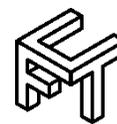




Universidad de Matanzas
Facultad de Ciencias Técnicas



METODOLOGÍA PARA LA OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS DE MANUFACTURA CON ENFOQUE SOSTENIBLE (MOPMES)

Tesis Presentada como Requisito Parcial
para la Obtención del Título de
Máster en Ingeniería Asistida por Computadora

Autor: Ing. Daniel Rivas Ramos

Tutores: Dr.C. Marcelino Rivas Santana

Dr.Cs. Joaquín Aramís García Dihigo

Matanzas, 2019

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD Y NOTA LEGAL

Yo, Daniel Rivas Ramos, declaro que soy el único autor de la siguiente tesis, titulada *METODOLOGÍA PARA LA OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS DE MANUFACTURA CON ENFOQUE SOSTENIBLE (MOPMES)*. y, en virtud de tal, cedo el derecho de copia de la misma a la Universidad de Matanzas, bajo la licencia *Creative Commons* de tipo *Reconocimiento No Comercial Sin Obra Derivada*, con lo cual se permite su copia y distribución por cualquier medio siempre que mantenga el reconocimiento de sus autores, no haga uso comercial de la obra y no realice ninguna modificación de ella.

Matanzas, 25 de febrero de 2019

Daniel Rivas Ramos

RESUMEN

La optimización de los procesos de manufactura puede mejorar significativamente no solo la calidad sino también la productividad, especialmente cuando se lleva a cabo la optimización multiobjetivo, ya que permite un análisis más cercano a la realidad de la producción. En los últimos años se han llevado a cabo diferentes investigaciones para mejorar la sostenibilidad de un producto, enfocándose en los tres aspectos fundamentales: económico, ambiental y social, resultando de gran interés para la industria la fabricación con regímenes óptimos que garanticen la sostenibilidad del producto elaborado. Por tal motivo el objetivo del trabajo es proponer una metodología para la optimización de los procesos de manufactura con enfoque sostenible. La validación se realizó con el proceso de soldadura ecuatorial de los cilindros de gas de 10 kg. El método de Algoritmo Genético de Ordenamiento no Dominado II (NSGA-II) se utilizó como heurística de optimización, obteniéndose la frontera de Pareto con la correspondiente toma de decisión a posteriori según las condiciones específicas del taller.

Palabras claves: Optimización multiobjetivo; Sostenibilidad; Procesos de manufactura

ABSTRACT

The optimization of the manufacturing processes can significantly improve not only the quality but also the productivity, especially when carrying out the multi-objective optimization, since it allows a closer analysis to the reality of the production. In the last years, different researches have been carried out to improve the sustainability of a product, focusing on the three fundamental aspects: economic, environmental and social, being of great interest for the industry, the manufacturing with optimal regimes that guarantee the sustainability of the final product. For this reason, the objective of the paper is to propose a methodology for the optimization of manufacturing processes with a sustainable approach. The validation was carried out with the equatorial welding process of the 10 kg gas cylinders. The method of Genetic Algorithm of Non Dominated Classification II (NSGA-II) was used as an optimization heuristic, obtaining the Pareto border with the corresponding a posteriori decision making according to the specific conditions of the workshop.

Keywords: Multiobjective optimization; Sustainability; Manufacturing processes

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	1
Capitulo I. Análisis de los aspectos fundamentales a tratar en la metodología para la optimización de procesos de manufactura con enfoque sostenible (MOPMES)	4
1.1 Sostenibilidad.....	4
1.2 Indicadores de sostenibilidad.....	8
1.3 Indicador del Instituto Nacional de Normas y Tecnologías (NIST).....	17
1.3.1 Repositorio de indicadores NIST.....	20
1.4 Criterio de selección de indicadores de sostenibilidad	25
1.5 Métodos de optimización. Generalidades	30
1.5.1 Métodos de optimización utilizados en procesos de manufactura.....	31
1.5.2 Algoritmos evolutivos.....	34
1.6 Conclusiones parciales del capítulo	37
Capitulo II. Metodología para la optimización de procesos de manufactura con enfoque sostenible (MOPMES)	38
2.1 Objetivo del método. Campo de empleo.....	38
2.2 Metodología para la optimización de procesos de manufactura con enfoque sostenible (MOPMES).....	38
2.3 Conclusiones parciales del capítulo	46
Una vez finalizado el presente capítulo, se ha podido arribar a las siguientes conclusiones parciales:.....	46
Capítulo III. Caso de estudio	47
3.1 Caso de estudio de soldadura bajo fundente	47

Conclusiones	68
Recomendaciones	69
Referencias Bibliográficas	70
Anexos	80

Introducción

En el reporte del Fórum Mundial de Manufactura (WMF, 2018) se muestra un análisis comparativo del peso que tienen diferentes esferas en la economía (agricultura, minería y construcción, transporte, útiles y comercio, los servicios, el gobierno y la manufactura). Los datos de los Estados Unidos muestran un crecimiento de la manufactura desde el año 1850 hasta 1970, alcanzando cifras de un 27% superada solo por la esfera de los servicios y ligeramente por la esfera del transporte, útiles y comercio. Posteriormente, en el año 2000 ocurrió un decrecimiento de un 16%, debido fundamentalmente al crecimiento en la esfera de los servicios (45%). La mejora de los procesos de manufactura es fundamental para crear economías sólidas que permitan lograr un crecimiento económico positivo capaz de adaptarse y enfrentar nuevos retos. Además de crear empleos estables para trabajadores calificados, la manufactura también desempeña un papel clave en la economía de servicios, los que dependen de los bienes manufacturados para la creación de empleo. Como resultado, la manufactura ayuda a mantener los empleos del sector de servicios que son críticos para ayudar a crecer en todos los aspectos de la economía moderna. La industria manufacturera también sirve como innovadora para la sostenibilidad, jugando papel importante la economía circular, ya que ayuda a promover la desmaterialización en el sector industrial con reutilización (reciclaje) y cero desperdicios de materiales. La tecnología de la información, junto con las prácticas de fabricación avanzadas han ayudado al desarrollo de la economía circular.

Otro aspecto de importancia en la manufactura moderna es la disminución de los niveles de contaminación. Si observamos los datos de la NASA (WMF, 2018) con respecto a la emisión de dióxido de carbono, en el año 2018, se superó la cifra de 405 partes por millón,

siendo los diez países con mayor cantidad de gases de efecto invernadero China, Estados Unidos, Unión Europea, India, Federación Rusa, Indonesia, Brasil, Japón, Canadá y México, alcanzando China, niveles superiores a 10 GtCO_{2e} en el año 2011, según datos del Instituto de Recursos Mundiales (WMF, 2018). El progreso continuo de la industria requiere de un mayor desarrollo, que exige el incremento del progreso, innovación y niveles de vida, por tal motivo la fabricación desempeña un papel clave en el tratamiento de las tendencias sociales e industriales emergentes a través del desarrollo tecnológico y las mejores prácticas, jugando las partes interesadas en la fabricación, un papel importante en ayudar a aumentar la prosperidad social.

De lo mencionado anteriormente se hace evidente la necesidad de procesos de manufactura que utilicen parámetros óptimos que permitan mejorar la sostenibilidad de los productos fabricados. Con relación al tema se han realizado muchos trabajos, pero en todos los casos el enfoque no está dirigido a un análisis de sostenibilidad en sus tres componentes (económico, ambiental y social), ya que las funciones objetivos no se encaminan a este fin. Los resultados muestran que, aunque en algunos casos se analizan aspectos que mejoran la sostenibilidad, como la propuesta de (Vimal, *et al.*, 2017), en ninguna de la bibliografía consultada se parte de los indicadores de sostenibilidad, por lo que ha sido necesario realizar una revisión bibliográfica para proponer una Metodología que permita la optimización de procesos de manufactura con enfoque sostenible (MOPMES), partiendo de los indicadores de sostenibilidad establecidos. La metodología propuesta deberá ser capaz de integrar cualquier proceso de manufactura, lo que hace compleja la situación, ya que existen una gran diversidad de ellos. Para poder llevar a cabo la tarea se realiza el análisis desde el punto de vista de un indicador de sostenibilidad para procesos de

manufactura, siendo las funciones objetivos el impacto económico, social y ambiental, por lo que el problema se convierte en una optimización multiobjetivo. Para llevar a cabo el estudio se proponen los siguientes objetivos:

Objetivo General.

Realizar una Metodología para la optimización de procesos de manufactura con enfoque sostenible (MOPMES).

Objetivos específicos.

- Revisión del estado del arte de los indicadores de sostenibilidad y los métodos de optimización utilizados en procesos de manufactura.
- Análisis de los indicadores de sostenibilidad establecidos.
- Proponer la Metodología para la optimización de procesos de manufactura con enfoque sostenible (MOPMES).
- Resolver un caso de estudio.

CAPITULO I. ANÁLISIS DE LOS ASPECTOS FUNDAMENTALES A TRATAR EN LA METODOLOGÍA PARA LA OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS DE MANUFACTURA CON ENFOQUE SOSTENIBLE (MOPMES)

En este capítulo se analiza el estado del arte, mostrando una revisión de los indicadores de sostenibilidad, criterios para su selección y los métodos de optimización para procesos de manufactura más usados en los últimos cinco años.

1.1 Sostenibilidad

En la actualidad, el concepto de sostenibilidad se ha generalizado y comenzó a surgir en todas partes involucrando a las industrias manufactureras (Aminuddin, *et al.*, 2014). El concepto de fabricación sostenible surgió en la fabricación debido a su práctica actual, que se considera responsable como una de las principales causas de la privación ambiental actual (Rosen y Kishawy, 2012). La sostenibilidad es definida por Naciones Unidas como: "el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades" y se clasifica en tres pilares interdependientes, pero que se apoyan mutuamente, en aspectos económicos, ambientales y sociales. Por otro lado, la interpretación de la fabricación sostenible del Departamento de Comercio de los Estados Unidos es: "la creación de productos manufacturados que utilizan materiales y procesos que minimizan los impactos ambientales negativos, conservan la energía y los recursos naturales, son seguros para los empleados, las comunidades y los consumidores y son económicamente robustos".

La fabricación sostenible es el paradigma de fabricación más compleja y desafiante en comparación con el paradigma de fabricación en serie anterior; manufactura esbelta y

manufactura ecológica, etc. (Rosen y Kishawy, 2012). El pensamiento sostenible insistió en que la práctica de manufactura beneficiara los elementos de aspecto económico, ambiental y social de manera equilibrada, antes de este paradigma relativamente nuevo, los académicos y profesionales de la industria buscan el desarrollo de indicadores de rendimiento de fabricación sostenible para monitorear el progreso real de la práctica, sin embargo, se afirma que la tarea de encontrar un equilibrio perfecto en términos de beneficios es vaga, confusa y tediosa, por lo que se convierte en un desafío el desarrollo de indicadores de rendimiento de fabricación sostenible robustos (Parris y Kates, 2003), (Krajnc y Glavi 2003), (Fan, *et al.*, 2010) y (Amrina y Yusof, 2011).

La sostenibilidad es un proceso socio-ecológico caracterizado por un comportamiento en busca de un ideal común, es un término ligado a la acción del hombre en relación a su entorno, se refiere al equilibrio que existe en una especie basándose en su entorno y todos los factores o recursos que tiene para hacer posible el funcionamiento de todas sus partes, sin necesidad de dañar o sacrificar las capacidades de otro entorno.

La puesta en práctica del desarrollo sostenible tiene como fundamento ciertos valores y principios éticos. La Carta de la Tierra presenta una articulación comprensiva e integral de los valores y principios relacionados a la sostenibilidad. Este documento, el cual es una declaración de la ética global para un mundo sostenible, fue desarrollado a partir de un proceso altamente participativo global, por un período de 10 años, iniciado en la Cumbre de Río 92, y el cual culminó en el año 2000. La legitimidad de la Carta de la Tierra proviene precisamente del proceso participativo el cual fue creado, ya que miles de personas y organizaciones de todo el mundo brindaron su aporte para encontrar esos valores y principios compartidos, que pueden ayudar a las sociedades a ser sostenibles.

La sostenibilidad se estudia y maneja a varios niveles de tiempo y espacio y en muchos contextos de organización económica, cultural, social y ambiental. Se enfoca desde la sostenibilidad total del planeta a la sostenibilidad de sectores económicos, países, municipios, barrios, casas individuales; bienes y servicios, ocupaciones, estilos de vida, etc. En resumen, puede incluir el total de las actividades humanas y biológicas o partes especializadas de ellas. Los tipos de sostenibilidad se muestran en la figura 1.1.

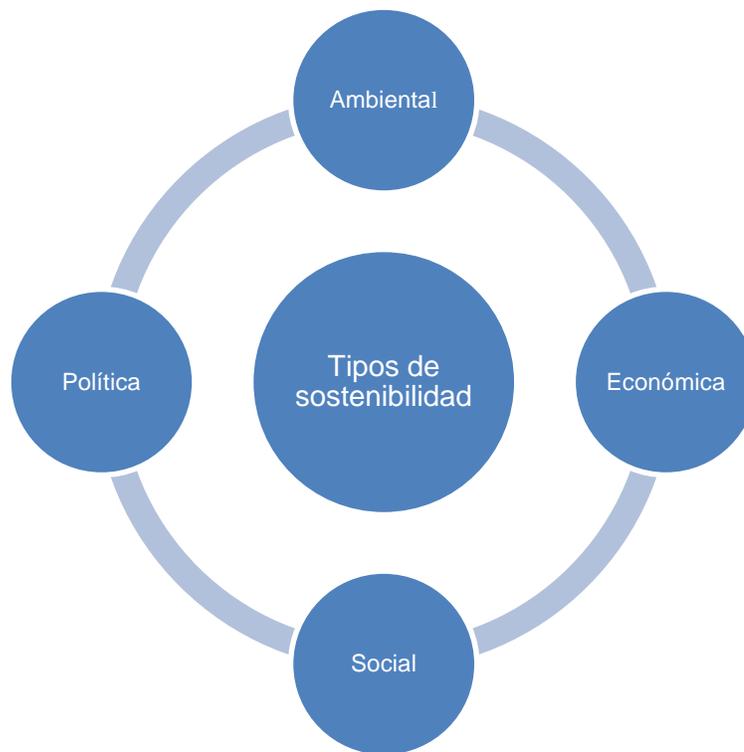


Figura 1.1 Tipos de sostenibilidad

1. Sostenibilidad Ambiental. Se refiere a la capacidad de poder mantener los aspectos biológicos en su productividad y diversidad a lo largo del tiempo, y de esta manera ocupándose por la preservación de los recursos naturales a fomentar una

responsabilidad consciente sobre lo ecológico y al mismo tiempo crecer en el desarrollo humano cuidando el ambiente donde vive.

2. **Sostenibilidad Económica.** Se refiere a la capacidad de generar riqueza en forma de cantidades adecuadas, equitativas en distintos ámbitos sociales que sea una población capaz y solvente de sus problemas económicos, tanto como fortalecer la producción y consumo en sectores de producción monetaria, en pocas palabras es un equilibrio entre el hombre y la naturaleza para satisfacer las necesidades y no sacrificar generaciones futuras.
3. **Sostenibilidad Política.** Se refiere a redistribuir el poder político y económico, que existan reglas congruentes en el país, un gobierno seguro y establecer un marco jurídico que garantice el respeto a las personas y el ambiente fomentando relaciones solidarias entre comunidades y regiones para mejorar su calidad de vida y reducir la dependencia de las comunidades generando estructuras democráticas.
4. **Sostenibilidad Social.** Se refiere a adoptar valores que generen comportamientos como el valor de la naturaleza, principalmente mantener niveles armónicos y satisfactorios de educación, capacitación y concientización ya que así apoyas a la población de un país a superarse, se refiere a mantener un buen nivel de vida en la población de un país, en los aspectos sociales ya sea el enrolamiento de las mismas personas para crear algo nuevo en la sociedad donde forman parte.

