



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO.
DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA.



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA

*“Análisis técnico, económico y ambiental de procesos de manufactura
aditiva”*

TESIS

Presentado por:

M.C. Juan José Olivarez Areyan

A la división de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química
como requisito para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA

Dirigido por:

Dr. Fabricio Nápoles Rivera

Morelia Michoacán. Marzo 2023



ABSTRACT

Technical, economic and environmental analysis of additive manufacturing processes.

Fabricio Nápoles Rivera.

Worldwide there is a social problem related to the motor disability of the population, which occurs more frequently in older people who are more likely to experience health complications from bone fractures. In some cases, these complications require reconstruction or total replacement. In this work an optimization model for the supply chain of medical prostheses through additive manufacturing is presented. A superstructure is presented to satisfy the demand of medical prostheses and it is applied to a geographical region to obtain the maximum economic benefit and at the same time quantify the environmental impact through the eco-indicator 99 methodology. The mathematical model considers the optimal location of the mineral extraction sites, for the raw material conversion technologies and the printing of medical prostheses, it also includes the decision of the type of technology required. A case study for a geographical region of Mexico is solved to show the applicability of the proposed methodology. Two products are generated in the supply chain, one is the by-product of titanium alloy powder or wire and the other is medical prosthesis. Two objective functions are considered in the model: total annual profit as an economic index and the eco-indicator 99 as an environmental index. The results show an important economic and environmental potential, because when evaluation the points of the eco-indicator 99, it presents low environmental impact and at the same time considerable profits are shown.

Keywords: Optimization, disability, additive manufacturing, eco-indicator 99.



RESUMEN.

Análisis técnico, económico y ambiental de procesos de manufactura aditiva.

Fabricio Nápoles Rivera.

Alrededor del mundo existe una problemática social relacionada a la discapacidad motriz de la población, la cual se agudiza en personas de edad avanzada que presentan más probabilidades de experimentar complicaciones de salud por fracturas óseas. En algunos casos estas complicaciones requieren reconstrucción o remplazo total. En este proyecto se presenta un modelo de optimización para la cadena de suministro de prótesis médicas mediante manufactura aditiva. Se presenta una superestructura para satisfacer la demanda de prótesis médicas y se aplica a una región geográfica para obtener el máximo beneficio económico y a la vez cuantificar mediante las metodologías del eco-indicador 99 el impacto ambiental. El modelo matemático considera la ubicación óptima de los sitios de extracción de minerales, para las tecnologías de conversión de la materia prima y la impresión de las prótesis médicas, así como la decisión del tipo de tecnología requerida. Se resuelve un caso de estudio para una región geográfica de México para mostrar la aplicabilidad de la metodología planteada. Se generan dos productos en la cadena de suministro, uno es el sub-producto de polvo o alambre de aleación de titanio y el otro son las prótesis médicas. En el modelo se consideran dos funciones objetivo: las ventas totales anuales como índice económico y el eco-indicador 99 como índice ambiental. Los resultados muestran un importante potencial económico y ambiental.

Palabras clave: Optimización, discapacidad, manufactura aditiva, eco-indicador 99.



CONTENIDO

ABSTRACT	2
RESUMEN.....	3
ÍNDICE DE FIGURAS.....	5
INDICE DE TABLAS.....	6
INTRODUCCION.....	7
ANTECEDENTES.....	23
JUSTIFICACIÓN.....	28
HIPÓTESIS.....	28
OBJETIVOS.....	28
Objetivo general.....	28
Objetivos específicos.....	28
METODOLOGÍA.....	30
DECLARACIÓN DEL PROBLEMA.....	34
FORMULACIÓN MATEMÁTICA.....	36
BALANCES DE MASA Y RESTRICCIONES DE LA CADENA DE SUMINISTRO.....	36
MODELO ECONOMICO.....	41
MODELO AMBIENTAL.....	43
FUNCIONES OBJETIVO.....	45
CASO DE ESTUDIO.....	47
RESULTADOS.....	52
Análisis de resultados evaluando objetivo económico y variando la demanda de prótesis médicas.....	52
Análisis de resultados evaluando los objetivos económicos y ambientales.....	56
CONCLUSIONES.....	66
REFERENCIAS.....	67



ÍNDICE DE FIGURAS.

Fig. 1 Proceso de fotopolimerización. Tecnologías MA	10
Fig. 2 Proceso extrusión de material. Tecnologías MA.	10
Fig. 3 Proceso inyección de material. Tecnologías MA.....	11
Fig. 4 Proceso inyección de aglutinante. Tecnologías MA.	12
Fig. 5 Fusión de lecho de polvo. Tecnologías MA.....	12
Fig. 6 Proceso deposición directa de energía. Tecnologías MA.	13
Fig. 7 Proceso Kroll para la extracción del Titanio.....	19
Fig. 8 Diagrama de bloques de la metodología del proyecto. Manufactura aditiva.	31
Fig. 9 Superestructura de la cadena de suministro de procesos de manufactura aditiva.	37
Fig. 10 Principales destinos de titanio en México (SECRETARÍA DE ECONOMIA 2020).	49
Fig. 11 Conjunto de soluciones Pareto disminuyendo demanda de prótesis médicas.....	53
Fig. 12 Diagrama de flujo para el escenario F en el año 2025.	55
Fig. 13 Conjunto de soluciones óptimas Pareto.	59
Fig. 14 Diagrama de flujo para el escenario A en el año 2025.....	61
Fig. 15 Configuración óptima para el escenario C en el año 2025.....	64
Fig. 16 Diagrama de flujo para el escenario H en el año 2025.....	65



INDICE DE TABLAS.

Tabla 1 Procesos de manufactura convencional de materiales.....	8
Tabla 2 Categorías de impacto consideradas en el caso de estudio.....	35
Tabla 3 Demanda de prótesis médicas.	48
Tabla 4 Demanda de polvo y alambre de aleación de titanio.....	49
Tabla 5 Composición del polvo.....	51
Tabla 6 Resultados para cada escenario evaluando aspecto económico disminuyendo demanda de prótesis.....	53
Tabla 7 Flujos correspondientes a la solución del escenario F.....	54
Tabla 8 Locación y tipo de tecnología para el procesamiento de la aleación de titanio.	57
Tabla 9 Locación y tipo de tecnología de impresión 3D.....	57
Tabla 10 Resultados para cada escenario evaluando aspecto económico y ambiental.	58
Tabla 11 Flujos correspondientes a la solución del escenario A.....	60
Tabla 12 Flujos correspondientes a la solución óptima del escenario C.....	62
Tabla 13 Flujos correspondientes a la solución del escenario H.....	63



INTRODUCCION.

Para fines de un conocimiento más profundo acerca de los procesos de manufactura de materiales es necesario revisar sus orígenes, que datan desde el periodo 4000-5000 a.C. En la antigüedad nuestros antepasados crearon instrumentos que los ayudaron a expresar a través de pinturas rupestres su cotidianidad y así dejar rastro de su historia. Al paso del tiempo crearon herramientas cada vez más complejas que facilitaban, agilizaban y proporcionaban mayor eficacia a sus tareas diarias, en un fugaz vistazo a nuestra historia, hoy en día contamos con tecnología que hace algunas décadas era difícil imaginar.

Estos avances proporcionan a las industrias la facilidad de adquirir maquinaria para producir en masa diferentes bienes, a esto lo llamamos manufactura. Existen dentro de esta definición dos tipos de procesos, los técnicos, que refieren una serie de pasos físicos y químicos que modifican las propiedades, geometría y/o propiedades físicas de la materia prima utilizada. Y los económicos en donde existen cambios en el material utilizado por ensamblaje u otro proceso dándole mayor valor.

Regresando a nuestro pasado veremos que la mayor parte de instrumentos que se utilizaban en la época de las cavernas eran construidos de materiales cercanos y al alcance de los habitantes de las distintas zonas geográficas, primero piedra, metal o madera y posteriormente utilizaron el oro, hierro, plata, estaño, cobre, bronce, plomo y latón para adornos o por ejemplo el martillo. Al paso de los siglos, a estos procesos simples les comenzaron a hacerle mejoras y más complejas operaciones, mayores producciones y aumentos en los niveles de calidad del producto (Atzeni y col, 2012).

La fabricación de hierro fue una de las primeras producciones en distintos países, después de ello, una amplia variedad de materiales empezó a desarrollarse. Hoy en día, están disponibles inmensos materiales metálicos y no metálicos con propiedades distintas, entre los materiales disponibles en el mercado se encuentran los materiales industriales o compuestos, las cerámicas de alta tecnología, los plásticos reforzados y los nanomateriales que ahora se utilizan en gran parte de los productos.

Los procesos de manufactura de pueden clasificar en distintas categorías como se observa en la Tabla 1:

“Análisis técnico, económico y ambiental de procesos de manufactura aditiva”



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO.
DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA.**



Tabla 1 Procesos de manufactura convencional de materiales.

Procesos de manufactura convencional					
Formación por desprendimiento de material		Formación forzada			
Maquinado		Formación plástica mecánica		Formación térmica	
Torneado	Se extrae metal de una pieza de trabajo giratoria utilizando una herramienta de corte para lograr las consideraciones de diseño de la pieza (Ononiwu y col, 2021).	Laminado	En este proceso se hace pasar el material sobre rodillos para reducir el espesor del material deseado.	Fundición	La fundición es uno de los procesos más antiguos y consta de fundir el metal para posteriormente vaciarlo al molde deseado y dejarlo enfriar.
Taladrado	Este proceso involucra el giro de una broca sobre el material para hacer el corte deseado.	Forjado	Es el procedimiento de formación de metales más antiguo que se conoce. Costa de utilizar un martillo o por presión de una prensa para darle la forma deseada al material y se hace a temperaturas elevadas.		
Cepillado	En el proceso de cepillado es necesario contar con una maquina cepilladora para realizar el desprendimiento de viruta.	Extrusión	Este proceso es utilizado para polímeros empleando compresión, en el cual el material se suministra para hacerlo fluir a través de la abertura de un cono de extrusión y así, darle la forma en su sección transversal.	Soldadura	El proceso de la soldadura consiste en unir piezas por medio de una aleación metálica, fácilmente fundible tal como el estaño, el plomo, etc.
Aserrado	En el aserrado se utiliza una hoja de sierra para realizar el desbaste del material cortándolo.				
Brochado	Se utiliza una herramienta rectilínea de filos múltiples para trasladarla sobre el material y darle la forma deseada.	Trefilado	El trefilado es un proceso de reducción aplicado a sólidos y generalmente es necesario tener dos o más operaciones.		

A este tipo de manufactura se le conoce como manufactura tradicional, formativa o sustractiva en el cual el material se elimina mediante una de las técnicas antes mencionadas.

Existe otro tipo de manufactura como lo es la manufactura aditiva (MA), mejor conocida como impresión tridimensional 3D, que tiene un inicio desde el año 1980 con el primer método de impresión 3D, el cual es un conjunto de técnicas que permite producir objetos sólidos por medio de la impresión sucesiva de finas capas de material. MA es versátil, flexible

“Análisis técnico, económico y ambiental de procesos de manufactura aditiva”



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO. DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA.



y sumamente personalizable, como tal, puede abarcar la mayoría de los sectores de la producción industrial. La rápida proliferación de la MA en los últimos 50 años ha permitido el desarrollo integrado y el modelado como una técnica de creación rápida de prototipos (Gao y col, 2015). Existe un gran interés en la industria por considerar la MA como una de las principales vías de la ingeniería de producción. Por ello, la MA se utiliza para la producción industrial que posibilita la creación de piezas y sistemas más ligeros y fuertes. Con este avance tecnológico se posibilita un puente que permite la transición de procesos tecnológicos a digitales. Con los avances tecnológicos en áreas como la comunicación, imagen, arquitectura y la ingeniería, la manufactura aditiva se puede acoplar para aportar mayor flexibilidad y eficiencia digital a su fabricación. El enfoque principal de MA se ha centrado en la personalización de productos de bajo volumen y alto valor agregado que se puedan fabricar rápidamente. Por ejemplo, los principales fabricantes de automóviles ahora están produciendo componentes de motor con MA que puedan manejarse en carretera; la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA) por sus siglas en inglés de los Estados Unidos de América ha aprobado aleaciones como material de implante biomédico de uso humano fabricados a través de MA (Dewidar y col, 2007; Huang y col, 2015).

Las diferentes tecnologías de la manufactura aditiva han sido clasificadas por el comité internacional de la sociedad estadounidense para pruebas y materiales en distintos procesos relacionado al método de deposición y unión entre capas las cuales son:

Fotopolimerización: El proceso de fotopolimerización involucra una curación selectiva de un polímero líquido fotosensible pre-depositado usando luz (Strucker, 2011). En estereolitografía, la principal técnica de fotopolimerización utiliza un rayo de luz láser o una fuente de luz ultravioleta para proyectar una sección transversal del objeto sobre un fotopolímero, lo que da como resultado la impresión capa por capa. Este proceso de repite hasta crear todas las capas como estructura completa como podemos observar en la Fig. 1.

Extrusión del material: En este proceso, se alimenta un flujo continuo de materiales capa por capa en forma de pasta o lodo utilizando un sistema de movimiento 3D incorporado con una boquilla de extrusión (ver Fig. 2). La extrusión de materiales se puede clasificar en dos

grupos: procesos basados en la fusión de materiales y ensamblaje de escritura directa (Smay y col, 2002).

Inyección de material: En esta tecnología se utiliza la impresión por inyección de tinta u otras técnicas similares para depositar gotas de material que se distribuyen selectivamente a través de una boquilla o un orificio para construir la estructura 3D. El material se convierte en un sólido posterior al proceso de deposición por enfriamiento, cambios químicos o evaporación del solvente como se puede apreciar en la Fig. 3 (Landers y col, 2000; Kalita y col, 2003).

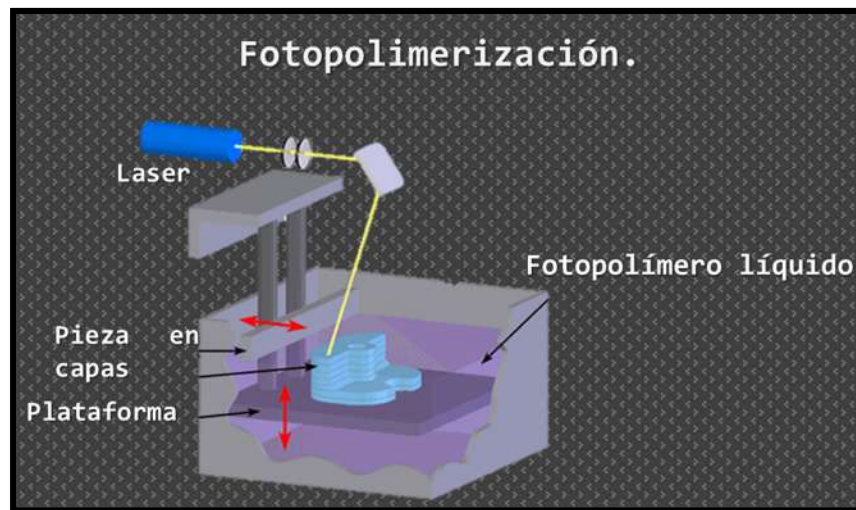


Fig. 1 Proceso de fotopolimerización. Tecnologías MA

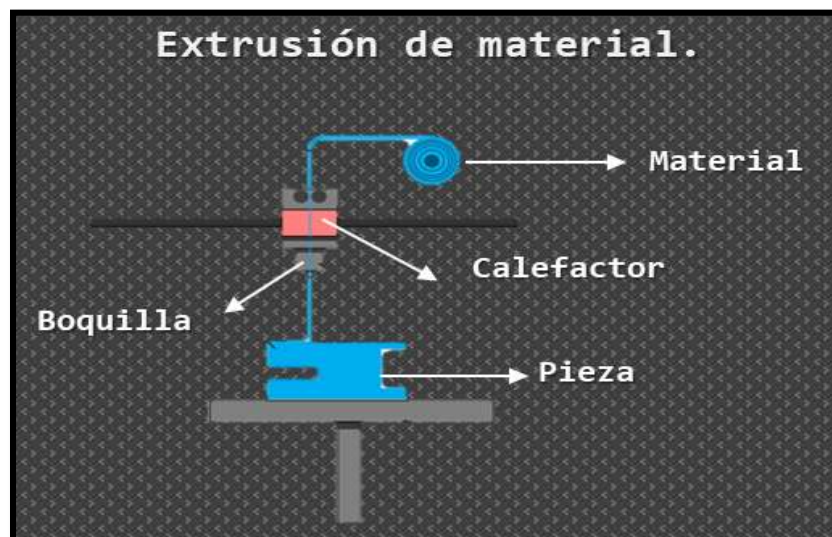


Fig. 2 Proceso extrusión de material. Tecnologías MA.
“Análisis técnico, económico y ambiental de procesos de manufactura aditiva”

Inyección de aglutinante: Para esta técnica se utilizan boquillas para imprimir el material; sin embargo, en lugar de imprimir con el material de construcción, el material impreso es el pegamento que mantiene el polvo unido en la forma deseada (Strucker, 2011). Enseguida el proceso pasa a una reducción de lecho de polvo a través de un pistón y luego se extiende una nueva capa de polvo sobre la capa anterior y, así sucesivamente hasta construir toda la estructura como se puede observar en la Fig. 4.

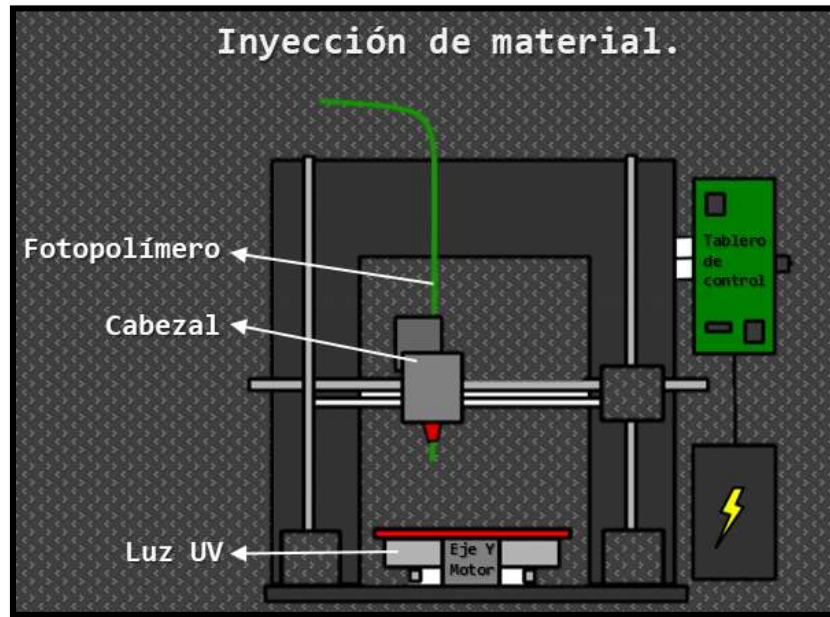


Fig. 3 Proceso inyección de material. Tecnologías MA.

Fusión de lecho de polvo: Las tecnologías de fusión de lecho de polvo se basan en los principios de colocar una capa de polvo metálico en la plataforma de construcción y escanear el lecho de polvo con una fuente de calor, como un láser o un haz de electrones, que derrite parcial o completamente el polvo en el camino de la viga y el polvo se re-solidifica y se une a medida que se enfría (Strucker, 2011). El traslado de la trayectoria de la herramienta capa por capa se rige por los datos de un software para crear y editar modelos bidimensionales y tridimensionales de objetos físicos de la pieza que se está construyendo (ver Fig. 5).

Deposición directa de energía: Se utiliza un rayo láser para derretir y fusionar partículas del material en polvo suministrado desde el cabezal de deposición de material. La base X-Y se mueve para dar forma a la sección transversal de cada capa deseada. Este proceso se repite

hasta que se crean todas las capas transversales deseadas de la estructura como se ve en la Fig. 6 (Gibbs y col, 2014).

