

Análisis del desempeño de la programación de operaciones con base en medidas de sostenibilidad en las organizaciones: una revisión sistemática de literatura

David José Bautista Zárate

Trabajo de Grado para Optar al título de Ingeniero Industrial

Director

PhD. Juan Felipe Reyes Rodríguez

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físico - Mecánicas
Escuela de Estudios Industriales y Empresariales
Ingeniería Industrial
Bucaramanga
2024

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción.....	10
1. Planteamiento del Problema	12
2. Objetivos	15
2.1 Objetivo General	15
2.2 Objetivos Específicos	15
3. Marco de Referencia	15
3.1 Antecedentes Investigativos	15
3.1.1 Trabajos de grado precedentes	16
3.1.2 Revisiones de literatura previas	18
3.2 Marco Teórico.....	19
3.2.1 Sostenibilidad en las organizaciones.....	19
3.2.2 Sostenibilidad en las operaciones.....	20
3.2.3 Programación de operaciones	21
3.2.4 Revisión sistemática de literatura.....	22
4. Marco Metodológico	22
4.1 Planificación de la Revisión Sistemática de la Literatura	23
4.1.1 Identificación de la necesidad de investigación	23
4.1.2 Protocolo de búsqueda.....	23
4.2. Identificación de Artículos Idóneos	24
4.2.1 Análisis de la información	26
5. Resultados.....	26
5.1 Análisis Bibliométrico.....	26

5.1.1 Prototipado y ecuación de búsqueda	27
5.1.2 Visualización de resultados bibliométricos	30
5.1.2.1 Producción científica anual.	30
5.1.2.2 Publicaciones por autor.....	31
5.1.2.3 Países destacados.....	32
5.1.2.4 Revistas con mayor número de publicaciones.	33
5.1.2.5 Índice h de los artículos hallados.	34
5.1.2.6 Los 10 artículos más citados.	35
5.1.2.7 Número de citas por año.	35
5.1.2.8 Procesamiento de datos.....	36
5.1.2.9 Co-ocurrencia de palabras clave.....	36
5.1.2.10 Co-autoría.....	40
5.1.2.11 Co-citación.	43
5.2 Revisión Sistemática de la Literatura	48
5.2.1 Hacia un abordaje concreto de la programación de operaciones sostenible desde diferentes concepciones.....	48
5.2.2 Sistemas de manufactura	53
5.2.3 Enfoques sostenibles en la programación de operaciones	54
5.2.3.1 Enfoque de eficiencia energética.....	55
5.2.3.1.1 Subenfoque de producción por tarificación con precio variable de energía.	58
5.2.3.1.2 Subenfoque de gestión efectiva de las máquinas en su cambio de estado.....	63
5.2.3.1.3 Subenfoque de control de velocidad de procesamiento de la maquinaria y secuenciación.....	66
5.2.3.2 Enfoque de reducción de Huella de Carbono.....	74

5.2.3.2.1 Subenfoque de integración con cadena de suministro.....	79
5.2.3.2.2 Gestión de ciclo de vida.....	85
5.2.3.3 Enfoque de bienestar social.....	87
5.2.4 Efectividad de la programación de operaciones sostenible en la optimización de procesos industriales.....	91
5.2.5 Discusión de los algoritmos en la programación de operaciones sostenible	97
6. Agendas de Investigación Propuesta.....	103
7. Conclusiones	105
Referencias Bibliográficas.....	107

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Cumplimiento de objetivos	11
Tabla 2. Términos de la ecuación de búsqueda	27
Tabla 3. Protocolo de búsqueda exploratoria	28
Tabla 4. Ecuación de búsqueda definitiva.....	29
Tabla 5. Investigaciones con enfoque de eficiencia energética	71
Tabla 6. Investigaciones con enfoque de reducción de huella de carbono.....	85
Tabla 7. Investigaciones con enfoque de bienestar social.....	90
Tabla 8. Ejemplos de métricas de desempeño en algoritmos multiobjetivo	96

Lista de Figuras

Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA 2020.....	25
Figura 2. Etapas del análisis bibliométrico.....	27
Figura 3. Producción científica anual.....	30
Figura 4. Publicaciones por autor	31
Figura 5. Países destacados	33
Figura 6. Revistas con mayor número de publicaciones	34
Figura 7. Índice h de los artículos encontrados	35
Figura 8. Distribución de sistemas de manufactura en artículos	54
Figura 9. Distribución de enfoques en programación de operaciones sostenible	57

Lista de apéndices

(Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS)

Apéndice A. Tabla de artículos seleccionados.

Apéndice B. Artículo de carácter publicable.

Apéndice C. Prototipado de la ecuación de búsqueda.

Apéndice D. Artículos más citados.

Apéndice E. Número de citas por año de los 10 artículos más citados.

Apéndice F. Frecuencia de las palabras clave en el periodo 2017 – 2023.

Apéndice G. Co-ocurrencia de palabras clave.

Apéndice H. Mapa temático de los datos hallados.

Apéndice I. Co-ocurrencia de author keywords.

Apéndice J. Evolución temática 2017-2023.

Apéndice K. Mapa de colaboración entre países.

Apéndice L. Red de cocitación de países

Apéndice M. Países de los autores de correspondencia

Apéndice N. Red de co-citación de autores

Apéndice O. Tabla de redes de autoría más influyentes.

Apéndice P. Las referencias más citadas en la red de co-citación

Apéndice Q. Las referencias locales más citadas

Apéndice R. Red de co-citación de autores

Apéndice S. Mapa de la red de co-citación del autor Li, X.

Apéndice T. Los 10 autores citados mínimo 20 veces en la red de co-citación

Apéndice U. Histografía de la temática de análisis

Apéndice V. Referencias contenidas en la Historiografía de la temática de análisis

Resumen

Título: Análisis del desempeño de la programación de operaciones con base en medidas de sostenibilidad en las organizaciones: una revisión sistemática de literaturas*

Autor: David José Bautista Zárate**

Palabras Clave: Programación de operaciones, sostenibilidad, organizaciones, revisión sistemática.

Descripción: La integración de medidas de sostenibilidad en la programación de operaciones es un aspecto fundamental para alcanzar un desarrollo sostenible en las organizaciones generadoras de bienes, que enfrentan una fuerte presión por parte de sus grupos de interés cada vez más exigentes frente a la crítica situación ambiental y social que aqueja la realidad contemporánea, y que impone la adopción de enfoques sostenibles en la producción. De ahí que, en la presente investigación se desarrolle una revisión sistemática de la literatura con el propósito de caracterizar teorías, enfoques y metodologías en torno al desempeño de la programación de operaciones con base en medidas de sostenibilidad en las organizaciones documentadas en la literatura científica. A partir de esta investigación se presentan las diferentes tendencias en torno a los enfoques sostenibles en la programación de producción en sistemas de manufactura como *job shop*, *flow shop*, *parallel machine* y *single machine*, y que permiten responder a los retos impuestos tanto por los entes gubernamentales como por sus clientes en el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible. Los enfoques sostenibles preponderantes en la comunidad científica en este documento son: el enfoque de eficiencia energética, el enfoque de reducción de huella de carbono y el enfoque de bienestar social. Estos revelan el desempeño de estas medidas de sostenibilidad en organizaciones manufactureras mediante estrategias como la secuenciación óptima de los trabajos, entre otros. Por este motivo, los resultados emanados de este proceso investigativo inherentemente se constituyen en fundamento para la toma de decisiones a nivel operativo para las empresas manufactureras que quieran optimizar su producción de forma responsable.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Programa de Ingeniería Industrial. Juan Felipe Reyes Rodríguez. PhD en Management.

Abstract

Title: Analysis of the performance of Operations Scheduling based on sustainability measures in organizations: a systematic literature review*

Author(s) : David José Bautista Zárate **

Key Words: Operations scheduling, organizations, sustainability, systematic review..

Description : The integration of sustainability measures in operations scheduling is a fundamental aspect to achieve sustainable development in goods-generating organizations, which face strong pressure from their increasingly demanding stakeholders in the face of the critical environmental and social situation that plagues contemporary reality, and which requires the adoption of sustainable approaches in production. Therefore, in this research, a systematic review of the literature is developed with the purpose of characterizing theories, approaches and methodologies around the performance of operations programming based on sustainability measures in organizations documented in the scientific literature. Based on this research, the different trends around sustainable approaches in production programming in production systems such as *job shop*, *flow shop*, *parallel machine* and *single machine* are presented, which allow responding to the challenges imposed by government entities and their clients in meeting sustainable development goals. The predominant sustainable approaches in the scientific community in this document are energy efficiency, carbon footprint reduction, and social welfare. These reveal the performance of these sustainability measures in manufacturing organizations through strategies such as optimal job sequencing, among others.

* Degree Work

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Industrial and Business Studies. Industrial Engineering Program. Director: Juan Felipe Reyes Rodríguez Management PhD.

Introducción

En las últimas décadas, la sostenibilidad se ha convertido en un tema crítico en la gestión de las organizaciones. La creciente conciencia sobre el impacto de las actividades empresariales en el medio ambiente, la sociedad y la economía ha llevado a las empresas a implementar estrategias y prácticas más sustentables. En este contexto, la instauración integral de la sostenibilidad en las corporaciones es un proceso complejo que involucra la toma de decisiones responsables en los niveles organizacionales, definidos como: nivel estratégico, táctico y operativo (Chofreh & Goni, 2017). Esta opción decisoria es un reto de enormes proporciones en el proceso de transformación hacia un negocio sostenible, debido a la implicación en dos aspectos: primero, en las dimensiones social, ambiental y económica; segundo, en las dimensiones organizacionales de los niveles estratégico, táctico y operativo (Ahmed & Sundaram, 2012). Cada una de las dimensiones esbozadas concierne diferentes cuestiones y alcances en la toma de decisiones.

En cuanto a la dimensión operativa, particularmente en el contexto de las organizaciones generadoras de bienes, comprende los aspectos de programación de operaciones toda vez que busca definir la mejor manera de asignar los recursos disponibles para atender los requerimientos de la demanda; de tal modo que, se cumplan los objetivos organizacionales. De ahí que, la programación de operaciones abarca diferentes técnicas controladas en tiempo real que permite optimizar la producción de manera sostenible, mediante el monitoreo constante en dicho proceso. Dentro de este contexto, es relevante visibilizar el abanico de teorías, enfoques y metodologías aplicadas en la industria en la temática objeto de estudio.

Ahora bien, la programación de operaciones sostenibles debe entenderse como un enfoque que busca diseñar modelos de programación matemáticos estableciendo una función objetivo, y un conjunto de restricciones asociadas con la optimización de la producción en

cuanto a las dimensiones de la sostenibilidad, mediante la identificación de prácticas sustentables y su incorporación en las decisiones a nivel operativo de las organizaciones.

En ese orden, se considera necesario realizar una revisión sistemática de la literatura para el análisis del desempeño de la programación de operaciones con base en medidas de sostenibilidad en las organizaciones, la cual busca identificar en documentos de revistas internacionales de alto impacto, la variedad de teorías, enfoques y metodologías puestas en marcha en las organizaciones productivas para mejorar su desempeño, a través de algoritmos matemáticos que permitan su crecimiento económico dentro del entorno global al que pertenecen.

El presente documento constará de cinco secciones claramente definidas y organizadas de manera lógica y estructurada. En la primera y segunda sección, se expondrá el planteamiento problema a investigar y se exhibirán los objetivos del estudio respectivamente. En la tercera sección, se presentará el marco de referencia, que estará compuesto por el marco de antecedentes y el marco teórico; posteriormente, se muestra el marco metodológico para la realización del estudio. Finalmente, se relacionarán los resultados del proyecto, los cuales se constituyen en el análisis bibliométrico, la revisión sistemática de la literatura con sus respectivas conclusiones y recomendaciones, y las respectivas referencias bibliográficas abordadas.

Tabla 1

Cumplimiento de objetivos

Objetivo	Cumplimiento
Identificar la bibliografía relacionada con el desempeño de la programación de operaciones con base en medidas de sostenibilidad en las organizaciones.	Capítulo 4 y 5.1

Realizar un análisis bibliométrico sobre la literatura existente en bases de datos sobre el desempeño de la programación de operaciones con base en medidas de sostenibilidad en las organizaciones.	Capítulo 5.1
Discutir las teorías, enfoques y metodologías implementadas sobre el desempeño de la programación de operaciones con base en medidas de sostenibilidad en las organizaciones.	Capítulo 5.2
Elaborar un artículo de carácter publicable sobre los principales resultados del trabajo de investigación desarrollado	Apéndice B. Artículo de carácter publicable.

1. Planteamiento del Problema

La Comisión Brundtland de las Naciones Unidas en 1987 introdujo la definición de “desarrollo sostenible”. Allí se planteó que su existencia es imperativa a que las generaciones del presente satisfagan sus necesidades; sin comprometer las de generaciones futuras (UN Secretary-General & World Commission on Environment and Development, 1987). Dicho concepto sentó las bases del inicio de un proceso de transformación en las organizaciones, que ha venido acentuándose de manera significativa durante el siglo XXI; justamente con el establecimiento de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) en el año 2000 y posteriormente con los denominados Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en el 2015. De ahí que, en el ámbito corporativo, la sostenibilidad debe ser entendida como el esfuerzo sistemático de las organizaciones para conseguir el equilibrio entre su labor productiva enfocada a la consecución de metas económicas y el objetivo de aminorar los daños al ambiente y a la sociedad; de tal forma que se maximicen los beneficios para los entornos naturales y sociales (Dyllick & Hockerts, 2002).

Inicialmente, el enfoque de la sostenibilidad se centraba en el aspecto económico, y no se prestaba suficiente atención a la categoría ambiental. Sin embargo, las empresas han comenzado a reconocer su importancia adoptando prácticas socialmente responsables (Giret et al., 2015). Dentro de este contexto, se adquiere mayor conciencia sobre la relevancia de la

sostenibilidad en las empresas, asumiendo un rol proactivo en la promoción de prácticas sostenibles en lo organizacional y en la sociedad en general. Esto implica la adopción de medidas orientadas a reducir el impacto ambiental de las operaciones en la industria para fomentar la transparencia y la rendición de cuentas. Al hacerlo, las empresas pueden mejorar su reputación y su relación con sus clientes y demás grupos de interés; paralelamente, contribuyen a un futuro sostenible y responsable.

En consecuencia, la programación de operaciones asume un rol protagónico, por cuanto es un componente fundamental en la eficiencia de los procesos industriales. Específicamente en el mundo global caracterizado por un mercado competitivo en el cual los márgenes de ganancia suelen ser mínimos. Por esta razón, es imprescindible garantizar una optimización responsable a nivel operativo en las empresas; aunque no es una tarea fácil, se deben establecer diferentes medidas desde la programación de la producción.

En concomitancia, la realización de la presente investigación referente al desempeño de la programación de operaciones en las empresas con base en medidas de sostenibilidad adquiere pertinencia ante los ingentes esfuerzos globales por la preservación del ambiente y la adopción de prácticas empresariales responsables; a través de la implementación de medidas amigables en la gestión del nivel operativo. Cabe resaltar que, las empresas que no adopten este paradigma asumen el riesgo de rezagarse en un mercado cada vez más exigente y competitivo, ante la pérdida de confianza de sus consumidores.

En el marco de la programación de operaciones con base en medidas de sostenibilidad en las organizaciones, la revisión sistemática de literatura desempeña una función crucial para identificar aquellos desarrollos investigativos que se han realizado en los años precedentes, mediante la instauración de métricas sostenibles en la programación de la producción en empresas generadoras de bienes, enfocadas en el medio ambiente, la responsabilidad social y la eficiencia económica. Por lo anterior, se hace necesario documentar las distintas teorías,

enfoques y metodologías relacionadas al tópico de análisis en la ventana temporal de 2017 al 2023, a fin de comprender su evolución y desarrollo. De esta manera, se plantea la caracterización de líneas y temáticas de estudio que permitan dimensionar la sostenibilidad en la programación de operaciones, como, por ejemplo, la inclusión de indicadores de huella de carbono en la toma de decisiones de programación de operaciones, la utilización de fuentes de energía renovable en los procesos productivos, y el diseño de cadenas de suministro sostenibles. Por consiguiente, una revisión exhaustiva de la literatura permitirá identificar las mejores tendencias y prácticas en la programación de operaciones con respecto a las dimensiones de sostenibilidad en las organizaciones.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Caracterizar las teorías, enfoques y metodologías en torno al desempeño de la programación de operaciones con base en medidas de sostenibilidad en las organizaciones, documentadas en la literatura científica.

2.2 Objetivos Específicos

- Identificar la bibliografía relacionada con el desempeño de la programación de operaciones con base en medidas de sostenibilidad en las organizaciones.
- Realizar un análisis bibliométrico sobre la literatura existente en bases de datos sobre el desempeño de la programación de operaciones con base en medidas de sostenibilidad en las organizaciones.
- Discutir las teorías, enfoques y metodologías implementadas sobre el desempeño de la programación de operaciones con base en medidas de sostenibilidad en las organizaciones.
- Elaborar un artículo de carácter publicable donde se documenten los resultados obtenidos en la investigación.

3. Marco de Referencia

3.1 Antecedentes Investigativos

Para construir el marco de antecedentes del estudio en cuestión, se realizó una búsqueda de proyectos de grado relacionados con el tema de análisis: “la programación de operaciones con base en medidas de sostenibilidad en las organizaciones”. Es necesario mencionar que, durante el proceso de identificación de documentos en la biblioteca de la Universidad Industrial de Santander, no se encontraron trabajos desarrollados con la temática, por lo cual fue necesario iniciar el rastreo en literatura gris en el buscador Google Scholar. Adicionalmente, se consideraron dos proyectos de posgrado, uno de maestría y otro de doctorado, siendo fundamentales para la familiarización y estructura del marco de antecedentes. Seguidamente,

se identificaron dos revisiones de literatura fundamentales para el seguimiento del estudio retrospectivo. La revisión exhaustiva de estos proyectos de grado y revisiones sistemáticas mencionadas, permitieron establecer una base sólida para el marco de antecedentes y el desarrollo de la revisión sistemática de literatura desarrollada en el presente documento.