1.2 Indicadores de sostenibilidad

La literatura consultada reporta diferentes investigaciones realizadas sobre indicadores de sostenibilidad. Los trabajos de (Aminuddin, *et al.*, 2014) se basan en la guía más reciente del Global Reporting Initiative (GRI), (Guía de informes de sostenibilidad G4), justificando que:

- GRI es una organización pionera y bien conocida en el campo de la sostenibilidad.
- GRI promueve el uso de informes de sostenibilidad que se utilizan ampliamente en todo el mundo como una forma para que las organizaciones contribuyan al desarrollo sostenible. Proporciona métricas y métodos para medir e informar los impactos y el rendimiento relacionados con la sostenibilidad.
- G4 se está preparando para ser una norma completa en comparación con los otros indicadores. Esto significa que G4 se pudiera aplicar a todo tipo de compañías y organizaciones.
- G4 logró construir más indicadores sociales que los propuestos en (Fan, *et al.*, 2010), los que se consideraron insuficientes y vagos en el contexto de la manufactura sostenible.

El estudio designa la mejor combinación de criterios estratégicos y de control utilizados a partir de las pautas de informes de sostenibilidad G4 formando un sólido indicador de rendimiento sostenible para la industria de fabricación a través de la utilización del proceso de red analítica (ANP), el cual permite la interdependencia entre los criterios considerados, siendo más aplicable a un problema de decisión del mundo real (Saaty, 2010).

Desde el punto de vista de la sostenibilidad, los elementos complejos y no estructurados que intervienen en los tres paradigmas originalmente separados se pueden generalizar con la aplicación de este método. Los criterios económicos, ambientales y sociales de la Guía de Informes de Sustentabilidad G4 se utilizan como criterios de control. La fabricación se construye como alternativas para los criterios respectivos. A partir de la respuesta de los expertos se determina la clasificación local y la clasificación global de los criterios de sostenibilidad para la dimensión económica, ambiental y social.

En (Joung, *et al.*, 2012) y (Feng y Joung, 2011), se realiza un análisis de varios indicadores de sostenibilidad y métricas, los cuales se explican a continuación.

Global Report Initiative (GRI). Es una iniciativa voluntaria de informes de sostenibilidad para las organizaciones. Consta de 70 indicadores que se identifican dentro de las tres dimensiones principales de la sostenibilidad: economía, medio ambiente y sociedad. Al informar, una organización registraría e informaría los números reales de los indicadores individuales elegidos. Utilizando el informe, se puede analizar y rastrear el desempeño de la sostenibilidad de la organización de acuerdo con el GRI o las entidades internas. El propósito de estos informes es la evaluación y el seguimiento para la toma de decisiones en múltiples niveles de la organización, incluidos: administración, operaciones y partes interesadas internas o externas (GRI, 2006).

Índices de sostenibilidad de Dow Jones (DJSI). Evalúa el desempeño financiero y de sostenibilidad del 10% superior de las compañías en el Índice global de mercado de valores de Dow Jones. Los resultados del índice se utilizan como criterios para inversionistas. El análisis realizado por los medios de comunicación y las partes interesadas junto con un

cuestionario para la organización, constituye la base del índice. El índice evalúa el desempeño de una compañía en 12 criterios, que cubren principalmente la dimensión económica, pero también incluye algunos aspectos de las dimensiones ambientales y sociales (SAM Index, 2007).

Indicadores de sostenibilidad ambiental (ESI) de 2005. Fue desarrollado por el Centro de Derecho y Política Ambientales de Yale para medir y evaluar la gestión ambiental por regiones y países. El ESI es un índice de valor único que es un agregado de seis categorías de políticas y 21 factores centrales que consta de 68 indicadores. Un valor de ESI para un país es el promedio de 68 indicadores dentro de los 21 factores (ESI, 2005).

Índice de desempeño ambiental (EPfI). Desarrollado en la Universidad de Yale, complementa el ESI al evaluar el desempeño de las políticas de los países para reducir las tensiones ambientales en la salud humana, mejorar la vitalidad del ecosistema y mantener la gestión de los recursos naturales. El foco de la EPfI está en sus 19 indicadores para los cuales se miden estas tensiones ambientales (EPfI, 2010).

Indicadores de las Naciones Unidas para el Desarrollo Sostenible (UN-CSD). Desarrollado por la Comisión de las Naciones Unidas para el Desarrollo Sostenible (CSD) evalúa el grado de desarrollo sostenible de un país o región. La última versión de UN-CSD se finalizó en 2006 y contiene 96 indicadores. Los indicadores están categorizados por 14 temas que tienen en cuenta la salud económica, social y ambiental de los países en desarrollo (UN-CSD, 2007).

Indicadores ambientales fundamentales (CEI) de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE): Se diseñó para monitorear las condiciones ambientales

para el desarrollo sostenible de los países miembros. El CEI de la OCDE incluye 46 indicadores, que abordan una variedad de temas ambientales, sociales y económicos (OECD CEI, 2003).

Índice de sostenibilidad de productos de Ford (Ford PSI). Considera indicadores sostenibles dentro de las dimensiones ambientales, económicas y sociales que son específicamente relevantes para la fabricación y los servicios de automóviles. Debido a la especialización, el PSI de Ford tiene ocho indicadores: capacidad de movilidad, costo del ciclo de vida, impacto en el calentamiento global del ciclo de vida, calidad del aire en el ciclo de vida, materiales sostenibles, sustancias restringidas, seguridad y ruido (Schmidt y Taylor, 2006). Estándar de la Evaluación de Desempeño Ambiental (EPE) de la Organización Internacional de Normalización (ISO 14031). Es una norma internacional que contiene especificaciones para que las organizaciones desarrollen sus propios indicadores para la medición del desempeño ambiental. En el anexo informativo de la norma, tres categorías son relevantes para la fabricación: (1) desempeño operativo, (2) desempeño de la administración y (3) condición ambiental (ISO, 1999).

Indicadores de presión ambiental para la Unión Europea (EPrI). Es una lista completa de indicadores de las actividades humanas más importantes que tienen un impacto negativo en el medio ambiente. El EPrI contiene 60 indicadores que resumen la presión de las actividades humanas sobre el medio ambiente en 10 campos de políticas, incluida la contaminación del aire, el cambio climático, la pérdida de biodiversidad, los entornos marinos y costeros, el agotamiento de la capa de ozono, el agotamiento de los recursos, los problemas ambientales urbanos, los residuos y el agua. Contaminación y recursos hídricos (EPrI, 1999).

Instituto Nacional de Política de Ciencia y Tecnología de Japón (NISTEP). Contiene indicadores que cubren el avance tecnológico debido a las contribuciones y el nivel de habilidad del personal de una organización dada a través de la educación, las patentes importadas o exportadas y las publicaciones científicas (Japan Science and Technology Agency, 1995).

Conjunto de indicadores básicos de la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA-CSI). El objetivo es proporcionar un conjunto de indicadores manejables para la presentación de informes. Las mediciones basadas en el EEA-CSI proporcionan un medio para priorizar las mejoras ambientales para los países de la UE (EEA-CSI, 2005).

Las métricas de General Motors para la fabricación sostenible (Dreher, *et al.*, 2009) fueron desarrolladas por un proyecto de General Motors (GM) que revisó el estado del arte de las métricas para la fabricación sostenible. El objetivo del proyecto era determinar qué métricas para la fabricación sostenible deberían recomendarse. Basándose en el trabajo del proyecto, GM recomendó más de 30 métricas en seis categorías principales: impacto ambiental, consumo de energía, salud personal, seguridad laboral, gestión de residuos y costos de fabricación. Para una mejora de la fabricación sostenible, GM compara el rendimiento métrico actual con el de los líderes de la industria y ajusta su organización en consecuencia.

Índice de productos sostenibles de Wal-mart (Wal-mart SPI, 2009). El índice de productos sostenibles de Wal-mart aún se está desarrollando. La intención del índice es proporcionar a los proveedores de Wal-Mart y a Wal-Mart un índice de productos sostenibles en todo el mundo. El desarrollo actual del índice se ha centrado en una encuesta de 15 preguntas a

proveedores que enfatiza los problemas ambientales con la producción. La compañía espera ayudar a los clientes a tomar decisiones de compra y alentar a los proveedores a cumplir con los requisitos de sostenibilidad.

Conjunto de indicadores Eco-indicador 99 (Consultants, 2004). El Eco-Indicador 99 es una metodología orientada hacia el daño, es un método de ponderación de evaluación del ciclo de vida (LCA) especialmente desarrollado para el diseño de productos. Un indicador de daño de valor único se deriva del enfoque algorítmico del sistema Eco-Indicador 99 y representa tres daños principales: recursos minerales y fósiles, calidad del ecosistema y salud humana. El Eco-Indicador 99 ha sido una herramienta utilizada por los ingenieros en el diseño de productos ambientalmente sostenibles. Un resumen del análisis realizado se muestra en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Indicadores de sostenibilidad

<i>No</i>	<i>Indicador</i>	<i>Indicadores</i>	<i>Tipo</i>	<i>Propósito</i>
1	Global Report Initiative (GRI).	70	Indicadores individuales	Evaluación y toma de decisiones a diferentes niveles
2	Dow Jones Sustainability Indexs (DJSI).	12 criterios	Indicadores compuestos	Índice para las empresas de inversión.
3	2005 Environmental Sustainability Indicators (ESI)	68 indicadores con 21 factores	Indicadores compuestos	Medidor de la gestión ambiental nacional.
4	Environment Performance Index (EPFI).	19	Indicadores compuestos	Índice nacional. Protección del medio ambiente.

5	United Nations- Indicators of sustainable Development (UN-CSD)	96	Indicadores individuales	Indicadores de desarrollo sostenible nacional
6	Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD)	46	Indicadores individuales	Indicador nacional Desempeño de políticas ambientales hacia el desarrollo sostenible
7	Ford Product Sustainability Index (Ford PSI)	8	Índices compuestos	Fundamentalmente para la industria del automóvil Índice de sostenibilidad de productos basado en ACV.
8	International Organization for Standardization (ISO 14031)	155	Indicadores individuales.	Orientación sobre el diseño y uso de la evaluación del desempeño ambiental dentro de una organización.
9	Environmental Pressure Indicators for European Union (EPrI)	60	Indicadores individuales	Es una lista de indicadores de las actividades humanas más importantes que tienen un impacto negativo sobre el medio ambiente.
10	Japan National Institute of Science and Technology Policy (NIS-TEP)	-	Indicadores individuales	Avance tecnológico debido a las contribuciones y el nivel de habilidad del personal de una organización dada a través de la educación, las patentes importadas o exportadas y las publicaciones científicas

11	European Environmental Agency Core Set of Indicators (EEA-CSI)	-	Indicadores individuales	Proporcionan un medio para priorizar las mejoras ambientales para los países de la Unión Europea
12	Métricas de GM para la fabricación sostenible	30 métricas	indicadores individuales	Utiliza métricas de fabricación sostenible (GM).
13	Índice de productos sostenibles de Wal-Mart	15 preguntas	indicadores individuales	Índice de producto sostenible para proveedores
14	Indicadores ecológicos 99	-	índices compuestos	Evaluación del impacto del ciclo de vida de un producto

El repositorio de indicadores de fabricación sostenible contiene 14 conjuntos de indicadores que pueden aplicarse al entorno de fabricación. A pesar de eso, no todos estos indicadores están hechos exactamente para la conformidad de la fabricación. De estos 14 indicadores, solo el índice de sostenibilidad de productos de Ford y las métricas de GM para la fabricación sostenible cumplen con los requisitos de fabricación. Además, los Indicadores de Desempeño Ambiental de 2005 y 2006, ISO 1403, Indicadores Ambientales para la Unión Europea y Eco-Indicadores 1999 solo se centran en el pilar ambiental de la sostenibilidad, que no es suficiente para abordar los conceptos de sostenibilidad de manera integral. Además, otros indicadores generales de sostenibilidad, aunque completos, pueden no estar encaminados a la fabricación.

Los conjuntos e índices revisados proporcionan agregaciones simples a través de la consideración punto por punto de los indicadores. La aplicación de un conjunto de indicadores o índices varía desde una evaluación a nivel organizacional hasta una evaluación a nivel nacional o regional. Muchos conjuntos e índices se centran en el desarrollo sostenible de una región o país, como ESI, EPfI, EPrI, EEA-CSI, OECD, DJSI, ISO 14031 y UN-CSD, mencionados anteriormente. Un índice que se centra más en el proceso o nivel de producto para la fabricación sostenible es el propuesto por Ford PSI. Un grupo de índices se centran, principalmente, en la capacidad tecnológica corporativa (NISTEP). El kit de herramientas de la OCDE publicado en (OECD Toolkit, 2011) proporciona 18 indicadores sobre la fabricación en insumos (material y su contenido), operación (energía, agua y emisiones) y productos (impacto ambiental). Sin embargo, todavía existen limitaciones en cuanto a criterios. Esta limitación establece la necesidad de criterios y definiciones estándar para los indicadores. Los indicadores estándar proporcionarán un medio confiable y repetible para los fabricantes cuando evalúen su nivel de sostenibilidad y permitan comparaciones entre productos, procesos, empresas, sectores o países. Sobre la base de los aspectos mencionados anteriormente en (Joung, *et al.*, 2012) se define y categorizan indicadores que pueden ser utilizados por los ingenieros en la fábrica para evaluar la sostenibilidad de sus procesos de fabricación y productos manufacturados denominado Indicador NIST.

1.3 Indicador del Instituto Nacional de Normas y Tecnologías (NIST)

El indicador NIST fue desarrollado específicamente para procesos de manufactura, la clasificación se basa en cinco dimensiones de sostenibilidad: administración ambiental, crecimiento económico, bienestar social, avance tecnológico y gestión del desempeño. La gestión ambiental cubre los impactos ambientales de las emisiones, el uso de los recursos y el deterioro del ecosistema de los procesos y productos de fabricación. La dimensión del crecimiento económico enfatiza los costos, las ganancias y los beneficios acumulados junto con las inversiones realizadas por la organización manufacturera. El bienestar social (Mihelcic, *et al.*, 2003); (Labuschagne, *et al.*, 2005) considera los impactos en los empleados, los clientes y la comunidad a partir de programas de salud y seguridad, evaluaciones de satisfacción y desarrollo profesional - educativo. El avance tecnológico explica la capacidad de un fabricante para promover el avance tecnológico a través de la dotación de personal en I + D, los gastos y los productos de alta tecnología. La gestión del rendimiento se refiere al despliegue de políticas y programas de sostenibilidad y al cumplimiento de las regulaciones. La colocación de los indicadores de los diversos conjuntos se realizó de acuerdo con el significado y la relevancia del indicador dado en base a una definición neutral. Con la selección, el desarrollo y la colocación de indicadores en la estructura de categorización, el resultado de la categorización muestra una extensa colección de indicadores que satisfacen el concepto general de fabricación sostenible. A continuación, se muestran las tres primeras dimensiones por ser la de mayor interés en el caso estudiado, ver figura 1.2, (a, b, c y d) (Joung, *et al.*, 2012).

