impacto

2.3.1. Clasificación

En la fase de evaluación de impacto, los resultados del análisis de inventario se traducen en contribuciones a categorías de impacto relevantes. Las categorías de impacto relevantes deben considerarse de acuerdo con aquellas categorías relevantes para el objetivo y el alcance del estudio en particular [5]. Estos indicadores se estiman siguiendo la metodología de ReCiPe, este es un método para la evaluación de impacto (LCIA) en un análisis de ciclo de vida. La metodología ReCiPe proporciona una implementación armonizada de las vías de causa y efecto para el cálculo de los factores de caracterización del punto medio y del punto final [6]. La evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV) traduce las emisiones y extracciones de recursos en un número limitado de resultados de impacto ambiental por medio de los llamados factores de caracterización [7]. Desde la perspectiva de la sostenibilidad, la visión general de las categorías de impacto muestra los indicadores ambientales con efectos en la salud humana, daños al ecosistema y daños a la disponibilidad de recursos. Los indicadores se muestran en la Fig. 4, en el cual se aprecia la relación entre categoría de impactos, indicadores y categoría de daños.

Cada sustancia, recurso y extracción pertenecientes al proceso de fabricación se clasifico y contabilizo según su grupo de compartimentos de recursos, aire, agua dulce, agua de mar, suelo agrícola y suelo industrial, dichos grupos son las emisiones que contribuyen a los niveles de toxicidad del proceso de fabricación. Su clasificación se basa en la guía operativa de ISO 14044 del manual de LCA y para su contabilización se utilizó el software GaBi. Los resultados obtenidos son representados en la tabla 2.

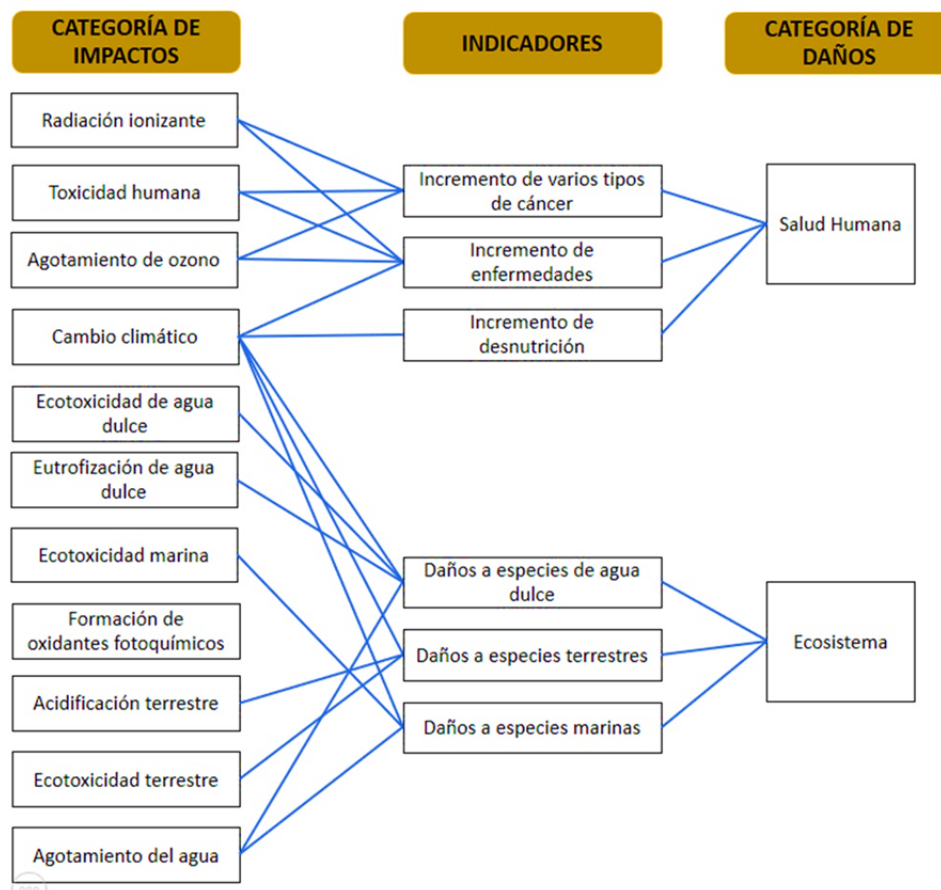


Fig. 4. Descripción general de las categorías de impacto con el método ReCiPe2016.