3.1.1 Trabajos de grado precedentes

Se consideraron proyectos de pregrado relacionados con la temática de investigación. El primero se relacionado con la aplicación de metaheurísticas aplicadas a la programación de producción de un taller de trabajo (*job shop*) (Ramos Zhunio & Freire Barrera, 2019). Se realizó desde una revisión de literatura para examinar los algoritmos para la resolución de problemas en talleres de maquinaria. Finalmente, arguye que las metaheurísticas denominadas de búsqueda tabú y recocido simulado son de las más eficientes según la literatura; siempre y cuando se seleccionen los criterios adecuados. Esta tesis permitió avizorar diferentes modelos metaheurísticos que se constituyeron en guía para el análisis de la revisión.

También, se consideró el proyecto de grado en el que se propuso plantear un modelo de programación de la producción en ambientes *job shop* flexibles bajo pedido, en una empresa del sector metalmecánico (Barrera Salgado & Millán Pineda, 2018). Como primera medida se analizó el flujo del sistema productivo, según la distribución de planta de la empresa y las maquinarias disponibles. Luego, se caracterizó cada orden de trabajo que se llevaba a cabalidad dentro del taller del negocio, y se tomaron mediciones de tiempos y secuencias de cómo se estaba llevando a cabo el proceso de fabricación. El modelo matemático primordialmente consistió en disminuir los tiempos de procesamiento de cada tarea para disminuir el *makespan* total de cada producto. Dicho documento contribuyó a la investigación, toda vez que se trata de un caso de optimización de la producción desde la programación de operaciones con el planteamiento de un logaritmo matemático, con una función objetivo y restricciones asociadas a la disminución del tiempo de procesamiento.

En el abanico de las tesis de pregrado se menciona el trabajo que tuvo como objetivo la minimización del consumo energético de la producción dentro de un taller de flujo de permutación sin espera, optimizando el tiempo de uso teniendo las máquinas encendidas sin estar procesando ninguna orden de trabajo (Romero Parias, 2021). Para esto, se propuso un modelo de programación lineal, en el que se plantea la mejor secuencia de órdenes de trabajo dentro del taller en las diferentes máquinas disponibles. En este modelo, se comprobó en instancias productivas de diferentes tamaños, llegándose a obtener valores bajos de coste energético y *makespan* en comparación con otros algoritmos, donde el propósito de la función principal es la mejora del *makespan* sin consideraciones ambientales.

Como tesis de posgrado se menciona la investigación que tiene como finalidad diseñar una metodología multiobjetivo para la programación de la producción en talleres de trabajo flexibles del sector metalmecánico para mejorar el rendimiento en la generación de bienes en cada dimensión de la sostenibilidad (Coca Ortegon, 2021). Metodológicamente, se seleccionaron diferentes variables y se diseñaron tres métodos basados en algoritmos genéticos en la secuenciación de pedidos de un sistema de fabricación del tipo *job shop* flexible y se aplicaron en una compañía constituida, para determinar cuál presentaba mejor desempeño en el indicador propuesto C-Metric. Se concluye con un modelo multiobjetivo de programación de la producción más eficiente. Adicionalmente, se menciona la importancia de la sostenibilidad en la gestión organizacional, desde la perspectiva de la programación de operaciones. El aporte de este proyecto a la investigación presente es fundamental, ya que se enmarca en el mismo tema de estudio, lo cual permite tomarlas como punto de referencia y saber de qué manera las dimensiones de la sostenibilidad pueden abordarse en la programación de operaciones en las organizaciones.

Por último, se encontró el proyecto de Maestría en Ingeniería Industrial que se planteó como objetivo proponer un modelo de programación de operaciones multiobjetivo y un

algoritmo evolutivo, para talleres de tipo *job shop* con consideración en la eficiencia energética de las diferentes máquinas utilizadas (Vallejo Cifuentes, 2017). En este sentido, propone un algoritmo genético multiobjetivo adaptativo para resolver el problema, y posteriormente con base en pruebas estadísticas y prácticas, se realiza la respectiva comparación del modelo planteado junto con otros tres algoritmos existentes en la literatura. En conclusión, el algoritmo propuesto por el autor es el más eficiente energéticamente, y es el que cuenta con el menor tiempo de producción.

Los proyectos de posgrado mencionados aportan a la presente investigación en cuanto proponen modelos matemáticos que buscan mejorar la eficiencia energética de un taller de tipo *job shop* desde la perspectiva de la programación de operaciones, lo cual concierne a la dimensión ambiental de la sostenibilidad y por consiguiente permite enmarcar esta medida como importante en las empresas generadoras de bienes para mejorar su desempeño.

3.1.2 Revisiones de literatura previas

Conforme el marco de antecedentes es imperativo recalcar el hecho de que el procedimiento a realizar es una revisión sistemática de literatura, por lo cual, es necesario considerar otras revisiones de años anteriores en la misma área de conocimiento. En primera instancia, se identificó el artículo que busca analizar el estado y progreso de la programación de operaciones sostenible entre los años 2010 y 2018, se examinaron 50 artículos en los que se proponen diferentes modelos matemáticos identificando objetivos, restricciones e indicadores de producción sostenible (Akbar & Irohara, 2018). El estudio permitió entrever el estado de los estudios precedentes en torno a la programación de operaciones con enfoque sostenible, y su clasificación según cada modelo matemático planteado.

Otra revisión pertinente para mencionar es un estado del arte de la programación de operaciones sostenible en las dimensiones económicas y ambientales en la ventana del 2008 al

2014. Aborda factores que caracterizan a las operaciones manufactureras sostenibles, desde el componente energético, según la meta de la función objetivo establecida (Giret et al., 2015).

Al realizar un análisis crítico es dable afirmar que todos los estudios traídos a colación conciben la programación de operaciones desde el desarrollo sostenible, lo cual se deja entrever en las revisiones de literatura al demostrarse un crecimiento vertiginoso de las investigaciones en los últimos años que buscan responder primeramente, a unas necesidades de producción según la demanda para ser rentables financieramente y en segundo lugar responder a unas necesidades ambientales que han sido declaradas por organismos internacionales integrados por países hegemónicos como es el caso de los ODS; por cuanto fundamentalmente comentan en general la importancia de la eficiencia energética y la reducción de huella de carbono.

En contraposición, los documentos realizan análisis casuísticos de la industria manufacturera en contextos específicos como China, Estados Unidos, India e incluso Hispanoamérica, a partir de los cuales se diseñan modelos como posible respuesta a cada problemática; dejando de lado otros indicadores de sostenibilidad como la reducción de las emisiones sonoras, gestión del ciclo de vida de los productos, bienestar de los trabajadores y de la comunidad. De ahí que, la programación de operaciones sostenible sea vista desde una visión reduccionista al considerar primordialmente la eficiencia económica y el componente ambiental desde los impactos generados por el consumo energético y la huella de carbono.

Por esta razón surgió como tema de investigación precisar la existencia de teorías, enfoques y metodologías en torno al desempeño de la programación de operaciones con base en medidas de sostenibilidad en las organizaciones.

3.2 Marco Teórico

3.2.1 Sostenibilidad en las organizaciones.

El enfoque de triple resultado, también conocido como enfoque de triple línea, es un marco de gestión que tiene en cuenta no solo el resultado económico, sino también los

resultados sociales y ambientales de una organización. Este enfoque considera que una empresa exitosa no solo debe ser rentable económicamente, sino que también debe ser socialmente responsable y sostenible ambientalmente. El triple resultado se refiere a tres dimensiones interrelacionadas: el resultado económico (beneficio), el resultado social (impacto en la comunidad y las personas) y el resultado ambiental (impacto en el medio ambiente). El objetivo es encontrar un equilibrio entre estos tres resultados, de modo que se logre el éxito sostenible de la organización (Sala, 2020).

Sabiendo que la sostenibilidad concierne a tres conceptos que serán tratados en este documento como las tres dimensiones de la sostenibilidad, hay que tener en cuenta que la sostenibilidad ambiental se refiere a la capacidad de la sociedad humana de satisfacer sus necesidades sin agotar los recursos naturales o degradar el medio ambiente. Esto implica alcanzar un equilibrio e interconexión entre las actividades humanas y los ecosistemas, permitiendo que estos últimos sigan regenerando los elementos necesarios para cumplir con dichas necesidades, sin disminuir la diversidad biológica. También, la sostenibilidad ambiental abarca las cuestiones relacionadas con las emisiones, el uso de la energía, los desechos, la contaminación y el agotamiento de los recursos naturales, con el objetivo de mantener y preservar el medio ambiente a largo plazo (Farrukh et al., 2022). La sostenibilidad social se refiere a las buenas prácticas desde la responsabilidad social en un negocio, es decir que todas las diferentes prácticas que se realicen en la operación de la empresa busquen generar un valor para la sociedad y contribuyan al bienestar de la comunidad. Estas pueden incluir la garantía de salarios justos y la provisión de cobertura de salud para los trabajadores, la ergonomía en los diferentes puestos de trabajo (Alhaddi, 2015).

3.2.2 Sostenibilidad en las operaciones

Para que un sistema de manufactura sea sostenible se deben instaurar diferentes prácticas en sus operaciones. Entre estas se encuentra la eficiencia energética, que implica la

disminución de la energía consumida para producir un bien o servicio específico, lo que implica maximizar el rendimiento energético mediante la optimización del consumo de energía en equipos y procesos, sin afectar la calidad o nivel del servicio (Patterson, 1996).

En el mismo ámbito se encuentra el uso de fuentes de energías renovables tales como la energía eólica o la energía solar para contribuir al aminoramiento de emisiones de gases de efecto invernadero y dependencia de combustibles fósiles. Por último, la responsabilidad social corporativa también es una práctica importante en la sostenibilidad de las operaciones de manufactura, porque implica el compromiso de la empresa con la comunidad y el medio ambiente; a través de acciones como la gestión adecuada de residuos, la conservación de recursos naturales y la promoción de prácticas justas y éticas en todas sus operaciones. Al implementar estas prácticas, las empresas pueden mejorar su impacto ambiental y social; al mismo tiempo que reducen costos y mejoran su eficiencia operativa.

3.2.3 Programación de operaciones

La programación de operaciones o programación de la producción puede definirse como aquel proceso de toma de decisiones relacionada con la asignación eficiente de los recursos disponibles en la producción de bienes y servicios a distintos órdenes de trabajo, de manera que se optimicen uno o más objetivos. Estos recursos naturalmente son máquinas o personal encargado de llevar a cabo las diferentes operaciones relativas a una orden de trabajo (Pinedo, 2008). Dentro de la programación de operaciones, existen tres modelos básicos de programación de la producción denominados: *flow shop*, *job shop* y *open shop*. El modelo *flow shop* es un concepto que se refiere a un tipo de sistema de producción en el que un conjunto de tareas ordenadas debe ser procesadas en una secuencia específica en una serie de estaciones de trabajo (Caldeira et al., 2020), donde cada tarea se realiza en cada estación de trabajo en un orden establecido. Un ejemplo típico de *flow shop* es una línea de ensamblaje, donde los trabajadores en la línea desempeñan el papel de procesadores o estaciones de trabajo (Garey

et al., 1976). Por otro lado, el *job shop* es un sistema donde cada orden de trabajo tiene requisitos y tiempos de procesamiento únicos, por lo que es pertinente personalizar el flujo de producción para cada trabajo individual (Arisha et al., 2001). Asimismo, es importante mencionar el modelo *open shop*, el cual es un tipo de producción en el que las tareas se pueden realizar en cualquier secuencia y cada una puede ser asignada a cualquier máquina o recurso disponible (Ahmadian et al., 2021).

3.2.4 Revisión sistemática de literatura

Una revisión sistemática de literatura es un compendio y análisis de diferentes documentos referentes a un tema de estudio en específico. Metodológicamente, se establece un protocolo de investigación para evitar los posibles sesgos y errores. Entre estas estrategias se encuentran: la búsqueda exhaustiva de artículos relevantes, la definición de criterios de selección precisos para incluir o excluir, la evaluación cuidadosa de los mismos, y finalmente la síntesis e interpretación de los resultados obtenidos. Este proceso sistemático se emplea para resultados fiables en las investigaciones existentes referentes a un tema determinado (Manterola et al., 2013). Dentro de una revisión sistemática es importante entablar el concepto de análisis bibliométrico, en cuanto este permite analizar de manera cuantitativa los documentos escogidos en la revisión; de ahí que, el análisis bibliométrico pueda definirse como un método que posibilita la exploración de la distribución de documentos científicos, lo que permite evaluar aspectos como la calidad, importancia e impacto científico de la información obtenida. Asimismo, este enfoque posibilitó una evaluación retrospectiva del proceso de generación de conocimiento y la divulgación de los avances científicos, al tiempo que permitió el análisis del desarrollo de áreas de estudio, autores más productivos, líneas de investigación, el consumo de publicaciones científicas y su obsolescencia, entre otros indicadores (Sanz-Valero & Casterá, 2014).

4. Marco Metodológico

La revisión sistemática de literatura es el punto de partida para compilar el compendio de hallazgos científicos disponibles sobre una pregunta o problema de investigación específico, a partir de un proceso explícito y riguroso para identificar diferentes estudios, evaluarlos de manera crítica y sintetizar las investigaciones relevantes (Salmond & Holly, 2011). De este modo, se comprende mejor la literatura sobre la temática de interés, se obtienen nuevas perspectivas y las tendencias más influyentes dentro de una especialidad (Aryadoust & Ang, 2021).

Esta metodología se caracteriza por implementar un proceso riguroso, replicable, científico y transparente; así como, responder de manera sistemática a los objetivos de investigación planteados (Eichler & Schwarz, 2019; Romero-Rodríguez et al., 2020). En este sentido, la revisión requiere la aplicación de estrategias a priori para la búsqueda de literatura, a través de criterios definidos y la construcción de un protocolo de investigación (Atkinson & Cipriani, 2018).

4.1 Planificación de la Revisión Sistemática de la Literatura

4.1.1 *Identificación de la necesidad de investigación*

La implementación de medidas sostenibles en la gestión de operaciones se ha convertido en una necesidad imperativa y la programación de operaciones sostenible permite a las empresas lograr la consecución de sus objetivos estratégicos, sin comprometer el futuro de la sociedad actual. Por consiguiente, se requiere el estudio del desempeño de la programación de operaciones con base en medidas de sostenibilidad, a fin de clasificar las metodologías, teorías y enfoques en la temática objeto de la investigación.

4.1.2 *Protocolo de búsqueda*

Se definió un protocolo de investigación con las estrategias de búsqueda de las publicaciones, selección de estudios preliminares, evaluación de la calidad de los documentos, extracción de datos relevantes y síntesis de los extraídos (Nidhra et al., 2013).

4.2. Identificación de Artículos Idóneos

Se implementó la metodología PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis*) por sus siglas en inglés. Se constituye en una guía para el desarrollo de revisiones de literatura con rigurosidad científica (Albhirat et al., 2024). La declaración PRISMA 2020 contiene una guía para evaluar efectos sobre intervenciones sanitarias; sin embargo, los ítems de la lista de verificación se aplican a revisiones sistemáticas sobre cualquier dominio de conocimiento (Page et al., 2021). Cada uno de los ítems de PRISMA 2020 son aplicables a revisiones con métodos mixtos (cuantitativo y cualitativo), están estandarizados y facilitan el tamizaje sistemático de la información recopilada (Page et al., 2021).

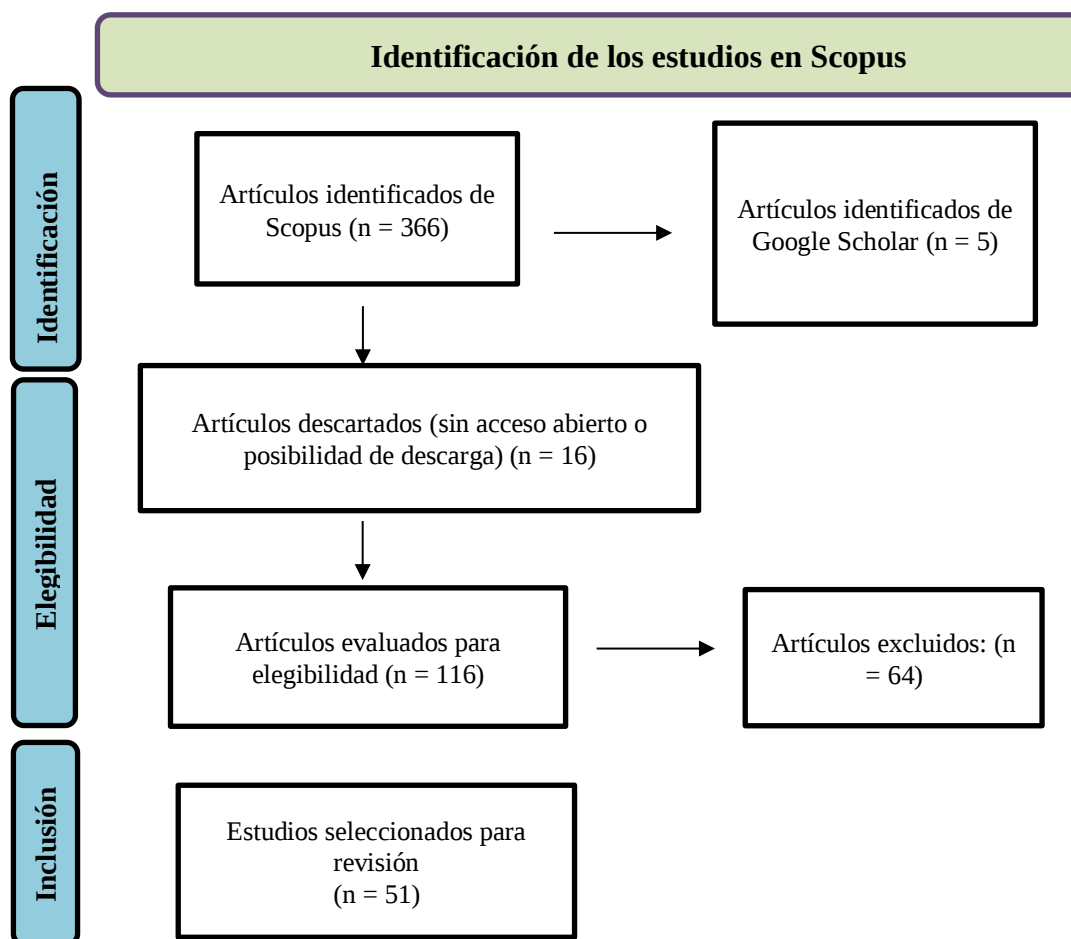
El diagrama de flujo PRISMA 2020 (Figura 1) contiene tres fases: identificación, elegibilidad e inclusión. Esta es la guía más común para otorgar rigurosidad a la búsqueda y justificar el proceso de selección de la información definitiva para el análisis sistemático (France et al., 2019).