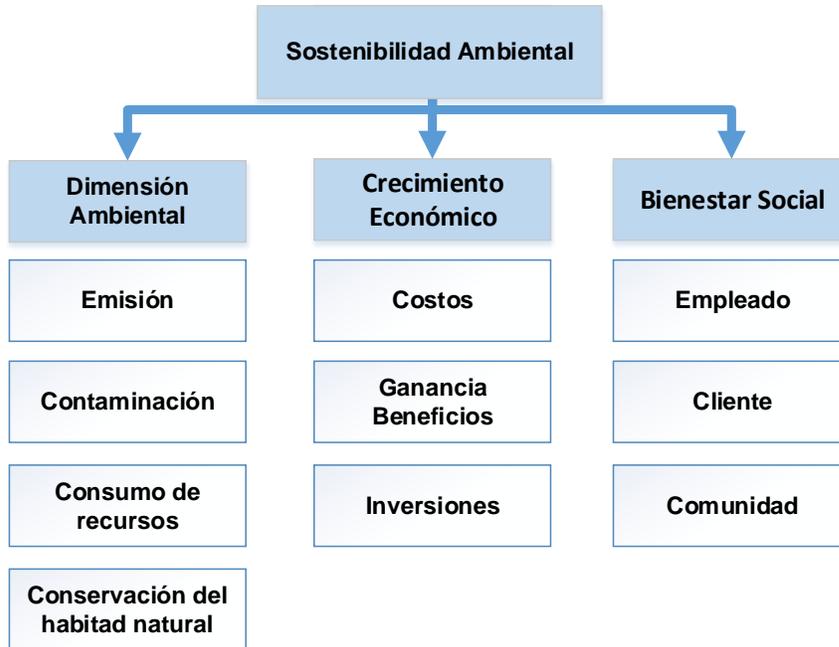


Figura 1.2 (a) Indicador de sostenibilidad NIST

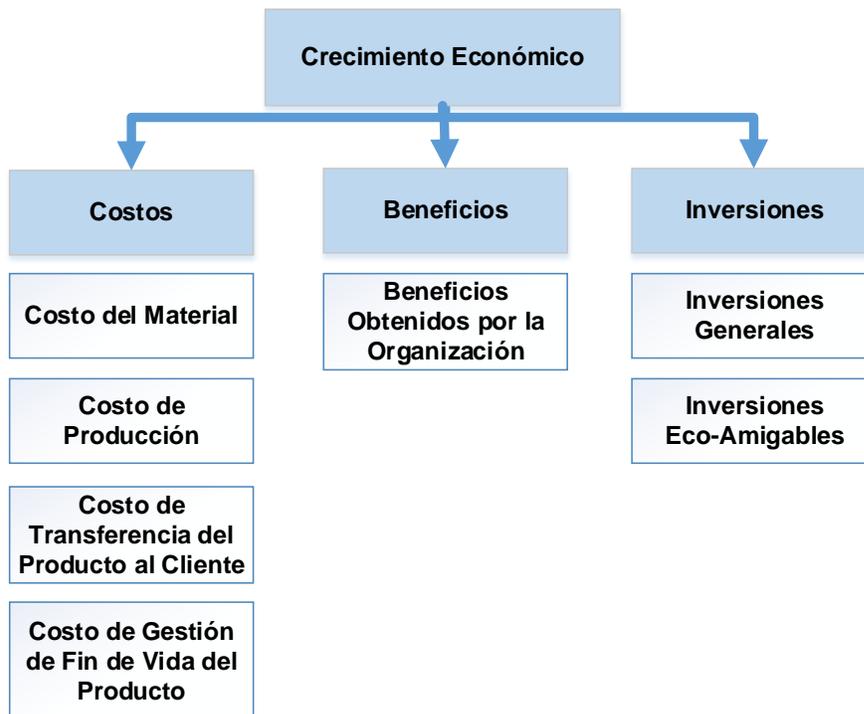


Figura 1.2 (b). Indicador de crecimiento económico

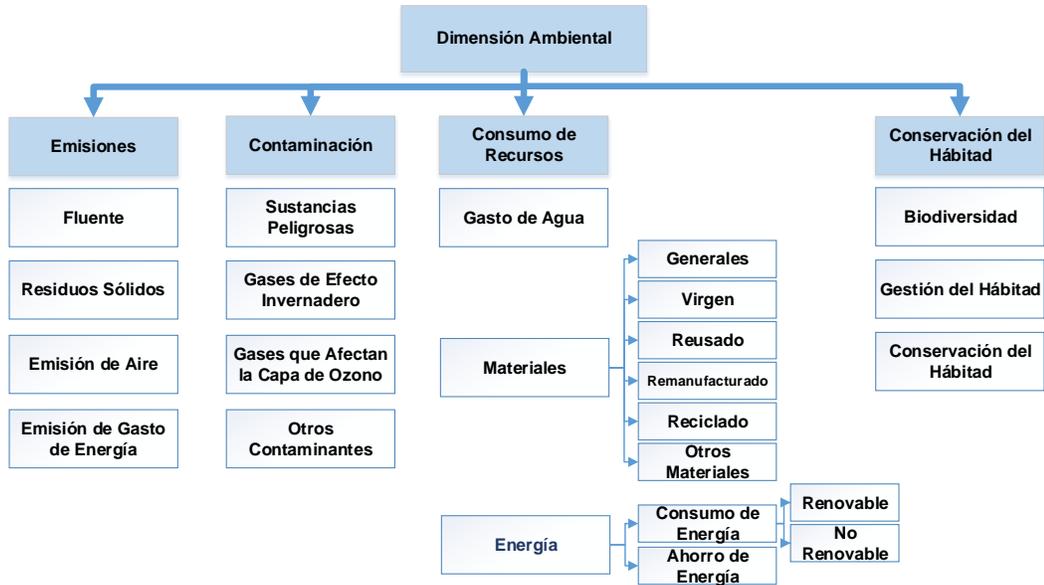


Figura 1.2(c). Indicador ambiental

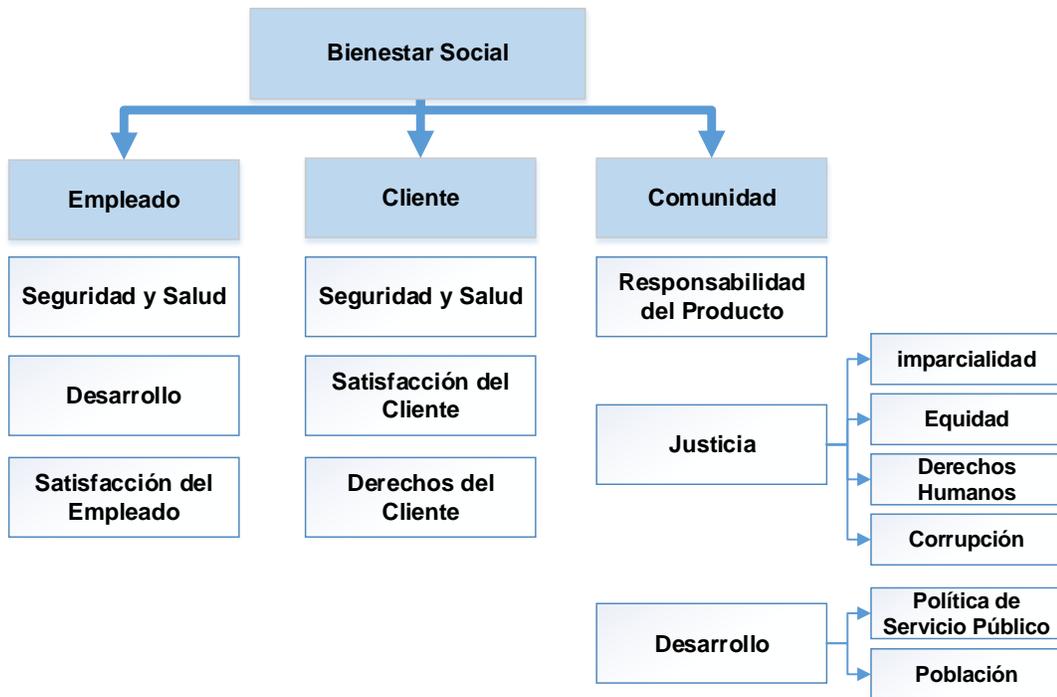


Figura 1.2 (d). Indicador social

1.3.1 Repositorio de indicadores NIST

El Repositorio de Indicadores de Manufactura Sostenible (SMIR, 2011) de NIST se pueden encontrar más detalles, así como los indicadores propuestos. El número total de indicadores incluidos en el SMIR es 212, de los cuales, 77 indicadores pertenecen a la dimensión de gestión ambiental, 23 a la dimensión de crecimiento económico, 70 a la dimensión de bienestar social, 30 a la gestión del desempeño y 12 a la gestión del avance tecnológico. Cada dimensión se categoriza y describe a continuación.

Subcategorización

El número de indicadores en cada categoría o subcategoría principal indica el tamaño de esa categoría o subcategoría. El tamaño de cada subcategoría se divide por el número total de indicadores en el SMIR y el número de indicadores en la subcategoría principal a la que pertenece la subcategoría.

Indicadores de gestión ambiental.

Para la gestión ambiental, se clasificó una amplia gama de indicadores según el impacto de las emisiones, el consumo de recursos, las contaminaciones y la conservación del hábitat natural. Las emisiones se clasifican de la siguiente manera: efluente, emisión de residuos sólidos, emisión de aire y emisión de energía residual. Los indicadores en la subcategoría de emisión se miden sobre la base de lo que una organización o proceso libera durante la producción, junto con la descarga de un producto o servicio durante su ciclo de vida. El consumo de recursos se clasifica de la siguiente manera: uso del agua, uso de materiales, uso de energía y uso de la tierra para una organización o proceso. La subcategoría de

consumo de material incluye indicadores de consumo de material total, consumo de material virgen, consumo de material reciclado, materiales reutilizados, materiales re manufacturados y otros consumos de material. La subcategoría de consumo de energía incluye indicadores de consumo total de energía y ahorro de energía. La contaminación se clasifica de la siguiente manera: sustancias peligrosas, gases de efecto invernadero (GEI), gases que afectan la capa de ozono y otros contaminantes que son perjudiciales para el medio ambiente. La conservación del hábitat natural se clasifica de la siguiente manera: biodiversidad, manejo del hábitat y conservación. Esta subcategoría es necesaria para reflejar los efectos sobre la flora y la fauna junto con el hábitat en el que viven.

Indicadores de crecimiento económico

Los indicadores de crecimiento económico miden las ganancias, los costos y las inversiones de una organización. Los indicadores de ganancias se utilizan para medir la ganancia obtenida por la organización. Los indicadores de costos se utilizan para medir los costos de fabricación, incluida la adquisición de materiales, la producción, la transferencia de productos al cliente y el manejo de productos al final de la vida útil. Estos indicadores se establecen a partir de datos de varios fabricantes a través de la contabilidad financiera básica y los costos del ciclo de vida. Los indicadores de inversión se utilizan para calcular los impactos de las inversiones generales y las inversiones ecológicas, que colectivamente miden la salud económica de una organización. Las inversiones y la gestión de inversiones son aspectos claves del crecimiento económico. Las inversiones establecen el crecimiento de un producto o empresa y la sostenibilidad de una organización. Dentro del aspecto de las inversiones, las generales promueven el crecimiento financiero y social de la

organización y se incluyen junto con las inversiones que son respetuosas con el medio ambiente.

Indicadores de bienestar social

Los indicadores de bienestar social miden el impacto social de los procesos de fabricación y los productos manufacturados a través de las prácticas generales de salud y seguridad, la gestión del desarrollo y los derechos humanos de una organización. La estructura de la dimensión de bienestar social muestra tres aspectos básicos: los empleados, los clientes y la comunidad circundante, los cuales se ven afectados directa e indirectamente por las acciones de una organización, la consideración de estos aspectos es importante para garantizar operaciones socialmente sostenibles. Los indicadores de empleados cubren la salud y seguridad, su desarrollo profesional y la satisfacción dentro de una organización. Los indicadores dentro del aspecto del empleado son necesarios para la fabricación sostenible debido a cuestiones de derechos humanos, pero también la relación cercana entre el empleado y la calidad del producto. Los indicadores del cliente cubren los impactos en la salud, seguridad y el uso del producto, la satisfacción del cliente de las operaciones y los productos, y la inclusión de derechos específicos para los clientes. La subcategoría de clientes contiene indicadores que reflejan la capacidad de la organización para cumplir o superar las demandas y los deseos de los clientes. Los indicadores de satisfacción del cliente son esenciales para medir la satisfacción y el bienestar del cliente, ya que son factores dominantes para la existencia de una organización. Los indicadores comunitarios están directamente relacionados con las acciones de una organización. Las subcategorías son programas de responsabilidad del producto, justicia y desarrollo comunitario. La equidad, los derechos humanos y la corrupción están todos incluidos dentro del aspecto de

justicia de la dimensión del bienestar social. Las medidas comunitarias están relacionadas con el bienestar de la organización a través de una relación sana con su comunidad.

En (Sarkar, 2011) se propone en el trabajo: “Indicadores de rendimiento de sostenibilidad” que después de definir los temas para cada dimensión y los criterios generales para los indicadores, se requiere definir y restringir el concepto a una serie de indicadores clave de desempeño que cumplan con todos los criterios y puedan medirse, monitorearse y registrarse de manera regular. En la literatura se puede encontrar una amplia gama de posibles indicadores de desempeño de sostenibilidad, como fue analizado anteriormente, sin embargo, todos los indicadores no son relevantes para la industria y pueden evaluarse desde una perspectiva externa. Por lo tanto, se deben identificar los indicadores clave adecuados, se incluyen conjuntos adicionales de indicadores encontrados en la literatura que se centran en la fabricación sostenible: (Krajnc y Glavic, 2005), y (Veleva y Ellenbecker, 2001). Luego, estos indicadores se prueban y comparan con los informes de sostenibilidad publicados por diferentes compañías para garantizar la disponibilidad de datos para el uso externo de la herramienta. Estos informes son publicados anualmente por las compañías para informar sus cifras y objetivos en términos de sostenibilidad. En general, el estudio pretende utilizar solo indicadores cuantitativos, ya que son más objetivos y menos sesgados que los cualitativos. También debería ser posible expresar cada indicador en términos relativos y no solo en términos absolutos, ya que las diferentes empresas de fabricación deben compararse en un nivel significativo. Los indicadores sociales, por ejemplo, deben expresarse en relación con el tamaño de la fuerza laboral y los indicadores ambientales en relación con una medida adecuada de producción, como las unidades producidas o una indicación del peso producido. En (Madanchi, *et al.*, 2019) se

propone Los indicadores clave de sostenibilidad identificados junto con sus dimensiones, temas y unidades, los cuales se muestran en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2 Indicadores clave de desempeño de la sostenibilidad de la fábrica

<i>Dimensión</i>	<i>Tema</i>	<i>Indicador</i>	<i>Unidad</i>
<i>Medio ambiente</i>	(a) Recursos naturales y activos	Uso de energía	[MWh]
		Material usado	[kg]
		Consumo de agua	[m ³]
		Generación de residuos	[kg]
	(b) Contaminación	Potencial de calentamiento global	[t CO ₂ -eq]
		Potencial de acidificación	[t SO ₂ -eq]
<i>Social</i>	(c) Salud y seguridad	Accidentes de trabajo	[-]
		Entrenamiento de seguridad	[-]
		Materiales peligrosos	[kg]
	(d) Desarrollo laboral y satisfacción laboral	Formación y educación	[h]
		Días de frecuencia de la enfermedad	[días]
		Tasa de deserción de empleados	[%]
	(e) Igualdad de oportunidades y trabajo decente	Proporción de mujeres en la fuerza laboral	[%]
		Proporción de mujeres en cargos directivos	[%]
		Los salarios en el grupo de salarios más bajos	[\$]
<i>Económico</i>	(f) Finanzas	Margen de utilidad neta	[%]

		Retorno de capital empleado	[%]
	(g) Desarrollo	Inversión en I + D	[\$]
		Inversión en desarrollo de personal	[\$]
		Gastos en cumplimiento de EHS	[\$]

1.4 Criterio de selección de indicadores de sostenibilidad

Según (Wolf, *et al.*, 2015), los criterios para la selección de un indicador de sostenibilidad son:

- Robustez. Debe ser científicamente defendible. Sus cálculos deben ser reproducibles con suficiente precisión.
- Relevancia. Debe ayudar en la medición del progreso hacia un objetivo.
- Efectividad.
- Claro y fácil de medir. Debe ser medido con un esfuerzo aceptable.
- Práctico. Debe ser aplicado con costo aceptable y tiempo de duración.