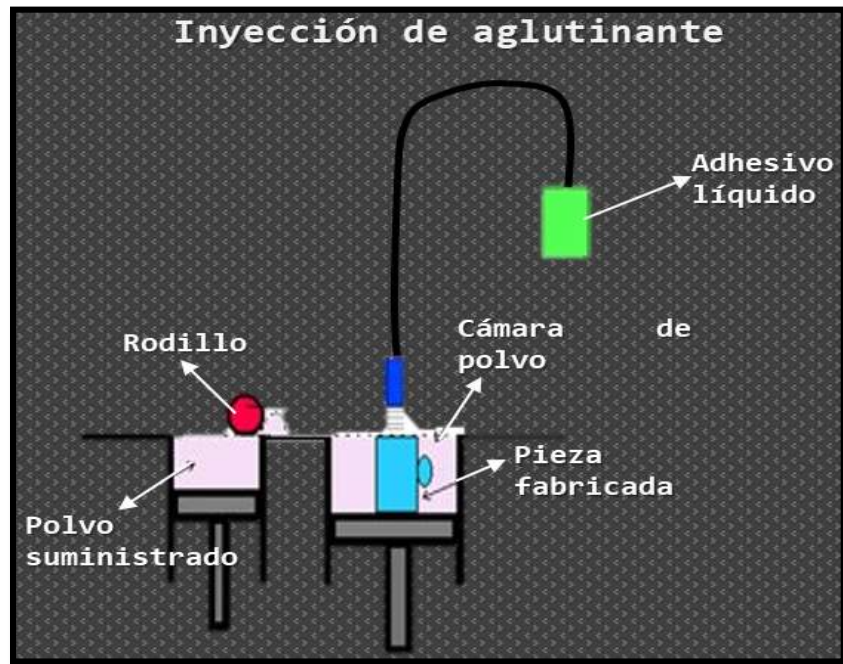


Fig. 4 *Proceso inyección de aglutinante. Tecnologías MA.*

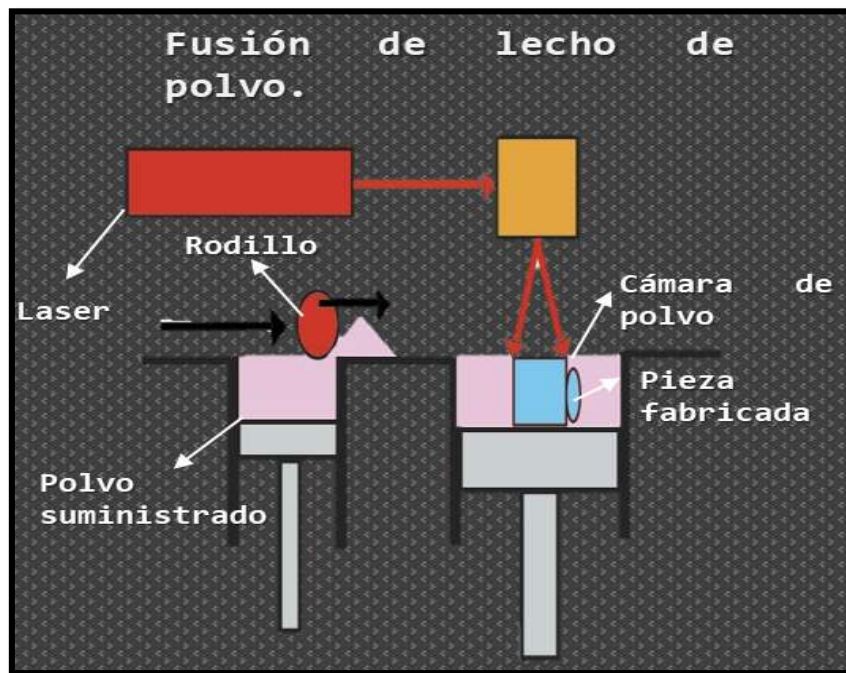


Fig. 5 *Fusión de lecho de polvo. Tecnologías MA.*

“Análisis técnico, económico y ambiental de procesos de manufactura aditiva”

Actualmente se ha visto un incremento exponencial en los materiales utilizados en la MA, asimismo, se ha hecho investigación y fusión de materiales nuevos, por ejemplo, los polímeros tienen temperaturas de transición y fusión relativamente más bajas, lo que facilita el flujo a una temperatura relativamente más baja que la de las cerámicas y los metales. Y gracias a ello ha habido un avance notable en la creación de piezas cada vez más exactas y eficaces.

Es importante tomar en cuenta las consideraciones en el tipo de material en la impresión 3D, por ejemplo, un simple cambio de una impresora 3D de polímero a una impresora 3D de metal para crear una estructura deseada puede llevar a resultados no pertinentes. Hoy en día, se ha utilizado la MA para producir de todo, desde armas hasta prototipos de simulación de bebés, incluso se han hecho intentos de utilizar MA para formar órganos humanos; por lo

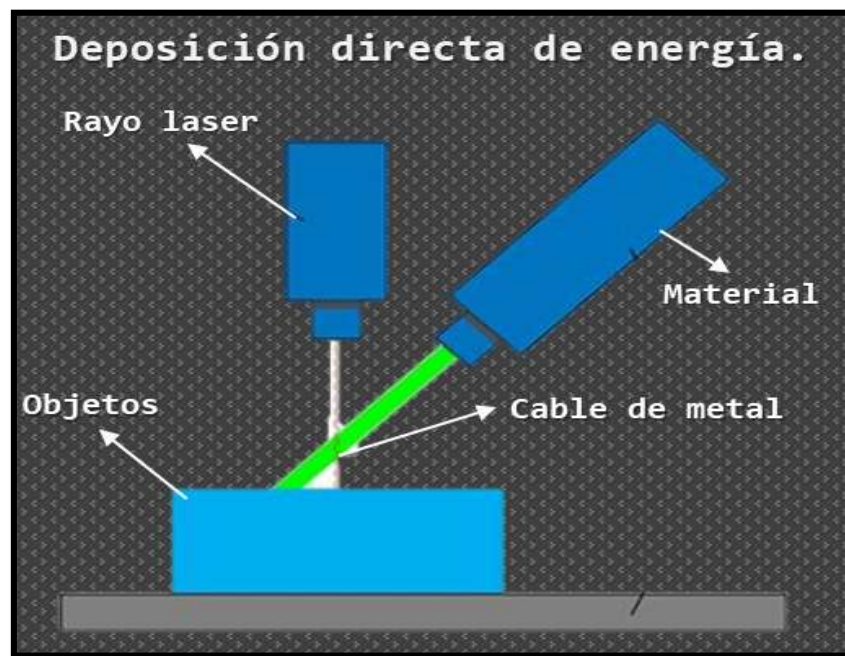


Fig. 6 Proceso deposición directa de energía. Tecnologías MA.

que, algunos autores han comentado en el campo biomédico acerca de las aplicaciones en tejidos duros, mencionando que las barreras para la interpretación clínica ahora son regulatorias en lugar de científicas o técnicas (Derby, 2012). Sin embargo, varios investigadores creen que aún existen problemas que deben solucionarse antes de que podamos ver la disponibilidad de imprimir implantes humanos para fines clínicos.

“Análisis técnico, económico y ambiental de procesos de manufactura aditiva”



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO. DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA.



Algunos obstáculos en la producción de la MA surgen al querer integrar un sistema seguro y bien planificado que resuelva el mayor volumen de piezas además de los detalles en los productos por ejemplo el acabo de la superficie, los bordes y los cambios de calidad de un producto hecho con un maquina u otra al no tomar en cuenta el impacto de las variables operativas como lo son el rango de potencia, tasas de producción, la longitud de onda del láser y flexibilidad del punto láser.

Varias industrias están aplicando la MA en sus procesos, algunos ejemplos de ello se mencionan a continuación:

Industrias automotrices.

- Integración de distintas piezas en una parte compuesta unificada.
- Construcción de medios de producción.
- Producción de partes de repuesto y accesorios.
- Estandarización rápida.

Aeroespacial/Aeronáutica.

- Producción de accesorios de geometría compleja.
- Control de densidad y propiedades mecánicas.
- Producción de accesorios más ligeros.

Medicina/Industria farmacéutica.

- Planificación de operaciones quirúrgicas con el uso de modelos anatómicos precisos que se basan en la tomografía computarizada (TC) o la imagen de resonancia magnética (IRM).
- Desarrollo de implantes ortopédicos y prótesis ajustables.
- Uso de un cadáver simulado impreso para entrenamiento médico.
- Impresión de tejidos vivos biodegradables para pruebas durante la fase de desarrollo de algún medicamento.

Industria deportiva.



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO. DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA.



- Producción de accesorios de geometría compleja.
- Creación de equipos de protección ajustados para una mejor aplicación y uso.
- Creación de prototipos de múltiples colores y materiales compuestos para pruebas de productos.

Industria de construcción.

- Manufactura aditiva de concretos para construcciones convencionales.
- Novedoso diseño de concretos funcionales como el concreto auto-limpiante o el concreto de alto rendimiento.
- Construcción de edificios utilizando materiales encontrados en la cercanía.
- Construcciones sin cemento.
- Bajo costo y bajo consumo de energía.

Las tecnologías MA muestran capacidad de producción eficiente. Sin embargo, MA sigue siendo una inversión muy costosa en comparación con las máquinas de fabricación tradicionales. Por lo que, varios investigadores han hecho comparaciones entre ambas manufacturas. Ferro y col, (2017) propusieron una comparación entre un proceso de fabricación tradicional y la fabricación aditiva para demostrar las posibilidades de reducción de masa utilizando el método de fusión de lecho de polvo aplicado a un scar cap de un vehículo aéreo no tripulado (UAV). En el proceso de fabricación convencional se ha demostrado que el proceso de fresado requiere 1.24 horas para fabricar la pieza y para la fabricación aditiva se requieren al menos 80 horas para hacerlo. Por lo que, en términos de eficiencia de fabricación la MA no presenta ventaja debido a la lentitud del proceso. Sin embargo, la reducción de masa alcanzable fue del 50% (de 31.473 kg a 15.715 kg) en aeronáutica es de interés porque puede reducir la masa global y así mejorar la resistencia de vuelo de la misión cuando se aplica en toda la estructura primaria.

En la actualidad las tecnologías MA han crecido exponencialmente y este crecimiento está mejorando los procesos de producción para que los productos sean más funcionales. Sin embargo, también podría minimizar los impactos ambientales. Al tener nuevas tecnologías de procesamiento el impacto ambiental siempre será una preocupación, debido a la generación de residuos y los altos consumos de energía, por lo que, la impresión

“Análisis técnico, económico y ambiental de procesos de manufactura aditiva”



tridimensional no requiere sustancias como refrigerantes, lubricantes y otros componentes que pueden ser dañinas para el medio ambiente (Gelber y col, 2014).

Una de las facilidades y ventajas de la MA es que se pueden optimizar los componentes funcionales de los productos fabricados, con ello podemos mejorar costos, tiempo de producción, generar una cantidad mínima de material desechado y disminuir el tiempo de producción. Por lo tanto, se genera un impacto positivo en el cuidado del medio ambiente sin perder de vista el equilibrio económico. Por otro lado, las nuevas tecnologías MA que están disponibles reemplazan algunas etapas de los procesos de producción convencionales, disminuyendo el uso de energía y minimizando el desperdicio y los materiales inservibles, garantizando la optimización y la productividad para disminuir el costo de la cadena de suministro y los tiempos de fabricación de los productos. Finalmente, las tecnologías MA no solo disminuyen el desperdicio, además, permite la reutilización de los materiales, razón por la cual se convierte en una opción muy atractiva para algunas industrias.

Una ventaja de los productos de metal impresos con la tecnología MA presenta resistencias superiores a las piezas convencionales que consisten en metales refinados. La variedad de metales aplicables para la producción de piezas es tan diversa como: acero inoxidable, bronce, oro, níquel, aluminio, titanio, entre otros. El polvo de metal es el que se usa con regularidad para imprimir prototipos de instrumentos metálicos, pero también se utiliza para producir dispositivos médicos.

Recientemente uno de los sectores en donde la comunidad científica ha puesto demasiado interés es en el uso de la impresión 3D en el campo de la medicina. Se han demostrado varios éxitos en el desarrollo de prótesis médicas, donde se presenta la facilidad de generar geometrías complejas que permiten el desarrollo de piezas específicas y personalizadas para cada paciente. Los materiales para elaborar productos pueden ser de tipo muy variables. Estos incluyen materiales como las resinas, la fibra de carbono, cerámicos y polímeros, junto con combinaciones en forma de materiales compuestos, híbridos o de grado funcional.

Uno de los materiales que ha causado demasiado interés en la fabricación aditiva es el titanio, ya que se han recolectado éxitos en varios campos con el uso de este material. La aplicación del titanio para la impresión de prótesis médicas se debe a que el material presenta gran

“Análisis técnico, económico y ambiental de procesos de manufactura aditiva”



ventaja en sus propiedades mecánicas (vínculo entre propiedad mecánica y densidad), también muestra magnífica resistencia a la corrosión. Mencionando dichas propiedades hacen al titanio y sus aleaciones un material excelente para la aplicación en la industria biomédica por su biocompatibilidad con los tejidos del cuerpo humano.

Una desventaja que presentan las aleaciones de titanio para el uso en la impresión 3D es su elevado costo comparado con otros materiales que se encuentran en el mismo sector. Por ejemplo, el precio del acero es de \$0.02/lb, \$0.10/lb, \$0.15/lb y \$0.6/lb en mineral, metal lingote y lámina, respectivamente. Por otro lado, el precio del aluminio es de \$0.01/lb, \$1.10/lb, \$1.15/lb y \$5.00/lb en mineral, metal, lingote y lámina, respectivamente. Mientras que para el titanio el precio es de \$0.22/lb, \$5.44/lb, \$9.07/lb y \$50.00/lb en mineral, metal, lingote y lámina, respectivamente (Ashraf y col, 2010). Por lo que, comparado con materiales que están en su mismo campo como lo es el acero y el aluminio, es complicado hacer uso del titanio. El alto costo en el precio de las aleaciones de titanio comienza en la complejidad de la obtención del elemento en su forma natural como mineral, que se extrae en forma de rutilo o ilmenita principalmente. Enseguida se debe procesar para liberar el elemento principal y aunque, el porcentaje de costo es muy bajo con relación al precio del material base, comparativamente, es superior al de sus principales competidores. Enseguida de la obtención del material base, existen varios procesados para obtener el componente final, que tiene un costo muy elevado en comparación con los materiales competidores. Por lo que, finalmente se obtiene un producto con un precio por encima al de sus adversarios.

Existen varios procesos para producir el polvo de titanio, por ejemplo, la producción de titanio mediante el proceso Kroll, proceso Armstrong, proceso hidruro-deshidruro, etc. A continuación se detallan algunos procesos aplicables al titanio.

Producción de titanio proceso Kroll.

El metal primario para la producción de aleaciones de titanio es titanio puro. Existe la producción de titanio puro mediante varios métodos, siendo el proceso Kroll el más utilizado en la industria a nivel mundial. Este proceso consta en la extracción del mineral rutilo o ilmenita. Estos minerales se colocan en un reactor de lecho fluidizado junto con cloro gaseoso y carbono y se calienta a 900 °C y la reacción química subsiguiente da como resultado la

“Análisis técnico, económico y ambiental de procesos de manufactura aditiva”



creación de tetracloruro de titanio ($TiCl_4$) impuro y monóxido de carbono. El tetracloruro de titanio resultante se introduce en tanques de destilación verticales donde se calienta para eliminar las impurezas mediante la separación mediante procesos como la destilación fraccionada y la precipitación. Estos procesos eliminan los cloruros metálicos, incluidos los de hierro, silicio, circonio, vanadio y magnesio. A continuación, el tetracloruro de titanio líquido purificado se transfiere a una vasija de reactor en la que se añade magnesio y el recipiente se calienta ligeramente por encima de $1000^{\circ}C$. En esta etapa, el argón se bombea al recipiente para eliminar el aire y evitar la contaminación del titanio con oxígeno o nitrógeno. Durante este proceso, el magnesio reacciona con el cloro para producir cloruro de magnesio líquido, dejando así el titanio puro como sólido (Gao y col, 2017). Este proceso se presenta esquemáticamente en la Fig. 7.

El sólido de titanio resultante se extrae del reactor mediante perforación y luego se trata con agua y ácido clorhídrico para eliminar el exceso de magnesio y cloruro de magnesio dejando una esponja de titanio porosa, que se martilla, se tritura y se prensa, seguido de fusión en un horno de arco eléctrico al vacío. Se deja solidificar el lingote fundido en una atmósfera de vacío. Este sólido a menudo se vuelve a fundir para eliminar las inclusiones y homogeneizar sus componentes. Por lo general, el sólido de titanio se somete a un tratamiento adicional para producir polvo de titanio requerido en el proceso de aleación.

Producción de polvo de titanio proceso Armstrong.

El proceso Armstrong se elabora como producto de procesos de extracción que producen polvo de metal primario. Este proceso es capaz de producir polvo de titanio (Ti) comercialmente puro mediante la reducción de tetracloruro de titanio ($TiCl_4$) y otros haluros metálicos utilizando sodio (Na). Este proceso produce partículas de polvo con propiedades únicas y baja densidad aparente. Al proceso Armstrong recibe el nombre de proceso en cadena. El cual consta de usar gas de tetracloruro de titanio añadiendo sodio en estado líquido. A continuación, se necesita filtrar el exceso de sodio para hacer más fácil el proceso de separación de las partículas de titanio y las de cloruro de sodio. Enseguida se utiliza un lavado de agua para realizar la separación total (Chen y col, 2011). Los subproductos pueden volver al proceso para conseguir más titanio.

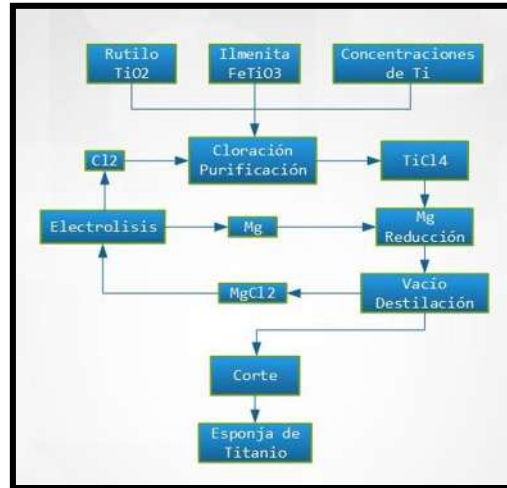


Fig. 7 Proceso Kroll para la extracción del Titanio.

Producción de polvo de titanio proceso hidruro-deshidruo.

El proceso de hidruro-deshidruo (HDH) se usa para producir polvo de titanio usando esponja de titanio, titanio, productos de molienda o chatarra de titanio como materia prima. El proceso de hidrogenación se logra utilizando un horno discontinuo que generalmente se opera en condiciones atmosféricas de vacío y / o hidrógeno. Las condiciones necesarias para la hidrogenación del titanio son una presión atmosférica y temperaturas máximas de 800 ° C. Este proceso da como resultado la formación de hidruro de titanio e hidruros de aleación que generalmente son de naturaleza quebradiza. Estos hidruros metálicos se muelen y tamizan para producir polvos finos. El polvo se cambia de tamaño utilizando una variedad de técnicas de trituración y molienda de polvo, que incluyen: una trituradora de mandíbulas, molienda de bolas o molienda por chorro. Después de que los polvos de hidruro de titanio se trituran y clasifican, se vuelven a colocar en el horno discontinuo para deshidrogenar y eliminar el hidrógeno intersticial al vacío o en atmósfera de argón y producir polvo metálico (Guzmán y col, 2021).

Después de obtener el polvo de titanio, es necesario someterlo a otro proceso adicional para producir la aleación necesaria para el cual estará destinado en la manufactura aditiva. Algunos de los procesos para la producción de polvo de aleación de titanio (Ti6Al4V) se mencionan a continuación.



Producción de polvo de aleación de titanio proceso atomización gaseosa.