En este sentido, se conformó una muestra de 366 documentos obtenidos de la base de datos Scopus y 5 del buscador Google Scholar; a los cuales se les realizó lectura de título, resumen y palabras clave. No obstante, se excluyeron 16 que no permitían acceso abierto o de descarga. Posteriormente, se leyeron de manera rigurosa los resúmenes, a los que se les aplicaron criterios de exclusión determinándose la elegibilidad preliminar de 116 estudios y, prescindiendo de 64 de los mismos, debido a que se encontraron algunos estudios meramente descriptivos sin análisis argumentativo, y contenían el tema de programación de operaciones sin paradigma de sostenibilidad, entre otros. Para la selección de las publicaciones definitivas, se revisaron los objetivos, metodología y discusión/conclusiones. Al final, los manuscritos objeto de estudio fueron 51, en consideración a las siguientes razones:

- Pese a que se centraban en la programación de operaciones, se excluyeron artículos que no abordaban explícitamente medidas de sostenibilidad.
- Se excluyeron estudios que no aplicaban las medidas de sostenibilidad en programación de operaciones en entornos productivos reales o simulados.
- Carecían de rigurosidad científica y presentaban incongruencias con el alcance de los objetivos. Como, por ejemplo, se detectaron artículos fundamentados en literatura gris, incluyendo bases de datos como Opengray, Dialnet, OAIster. Asimismo, no existía conexidad entre el título, el problema de investigación, y los resultados.

Figura 1

Diagrama de flujo PRISMA 2020



Nota. (Page et al., 2021)

4.2.1 Análisis de la información

En este inciso, se analizó cada modelo de programación de operaciones propuesto en los artículos, entablando una clasificación del tipo modelo correspondiente y la dimensión de sostenibilidad en que se enfoca la ecuación objetivo. Adicionalmente, se identificó si al aplicar los modelos de programación con base en medidas de sostenibilidad se presentan mejoras de desempeño en el taller de trabajo u organización donde son examinados.

Para el análisis de los documentos se utilizó el software NVivo (v12), como facilitador del tratamiento de datos cualitativos en un proceso paso a paso que contiene: exploración, codificación, consulta, visualización y toma de notas para compilar el documento definitivo.

Como criterio de validez, se utilizó el propuesto por Rose & Johnson, (2020), referido a la comprobación de los miembros. Este método implica compartir los datos recopilados con los participantes de la investigación y recibir comentarios continuos sobre el proceso. Para este proyecto se recurrió a dos investigadores expertos en la investigación mixta y en el desempeño de la programación de operaciones, con base en medidas de sostenibilidad en las organizaciones. Los académicos realizaron correcciones respecto a las categorías que más se ajustaban al análisis y facilitaron aportes metodológicos para definirlos de manera precisa y específica.

Como criterio de confiabilidad se establecieron categorías específicas para clasificar la información, con el propósito de estandarizar los datos y reducir los errores en la codificación (Rose & Johnson, 2020), lo cual facilitó el análisis de información de manera continua y con precisión.

5. Resultados

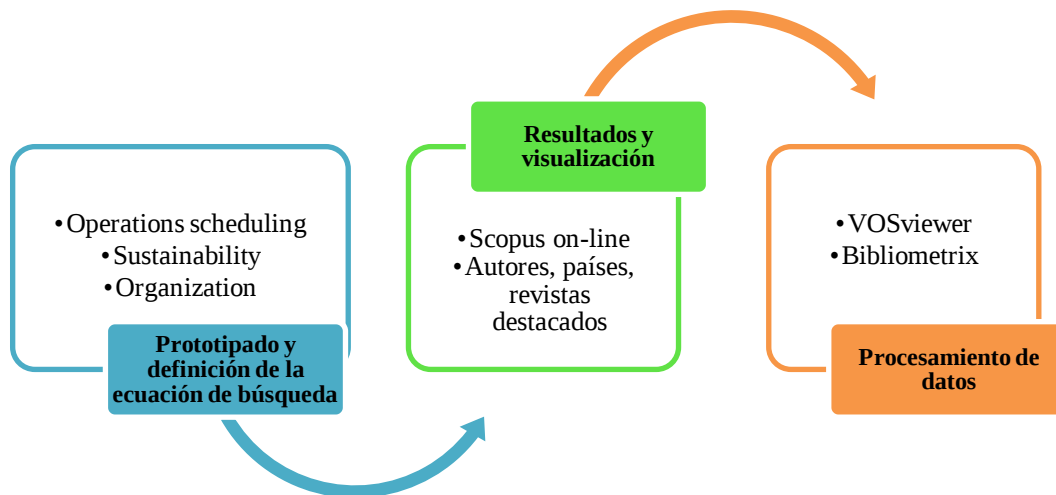
5.1 Análisis Bibliométrico

El análisis bibliométrico comprende la primera fase del proyecto de investigación, con el fin de analizar y mapear el conocimiento científico acumulado y la evolución de un dominio

específico (Johri et al., 2024). De este modo, la bibliometría se desarrolló en tres etapas (Racetin et al., 2022; Reina-Guaña, 2024): (i) prototipado de la ecuación de búsqueda; (ii) análisis en bases de datos; (iii) análisis de software; (iv) resultados y visualización (Figura 2).

Figura 2

Etapas del análisis bibliométrico



Nota: elaboración propia basada en (Racetin et al., 2022)

5.1.1 Prototipado y ecuación de búsqueda

La formulación de la ecuación de búsqueda se basó en identificar la selección del área de investigación, a partir de las palabras clave que orientaron la pregunta: ¿cuál es el desempeño de la programación de operaciones con base en medidas de sostenibilidad en las organizaciones? De esta manera, se logró caracterizar la temática en tres ejes de búsqueda *Operations Scheduling*, *Sustainability* y *Organizations*. Estos fueron complementados con sinónimos del tesauro ERIC y la combinación de conceptos, a fin de incluir la mayor cantidad de resultados posibles.

La lista de términos se expone en la Tabla 2. Para ampliar la búsqueda, se implementaron los símbolos reservados (paréntesis y asterisco).

Tabla 2

Términos de la ecuación de búsqueda

Concepto	Palabras clave
Programación de operaciones	Operation* scheduling, scheduling problem, manufacturing scheduling, process scheduling, Job Shop, Flow Shop, Open Shop, production scheduling, Scheduling.
Medidas de sostenibilidad	Sustainab*, green, energy-efficient, cleaner production, environmental sustainability, environmental impact, environmental performance, social performance, social sustainability, social value, social impact, carbon footprint.
Organizaciones	Compan*, firm*, corporat*, enterprise*, business*, organi?ation*

Con base en los términos definidos se determinaron los criterios de inclusión y exclusión:

1. Periodo de tiempo 2017 – 2023: se incluyeron documentos publicados entre el 1 de enero de 2017 y el 20 de diciembre de 2023. Esto con el objetivo de abarcar estudios recientes e identificar investigaciones que cumplieran con las especificaciones de la temática del proyecto.

2. Documentos en inglés y/o español.

3. Se incluyeron únicamente artículos científicos.

4. Se excluyeron áreas de estudio relacionadas con salud y artes.

Se seleccionó la base de datos SCOPUS, reconocida entre la comunidad científica por ser de alto impacto, actualmente contiene la mayor cantidad de resúmenes y citas de literatura en investigación a nivel global; asimismo, presenta herramientas adicionales para el análisis métrico, por medio de gráficas y tablas interactivas (Chebo & Dhliwayo, 2024). Posterior a la definición de palabras clave para la ecuación de búsqueda y la elección de la base de datos, se procedió a realizar una búsqueda exploratoria en SCOPUS con el uso de los operadores booleanos AND (intersección) y OR (unión). Por lo anterior, se estructuró el protocolo de búsqueda exploratoria de literatura evidenciado en la Tabla 3.

Tabla 3

Protocolo de búsqueda exploratoria

Idioma	Inglés - español
Ventana temporal	2017-2023

Términos involucrados	Operation* scheduling, scheduling problem, manufacturing scheduling, process scheduling, Job Shop, Flow Shop, Open Shop, production scheduling, Scheduling, Sustainab*, green, energy-efficient, cleaner production, environmental sustainability, environmental impact, environmental performance, social performance, social sustainability, social value, social impact, carbon footprint, Compan* OR firm* OR corporat* OR enterprise* OR business* OR organi?ation*
Tipo de documentos	Artículos
Base de datos	SCOPUS
Campo de búsqueda	Título, resumen, palabras clave
Criterios de selección	• Artículos que tengan como tópico principal el tema de estudio • Publicaciones recientes (últimos 7 años) • Documentos en inglés y español

El protocolo de búsqueda fue validado por un académico experto en la temática de análisis, a fin de potenciar el proceso exploratorio y construir una ecuación de búsqueda que permitiera abarcar un número significativo de documentos. En el apéndice C se observan las ecuaciones de búsqueda de la fase exploratoria, para definir la ecuación final se decidió ampliar el periodo de análisis a siete años (2017 – 2023), luego de realizar un rastreo preliminar del título y resumen de los artículos hallados y observar el reducido número de publicaciones que correspondían de manera específica con los objetivos de la revisión sistemática. A su vez, se fueron validando las categorías emergentes para el análisis sistemático, por medio de la codificación de la información en tablas de Excel.

En la Tabla 4 se relaciona la ecuación de búsqueda definitiva transcrita en SCOPUS. Se obtuvo un total de 366 artículos, entre los cuales el 99,72% están en inglés y un 0,28% en español. Los criterios de exclusión sobre las áreas de conocimiento y el periodo de tiempo facilitaron de manera precisa la selección de los documentos en concordancia con los objetivos del estudio.

Tabla 4

Ecuación de búsqueda definitiva

Ecuación de búsqueda
(TITLE-ABS-KEY ("operation* scheduling" OR "scheduling problem" OR "manufacturing scheduling" OR "process scheduling" OR "flowshop" OR "flow shop" OR "jobshop" OR "job shop" OR "open shop" OR "production scheduling" OR "scheduling") AND TITLE-ABS-KEY (sustainab* OR "green" OR "energy-efficient" OR "cleaner production" OR "environmental sustainability" OR "environmental impact" OR "environmental performance" OR "social performance" OR "social sustainability" OR "social value" OR "social impact" OR "carbon footprint") AND TITLE-ABS-KEY (compan* OR firm* OR corporation* OR

```
enterprise* OR business* OR organi?ation* ) AND ( EXCLUDE ( SUBJAREA , "MEDI" ) OR EXCLUDE ( SUBJAREA , "NURS" ) OR EXCLUDE ( SUBJAREA , "ARTS" ) OR EXCLUDE ( SUBJAREA , "HEAL" ) OR EXCLUDE ( SUBJAREA , "PSYC" ) ) AND ( LIMIT-TO ( LANGUAGE , "English" ) OR LIMIT-TO ( LANGUAGE , "Spanish" ) ) AND ( LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2017 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2018 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2019 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2020 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2021 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2022 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2023 ) )
```

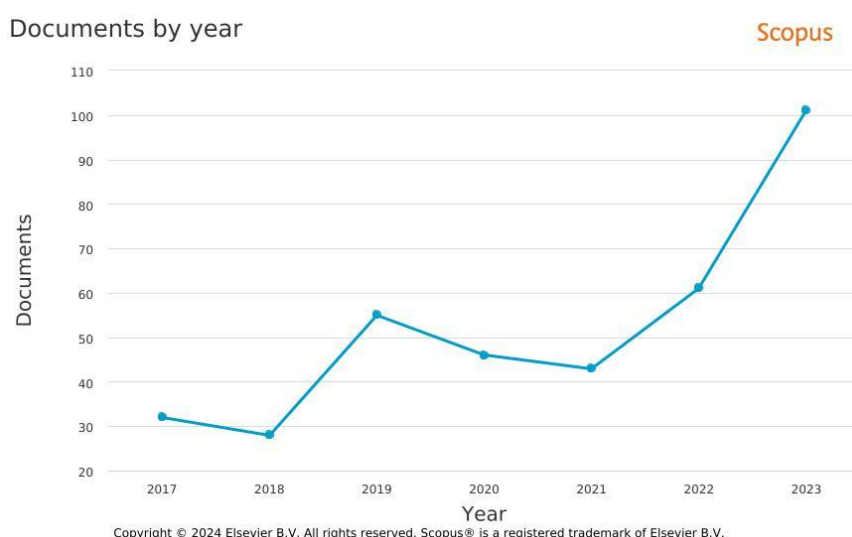
5.1.2 Visualización de resultados bibliométricos

Esta fase incluye el análisis y visualización de los resultados, a partir de la herramienta SCOPUS-on line.

5.1.2.1 Producción científica anual. La Figura 3 presenta la producción científica anual relacionada con la programación de operaciones con base en medidas de sostenibilidad en la ventana temporal 2017 - 2023. Se evidencia un aumento significativo de publicaciones en los últimos siete años, pasando de 32 en 2017 a 102 en 2023. El 2018 muestra un total de 28 publicaciones y en el 2019 se refleja un crecimiento perceptible de 55 artículos. Sin embargo, para el 2020 y 2021, la producción científica desciende hasta los 46 y 43 artículos respectivamente, posiblemente estas reducciones son consecuentes con la pandemia del Covid-19. Entre el 2022 (61 publicaciones) y el 2023 aparece una tendencia de crecimiento relevante, lo cual indica que la temática de estudio es de amplio interés en la comunidad científica global.

Figura 3

Producción científica anual



Nota. Scopus, (2024)

5.1.2.2 Publicaciones por autor. En la Figura 4 aparecen los 10 autores que presentan mayor cantidad de documentos publicados sobre la temática de análisis. Cabe mencionar que, de los 366 documentos se detectó un total de 1.160 autores, caracterizados por ser los únicos investigadores del estudio o por vincular redes de colaboración.

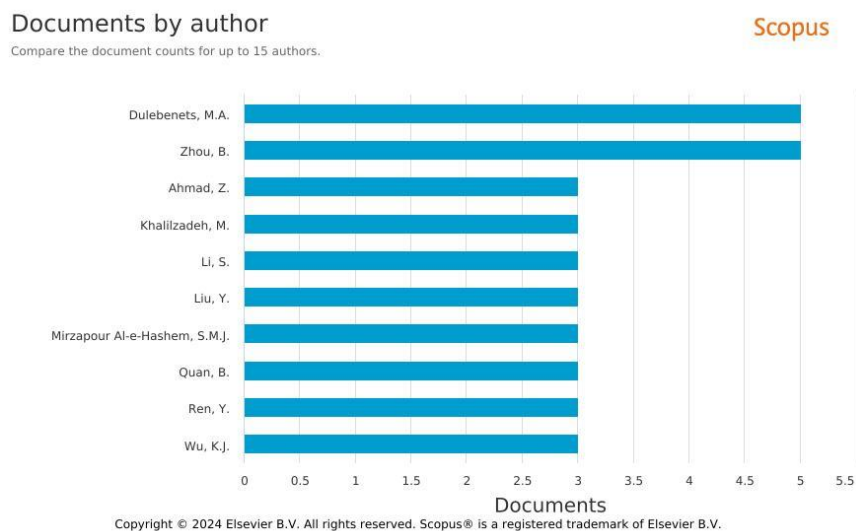
El autor Maxim A. Dulebenets del Instituto de Ingeniería FAMU-FSU (Tallahassee, United States) y Binghai Zhou de la Universidad Tongji (Shanghai, China) representan cinco publicaciones cada uno. El primero tiene únicamente una publicación con co-autoría y el segundo relaciona redes de colaboración en los cinco documentos.

Los autores mencionados a continuación, presentan tres publicaciones cada uno: Zulfiqar Ahmad de la Universidad Hazara (Mansehra, Pakistan), Mohammad Khalilzadeh de la Escuela de Negocios Centrum PUCP (Lima, Peru), Sujian Li y Bingtao Quan de la Universidad de Ciencia y Tecnología de Beijing (China). Yang Liu de la Universidad Linköpings (Suecia), Chao Lu de la Universidad de Geociencias (Wuhan, China), S. M. J. Mirzapour Al-E-Hashem de la Universidad de Tecnología Amirkabir (Tehran, Iran) y Yaping Ren de la Universidad Jinan (Guangzhou, China).

Se evidencia una red de co-autoría entre Sujian Li y Bingtao Quan en los tres documentos registrados, publicados entre el 2022 y 2023. Es importante precisar que el número de artículos por autor no es significativo, sin embargo, se encontraron diferentes académicos que han profundizado en la temática de interés desde diversas perspectivas.