(Wolf, *et al.*, 2015) muestra un método para la selección de indicadores de sostenibilidad denominado “Método de juicio ABC”, el cual es un método semi-cuantitativo para priorizar el uso de indicadores a partir del juicio de los expertos. Para la selección de los expertos se utiliza la determinación del coeficiente de experticia (Orozco, 2005), para lo cual se realizan los siguientes pasos:

- Se aplica la determinación del Coeficiente K .

$$K = 0,5(K_c + K_a) \quad (1)$$

Donde:

K - Coeficiente de competencia

K_c - Autovaloración sobre su nivel de conocimiento sobre el tema.

K_a - Coeficiente de Argumentación

- Determinación de K_c
- Existen diferentes tipos de escalas. Será utiliza la escala de 0 a 10, donde el candidato a experto marca su propia autoevaluación.
- Evalúa en la siguiente escala el criterio que el candidato tiene sobre su nivel de conocimiento sobre la temática abordada. Pondera con el mayor valor el nivel más elevado de conocimiento y viceversa.



- El valor marcado por el experto se divide entre 0,1
- Determinación del grado de influencia que ha tenido sobre su conocimiento acerca del tema, ver Tabla 1.3. En caso que no haya tenido influencia marque bajo.
- Sí $0,8 < K < 1$; entonces, el coeficiente de competencia es alto.
- Sí $0,5 < K < 0,8$: coeficiente de competencia medio
- Sí $K < 0,5$: coeficiente de competencia bajo

Tabla 1.3 Determinación de grado de influencia

<i>Fuentes de argumentación</i>	<i>Grado de influencia</i>		
	Alto	Medio	Bajo
<i>Análisis técnicos realizados por usted sobre el proceso analizado</i>	0,4	0,3	0,2
<i>La experiencia adquirida sobre el proceso tratado</i>	0,5	0,4	0,2
<i>Trabajos de autores nacionales</i>	0,025	0,024	0,022
<i>Trabajos de autores extranjeros</i>	0,025	0,024	0,022
<i>Su intuición</i>	0,025	0,024	0,022

Finalmente se seleccionan los que mayor valor de K obtengan, debiendo tener un mínimo de siete expertos.

El método de juicio ABC se fundamenta en la realización de preguntas a las cuales se les da un peso determinado. Consta de los siguientes pasos:

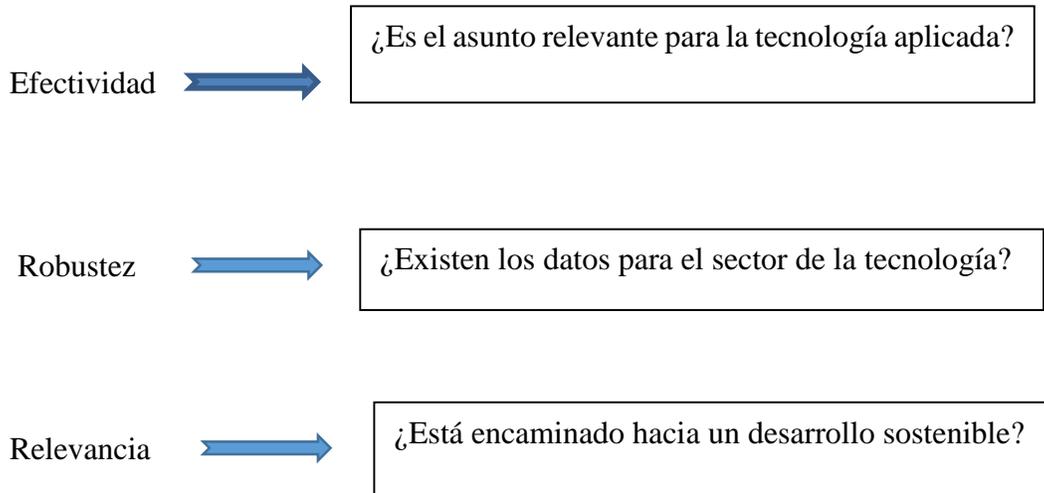
1. Selección de criterios a preguntar.
2. Preparación de las preguntas.
3. Entrevistas con los expertos.
4. Priorizar las categorías de impacto.

Existen dos formas de realizar el método:

1. “Top Down”. De arriba hacia abajo (TD).

2. “Bottom up”. De abajo hacia arriba (BU).

Las preguntas a realizar a los expertos dependen precisamente de los criterios que se deben tener en cuenta para que pueda ser un indicador. A continuación, se muestran ejemplos de preguntas a realizar y su relación con los criterios.



Para la evaluación se usarán tres niveles A, B y C, (máximo, medio y bajo), donde A=3, B=2 y C=1. La escala de orden del sorteo se puede apreciar en la Tabla 1.4.

Los pesos se establecen entre valores de 1 – 0, siendo los de mayor importancia los valores entre 1 y 0.83, correspondiente al orden I y II, aunque no deben ser menospreciados los demás. Los pesos para el orden del sorteo se muestran en la Tabla 1.5. La selección se realizará en una reunión grupal con todos los expertos, donde se llenarán las tablas y con los resultados de los expertos se buscará el consenso por votación.

Este método puede ser utilizado para seleccionar los sub-indicadores extraídos de la tabla de inventario y dar un orden en la selección para integrar los tres indicadores (económico, social y medio ambiental) utilizados para el proceso de optimización. Para el análisis de los pesos de cada indicador y sub-indicador utilizados en la construcción de las funciones.

Tabla 1.4 Escalas de orden para el sorteo

<i>Orden</i>	<i>Escalas de orden para el sorteo</i>
<i>I</i>	AAA
<i>II</i>	AAB ABA BAA
<i>III</i>	AAC ACA CAA
<i>IV</i>	ABB BAB BBA
<i>V</i>	ABC ACB BAC BCA CAB CBA
<i>VI</i>	ACC CAC CCA
<i>VII</i>	BBB
<i>VIII</i>	BBC BCB CBB
<i>IX</i>	BCC CBC CCB
<i>X</i>	CCC

Tabla 1.5 Pesos para el orden del sorteo

<i>Peso</i>	<i>Peso para el orden del sorteo</i>
<i>1</i>	AAA

0.83	AAB ABA BAA
0.67	AAC ACA CAA ABB BAB BBA
0.5	ABC ACB BAC BCA CAB CBA BBB
0.33	ACC CAC CCA BBC BCB CBB
0.16	BCC CBC CCB
0	CCC

objetivos, el grupo de experto realizará la ponderación de los pesos y se toma el valor de la moda para eliminar el efecto de los valores extremos (Valls, 2006).

1.5 Métodos de optimización. Generalidades

Los métodos de optimización pueden ser clasificados según la cantidad de objetivos a optimizar, figura 1.3 (Quiza, et al., 2019).

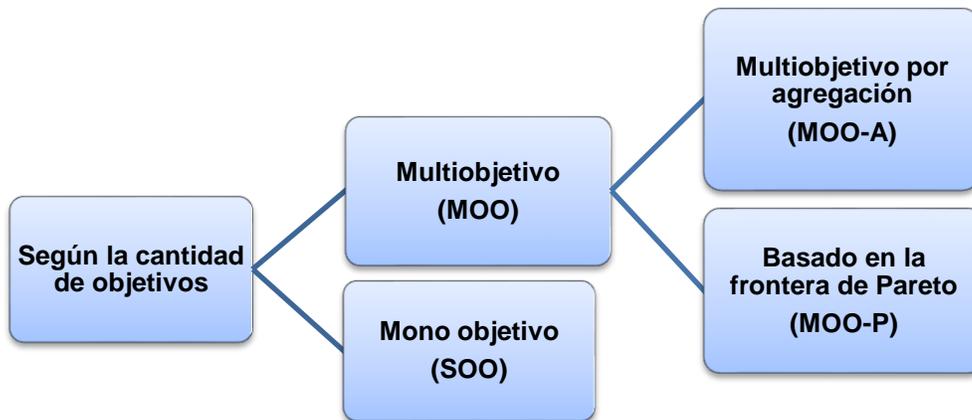


Figura 1.3 Clasificación de los métodos de optimización

El método MOO-A, conocido como una técnica a priori, donde el problema se reduce a un solo objetivo, mientras que el MOO-P se basa en la obtención de la frontera de Pareto y es

conocido como una técnica a posteriori. Otro aspecto a tener en cuenta, es la técnica empleada para resolver el problema de optimización. Según Quiza, et al., (2019), se muestran las siguientes técnicas:

1. Selección del mejor punto (BS). No son necesario modelos matemáticos. La técnica es usada por el método de Taguchi, donde se calcula la señal de ruido para determinar el parámetro de mayor influencia en el proceso y obtener el óptimo.
2. Basado en gradientes (GB). Requiere de modelos matemáticos. El óptimo se obtiene usando técnicas basadas en gradiente. Ejemplo: método de gradiente descendente.
3. Técnica de libre de gradiente (GF). Requiere de modelos matemáticos. Ejemplo: algoritmos genéticos, enjambre de partículas y tratamiento simulado.

1.5.1 Métodos de optimización utilizados en procesos de manufactura

Como ejemplo de procesos de manufactura nos basaremos fundamentalmente en el proceso de soldadura automática bajo fundente, ya que se corresponde con el caso de estudio propuesto.

El proceso de soldadura automática bajo fundente es muy utilizado en la industria por las buenas propiedades mecánicas que se alcanzan; por tal motivo muchos investigadores han dedicado su tiempo a la optimización de los parámetros de trabajo. En una revisión realizada de los últimos cinco años se puede observar que son utilizados diferentes métodos para optimización del proceso de soldadura bajo fundente. El método de Taguchi es

utilizado por: (Srinivasulu, 2013); (Ismail, *et al.*, 2013); (Sailender, *et al.*, 2018); (Ahmed y Saadoon, 2015) y (Saadoon, 2016). Ellos se fundamentan en seleccionar la combinación del régimen de soldadura que mejor resultados tenga para una función objetivo determinada. Estos trabajos usaron como funciones objetivas la dilución, propiedades mecánicas, geometría del cordón y el peso del metal depositado. El método híbrido de Taguchi-Grey es usado por (Singh, 2017), donde utiliza como función objetivo el área afectada por el calor y el ancho de la zona afectada por el calor y (Ahmed y Saadoon, 2017) utilizan una combinación de Taguchi con lógica borrosa, trabajando con las propiedades mecánicas como funciones objetivos. La metodología de superficie respuesta es utilizada por: (Om y Pandey, 2014); (Tamang y Singh, 2015); (Da Silva, *et al.*, 2017) y (Vedrtnam, *et al.*, 2018) en estos casos las funciones objetivos utilizadas fueron la dilución y geometría del cordón. Un método que ha tenido mucha aceptación es el de algoritmos genéticos, utilizado por: (Choudhary, *et al.*, 2018); el cual realiza una comparación entre el algoritmo genético y el algoritmo Jaya. (Ahire, *et al.*, 2018); (Ghaderi, *et al.*, 2015); (Rao y Rai, 2017), realizan la comparación con varios métodos como: QO-Jaya, GA, PSO, TLBO y ICA. (Dhasa y Kumanan, 2011) compara los algoritmos genéticos con el método de enjambre de partículas (PSO) y (Moradpour, *et al.*, 2015) utiliza el algoritmo genético NSGA-II. En estos casos las funciones objetivos son el coeficiente de depósito, propiedades mecánicas y geometría del cordón. Las variables de decisión, en la gran mayoría de los casos son los parámetros del régimen de soldadura (corriente, tensión, velocidad y distancia entre el electrodo y la pieza).

En los últimos años un aspecto de gran importancia en el futuro de la manufactura es lograr una producción con un nivel de sostenibilidad adecuado que permita la disminución de las

emisiones de gases contaminantes, residuos sólidos no degradables, etc. Teniendo en cuenta la gran importancia que revela el tema, diferentes investigaciones se han encaminado en esta línea. (Nouira, *et al.*, 2014) plantean la optimización de sistemas de manufacturas bajo consideraciones medio ambientales; (Ibrahim, 2015) propone la optimización de la sostenibilidad para empresas de manufactura, el trabajo se fundamenta en lograr una minimización del índice de sostenibilidad como una guía para determinar el tiempo y costo óptimo de sostenibilidad. Los trabajos de (Vimal y Raja, 2015); (Chang, *et al.*, 2015); y (Sproesser, *et al.*, 2015) establecen el análisis ambiental mediante la evaluación de ciclo de vida (*life cycle assesment*, LCA) para diferentes tipos de soldadura partiendo del análisis de inventario que tiene en cuenta las entradas y salidas del proceso, el método permite realizar comparaciones y mejorar el impacto ambiental. (Alkahla y Pervaiz, 2017) realizan un análisis desde el punto de vista de sostenibilidad del proceso de soldadura manual con electrodo revestido. (Vimal, *et al.*, 2017) propone un método para la optimización de los parámetros del proceso soldadura manual con electrodo revestido usando la predicción por redes neuronales a partir de un diseño factorial completo, posteriormente realiza un análisis relacional de Grey para finalmente llegar al óptimo a través de una máquina de inferencia borrosa, finalmente realiza la comparación del óptimo con los valores anteriormente establecidos usando un análisis de ciclo de vida (LCA), los valores optimizados muestran los mejores resultados.

1.5.2 Algoritmos evolutivos

Los algoritmos evolutivos (EA's) son estrategias de búsqueda en paralelo que simulan el proceso de selección natural de los organismos vivos (Sánchez, 2002). Los EA's se basan en el mantenimiento de una población de individuos dentro del espacio de búsqueda, operando sobre ellos de forma que nuevos individuos se vayan generando a partir de los existentes. Los nuevos individuos son evaluados a partir de una función de ajuste que corresponde con la función objetivo de la optimización y si resultan mejores que los existentes, los reemplazan. Al repetir este proceso un número de veces, cabe esperar una convergencia de la población hacia el óptimo (Abbass, 2000). A diferencia de otros métodos de optimización, los EA's son muy poco exigentes con las funciones que emplean. Consideraciones de convexidad o concavidad, derivabilidad y continuidad no son en absoluto necesarias para las funciones en los EA's (Abbass, *et al.*, 2001). Los EA's permiten obtener, simultáneamente, un conjunto de puntos del espacio de búsqueda que definan completamente la frontera de Pareto (Herreros, 2000). En este sentido es muy importante que los EA's dispongan de los mecanismos necesarios para garantizar la diversidad de la población, ya que no sólo es necesario obtener un conjunto de soluciones situadas lo más cerca posible de la frontera de Pareto, sino que estén uniformemente distribuidas por la misma (Sánchez, 2002).

El tratamiento de las restricciones es un aspecto clave dentro de los EA's. (Coello, 2002) propone un método para tratar las restricciones como otros tantos objetivos a optimizar. A pesar de que este enfoque reporta buenos resultados, complica innecesariamente la toma de decisiones. (Kurpati, *et al.*, 2002) proponen la penalización de la función de adaptación en dependencia de la cantidad de restricciones violadas. (Jiménes, *et al.*, 2001) proponen

un algoritmo donde los elementos de la población que no cumplen las restricciones son agrupados y tratados independientemente.