Probablemente, el método más utilizado para la producción de polvo metálico es la atomización gaseosa: es una mezcla de metales fundidos pasan por una boquilla y se rompen en una corriente de gas inerte, como argón, nitrógeno o helio. La corriente de gas inerte solidifica el metal fundido, creando las partículas esféricas que se recogen en el fondo de la cámara (Ruan y col, 2022).

Producción de polvo de aleación de titanio proceso de electrodo de plasma rotatorio.

El proceso consiste en aplicar un haz de plasma de helio generado con un electrodo de tungsteno sobre un extremo de una barra de titanio que gira a alta velocidad, por lo que, se funde la parte central de la barra y las gotas del metal fundido salen dispersas debido a la rotación de la barra. El tamaño de polvo está relacionado con la aleación que se funda. En este proceso suele tener un tamaño de partícula entre 0 y 100 μm para la aleación Ti6Al4V (Ruan y col, 2021).

Producción de polvo de aleación de titanio proceso atomización plasma.

El proceso consta de cargar los distintos alambres metálicos en la tolva del atomizador y, a continuación, se funde en una antorcha de plasma, y un flujo de plasma de alta velocidad divide el líquido en gotas que se enfrían rápidamente, a medida que el metal fundido cae, se solidifica creando partículas esféricas (Chen y col, 2018).

Producción de polvo de aleación de titanio proceso esferoidización plasma.

Este proceso parte de polvo irregular, utilizándolo como un flujo, se aplica plasma de inducción que funde cada partícula individualmente. El líquido generado adquiere forma de gota, que al solidificarse genera una partícula de polvo esférica (Sehhat y col, 2023).

Cabe considerar, por otra parte, que la mayor proporción de la literatura actual en relación a las cadenas de suministro de la manufactura aditiva se ha centrado principalmente en casos comparativos y análisis de las ventajas y desventajas que presenta. Sin embargo, es necesario explorar investigaciones que contengan análisis más a detalle, por ejemplo, Cui y col, (2021)

“Análisis técnico, económico y ambiental de procesos de manufactura aditiva”



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO. DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA.



establecen modelos teóricos para cuantificar los costos de la cadena de suministro de la manufactura tradicional y aditiva considerando la producción, inventario y transporte de productos de consumo altamente personalizable. Los resultados muestran potenciales ahorros en los costos de hasta un 31.46% al adoptar la manufactura aditiva. Ahora bien, Afshari y col, (2020) exploraron la fabricación aditiva como una mejor práctica de eco-innovación a través del desarrollo de un modelo matemático original y brinda recomendaciones para poner a la manufactura aditiva en operación a costos mínimos. Los resultados muestran recomendaciones sobre como operar mejor las soluciones eco-innovadoras en las cadenas de suministro. Por otro lado, Emelogu y col, (2016) propusieron un modelo de costo estocástico para cuantificar los costos a nivel de la cadena de suministro asociados con la producción de implantes biomédicos usando técnicas de manufactura aditiva e investigaron la viabilidad económica de usar las tecnologías para fabricar implantes biomédicos en los hospitales. La solución que encontraron fue que, entre los costos unitarios de producción de la manufactura aditiva y la manufactura tradicional, así como el tiempo de entrega y las demandas del producto, son parámetros de costos clave que determinan la viabilidad económica de la manufactura aditiva. En este mismo contexto, Khajavi y col, (2014) evaluaron el impacto potencial de las mejoras de la manufactura aditiva en la configuración de las cadenas de suministro de los repuestos evaluando distintos escenarios variando las configuraciones de la cadena de suministro y las especificaciones de las máquinas de manufactura aditiva. Encontraron que al usar la tecnología de manufactura activa actual, la producción centralizada es claramente la configuración de la cadena de suministro preferible, sin embargo, la producción distribuida de repuestos se vuelve práctica a medida que las máquinas de la manufactura aditiva se vuelven menos intensivas en capital, más autónomas y ofrecen ciclos de producción más cortos. Como se puede apreciar, las configuraciones de las cadenas de suministro actuales en la manufactura aditiva han adoptado técnicas en la producción de productos que les ha proporcionado innovación y perfeccionamiento al explotar los esquemas exclusivos de producción bajo demanda y personalización. Sin embargo, en la mayoría de las investigaciones se carece de análisis conjuntos que enriquezcan el ámbito económico y ambiental detallado desde el principio del proceso para la manufactura aditiva. Por lo tanto, en esta investigación se analizan conjuntamente los

“Análisis técnico, económico y ambiental de procesos de manufactura aditiva”



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO.
DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA.**



aspectos económicos y ambientales estableciendo modelos matemáticos para cuantificar los costos de la cadena de suministro desde el principio del proceso.



ANTECEDENTES.

En la MA existen ventajas potenciales en su aplicación como la generación de piezas con mayor personalización sin herramientas o costos de fabricación adicionales, ya que con el simple hecho de personalizar el diseño con ayuda del software tienes diferentes modelos. Existe la posibilidad del diseño funcional que permite la fabricación de complejas características internas; la fabricación de componentes flexibles y livianos con estructuras huecas; la capacidad de fabricación directa de componentes a su forma final con un procesamiento mínimo o sin procesamiento adicional; la posibilidad de acercarse a cero la fabricación de residuos al maximizar la utilización del material, por lo que, en comparación con el proceso de manufactura convencional presenta una ventaja ambiental positiva muy importante; una gran reducción en el desarrollo general del producto y el tiempo de fabricación que lleva a una transferencia más rápida en el mercado; fabricación bajo demanda, alejándose de la fabricación basada en proyección y excelente escalabilidad. Lo que es más importante, la MA se concentra en la producción de un componente con menor desperdicio de material, uso de energía y emisiones de la máquina. La ventaja ofrecida por MA ha brindado oportunidades esenciales con la capacidad de eliminar la forja y el proceso de unión imprimiendo partes completas en una sola impresión. Un ejemplo de esto es la copa acetabular de metal (Unger y col, 2005) utilizada en las cirugías de reemplazo de cadera, donde se realizan casi 440,000 cirugías al año de reemplazo de cadera solo en los EE.UU (Excell y col, 2010).

MA ofrece un plazo de entrega y un costo reducidos para capitalizar un alto valor, una baja producción de piezas como las que se utilizan en barcos, automatización, aviación, satélites, etc. Las máquinas de MA ofrecen flexibilidad de producción; las maquinas no requieren arreglos de configuración costosos, lo que hace que la tecnología sea económica para la producción de lotes más pequeños (Huang y col, 2013).

En la actualidad, es necesario considerar las cantidades extraordinarias de energía necesarias para la fabricación convencional, lo que produce una enorme porción de residuos y emisiones. La exigencia es reducir los niveles de las emisiones y revertir el cambio climático. Por lo que, la manufactura aditiva se considera más sostenible que los métodos de fabricación convencional y más conveniente para la atmósfera y la tierra (Ford y col, 2016).

“Análisis técnico, económico y ambiental de procesos de manufactura aditiva”



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO. DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA.



Así como existen ventajas en la utilización de la MA también existen desventajas, por ejemplo, los defectos y el tamaño de ellos dependerá del tipo de materiales de alimentación (metales, polímeros, cerámicos, etc.), proceso y técnica utilizada de la MA. Las características estructurales internas pueden no ser bien capturadas durante la MA; pueden aparecer discontinuidades internas (porosidades); y el estado del acabado de la superficie puede no estar limitado debido a los perfiles ásperos. Además de estos defectos, el producto de MA puede tener material no deseado atrapado que cambia la densidad local de la estructura, modifica las distribuciones de tensión locales y sirve como un indicador interno de grietas, lo que afecta el rendimiento esperado del diseño virtual. Una tendencia reciente es la adición de un sistema sustractivo en combinación con MA. El propósito de la herramienta sustractiva es mejorar el acabado de la superficie y minimizar los defectos entre capas. Otro problema con la MA es la reproducibilidad. Dado que cada parte está construida capa por capa, la calidad de la pieza entre maquinas o para la misma maquina en diferentes momentos debe ser la misma. De lo contrario, las piezas para aplicaciones críticas no se pueden fabricar a través de la MA. Este problema es intrínsecamente complicado debido a los enfoques de MA. La mayoría de los procesos de MA comienzan con los metales en polvo, donde los tamaños y formas de partículas varían de un lote a otro. La fuente de calor es típicamente un láser o un haz de electrones (Tofail y col, 2018).

Se han utilizado varias técnicas de caracterización para el control en tiempo real de defectos estructurales y microestructurales en las piezas de MA para proporcionar información sobre la red interna de poros generada por el proceso, la rugosidad de la superficie, el volumen de la pieza y la cantidad de material de soporte atrapado. Estas técnicas incluyen tomografía óptica, tomografía de rayos X, análisis termográfico o monitoreo ultrasónico (Zenzinger y col, 2015; Carl, 2015; Krauss y col, 2015; Rieder y col, 2015; Everton y col, 2016; Ragugarun y col, 2015).

Existen trabajos enfocados a la manufactura aditiva haciendo todo tipo de estudios relacionados con la aceptación de MA en el mercado y analizando cada una de las oportunidades, por ejemplo Tofail y col, (2018) estudió la MA desde un punto de vista científico, tecnológico y su aceptación hoy en día. Consideran que existe un gran interés en la industria por considerar a MA como una de las principales vías de ingeniería de producción

“Análisis técnico, económico y ambiental de procesos de manufactura aditiva”



para la próxima generación, demostrando la capacidad de producir productos reales, innovadores, complejos y tecnológicos, sin embargo, transferir esta creación a la obtención de objetos que sean funcionales sigue siendo un desafío enorme. En este mismo contexto, Pereira y col, (2019) realizó una investigación en la cual se centraron en el efecto del volumen de producción, la personalización y la complejidad para determinar si los métodos de fabricación convencionales o de manufactura aditiva en un tipo de producto son adecuados para su propósito. Los resultados que obtuvieron son que los modelos con altos volúmenes de producción son más adecuados los métodos de fabricación tradicionales. Sin embargo, cuanto mayor es la complejidad o la personalización requerida, la manufactura aditiva es más adecuada. MA ofrece flexibilidad, lo que permite a los fabricantes crear un diseño óptimo para la producción ajustada, pero sigue siendo una inversión considerablemente costosa en comparación con las máquinas de fabricación tradicionales. Por otro lado, Huang y col, (2016) hizo un análisis del potencial de ahorro de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero de tecnologías de MA aplicado a los componentes metálicos de los aviones, siendo la reducción de peso, particularmente un punto muy importante. Los resultados que obtuvieron en dicho análisis fueron que aplicando el estudio rigurosamente, el consumo de combustible del avión podría reducirse hasta el 6.4%, esto debido al menor peso de las piezas fabricadas por MA. Al aplicar el estudio el total, se estimó que el 9-17% de la masa total de la aeronave puede ser reemplazable por los componentes de MA en el corto plazo, con 4-5% atribuible al reemplazamiento de componentes de aleaciones de Aluminio, 2-5% con aleaciones de Níquel, 3-6% con aleaciones de Ti y 0.4-1% atribuibles a componentes de aleaciones de hierro.

En relación al aumento de la importancia de las preocupaciones ecológicas y las regulaciones ambientales, el desarrollo sostenible permanece con una producción amigable con el medio ambiente (Baumers y col, 2011; Niaki y col, 2019; Yang y col, 2019). La impresión 3D abrirá y brindará nuevas posibilidades y opciones para cumplir las regulaciones ambientales continuamente. La efectividad ecológica es una parte fundamental de la sostenibilidad y cualquier disminución en las exorbitantes cantidades de energía y materiales utilizados puede acompañar a una reducción en el calentamiento global. Cabe señalar que mediante la planificación y el seguimiento de la contaminación ambiental tal como la medición, el



control, la cuantificación y la detección se pueden reducir los impactos a la atmósfera y brindar mayor sostenibilidad ambiental. Con las tecnologías MA se pueden fabricar productos personalizados de forma automática que encajan perfectamente a la aplicación necesaria. Estos productos otorgan un desempeño ambiental más óptimo y estándares más elevados (Gebisa y col, 2017; Ghobadian y col, 2020).

Las materias primas utilizadas en la MA se consideran de naturaleza secundaria, ya que por lo general requieren un procesamiento previo cuidadoso antes de usarse en la producción industrial.

Recientemente el mercado de las impresoras 3D ha aumentado exponencialmente y junto a ello la demanda tanto de la complejidad como de la multifuncionalidad de los productos, por lo que, la comunidad científica ha explorado distintos materiales nuevos para la impresión 3D, tales como materiales inteligentes, nanomateriales, biomateriales, y materiales funcionales. Existen infinidad de productos que se pueden producir con MA, así como los materiales con los que se elaboran. La fabricación aditiva puede realizar productos muy flexibles como para permitir que los fabricantes determinen la forma, la textura y la resistencia del producto.

El material más común que se utiliza hoy en día en la impresión 3D es el plástico. Este material es uno de los más diversos para fabricar juguetes y accesorios domésticos impresos en 3D. El plástico presenta una generosa gama de opciones de colores, firmeza, suavidad y flexibilidad, factores que hacen atractivo y muy fácil de entender. El proceso de fabricación para los materiales de plástico es en impresoras de modelado por deposición fundida, en las que los filamentos termoplásticos se funden y se moldean capa por capa. Existe demasiada diversidad en los materiales de plástico como: ácido poliláctico (pla), estireno-acrilonitrilo (abs), alcohol polivinílico (pva), policarbonato (pc), etc., por mencionar los más usuales. Los productos de plástico impresos en 3D presentan una gran variedad de formas y consistencias, desde planos y redondos hasta con surcos y muescas.

Hoy en día, existen impresoras capaces de imprimir materiales en polvo para la elaboración de productos. El proceso consta en fundir el polvo y distribuir capa a capa hasta obtener los patrones deseados. Los polvos más comunes son: nylon, aluminio, etc. Los materiales como



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO.
DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA.**



el cobre, el acero y otros tipos de metales en polvo tienen la practicidad de ser más fácil de transportar y moldear en las formas deseadas.

En la impresión 3D, el metal como materia prima para elaborar productos ha ganado mucho campo en la actualidad, siendo el segundo material más popular en la industria. Entre los artículos de uso diario, el metal puede producir una gran variedad de productos, por ejemplo, la joyería ha utilizado acero y cobre para elaborar pulseras impresas en 3D. Los materiales de metal utilizados en la fabricación aditiva tienen beneficios tanto, económicos como ambientales sobre los procesos convencionales. En la fabricación tradicional existen demasiadas desventajas ambientales, consecuentemente, con la impresión 3D se pueden evitar algunas de ellas. Por ejemplo, en la fabricación convencional, el transporte de materias primas hacia las unidades de procesamiento y los productos terminados requiere mayor energía y un sistema de transporte para los ensamblajes, lo que ocasiona la contaminación del aire. La mayoría de las manufacturas de materiales convencionales se han basado gran parte en los combustibles fósiles, por consiguiente, este método presenta un impacto ambiental negativo significativo (Mohd y col, 2019; Ghaffar y col, 2018).



JUSTIFICACIÓN.

Actualmente se han elaborado una gran cantidad de proyectos relacionados a las ventajas y desventajas que ofrece la manufactura aditiva, así como los atributos que muestra cada uno de los procesos y comparando los costos y beneficios que cada medio promete. Sin embargo, es necesario realizar un estudio analizando las cadenas de suministro de los procesos de manufactura aditiva examinado desde la ingeniería de procesos que tome en cuenta análisis económico y ambiental, ya que cada uno de estos factores analizados conjuntamente permitirá mostrar las ventajas económicas de adoptar la impresión 3D en los productos y en términos de impacto ambiental, la disminución del desperdicio de materia prima y eficiencia de los recursos, así como, los avances que tiene la manufactura aditiva sobre la fabricación tradicional.

HIPÓTESIS.

Optimizar las cadenas de suministro para la producción de prótesis médicas a través de manufactura aditiva permitirá evaluar el potencial económico y ambiental de dicha cadena de suministro, permitiendo definir cuáles son los mejores sitios de extracción de minerales, sitios y tecnologías de procesamiento y las mejores rutas para la comercialización.

OBJETIVOS.

Objetivo general.

El objetivo general de este proyecto es proponer un modelo de optimización de las cadenas de suministro de los procesos de manufactura aditiva considerando factores desde el abastecimiento de la materia prima hasta el producto final, un análisis económico y ambiental que permita maximizar las ganancias de la cadena de suministro, así como minimizar el impacto ambiental del proceso.

Objetivos específicos.

- Realizar un análisis de las cadenas de suministro para los procesos de manufactura aditiva.
- Establecer una superestructura que represente todas las interacciones del sistema del proceso de manufactura aditiva.

“Análisis técnico, económico y ambiental de procesos de manufactura aditiva”



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO.
DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA.**



- Formular un modelo matemático basado en la superestructura que incluya todas las opciones de interés (abastecimiento de materia prima de acuerdo a su procedencia, proceso de transformación de subproductos, proceso de impresión 3D y distribución).
- Codificar el modelo matemático establecido empleando plataformas de programación.
- Aplicación del modelo propuesto en un caso de estudio con las características propias del análisis.
- Evaluar técnicas de optimización para la mejora de los procesos de manufactura específicamente aplicado a la generación de prótesis.
- Analizar los resultados obtenidos para determinar la efectividad económica-ambiental por el acoplamiento de la manufactura aditiva en la producción de prótesis médicas.



METODOLOGÍA.

La metodología para la elaboración de este trabajo consiste en examinar los procesos de manufactura aditiva mediante estrategias de optimización considerando conjuntamente un análisis económico y ambiental. Enseguida se muestra en la Fig. 8 un diagrama de flujo del proyecto.

La elaboración de este trabajo consistirá en profundizar y plantear soluciones a los procesos de manufactura aditiva, considerando los elementos que intervienen en las cadenas de suministro, un análisis económico y ambiental considerando la interacción entre todos los componentes que se mencionan a continuación:

- Análisis de la cadena de suministro.

La calidad de un inventario de ciclo de vida depende de una descripción precisa del sistema que va a ser analizado.

Alcance general de cada etapa.

1. Adquisición de materias primas.

En esta etapa se pretende contemplar las materias primas que se van a utilizar para la fabricación del producto, estas pueden ser desde la madera de un árbol hasta la extracción del petróleo crudo, sin olvidar su transporte desde donde se obtienen hasta donde se transformaran en un nuevo producto.

2. Manufactura.

Esta fase del proceso es vital, ya que de ella se obtiene el producto fabricado partiendo del procesamiento de las materias primas, incluye la manufactura de materiales, la creación del producto, el empaque y la distribución.

2.1 Manufactura de materiales.

Este paso involucra la transformación de la materia prima en un producto que el fabricante pueda usar.