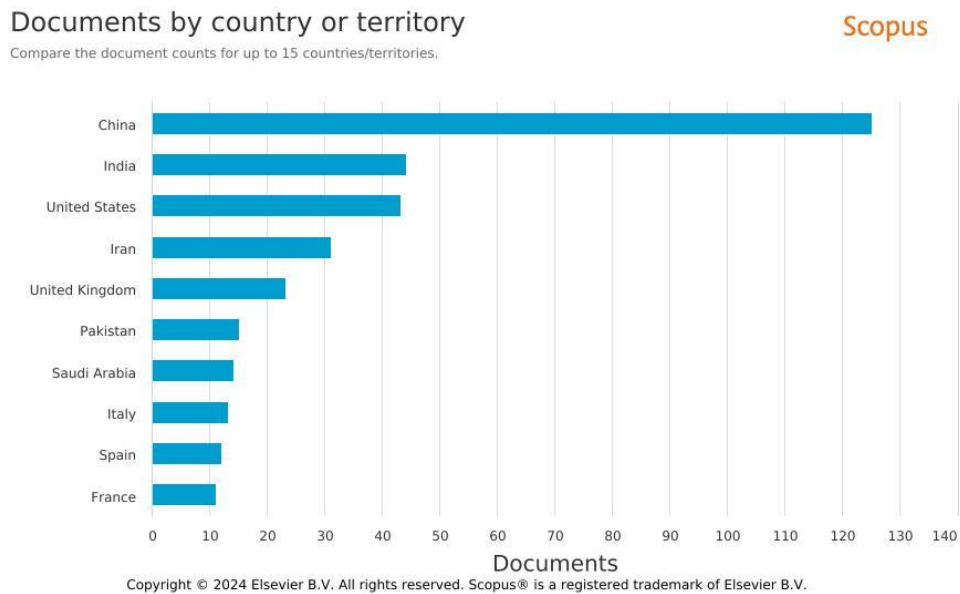
Figura 4

Publicaciones por autor



Nota. Scopus, (2024)

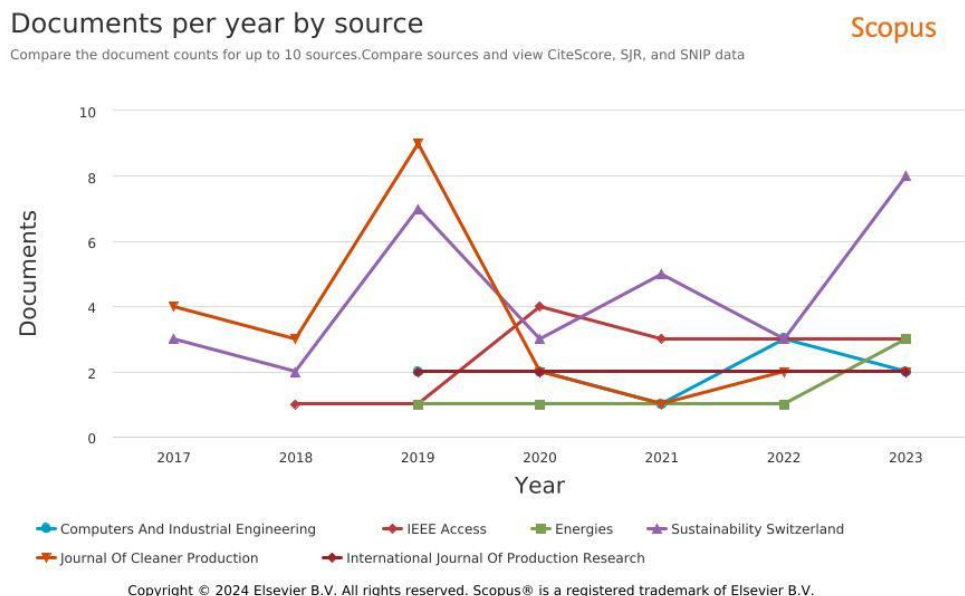
5.1.2.3 Países destacados. La Figura 5 representa el número de artículos por país, destacándose la prevalencia del continente asiático. De esta parte del hemisferio sobresale China con la mayor cantidad de documentos (125 artículos), seguido de India con 44, Irán con 31, Pakistán con 15 y Arabia Saudita con 13. Estados Unidos aparece en tercer lugar con 43 publicaciones. Del territorio europeo predominan: Reino Unido con 23 documentos, Italia con 13, España con 12 y Francia con 11. Colombia aparece en el puesto 19 con siete artículos. Se evidencia una correlación entre los países y autores destacados, lo cual se percibe en la conexión entre el lugar de afiliación de los autores mencionados y los países destacados.

Figura 5*Países destacados*

Nota. Scopus, (2024)

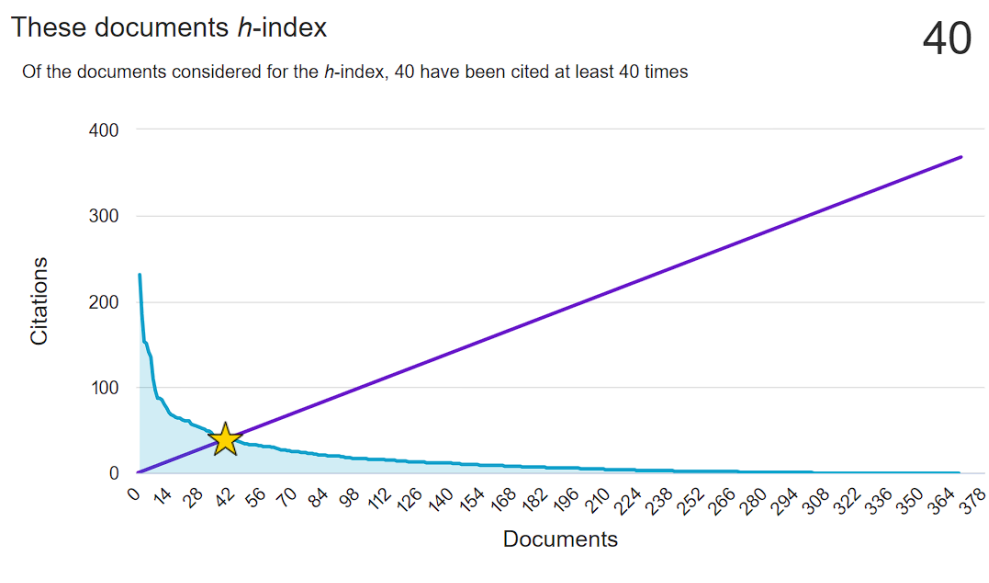
5.1.2.4 Revistas con mayor número de publicaciones. En la Figura 6 se evidencian las cinco revistas con mayor número de artículos, destacándose la influencia de Reino Unido con tres revistas. Sustainability de Suiza representa el mayor número de documentos con 31 artículos. Seguida de Journal Of Cleaner Production con 23 publicaciones (Reino Unido), IEEE Access con 15 (Estados Unidos) y Computers And Industrial Engineering con 10 (Reino Unido). Energies e International Journal Of Production Research (Reino Unido) con 6 publicaciones cada una.

Las revistas europeas son predominantes en la producción de artículos sobre la temática de análisis, enfocadas en áreas como la sostenibilidad, productividad, procesos técnicos, desarrollo tecnológico, entre otros. A su vez, se deduce que la mayoría de los académicos procedentes del continente asiático y norteamericano, prefieren publicar sus investigaciones en revistas europeas y editoriales reconocidas por su alto impacto académico alrededor del mundo

Figura 6*Revistas con mayor número de publicaciones**Nota.* Scopus, (2024)

5.1.2.5 Índice h de los artículos hallados. El índice h es un indicador de medición de la productividad y el impacto de los académicos en determinada área de estudio. Fue propuesto por el físico Jorge Hirsch en 2005, con el propósito de medir la influencia de un científico respecto a la cantidad de artículos que ha publicado y el número de veces que éstos han sido citados por otros investigadores (Hirsch, 2005). Cabe señalar que, este índice no excluye el recuento de autocitas ni distingue con precisión la fuente de la cita; es decir, el autor puede calificar como popular en el medio científico, excluyéndose un análisis de la calidad de las citas (Bihari et al., 2023).

De acuerdo con la Figura 7, de los 366 artículos hallados en SCOPUS con la ecuación de búsqueda definitiva, se registra un índice h de 40. Esto significa que, de 366 documentos, al menos 40 han sido citados mínimo 40 veces, para un total de 1.600 citaciones. Se deduce que las publicaciones encontradas presentan un nivel significativo de referencia en la temática de análisis, teniendo en cuenta que el periodo analizado es relativamente reciente.

Figura 7Índice h de los artículos encontrados

Nota. Scopus, (2024)

5.1.2.6 Los 10 artículos más citados. En el apéndice D se evidencian los 10 artículos más citados en SCOPUS, lo cual indica que han sido referentes de investigación y tendencias de análisis para profundizar en la temática de interés. En concordancia con la Figura 5, nuevamente sobresale la revista *Journal of Cleaner Production* con cuatro de los documentos más citados, seguida de *Energies* con una publicación destacada. Respecto a los autores (ver Figura 4), el artículo de Chao Lu (China) titulado “*Energy-efficient permutation flow shop scheduling problem using a hybrid multi-objective backtracking search algorithm*” destaca por ser el más citado con 232 citas. Asimismo, la publicación de Yaping Ren (China) denominada “*MILP models for energy-aware flexible job shop scheduling problem*” prepondera con 141 citaciones. Nueve de los diez documentos más citados fueron publicados entre 2019 y 2020; periodo en que se produjo un escalamiento y descenso significativos en el número de publicaciones sobre el área de estudio (ver Figura 3).

5.1.2.7 Número de citas por año. En el apéndice E se evidencia de forma detallada el número de citas que cada uno de los 10 artículos del apéndice D ha recibido en los últimos siete

años. Se observa que entre el 2022 y 2023 las publicaciones han recibido el mayor número de citaciones, lo cual corresponde con el aumento representativo en la cantidad de documentos registrados en la Figura 3. Los artículos 2, 7, 8 y 9 presentan un ascenso progresivo en cantidad de citas, con una proyección hacia el incremento de estas al tratar temáticas emergentes como la economía circular, programación dirigida por datos, aprendizaje automático, inteligencia artificial y eficiencia eléctrica.

5.1.2.8 Procesamiento de datos. Esta etapa contiene el procesamiento de datos de la información exportada de SCOPUS, a partir del análisis basado en el mapeo científico. La consolidación de los resultados bibliométricos se desarrolló con la herramienta Biblioshiny de la aplicación web de Bibliometrix y el software VOSviewer, a fin de incluir componentes interpretativos alusivos a las redes de co-ocurrencia, co-citación y co-autoría. Al respecto, es importante precisar el significado de dos elementos cuantitativos para la interpretación de los mapas: (i) vínculos y (ii) fortaleza de vínculos o índice de fuerza. El primero, refiere el número de vínculos que tiene un nodo (palabra clave, autor, revista) con otros nodos; el segundo, especifica la fuerza total de los vínculos de un nodo determinado con otros nodos (Van Eck & Waltman, 2020),). Entre más alto sea el valor de la fuerza de vínculos, más sólida será la conexión entre los nodos; asimismo, indicará el número de veces en que dos palabras clave aparecen juntas o la co-autoría entre académicos (Y.-M. Guo et al., 2019).

5.1.2.9 Co-ocurrencia de palabras clave. La co-ocurrencia de palabras clave es utilizada para el mapeo de conocimiento e identificar la estructura conceptual o metodológica de la temática de interés, a partir del relacionamiento entre dos o más términos (Cárcamo et al., 2022; D. Xu et al., 2022). Por consiguiente, consiste en un conglomerado de conceptos que reflejan de manera intuitiva los temas principales de investigación y los puntos críticos del área de análisis (Chen et al., 2023).

El mapa de co-ocurrencia se divide en categorías con características similares (clústeres) (J. Zhao et al., 2023) e indica la frecuencia de aparición de palabras clave representadas en nodos que se vinculan entre sí y se agrupan en diferentes colores, a fin de interpretar de manera intuitiva la red de co-ocurrencia de los términos (Y. Zhu et al., 2024). De acuerdo con Chen et al., (2023) la visualización permite indagar sobre la diversificación del contenido y los direccionamientos que orientan las tendencias de investigación; al respecto, se especifica que cuanto mayor sea la centralidad, mayor será la frecuencia de aparición de palabras clave, aspecto que es determinante al analizar la matriz de conocimiento (M. Yang et al., 2023).

A continuación, se presenta el análisis de co-ocurrencia de palabras clave, cada nodo del mapa representa una palabra clave, el volumen de este representa la ocurrencia del término y el vínculo entre nodos es equivalente a la co-ocurrencia entre palabras (Cárcamo et al., 2022). La fortaleza de vínculos de cada nodo indica el estado relacional entre los términos en el periodo de tiempo establecido.

El apéndice F presenta las 10 palabras clave con mayor número de co-ocurrencias en el periodo 2017-2023. Todas coinciden en que, de manera gradual, cada año ha aumentado la cantidad de repeticiones (en vínculo con otros términos) y relevancia, respecto al desempeño de la programación de operaciones, con base en medidas de sostenibilidad en las organizaciones.

El apéndice G muestra 108 nodos distribuidos en cinco clústeres. Las palabras clave del mapa corresponden a los términos que se repiten mínimo cinco veces, referidos a la sumatoria de index keywords (codificadas por Scopus) y author keywords (codificadas directamente por los autores). En el primer clúster (rojo) las palabras que más se repiten son: *optimización* con 63 ocurrencias (141 vínculos y fuerza total 462) y *costos* con 34 ocurrencias (107 vínculos y fuerza total 254). En el segundo clúster (verde) se destacan los términos:

consumo energético con 89 ocurrencias (148 vínculos y fuerza total 838) y *eficiencia energética* con 88 ocurrencias (157 vínculos y fuerza total 744).

El tercer clúster (azul) contiene el nodo central, el cual corresponde al mayor número de ocurrencias, vínculos y fuerza total respecto a los demás nodos, destacándose la palabra *planeación* con 143 ocurrencias (176 vínculos y fuerza total 1.105). En el cuarto clúster (amarillo) sobresalen los términos: *desarrollo sostenible* con 60 ocurrencias (141 vínculos y fuerza total 399) y *sostenibilidad* con 40 ocurrencias (99 vínculos y fuerza total 208).

El clúster violeta presenta nodos con un número de ocurrencias similar, entre los que se encuentran: *algoritmos genéticos* con 40 ocurrencias (123 vínculos y fuerza total 374), *gestión de producción* con 39 ocurrencias (100 vínculos y fuerza total 352), *manufactura* con 36 ocurrencias (109 vínculos y fuerza total 332) y *optimización multiobjetivo* con 31 ocurrencias (104 vínculos y fuerza total 286). Finalmente, el clúster celeste contiene dos términos principales con un número reducido de ocurrencias respecto a los otros clústeres, pero con amplia relevancia por la cantidad de vínculos con los demás nodos: *algoritmo* con 17 ocurrencias (76 vínculos y fuerza total 129) e *internet de las cosas* con 17 ocurrencias (79 vínculos y fuerza total 144).

El mapa de centralidad (eje x) y densidad (eje y) evidenciado en el apéndice G constituye una representación de las tendencias de investigación, basado en la co-ocurrencia de palabras clave. De este modo, se observa que el primer cuadrante comprende los temas de mayor relevancia, pero menos desarrollados, conocidos como *temas básicos*: *planeación*, *desarrollo sostenible*, *optimización*, *consumo energético*, *eficiencia energética* y *tecnologías verdes*. En el segundo cuadrante se encuentran los contenidos con amplia relevancia y desarrollo, reconocidos como *temas motores*, entre los que ninguno fue identificado. Este resultado indica nulidad en el despliegue de categorías determinantes, que estructuren de manera específica el campo de estudio analizado.

En el tercer cuadrante sobresalen los temas con menos relevancia y desarrollo, se identifican como *temas de nicho*: gestión del agua, sostenibilidad, recursos de energía renovable y cambio climático. El cuarto cuadrante integra los *temas emergentes y decadentes*, entre los que no aparece ninguno. De este mapa se deduce que el área de análisis presenta temáticas de amplia y mediana relevancia entre la comunidad científica, pero carece del desarrollo de contenido específico y determinación de los contenidos emergentes que, de acuerdo con los nodos del apéndice H, se mencionan diversas cuestiones de interés actual entre los investigadores.

El apéndice I presenta los 24 nodos que simbolizan las *author keywords*. Esta gráfica permite identificar diferencias significativas en el número de nodos (términos) que surgieron en el apéndice G, adicional a la cantidad de vínculos y clústeres. En este sentido, se evidencia la congruencia con el apéndice H por cuanto las tendencias del mapa temático se alinean con las palabras clave determinadas por los académicos. En el clúster rojo los términos que más se repiten son: *eficiencia energética* con 24 ocurrencias (14 vínculos y fuerza total 22) y *computación en la nube* con 15 ocurrencias (10 vínculos y fuerza total 18).

En el clúster verde sobresale la palabra *planeación*, con 33 ocurrencias (13 vínculos y fuerza total 27). En el clúster azul destacan los términos: *sostenibilidad* con 21 ocurrencias (7 vínculos y fuerza total 13) y *algoritmo genético* con 12 ocurrencias (8 vínculos y fuerza total 11). En los dos últimos clústeres resaltan dos palabras clave: *aprendizaje automático* del clúster amarillo con 8 ocurrencias (5 vínculos y fuerza total 8) y *optimización multi-objetivo* del clúster violeta con 12 ocurrencias (5 vínculos y fuerza total 6).

Es importante resaltar que la palabra *planeación* está constituida como un concepto básico y central del tema de investigación, respecto a la totalidad de artículos hallados; por consiguiente, esto evidencia que ha sido empleada de manera consecutiva y reiterada por los autores y la base de datos Scopus. En el apéndice J se evidencia la evolución temática del

periodo seleccionado (2017-2023), allí sobresale el término mencionado y su continuidad en el tiempo; adicionalmente, algunas de las palabras clave registradas en los nodos de las Figuras 8 y 10.

La evolución temática permite evidenciar la importancia de las palabras clave, de acuerdo con el tamaño del rectángulo; a su vez, las líneas que conectan los términos se relacionan con la cantidad de vínculos, dependiendo si es gruesa o delgada (Mota et al., 2024). La tendencia hacia el 2023 consiste en indagar sobre temáticas como: planeación, desarrollo sostenible, consumo energético, ciudad inteligente, efectos económicos y sociales. Todos los términos están relacionados entre sí y de manera directa con el desempeño de la programación de operaciones, con base en medidas de sostenibilidad en las organizaciones.

Asimismo, se resalta el modo en que los términos con similitudes se empiezan a agrupar como tendencias de investigación particulares y vinculadas entre sí, evolucionando como temáticas que han emergido con el paso del tiempo y reflejan los intereses de la comunidad científica en el área temática.