Dentro de los algoritmos evolutivos cabe señalar los siguientes:

- Programación evolutiva: Utiliza una representación adaptada al problema concreto que va a resolver. No utiliza cruce entre los individuos, pero la mutación que emplea puede ofrecer resultados similares (Sánchez, 2002).
- Estrategias de evolución: Al igual que la programación evolutiva, la representación que utiliza depende del problema considerado. Incluye el cruce entre los progenitores (Leiva, 2001).
- Algoritmos genéticos: Utilizan cadenas de caracteres para representar las variables del problema dado. Esta característica los hace muy robustos, ya que pueden tratar una gran cantidad de problemas sin necesidad de variar sus estructuras (Leyland, 2002; Sánchez, 2002)

Dada su capacidad para tratar tanto variables discretas como continuas, los algoritmos genéticos son los EA's más convenientes para la optimización de regímenes de soldadura. Por otro lado, los algoritmos genéticos son los EA's más estudiados (Gero y Kazarov, 2001). Existen varios EA's para optimización multiobjetivo, entre los que cabe señalar el PDE, de Abbass y colaboradores (Abbass, *et al.*, 2001) y el ENORA, de (Jiménes, *et al.*, 2001). Este último es especialmente interesante por la forma en que trata las restricciones.

Como fue señalado anteriormente, el rasgo principal de los AG's, son la representación en forma de cadena de caracteres de las variables del espacio de búsqueda (Gero y Kazarov, 2001). Esta característica está inspirada en la relación entre el genotipo y el fenotipo de los

organismos vivos, y es muy adecuada para el tratamiento de variables cualitativas o discontinuas. Como en todos los algoritmos evolutivos, los AG's parten de una población inicializada aleatoriamente, dentro del espacio de búsqueda. Los operadores principales que se emplean en los AG's son: selección, cruzamiento y mutación (Soodamani y Liu, 2000). Algunos AG's propuestos para optimización multiobjetivo son:

- VEGA (Vector Evaluated Genetic Algorithm) propuesto por Shaffer en 1985 (Kurpati, *et al.*, 2002). Es un algoritmo a priori que no permite obtener la frontera de Pareto.
- MOGA (Multi Objective Genetic Algorithm), desarrollado por Fonseca y Fleming en 1998 (Van Veldhuizen, 2000). El manejo de las restricciones que propone, tiene serias limitaciones (Kurpati, *et al.*, 2002).
- El propuesto por (Kurpati, *et al.*, 2002), que se basa en el MOGA, pero propone mejoras en el tratamiento de las restricciones.
- NSGA (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm), propuesto de Srinivas y Deb, en 1994, y perfeccionado por (Deb, *et al.*, 2000).
- El micro algoritmo genético propuesto por (Toscano, 2001) que solventa muchas de las limitaciones de los anteriores.

El software MATLAB R2013a muestra una herramienta para obtener la frontera de Pareto utilizando el algoritmo propuesto por (Kalyanmoy, *et al.*, 2002) denominado NSGA-II, el cual muestra buenos resultados.

1.6 Conclusiones parciales del capítulo

Una vez finalizado el presente capítulo, se ha podido arribar a las siguientes conclusiones parciales:

1. El análisis y la selección de los indicadores de sostenibilidad permitirá plantear las funciones objetivos necesarias para el proceso de optimización con enfoque sostenible.
2. El indicador NIST es el más indicado para ser utilizado en el trabajo, ya que está dirigido a los procesos de manufactura.
3. El método de optimización NSGA-II muestra resultados satisfactorios aplicados a diferentes procesos de manufactura, por lo que será utilizado como método de optimización.

CAPITULO II. METODOLOGÍA PARA LA OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS DE MANUFACTURA CON ENFOQUE SOSTENIBLE (MOPMES)

El objetivo del capítulo es la confección de la metodología para la optimización de procesos de manufactura (MOPMES) con enfoque sostenible teniendo en cuenta los aspectos tratados en el capítulo anterior.

2.1 Objetivo del método. Campo de empleo

La metodología para la optimización de los procesos de manufactura con enfoque sostenible (MOPMES) tiene como objetivo principal la optimización de procesos de manufactura a partir del método de optimización MOO-P, el cual permitirá la minimización de los tres factores fundamentales del análisis de sostenibilidad: impacto económico, ambiental y social. El campo de empleo será los procesos de manufacturas, siendo un aspecto importante el análisis de cualquier proceso a partir de los indicadores de sostenibilidad, permitiendo este aspecto, la generalización del método.

2.2 Metodología para la optimización de procesos de manufactura con enfoque sostenible (MOPMES)

La metodología cuenta con VIII pasos, según se puede observar en el diagrama de bloques de la figura 2.1. A continuación, se realiza la explicación de cada paso.

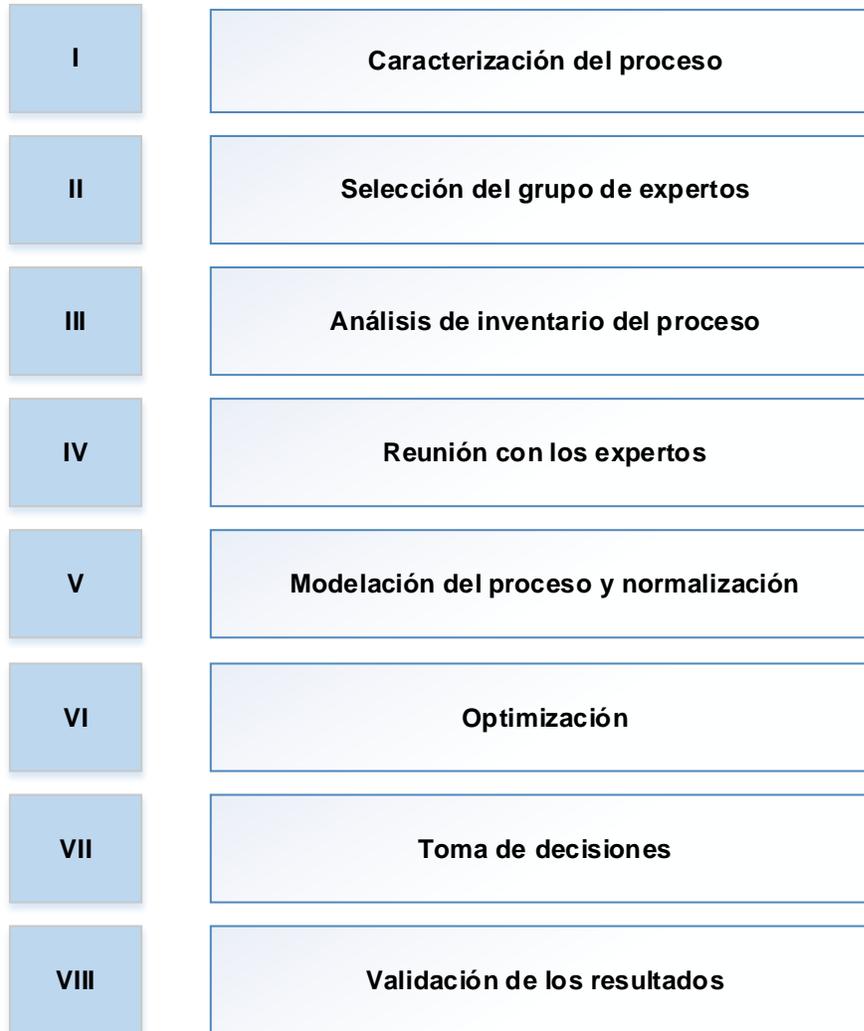


Figura 2.1 Pasos a seguir para la aplicación de (MOPMES)

Paso I

En este paso se deben apuntar todos los detalles del proceso, de forma que pueda ser repetido en otro momento con otro personal y se logren los mismos resultados. Será necesario caracterizar el equipamiento, materiales utilizados y régimen de trabajo. Para este fin puede ser utilizada la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Caracterización del proceso de manufactura

<i>Cod</i>	<i>Datos básicos del proceso.</i>	
<i>A1</i>	<i>Esquema del proceso</i>	
<i>A2</i>	<i>Descripción de los materiales utilizados</i>	
<i>A2.1</i>		
<i>A2.2</i>		
<i>A2.3</i>		
<i>A3</i>	<i>Parámetros tecnológicos del proceso.</i>	
<i>A4</i>	<i>Equipo:</i>	<i>Modelo:</i>

Paso II

Para la selección del grupo de expertos utiliza el método explicado en el epígrafe 1.4. El grupo puede estar integrado por ingenieros de la producción, profesores de la universidad con experiencia en el proceso de manufactura a tratar, técnicos medios de la rama y obreros de alta experiencia. Sus datos generales, como años de experiencia, profesión, etc. serán recogidos en la Tabla 2.2.

Paso III

Se realizará el inventario del proceso analizado. Para este paso deberá tenerse en cuenta el esquema de flujo del proceso mostrado en la figura 2.2.

Tabla 2.2 Grupo de expertos

No	Nombre y apellidos	Profesión	Categoría científica	Cargo	Años de experiencia



Figura 2.2 Flujo de un proceso de manufactura X

Con el análisis de inventario y el indicador de sostenibilidad NITS podemos confeccionar la Tabla 2.3, donde se deben poner todos los indicadores y sub-indicadores relacionados con el proceso que fueron detectados en el análisis de inventario.

Tabla 2.3 Relación de indicadores de sostenibilidad según NITS y el análisis de inventario del proceso

<i>B</i>	<i>Impacto ambiental</i>
<i>B1</i>	<i>Emisiones</i>
<i>B1.1</i>	
<i>B1.2</i>	
<i>B2</i>	<i>Contaminación</i>
<i>B2.1</i>	

<i>B2.2</i>	
<i>B3</i>	<i>Consumo de recursos</i>
<i>B3.1</i>	
<i>B3.2</i>	
<i>B4</i>	<i>Conservación del hábitat natural</i>
<i>B4.1</i>	
<i>B4.2</i>	
<i>C</i>	<i>Impacto económico</i>
<i>C1</i>	<i>Costos</i>
<i>C1.1</i>	
<i>C1.2</i>	
<i>C2</i>	<i>Beneficios</i>
<i>C2.1</i>	
<i>C2.2</i>	
<i>C3</i>	<i>Inversiones</i>
<i>C3.1</i>	
<i>C3.2</i>	
<i>D</i>	<i>Impacto social</i>
<i>D1</i>	<i>Empleado</i>
<i>D1.1</i>	
<i>D2</i>	<i>Cliente</i>
<i>D2.1</i>	
<i>D3</i>	<i>Comunidad</i>
<i>D3.1</i>	

Paso IV

En este punto se utilizará el método de selección de indicadores ABC, explicado en el epígrafe 1.4, para lo que será necesario llenar la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Resultado del método ABC para el proceso

<i>Orden</i>	<i>Indicadores</i>	<i>¿Influye el indicador en los parámetros del régimen a optimizar?</i>	<i>¿Existen los datos para crear los modelos necesarios?</i>	<i>¿Está encaminado hacia un desarrollo sostenible?</i>	<i>Peso</i>
.	
.	

Con los resultados de la Tabla 2.4 se seleccionan los sub-indicadores que tengan Orden I y II que serán utilizados en la Tabla 2.3 y 2.5. Los restantes ordenes serán utilizados en otro tipo de investigaciones. Para la selección de los pesos de cada indicador se utilizará el método de (Saaty, 1980). La Tabla 2.5 será llenada con el criterio de los expertos, siendo estos los criterios con que se fundamentaran las funciones objetivos a utilizar en el proceso de optimización.

Tabla 2.5 Selección de los pesos de cada indicador y sub-indicador

<i>Indicador</i>	<i>Peso</i>	<i>Sub-indicador</i>	<i>Peso</i>	<i>Sub-indicador del proceso</i>	<i>Peso</i>
<i>Impacto Ambiental</i>		<i>Emisiones</i>			
		<i>Contaminación</i>			
		<i>Consumo de Recursos</i>			
		<i>Conservación de habitat</i>			
<i>Impacto Económico</i>		<i>Costo</i>			
		<i>Beneficios</i>			
		<i>Inversiones</i>			
<i>Impacto Social</i>		<i>Empleado</i>			
		<i>Cliente</i>			
		<i>Comunidad</i>			

Paso V

Para realizar la modelación de las funciones objetivos y las variables de decisión se utilizarán los métodos siguientes:

- Diseño de experimento. En este caso se podrán utilizar los diseños de experimentos recomendados en la literatura para modelos que serán utilizados en procesos de optimización, entre los más utilizados tenemos los diseños factoriales completo a tres niveles y los diseños de Box- Behnken.
- Obtención del modelo. Se utilizará el método estadístico de mínimos cuadrado, aunque pueden ser utilizados los métodos de inteligencia artificial entre los que

tenemos: redes neuronales y algoritmos genéticos, en aquellos casos que no sea posible un buen ajuste con el método de mínimos cuadrado.

- Análisis estadísticos de los resultados. Se realizarán los análisis estadísticos establecidos para la confiabilidad de los modelos.
- Normalización de los indicadores. El objetivo de realizar la normalización de los indicadores es poder llevar cada parámetro a un eje correspondiente con el indicador de sostenibilidad. Para esto se utilizan la ecuación 2.

$$X_0 = \frac{X_{(i)} - X_{(min)}}{X_{(max)} - X_{(min)}} \quad (2)$$

Donde:

X_0 - Valor del parámetro que se quiere normalizar.

$X_{(min)}$ - Valor mínimo

$X_{(max)}$ - Valor máximo

Paso VI.

Para realizar este paso será necesario establecer varios puntos.

- Selección del método de optimización.
- Funciones objetivos.
- Restricciones.

Paso VII

Los resultados obtenidos de la frontera de Pareto serán analizados por los especialistas y se buscará el mejor punto para las condiciones reales de la empresa.

Paso VIII

En este paso será necesario realizar la validación de los resultados obtenidos. El punto seleccionado como óptimo deberá realizarse de forma experimental y comprobar los resultados obtenidos en condiciones de producción.

2.3 Conclusiones parciales del capítulo

Una vez finalizado el presente capítulo, se ha podido arribar a las siguientes conclusiones parciales:

1. La metodología propuesta puede ser aplicada en la optimización de los procesos de manufactura, incrementando los valores de sostenibilidad del producto.
2. Para corroborar la metodología propuesta se realizará el caso de estudio propuesto en el Capítulo III.

CAPÍTULO III. CASO DE ESTUDIO

En el capítulo se muestra un caso de estudio para validar la metodología propuesta. En el mismo se realizaron todos los pasos previstos. Los resultados obtenidos muestran un incremento en la sostenibilidad del proceso.

3.1 Caso de estudio de soldadura bajo fundente

La metodología será aplicada al proceso tecnológico de la soldadura ecuatorial del cilindro de gas de 10 kg, fabricados en la Fábrica Noel Fernández de la provincia de Matanzas. Dicha empresa fue seleccionada ya que se producen estos cilindros de forma seriada para todo el país con altos niveles de producción (100 000 unidades para el año 2019). El método de soldadura utilizado es la soldadura bajo fundente.

Metodología para la optimización de procesos de manufactura con enfoque sostenible (MOPMES).

Paso I. Caracterización del proceso de soldadura bajo fundente utilizado en la soldadura de los cilindros de gas de 10 kg en la Fábrica Noel Fernández.

La figura 3.1 muestra la máquina donde se realizaron los experimentos para obtener los modelos necesarios. La misma tiene las siguientes características:

- Velocidad de alimentación del alambre 30-300 m/h.
- Diámetro del alambre 2-6,4 mm.
- Velocidad de soldadura de 0,1-2 rpm.



Figura 3.1 Máquina utilizada en la realización de los experimentos

Extensión del electrodo (Stickout).

La extensión del electrodo es la distancia que existe entre la boquilla y la superficie a soldar (Figura 3.2).