Fuente: Basado en (Huijbregts *et al.*, 2016).

Tabla 2. Clasificación de entradas y salidas de emisiones de toxicidad.

Emisiones	Entradas (kg equivalentes)	Salidas (kg equivalentes)
emisiones del aire	71	2.00e+05
emisiones de agua dulce	75	3.51e+07
emisiones del suelo industrial	92	1.05e-01
bienes depositados	0	3.15e+04
emisiones de agua de mar	20	1.58e+05
emisiones del suelo agrícola	0	-7.00e-03

2.3.2. Caracterización

Para el paso de caracterización de la evaluación, las categorías de impacto mencionadas en la Fig. 4 se traducen en resultados ambientales. Para el cálculo de impactos, los flujos deben cuantificarse y multiplicarse por su indicador ecológico específico [8]. Estos datos son usados para alimentar el software GaBi que simula el proceso y brinda información de sostenibilidad sobre métricas específicas. Para cada categoría de impacto, el resultado del indicador se calcula multiplicando las intervenciones relevantes por sus correspondientes factores de caracterización utilizando la siguiente ecuación.

$$I_c = \sum_s CF_{c,s} * m_s \quad (1)$$

donde:

I = Resultado del indicador para la categoría de impacto.

Tabla 3. Resultados de las categorías de impactos ambientales.

Moldeo a la cera perdida	Resultados	Unidades equivalentes
Ecotoxicidad de agua dulce	2.371	kg 1 ,4-Diclorobenceno equivalentes
Eutrofización de agua dulce	0.018	kg de fósforo equivalentes
Cambio climático	7,270.74	kg de dióxido de carbono equivalentes
Toxicidad humana	178.785	kg 1 ,4-Diclorobenceno equivalentes
Radiación ionizante	3,176.64	kg U235 ¹
Ecotoxicidad marina	0.70	kg 1 ,4-Diclorobenceno equivalentes
Eutrofización marina	4.462	kg de nitrógeno equivalentes
Agotamiento de ozono	3.225	kg CFC-11 ¹
Formación de oxidantes fotoquímicos	12.029	kg COVDM ¹
Acidificación terrestre	17.61	kg de dióxido de azufre equivalentes
Ecotoxicidad terrestre	0.14	kg 1 ,4-Diclorobenceno equivalentes
Agotamiento del agua	199.17	m ³
Maquinado de precisión	Resultados	Unidad
Ecotoxicidad de agua dulce	0.873	kg 1 ,4-Diclorobenceno equivalentes
Eutrofización de agua dulce	6.774	kg de fósforo equivalentes
Cambio climático	2,508.23	kg de dióxido de carbono equivalentes
Toxicidad humana	56.974	kg 1 ,4-Diclorobenceno equivalentes
Radiación ionizante	993.21	kg U235
Ecotoxicidad marina	0.23	kg 1 ,4-Diclorobenceno equivalentes
Eutrofización marina	1.52	kg de nitrógeno equivalentes
Agotamiento de ozono	1.00e-07	kg CFC-11
Formación de oxidantes fotoquímicos	3.982	kg COVDM
Acidificación terrestre	5.655	kg de dióxido de azufre equivalentes
Ecotoxicidad terrestre	0.047	kg 1 ,4-Diclorobenceno equivalentes
Agotamiento del agua	71.35	m ³

¹ U235: Uranio-235

² CFC-11: Triclorofluorometano

³ COVDM: Compuestos Orgánicos Volátiles Distintos del Metano

CF = Factor de caracterización.

c = Categoría de impacto

s = Emisión de la sustancia

m = Cantidad emitida expresada en kg.