5.1.2.10 Co-autoría. La colaboración implica el proceso de investigación y construcción del documento, en la cual dos o más académicos trabajan juntos en el proceso de escritura, comparten la autoría y responsabilidad del producto definitivo (Bonilla-Valencia & Castro-Daza, 2021). Este criterio examina las relaciones y colaboraciones entre investigadores (Srinivasan & Yadav, 2023), las cuales pueden darse entre colegas de diferentes disciplinas o un académico y su estudiante (Lazebnik et al., 2023). Cabe precisar que la co-autoría no refiere una medida perfecta de colaboración, por cuanto existen contribuciones que no están representadas en una publicación; sin embargo, es una herramienta verificable, práctica y eficaz para evidenciar las redes de co-autoría de una temática determinada (Y. Zhu et al., 2024). Este criterio simboliza la producción de conocimiento y las afiliaciones relacionadas con los países o instituciones que representan los investigadores (Schirone, 2024); a su vez, toma en

consideración las redes estructuradas de co-autores influyentes o aquellos que están relativamente aislados al encontrarse ubicados en las periferias (Bunker Whittington et al., 2024). Respecto a las redes de co-autoría existen discrepancias por su influencia en la comunidad científica, encontrándose aquellos que perciben este criterio como una tendencia del conocimiento moderno para su difusión y atraer la atención de otros investigadores, por cuanto existe una correlación entre la productividad y la intensidad de la colaboración (Isfandyari-Moghaddam et al., 2023). En contraparte, se encuentran aquellos que cuestionan la hiperautoría por el extraordinario número de autores procedentes de instituciones de diferentes países, en tanto no es necesario ser un escritor del artículo para ser co-autor (Martínez-Garrido & Murillo, 2024).

El mapeo de co-autoría presentado a continuación, está basado en los países y autores destacados. Los nodos (autores/países) están conectados entre sí por un enlace común (vínculos) para conformar una red de colaboración (Isfandyari-Moghaddam et al., 2023).

De acuerdo con el apéndice K, China representa el mayor número de vínculos de colaboración por co-autoría, específicamente con 28 países. Los autores procedentes de China han colaborado en 13 ocasiones con Estados Unidos, 9 con Reino Unido y 6 con Hong Kong, entre los más destacados. India sobresale con 17 vínculos de colaboración y Estados Unidos con 16. En el caso de Colombia, presenta un vínculo con Ecuador y México respectivamente.

La mayoría de los vínculos de co-autoría se encuentran ubicados en Asia, Europa y Norte América. En esos continentes se ha consolidado un número considerable de redes de colaboración, lo cual implica que la temática de investigación involucra experiencias científicas que se complementan entre pares académicos a nivel global.

El apéndice L muestra en detalle la red de co-autoría por país. Encontrándose nuevamente el predominio de China con 2.420 citaciones y fuerza de vínculos 71, además de la centralidad en el mapa y la conexión con al menos un país de cada continente. Seguida de

Estados Unidos con 1.031 citaciones e India con 879 citaciones. En esta red aparece nuevamente Colombia, específicamente con seis vínculos de co-autoría (Ecuador, México, España, Francia, Estados Unidos, Reino Unido) y 77 citaciones.

Se puede precisar que la red de co-autoría está consolidada en los países asiáticos, con estudios ampliamente reconocidos a nivel mundial, en concordancia con el número de citaciones obtenidas y los vínculos construidos con el paso del tiempo. Asimismo, es posible determinar que los investigadores asiáticos han venido indagando de manera escalonada sobre el desempeño de la programación de operaciones, con base en medidas de sostenibilidad en las organizaciones; a su vez, se deduce la existencia de colaboración por redes interdisciplinarias y la interacción complementaria con resultados de investigaciones influyentes, provenientes de diferentes universidades alrededor del mundo.

El apéndice M presenta los 19 países con mayor número de autores de correspondencia. Este resultado es congruente con los resultados obtenidos en las Figuras 11 y 12, por cuanto representa los países destacados por la cantidad de redes de co-autoría. Para interpretar la gráfica es necesario comprender dos variables: (i) MCP (publicaciones de varios países) indica que los autores del artículo pertenecen a diferentes países que representan una colaboración internacional. (ii) SCP (publicaciones de un solo país) señala que todos los investigadores pertenecen al mismo país (Sweileh et al., 2017)

La programación de operaciones se puede abordar desde diferentes concepciones, en función del énfasis otorgado a aspectos específicos. Una de las concepciones más comunes es la que se centra en la optimización de la eficiencia. Esta concepción considera la programación de operaciones como un proceso de toma de decisiones que busca minimizar los costos o maximizar la producción. En el caso de China, 81 documentos corresponden a académicos con vinculación al país y 33 publicaciones pertenecen a redes de co-autoría globales. Colombia destaca por contener dos MCP y dos SCP.

En el apéndice N se evidencian las diferentes redes de colaboración entre autores, observándose en detalle cada uno de los investigadores que han participado, de manera colaborativa, en la construcción de conocimiento sobre la temática de análisis. Sobresalen nueve clústeres, entre los que se destaca la red de co-autoría de Sujian Li y Bingtao Quan (clúster marrón), los cuales sobresalieron en la Figura 3 por el número de publicaciones. A su vez, en concordancia con el grosor de la línea que une los nodos, se deduce que han colaborado como co-autores en varias ocasiones. La red más grande se consolida en el clúster rojo con 11 académicos, seguida por el clúster verde con nueve investigadores. Es importante resaltar que, la mayoría de los autores de la red de co-autoría son procedentes de China, lo cual es congruente con los resultados del apéndice M.

El apéndice O muestra los artículos de las redes de co-autoría más influyentes, de acuerdo con el número de artículos publicados o la cantidad de citas de los artículos. Algunos documentos presentan aportes significativos sobre la temática de análisis, otros se enfocan en aspectos alternativos. En este sentido, se resalta la influencia de las investigaciones documentadas por la red de colaboración de Yuan H., Bi J. y Zhou M., en tanto presentan un acumulado de 59 citas de estudios sobre computación en la nube y planeación, como conceptos que han sido destacados en el mapeo científico.

5.1.2.11 Co-citación. El análisis de co-citas parte de la asunción de que entre dos o más documentos que son co-citados (citados juntos) en un tercero y posterior trabajo, existe —al menos desde la perspectiva del autor citante— una similitud temática; y que cuanto mayor sea la frecuencia de co-citación, mayor será la afinidad entre ellos (Miguel et al., 2007).

La red de co-citación se construye cuando dos estudios citan en sus referencias a una tercera publicación común, de esta manera se puede identificar la literatura más influyente en el dominio de investigación (Cai et al., 2024) y analizar patrones entre documentos, autores y revistas por la frecuencia de co-citación. En el mapeo los nodos representan a los

autores/referencias y los enlaces entre nodos indican la fuerza de co-citación (Pooja & Sood, 2024).

Este criterio proporciona información sobre las tendencias académicas en el campo de investigación específico (Muneer et al., 2024) y los grupos de referencias temáticamente similares respecto al desempeño de la programación de operaciones, con base en medidas de sostenibilidad en las organizaciones. En este sentido, los documentos bibliográficos de la red de co-citas constituyen las fuentes de conocimiento fundamentales en el desarrollo de la literatura sobre la temática de análisis, especialmente porque no fueron capturados al realizar la búsqueda en Scopus (Zwack et al., 2024).

Por lo anterior, los documentos secundarios citados se componen como las raíces del panorama actual del dominio de conocimiento, por ello el criterio de co-citación explora cuáles y con qué frecuencia dos publicaciones secundarias se citan juntas dentro de los artículos primarios; de ese modo, se identifica la estructura intelectual del dominio (autores, referencias, revistas) (Diaz Tautiva et al., 2024; Z. Jiang et al., 2024). El análisis de co-citación presentado está consolidado en cuatro partes: (i) las referencias con la mayor cantidad de citas, (ii) las raíces históricas del campo de investigación (Zwack et al., 2024), (iii) historiografía de la temática y (iv) los autores más relevantes en la red de co-citas.

En el apéndice P se registran las referencias más citadas (mínimo cinco veces) de la red de co-citación. Cinco de estas han sido publicadas en *Journal of Cleaner Production*, una de las revistas destacadas a lo largo del análisis bibliométrico. Las referencias relacionadas han sido co-citadas por agentes externos y publicadas entre 2014 y 2018, lo cual corresponde a un periodo de tiempo considerable para que los estudios sean reconocidos entre la comunidad científica. La centralidad está focalizada en el artículo “*An investigation into minimising total energy consumption and total weighted tardiness in job shops*”. El estudio desarrolla un modelo que minimiza el consumo total de electricidad y la tardanza total ponderada; también,

se empleó el Algoritmo Genético de Clasificación No Dominante como solución para obtener el frente de Pareto.

Cabe mencionar que estas referencias al encontrarse vinculadas a una red de co-citación, presentan elementos en común respecto al desempeño de la programación de operaciones, con base en medidas de sostenibilidad en las organizaciones. De ahí la importancia de este tipo de análisis, en tanto se identifican documentos que refieren fundamentos del dominio de conocimiento y no fueron encontrados en la búsqueda realizada en la base de datos.

El apéndice Q presenta las referencias del apéndice P, especificándose que corresponden a las más citadas por los autores de los artículos seleccionados, por ello se hace alusión a “citas locales”. De esta manera, se considera importante referir los documentos que han consultado para el desarrollo de sus estudios, los diferentes académicos que consolidan la comunidad científica global identificada en el análisis bibliométrico.

En el apéndice R se observa la red de co-citación de autores, conformada por 197 nodos y cinco clústeres. Los autores que se relacionan han sido co-citados mínimo 20 veces, algunos fueron identificados en el apéndice P, Figura 4 y apéndice N. La centralidad está concentrada en *Li, X.* (clúster verde) con 195 vínculos, 8.781 fuerza de vínculos, 178 citaciones y conexión con los cinco clústeres (ver apéndice S); por otra parte, *Wang Y.* (clúster rojo) con 195 vínculos, 5.291 fuerza de vínculos y 133 citaciones. Por cada clúster se destacan los siguientes autores: Wang, Y. (rojo), Li, X. (verde), Wang, S. con 151 citas (azul), Valipour, M. con 40 citas (amarillo) y Wang, L. con 132 citas (violeta). Todos los clústeres están interconectados entre sí, incluso por uno o dos de sus autores (amarillo y púrpura).

Nuevamente se evidencia la predominancia de China y Estados Unidos en la red de co-citación de la temática de estudio; al respecto, es importante precisar que el mapa demuestra una consolidación sólida, en concordancia con la fortaleza de vínculos entre los nodos y

clústeres. Es posible que algunos autores destacados del dominio de conocimiento aparezcan en esta red por dos razones: primero, tienen un amplio número de citas en una o varias de sus publicaciones, segundo, han sido referenciados en estudios de su propia autoría; en definitiva, estos dos factores han influido en la identificación de sus documentos respecto al desempeño de la programación de operaciones, con base en medidas de sostenibilidad en las organizaciones. En el apéndice T se destacan los 10 autores que han sido citados mínimo 20 veces en la red de co-citación, especificándose el nombre, número de citas y fortaleza de vínculos.

El apéndice U presenta la Historiografía de la temática de análisis, en esta se evidencia un mapa cronológico de las citas directas más relevantes de la colección bibliográfica seleccionada (Aria & Cuccurullo, 2017). El tamaño del nodo indica el número de veces que el autor ha sido citado históricamente (citas locales) y las flechas indican un vínculo relacionado con la citación que un autor o autores le otorgan a otro; por ejemplo, Abedini A. et al. citó el estudio de Pulluro S. J. & Akkerman, R. En la parte inferior del clúster verde se observa que el investigador Dulebenets M. A. se ha autocitado en varias oportunidades, aspecto que es muy común en los estudios científicos recientes. De acuerdo con este análisis, es posible identificar las fuentes bibliográficas utilizadas por los académicos al indagar sobre la temática de análisis.

En el apéndice V se evidencian las referencias de la historiografía, en relación con la Puntuación Global de Citas (PGC) y la Puntuación de Citas Locales (PCL). La primera refiere que los documentos con mayor PGC son reconocidos como influyentes en el campo de conocimiento determinado; la segunda, muestra el número de citas que recibió un artículo en una red de citación (Strozzi et al., 2017).

El artículo “*Energy-efficient permutation flow shop scheduling problem using a hybrid multi-objective backtracking search algorithm*” presenta la mayor puntuación de PGC con 232 citas. Respecto al PCL sobre la temática de análisis, la publicación titulada “*A diploid*

evolutionary algorithm for sustainable truck scheduling at a cross-docking facility” manifiesta el mayor puntaje con 16 citas.

Posterior al análisis de procesamiento de datos, se estima el alcance de los objetivos específicos 1 y 2. Los documentos hallados se relacionan con la temática de estudio y amplían el espectro de análisis sobre las tendencias en planeación, algoritmos de búsqueda, *job shop*, entre otros. Se evidenció que hay una cantidad significativa de citaciones de los documentos, lo cual indica que los estudios encontrados presentan influencia en el medio científico. A la par, un número considerable de los artículos más citados y de las referencias más citadas en la red de co-citación, han sido publicados en *Journal of Cleaner Production*.

El tope de citación se consolida entre 2022 y 2023, lo cual refiere que el área de estudio está alcanzando su punto de influjo más alto, posiblemente la tendencia vaya al aumento en el número de publicaciones y de citaciones, en la medida en que las redes de co-citación y co-autoría se fortalecen. Adicionalmente, el dominio de conocimiento se va desarrollando con las tendencias temáticas impulsadas por la comunidad científica alrededor del mundo.

La red de co-ocurrencia de palabras clave se caracteriza por la prevalencia de términos relevantes, en tanto demuestran congruencia con las categorías incluidas en la ecuación de búsqueda de la fase definitiva. También, se destaca que el dominio temático es emergente en el medio científico, por cuanto no aparecieron temas ampliamente desarrollados (teorías, principios teóricos, métodos); en contraparte, algunos componentes estudiados a profundidad han sido medianamente identificados como relevantes. La evolución temática es congruente con la red de co-ocurrencia de palabras clave y el mapa temático, especialmente por la transformación del contenido en aspectos con amplia significación en el medio científico.

La red de co-autoría demuestra precisión con los autores y países destacados, principalmente por los vínculos de colaboración entre académicos con afiliación asiática. Asimismo, se evidenció que los investigadores del dominio de análisis prefieren construir redes

de co-autoría con académicos procedentes o vinculados a instituciones de su mismo país, incluso se evidenciaron colaboraciones con un amplio periodo de consolidación y reconocimiento científico, valorado por la cantidad de citas.

El análisis de la red de co-citación dio lugar a la identificación de documentos raíz del dominio de conocimiento, los autores referentes, las publicaciones más reconocidas por los investigadores al interpretar sus estudios, junto con la cantidad de citas locales y globales recibidas. Se demostró que el relacionamiento de citación entre investigadores ha consolidado la red de co-citación, como referente adicional en la búsqueda de documentos. A la par, con los criterios de historiografía y espectroscopía de la herramienta Biblioshiny, se examinaron algunos elementos cuantitativos relacionados con la variación en el número de citas (especialmente en los dos últimos años) y las publicaciones que históricamente han sido un referente conceptual, metodológico y/o teórico. En este punto es importante precisar que, una de las limitaciones al valorar criterios como el índice h , se relaciona con el elemento de “autocitación” que en reducidas ocasiones se contempla en este tipo de análisis y limita el espectro de documentos en la red de co-citación.

5.2 Revisión Sistemática de la Literatura

5.2.1 Hacia un abordaje concreto de la programación de operaciones sostenible desde diferentes concepciones

La producción sostenible consiste en la formación de bienes y servicios utilizando procedimientos y sistemas libres de contaminantes, con atención particular en el ahorro energético y los recursos naturales. Específicamente, el uso de sistemas de producción sostenibles conduce a la consecución de estrategias generales de desarrollo, reducir los costos ambientales y sociales futuros, fortalecer la competitividad financiera y reducir la pobreza en las sociedades (Coca et al., 2019; Ghadiri Nejad et al., 2023; He et al., 2015). Además, la producción sostenible es definida por Quan et al. (2023), como la optimización del proceso y

sistema de producción mediante el empleo de nuevas tecnologías o enfoques en armonía con el medio ambiente ecológico y el desarrollo económico, garantizando la seguridad y la salud de los empleados para proporcionar retornos sociales y creativos a todas las personas. Esta práctica inherentemente promueve un impacto positivo en la sociedad mediante la implementación de estrategias sostenibles dentro de los sistemas de producción en empresas productoras de bienes.

Dentro de este contexto, la programación de operaciones o también definida como programación de producción, es el proceso empleado para determinar las secuencias de procesamiento de productos o trabajos en un taller de fabricación, además de asignar máquinas a diferentes procedimientos mecanizados (Liu et al., 2017). Asimismo, comprende la asignación eficaz de los recursos disponibles en el proceso productivo de las organizaciones (mano de obra, material, maquinaria) a actividades o trabajos a lo largo del tiempo, con el propósito de satisfacer la demanda al optimizar uno o varios objetivos relacionados con los costos de producción y el *makespan* (tiempo total de procesamiento de las tareas) (Danishvar et al., 2021; Kapoor et al., 2023; Mansouri & Aktas, 2016; Waschneck et al., 2018).

En vista de que la programación de operaciones impacta directamente en aspectos esenciales como el consumo energético, las emisiones de carbono, la capacidad de la producción y costos; permite entrever que la programación de la producción no solo reviste una gran importancia para la eficiencia en el taller, sino que además representa una vía de investigación en la esfera de la programación inteligente y sostenible (Sang & Tan, 2022). Precedentemente, los análisis convencionales dentro del ámbito de la producción se enfocaban exclusivamente en aspectos económicos, tales como los costos de producción y los plazos de entrega. En tiempos recientes, se ha otorgado un notorio interés al comportamiento ambiental, destacando la importancia de considerar la eficiencia energética y la minimización de emisiones en la planificación de la producción. Una estrategia sugerida para lograr estos

objetivos implica la posibilidad de apagar las máquinas durante períodos prolongados de inactividad, reiniciándolas únicamente cuando se recibe una nueva tarea (Liu et al., 2014; Wang et al., 2019).

Esta perspectiva contemporánea considera la programación de operaciones como un proceso que busca reducir el impacto ambiental y social de la organización. Aunque tradicionalmente se había considerado que los costos de la energía eran un factor externo en la producción manufacturera, se ha hecho hincapié en la adopción de enfoques de planificación y programación para mejorar la sostenibilidad mediante la reducción del consumo y el impacto energético (Hudaifah et al., 2024); de este modo, una correcta planificación de horarios óptimos conduce a un movimiento más rápido de los productos (mayor productividad) con un menor consumo de energía (fabricación ecológica), un mejor uso de los activos (eficiencia óptima) y, lo que es más importante, a un menor costo (Danishvar et al., 2021).