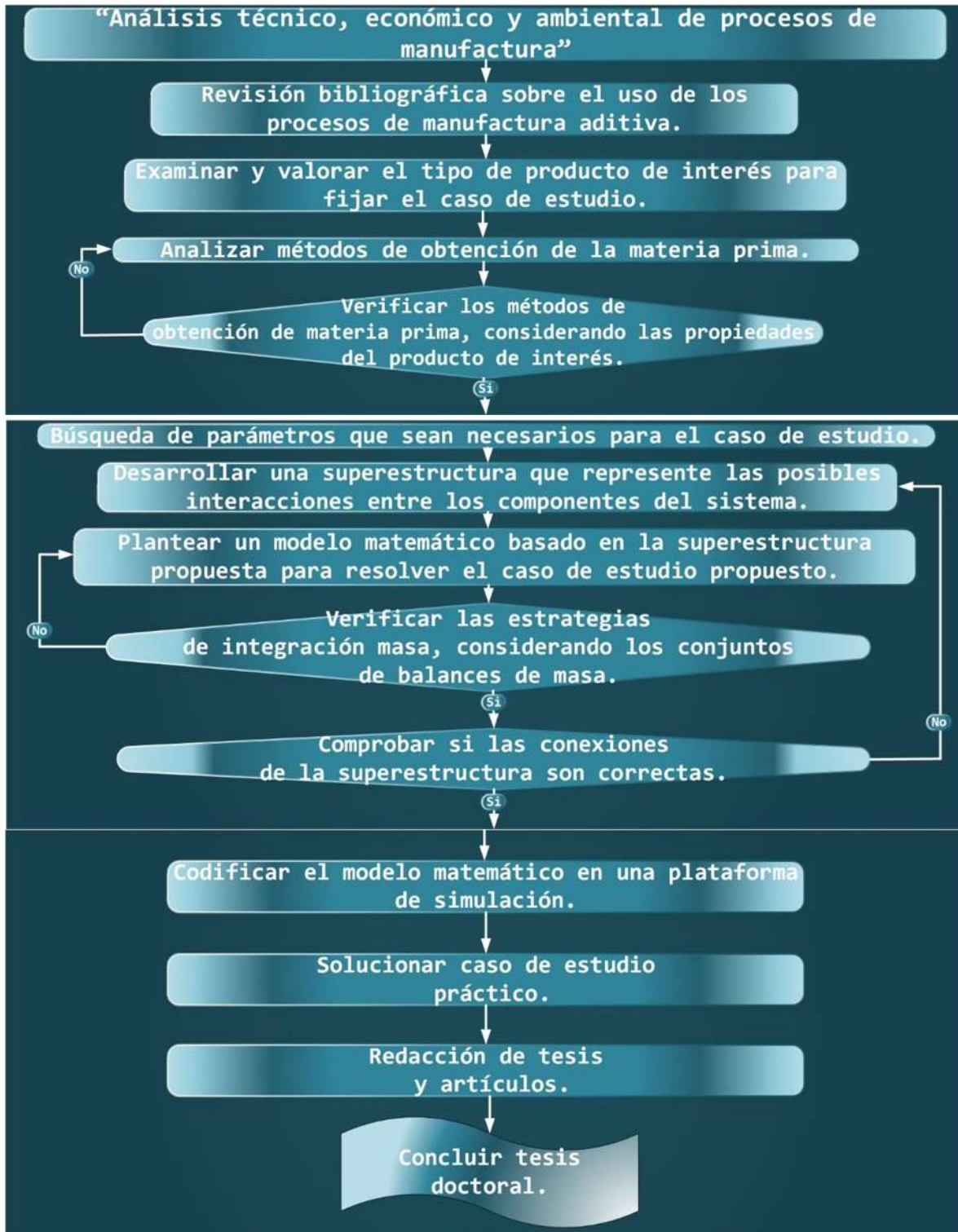


Fig. 8 Diagrama de bloques de la metodología del proyecto. Manufactura aditiva.

“Análisis técnico, económico y ambiental de procesos de manufactura aditiva”



2.2 Creación del producto.

Este periodo incluye el procesamiento del material manufacturado para crear un producto listo para ser empacado.

2.3 Empaquetado/Distribución.

En este paso se considera todo el proceso de manufactura y la transportación requerida para empaquetar y distribuir el producto finalizado.

3. Uso/Reúso/Mantenimiento.

Este es la etapa que los consumidores conocen, ya que involucran el uso real del producto, así como su reúso y su mantenimiento. También es necesario considerar los requerimientos energéticos y los desechos ambientales del producto en sí, su empaquetado y consumo.

4. Reciclaje/Gestión de residuos.

En esta fase los desechos ambientales toman importancia asociados a las gestiones y regulaciones locatarias del consumo, reciclaje, composición e incineración post-consumo.

Cuestiones que aplican a todas las etapas.

Los siguientes problemas generales se aplican en las cuatro etapas de la cadena de suministro.

1. Energía y transporte.

Es necesario determinar los requisitos de energía del proceso y transporte para cada etapa de la creación de los productos.

2. Aspectos de desechos ambientales.

Se generan tres categorías de desechos ambientales de la cadena de suministro de un producto: emisiones atmosféricas, aguas residuales y desechos sólidos. Estos desechos ambientales son generados tanto por los procesos de fabricación como el uso de combustibles en vehículos de transporte u operaciones de proceso.

3. Practica de gestión de residuos.



Existen varias posibilidades para la gestión de residuos, entre ellas, el relleno sanitario, incineración, composta y la más común, el reciclaje. Depende de la materia prima utilizada y el producto final se elige alguna de las opciones mencionadas anteriormente.

4. Resumiendo los resultados de cada etapa.

Los resultados de la cadena de suministro de un producto en particular, las ganancias obtenidas y los valores de los eco-puntos totales generados de cada etapa del producto pueden ser calculables. La metodología más utilizada actualmente es presentar los requerimientos ambientales individuales de cada categoría de impacto.

- Análisis económico.

Realizar un análisis económico para comparar las posibilidades de los procesos de la manufactura aditiva es tan diversa y está en dependencia de tantos factores a considerar, sin embargo, es importante subrayar que las cargas ambientales asociadas a un nuevo producto deben evaluarse durante todas las fases y etapas de su vida útil, desde la extracción del material hasta su eliminación final, incluida la producción y fabricación, la distribución y el uso del producto, así como su mantenimiento, lo cual nos permitirla realizar un estudio en el cual se analicen los puntos a favor y en contra de los procesos de manufactura aditiva de cada etapa del proceso en donde se podrá plantear una estrategia general que posibilite llegar a resultados concretos con el menor esfuerzo posible.



DECLARACIÓN DEL PROBLEMA.

El problema que se desarrolla en esta investigación es un problema de optimización multiobjetivo y se puede declarar de la siguiente manera. Se tiene la disponibilidad de materia prima de diferentes locaciones, la demanda de polvo y alambre de aleación de titanio para diferentes usos y también se cuenta con la demanda de prótesis médicas, el periodo de tiempo en las que se necesitan estas demandas, los lugares óptimos donde se pueden instalar las tecnologías de procesamiento para producir el polvo o alambre de aleación de titanio y también las tecnologías de impresión 3D, así como las características de cada una de las tecnologías (eficiencia, restricciones de mezclado, etc.) y la distancia que hay entre las ubicaciones seleccionadas en la cadena de suministro. Asimismo, contamos con los distintos eco-puntos relacionados a cada categoría de impacto del eco-indicador 99. Para la etapa de la evaluación de impacto, el indicador ambiental listado en la Tabla 2 se convierte en puntajes para cada categoría de impacto, continuando la medición con los indicadores. Para la cuantificación del impacto ambiental del proceso de la cadena de suministro se deben evaluar los caudales y multiplicarlos por su indicador en específico (Burkhart y col, 2015). Estos indicadores se evalúan en base a las metodologías de CML 2001 y USEtox. La metodología del CML 2001 fue desarrollada por el instituto de ciencias ambientales de la universidad de Leiden (CML), que evalúa las emisiones de la cadena causa-efecto. Los resultados de las categorías de impacto se asocian en categorías de punto medio. Por otra parte, la metodología USEtox es un es un modelo para la caracterización de impactos humanos y eco toxicológicos, que se define por los factores de cancerígenos y no cancerígenos.

El problema consiste en sintetizar la cadena de suministro para la fabricación de prótesis médicas y los sub-productos que en ella se elaboran, aplicando las tecnologías de fabricación aditiva, esto para satisfacer las demandas de prótesis médicas y el sub-producto de polvo y alambre de aleación de titanio en una región geográfica en diferentes periodos de tiempo, así como determinar si una tecnología debe o no ser instalada y consecutivamente la optimización de toda la red del sistema. La solución óptima debe considerar la configuración de la red, las materias primas utilizadas, el transporte y transformación en los productos deseados con el máximo beneficio y el menor impacto ambiental producido en la cadena de suministro. Para resolver este problema se establece la superestructura que se muestra en la

“Análisis técnico, económico y ambiental de procesos de manufactura aditiva”



Fig. 9, en la cual se divide la cadena de suministro en 4 secciones: adquisición de materia prima, transformación del polvo o alambre de aleación de titanio, impresión 3D y mercados. En la primera sección tomamos en cuenta la compra de la materia prima ya transformada en polvo de titanio, aluminio y vanadio que son los tres componentes principales para la fabricación de polvo de aleación de titanio (Ti6Al4V), que pueden provenir de diferentes lugares de acuerdo al porcentaje de la aleación de titanio, así como las distintas categorías de impacto del eco-indicador 99 relacionado a lo que genera la extracción de materia prima. La segunda sección representa el procesamiento de la materia prima procesada por diferentes tecnologías (como: proceso atomización plasma, electrodo de plasma rotatorio, atomización gaseosa y esferoidización plasma) en diferentes lugares, generando el sub-producto de aleación de titanio (Ti6Al4V). El sub-producto generado en esta etapa, tiene dos formas de ser tratado. La primera opción consiste en suministrar el polvo de aleación de titanio en alguna ubicación de las tecnologías de impresión 3D y la segunda, puede venderse como sub-producto a un mercado. En la sección de las tecnologías de impresión 3D se generan las prótesis médicas procesadas por diferentes tecnologías de impresión (es decir: fusión de lecho de polvo y recubrimiento laser) y estas prótesis médicas pueden ser vendidas al mercado que lo demande. Nuevamente, en esta etapa del proceso se evalúan las diferentes categorías de impacto relacionadas a la energía necesaria de transformación del polvo y alambre de aleación de titanio, así como de la impresión de las prótesis médicas. Además, la superestructura esta esquematizada para aplicarse de forma general a cualquier caso de estudio.

Tabla 2 Categorías de impacto consideradas en el caso de estudio.

CATEGORIA DE IMPACTO	
Cancerígenos	Eco toxicidad
Por compuestos orgánicos	Acidez/Eutrofijación
Por compuestos inorgánicos	Uso de tierra
Cambio climático	Minerales
Radiación	Combustible fósil
Capa de ozono	



FORMULACIÓN MATEMÁTICA.

Esta sección presenta el modelo de optimización propuesto para la cadena de suministro de la manufactura aditiva, considerando la compra y distribución de la materia prima disponible, las tecnologías para la transformación para producir polvo y alambre de titanio aleación de titanio (Ti6Al4V) y la tecnología de impresoras 3D para la producción de prótesis médicas y finalmente, la venta y distribución de productos, basado en la superestructura mostrada en la Fig. 20. El modelo toma en consideración aspectos económicos y ambientales. Los subíndices utilizados en esta formulación se definen a continuación, k es el tipo de materia prima disponible (polvo de titanio, aluminio y vanadio), i representa el sink industrial para la conversión de la materia prima en polvo y alambre de aleación de titanio (Ti6Al4V) utilizados para la impresión 3D, $r, l, y n$ representan las locaciones en donde se puede comprar la materia prima, la ubicación para la producción del polvo y alambre de aleación de titanio (Ti6Al4V) y la ubicación para el sink en donde imprimen las prótesis médicas respectivamente, f and e son los mercados en donde se puede vender el polvo y el alambre aleación de titanio (Ti6Al4V) y el mercado en donde se pueden vender las prótesis médicas terminadas respectivamente. Además, la formulación matemática considera una escala de tiempo, t el cual representa el año.

BALANCES DE MASA Y RESTRICCIONES DE LA CADENA DE SUMINISTRO.

Cantidad de materia prima disponible proveniente de diferentes fuentes.

La suma para cada tipo de materia prima requerida k en todas las locaciones l provenientes de cada locación r en un periodo de tiempo t ($G_{k,r,l,t}$) debe ser menor o igual a la cantidad de materia prima disponible en cada ubicación $Q_{k,r,t}$.

$$\sum_l G_{k,r,l,t} \leq Q_{k,r,t} \quad \forall k \in K, \forall r \in R, \forall t \in T \quad (1)$$

Donde la cantidad de materia prima disponible es un parámetro para cada sitio de extracción.

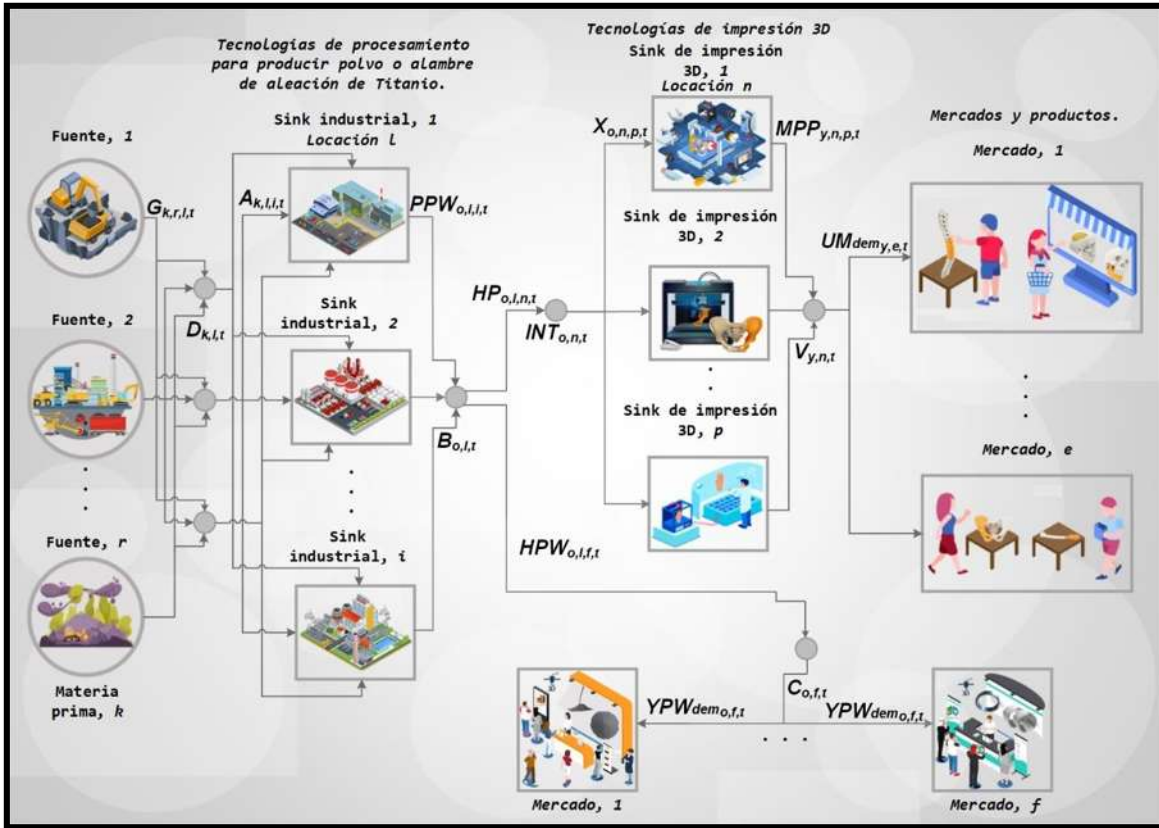


Fig. 9 Superestructura de la cadena de suministro de procesos de manufactura aditiva.

Balance de masa de materia prima antes del procesamiento para la conversión en polvo o alambre de titanio.

La cantidad total de materia prima en cada locación de procesamiento l ($D_{k,l,t}$) debe ser igual la sumatoria de la materia prima disponible que viene de todos los sitios de extracción disponibles ($G_{k,r,l,t}$). Simultáneamente el flujo de la materia prima la cual puede ser distribuida al sink industrial i (para ser convertida en polvo o alambre de titanio) ($A_{k,l,i,t}$) en cada locación de procesamiento l .

$$D_{k,l,t} = \sum_r G_{k,r,l,t} \quad \forall k \in K, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (2)$$

$$D_{k,l,t} = \sum_i A_{k,l,i,t} \quad \forall k \in K, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (3)$$

“Análisis técnico, económico y ambiental de procesos de manufactura aditiva”



Balance de masa después del procesamiento de la conversión de materia prima.

El flujo total de polvo y alambre de titanio generado por diferentes fuentes de materia prima en cada locación de procesamiento ($B_{o,l,t}$) debe ser igual a la cantidad de flujo de polvo o alambre de titanio proveniente de todos los sinks industriales i que se pueden procesar en cada locación de procesamiento ($PPW_{o,l,i,t}$).

$$B_{o,l,t} = \sum_i PPW_{o,l,i,t} \quad \forall o \in O, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (4)$$

La cantidad del flujo de polvo y alambre de titanio ($B_{o,l,t}$) es igual al flujo transportado a la locación n ($HP_{o,l,n,t}$) en donde será utilizado para imprimir las prótesis médicas necesarias más el flujo que será destinado para la venta al público ($HPW_{o,l,f,t}$) en el mercado f .

$$B_{o,l,t} = \sum_n HP_{o,l,n,t} + \sum_f HPW_{o,l,f,t} \quad \forall o \in O, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (5)$$

Por otro lado, la cantidad total de polvo y alambre de titanio producido por el sink industrial i en la locación l desde cada fuente de materia prima ($C_{o,f,t}$) debe ser igual a la suma de la cantidad de alambre y polvo de titanio que llega de todos los sinks industriales i que puede ser utilizado en cada locación de procesamiento ($HPW_{o,l,f,t}$). Aquí, el polvo o alambre de titanio puede ser distribuido a todos los mercados f ($YPdem_{o,f,t}$) porque la cantidad de alambre y polvo de titanio puede ser vendido tal como es producido.

$$C_{o,f,t} = \sum_l HPW_{o,l,f,t} \quad \forall o \in O, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (6)$$

$$C_{o,f,t} = YPWdem_{o,f,t} \quad \forall o \in O, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (7)$$

Balance de masa antes de la impresión 3D de productos.

La cantidad total de polvo de titanio proveniente de todos los sinks industriales i transformado en la locación l ($INT_{o,n,t}$) debe ser igual al flujo de polvo transformado proveniente del sink industrial l ($HP_{o,l,n,t}$).

$$INT_{o,n,t} = \sum_l HP_{o,l,n,t} \quad \forall o \in O, \forall n \in N, \forall t \in T \quad (8)$$



Además, la cantidad de polvo de titanio proveniente de todos los sinks industriales i debe ser igual a la cantidad de polvo enviada al sink de impresión 3D p en la locación n ($X_{o,n,p,t}$) para la impresión de prótesis médicas.

$$INT_{o,n,t} = \sum_p X_{o,n,p,t} \quad \forall o \in O, \forall n \in N, \forall t \in T \quad (8)$$

Balance de masa después de la impresión 3D de prótesis médicas

La cantidad total de prótesis médicas generadas por cada sink de impresión 3D p en cada locación n ($V_{y,n,t}$) debe ser igual a la suma de la cantidad de prótesis provenientes de todas las corrientes de materia prima o para cada sink de impresión p y locación n ($MPP_{y,n,p,t}$). Además la cantidad de prótesis médicas debe ser distribuida a los mercados e desde cada locación n ($3D_{y,n,e,t}$) y debe ser igual a la cantidad total de prótesis médicas generadas.