Los valores de factores de caracterización (CF) para cada sustancia emitida se encuentran enlistados en el Manual sobre ACV: Anexo operacional [9]. Los cálculos para realizar la caracterización, es decir, pasar de emisiones a impactos ambientales, fueron calculados con el software GaBi. Los resultados cuantitativos del análisis de inventarios después de la caracterización del proceso de moldeo a la cera perdida y maquinado de precisión son representados en la tabla 3.

3. RESULTADOS

3.1. Interpretación del ciclo de vida

De acuerdo con la etapa de interpretación, las entradas y salidas de materiales, energía y fluidos para cada operación y proceso de fabricación se cuantifican con el fin de obtener indicadores de sostenibilidad. Los resultados de sostenibilidad ayudaron a determinar qué etapa del proceso de fabricación tiene mayor impacto ecológico en términos de cantidad de emisiones de gases nocivos para la salud y para el ecosistema. Los resultados de la clasificación de toxicidad proporcionan información sobre las emisiones del aire, el agua y el suelo de cada etapa analizada en el proceso de moldeo a la cera perdida y maquinado de precisión, los resultados de los impactos ambientales basados en la metodología ReCiPe son mostrados en las Fig. 5 y Fig. 6.

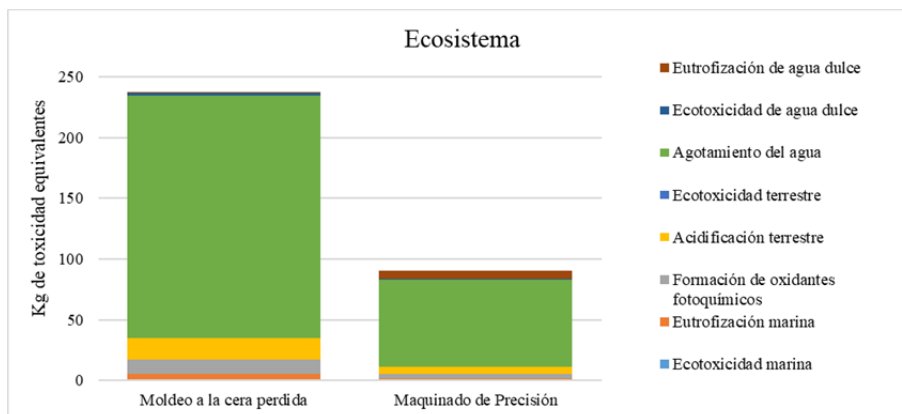


Fig. 5. Resultados de sostenibilidad de los indicadores de ecosistema del moldeo a la cera pérdida y maquinado de precisión.

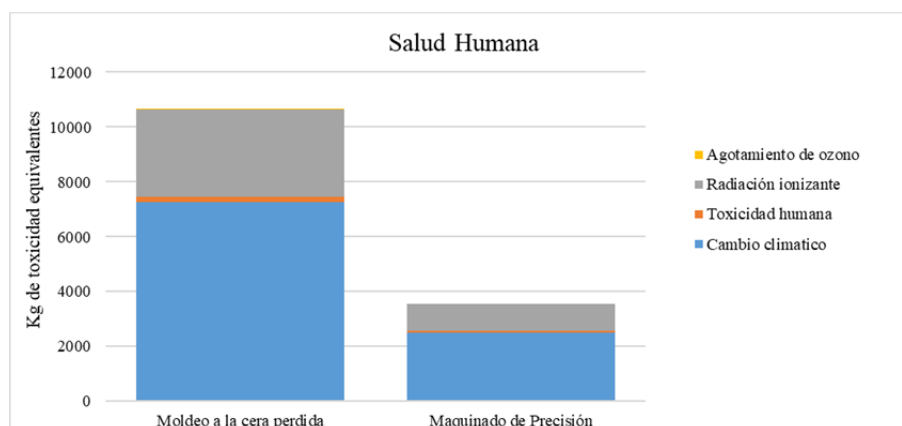


Fig. 6. Resultados de sostenibilidad de los indicadores de salud humana del moldeo a la cera pérdida y maquinado de precisión.