En países como China, las empresas manufactureras utilizan alrededor del 50% de la energía eléctrica nacional. El consumo de energía es uno de los factores más relevantes que contribuyen al deterioro ambiental, como el calentamiento global y el agotamiento de los recursos combustibles. Como resultado, el sector manufacturero es responsable del aumento del consumo de energía y la crisis ambiental asociada. Por lo tanto, las compañías manufactureras han emprendido esfuerzos para desarrollar técnicas prometedoras que mejoren la eficiencia energética en el sector industrial (Liu et al., 2014; Lu et al., 2017).

En respuesta a la situación crítica medioambiental planetaria y con el propósito de contribuir al cumplimiento de los ODS, los gobiernos han implementado regulaciones para ejercer control en las emisiones de carbono por parte de las organizaciones, mediante impuestos y estableciendo límites máximos (Asadkhani et al., 2022; Fallahi et al., 2023). Estas circunstancias presentan un desafío para los gerentes de las empresas manufactureras, en la búsqueda de lograr un equilibrio entre los objetivos económicos y ambientales. En el caso de

las emisiones de carbono y las emisiones de gases de efecto invernadero comprendidas en las actividades empresariales, se destaca el enfoque de reducción de huella de carbono en la programación de la producción (Liu et al., 2017; Weber & Matthews, 2008).

Asimismo, en respuesta al crecimiento en la demanda de productos cada vez más personalizados, es común que la elaboración requiera trabajos específicos y complejos, que pueden ser procesados en uno o más equipos de manera simultánea en múltiples variedades y en lotes pequeños de producción. Este tipo de producción se ajusta a un problema típico de taller de fabricación, el cual tiene las características de ser un problema de modelado complejo y de multiplicidad de restricciones. Un esquema de programación de operaciones eficiente puede disminuir el consumo energético, la huella de carbono, entre otros aspectos de sostenibilidad; así como, mejorar la capacidad operativa de la producción y la calidad de procesamiento de la manufactura (Fazel Zarandi et al., 2020; Sang & Tan, 2022; Zhu et al., 2019). Al respecto, la programación de la producción se está volviendo cada vez más importante en las empresas del sector. El problema de la programación de la producción en talleres de trabajo se erige como un componente decisivo para la gestión inteligente de la producción en la fábrica, representando un aspecto crítico en el proceso de toma de decisiones (Sang & Tan, 2022; Zhou et al., 2018). Además de la aplicación de equipos autónomos y de tecnologías de procesamiento mejoradas, una empresa de fabricación debe optimizar la asignación y secuenciación de los recursos de elaboración, mediante la aplicación de metodologías avanzadas de programación de la producción de ahorro de energía; por lo tanto, el consumo total puede reducirse razonablemente mientras se cumplen los criterios de productividad (Luan et al., 2023).

En primer lugar, el uso de estrategias de ahorro energético puede reducir gradualmente dicho consumo sin afectar el *makespan*. Cuando el gobierno adopte medidas de control del consumo de energía, las empresas manufactureras que se centren en una gestión eficiente serán

más adaptables al entorno político. Por lo tanto, los fabricantes deberían cambiar gradualmente su forma de pensar en materia de administración y aplicar conceptos como gestión ajustada y desarrollo ecológico/sostenible a la producción diaria. En segundo lugar, las empresas deben considerar políticas de personal razonables para que los empleados calificados puedan servir a la empresa durante mucho tiempo (Xin et al., 2023).

A medida que las cuestiones ambientales se convierten en un tema cada vez más relevante, los consumidores con conciencia ambiental prefieren elegir productos con etiquetas de bajo carbono. Además, en varios países se han promulgado regulaciones sobre impuestos o aranceles al carbono y es probable que se emitan en más países en un futuro cercano. La reducción de las emisiones de carbono en una empresa de producción personalizada ayudaría a mejorar la competitividad de los productos y a disminuir los impuestos futuros sobre el carbono (Liu et al., 2017; Weber & Matthews, 2008).

En el contexto organizacional, las empresas de manufactura que aún se rigen por la programación manual se hallan limitadas por las restricciones que presenta la toma de decisiones humanas en la realización de los diferentes trabajos en talleres de manufactura, lo cual resulta en un mayor consumo energético, cuellos de botella en la producción, entre otros factores que afectan tanto la eficiencia operativa como la utilización de recursos. La falta de adaptabilidad de las organizaciones frente a cambios imprevistos, o fluctuaciones en la demandas pueden resultar en tiempos de inactividad innecesarios, aumentando los costos operativos e impactando de manera negativa la sostenibilidad ambiental en la operación (Liu et al., 2022).

Es necesario precisar que, desde la programación de operaciones se busca exhaustivamente establecer estrategias desde la gestión eficiente de los recursos, la secuenciación de la maquinaria, así como el uso de tecnologías que contribuyan al desarrollo sostenible en primera instancia; en consecuencia, posteriormente se detallarán investigaciones

referentes a la programación de producción con enfoque sostenible comenzando con la clasificación de los sistemas de manufactura hallados.

5.2.2 *Sistemas de manufactura*

Los tipos de manufactura en la programación de operaciones pueden ser clasificados en cuatro grandes grupos definidos por Giret et al. (2015) y Kapoor et al. (2023): programación de máquina única, programación de *parallel machines*, programación *flow shop* y programación *job shop*. La programación de máquina única implica el uso de una sola máquina para todas las tareas, mientras que en la programación de máquinas paralelas se emplean múltiples máquinas simultáneamente. Por otro lado, en la programación de talleres de tipo *flow shop*, el procesamiento de los trabajos sigue un orden específico en una misma ruta; por último, en la programación de talleres de tipo *flow shop*, las tareas pueden ser procesadas en diferentes secuencias y en diferentes máquinas (Kapoor et al., 2023). No obstante, cada modelo de manufactura presenta diferentes aplicaciones y modificaciones que se rigen por las problemáticas y necesidades particulares de la producción dentro de una empresa.

En el presente análisis se consideran estudios en talleres de manufactura de diferente variedad de tipos de fabricación según las condiciones, necesidades y configuración de los recursos disponibles (maquinaria, mano de obra, materiales). Al finalizar la revisión de los 51 documentos objeto de investigación, de manera análoga a la expuesta por Akbar & Irohara (2018), se hallaron cuatro modelos de fabricación predominantes: *flow shop*, *job shop*, *parallel machine* y *single machine*. A la par, aquellos estudios que no se pudieron abarcar dentro de estos grupos mayoritarios fueron clasificados en el grupo de “*continuous manufacturing*”. Cabe destacar que todas las investigaciones presentadas abarcan un enfoque sostenible desde su función objetivo, asunto que se tratará con más detalles en acápites posteriores.

En el caso de investigaciones de talleres productivos de tipo *flow shop*, un total de 19 investigaciones fueron listadas (e.g., Lu et al., 2017; Prado et al., 2021; Wang et al., 2023; Xin

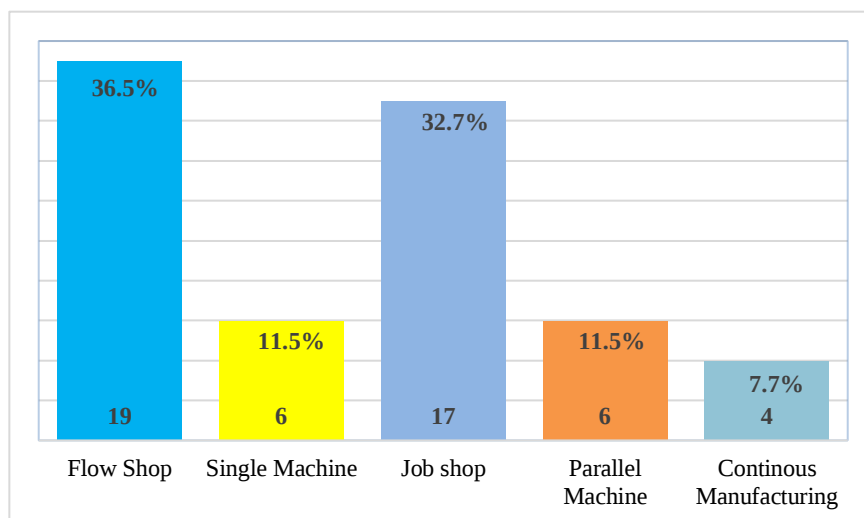
et al., 2023; Xue & Wang, 2023; Zhai et al., 2017; Zhao & Di, et al., 2023). Cada una presenta particularidades con énfasis en el producto a fabricar. Por otro lado, el número de investigaciones de talleres productivos de tipo *job shop* fue de 17 (e.g., Liao & Wang, 2019; Liu et al., 2022; Piroozfard et al., 2018; Xu et al., 2023; Zhou & Liao, 2020). En el caso de sistemas de producción de tipo *parallel machine* se identificaron en total un 6 (e.g., Hudaifah et al., 2024; Jia et al., 2022; Wang et al., 2019) y 6 de tipo *single machine* (e.g., Fallahi et al., 2023; Ghadiri Nejad et al., 2023; Hilbert et al., 2023; Zandi et al., 2020).

Estos estudios mayoritariamente presentaban un enfoque en la eficiencia energética en lo que respecta a la dimensión ambiental y referente al objetivo económico desde la programación de operaciones se buscaba la aminoración del *makespan* y/o el retraso de la operación para cumplir con los plazos de entrega.

En la Figura 8 se aprecia de manera detallada la distribución de los modelos de manufactura identificados en las investigaciones.

Figura 8

Distribución de sistemas de manufactura en artículos



Nota: elaboración propia basada en los datos de la investigación.

5.2.3 Enfoques sostenibles en la programación de operaciones

La programación de operaciones con base en medidas de sostenibilidad es una tendencia creciente que puede tener un impacto positivo en la eficiencia, la rentabilidad y la imagen pública de las organizaciones. Si bien existen algunos desafíos que las organizaciones deben enfrentar, los beneficios de la programación de operaciones sostenible son significativos. El enfoque de programación sostenible se erige como una perspectiva innovadora que va más allá de los paradigmas tradicionales de programación de producción. Este método redefine la programación de operaciones al integrar consideraciones medioambientales y sociales, transformando así la manera en que abordamos los desafíos inherentes a la eficiencia operativa (Gahm et al., 2016; Wang et al., 2019).

En el presente documento, las investigaciones sobre los diferentes sistemas de manufactura aludidos se han categorizado en tres enfoques: enfoque de eficiencia energética, enfoque de reducción de la huella de carbono y enfoque de bienestar social. Cada uno de estos enfoques presenta estrategias desde la programación de la producción que serán abordadas más exhaustivamente a continuación. En primera instancia se hablará del enfoque de eficiencia energética.

5.2.3.1 Enfoque de eficiencia energética. La reducción del consumo energético es una prioridad inminente en la agenda global, dado que se ha demostrado que gran parte de la energía consumida en el mundo es consecuencia de la operación de la industria manufacturera. Asimismo, la programación de operaciones energéticamente eficiente ha demostrado ser efectiva en la aminoración del consumo de energía con ninguna o poca inversión de capital, con mecanismos como la selección de la máquina de la operación y la secuenciación de operaciones en las máquinas (Li et al., 2018; Meng et al., 2019; Yan et al., 2016; Zhang et al., 2017).

Dado que la energía es una pieza clave de la producción y la demanda energética tiene un alcance limitado que depende de la producción deseada, es importante reducir la cantidad

de energía necesaria para alcanzar un determinado nivel de producción; es decir, aumentar la eficiencia energética para poder dar cabida a una producción sostenible (Ghadiri Nejad et al., 2023; Lu et al., 2021).

En las empresas de manufactura, así como en la logística, es imperativo que la realización de las tareas diarias se lleve a cabo de manera eficiente mediante el empleo de diversas fuentes energéticas como: corriente eléctrica, gas natural, energía eólica, entre otras, según la disponibilidad y requerimientos de cada organización (Ghadiri Nejad et al., 2023 ; Li et al., 2022 ; Min et al., 2023). Ahora bien, si se quiere lograr un desarrollo sostenible en el tiempo, las empresas manufactureras tienen el deber de reducir su consumo de energía, teniendo en cuenta el efecto perjudicial que el consumo excesivo de energía en el tiempo significa para el medio ambiente.

En concreto, los procesos de fabricación tales como el mecanizado y corte, requieren uso de herramientas que indiscutiblemente consumen energía. La vasta mayoría de los sistemas de producción, como el *flow shop* y *job shop* manejan múltiples turnos y tienen una flexibilidad de producción limitada (Ghadiri Nejad et al., 2023; Lu et al., 2023; Meng et al., 2019).

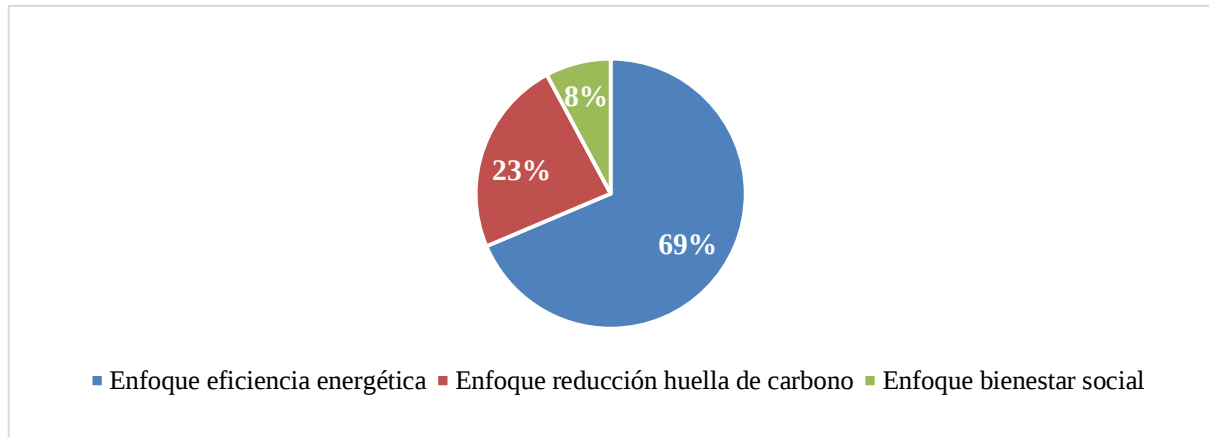
Dada esta problemática, la programación de operaciones presta especial atención al ámbito de la energía eléctrica consumida en la operación, definida por Scholz & Meisel (2022) como programación consciente de la energía (energy-aware), la cual consiste en que las empresas responden a las variaciones del precio de la energía cambiando sus patrones de consumo; esto en respuesta a que la eficiencia energética se ha destacado como un aspecto fundamental en la evaluación del desempeño operativo.

De ahí que, en la presente investigación el enfoque de eficiencia energética en la programación de operaciones es el más predominante con un total de 35 estudios referentes; es decir, un 69% en concreto. Por otro lado, se obtuvo que el enfoque de reducción de huella de carbono tuvo una participación del 23% de los artículos con 12 en total; finalmente, el enfoque

de bienestar social corresponde al menos estudiado con 4 artículos y 8% de participación (ver figura 9).

Figura 9

Distribución de enfoques en programación de operaciones sostenible



Nota: elaboración propia basada en los datos de la investigación.

En esta sección se exploraron sistemáticamente aquellas investigaciones que comprenden la programación de operaciones desde una perspectiva sostenible con énfasis especial en el enfoque de eficiencia energética.

En este proceso investigativo, se identificaron 3 subenfoques principales para mejorar la eficiencia energética en los talleres de manufactura, los cuales son: en primera instancia el *subenfoque de producción por tarificación con precio variable de energía*, en segunda el *subenfoque de gestión efectiva de las máquinas en su cambio de estado* y finalmente, el *subenfoque de control de velocidad de procesamiento de la maquinaria y secuenciación*. Estas tres estrategias se encuentran en concomitancia con los expuesto por el autor por Fernandes et al. (2022).

Como primera medida, se hablará de aquellos modelos que presenten como estrategia el establecimiento de horarios óptimos, en que se evalúan las fluctuaciones de los precios de la energía, lo cual es una estrategia de los gobiernos para incentivar a las empresas a producir en diferentes horarios para que la carga de la red eléctrica no sea máxima.

5.2.3.1.1 Subenfoque de producción por tarificación con precio variable de energía.

Dado que la electricidad no puede ser almacenada de un modo eficiente, sino que debe generarse, transmitirse y consumirse de manera instantánea y teniendo en cuenta el desbalance entre la demanda y la oferta actual, diferentes países han adoptado enfoques de gestión de la demanda para alentar a clientes y productores a ajustar sus comportamientos de consumo de electricidad (An et al., 2023; Kumar et al., 2021; Strbac, 2008).

En ciertas investigaciones se observa un interés significativo en la aplicación de modelos de optimización de eficiencia y rentabilidad energética en el escenario de las tarifas de tiempo de uso (TOU por su siglas en inglés pertenecientes a time-of-usage). Estos modelos buscan desarrollar estrategias inteligentes que aprovechen la variabilidad de los precios de energía a lo largo del día, permitiendo una gestión más eficaz de la demanda y la oferta, adoptando horarios adecuados de operación y mantenimiento que se ajusten a las tarifas TOU, las cuales habitualmente tratan tres períodos en un día: períodos de pico, periodos de pico medio y periodos de picos bajos (An et al., 2023). En vista de que el consumo energético de los trabajos fluctúa durante el proceso productivo, aquellas operaciones que requieran gran cantidad de energía deben programarse con meses de antelación, mientras que las operaciones que demandan una pequeña cantidad de electricidad se pueden utilizar de manera constante (Ghadiri Nejad et al., 2023; Hasnaeen et al., 2019). Este enfoque no se centra exclusivamente en la reducción de los costos operativos, también contribuye a la sostenibilidad, en cuanto se promueven prácticas energéticas respetuosas con el medio ambiente.