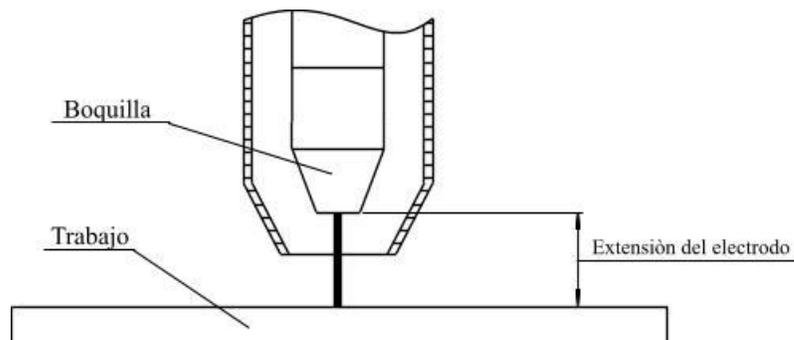
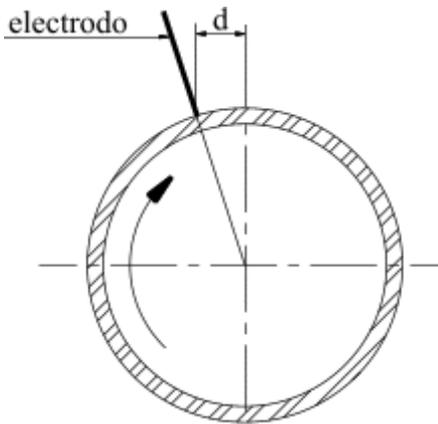


Figura 3.2 Esquema de la extensión del electrodo (Stickout)

Un aumento o disminución de esta distancia, influye directamente en la penetración de la soldadura. Los cilindros del experimento se soldaron con una extensión de electrodo de 16 mm.

Posición del electrodo.

Para obtener una mejor forma de la geometría del cordón, el electrodo se desplaza a una distancia de 25 mm del centro y se inclina hacia el mismo como muestra la figura 3.3. La dimensión se seleccionó de la tabla con el diámetro del cilindro de 310 mm.



Diametro	Desplazamiento (d)
25-76	9,5-19
76-457	19-25
457-914	32-38

Figura 3.3 Posición del electrodo

Material base según las normas del fabricante.

Se utilizan discos de chapa de acero para embutido, laminadas en caliente según la norma JIS 3116-SG259, con un diámetro de 310 mm y un espesor de 2,2 mm. La composición química y propiedades mecánicas se rigen por la norma ASTM 414 - D (Tabla 3.1 y 3.2).

Tabla 3.1 Propiedades mecánicas del metal base

<i>Límite Elástico (MPa)</i>	<i>Elongación(%)</i>	<i>Resistencia a la tensión (MPa)</i>
387	26	458

Tabla 3.2 Propiedades químicas del metal base

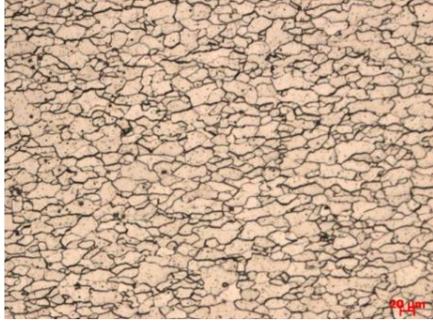
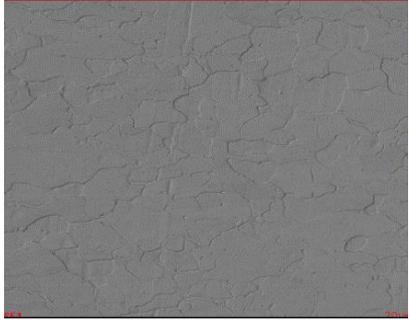
<i>%Al</i>	<i>%C</i>	<i>%Co</i>	<i>%Cr</i>	<i>%Cu</i>	<i>%Mn</i>	<i>%Si</i>	<i>%Ni</i>	<i>%P</i>	<i>%S</i>	<i>%Ti</i>	<i>%V</i>
0,036	0,06	0,019	0,01	0,05	0,57	0,02	0,02	0,008	0,005	0,001	0,003

El metal base fue caracterizado y obtenida su estructura, composición química y resistencia a la rotura. La microestructura del acero se analizó mediante el uso de un microscopio óptico de platina invertida (modelo Axio Observer.Z1m, fabricado por Carls Zeiss). La superficie del material fue pulida y atacada con una solución de 2% de ácido nítrico en etanol. La microscopía electrónica de barrido (SEM) se realizó en el microscopio modelo JSM6510 LV, fabricado por JEOL, a bajo vacío y a través de la detección de electrones retro-dispersados, ver Tabla 3.3.

Mediante el uso de un espectrómetro (LECO de descarga luminiscente) de emisión atómica (Modelo G4 Ikarus fabricado por Bruker) se determinó la composición de carbono y de azufre, resultando 0,017% y 0,008%, respectivamente. La composición de los otros elementos se determinó a través de un espectrómetro de absorción atómica (modelo AA240 fabricado por Vanan), dando 0,04% de silicio, 0,204% de manganeso y 0,056% de aluminio.

Los ensayos de tracción fueron realizados en la prensa de ensayo modelo a una velocidad

Tabla 3.3 Estructura del metal base en estado de suministro

<p><i>Metal base JISS3116-259</i></p>	<p><i>Óptica</i></p> <p><i>Estructura ferrífica de granos equiaxiales.</i></p>	<p><i>Microscopia electrónica (SEM)</i></p>
		

de 4 mm/min según ASTM E-8M. Los resultados mostraron un valor de límite elástico de 242 MPa y límite de rotura de 384.76 MPa.

El fundente utilizado es denominado como Flux PV60-3, según las normas ASW A5.17 y ASME SFA-5.17, de tipo fundido, con una granulometría de -2; +0,25. La composición química del fundente se muestra en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Composición química del fundente

<i>%SiO₂</i>	<i>%MnO</i>	<i>%Al₂O₃</i>	<i>%CaO</i>	<i>%CaF₂</i>	<i>%MgO</i>	<i>%Fe₂O₃</i>	<i>%S</i>	<i>%P</i>
41-44	34-38	6.0 máx.	10.0 máx.	3.5-5.0	7	2.0	0.14	0.12

El electrodo utilizado viene clasificado por la norma AWS como EM12K, tiene un diámetro de 2 mm, se fabrican en rollos, están recubiertos por cobre y tienen una composición química que se muestra en la (Tabla 3.5).

Tabla 3.5 Propiedades químicas del metal de aporte

<i>%C</i>	<i>%Mn</i>	<i>%Si</i>	<i>%Cu</i>	<i>%P</i>	<i>%S</i>
<i>0,105</i>	<i>0,105</i>	<i>0,200</i>	<i>0,16</i>	<i>0,015</i>	<i>0,014</i>

Regímenes de trabajo. Los valores utilizados como intervalos para el diseño de experimentos se muestran en la tabla 3.6.

Tabla 3.6 Parámetros del proceso y sus niveles

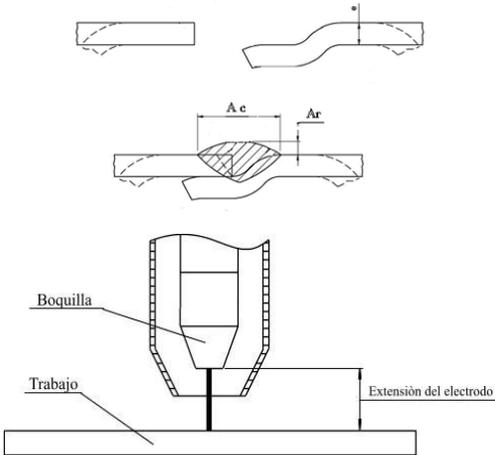
<i>Parámetro</i>	<i>Niveles</i>		
	<i>Bajo</i>	<i>Medio</i>	<i>Alto</i>
<i>Voltaje, U [V]</i>	20	25	30
<i>Intensidad de la corriente, I [A]</i>	200	250	300
<i>Velocidad, S [m/h]</i>	41	65	85

Los resultados de la caracterización del proceso se resumen en la Tabla 3.7. Como se puede observar se han establecido cuidadosamente todos los parámetros posibles para poder tener establecidos los aspectos importantes para lograr la repetición de los ensayos.

Paso II. Selección del grupo de expertos.

En la Tabla 3.8 se relacionan los expertos seleccionados, así como sus datos fundamentales. El coeficiente de experticia K varía entre 0,84 y 0,99, por lo que se puede considerar que los expertos seleccionados muestran un alto conocimiento del proceso analizado.

Tabla 3.7 Caracterización del proceso de manufactura

A	<i>Datos básicos del proceso.</i>	
A1	<p><i>Esquema del proceso</i></p> <p><i>Preparación de borde</i> $e=2,2\text{ mm}$, $Ac=7-9\text{ mm}$, $Ar=0,5-1,5\text{ mm}$</p> <p><i>diámetro del cilindro= 310 mm</i></p> <p><i>diámetro del electrodo= 2 mm.</i></p> <p><i>Extensión del electrodo=16 mm</i></p>	
A2	<i>Descripción de los materiales utilizados</i>	
A2.1	<i>Acero de bajo carbono (chapa) JIS 3116-259 (ASTM 414-D)</i>	
A2.2	<i>Material del alambre EM12K</i>	
A2.3	<i>Material del fundente PV60-3 (ASW A5.17 y ASME SFA-5.17)</i>	
A3	<i>Parámetros tecnológicos del proceso.</i>	$I= 200-300\text{ A}$, $U= 20-30\text{ V}$, $S= 41-85\text{ m/h}$
A4	<i>Equipo: Máquina de soldar</i>	<i>Modelo: Kaiyuan</i>

Paso III. Análisis de inventario del proceso.

Se confeccionó el gráfico del flujo del proceso de soldadura automática bajo fundente y la relación de los indicadores de sostenibilidad según NITS (Figura 3.4).

Tabla 3.8 Grupo de expertos

No	Nombre y apellidos	Profesión	Categoría científica	Cargo	Años de experiencia	Coefficiente de experticia K
1	Pedro Llerena	Ing. Mecánico	-	Director de la Fábrica	27	0,89
2	Ramón Quiza Sardiñas	Ing. Mecánico	Dr.C	Jefe del CEFAS		0,84
3	Marcelino Rivas Santana	Ing. Mecánico	Dr.C	Jefe de proyecto de investigación	35	0,84
4	Leonel Rufín Alfonso	Ing. Mecánico	-	Especialista mecánico	9	0,99
5	Eduardo Laguardia Betancourt	Ing. Mecánico	-	Especialista principal	27	0,89
6	Israel González Medina	Ing. Mecánico	-	Jefe de producción	56	0,99
7	Antonio de Jesús Rivera Pérez	Ing. Industrial	-	Especialista en calidad	28	0,89



Figura 3.4 Flujo del proceso

Tabla 3.9 Relación de indicadores de sostenibilidad según NITS y el análisis de inventario del proceso

<i>B</i>	<i>Impacto ambiental</i>
<i>B1</i>	<i>Emisiones</i>
<i>B1.1</i>	Escoria
<i>B1.2</i>	Formación de partículas
<i>B2</i>	<i>Contaminación</i>
<i>B2.1</i>	Gases
<i>B2.2</i>	Humo
<i>B2.4</i>	Calor
<i>B2.5</i>	Ruido
<i>B2.6</i>	Emisiones de CO ₂ del proceso de fabricación de la energía
<i>B3</i>	<i>Consumo de recursos</i>
<i>B3.1</i>	Gasto de fundente
<i>B3.2</i>	Gasto de electrodo
<i>B3.3</i>	Gasto de energía
<i>B4</i>	<i>Conservación del hábitat natural</i>
<i>B4.1</i>	No se considera
<i>C</i>	<i>Impacto económico</i>
<i>C1</i>	<i>Costos</i>
<i>C1.1</i>	Costo total del proceso
<i>C1.2</i>	Productividad
<i>C2</i>	<i>Beneficios</i>

<i>C2.1</i>	No se considera
<i>C3</i>	<i>Inversiones</i>
<i>C3.1</i>	No se considera
<i>D</i>	<i>Impacto social</i>
<i>D1</i>	<i>Empleado</i>
<i>D1.1</i>	No se considera
<i>D2</i>	<i>Cliente</i>
<i>D2.1</i>	No se considera
<i>D3</i>	<i>Comunidad</i>
<i>D3.1</i>	No se considera

Paso IV. Reunión con los expertos

De la Tabla 3.9 del análisis de inventario los expertos seleccionan los indicadores a utilizar según el método de juicio ABC explicado anteriormente. Los resultados se muestran en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10 Resultado del método de Juicio ABC para el proceso aprobado por consenso

<i>Método de Juicio ABC para la selección de indicadores.</i>					
<i>Orden</i>	<i>Indicador</i>	<i>¿Influye el indicador en los parámetros del régimen a optimizar?</i>	<i>¿Existen los datos para crear los modelos necesarios?</i>	<i>¿Está encaminado hacia un desarrollo sostenible?</i>	<i>Peso</i>
<i>I</i>	<i>Escoria</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>1</i>
<i>X</i>	<i>Formación de partículas</i>	<i>C</i>	<i>C</i>	<i>C</i>	<i>0</i>

VI	<i>Gases</i>	C	C	A	0.33
VI	<i>Humo</i>	C	C	A	0.33
VIII	<i>Calor</i>	C	B	B	0.33
VI	<i>Ruido</i>	C	C	A	0.33
I	<i>Emisiones de CO₂ del proceso de fabricación de la energía</i>	A	A	A	1
I	<i>Gasto de fundente</i>	A	A	A	1
I	<i>Gasto de electrodo</i>	A	A	A	1
I	<i>Gasto de energía</i>	A	A	A	1
II	<i>Costo total del proceso</i>	A	A	B	0.83
II	<i>Productividad</i>	A	A	B	0.83
X	<i>Empleado</i>	C	C	C	0
X	<i>Cliente</i>	C	C	C	0
X	<i>Comunidad</i>	C	C	C	0

De la Tabla 3.10 y 3.11 se puede seleccionar los indicadores correspondientes a los órdenes I y II. Los pesos otorgados por los expertos se muestran en la Tabla 3.12.

Tabla 3.11 Resultados de los sub-indicadores seleccionados para ser utilizados en la optimización.

Orden	Sub-indicador	Indicador
<i>I</i>	Escoria	Ambiental
<i>I</i>	Emisiones de CO ₂ del proceso de fabricación de la energía	
<i>I</i>	Gasto de fundente	
<i>I</i>	Gasto de electrodo	

<i>I</i>	Gasto de energía	
<i>II</i>	Costo total del proceso	Económico
<i>II</i>	Productividad	

Tabla 3.12 Selección de los pesos de cada indicador

<i>Indicador</i>	<i>Peso</i>	<i>Indicador</i>	<i>Peso</i>	<i>Indicador del proceso</i>	<i>Peso</i>
<i>Impacto Ambiental</i>	1.0	Emisiones	0.3	Escoria (g)	0.3
		Contaminación	0,2	Emisiones de CO ₂ del proceso de fabricación de la energía	0,2
		Consumo de Recursos	0.5	Gasto de fundente (g) Gasto de electrodo (g) Gasto de energía (g)	0.1 0.1 0.3
		Conservación de habitat	0	-	0
<i>Impacto Económico</i>	1.0	Costo	0,5	Costo total del proceso (\$)	0,5
		Productividad	0,5	Tiempo principal	0,5
		Beneficios	0	-	0
		Inversiones	0	-	0

Paso V. Modelación del proceso y normalización.

En este caso seleccionamos el diseño de experimento de Box-Behnken. Para obtener los modelos se usó el método de regresión múltiple.