Por otro lado, la ecuación 12 representa el balance de masa en el mercado de las prótesis médicas.

$$V_{y,n,t} = \sum_p MPP_{y,n,p,t} \quad \forall y \in Y, \forall n \in N, \forall t \in T \quad (10)$$

$$V_{y,n,t} = \sum_e 3D_{y,n,e,t} \quad \forall y \in Y, \forall n \in N, \forall t \in T \quad (11)$$

$$\sum_n 3D_{y,n,e,t} = UMdem_{y,e,t} \quad \forall y \in Y, \forall e \in E, \forall t \in T \quad (12)$$

Rendimiento de productos. La cantidad de polvo y de alambre de titanio generado por las tecnologías de procesamiento están relacionadas al flujo procesado en cada tecnología en el sink industrial i y en el sink de impresión 3D mediante un factor de eficiencia ($\eta_{o,i}^{HPW}$ y $\eta_{y,o,p}^{HP}$ respectivamente). Este factor de eficiencia depende exclusivamente del tipo de materia prima utilizado en el sink.

$$PPW_{o,l,i,t} = \eta_{o,i}^{HPW} \cdot \sum_k A_{k,l,i,t} \quad \forall o \in O, \forall l \in L, \forall i \in I, \forall t \in T \quad (13)$$

$$MPP_{y,n,p,t} = \eta_{y,o,p}^{HP} \cdot X_{o,n,p,t} \quad \forall y \in Y, \forall o \in O, \forall n \in N, \forall p \in P, \forall t \in T \quad (14)$$



Capacidades de los sinks. La cantidad de polvo o alambre de titanio y las prótesis médicas que pueden ser generados desde el tipo de materia prima o en cada locación l y n respectivamente usando los correspondientes sinks i y p , deber ser menor o igual a la máxima capacidad de estos sinks $(\alpha_i^{HPW}, \alpha_p^{HP})$. La máxima capacidad es multiplicada por una variable de decisión la cual indica si el sink i y p debería o no ser instalado en la locación l y n $(\beta_{i,l}, \beta_{p,n})$. Las ecuaciones a continuación describen lo antes mencionado.

$$\sum_k A_{k,l,i,t} \leq \alpha_i^{HPW} \cdot \beta_{i,l} \quad \forall l \in L, \forall i \in I, \forall t \in T \quad (15)$$

$$X_{o,n,p,t} \leq \alpha_p^{HP} \cdot \beta_{p,n} \quad \forall l \in L, \forall i \in I, \forall t \in T \quad (16)$$

Demanda mínima y máxima de productos. La suma de la cantidad de prótesis médicas impresas en las locaciones n generadas por los diferentes métodos de impresión 3D debe satisfacer la demanda del mercado e $(Udem_{y,e,t})$. La sumatoria debe ser mayor o igual a la demanda mínima $(\gamma_{y,e,t}^{Udemmin})$ y también debe ser menor o igual la demanda máxima $(\gamma_{y,e,t}^{Udemmax})$ necesaria en el mercado de las prótesis médicas.

$$\gamma_{y,e,t}^{Umin} \leq Udem_{y,e,t} \leq \gamma_{y,e,t}^{Umax} \quad \forall y \in Y, \forall e \in E, \forall t \in T \quad (18)$$

Por otro lado, la demanda en el mercado del polvo o alambre de titanio se puede calcular con la ecuación (19). La suma de la cantidad generada de polvo y alambre de titanio por el tipo de materia prima k en todas las locaciones l debe ser mayor o igual a la demanda mínima $(\gamma dem_{o,f,t}^{Ydemmin})$ y también debe ser menor o igual a la demanda máxima $(\gamma dem_{o,f,t}^{Ydemmax})$.

$$\gamma dem_{o,f,t}^{Ydemmin} \leq Ydem_{o,f,t} \leq \gamma dem_{o,f,t}^{Ydemmax} \quad \forall o \in O, \forall f \in F, \forall t \in T \quad (19)$$

Existencia de las tecnologías para producir polvo o alambre y de las tecnologías de impresión 3D. Las tecnologías de procesamiento para producir polvo o alambre de titanio y para la impresión de prótesis médicas i y p respectivamente las cuales pueden ser instaladas en las locaciones l y n depende de las variables binarias $(\theta_{i,l}$ y $\theta_{p,n})$ que determinan su existencia.



$$\sum_i \theta_{i,l} \geq 0 \quad \forall l \in L \quad (20)$$

$$\sum_p \theta_{p,n} \geq 0 \quad \forall n \in N \quad (21)$$

Restricción de mezclado para producir prótesis médicas de acuerdo a la aleación de

titanio. Al modelo se agrega una restricción de mezclado para poder fabricar prótesis médicas utilizando la aleación de titanio necesaria y poder acoplar las tecnologías de impresión 3D que se consideran en la modelación. La restricción debe cumplir una mezcla de materia prima del 90% de titanio, 6% de aluminio y 4% de vanadio, por lo que, es necesario considerar la siguientes igualdades.

$$0.04 \cdot A_{Al^i,l,i,t} = 0.06 \cdot A_{V^i,l,i,t} \quad ; \quad 0.9 \cdot A_{Al^i,l,i,t} = 0.06 \cdot A_{Ti^i,l,i,t} \quad (22)$$

MODELO ECONOMICO.

Ganancias asociadas con la venta de productos. La venta de las prótesis médicas

(*PmRevenue*) es igual a la suma del precio de venta de la prótesis médica ($PmSales_{y,e,t}^U$) multiplicado por la cantidad demandada por el mercado de prótesis médicas ($UMdem_{y,e,t}$).

La sumatoria incluye todos los índices *y* y *e* en todos los periodos *t*.

$$PmRevenue = \sum_y \sum_e \sum_t (PmSales_{y,e,t}^U \cdot UMdem_{y,e,t}) \quad (23)$$

De la misma manera, la venta del polvo y alambre de titanio (*PWRevenue*). Donde

($PWSales_{o,f,t}^Y$) es el precio de venta del mercado del polvo y alambre de titanio para el mercado *f*.

$$PWRevenue = \sum_o \sum_f \sum_t (PWSales_{o,f,t}^Y \cdot YPWdem_{o,f,t}) \quad (24)$$

Costo asociado con la compra de materia prima. El costo asociado con la compra de la

materia prima (*RmCosto*) es igual a la suma del costo del parámetro de la materia prima

($RmCC_{k,r,t}^G$) multiplicado por la cantidad del tipo de materia prima *k* que viene suministrada

de la corriente *r* a la locación *l* ($G_{k,r,l,t}$). ($RmCC_{k,r,t}^G$) es un parámetro que depende del tipo

de material prima considerada a utilizarse en el caso de estudio.



$$RmCosto = \sum_k \sum_r \sum_l \sum_t (RmCC_{k,r,t}^G \cdot G_{k,r,l,t}) \quad (25)$$

Costo asociado con el transporte de las materias primas, el producto polvo o alambre de titanio y las prótesis médicas.

La siguiente ecuación representa el costo asociado con el transporte (*CostoTrans*) incluyendo la materia prima y los productos desde una locación a otra y esto multiplicado por un parámetro del costo de transporte. Donde ($RmCT_{k,r,l,t}^G$, $PpCT_{o,l,n,t}^{HP}$, $MpCT_{y,n,e,t}^{3D}$ y $PCT_{o,l,f,t}^Y$) son los parámetros de costo del transporte de la materia prima, el costo del producto de polvo de titanio que entra al sink industrial i , el costo del producto como prótesis médicas impresas en el sink industrial p y el costo del producto de polvo y alambre de titanio que se destinara al mercado f y e respectivamente y esto depende del tipo de materia prima y la distancia entre las locaciones situadas. Cada parámetro del costo de transporte es multiplicado por el flujo de la cantidad correspondiente.

$$\begin{aligned} CostoTrans = & \sum_k \sum_r \sum_l \sum_t (RmCT_{k,r,l,t}^G \cdot G_{k,r,l,t}) \\ & + \sum_o \sum_l \sum_n \sum_t (PpCT_{o,l,n,t}^{HP} \cdot HP_{o,l,n,t}) \\ & + \sum_y \sum_n \sum_e \sum_t (MpCT_{y,n,e,t}^{3D} \cdot 3D_{y,n,e,t}) \\ & + \sum_o \sum_l \sum_f \sum_t (PCT_{o,l,f,t}^Y \cdot HPW_{o,l,f,t}) \end{aligned} \quad (26)$$

Costos fijos asociados con el procesamiento de los sinks industriales y la impresión 3D para las prótesis médicas.

La siguiente ecuación representa los costos fijos de las tecnologías procesamiento del sink industrial i y la impresión tridimensional 3D en el sink p (*Costosfijos*) y esto incluye la sumatoria de todos los costos fijos de procesamiento para la conversión del polvo y alambre de titanio del sink i ($PSCF_{i,l}$) y todos los costos fijos de la impresión 3D del sink p ($3DCF_{p,n}$) en todas las locaciones que pudieran ser instaladas. Estos costos fijos serán multiplicados por un factor anualizado (δ) y cada uno es activado por su variable binaria correspondiente (ϵ).

$$Costosfijos = \sum_i \sum_l \sum_t (PSCF_{i,l} \cdot \delta_{i,t} \cdot \epsilon_{i,l}) + \sum_p \sum_n \sum_t (3DCF_{p,n} \cdot \delta_{p,t} \cdot \epsilon_{p,n}) \quad (27)$$

“Análisis técnico, económico y ambiental de procesos de manufactura aditiva”



El factor de anualización ($\delta_{i,t}$ y $\delta_{p,t}$) para la conversión de polvo o alambre de titanio en el sink industrial i y para la impresión de prótesis médicas en el sink p respectivamente es determinado por la siguiente ecuación. Donde μ_i y μ_p son la tasa de descuento utilizada para determinar el costo anual y Δ es la vida útil esperada para cada tecnología.

$$\delta_{i,t} = \left[\frac{(1 + \mu_i)^\Delta \cdot \mu_i}{(1 + \mu_i)^\Delta - 1} \right]; \quad \delta_{p,t} = \left[\frac{(1 + \mu_p)^\Delta \cdot \mu_p}{(1 + \mu_p)^\Delta - 1} \right] \quad \forall i \in I, \forall p \in P, \forall t \in T \quad (28)$$

Costos variables asociados con el procesamiento de los sinks industriales y la impresión

3D para las prótesis médicas. Los costos variables frecuentemente se asocian con el volumen de producción. Por esta razón, los costos variables (*CostosVariables*) dependen directamente con la cantidad de materia prima suministrada ($A_{k,l,i,t}$ y $X_{k,n,p,t}$) convertida en los productos finales. La siguiente ecuación describe el total de los costos variables asociados con las tecnologías de conversión de polvo y alambre de titanio y la tecnología de impresión 3D. ($PSCV_{l,i,t}$ y $3DCV_{n,p,t}$) son parámetros de costo ligados a las materias primas, servicios y labores involucrados con los procesos de manufactura.

$$Costosvariables = \sum_k \sum_l \sum_i \sum_t (A_{k,l,i,t} \cdot PSCV_{l,i,t})^{0.8} + \sum_k \sum_n \sum_p \sum_t (X_{k,n,p,t} \cdot 3DCV_{n,p,t})^{0.8} \quad (29)$$

MODELO AMBIENTAL.

Para evaluar el impacto ambiental del proceso de la cadena de suministro implementamos la metodología del eco-indicador 99 basado en las contribuciones de diferentes expertos en LCA del Instituto Nacional de Salud Pública y Medio Ambiente (RIVM) (2000) por sus siglas en ingles. Para evaluar la metodología del eco-indicador 99 se consideran 11 categorías de impacto. Las 11 categorías de impacto se pueden agrupar en tres categorías de daño principales: salud humana, calidad del ecosistema y agotamiento de recursos. Para este caso de estudio, las 11 categorías del eco-indicador 99 se pueden considerar se la siguiente manera: examinar el impacto de tres etapas y asumirlos como los más importantes de este proceso. La primer etapa se refiere a la extracción de la materia prima del proceso, la segunda etapa está relacionada con la energía total necesaria para la conversión de polvo y alambre de aleación de titanio (Ti6Al4V), así como la energía necesaria para la impresión de las



prótesis médicas y la etapa final describe lo relacionado con el transporte de todo el proceso. Las 11 categorías de impacto se resumen en la Tabla 1. Los datos asociados con estas categorías de impacto generalmente se toman de bases de datos estándar (Goedkoop y col, 2000).

Eco-puntos relacionados a la extracción de la materia prima (Titanio, aluminio y vanadio). La ecuación 30 representa los eco-puntos totales generados relacionados a la extracción de materia prima (es decir, a la primera etapa del proceso de la cadena de suministro) e incluye la sumatoria de los eco-puntos de las 11 categorías de impacto ($ecoptsk$) multiplicado por las toneladas de cada tipo de materia prima extraída ($D_{k,l,t}$).

$$eprm = \sum_k ecoptsk \cdot \sum_k D_{k,l,t} \quad (30)$$

Eco-puntos relacionados a la energía necesaria para la conversión de polvo y alambre de aleación de titanio (Ti6Al4V) y a la impresión de prótesis médicas. La siguiente ecuación refiere a los eco-puntos generados al uso de la energía total para la conversión de polvo y alambre de aleación de titanio, así como para la impresión de prótesis médicas. La energía total necesaria para la conversión ($energyconv$) y ($energyimpr$) se multiplica por las toneladas que están disponibles para la conversión de polvo y alambre y la impresión de prótesis ($X_{o,n,p,t}$) y ($3D_{y,n,e,t}$) y a la vez multiplicado por la sumatoria de los eco-puntos de las 11 categorías de impacto $ecoptconv$ y $ecoptsimpr$.

$$epec = \sum_{epc} ecoptconv \cdot \sum_o \sum_n \sum_p X_{o,n,p,t} \cdot energyconv \quad (31)$$

$$epei = \sum_{epi} ecoptsimpr \cdot \sum_y \sum_n \sum_e 3D_{y,n,e,t} \cdot energyimpr \quad (32)$$

Eco-puntos relacionados al transporte de todo el proceso de la cadena de suministro. La ecuación (33) describe la relación de los eco-puntos asociados con el transporte ($eptrans$) e incluye la suma de los eco-puntos de las 11 categorías de impacto ($ecoptstrans$) multiplicado por la suma de todos los flujos de las materias primas y productos de un lugar a otro ($D_{k,l,t}$), ($HPW_{o,l,f,t}$), ($X_{o,n,p,t}$) y ($3D_{y,n,e,t}$) y esto dividido por la distancia que existe



entre los lugares que corresponden a cada flujo transportado $(Di_{r,l}), (Di_{f,l}), (Di_{l,n})$ y $(Di_{e,n})$.

$$eptrans = \sum_{ept} ecoptstrans \cdot \left[\left(\frac{\sum_k \sum_l \sum_t D_{k,l,t}}{Di_{r,l}} \right) + \left(\frac{\sum_o \sum_l \sum_f \sum_t HPW_{o,l,f,t}}{Di_{f,l}} \right) + \left(\frac{\sum_o \sum_n \sum_p \sum_t X_{o,n,p,t}}{Di_{l,n}} \right) + \left(\frac{\sum_y \sum_n \sum_e \sum_t 3D_{y,n,e,t}}{Di_{e,n}} \right) \right] \quad (33)$$

FUNCIONES OBJETIVO.

Ganancias totales. La función objetivo económica consiste en la maximización del TAR (ganancias totales anuales), la cual incluye las ganancias asociadas con la venta de las prótesis médicas ($PmRevenue$), ventas generadas por la venta del polvo o alambre de titanio ($PwRevenue$), costos asociados con la compra de la materia prima ($RmCosto$), costo asociado con el transporte ($CostoTrans$), y costos fijos y variables asociados con las tecnologías de transformación ($Costosfijos$), ($Costosvariables$) respectivamente.

$$TAR = PmRevenue + PRevenue + WRevenue - (RmCosto + CostoTrans + Costosfijos + Costosvariables) \quad (34)$$

Eco-puntos totales generados. Otra función objetivo es la minimización de los eco-puntos totales generados en el proceso de la cadena de suministro ECO99 ecuación (35), que incluye la sumatoria de los eco-puntos generados por la extracción de la materia prima ($eprm$), los eco-puntos relacionados al uso de la energía total para la conversión de polvo y alambre de aleación de titanio, así como para la impresión de prótesis médicas $epec$ y $epei$ y la relación de los eco-puntos asociados con el transporte ($eptrans$).

$$ECO99 = eprm + epec + epei + eptrans \quad (35)$$

Función objetivo. La función objetivo es la maximización de las ganancias totales (TAR) y simultáneamente la minimización de los eco-puntos totales generados ($ECO99$):



$$\text{Función objetivo} = \{ \text{Maximizar } TAR; \text{Minimizar } ECO99 \} \quad (36)$$

La ecuación (36) conlleva maximizar las ganancias totales (TAR) dado por la ecuación (34) y minimizar simultáneamente los eco-puntos totales generados ($ECO99$) dado por la ecuación (35). Es importante subrayar que cuando la función objetivo se resuelve para maximizar las ganancias totales, la solución de los eco-puntos totales generados corresponde al resultado con mayores eco-puntos totales, razón por la cual busca la mejor solución en el aspecto económico sin importar cuantos eco-puntos se generen. Ahora bien, la solución con los eco-puntos totales más bajos brinda los beneficios económicos más bajos porque esto podría requerir mayor infraestructura para reducir los eco-puntos totales y esto conlleva a aumentar los costos del proceso. Por lo tanto, ambos objetivos se contraponen entre sí y para ello resolvemos el problema de maximizar el (TAR) con la metodología del epsilon constraint (Haimes y col, 1971).



CASO DE ESTUDIO.

La OMS 2020 (Organización Social de la Salud) se ocupa de trabajar por la salud sobre todo de las personas que presentan algún tipo de discapacidad, esto incluye medidas que puedan garantizar la inclusión de estas personas a una vida social y digna. El número de personas con discapacidad aumenta debido al envejecimiento de la población y al incremento de enfermedades crónicas (INEGI. 2020). Las personas de 65 años o más ahora representan casi el 10% de la población mundial, y se espera que este número se duplique para el año 2050 (Ashammaki y col, 2019). Estas personas mayores tienen más probabilidades de experimentar complicaciones de salud como fracturas óseas y pérdida de tejido debido a su edad. Resolver estas complicaciones requiere reconstrucción o reemplazo. El INEGI reconoce a las personas con discapacidad a las cuales presentan dificultad para realizar actividades consideradas básicas, como: ver, escuchar, caminar, recordar o concentrarse, efectuar su cuidado personal y comunicarse. Por lo que, al hacer referencia a las personas que presentan dificultades para caminar, subir o bajar nos referimos a las personas que muestran impedimento para moverse, caminar, desplazarse o subir escaleras debido a la falta de toda o una parte de sus extremidades superiores o inferiores. Este es uno de los parámetros que se consideran para calcular la demanda de prótesis médicas para diferentes localidades como se muestra en la Tabla 3. También es necesario señalar que se espera un crecimiento de población del 1.05% anual (STATISTA 2022). Por otro lado, podemos observar en la Tabla 4 la demanda del sub-producto de polvo y alambre de aleación de titanio.

Se analiza un caso de estudio en México, esto para demostrar la aplicabilidad del modelo de optimización. De acuerdo con el Censo de Población y Vivienda 2020, en la entidad federativa de los Estados Unidos Mexicanos existe un total de población con problemas de discapacidad de 6, 179,890, lo que representa un 4.9% de la población total del país. De las cuales, 53% son mujeres y 47% son hombres (INEGI 2020 censo de población y vivienda 2020), lo que significa poder aplicar el caso de estudio y así proyectar resultados económicos y ambientales si se implementa la manufactura aditiva para la impresión de prótesis médicas. Por otro lado, también consideramos la venta del sub-producto que se genera en la cadena de suministro que es la producción de polvo y alambre de aleación de titanio, esto para maximizar las ganancias con la venta de este sub-producto. Con las vías de comunicación

“Análisis técnico, económico y ambiental de procesos de manufactura aditiva”



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO.
DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA.**



que se presentan hoy en día, es más fácil poder distribuir tanto de manera interna como externa ambos productos que se fabrican. De esta manera, se consideran en este caso de estudio las locaciones para la venta de ambos productos las ciudades de Colima, Guadalajara, León, Querétaro, Ciudad de México, Morelia, Puebla y Veracruz, por fines prácticos para la aplicación del modelo de optimización.

Para todas las localidades propuestas de la Tabla 3 se considera la producción de prótesis médicas en el sink de impresión 3D, la venta de dichas prótesis y la venta del polvo y alambre de aleación de titanio.

Para la obtención de la materia prima, es necesario contar con locaciones en donde se encuentre en abundancia minerales que contengan titanio, esto para minimizar el costo de la compra de la materia prima (ver Fig. 10). Los minerales de titanio en México se encuentran en tres principales regiones:

Tabla 3 Demanda de prótesis médicas.