Teniendo en cuenta las mediciones de las 12 categorías de impacto ambiental, se puede observar que el cambio climático es el impacto con mayor contribución. El cambio climático se calculó con los datos de la cantidad de energía y horas de trabajo consumidas por la maquinaria en los procesos de fabricación. Si profundizamos en las operaciones de los procesos de fabricación, podemos observar que las emisiones de dióxido de carbono emitidas son causadas por las operaciones periódicas y el consumo de materiales refractarios en el moldeo a la cera perdida. Por otra parte, en el proceso de mecanizado de precisión, la energía es consumida directamente por maquinaria pesada de las operaciones de rectificado de la pieza.

El cambio climático afecta en el aumento del forzamiento radiativo que a su vez cambia el equilibrio de radiaciones y el control de temperatura en la superficie terrestre, por lo tanto, tiene efectos negativos en la misma, como lo es el agotamiento de la capa de ozono, el aumento de riesgo de enfermedades en la población y el aumento de catástrofes naturales, los cuales contribuyen a la desaparición y/o descontrol de especies. No obstante, el cambio climático y las emisiones que son arrojadas a la atmósfera ocasionan la formación de oxidantes fotoquímicos, los cuales son gases con potente efecto oxidante que daña a la salud humana y al ecosistema.

En términos de toxicidad humana, los resultados muestran que la exposición de diclorobenceno afecta principalmente al respirar el aire del ambiente de trabajo. Los trabajadores que son expuestos a niveles muy altos de 1,4-diclorobenceno pueden sufrir mareo, dolor de cabeza, y problemas del hígado. Hay evidencia por el Departamento de Salud y Servicios Humanos (DHHS) que inhalar 1,4-diclorobenceno puede ocasionar enfermedades respiratorias, enfermedades cancerígenas y no cancerígenas. Los resultados muestran los kilogramos de 1,4-diclorobenceno que son emitidos durante los procesos, pero es necesario trabajo futuro para calcular los límites de toxicidad permitidos en cada trabajador. Para su cálculo, se debe contemplar factores como cantidad de personal, horas de trabajo/jornada, tamaño del área de trabajo y concentraciones de aire. La Administración de Seguridad y Salud Ocupacional de EE. UU. (OSHA, por sus siglas en inglés) ha establecido un límite de 75 partes por millón (75 ppm) de 1,4-diclorobenceno en el aire del trabajo.

Los impactos de ecotoxicidad marina, de agua dulce y terrestre afectan los ecosistemas más vulnerables, provocando cambios en la composición de especies, pérdida del hábitat, cambios de inundaciones y sequías, cambios bruscos de temperatura, entre otros. Otros impactos que repercuten en el ecosistema son la eutrofización que es el aumento de fósforo en el agua, lo que conlleva al agotamiento de agua debido a las grandes cantidades de agua necesarios para la mezcla de materiales refractarios en el proceso de moldeo a la cera perdida.

4. CONCLUSIONES

El presente estudio proporciona un análisis ambiental en la fabricación de álabes para turborreactores. Su principal contribución novedosa radica en ser un caso de estudio real aplicado directamente en la industria aeroespacial, así como en la medición de entradas y salidas en las líneas de producción, y la obtención del análisis de los indicadores ambientales orientados a la evaluación de procesos para componentes aeroespaciales. La recopilación de datos de este trabajo puede ser una pieza crucial en la planificación estratégica de las empresas, con el propósito de tener una mayor comprensión de la relación entre las tecnologías y los impactos ambientales, ya que las decisiones de planificación pueden optimizar muchos factores a lo largo del ciclo de vida del producto.