Los resultados de los modelos experimentales se muestran en (3) – (10). La confiabilidad obtenida es superior al 95% y el valor del coeficiente de regresión es superior a 0.8 para todos los casos.

$$B = 7,74 + 0,726 \cdot 10^{-3} IU - 0,0665S \quad (3)$$

$$P = -0,833 + 10,9 \cdot 10^{-6} I^2 + 0,112U - 7,71 \cdot 10^{-3} S \quad (4)$$

$$R = 1,15 - 5,90 \cdot 10^{-6} I^2 + 50,4 \cdot 10^{-6} UI - 69,8 \cdot 10^{-6} S^2 \quad (5)$$

$$Gw = -14,1 + 0,852 \cdot 10^{-3} I^2 + 0,0911U^2 - 0,0308US \quad (6)$$

$$Gf = -47,2 + 2,70 \cdot 10^{-3} I^2 + 0,308U^2 - 0,101US \quad (7)$$

$$AD = 2,84 + 68,8 \cdot 10^{-6} I^2 + 7,87 \cdot 10^{-3} U^2 - 3,63 \cdot 10^{-3} US \quad (8)$$

$$AB = -5,36 + 6,73 \cdot 10^{-3} U^2 + 0,0518I - 0,0902S \quad (9)$$

$$Gs = 6,59 + 273,5 \cdot 10^{-6} I^2 - 1,31 \cdot 10^{-3} S^2 + 4,50U \quad (10)$$

Donde:

B – ancho del cordón (mm)

P – penetración (mm)

R – altura del refuerzo (mm)

Gw – gasto de electrodo (g)

G_f – gasto de fundente (g)

AD – área de metal depositado (mm²)

AB – área de metal fundido (mm²)

G_s – peso de la escoria obtenida (g)

Para realizar los cálculos de tiempo del proceso, costos y energía se necesitan los valores constantes que se exponen en la Tabla 3.13. Los parámetros calculados se muestran en (11) – (19).

Tabla 3.13 Valores de las constantes utilizadas para la optimización

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
<i>Longitud del cordón (Lc)</i>	0,97	[M]
<i>Salario del soldador (zl)</i>	5,81	[\$/h]
<i>Costo del alambre (zw)</i>	2,65	[\$/kg]
<i>Costo del fundente (zf)</i>	6,21	[\$/kg]
<i>Costo de energía (ze)</i>	0,12	[\$/(kW.h)]
<i>Tiempo auxiliar (tA)</i>	3,69	[min]

$$L = \frac{100AD}{(AD + AB)} \quad (11)$$

$$tT = \frac{60Lc}{S} \quad (12)$$

$$E = \frac{\sqrt{3}LcIU}{1000S} \quad (13)$$

$$t = tT + tA \quad (14)$$

$$Zl = \frac{zlt}{60} \quad (15)$$

$$Zw = \frac{zwGw}{1000} \quad (16)$$

$$Zf = \frac{zfGf}{1000} \quad (17)$$

$$Ze = zeE \quad (18)$$

$$Z = Zl + Zw + Zf + Ze \quad (19)$$

Donde:

L - Longitud (mm)

tT - tiempo principal (min)

E - Consumo de energía (KW.h)

t - tiempo total del proceso (min)

Zl - Costo de mano de obra (\$)

Zw -Costo del alambre (\$)

Zf -Costo del fundente (\$)

Ze - Costo de energía (\$)

Z - Costo total del proceso (\$)

Paso VI. Optimización.

Del estudio de la bibliografía realizado se llegó a la conclusión de que el método a utilizar sería el multi-objetivo con obtención de la frontera de Pareto (MOO-P) y análisis a posteriori usando la técnica de libre de gradiente (GF), para lo que utilizaremos el método de Algoritmo Genético de Ordenamiento no Dominado II (NSGA-II), siendo este el más utilizado por la literatura en los últimos cinco años como se pudo observar en epígrafes anteriores. Las funciones objetivos fueron:

Impacto ambiental (IA):

$$IA = 0,3Gs + 0,1Gf + 0,1Gw + 0,3GE + 0,2ECO_2 \quad (20)$$

Impacto económico (IE):

$$IE = 0,5Z + 0,5t \quad (21)$$

Donde:

ECO_2 – Emisiones de dióxido de carbono. En el caso de Cuba se considera como 0,7530 kg (CO₂) / (KW.h).

Como restricciones fueron considerados los parámetros límites del régimen de soldadura y las dimensiones límites de los parámetros del cordón (ancho (mm), altura del refuerzo (mm) y penetración (mm)) establecidos por la norma de calidad del proceso.

$$20 \leq U \leq 30 \quad (22)$$

$$200 \leq I \leq 300 \quad (23)$$

$$41 \leq S \leq 85 \quad (24)$$

$$7 \leq B \leq 9 \quad (25)$$

$$2,2 \leq P \quad (26)$$

$$0,5 \leq R \leq 1,5 \quad (27)$$

Para el caso analizado se utiliza un tamaño de la población de 1500 y una cantidad de iteraciones de 500. Para el computo del algoritmo se utilizó el software MATLAB R 2015^a. La frontera de Pareto y el conjunto de Pareto se muestran en las Figuras 3.5 y 3.6.

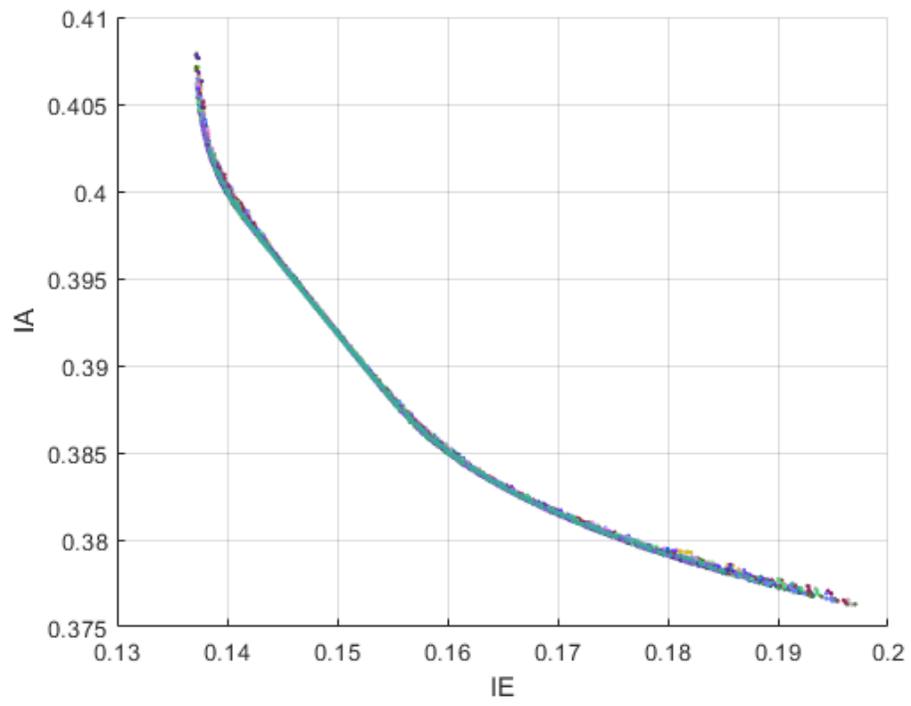


Figura 3.5 Frontera de Pareto

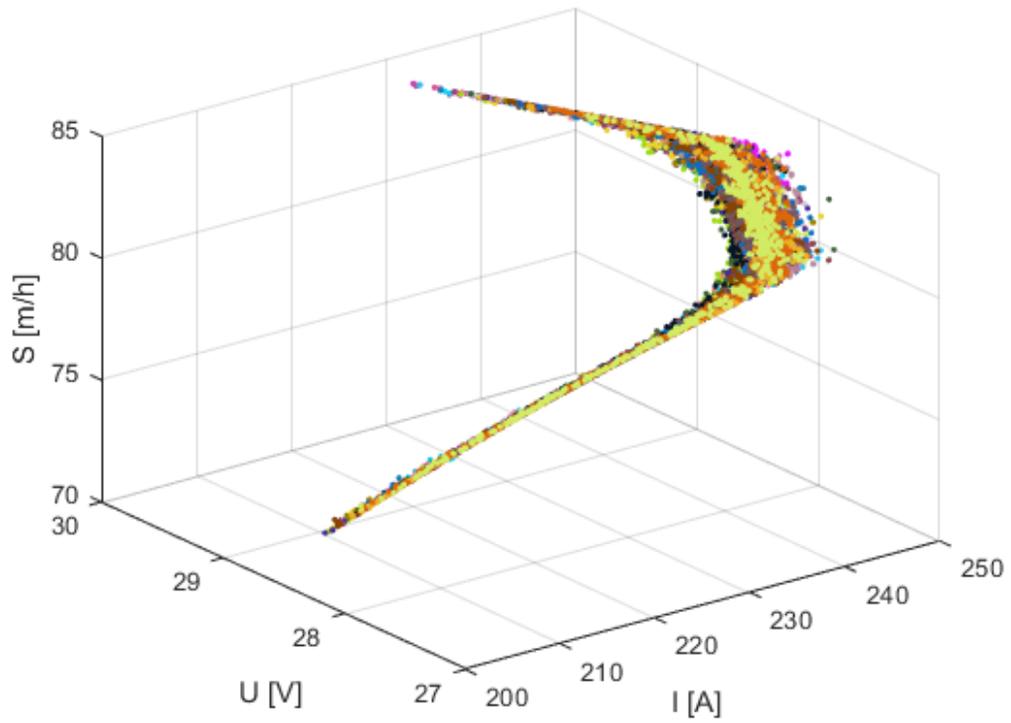


Figura 3.6 Conjunto de Pareto

Paso VII. Toma de decisiones.

De la Figuras 3.5 y 3.6 se puede observar que existen cuatro puntos de interés en la curva, los cuales fueron analizados. Para realizar la toma de decisiones se analizaron diferentes puntos de la frontera, los resultados se muestran en la Tabla 3.14.

Tabla 3.14 Análisis de diferentes puntos de la frontera de Pareto para la toma de decisiones

<i>Variante</i>	<i>Corriente (A)</i>	<i>Tensión (V)</i>	<i>Velocidad (m/h)</i>	<i>IE</i>	<i>IA</i>	<i>Análisis de sostenibilidad</i>
<i>1</i>	200,7	28,18	72,87	0,197	0,376	Mejor impacto ambiental
<i>2</i>	239,1	27,25	82,28	0,153	0,389	-
<i>3</i>	242,2	27,92	84,94	0,142	0,398	-
<i>4</i>	229,1	29,53	85	0,137	0,407	Mejor impacto económico
<i>5</i>	380	32	95	0,554	0,867	Régimen de la Fábrica

En el caso analizado se decide tomar la variante 4, ya que el impacto ambiental no tiene una gran variación en los cuatro puntos (0,376-0,407) y se es el punto de mejor impacto económico (0,137). Como se puede observar en la Tabla 3.14, el régimen óptimo presenta una mejora de la sostenibilidad que el régimen establecido en la fábrica, ya que tanto el impacto ambiental como económico disminuyen. En la Tabla 3.15 se muestran los cálculos realizados para el régimen óptimo y el régimen de la fábrica.

Tabla 3.15 Comparación de los resultados del régimen óptimo y el régimen utilizado por la fábrica

<i>Variante</i>	<i>Consumo de recursos</i>			<i>Emisiones y contaminantes</i>		<i>Costo y productividad</i>	
	<i>G_w</i> [g]	<i>G_f</i> [g]	<i>G_s</i> [g]	<i>GE</i> [kW.h]	<i>ECO₂</i> [kg (CO ₂)/(KW.h)]	<i>Z</i> [\$]	<i>T</i> [min]
<i>Óptimo</i>	33	110	144	0,1208	0,0910	1,21	4,38

<i>Fábrica</i>	<i>109</i>	<i>351</i>	<i>178</i>	<i>0,1943</i>	<i>0,1463</i>	<i>2,91</i>	<i>4,31</i>
----------------	------------	------------	------------	---------------	---------------	-------------	-------------

Paso VIII. Validación de los resultados.

En este paso se llevó a cabo el experimento en la fábrica con los parámetros óptimos (variante 4). Como parámetros a validar se escogieron el ancho del cordón y la altura de refuerzo, ya que son relativamente fáciles de medir y fueron utilizados para el cálculo del consumo de recursos. Los resultados se muestran en la Tabla 3.16.

Como se puede observar de la Tabla 3.16 el error relativo máximo no superó el 10%, lo que significa un buen resultado para condiciones experimentales de producción.

Tabla 3.16 Validación de los resultados

Variante	Óptimo calculado	Óptimo experimental	Error relativo %
Ancho del cordón(mm)	<i>7,00</i>	<i>7,62</i>	<i>8,0</i>
Altura de refuerzo(mm)	<i>0,94</i>	<i>0,83</i>	<i>12,0</i>

CONCLUSIONES

Como resultado final del trabajo desarrollado, se ha podido arribar a las siguientes conclusiones:

1. Se desarrolló la metodología para la optimización de procesos de manufactura con enfoque sostenible a partir del indicador de sostenibilidad NIST, la misma cuenta con ocho pasos.
2. Para validar la metodología propuesta se realizó un caso de estudio, para el cual se tomó el proceso de soldadura ecuatorial del cilindro de gas de 10 kg.
3. La validación del régimen óptimo arrojó resultados satisfactorios para las condiciones de producción (12% de error relativo).
4. Del análisis de los indicadores de sostenibilidad realizados por los expertos no fueron considerados aquellos que se corresponden con la parte social debido a que el indicador no tiene influencia en los parámetros del régimen.
5. Con los resultados obtenidos se mejora el impacto ambiental en 47 % y el económico en 25%, en comparación de los regímenes utilizados en la fábrica.
6. La sostenibilidad del proceso con los regímenes óptimos ofrece mejores resultados que con los regímenes de la fábrica.

RECOMENDACIONES

Basadas en las conclusiones obtenidas y para la extensión futura del presente trabajo, se realizan las siguientes recomendaciones:

1. Aplicar la metodología realizada a otros procesos de manufactura.
2. Continuar la valoración de la inclusión de impacto social en la optimización.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abbass, H.A., 2000. “*The self-adaptive Pareto differential evolution algorithm*”.

Abbass, H.A.; Sarker, R. ; Newton, C., 2001. *PDE: A Pareto-frontier differential evolution approach for multi-objective optimization problems*”

Ahire, P.G.; Patil, U.S. ; Kadam, M.S., 2018. “Genetic Algorithm Based Optimization of the Process Parameters for Manual Metal Arc Welding of Dissimilar Metal Joint”. *2nd International Conference on Materials Manufacturing and Design Engineering*. vol. 20, pp. 106-112.

Ahmed ; Saadoon, A.M., 2015. “Optimization Process Parameters of Submerged Arc Welding Using Taguchi Method”. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 5 (1).

Ahmed, Z.I. ; Saadoon, A.M., 2017. “Multi Response Optimization of Submerged Arc Welding Using Taguchi Fuzzy Logic Based on Utility Theory”. *International Journal of Science and Research*, 6 (12), DOI: 10.21275/ART20178711

Alkahla, I. ; Pervaiz, S., 2017. “Sustainability assessment of shielded metal arc welding(SMAW) process”. *Materials Science and Engineering*, 244.

Aminuddin, A.S.A.; Nawawi, M.K.M. ; Mohamed, N.M.Z.N., 2014. ““Analytic Network Process Model For Sustainable Lean And Green Manufacturing Performance Indicator””. *Statistics and Operational Research International Conference (SORIC 2013)*. pp. 32-38.