Demanda de prótesis médicas. (Unidades).										
Año	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
Colima Col.	699	707	714	722	729	737	745	752	760	768
Guadalajara Jal.	5358	5415	5471	5529	5587	5646	5705	5765	5825	5887
León Gto.	6656	6726	6797	6868	6940	7013	7087	7161	7236	7312
Querétaro Qro.	3559	3596	3634	3672	3710	3749	3789	3829	3869	3909
CdMx.	41215	41647	42085	42527	42973	43424	43880	44341	44807	45277
Morelia Mich.	3851	3892	3933	3974	4016	4058	4100	4143	4187	4231
Puebla Pue.	6441	6509	6577	6646	6716	6786	6858	6930	7002	7076
Veracruz Ver.	3221	3254	3289	3323	3358	3393	3429	3465	3501	3538

Al noroeste (Baja California y la costa de Sonora), en el Golfo de México (en las costas de Tamaulipas) y en la parte del Pacífico (en los estados de Colima, Guerrero, Oaxaca y Chiapas). En la zona del pacífico existe una región con gran cantidad de minerales pesados, los cuales están distribuidos y concentrados en diferentes puntos (SECRETARIA DE ECONOMIA 2020). Cabe señalar que en este caso de estudio iniciamos el proceso de la cadena de suministro a partir de la materia prima ya procesada en polvo para la fabricación

de la aleación de titanio que necesitamos. El caso de estudio solo incluye algunas ciudades de la región geográfica para la compra de materia prima (ver Fig. 10), las

Tabla 4 Demanda de polvo y alambre de aleación de titanio.

Demanda de polvo y alambre de aleación de titanio (Toneladas).											
Locación	Año	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
Colima Col.		305	309	312	315	318	322	325	329	332	335
Guadalajara Jal.		440	445	449	454	459	464	469	474	479	484
León gto.		180	182	184	186	188	190	192	194	196	198
Querétaro Qro.		205	207	210	212	214	216	219	221	223	225
CdMx.		495	500	506	511	516	522	527	533	538	544
Morelia Mich.		200	202	205	207	209	211	213	215	218	220
Puebla Pue.		435	440	444	449	454	459	463	468	473	478
Veracruz Ver.		320	324	327	331	334	338	341	345	348	352

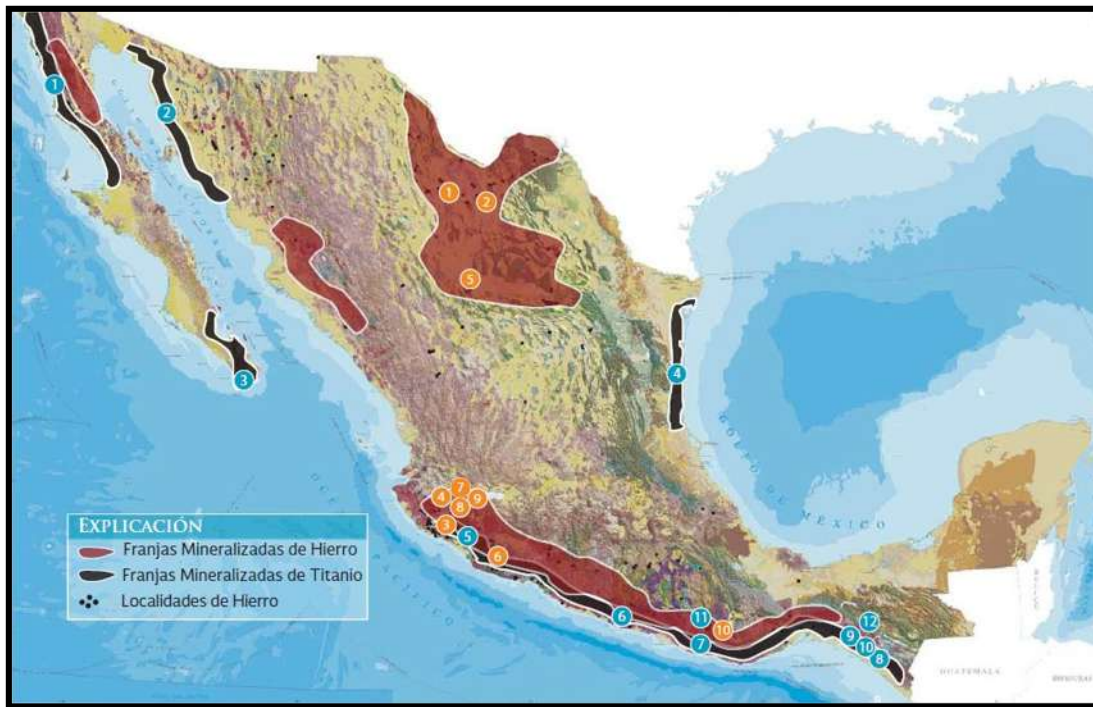


Fig. 10 Principales destinos de titanio en México (SECRETARÍA DE ECONOMÍA 2020).

ciudades que se seleccionan debido a la facilidad del alcance para la materia prima del componente principal, que en este caso es el titanio. Como se puede observar en la Fig. 10,

“Análisis técnico, económico y ambiental de procesos de manufactura aditiva”



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO. DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA.



en zona del pacifico hay disponibilidad de materia prima, es por ello que se seleccionan las siguientes localidades para la posible instalación del sink de procesamiento de conversión de polvo y alambre de aleación de titanio. Las localidades propuestas son: Colima, Colima, Chilpancingo, Guerrero, Tuxtla, Chiapas, y Oaxaca, Oaxaca.

En relación a las tecnologías utilizadas para la conversión de polvo y alambre de aleación de titanio (Ti6Al4V), el caso de estudio considera la implementación de cuatro tipos de procesos: atomización gas, electrodo plasma rotatorio, atomización plasma y esferoidización plasma. La capacidad de producción para estos procesos es de 10,000 toneladas al año, los costos fijos rondan los 7 millones de dólares aproximadamente y los costos variables 1 millón y medio. Para el caso de las tecnologías para la impresión 3D se seleccionan 2: fusión de lecho de polvo y revestimiento laser. En relación al lugar de instalación de estas nuevas tecnologías, se propone para este caso de estudio, las localidades siguientes: Colima, Colima, Guadalajara, Jalisco, León, Guanajuato, Querétaro, Querétaro, Ciudad de México, Morelia, Michoacán, Puebla, Puebla y Veracruz, Veracruz. Estas tecnologías de impresión 3D tienen un factor de eficiencia que ronda entre 0.7 y 0.8; una capacidad de producción de prótesis médicas de 18,000 por año. Los costos fijos anualizados oscilan entre 16 y 19 millones de dólares, los costos variables rondan entre 1 y 2 millones de dólares.

En la fabricación de las prótesis médicas es necesario tomar en cuenta las propiedades del material como: alta resistencia específica, alta resistencia a la corrosión, excelente biocompatibilidad, buena osteointegración, baja expansión térmica y baja conductividad térmica. Por lo que, es necesario producir el sub-producto de aleación de polvo de titanio (Ti6Al4V) que comprenda una fracción de masa de titanio de hasta 90% de aleación con aluminio de hasta 6.75% y vanadio de hasta 4.5%, junto con otros elementos menores. La composición completa necesaria para la fabricación del polvo de aleación de titanio se muestra en la Tabla 5. Es importante hacer notar que para fines prácticos del modelo de optimización solo se toman en cuenta los componentes con mayor porcentaje en masa de la composición total. El impacto ambiental se evalúa mediante el eco-indicador 99, el cual cuantifica el modelo del daño ambiental tomando en consideración una perspectiva de ponderación jerárquica para evaluar la importancia relativa del daño. Finalmente, para el caso de estudio, la tasa de descuento fue de 10% y la vida útil del proyecto fue de 10 años.

“Análisis técnico, económico y ambiental de procesos de manufactura aditiva”



Tabla 5 Composición del polvo.

Elemento	Porcentaje en masa
Titanio	90.37
Aluminio	5.5 a 6.5
Vanadio	3.5 a 4.5
Hierro	Menor a 0.25
Oxígeno	Menor a 0.13
Carbono	Menor a 0.08
Nitrógeno	Menor a 0.05
Hidrogeno	Menor a 0.012
Itrio	Menor a 0.005
Otros	Menor a 0.10

El problema fue codificado con el software GAMS (Brook y col, 1998), donde se utilizó el solver BARON para resolver el problema asociado mixto entero no lineal (MINLP). El problema consiste de 3,455 ecuaciones, 5,443 variables continuas y 40 variables binarias usando un valor absoluto y relativo de $10e-9$ con una computadora Inter® Core™ i7-7600U CPU @ 2.80GHz con 16 GB de memoria RAM instalada y con un tiempo de convergencia de aproximadamente 1.150 segundos.



RESULTADOS.

Análisis de resultados evaluando objetivo económico y variando la demanda de prótesis médicas.

El problema fue resultado para una vida útil de las tecnologías de 10 años, haciendo un análisis detallado año por año y variando la demanda satisfecha de prótesis médicas. El argumento de variar la demanda de las prótesis médicas es debido a que el alcance en el precio de las prótesis es demasiado alto para el mayor porcentaje de la población, por lo que, se analiza el caso de estudio disminuyendo gradualmente la demanda de las prótesis médicas y así lograr identificar hasta que porcentaje es rentable el caso de estudio. Al examinar la gráfica Pareto (Fig. 11) se puede observar en el escenario J, que el costo de las prótesis médicas es de vital importancia en el proceso, ya que al producir solo un 10% de la demanda de las prótesis médicas iniciales aun así el caso de estudio es rentable, por lo que, los resultados muestran que al producir 66,761 prótesis médicas para toda la cadena de suministro se tiene una ganancia de \$272.15 millones de dólares. Por otro lado, si se produce el 100% de la demanda de prótesis médicas se tienen ganancias de \$3116.53 millones de dólares. Se puede observar que la solución con el 10% de la demanda de las prótesis médicas representa el 8.73% del escenario con el máximo beneficio económico. Para fines prácticos se evaluaron 10 escenarios en este caso de estudio para observar el comportamiento de los resultados disminuyendo la demanda satisfecha de las prótesis médicas. En la Tabla 6 se pueden analizar cada uno de los escenarios resueltos, así como los parámetros utilizados. Se tienen las ganancias por la venta de los productos, así como, los costos de la materia prima utilizada, los costos de transporte de toda la configuración, y también, los costos fijos anualizados y variables del proceso. Es importante resaltar que en la solución de cada uno de los escenarios no se observa venta por el producto del polvo o alambre de aleación de titanio Ti6Al4V, esto se debe al alto valor económico de cada una de las prótesis médicas producidas, por lo que, la solución se inclina por vender el producto de mayor interés que en todos los escenarios resueltos son las prótesis médicas.

Al analizar el escenario F de la gráfica Pareto, se tienen ganancias totales de \$1534.21 millones de dólares, esto corresponde al disminuir la demanda satisfecha de prótesis médicas al 50%, produciendo un total de prótesis médicas de 339,748 para toda la cadena de

“Análisis técnico, económico y ambiental de procesos de manufactura aditiva”

suministro del proceso. En este escenario no se incluye la venta de polvo o alambre de aleación de titanio Ti6Al4V.

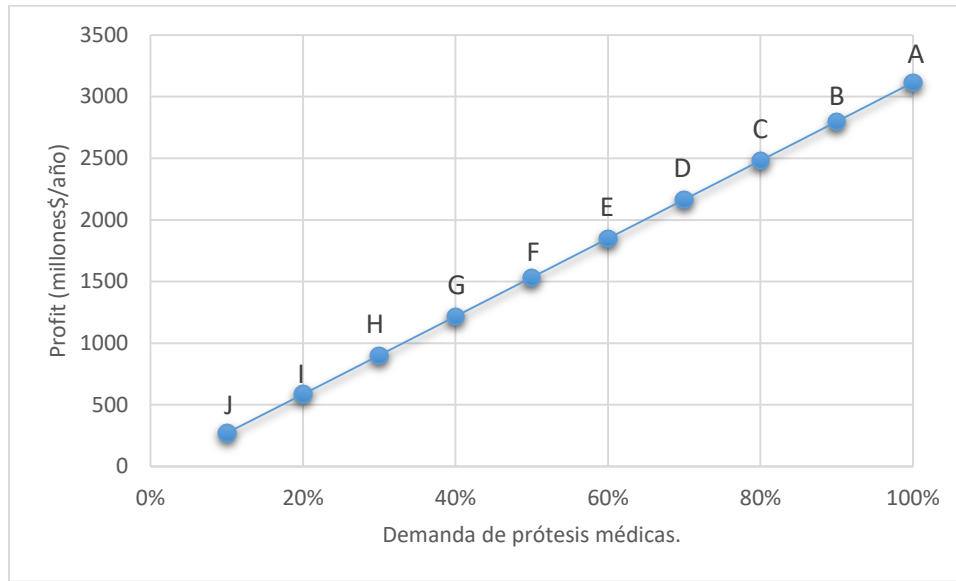


Fig. 11 Conjunto de soluciones Pareto disminuyendo demanda de prótesis médicas.

Tabla 6 Resultados para cada escenario evaluando aspecto económico disminuyendo demanda de prótesis.

Escenario	Profit (millones \$US)	% demanda prótesis médicas	Ventas (Millones \$US)		Costos (Millones \$US)			
			Polvo y alambre	Prótesis médicas	Materia prima	Transporte	Fijos	Variables
A	3116	100%	-	3708.2	328.07	177.22	45.51	40.8
B	2799	90%	-	3337.5	295.27	159.5	45.51	37.5
C	2482	80%	-	2966.6	266.38	141.78	41.12	34.3
D	2166	70%	-	2595.8	233.08	124.19	41.12	30.9
E	1850	60%	-	2225.1	199.78	106.34	41.12	27.3
F	1534	50%	-	1854.1	166.49	88.707	41.12	23.6
G	1218	40%	-	1483.3	133.19	70.890	41.12	19.7
H	902	30%	-	1112.5	99.89	53.22	41.12	15.7
I	586	20%	-	741.66	70.34	35.445	36.95	11.8
J	272	10%	-	370.83	33.297	17.741	41.12	6.5



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO.
DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA.**



En la Tabla 7 se muestran los caudales totales necesarios para la solución del escenario F. Se muestra cuanta materia prima es necesaria para obtener la solución, el tipo de tecnología seleccionada para la conversión de polvo y alambre de aleación de titanio, así como para la impresión de prótesis médicas y el flujo correspondiente.

Tabla 7 Flujos correspondientes a la solución del escenario F.

Escenario F										
	Año									
	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
Total materia prima (Tons)	42.226	42.670	43.117	43.57	44.028	44.490	45.226	45.429	45.906	46.388
Titanio	38.003	38.403	38.805	39.213	39.625	40.041	40.461	40.886	41.316	41.749
Aluminio	2.534	2.560	2.587	2.614	2.642	2.669	2.967	2.726	2.754	2.783
Vanadio	1.689	1.707	1.725	1.743	1.761	1.780	1.798	1.817	1.836	1.856
Total Polvo y alambre (Tons)	28.291	28.589	28.888	29.192	29.498	29.808	30.121	30.437	30.757	31.08
Atomización gas	28.291	28.589	28.888	29.192	29.498	29.808	30.121	30.437	30.757	31.08
Electrodo plasma rotatorio	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Atomización plasma	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Esferoidización plasma	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total prótesis médicas (unidades)	31831	32166	32503	32845	33190	33538	33890	34246	34606	34969
Fusión de lecho de polvo	31831	32166	32503	32845	33190	33538	33890	34246	34606	34969
Revestimiento laser	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Para mostrar la configuración gráfica de la cadena de suministro del escenario F, el cual se está analizando, debemos seleccionar un año en específico. En este caso, seleccionamos el año 2025 para hacer el análisis. La Fig. 12 muestra la configuración óptima del análisis de la cadena de suministro, mostrando el flujo de materia prima en específico necesario, las tecnologías seleccionadas para la conversión de polvo y alambre de la aleación de titanio, las

“Análisis técnico, económico y ambiental de procesos de manufactura aditiva”

tecnologías de impresión 3D, así como los destinos seleccionados del mercado de las prótesis médicas.

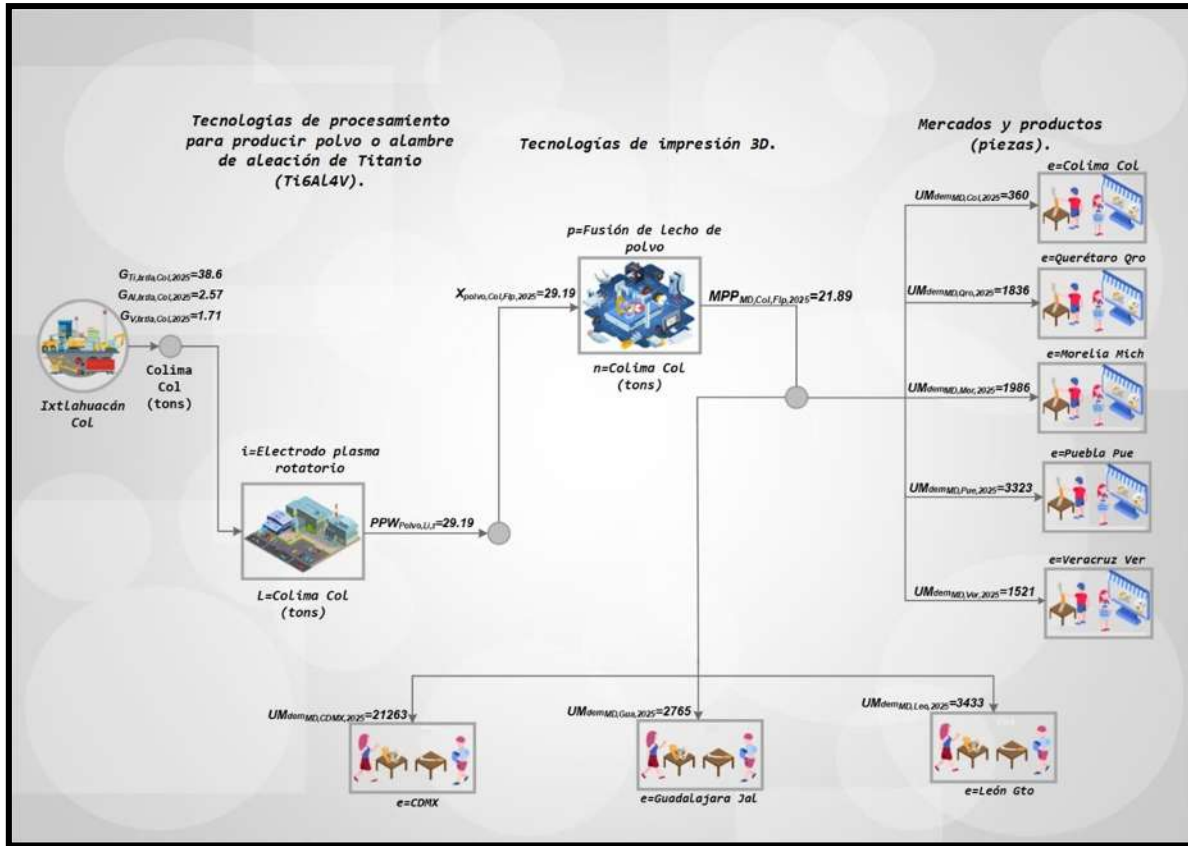


Fig. 12 Diagrama de flujo para el escenario F en el año 2025.



Análisis de resultados evaluando los objetivos económicos y ambientales.

El conjunto de soluciones óptimas Pareto que compensan el objetivo económico y ambiental, que corresponden al caso, se muestra en la Fig. 13. La Fig. 13 muestra las soluciones óptimas que representan el beneficio total (PROFIT) respecto a los eco-puntos totales generados en el proceso (ECO99). Como se puede observar en la gráfica Pareto, el escenario A corresponde al máximo beneficio total por el lado económico, pero, el objetivo ambiental que es evaluado por los eco-puntos totales generados es la máxima cantidad generada. Ahora bien, el escenario J corresponde a la solución con la menor cantidad de eco-puntos generados y por el lado económico representa el valor mínimo de ganancias en el proceso mientras que los escenarios B, C, D, E, F, G, H, e I corresponden a las soluciones intermedias que compensan los dos escenarios extremos. Las soluciones de los escenarios intermedios pueden servir para utilizarlos como una herramienta para el proceso de toma de decisiones, esto ayuda para seleccionar la mejor solución que satisfaga los requisitos deseados. Desde el punto de vista económico, todos los escenarios representan beneficios económicos positivos aunque, unos en mayor proporción que otros. Por el lado ambiental, los eco-puntos totales generados van disminuyendo conforme disminuye el beneficio económico y esto tiene lógica, ya que, a mayor producción de productos mayor es la suma total de eco-puntos generados en el proceso de la cadena de suministro. Esto significa que la implementación del proyecto es rentable en cualquiera de los escenarios, ya que todos representan ganancias en el proceso. Analizando el objetivo económico de la gráfica Pareto, cualquier escenario es rentable ya que en todos se observan ganancias, más sin embargo, para realizar la toma de decisiones del proyecto es necesario considerar los dos objetivos en conjunto, por lo cual, tomar en cuenta el objetivo ambiental es de vital importancia.