En ese sentido, una investigación específica destaca la proposición de un modelo de Programación No Lineal Entera Mixta (MINLP por sus siglas en inglés pertenecientes a Mixed-Integer Nonlinear Programming), diseñado para adaptarse tanto a las tarifas de tiempo de uso como a los acuerdos de Compra de Energía a Largo Plazo (PPAs por sus siglas en inglés que hacen referencia a Power Purchase Agreement) promovidos en Europa. Vale la pena señalar

que los PPAs son contratos a largo plazo entre un comprador y un productor de energía renovable. Dependiendo de las legislaciones vigentes en cada país, se presentan incentivos, como reducciones fiscales, cuando al menos el 50% del consumo eléctrico procede de fuentes renovables, de las cuales al menos el 10% está respaldado por un acuerdo de compra de energía a largo plazo (Communication from the Commission – Guidelines on State Aid for Climate, Environmental Protection and Energy, 2022). Esta investigación permite evidenciar la integración de modelos MINLP en el contexto de las dinámicas particulares de las tarifas TOU y los PPAs. Para ello, se plantea una ecuación multiobjetivo que propende minimizar los costos totales de energía eléctrica (TEC por sus siglas en inglés que significa Total Energy Consumption) y el consumo total eléctrico en un entorno de *parallel machines* de una sola etapa, en presencia de un sistema de almacenamiento de baterías de flujo redox (BSS) (Hilbert et al., 2023).

En este orden de ideas, An et al., (2023) estudia el problema de planificación conjunta desde el mantenimiento de la maquinaria y la programación de operaciones (MPPS), estableciendo que las actividades de fabricación, mantenimiento y producción en las empresas manufactureras están estrechamente relacionadas y tienen un impacto significativo en el consumo de electricidad; por consiguiente, las empresas manufactureras están comenzando a implementar mejoras efectivas en el uso de electricidad mediante la adaptación del marco de planificación de mantenimiento y programación de producción (An et al., 2023) para sistemas de manufactura en serie-paralelo, de acuerdo con tarifas TOU en un taller de producción híbrido de tipo *flow shop* de naturaleza NP-Hard. Para resolver este asunto, se establece un modelo de programación entera mixta (MIP por sus siglas en inglés que se refieren a Mixed Integer Programming) conforme a las tarifas TOU, junto al diseño de un algoritmo genético (GA por sus siglas en inglés pertenecientes a Genetic Algorithm) de codificación multicapa (MLEGA por sus siglas en inglés que se refieren a Multi-layer Encoding Genetic Algorithm).

Para ello, plantea como función objetivo la minimización del costo total de producción que consta de dos términos: el costo total de electricidad (TEC) y costo total de tardanza (TTC por sus siglas en inglés, Total Tardiness Cost). En este modelo se plantean estrategias en las que se integran las tasas de disponibilidad de la maquinaria, la tasa de costo de mantenimiento y el impacto del precio promedio de la electricidad en la operación; de este modo, se logra el ahorro energético en dos dimensiones: en la etapa de mantenimiento y en la etapa de producción.

Bajo el mismo propósito, Ramos & Leal, (2017) presentan un modelo de eficiencia energética conforme a las tarifas de tiempo de uso (TOU), basados en una problemática real ocurrida en una fábrica productora de hielo en escamas para tiendas minoristas de alimentos. Con el objetivo de no comprometer los niveles de servicio, los investigadores consideran que la variación del costo de la energía a lo largo del día se alcanza al evitar periodos con precios más altos, de manera que se minimice el costo total energético (TEC). Conforme a esto, formulan un modelo de programación lineal entera (ILP por sus siglas en inglés, Integer Linear Programming) en una producción de única máquina, resultando en un ahorro medio del 34,3% en los costes de energía para la empresa, permitiendo concluir que las actividades de productoras minoristas pueden lograr ser más sostenibles al tener un consumo más acorde con la carga de las redes eléctricas, sin comprometer el rendimiento operativo, así como sus beneficios financieros.

Ahora bien, en el mismo concepto de establecer modelos de programación de operaciones sostenibles y en respuesta al llamamiento para la protección del medio ambiente por parte del gobierno chino, quien promueve las tarifas TOU para las organizaciones manufactureras, Xue & Wang (2023) presentan un problema de programación de eficiencia energética en un taller de tipo *flow shop* de dos etapas, en el cual busca minimizar la tardanza media de las tareas de producción y costo total eléctrico (TEC) determinado por las tarifas TOU en la ciudad de Nankin, China. Por lo cual, proponen un algoritmo de evolución diferencial

discreta multiobjetivo (MDDE por sus siglas en inglés, Multi-Objective Discrete Differential Evolution Algorithm).

Asimismo, Cui & Lu (2021) realizan el modelado de un problema en un taller de tipo *flow shop* con permutación que aprovecha la oportunidad de las tarifas (TOU) para economizar en gastos energético y producir de manera eficiente. Los investigadores desarrollaron un algoritmo genético combinado con metaheurística matemática de dos capas, en el que la capa externa se refiere a la secuenciación de los trabajos y la capa interna a las posiciones de mantenimiento y la gestión del apagado y encendido de la maquinaria.

Por otro lado, es importante mencionar que en años recientes, las fuentes de energía renovables han sido consideradas por las empresas en su intención de alcanzar la transición energética de manera sostenible y eficiente. La adopción de energías como la solar y la eólica son una prioridad en la agenda empresarial global; no obstante, esta transición implica un gran desafío para la estabilidad de las redes eléctricas.

En este sentido, Zhai et al., (2017) indaga sobre la reducción del impacto ambiental y la huella de carbono desde la programación de la producción en una empresa manufacturera en Chicago, Estados Unidos que opera 8 horas al día. Presenta un problema de programación lineal entera mixta (MILP por sus siglas en inglés, Mixed Integer Linear Programming) con el objetivo de aminorar el costo total energético (TEC) en un taller tipo *flow shop* en el que se explora el uso de energía renovable por conducto de una turbina de energía eólica y la programación de las operaciones conforme a la tarificación de la electricidad. Para ello, fue necesario el desarrollo de pronósticos actualizados dinámicamente tanto para la velocidad real del viento como para el costo energético. Su efectividad es puesta en juicio frente a otros dos casos con un *throughput* constante. Uno en el que se prioriza la minimización del *makespan*; y otro en el que se considera la disminución del costo total energético únicamente empleando la red eléctrica estándar, llegándose a concluir que el modelo de producción propuesto con una

turbina de energía eólica proporciona un 14,6% menos de costo total sin afectar de manera notable el *makespan*.

Bajo la misma premisa, Scholz & Meisel (2022) exponen una metodología que adapta de manera flexible los procesos de producción, de manera que se aproveche la disponibilidad de energía proveniente de fuentes renovables; para ello, presentan dos modelos de optimización en un taller de trabajo: uno para la maquinaria y otro para dispositivos de soporte (dispositivos electrónicos que no participan de manera directa en la operación, pero ayudan a la toma de decisiones). Estos modelos son orquestados por una plataforma de coordinación de la producción (PCP) que dirige la toma de decisiones entre los dos modelos de optimización mencionados, creando de manera gradual un cronograma para los procesos de producción a lo largo del tiempo, a fin de operar al máximo cuando los precios tarifarios son menores.

En consonancia, el estudio de Tsao et al. (2020) investiga un problema de programación de operaciones con enfoque de eficiencia energética de *single machine*, en un entorno donde el tiempo de procesamiento de los trabajos depende directamente de la cantidad de recursos asignados a la operación; sin embargo, la asignación de recursos es incierta, dada la incertidumbre de los precios diferenciales de la electricidad a lo largo de la jornada. Con este propósito se presenta un algoritmo genético (GA) con un sistema de control difuso tipo 2, dada la capacidad de este último en el manejo de altas incertidumbres conforme la variación del precio de la energía y de adaptación dinámica. Este modelo de programación ofrece un enfoque innovador que aborda la sostenibilidad en las operaciones de manufactura en entornos de incertidumbre, por cuanto considera tiempos de procesamiento de los trabajos controlables con incertidumbre en la asignación de recursos y precios de electricidad variable.

De forma conclusiva el subenfoque de producción por tarificación con precio variable de energía implementa medidas tendientes a optimizar la eficiencia y rentabilidad energética teniendo en cuenta las tarifas de tiempo de uso (TOU), desarrollando estrategias inteligentes

para aprovechar los costes de energía lo largo del día. La estrategia se denomina gestión de la demanda y oferta, con la intención de reducir costos operativos y realizando practicas amigables con el ambiente. En consecuencia, los estudios tratan esta problemática planteando principalmente modelos de programación entera mixta (MILP), estableciendo acuerdos entre el comprador y productor de energía renovable; propendiendo la adopción de energías respetuosas con el ambiente como la eólica, y ayudando a la estabilidad de la red eléctrica. Otra estrategias implementadas en este ámbito consiste en la adaptación del marco de planificación de mantenimiento (MPPS), además estableciendo horarios específicos para aprovechar las tarifas más bajas en talleres de producción.

5.2.3.1.2 Subenfoque de gestión efectiva de las máquinas en su cambio de estado.

Generalmente, las máquinas empleadas en las empresas manufactureras se dividen en tres estados principales: estado de procesamiento, estado de inactividad y estado de reposo. Durante el estado de procesamiento, la máquina se halla en pleno funcionamiento al consumir energía. En la inactividad, está lista pero no lo suficientemente activa y con un consumo reducido; dependiendo del tipo de maquinaria, el consumo es cerca del 40% respecto a la máquina en pleno funcionamiento (Guo et al., 2022). Finalmente, en el estado de reposo está apagada y sin consumo significativo de energía. La gestión eficiente de estos estados puede optimizar el consumo energético y mejorar la eficiencia de producción (Guo et al., 2022; L. Li et al., 2017). Las máquinas naturalmente consumen energía cuando procesan diferentes trabajos, mientras que no consume energía cuando se realiza el mantenimiento, en tanto la máquina está apagada en ese momento. Por tanto, la producción, el mantenimiento y la energía son tres aspectos interrelacionados de la gestión de operaciones (Cui & Lu, 2021).

En entornos de fabricación reales, el encendido y apagado de la maquinaria no puede realizarse de manera arbitraria, dado que el reinicio puede consumir gran cantidad de energía, así como averiar la maquinaria (Jiang et al., 2018; Zhang & Chiong, 2016); por consiguiente,

es necesario establecer estrategias pertinentes. Gestionar estos estados en la maquinaria de manera efectiva, permite reducir el consumo energético y se identifica como una estrategia dentro del enfoque de eficiencia energética.

Bajo este contexto Guo et al. (2022) abordan el problema de programación de operaciones en un taller de tipo *flow shop* que opera con máquinas CNC, buscando la eficiencia energética sin comprometer el tiempo de entrega, aprovechando el estado de ultra baja inactividad que presentan estas máquinas en específico. A diferencia del estado de inactividad regular, los sistemas de controlador lógico programable (CLP) y control de posición automático (CPA) de las máquinas CNC se encuentran totalmente desactivados; al respecto, solo se mantienen encendidas las unidades elementales de las máquinas, logrando minimizar de manera sistemática el consumo energético durante tiempos de inactividad prolongada. No obstante, esto implica un tiempo de reinicio más largo cuando la máquina se reactiva. En consecuencia, Guo et al. (2022) a su vez desarrollan un sistema de supervisión energética (SSE) que permite variar de manera activa y automática entre el estado de inactividad y el estado de inactividad ultra baja, extendiendo los intervalos de tiempo entre dos trabajos en la maquinaria; para ello, desarrolla un algoritmo genético híbrido (HGA por sus siglas en inglés, pertenecientes a Hybrid Genetic Algorithm) basándose en el cambio de estados previamente descritos e implementando una estrategia de búsqueda local para determinar cuándo y qué máquina debe pasar al estado de inactividad ultra baja, logrando un equilibrio entre la eficiencia de la producción y la eficiencia energética.

En este contexto, Lu et al. (2017) investigan un problema (PFSPCT) (problema de programación *flow shop* con permutación y tiempo de transporte controlable) eficiente energéticamente en una empresa manufacturera de China que confecciona bielas; para ello, plantea un algoritmo de búsqueda híbrida con *backtracking* (HMOBSA por sus siglas en inglés pertenecientes a hybrid multi-objective backtracking search algorithm) con algoritmo genético

(GA). La razón por la que se adopta esta metaheurística híbrida se da gracias a su eficacia en el abordamiento de problemas de optimización multiobjetivo y la naturaleza NP-hard de la programación de la producción en esa organización (Civicioglu, 2013; Lu et al., 2016, 2017). Este modelo tiene como objetivos la minoración del consumo energético, así como del *makespan*. Se obtiene mediante la intervención correcta del tiempo de inactividad de la maquinaria, el tiempo de preparación y el tiempo de transporte entre las máquinas.

De la misma manera, Xin et al. (2023) contemplan un problema de programación en un taller de tipo *flow shop* de permutación eficiente energéticamente con efecto de aprendizaje biobjetivo: minimización del *makespan* y el costo total de energía (TEC), empleando la metaheurística multiobjetivo de iterado codicioso (MOIG por sus siglas en inglés refiriéndose a multi-Objective iterated greedy algorithm) estableciendo dos estrategias de ahorro, gestionando en primera instancia el tiempo de configuración dependiente de la secuencia. Lo cual se refiere, en primer lugar, al ajuste de las secuencias de los trabajos entre las maquinarias y realizar otro trabajo o proceso; en segunda instancia, la velocidad del transportador en la programación. El efecto de aprendizaje en este algoritmo contribuye a las estimaciones de tiempo para cada tarea a medida que avanza la producción, de manera que los trabajadores junto a la inteligencia artificial podrán tomar de una manera más rápida y pertinente las decisiones de la secuencia, ajuste y preparación de las máquinas.

En ese mismo orden de ideas Caldeira et al. (2020) también proponen un algoritmo de búsqueda de *backtracking* discreto mejorado (IBSA por su siglas en inglés, improved discrete backtracking search algorithm) y desarrollado inicialmente por Civicioglu (2013), para un problema multiobjetivo en un taller tipo *job shop* flexible, en el que considera la llegada de nuevos trabajos con una estrategia de encendido/apagado de la maquinaria con el objetivo de reducir notablemente el consumo energético *makespan*. De este modo, plantean una estrategia de reprogramación de inserción de nuevas órdenes de trabajo para modificar el cronograma y

se usa el análisis de Taguchi para identificar la mejor combinación de parámetros del algoritmo. Finalmente, es comparado con cuatro algoritmos de optimización multiobjetivo para verificar su efectividad.

El presente subenfoco subyace del estado de las máquinas que se emplean en la industria manufacturera, ya sea en estado de procesamiento, inactividad o reposo. De los estudios analizados se infiere que esta propuesta se constituye en una solución para garantizar la eficiencia energética en la producción, que se suscita en talleres de producción desde la preparación de la maquinaria, lo que a grandes rasgos representa una disminución en el costo total energético (TEC) en las problemáticas exploradas, aplicando algoritmo multiobjetivo y heurísticas para solucionar las formulaciones matemáticas para proporcionar la adecuada gestión del cambio de estado en las máquinas.

5.2.3.1.3 Subenfoco de control de velocidad de procesamiento de la maquinaria y secuenciación. En otra perspectiva, surge otra estrategia desde el mismo enfoque de programación de operaciones, en el que se pretende alternar de manera estratégica la velocidad de procesamiento de las máquinas. Una mayor velocidad en las máquinas reduce el tiempo del proceso; sin embargo, aumenta el consumo energético. Por otro lado, a menor velocidad, el tiempo de procesamiento aumenta mientras que el consumo de energía disminuye (Jiang et al., 2018). Por esta razón, los investigadores a través de modelos multiobjetivo procuran disminuir el consumo energético con la regulación de la velocidad equilibrando todos los factores productivos. Adicionalmente, se tiene la disposición de encontrar la secuenciación óptima para que los trabajos se realicen de manera eficiente.

En este sentido, un estudio relevante propone la consideración de la eficiencia energética en el problema de programación de operaciones conocido como *Distributed Blocking Flow Shop Scheduling Problem* (DBFSP). Zhao et al. (2023) presentan un modelo multiobjetivo que pretende disminuir el tiempo de tardanza total de las tareas (TTD), en

conjunto con la disminución del consumo total de energía (TEC). Para ello, se plantean una hiper heurística con *Q-Learning* (HHQL), a fin de tratar el problema DBFSP eficiente energéticamente en conjunto con ocho heurísticas simples o de bajo nivel (LLH). A través de estas, el TTD es minimizado con el aumento de la velocidad de procesamiento de trabajos en la ruta crítica de la producción y el consumo energético total se reduce con la desaceleración de los trabajos en rutas no críticas de la producción.

El uso de las células robóticas flexibles (FRC por sus siglas en inglés, flexible robotic cells) y su optimización conveniente resulta en reducción del consumo energético total (TEC), considerándose la naturaleza NP-Hard del problema. Ghadiri Nejad et al. (2023) desarrollan un modelo mono objetivo de optimización energética de un problema real de *parallel machines* en células robóticas flexibles (FRC), abordando la variación de la velocidad de procesamiento de la maquinaria, la reprogramación o programación en tiempo real (Ghaleb et al., 2020) de sus operaciones, conforme a la gestión de horarios de acuerdo a la demanda y la velocidad de desplazamiento los robots, proponiéndose un algoritmo genético aplicable a otros procesos de fabricación de alto consumo energético.

Igualmente, en el ámbito del transporte entre maquinaria, Zhou & Liao (2020) aducen la solución al problema de programación de un taller *job shop* flexible ecológico con grúas transportadoras, estableciendo que la selección de las grúas debe realizarse de manera estratégica, con el fin de reducir movimientos innecesarios entre ellas. Además, resaltan que la secuencia de los trabajos en estos entornos operativos está altamente relacionada con las rutas de transporte, lo que a largo plazo representa un impacto significativo en el *makespan* y, por ende, en el consumo energético. Cabe mencionar que, aunque el *makespan* puede ser más corto cuando las grúas se mueven a mayor velocidad, esto conlleva a un aumento en el consumo eléctrico. Para ello, plantearon un algoritmo con el objetivo de reducir consumo total energético y la aminoración del *makespan*, en el que los trabajos se secuencian en un orden óptimo, a la

vez que se elige una máquina y una grúa a determinada velocidad de desplazamiento. Dada la naturaleza NP-hard del problema, se presenta un algoritmo denominado híbrido eficiente basado en filtro de partículas y vuelos de Levy para la evolución multiobjetivo descompuesta hibridada con enjambre de partículas, desarrollado de la hibridación entre los algoritmos MOEA/D (por sus siglas en inglés multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition, y optimización por enjambre de partículas (PSO, por su siglas en inglés, particle swarm optimization); así como, la inclusión de estrategias de búsqueda de vecindario de filtro de partículas y vuelos de Levy para mejorar el rendimiento computacional del mismo.