- Amrina, E. ; Yusof, S.M., 2011. ““Key performance indicators for sustainable manufacturing evaluation in automotive companies””. *International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*. pp. 1093 – 1097.
- Coello, C.A., 2002. “ “Treating constraints as objectives for single-objective evolutionary optimization””. *Engineering Optimization*, 32, pp. pp.275-08.
- Consultants, P., 2004. *‘The eco-indicator 99: a damage oriented method for life cycle assessment’*.
- Chang, Y.-J.; Sproesserb, G.; Neugebauera, S.; Wolfa, K.; Scheumanna, R.; Pittnerc, A.; Rethmeierb, M. ; Finkbeinera, M., 2015. “Environmental and Social Life Cycle Assessment of welding technologies ”. *12th Global Conference on Sustainable Manufacturing*. vol. 26, pp. 293-298.
- Choudhary, A.; Kumar, M. ; Unune, D.R., 2018. “Experimental investigation and optimization of weld bead characteristics during submerged arc welding of AISI 1023 steel”. *Defence Technology*, xxx.
- Da Silva, M.M.; Batista, V.R.; Maciel, T.M.; Dos Santos, M.A. ; Brasileiro, T., Lacerda, 2017. “Optimization of submerged arc welding process parameters for overlay welding”. *Welding International*, DOI: 10.1080/09507116.2017.1347325.
- Deb, K.; Agrawal, S.; Pratab, A. ; Meyarivan, T., 2000. *A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II*

- Dhasa, J.E.R. ; Kumanan, S., 2011. "Optimization of parameters of submerged arc weld using non conventional techniques". *Applied Soft Computing*, 11.
- Dreher, J.; Lawler, M.; Stewart, J.; Strassorier, G. ; Thorne, M., 2009. *GM metrics for sustainable manufacturing*’.
- EEA-CSI, 2005. "(European Environmental Agency) EEA Core Set of Indicators".
- EPfI, 2010. *Environmental Performance Indicators*.
- EPfI, 1999. *Towards Environmental Pressure Indicators for the EU, Environment and Energy Paper Theme 8.Luxembourg, European Commission*.
- ESI, 2005. *(Environmental Sustainability Indicators)Environmental Sustainability Index: Benchmarking National Environmental Stewardship*.
- Fan, C.; Carrell, J.D. ; Zhang, H.C., 2010. "“An investigation of indicators for measuring sustainable manufacturing”". *Proceedings of IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology* Arlington, Virginia, pp. 1-5.
- Feng, S.C. ; Joung, C.B., 2011. "A measurement infrastructure for sustainable manufacturing". *Int. J. Sustainable Manufacturing*, 2.
- Gero, J.S. ; Kazarov, V., 2001. "A genetic engineering approach to genetic algorithms”". *Evolutionary Computation*, 9, pp. pp.71-92.
- Ghaderi, M.R.; Aghakhani, M.; Eslampanah, A. ; Ghaderi, K., 2015. "The application of imperialist competitive algorithm for optimization of deposition rate in submerged arc

- welding process using TiO₂ nano particle”. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29, pp. 357-364, DOI: 10.1007/s12206-014-1242-8
- GRI, 2006. (*Global Reporting Initiative*).*Sustainability Reporting Guidelines*.
- Herreros, A., 2000. *Diseño de controladores robustos multiobjetivo por medio de algoritmos genéticos*. Tesis Doctoral. Valladolid (España): Universidad de Valladolid.
- Ibrahim, H.G., 2015. “Sustainability Optimization in Manufacturing Enterprises”. *12th Global Conference on Sustainable Manufacturing*. vol. 26.
- Ismail, M.; Bandyopadhyay, A. ; Das, S., 2013. “PARAMETRIC OPTIMIZATION OF SUBMERGED ARC WELDING USING L9 ORTHOGONAL ARRAY”. *Jl. AEI* 83, DOI: 10.22485/jaei/2013/v83/i1/119918.
- ISO, 1999. (*International Organization for Standardization*) *Environmental Management-Environmental Performance Evaluation-Guidelines, ISO 14031:1999*.
- Japan Science and Technology Agency, 1995. *A Systematic Analysis of Science and Technology in Japan, National Institute of Science and Technology Policy (NISTEP)*.
- Jiménes, F.; Gómez-Skarmeta, A.F. ; Sánchez, G., 2001 of Conference. ““Un algoritmo evolutivo para optimización multiobjetivo””. En: (ed.)^(eds.), *IX Conferencia de la Asociación Española para la Inteligencia Artificial*,. Gijón (España). , vol., pp.
- Joung, C.B.; Carrella, J.; Sarkara, P. ; Fenga, S.C., 2012. “Categorization of indicators for sustainable manufacturing”. *Ecological Indicators*, 24, pp. 148-157.

- Kalyanmoy, D.; Amrit, P.; Sameer, A. ; Meyarivan, T., 2002. “A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm:NSGA-II”. *IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION*, VOL. 6, .
- Krajnc ; Glavic, 2005. “How to compare companies on relevant dimensions of sustainability”. *Ecol Econ* 55, pp. 551–563.
- Krajnc, D. ; Glavi , P., 2003. “Indicators of sustainable production”. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 5 (3), pp. 279-288.
- Kurpati, A.; Azarm, S. ; Wu, J., 2002. ““Constraint handling improvement for multiobjective genetic algorithms””. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 23, pp. pp.204-213.
- Labuschagne, C.; Brent, A. ; van Erck, R., 2005. “Assessing the sustainability performances of industries”. *J. Clean. Prod*, 13 (4), pp. 373–385.
- Leiva, M.A., 2001. *Localización óptima de condensadores en un sistema de distribución eléctrico vía algoritmos genéticos* Tesis de Grado. Santiago (Chile): Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Leyland, G., 2002. *Multi-objective optimization applied to industrial energy problems* Doctoral Thesis. Lausanne (Suiza): École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Madanchi, N.; Thiede, S.; Sohdi, M. ; Herrmann, C., 2019. *Development of a Sustainability Assessment tool for manufacturing Companies en Sebastian Thiede And Cristoph Herrmann. Eco- Factories of the future.* pag 198: ISBN 978-3-319-93729-8.

- Mihelcic, J.; Crittenden, J.; Small, M.; Shonnard, D.; Hokanson, D.; Zhang, Q.; Hui, C.; Sorby, S.; James, V.; Sutherland, J. ; Schnoor, J., 2003. “Sustainability science and engineering: the emergence of a new metadiscipline. ”. *Environ. Sci*, 37, pp. 5234–5314.
- Moradpour, M.A.; Hashemi, S.H. ; Khalili, K., 2015. “Multi-objective Optimization of Welding Parameters in Submerged Arc Welding of API X65 Steel Plates”. *JOURNAL OF IRON AND STEEL RESEARCH, INTERNATIONAL* 22, pp. 870-878.
- Nouira, I.; Frein, Y. ; Hadj- Alouane, A.B., 2014. “Optimization of manufacturing systems under environmental considerations for a greenness- dependent demand”. *Int. J. Production Economics*, 150, pp. 188-198.
- OECD CEI, 2003. “OECD Environmental Indicators: Development, Measurement and Use, OECD Environmental Performance and Information Division”.
- OECD Toolkit, 2011. *OECD Sustainable Manufacturing Toolkit. OECD*.
- Om, H. ; Pandey, S., 2014. “Modelling and optimization of advanced submerged arc welding process for stainless steel cladding”. *International Journal on Mechanical Engineering and Robotics*, 2 (2).
- Orozco, J.D.L., 2005. *Obtención de un índice simple para evaluar contaminación ambiental térmica en locales cerrados destinados a la elaboración de alimentos. . Tesis Doctoral: Universidad de Girona.*

- Parris, T.M. ; Kates, R.W., 2003. "Characterizing and measuring sustainable development". *Annual Review of Environment and Resources*, 28, pp. 559-586.
- Rao, R.V. ; Rai, D.P., 2017. "Optimization of submerged arc welding process parameters using quasi-oppositional based Jaya algorithm". *Journal of Mechanical Science and Technology*, 31, pp. 2513-2522, DOI: 10.1007/s12206-017-0449-x
- Rosen, M.A. ; Kishawy, H.A., 2012. *Sustainable Manufacturing and Design: Concept, Practices and Needs. Sustainability*.
- Saadoon, A.M., 2016. *Utility- Fuzzy Taguchi Optimization Multiple Quality Factors of Submerged Arc Welding*. A Thesis Submitted to the Collage of Engineering University of Baghdad in Partial Fulfillment of the Degree of Master of Science in Mechanical Engineering: University of Baghdad.
- Saaty, T.L., 1980. *The analytic Hierarchy process. Planning, priority setting, resource allocation*. New York: Mc Graw Hill.
- Saaty, T.L., 2010. "Principia Mathematica Decernendi". *RWS Publications*.
- Sailender, M.; Reddy, G.C. ; Venkatesh, S., 2018. "Influences of process parameters on weld strength of low carbon alloy steel in purged SAW". *Materials Today: Proceedings*, 5, pp. 2928-2937.
- SAM Index, 2007. *The Dow Jones Sustainability Index (DJSI)*.

- Sánchez, G., 2002. *Diseño y evaluación de algoritmos evolutivos multiobjetivo en optimización y modelación difusa*. Tesis Doctoral. Murcia (España): Universidad de Murcia,.
- Sarkar, P., 2011. "Sustainable Manufacturing Indicator Repository". *Proceedings of the ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE*. Washington, DC, USA.
- Schmidt, W. ; Taylor, A., 2006. "Ford of Europe's product sustainability index. ". *Proceedings of 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*. Leuven, Belgium.
- Singh, B., 2017. "OPTIMIZATION OF HEAT AFFECTED ZONE IN SUBMERGED ARC WELDING ". *International Journal of Advance Research in Science and Engineering*, 6 (6).
- SMIR, 2011. "Sustainable Manufacturing Indicator Repository".
- Soodamani, R. ; Liu, Z.Q., 2000. "'GA-based learning for a model-based object recognition system'". *International Journal of Approximate Reasoning* 23, pp. pp.85-109.
- Sproesser, G.; Chang, Y.-J.; Pittner, A.; Finkbeiner, M. ; Rethmeier, M., 2015. "Life Cycle Assessment of welding technologies for thick metal plate welds". *Journal of Cleaner Production*, xxx, pp. 1-8.

- Srinivasulu, K.R., 2013. "OPTIMIZATION & PREDICTION OF WELDING PARAMETERS AND BEAD GEOMETRY IN SUBMERGED ARC WELDING ". *International Journal of Applied Engineering Research and Development*, 3 (3), pp. 1-6.
- Tamang, S. ; Singh, N.K., 2015. "OPTIMISATION OF OUTPUT PARAMETER OF SUBMERGED ARC WELDING BY RESPONSE SURFACE METHODOLOGY". *Proceedings of the 17th ISME Conference*
- Toscano, G., 2001. *Optimización multiobjetivo usando un micro algoritmo genético.*
- UN-CSD, 2007. (*The United Nations Committee on Sustainable Development*). *Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodologies.*
- Valls, F.W., 2006. "*Procedimientos para la evaluación, análisis y diagnóstico de la calidad en destinos turísticos de sol y playa.*," Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. UMCC: UMCC.
- Van Veldhuizen, D.A.y.L., G.B, 2000. "Multiobjective evolutionary algorithms: analyzing the state-of-the-art". *Evolutionary Computation*, 8, pp. pp.125-145.
- Vedrtnam, A.; Singh, G. ; Kumar, A., 2018. "Optimizing submerged arc welding using response surface methodology, regression analysis, and genetic algorithm". *Defence Technology*, 14, pp. 204-212.
- Veleva ; Ellenbecker, 2001. "Indicators of sustainable production: framework and methodology". *J Clean Prod* 9,pp. 519–549.

Vimal, K.E.K. ; Raja, A., 2015. “Modelling, assessment and deployment of strategies for ensuring sustainable shielded metal arc welding process e a case study”. *Journal of Cleaner Production*, 93, pp. 364-377.

Vimal, K.E.K.; Vinodh, S. ; Raja, A., 2017. “Optimization of process parameters of SMAW process using NN-FGRA from the sustainability view point”. *J Intell Manuf*, 28, pp. 1459-1480, DOI: 10.1007/s10845-015-1061-5.

Wal-mart SPI, 2009. *Supplier Sustainability Assessment: 15 Questions for Suppliers*.

WMF, 2018. *World Manufacturing Forum*.

Wolf, K.; Scheumanna, R.; Minkova, N.; Changa, Y.-J.; Neugebauer, S. ; Finkbeiner, M., 2015. “Selection criteria for suitable indicators for value creation starting with a look at the environmental dimension”. *12th Global Conference on Sustainable Manufacturing*. pp. 24-29.

ANEXOS

Anexo 1:

Resultados de los experimentos realizados.

I [A]	U [V]	S [m/h]	B [mm]	P [mm]	R [mm]	Gw [g]	Gf [g]	Gs [g]	AD [mm2]	AB [mm2]
200	20	63	6,54	1,4	0,78	20	69	100,9	4,56	1,65
300	20	63	7,84	2	0,67	53	157	118,8	6,74	6,88
200	30	63	8,01	2,72	0,91	47	165	151,7	6,35	5,44
300	30	63	9,92	2,65	0,79	93	294	163,6	10,27	10,39
200	25	41	9,03	2,25	1,06	42	127	132,6	6,35	5,36
300	25	41	11,54	2,57	0,78	90	322	140,6	10,45	11,04
200	25	85	6,87	1,7	0,66	11	35	117,4	2,77	1,33
300	25	85	7,37	2,36	0,46	65	220	137,8	7,66	6,45
250	20	41	8,69	1,74	0,98	54	168	107,7	7,76	6,63
250	30	41	10,8	2,85	1,07	83	294	162,6	9,78	9,95
250	20	85	4,85	1,47	0,57	28	98	101,8	4,79	2,48
250	30	85	8,37	2,32	0,75	42	147	154,6	4,88	5,85
250	25	63	7,81	2,16	0,78	46	145	126,9	5,98	6,21
250	25	63	7,82	2,26	0,89	49	169	134,4	6,38	6,43
250	25	63	7,73	1,92	0,8	44	155	134,4	5,76	6,4
200	20	63	5,61	1,45	0,75	8	28	97,5	3,03	1,83
300	20	63	7,33	1,96	0,64	60	199	117,6	7,66	7,03
200	30	63	8,25	2,48	0,88	55	185	147,5	7,4	5,27
300	30	63	9,15	3,13	0,8	84	264	157,2	9	10,17
200	25	41	9,71	2,02	1,1	52	157	125	7,68	5,51
300	25	41	9,96	2,79	0,88	83	278	140,7	9,55	10,39
200	25	85	5,13	1,66	0,74	22	65	125,3	4,16	1,66
300	25	85	7,26	2,32	0,39	52	175	132,9	5,93	6,6
250	20	41	8,77	1,69	1,05	50	157	116,1	7,18	6,49
250	30	41	9,66	2,91	1,15	74	215	156,3	8,52	9,87
250	20	85	5,83	1,46	0,46	32	92	100,7	5,28	2,7
250	30	85	8,6	2,58	0,61	39	139	145,8	4,44	5,7
250	25	63	8,64	2,26	1,02	33	107	131	4,33	5,83
250	25	63	6,98	1,98	0,88	60	196	126,6	7,88	5,87
250	25	63	8,56	2,22	0,88	59	192	132,8	7,69	6,09
200	20	63	6,88	1,3	0,82	9	33	106,1	3,21	2,29
300	20	63	8,02	1,84	0,58	65	205	117,7	8,4	7,69
200	30	63	8,38	2,51	0,86	43	146	143,4	5,82	5,53
300	30	63	10,45	3,08	0,81	87	270	162,9	9,4	10,89
200	25	41	8,61	2,16	1,08	40	142	124,9	6,03	5,41
300	25	41	10,24	2,6	0,95	85	253	139,1	9,82	10,53
200	25	85	4,85	1,63	0,62	13	43	124,2	2,98	1,59
300	25	85	8,63	2,49	0,52	55	174	131,5	6,43	6,91
250	20	41	8,27	1,69	0,77	62	207	112,4	8,79	6,57
250	30	41	10,46	2,84	0,9	98	347	153,9	11,73	10,15
250	20	85	6,14	1,34	0,66	22	68	107,3	3,99	2,8
250	30	85	6,74	2,71	0,66	30	95	145,7	3,22	6,23
250	25	63	7,44	2,12	0,82	40	121	127,1	5,23	6,44
250	25	63	8,04	2,11	0,71	33	95	136,2	4,29	6,22
250	25	63	8,35	2,37	0,81	33	110	129,2	4,41	6,06