Respecto a la ubicación óptima y tipo de tecnologías que deben instalarse para el escenario A y el escenario G, por mencionar algunos, la Tabla 8 y 9 muestran la configuración de cada tecnología seleccionada y también donde muestra la locación en la cual debe ser instalada.

Analizando la segunda parte de la cadena de suministro que es la producción de polvo y alambre de aleación de titanio la ciudad elegida es una de la región geográfica estudiada.



Tabla 8 Locación y tipo de tecnología para el procesamiento de la aleación de titanio.

	Escenario A	Escenario G
Locación	Tecnología de procesamiento para producir polvo o alambre de aleación de Titanio.	Tecnología de procesamiento para producir polvo o alambre de aleación de Titanio.
Colima, Colima	Electrodo plasma rotatorio	Electrodo plasma rotatorio

Tabla 9 Locación y tipo de tecnología de impresión 3D.

	Escenario A	Escenario G
Locación	Tecnología de impresión 3D	Tecnología de impresión 3D
Colima, Colima	Fusión de lecho de polvo	Fusión de lecho de polvo

Para el escenario A (que es el escenario con el máximo beneficio económico), se tiene una configuración por lo que, se debe instalar un proceso para la conversión de polvo y alambre de aleación de titanio, el proceso instalado es el electrodo plasma rotatorio, así como para el escenario G que se encuentra en la parte intermedia de las soluciones. Cabe señalar que los escenarios B, C, D, E, F, H e I presentan la misma configuración tecnológica para el proceso de conversión de polvo y alambre de titanio debido a que estos escenarios presentan costos fijos similares. Por otro lado, al analizar la tercera etapa de la cadena de suministro, la cual es el proceso de impresión 3D presenta varias configuraciones factibles con las tecnologías de impresión. Para los escenarios B y C la configuración es similar, instalando las mismas tecnologías en las mismas locaciones, así como para los escenarios D, E y F. Sin embargo, para los escenarios en los cuales se presentan ganancias menores, la configuración es igual para todos. Esto se debe a que al tomar en cuenta el aspecto ambiental, disminuye la producción de producto y al disminuir la producción, disminuyen los eco-puntos totales generados, por lo que, las tecnologías que se seleccionan cambian respecto a los costos fijos y variables de cada una de ellas. Por lo tanto, las tecnologías de conversión de polvo y alambre de aleación de titanio y las tecnologías de impresión 3D tienen un papel importante en los resultados económicos. Enseguida se muestra en la Tabla 10 los detalles económicos



pertenecientes a cada escenario, en el cual, se puede observar que a pesar de que no hay ingreso por la venta del polvo o alambre de aleación de titanio se compensa por los ingresos de las prótesis médicas, esto se debe al gran impacto económico que representa cada unidad producida y vendida referente a las prótesis médicas. Esto hace notar que efectivamente la configuración de la tecnología tiene un alto impacto en las ganancias. Analizando el aspecto ambiental, en este estudio se evaluó mediante el eco-indicador 99, que en resumen es un modelo basado en la evaluación del ciclo de vida. Este modelo de daño ambiental tomó en cuenta una perspectiva de ponderación para evaluar la importancia relativa del daño. Al hacer uso del método de evaluación del ciclo de vida, nos permitió evaluar las cargas ambientales globales correspondientes al proceso asociado a la cadena de suministro, que identificó y cuantificó el material y la energía utilizados. Con la importancia que se le debe dar al aspecto ambiental, muchos trabajos han introducido este tipo de metodologías para medir y mejorar el desempeño de los procesos ambientalmente hablando (Singh y col, 2017; Morosuk y col, 2016).

En la Tabla 11 se muestran los caudales para el escenario A. El flujo total necesario de la materia prima para cumplir la demanda de prótesis médicas, así como la generación de polvo y alambre de aleación de titanio.

Tabla 10 Resultados para cada escenario evaluando aspecto económico y ambiental.

Escenario	Profit (millones \$US)	ECO99 (eco-puntos)	Ventas (Millones \$US)		Costos (Millones \$US)			
			Polvo y alambre	Prótesis médicas	Materia prima	Transporte	Fijos	Variables
A	3116	1126500	-	3708.3	328	177.23	45.52	40.8
B	2804	1014000	-	3338.1	295	155.63	45.52	37.51
C	2490	901500	-	2967.7	266	135.51	41.12	34.38
D	2175	788850	-	2596.9	233	116.11	41.12	30.906
E	1867	676200	-	2226.1	197	89.346	45.52	27.128
F	1551	563550	-	1855.2	167	72.287	41.13	23.615
G	1230	450900	-	1484.3	131	57.838	45.52	19.616
H	913	338250	-	1113.5	99	43.388	41.12	15.698
I	591	225600	-	742.67	66	28.938	45.52	11.273
J	279	112950	-	371.83	33	11.428	41.12	6.527
K	0	0	-	0	0	0	0	0

“Análisis técnico, económico y ambiental de procesos de manufactura aditiva”

También se observa el número total de prótesis producidas en la cadena de suministro y las tecnologías seleccionadas para la configuración del escenario A. Por otro lado, en la Fig. 14 se muestra la configuración óptima para el escenario A de los flujos del proceso de la cadena de suministro, así como las ciudades y tecnologías seleccionadas para el año 2025.

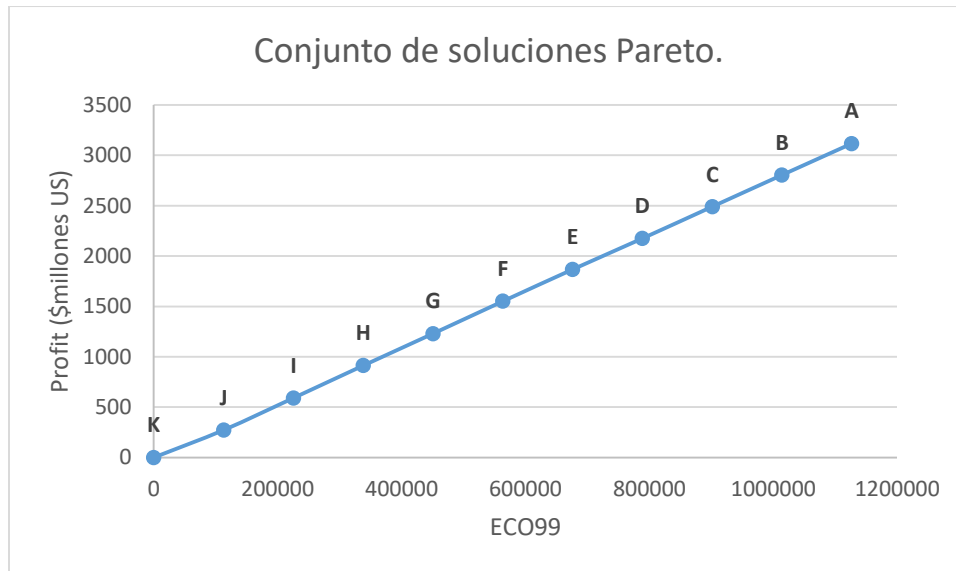


Fig. 13 Conjunto de soluciones óptimas Pareto.

Analizando el punto extremo positivo de la gráfica Pareto conjuntamente con la Tabla 10, el punto máximo en beneficios, se puede observar que se tienen ganancias de \$3116.21 millones de dólares, sin embargo, el escenario con menor ganancia económica que es el escenario J representa un 8.95% respecto al escenario A, sin embargo, el aspecto ambiental del escenario A es el punto máximo de la solución generando un total de 1,126,000 eco-puntos totales. Al analizar la gráfica Pareto y teniendo en cuenta el aspecto económico y ambiental, seleccionamos el escenario C y H para analizarlo a detalle. El escenario C es un punto factible en la configuración de la cadena de suministro, ya que las ganancias del proceso son considerables. Por otro lado, el escenario H tiene una generación de eco-puntos totales generados mínimos con respecto al escenario A, esto sucede debido a que se considera el aspecto ambiental en la modelación y para no generar gran cantidad de eco-puntos totales, disminuye la producción de prótesis médicas. Estas dos soluciones son adecuadas analizar ya que el primer escenario compensa el objetivo económico y el segundo escenario remedia el aspecto ambiental. El escenario C tiene un beneficio de \$2490.16 millones de dólares con

“Análisis técnico, económico y ambiental de procesos de manufactura aditiva”



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO.
DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA.**



un total de 901,500 eco-puntos generados. Por otro lado, el escenario H tiene ganancias de \$913.81 millones de dólares, pero los eco-puntos totales generados son 338,250. En el caso de la selección de tecnologías para la conversión de polvo y alambre de aleación de titanio, la configuración tanto para el escenario C como para el escenario H involucra la planta de electrodo plasma rotatorio. Con respecto a la selección de tecnología de impresión 3D, la alternativa para la tecnología es fusión de lecho de polvo. En la Tabla 12 y 13 se muestran los flujos pertinentes a la configuración óptima del escenario C y H, respectivamente que incluye desde, las toneladas de materia prima adquirida hasta el total de prótesis médicas impresas con las tecnologías de manufactura aditiva, así como la selección de las tecnologías y el lugar para instalarlas.

Tabla 11 Flujos correspondientes a la solución del escenario A.

Escenario A										
	Año									
	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
Total materia prima (Tons)	83.21	84.083	84.965	85.859	86.759	87.67	88.592	89.521	90.463	91.413
Titanio	74.889	75.675	76.469	77.273	78.084	78.904	79.733	80.569	81.416	82.271
Aluminio	4.992	5.045	5.098	5.152	5.205	5.26	5.315	5.371	5.428	5.485
Vanadio	3.329	3.363	3.398	3.434	3.47	3.506	3.544	3.581	3.619	3.657
Total Polvo y alambre (Tons)	56.583	57.177	57.777	58.384	58.997	59.616	60.242	60.875	61.514	62.16
Atomización gas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Electrodo plasma rotatorio	56.583	57.177	57.777	58.384	58.997	59.616	60.242	60.875	61.514	62.16
Atomización plasma	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Esferoidización plasma	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total prótesis médicas (Piezas)	63662	64331	65006	65689	66379	67075	67780	68491	69211	69937
Fusión de lecho de polvo	63662	64331	65006	65689	66379	67075	67780	68491	69211	69937
Revestimiento laser	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

“Análisis técnico, económico y ambiental de procesos de manufactura aditiva”

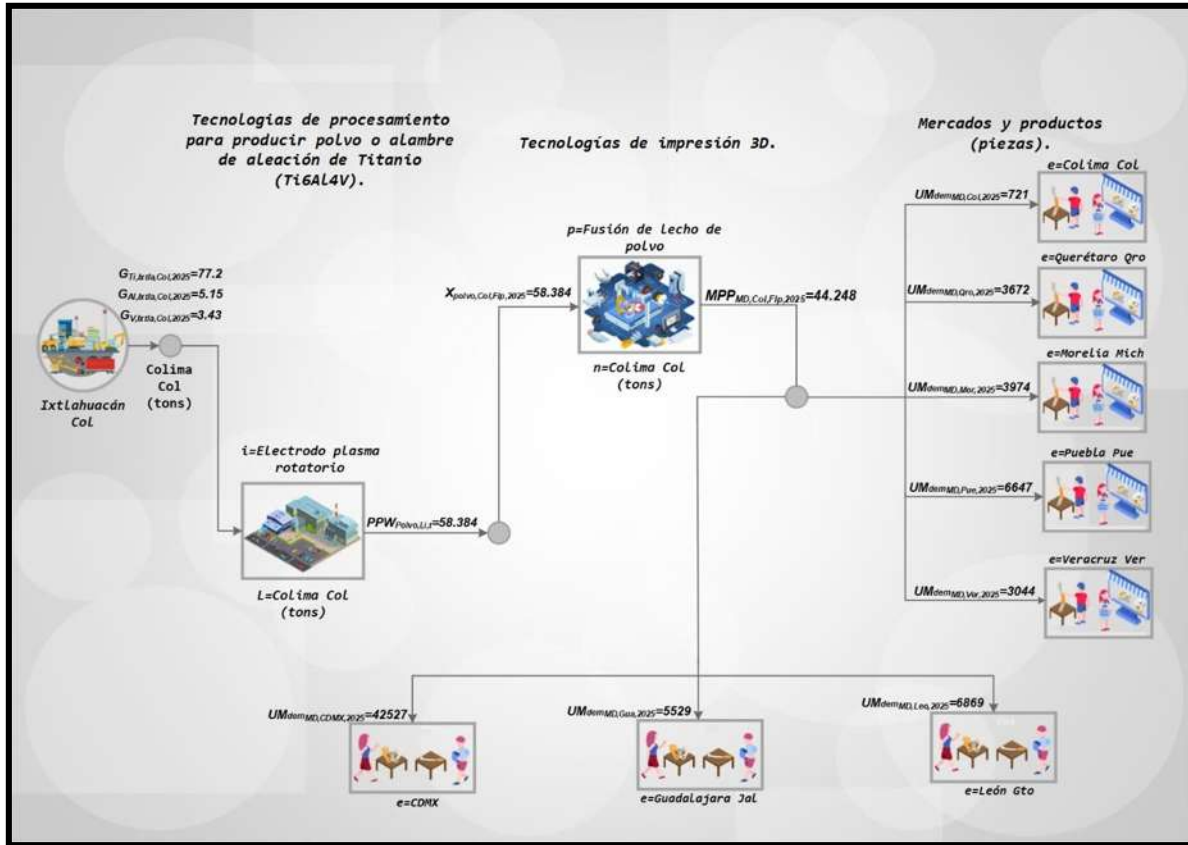


Fig. 14 Diagrama de flujo para el escenario A en el año 2025.

La Fig. 15 y la Fig. 16 muestran los flujos de toda la red, analizando ambos escenarios para el tiempo 2025 y la configuración tecnológica para los escenarios C y H respectivamente.

Existen diferencias de la solución entre estos dos escenarios, la principal diferencia es que en el primer escenario tenemos ganancias mayores que el segundo escenario analizado, en cambio, el aspecto ambiental existen menos eco-puntos totales generados en el segundo escenario. Algo que comparten ambos escenarios es que no existe la venta del polvo o aleación de titanio para el mercado, esto se debe primordialmente a que para configuración de la cadena de suministro es mejor producir y vender prótesis médicas, debido a su costo elevado de cada pieza, por lo que, la distribución se inclina hacia ese lado. De acuerdo con el análisis anterior, el escenario C puede ser una solución factible que garantice un equilibrio justo entre el aspecto económico y el ambiental. Para que se pueda tomar hacer el análisis de



toma de decisiones es primordial tomar en cuenta ambos aspectos ya que generalmente es lo más importante a considerar para la elección de los escenarios discutidos anteriormente.

Tabla 12 Flujos correspondientes a la solución óptima del escenario C.

Escenario C										
	Año									
	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
Total materia prima (Tons)	70.19	67.28	67.99	68.70	69.42	70.15	70.89	78.519	72.389	73.148
Titanio	63.17	60.55	61.19	61.83	62.48	63.13	63.80	70.667	65.15	65.833
Aluminio	4.212	4.037	4.079	4.122	4.166	4.209	4.254	4.711	4.343	4.389
Vanadio	2.808	2.691	2.72	2.748	2.777	2.806	2.836	3.141	2.896	2.926
Total Polvo y alambre (Tons)	47.03	45.08	45.55	46.03	45.51	47.00	47.49	52.60	48.5	49.009
Atomización gas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Electrodo plasma rotatorio	47.03	45.08	45.55	46.03	45.51	47.00	47.49	52.60	48.5	49.009
Atomización plasma	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Esferoidización plasma	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total prótesis médicas (unidades)	52916	50721	51253	57541	52336	52885	53440	59190	54569	55142
Fusión de lecho de polvo	52916	50721	51253	57541	52336	52885	53440	59190	54569	55142
Revestimiento laser	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Para el caso del escenario C, se tiene una distribución para la compra de materia prima desde una locación, como se muestra en la Fig. 15, para posteriormente procesar la materia prima para su conversión en polvo o alambre de aleación de titanio. Enseguida sigue una distribución a la locación seleccionada para la impresión 3D. Y posteriormente, destinar las prótesis médicas a distintos mercados. La configuración óptima para el escenario C muestra una distribución conveniente en una zona geográfica del caso de estudio. Esto es debido a



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO.
DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA.**



que las localidades elegidas en la configuración mantienen una distancia pertinente entre ellas. En este escenario se debe hacer notar que existe una reducción en los mercados de venta de las prótesis médicas, ya que solo se vende el producto en 5 mercados que se seleccionan en la configuración. Esto se debe al impacto ambiental que se tendría si se vendieran en todas los mercados, por lo que, la reducción de los eco-puntos totales generados es el resultado de la reducción de los mercados seleccionados. Para este escenario se tienen costos de materia prima de \$262.47 millones de dólares para toda la configuración de la red, así como \$135.51 millones de dólares para los costos de transporte. Por otro lado, se presenta costos fijos y variables de \$41.12 millones y \$34.38 millones de dólares respectivamente.

Tabla 13 Flujos correspondientes a la solución del escenario H.

Escenario H										
	Año									
	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
Total materia prima (Tons)	49.211	49.708	1.026	5.555	1.036	51.85	52.395	1.036	72.062	49.211
Titanio	44.29	44.756	0.923	5	0.933	46.665	47.155	0.933	48.656	44.29
Aluminio	2.953	2.984	0.062	0.333	0.062	3.111	3.144	0.062	3.244	2.953
Vanadio	1.968	1.968	0.041	0.222	0.041	2.074	2.096	0.041	20.162	1.968
Total Polvo y alambre (Tons)	32.972	33.318	0.694	3.722	0.694	34.739	35.104	0.694	36.222	32.972
Atomización gas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Electrodo plasma rotatorio	32.972	33.318	0.694	3.722	0.694	34.739	35.104	0.694	36.222	32.972
Atomización plasma	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Esferoidización plasma	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total prótesis médicas (unidades)	37097	37487	782	4653	782	39086	39497	782	40754	37097
Fusión de lecho de polvo	37097	37487	782	4653	782	39086	39497	782	40754	37097
Revestimiento laser	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Analizando el escenario H en el cual las ganancias en la configuración de la cadena de suministro son menores, nos encontramos con una reducción importante en la demanda de prótesis médicas, por lo que la configuración cumple esa cantidad demandada y las ganancias por las ventas de las prótesis médicas se ve afectado, sin embargo, si analizamos el aspecto ambiental, es conveniente inclinarse por este escenario, ya que los eco-puntos totales generados por la solución son mucho menor que los eco-puntos generados en el escenario C y esto beneficiaría al medio ambiente. En este escenario solamente existe como mercado de venta de las prótesis médicas la CDMX como se puede observar en la Fig. 15, esto genera un disminución importante en los eco-puntos totales generados en la configuración, ya que solamente se generan 338250 eco-puntos totales para toda la configuración. Esta solución solamente se analiza para observar cómo se comporta la configuración de la red de la cadena de suministro, sin embargo, es necesario tomar en cuenta ambos aspectos para tomar una decisión. La configuración de la red como se muestra en la Fig. 15 solo elige una locación para todo el proceso, desde la compra de la materia prima hasta la venta de las prótesis médicas que se distribuye en un solo mercado de la cadena de suministro.