Los resultados muestran que el cambio climático es el impacto ambiental con mayor relevancia en la fabricación de álabes para turborreactores. Dicho impacto ambiental proveniente del alto consumo de energía indica que existe un porcentaje alto de emisiones de dióxido de carbono arrojados a la atmósfera que son nocivos para la salud humana ocasionando incremento de enfermedades, así como al ecosistema generando daños a especies marinas y terrestres. El impacto de consumo energético para fabricar un alabe es constituido por $\frac{3}{4}$ partes de la fabricación de materia prima (pieza preforma) y $\frac{1}{4}$ parte corresponde a la pieza maquinada (pieza final). Esto es provocado por la maquinaria pesada y los procesos repetitivos que son llevados a cabo en el proceso de moldeo a la cera perdida. Así mismo, los resultados de las categorías de impacto ambiental (con excepción de la eutrofización de agua dulce), la etapa de fabricación de mol-

deo a la cera perdida genera mayores niveles de toxicidad que la etapa de maquinado de precisión, por lo que se propone sustituir y/o mejorar el proceso de moldeo a la cera perdida.

Algunas posibles acciones para la mejora del proceso del moldeo a la cera perdida no solo en cuestiones de sostenibilidad sino también tecnológicas, puede ser la implementación de las tecnologías aditivas para fabricar los componentes aeroespaciales, sustituyendo el proceso de moldeo por impresiones de metales en 3D. En un futuro, esta tecnología emergente reemplazará algunas etapas de los procesos de producción, garantizando así la optimización y la alta productividad para reducir el costo de la cadena de suministro de las empresas y los plazos de entrega.

El estudio fue de gran utilidad para mostrar los efectos de las operaciones y técnicas de fabricación en componentes con geometrías complejas. La implementación de la metodología ACV muestra ser efectiva en el enfoque requerido para la toma de decisiones y el cumplimiento de los objetivos de la evaluación de proyectos.

REFERENCIAS

- [1] Huang, S.H., Liu, P., Mokasdar, A., "Additive manufacturing and its societal impact: a literature review", 1191–1192 (2013)
- [2] Lenzen, M., Murray, S.A., Korte, B., Dey, C.J., "Environmental impact assessment including indirect effects - A case study using input-output analysis," *Environ. Impact Assess. Rev.*, **23**(3), 263–282 (2003)
- [3] Wilson, J.M.M., Piya, C., Shin, Y.C.Y.C., Zhao, F.F., Ramani, K., "Remanufacturing of turbine blades by laser direct deposition with its energy and environmental impact analysis", *J. Clean. Prod.*, **80**(0), 170–178 (2014)
- [4] Margolis, N., Jamison, K., Dove, L., "Energy and environmental profile of the U.S. metalcasting industry", (1999)
- [5] International Organization for Standardization, "ISO 14044:2006-Environmental management. Life cycle assessment. Requirements and guidelines" (2006)
- [6] Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A., Struijs, J., Van Zelm, R., "ReCiPe 2008", *Potentials*, 1–44 (2009)
- [7] Huijbregts, M.A.J. et al., "ReCiPe 2016: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level - Report 1 : Characterization", *Natl. Inst. Public Heal. Environ.* (2016)
- [8] Burkhart, M., Aurich, J.C., "Framework to predict the environmental impact of additive manufacturing in the life cycle of a commercial vehicle", *Procedia CIRP*, 29, 408–413 (2015)
- [9] Guinée, J.B., *Handbook on life cycle assessment- Operational Guide to the ISO standards*. Kluwer Academic Publishers (2002)

DEFINITION AND ANALYSIS OF SUSTAINABILITY INDICATORS FOR THE MANUFACTURING PROCESS OF TURBINE BLADES

Abstract – The sustainability indicators for the manufacturing process of turbine blades were identified and analyzed using the Life Cycle Assessment. The evaluation of indicators follows the ReCiPe methodology, focusing on the air, water and soil emissions emitted by each process. The results obtained provide information of the toxicity potential that affects human health and the ecosystem. The study concludes with possible actions to replace those operations of the process with the higher environmental impact.

Keywords – Aerospace Manufacturing, Life Cycle Assessment, Environmental Impact, Investment Casting, Precision Machining.