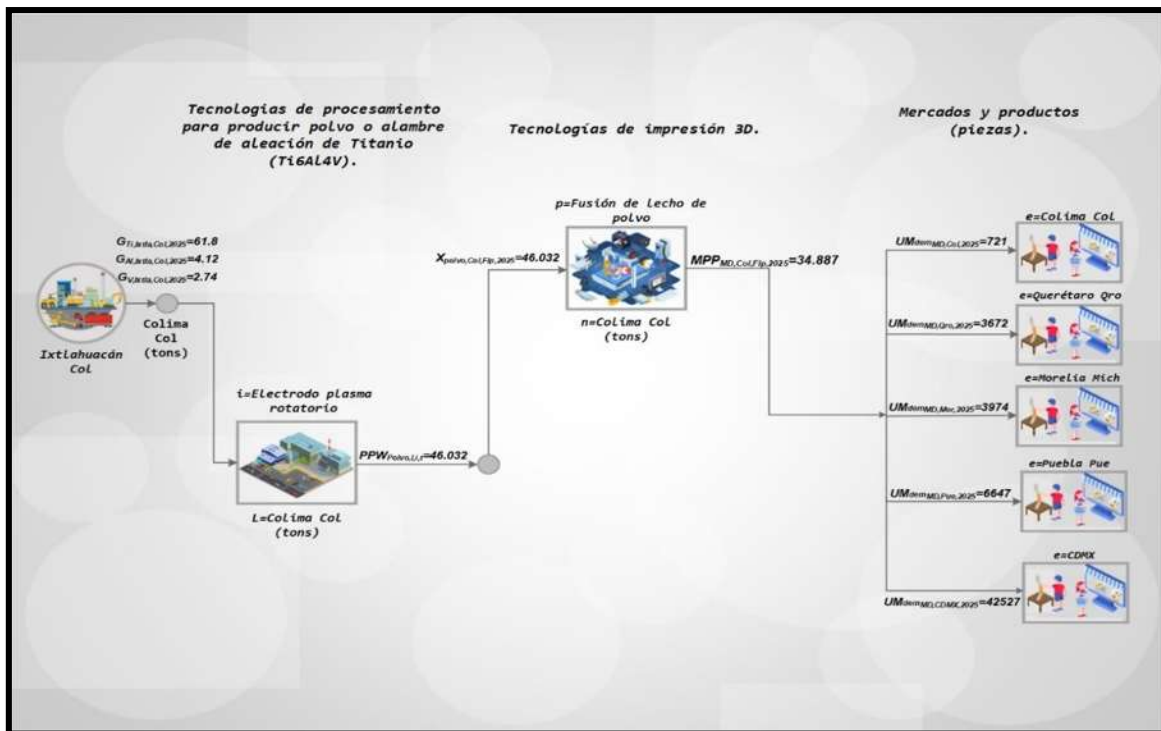


Fig. 15 Configuración óptima para el escenario C en el año 2025.
“Análisis técnico, económico y ambiental de procesos de manufactura aditiva”

Finalmente, se deben considerar todos aquellos escenarios para ser una solución factible y para que sea rentable el proceso, debido a que el aspecto ambiental y el aspecto económico deben de estar en equilibrio para alcanzar puntos positivos en la elección de algún escenario.

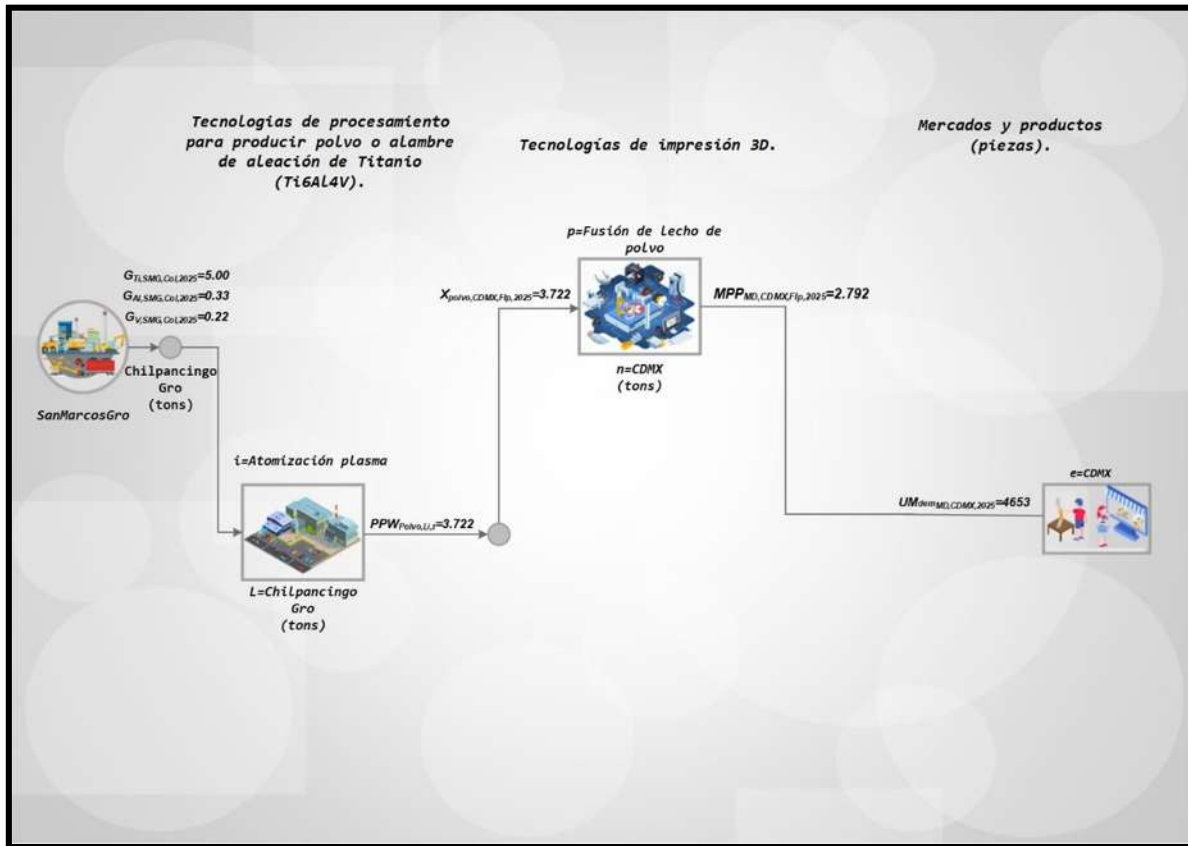


Fig. 16 Diagrama de flujo para el escenario H en el año 2025.



CONCLUSIONES.

Este proyecto involucra una formulación de optimización de programación mixta entera no lineal (MINLP) de una superestructura para la cadena de suministro de las prótesis médicas utilizando tecnologías de manufactura aditiva, se considera el proceso desde la compra de materia prima hasta la impresión de prótesis médicas que implica la ubicación y selección óptimas de diversas tecnologías de procesamiento e impresión 3D para satisfacer la demanda del sub-producto de polvo o alambre de titanio (Ti6Al4V) y la demanda de prótesis médicas. En relación a la superestructura, se desarrolló una formulación de programación matemática para la maximización simultánea de las ganancias totales tomando en consideración los ingresos generados por la venta de productos, los costos de capital asociados al transporte, costos fijos y costos variables generados por la cadena de suministro de las prótesis médicas y los eco-puntos totales generados en el proceso de la cadena de suministro. Se resuelve un caso de estudio aplicado en una región geográfica de México para mostrar la aplicabilidad de la metodología. Dependiendo de la demanda de prótesis médicas, los resultados que se muestran en las soluciones son económicamente factibles cuando se tiene una producción de prótesis médicas altas, considerando también los eco-puntos totales generados. Cuando el objetivo principal es el objetivo ambiental se le da prioridad a no producir una gran cantidad de productos y el resultado es la disminución en los eco-puntos totales generados. Además, los resultados mostraron que la implementación de la metodología planteada produce beneficios económicos y ambientales para el caso de estudio analizado, debido al crecimiento de la utilidad neta y la disminución de los eco-puntos totales generados de una región geográfica de México.

Finalmente, el planteamiento que se presenta es general, y se puede aplicar a cualquier otro caso de estudio con diferentes condiciones y en diferentes lugares, si la información requerida está disponible.



REFERENCIAS.

1. Atzeni, E. and A. Salmi, Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012. **62**(9-12): p. 1147-1155.
2. Ononiwu N.H, Akinlabi E.T, Ozoegwu C.G., Optimization techniques applied to machinability studies for turning aluminium metal matrix composites: A literature review. *Materiales Today: Proceedings*. 44 (2021) 1124-1129.
3. Gao W, Zhang Y, Ramanujan D, Ramani K, Chen Y, Williams C.B, Wang C. C. L, Shin, Zhang Y. C. S, Zavattieri P.D., The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computers-Aided Design*. 69 (2015) 65-89.
4. Dewidar M.M, Khalil K.A and Lim J. K., Processing and mechanical properties of porous 316L stainless steel for biomedical applications, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, vol. 17, no 3, pp. 468-473, 2007.
5. Huang L, Pu C, Fisher R. K, Mountain D. J. H, Gao Y, Liaw P. K, Zhang W, and He W., A Zr-based bulk metallic glass for future stent applications: Materials properties, finite element modeling, and in vitro human vascular cell response, *Acta Biomater.*, vol. 25, pp. 356–368, 2015.
6. Stucker B. Additive manufacturing technologies: technology introduction and business implications. In: *Frontiers of Engineering: Reports on Leading-Edge Engineering from the 2011 Symposium*. The National Academies Press, Washington, DC, USA, 5–14 (2011).
7. Gibbs D, Vaezi M, Yang S, Oreffo R. O. C., Hope versus hype: What can additive manufacturing realistically offer trauma and orthopedic surgery?, *Regen. Med.* 9(4), 535-549, 2014.
8. Smay JE, Gratson GM, Shepherd RF, Cesarano J, Lewis JA. Directed colloidal assembly of 3D periodic structures. *Adv. Mater.* 14(18), 1279–1283 (2002).
3. Derby B. Printing and prototyping of tissues and scaffolds. *Science* 338(6109), 921–926 (2012).
9. Landers R, Mulhaupt R. Desktop manufacturing of complex objects, prototypes and biomedical scaffolds by means of computer-assisted design combined with computer-guided



- 3D plotting of polymers and reactive oligomers. *Macromol. Mater. Eng.* 282(9), 17–21 (2000).
10. Kalita S. J, Bose S, Hosick H. L, Bandyopadhyay A. Development of controlled porosity polymer-ceramic composite scaffolds via fused deposition modeling. *Mater. Sci. Eng. C* 23(5), 611–620 (2003).
11. Ferro C.G, Mazza A, Belmonte D, Seclí C, Maggiore P. A comparasion between 3D printing and milling process for a Spar Cap fitting (wing-fuselage) of UAV aircraft. *Procedia CIRP.* 62(2017) 487-493.
12. Gebler, M., Schoot Uiterkamp, A.J.M., Visser, C., A global sustainability perspective on 3D printing technologies. *Energy Policy* 2014 74, 158-167.
13. Unger, A.S., R.J. Lewis, and T. Gruen, Evaluation of a porous tantalum uncemented acetabular cup in revision total hip arthroplasty: clinical and radiological results of 60 hips. *The Journal of arthroplasty*, 2005. 20(8): p. 1002-1009.
14. Excell, J. and S. Nathan, The rise of additive manufacturing. *The engineer*, 2010. 24.
15. Huang, S.H., et al., Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013. 67(5-8): p. 1191-1203.
16. S. Ford, M. Despeisse, Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges, *J. Clean. Prod.* 137 (2016 Nov 20) 1573-1587.
17. Tofail, A.M., Koumoulos E.P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., O'Donoghue, L., Charitidis, C., Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials Today*, 2018. 21(1): p. 22-37.
18. Zenzinger, G., Bamberg, J., Ladewig, A., Hess, T., Henkel, B., Satzger, W., Process monitoring of additive manufacturing by using tomography. *AIP Conference Proceedings*, 2015. 1650: p. 164-170.
19. Carl, V., Monitoring system for the quality assessment in additive manufacturing. *AIP Conference Proceedings*, 2015. 1650: p. 171-176.
20. Krauss, H., Zeugner, T., Zaeh, M.F., Thermographic process monitoring in powderbed base additive manufacturing. *AIP Conference Proceedings*, 2015. 1650: p. 177-183.



21. Rieder, H., Dilhofer, A., Spies, M., Bamberg, J., Hess, T., Ultrasonic online monitoring of additive manufacturing processes based on selective laser melting. *API Conference Proceedings*, 2015. 1650: p. 184-191.
22. Everton, S.K., Hirsch, M., Stravroulakis, P., Leach, R. K., Clare, A.M., Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing. *Materials & Design*, 2016. Vol (5): p. 431-445.
23. Raguvarun, K., Balasubramaniam, K., Rajagopal, P., Palanisamy, S., Nagarajah, R., Hoye, N., Curiri, D., Kapoor, A., A study of internal structure in components made by additive manufacturing process using 3D X-ray tomography. *AIP Conference Proceedings*, 2015. 1650: p. 146-155.
24. Pereira, T., Kennedy, J. V., Potgieter, J., A comparison of traditional manufacturing vs additive manufacturing the best method for the job. *Procedia Manufacturing*, 2019. Vol. (30): p. 11-18.
25. Huang, R., Riddle, M., Graziano, D., Warren, J., Das, S., Nimbalkar, S., Cresko, J., Masanet, E., Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components. *Journal of Cleaner Production*, 2016. Vol. (135) p. 1559-1570.
26. M. Baumers, C. Tuck, D.L. Bourell, R. Sreenivasan, R. Hague. Sustainability of additive manufacturing: measuring the energy consumption of the laser sintering process, *Proc. IME B J. Eng. Manufact.* 225 (12) (2011 Dec) 2228-2239.
27. M.K. Niaki, F. Nonino, G. Palombi, S.A. Torabi. Economic sustainability of additive manufacturing, *J. Manuf. Technol. Manag.* 30 (2) (2019 Feb 28) 353-365.
28. S. Yang, W. Min, J. Ghibaud, Y.F. Zhao. Understanding the sustainability potential of part consolidation design supported by additive manufacturing, *J. Clean. Prod.* 232 (2019 Sep 20) 722-738.
29. A.W. Gebisa, H.G. Lemu. Design for manufacturing to design for Additive Manufacturing: analysis of implications for design optimality and product sustainability, *Proc. Manuf.* 13 (2017 Jan 1) 724-731.



30. A. Ghobadian, I. Talavera, A. Bhattacharya, V. Kumar, J.A. Garza-Reyes, N. O'regan. Examining legitimatisation of additive manufacturing in the interplay between innovation, lean manufacturing and sustainability, *Int. J. Prod. Econ.* 219 (2020 Jan 1) 457-468.
31. S. Mohd Yusuf, S. Cutler, N. Gao. The impact of metal additive manufacturing on the aerospace industry, *Metals* 9 (12) (2019 Dec) 1286.
32. S.H. Ghaffar, J. Corker, M. Fan. Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution, *Autom. ConStruct.* 93 (2018 Sep 1), 1-1.
33. Ashraf Imam, M., Froes, F.H.S. Low cost titanium and developing applications. *JOM* 62, 17–20 (2010). <https://doi.org/10.1007/s11837-010-0069-8>.
34. Gao F, Nie Z, Yang D, Sun B, Liu Y, Gong X, Wang Z., Environmental impacts analysis of titanium sponge production using Kroll process in China, *Journal of Cleaner Production*, (2018) V-174 pp. 771-779, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.09.240
35. Chen W, Yamamoto Y, Peter W.H, Gorti S.B, Sabau A.S, Clark M.B, Nunn S.D, Kiggans J.O, Blue C.A, Williams J.C, Fuller B, Akhtar K., Cold compaction study of Armstrong Process® Ti–6Al–4V powders, *powder Technology*, 214 (2011) 194-199.
36. Guzmán J, Moura Nobre R, Nunes E. R, Bayerlein D.L, Falcao R.B, Sallica-leva E, Ferreira-Neto J.B, Rodrigues-Oliveira H, Lira-Chastinet V and Landgraf F.J.G., Laser powder bed fusion parameters to produce high-density Ti-53%Nb alloy using irregularly shaped powder from hydride-dehydride (HDH) process *Journal of materials research and technology*, 2021;10: 1372-1381.
37. Ruan G, Liu C, Qu H, Guo C, Li G, Li X, Zhu Q., A comparative study on laser powder bed fusion of IN718 powders produced by gas atomization and plasma rotating electrode process, *Materials Science and Engineering*: 850, 2022, 143-589.
38. Chen G, Zhao S.Y, Tan P, Wang J, Xiang C.S, Tang H.P, A comparative study of Ti-6Al-4V powders for additive manufacturing by gas atomization, plasma rotating electrode process and plasma atomization, *Powder Technology*, 333, 2018, 38-46.
39. Sehhat M.H, Perez-Palomino D, Wiedemeier C, Cullom T, Newkirk J.W., Characterization of Virgin, Re-used, and Oxygen-reduced Copper Powders processed by the Plasma Spheroidization Process, *Advanced Powder Technology*, 34, 1, 2023, 103-885.



40. Cui W, Yang Y, Di L, Dababneh F., Additive manufacturing-enabled supply chain: Modeling and case studies on local, integrated production-inventory-transportation structure, *Additive Manufacturing*, 48, 2021, 102-471.
41. Afshari H, Searcy C, Jaber M. Y., The role of eco-innovation drivers in promoting additive manufacturing in supply chains, *International Journal of Production Economics*, 223, 2020, 107-538.
42. Emelogu A, Marufuzzaman M, Thompson S.M, Shamsaei N, Bian L., Additive manufacturing of biomedical implants: A feasibility assessment via supply-chain cost analysis, *Additive Manufacturing*, 11, 2016, 97-113.
43. Khajavi S.H, Partanen J, Holmström J, Additive manufacturing in the spare parts supply chain, *Computers in Industry*, 65, 1, 2014, 50-63.
44. Burkhart, M., Aurich, J.C., 2015. Framework to predict the environmental impact of additive manufacturing in the life cycle of a commercial vehicle. *Procedia CIRP* 29, 408-413. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.194>.
45. Goedkoop, M., Spriensma, R., 2000. Eco-indicator 99 Manual for Designers. PReConsult., Amersfoort, Netherlands.
46. Haimes Y, Lasdon L, Wismer D., On a bicriterion formulation of the problems of integrated system identification and system optimization. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1:296-297, 1971.
47. INEGI. 2020. <https://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/discapacidad.aspx>
48. N. Ashammakhi, S. Ahadian, M.A. Darabi, M. El Tahchi, J. Lee, K. Suthiwanich, A. Sheikhi, M.R. Dokmeci, R. Oklu, A.J. Khademhosseini, *Minimally invasive and regenerative therapeutics*, *Adv. Mater.* 31 (1) (2019) 1804041.
49. STATISTA 2022 <https://es.statista.com/estadisticas/575917/tasa-de-crecimiento-de-la-poblacion-en-mexico/>
50. INEGI 2020. Censo de población y vivienda 2020. https://www.inegi.org.mx/app/tabulados/interactivos/?pxq=Discapacidad_Discapacidad_01_29827fe7-b1cd-4bd2-81d6-9d08bda47df8&idrt=151&opc=t
51. SECRETARIA DE ECONOMIA 2020.



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO.
DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA.**



https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/112612/portafolio_proyectos_mineros_1013.pdf

52. A. Brook, D. Kendrick, and A. Meeraus, “GAMS, a User’s Guide,” *SIGNUM Newsl.*, vol. 23, no. 3–4, pp. 10–11, 1988.

53. Singh, V., Dincer, I., Rosen, M.A., 2017. Life Cycle Assessment of Ammonia Production Methods, Exergetic, Energetic and Environmental Dimensions. *Elsevier, CITY*, (2018) p. 935-959. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-813734-5.00053-6>.

54. Morosuk, T., Tsatsaronis, G., K.C, 2016. Environmental impact reduction using exergy-based methods. *J. Clean. Prod.* 118, 118–123.