Por otro lado, Dai et al. (2019) proponen un problema en un taller de tipo *job shop* flexible eficiente energéticamente con restricciones en transporte con vehículos guiados de manera autónoma (AGV por sus siglas en inglés, Automated Guided Vehicle) entre máquinas en una taller de producción en Nanjing, China, para lo cual plantean un modelo de programación lineal entera mixta (MILP) con el objetivo de minimizar el *makespan* y el consumo energético. Para dar soluciones óptimas se desarrolla un algoritmo metaheurístico mejorado basado en una combinación de algoritmo genético (GA), optimización de enjambre de partículas (PSO) y algoritmo de recocido simulado (SA por sus siglas en inglés pertenecientes a simulated snnealing). Este algoritmo muestra un rendimiento óptimo frente al algoritmo genético tradicional; no obstante, el problema no tiene en cuenta eventos como fallas de la maquinaria, cancelación de trabajos y eventos inesperados, por lo cual se hace la recomendación de abarcar problemas de programación dinámicos en futuras investigaciones.

En el mismo orden, Xu et al., (2023) presentan un problema de programación ecológica multiobjetivo del taller de trabajo flexible integrado con vehículos guiados de manera autónoma; para ello, diseñaron un modelo de programación entera mixta en un entorno real que busca la reducción del *makespan* y el consumo total energético. En este modelo no solo se tienen en cuenta las restricciones de secuencia de procesamiento de los trabajos, también los

múltiples estados de los AGV. Para dar resolución a este problema, plantearon un algoritmo heurístico eficiente (EHA por sus siglas en inglés referentes a enhanced heuristic algorithm) basado en algoritmo genético de clasificación no dominado (NSGA-II por su siglas en inglés pertenecientes a non-dominated sorting genetic algorithm II). En este algoritmo mejorado, proponen reglas eficientes para seleccionar el AGV apropiado para cada operación. Asimismo, se presenta una estrategia de búsqueda loca para mejorar la calidad de las soluciones.

Por otro lado, Jiang & Wang, (2019) investigan el mismo tipo de problema de programación de tipo *flow shop* anterior, con tiempo de transporte controlable y tiempo de preparación dependiente de la secuenciación de las tareas, con la diferencia de que desarrollan un algoritmo evolutivo multiobjetivo basado en descomposición mejorado (IMOEAD), basado en el propuesto inicialmente por Zhang & Li (2007). Este descompone el problema original en subproblemas para resolverlos de manera colaborativa, buscando la aminoración del *makespan* y el consumo energético, toda vez que desarrolla dos heurísticas para mejorar la capacidad de búsqueda del algoritmo, demostrando ser superior al planteado en la investigación de Lu et al. (2017).

Asimismo, Wang et al. (2023) estudia un problema de programación multiobjetivo *flow shop* híbrido con sublotes consistentes, que propende la minimización del *makespan*, así como del costo total de consumo energético (TEC) de manera simultánea. Para ello, propone un algoritmo de colonia de abejas artificial discreto multiobjetivo (MODABC por sus siglas en inglés pertenecientes a multi-objective model based on discrete artificial bee colony algorithm), en el que se determina previamente la división de lotes, su secuencia, además de su asignación a las máquinas y la variación de la velocidad de estas para cumplir con los objetivos planteados.

Dada la vital importancia que representa la eficiencia energética en todo proceso operativo de fabricación actual, Liu et al. (2019) estudian un problema de tipo *flow shop* ultra flexible (uFSP), en el cual las operaciones pueden ser procesadas por más de una máquina y

no se encuentra predeterminada la asignación de maquinaria a un proceso; adicionalmente, las rutas de los trabajos no son fijas y la secuenciación de todas las operaciones de un trabajo pueden variar con determinadas restricciones. Este algoritmo es formulado con programación lineal entera mixta (MILP) y su solución en grandes instancias se realiza con un algoritmo genético (GA). El objetivo principal del modelo es la minimización costo total energético (TEC), compuesto por el total de energía de procesamiento (TPE) y el total de energía de transición (TTE).

Del mismo modo, Jiang et al. (2018) presenta un problema de tipo *job shop* eficiente energéticamente con un algoritmo de optimización de ballenas mejorado (IWOA por sus siglas en inglés pertenecientes a improved whale optimization algorithm), en el cual añade factores de convergencia no lineal y un operador de mutación para mejorar la capacidad y exploración del algoritmo, obteniendo un esquema de producción factible con diferentes niveles de velocidad de operación en la maquinaria. Paralelamente, Zandi et al., (2020) plantean una formulación matemática para abordar el problema de programación ecológica de *parallel machine*, cuyos objetivos principales son la minimización del consumo total eléctrico y el *makespan*, proponiendo un modelo de programación entera mixta (MIP) y considerando los consumos de energía variables en la velocidad de procesamiento para cada unidad de trabajo.

Desde otra perspectiva, respecto al uso de tecnologías propias de la industria 4.0, Danishvar et al. (2021) formulan un marco de optimización de sistemas de producción basados en fabricación por lotes. En concreto, un modelo de programación para un taller de tipo *flow shop* de producción por lotes multiobjetivo, en conjunto con una red neuronal profundamente conectada (FCDNN por sus siglas en inglés perteneciente a Fully Connected Deep Neural Network) a un caso de la vida real en una organización que fabrica piezas a base de metal duro de carburo de tungsteno, estableciéndose como objetivos la minimización de la energía consumida por unidad de producto, el costo de las operaciones y el *makespan*. En este

problema, se procesan secuencias de una gran variedad de trabajos en máquinas idénticas y no idénticas, gracias a su integración con la FCDNN, la toma de decisiones se realiza de manera automática sin que sea necesarias las intervenciones de expertos, lo cual añade flexibilidad y comodidad en la gestión de las operaciones complejas en sistemas de producción. Este modelo demuestra la eficacia del uso de redes neuronales profundas en la programación de operaciones, de manera que pueda integrarse con diferentes métodos de optimización.

Asimismo, Luan et al. (2023) con el mismo propósito de convertir más sostenibles las empresas manufactureras, contribuyeron con una estrategia eficaz de ahorro de energía al formular un problema de programación multiobjetivo en un taller de tipo *job shop* con objetivos fijados: minimización del *makespan*, consumo de energía y el tiempo de tardanza. Para ello, desarrolla un algoritmo genético de clasificación no dominado (NSGA-II) mejorado, con el cual se optimiza la precisión en la solución, en tanto se diversifica la población del algoritmo.

A manera de cierre, este subenfoque tratado disminuye el consumo energético desde la programación de operaciones regulando la velocidad de la maquinaria; pero en equilibrio con los factores productos y/o optimizando la secuenciación de los trabajos en entornos operativos. Para esto, en las investigaciones se pueden apreciar problemáticas en talleres *parallel machine*, *flow shop* y *job shop* que buscan reducir especialmente el *makespan* a la vez que el consumo energético desde variados algoritmos de resolución multiobjetivo.

En la tabla 5 se pueden apreciar todas las investigaciones de programación de producción con un enfoque de eficiencia energética, con su técnica de modelamiento, algoritmo de solución, medida de sostenibilidad preponderante y tipo de sistema de manufactura.

Tabla 5

Investigaciones con enfoque de eficiencia energética

Subenfoque de eficiencia energética	Autores	Distribución de sistema de manufactura	Medida(s) de sostenibilidad (eficiencia energética)	Técnica de modelamiento	Algoritmo de solución
-------------------------------------	---------	--	---	-------------------------	-----------------------

Producción por tarificación con precio variable de energía	An X.; Si G.; Xia T.; Wang D.; Pan E.; Xi L.	Parallel machine	Integración de mantenimiento preventivo y producción óptima conforme a tarifas TOU	Programación de enteros mixtos (MIP)	Algoritmo Genético de Codificación Multicapa (MLEGA)
Producción por tarificación con precio variable de energía	Batista JB.; McConky K.; Proano R	Parallel machine	Porcentaje de utilización de máquinas conforme a precios variables de demanda	Programación lineal entera mixta (MILP)	Algoritmo genético (GA), optimización de enjambre de partículas (PSO) y algoritmo de recocido simulado (SAA).
Gestión efectiva de las máquinas en su cambio de estado	Caldeira R.H.; Gnanavelbabu A.; Vaidyanathan T.	Job shop	Encendido/apagado de la maquinaria eficiente con llegada de nuevos trabajos	Programación lineal entera mixta (MILP)	Algoritmo de búsqueda de backtracking discreto mejorado (IBSA)
Producción por tarificación con precio variable de energía	Cui W.; Lu B.	Job shop	Gestión de la demanda y mantenimiento con tarifas TOU	Programación lineal entera mixta (MILP)	Algoritmo heurístico dinámico de dos capas
Control de velocidad de procesamiento de la maquinaria y secuenciación	Dai M.; Tang D.; Giret A.; Salido M.A.	Flow shop	Configuración de transporte entre maquinarias, tiempo de trabajos y velocidad de procesamiento	Programación lineal entera mixta (MILP)	Algoritmo genético (GA) combinando algoritmos PSO y SAA
Control de velocidad de procesamiento de la maquinaria y secuenciación	Danishvar M. ; Danishvar S.; Katsou E.; Mansouri S.A.; Mousavi A.	Flow shop	Integración de sistemas de redes neuronales para la toma de decisiones en las rutas de trabajo y secuenciación de maquinaria.	Programación entera mixta (MIP)	Algoritmo por lotes multiobjetivo (MOBS-NET) con red neuronal profunda completamente conectada (FCDNN)
Gestión efectiva de las máquinas en su cambio de estado	Ghadiri Nejad M.; Vatankhah Barenji R.; Güleriyüz G.; Shavarani S.M.	Parallel machine	Variación integrada de velocidad de robots y velocidad de procesamiento	Programación lineal entera mixta (MILP)	Algoritmo genético (GA)
Gestión efectiva de las máquinas en su cambio de estado	Guo J.; Wang L.; Kong L.; Lv X.	Flow shop	Variación automática de máquinas en inactividad a estado de inactividad ultra baja	Programación lineal entera mixta (MILP)	Algoritmo genético híbrido (HGA)
Producción por tarificación con precio variable de energía	Hilbert M.; Dellnitz A.; Kleine A.	Parallel machine	Uso de baterías redox para almacenamiento energético y consideración de precios dinámicos de electricidad (RTP, TOU) y acuerdos de compra de energía (PPA)	Programación Entera No Lineal Mixta (MINLP)	Algoritmo heurístico de corrección y relajación (FRH)
Control de velocidad de procesamiento de la maquinaria y secuenciación	Jiang E.-D. ; Wang L.	Flow shop	Configuración de transporte entre maquinarias, tiempo de trabajos y velocidad de procesamiento	Programación lineal entera mixta (MILP)	Algoritmo de Optimización Multiobjetivo Evolutivo con Descomposición (MOEA/D)
Control de velocidad de procesamiento de la maquinaria y secuenciación	Jiang T. ; Zhang C.; Zhu H.; Gu J.; Deng G.	Job shop	Selección de niveles adecuados de procesamiento en maquinaria	Programación Entera No Lineal Mixta (MINLP)	Algoritmo de optimización de ballenas mejorado (IWOA)
Control de velocidad de procesamiento de la maquinaria y secuenciación	Kapoor E.; Kumar A.; Singh D.	Flow shop	Distribución de trabajos en diferentes secuencias de maquinaria	Programación No Lineal (NLP)	Algoritmo metaheurístico Jaya
Control de velocidad de procesamiento de la maquinaria y secuenciación	Lian X. ; Zheng Z.; Wang C.; Gao X.	Flow shop	Control de rutas de procesamiento y secuenciación de las máquinas	Programación lineal entera mixta (MILP)	Algoritmo de Optimización Multiobjetivo Evolutivo con Descomposición (MOEA/D)
Control de velocidad de procesamiento de la maquinaria y secuenciación	Liu N.; Zhang Y.F.; Lu W.F.	Job shop	Gestión del orden de operaciones en ordenes de trabajo y asignación efectiva de maquinaria	Programación lineal entera mixta (MILP)	Algoritmo genético (GA)

Gestión efectiva de las máquinas en su cambio de estado	Lu C.; Gao L.; Li X.; Pan Q.; Wang Q.	Flow shop	Intervención correcta del tiempo de inactividad de la maquinaria, el tiempo de preparación y el tiempo de transporte entre las máquinas	Programación lineal entera mixta (MILP)	Algoritmo de búsqueda de backtracking multiobjetivo híbrido (HMOBSA)
Control de velocidad de procesamiento de la maquinaria y secuenciación	Mokhtari H.; Hasani A.	Job shop	Integración de mantenimiento y producción con secuencia de maquinaria	Programación Entera No Lineal Mixta (MINLP)	Algoritmo genético (GA) con algoritmo de recocido simulado (SA)
Control de velocidad de procesamiento de la maquinaria y secuenciación	Öztopa H. ; Tasgetiren M. F.; Eliyi D. T.; Pand Q.-K.; Kandiller L.	Flow shop	Gestión de secuencia de los trabajos y variación de niveles de procesamiento	Programación Entera No Lineal Mixta (MINLP)	Algoritmo NEH (Nawaz-Enscore-Ham)
Producción por tarificación con precio variable de energía	Ramos A.G.; Leal J.	Single machine	Se considera de la variación del costo de la energía a lo largo del día, evitando periodos con precios más altos	Programación lineal entera (ILP)	Algoritmo genético (GA)
Producción por tarificación con precio variable de energía	Saberi H.; Reisi-Nafchi M.; Moslehi G	Parallel machine	Asignación de trabajos en horarios de precios más bajos.	Programación lineal entera mixta (MILP)	Algoritmo heurístico de corrección y relajación (FRH)
Control de velocidad de procesamiento de la maquinaria y secuenciación	Sang Y.; Tan J.	Job shop	Gestión del orden de operaciones en ordenes de trabajo y asignación efectiva de maquinaria	Programación Entera No Lineal Mixta (MINLP)	El algoritmo memético combinando SPEA2 mejorado y la búsqueda por vecindario variable
Producción por tarificación con precio variable de energía	Scholz S.; Meisel F.	Continuous manufacturing	Se desarrolla una plataforma de coordinación de la producción (PCP) para direccionar la disponibilidad de energía proveniente de fuentes renovables con gestión de tarifas TOU	Programación lineal entera mixta (MILP)	Modelo integrado de optimización (IOM)
Control de velocidad de procesamiento de la maquinaria y secuenciación	Tian S.; Wang T.; Zhang L.; Wu X.	Job shop	Integración de sistema IoT con la producción para determinar la mejor ruta y secuencia de las ordenes	Programación No Lineal (NLP)	Algoritmo de colonia de hormigas (ACO)
Producción por tarificación con precio variable de energía	Tsao Y.-C.; Thanh V.-V.; Hwang F.-J.	Single machine	Asignan tiempos de procesamiento adecuados y variación del estado de las máquinas según tarifas TOU	Programación entera mixta (MIP)	Algoritmo genético (GA) con control difuso tipo 2
Producción por tarificación con precio variable de energía	Wang S.; Wang X.; Yu J.; Ma S.; Liu M.	Parallel machine	Ruta de procesamiento y utilización de maquinaria conforme a tarifas TOU,	Programación entera mixta (MIP)	Algoritmo genético no dominado (NSGA-II)
Control de velocidad de procesamiento de la maquinaria y secuenciación	Wang W.; Zhang B.; Jia B.	Flow shop	Regulación de la velocidad de producción equilibrando factores productivos para reducir consumo	Programación lineal entera mixta (MILP)	Algoritmo de colonia de abejas artificial discreto multiobjetivo (MODABC)
Gestión efectiva de las máquinas en su cambio de estado	Wei H.; Li S.; Quan H.; Liu D.; Rao S.; Li C.; Hu J.	Job shop	Ahorro de energía al poner las máquinas en modo de espera o apagarlas cuando permanecen inactivas	Programación entera mixta (MIP)	Algoritmo genético multiobjetivo U-NSGA-III combinado con Nawaz-Enscore-Ham (NEH)).
Gestión efectiva de las máquinas en su cambio de estado	Xin X. ; Jiang Q.; Li C.; Li S.; Chen K.	Flow shop	Manejo del velocidad del transportador y control eficaz de estados de maquinaria	Programación entera mixta (MIP)	Algoritmo multiobjetivo de iterado codicioso (MOIG)
Control de velocidad de procesamiento de la maquinaria y secuenciación	Xu G. ; Bao Q.; Zhang H.	Job shop	Gestión eficiente de los AGV y secuencia de procesamiento de los trabajos	Programación Entera Mixta en Modo Mixto (MMIP)	Algoritmo heurístico eficiente (EHA) basado en algoritmo genético de clasificación no dominado (NSGA-II)

Producción por tarificación con precio variable de energía	Xue L.; Wang X.	Flow shop	Se diseña un esquema de codificación para controlar la secuenciación y cambio de estado de máquinas teniendo en cuenta tarifas TOU	Programación lineal entera mixta (MILP)	Algoritmo de evolución diferencial discreta multiobjetivo (MDDE).
Control de velocidad de procesamiento de la maquinaria y secuenciación	Zandi A.; Ramezani R.; Monplaisir L.	Parallel machine	Asignación de diferentes niveles de procesamiento para disminuir consumo.	Programación entera mixta (MIP)	Algoritmo Heurístico
Producción por tarificación con precio variable de energía	Zhai Y.; Biel K.; Zhao F.; Sutherland J.W.	Flow shop	Integración de fuentes de energía renovables como turbinas eólicas y alternancia con la red eléctrica según tarifas TOU	Programación lineal entera mixta (MILP)	Sistema de modelado algebraico general (GAMS)
Control de velocidad de procesamiento de la maquinaria y secuenciación	Zhao F.; Di S.; Wang L.	Flow shop	Aumento de la velocidad de procesamiento de trabajos en la ruta crítica de la producción y desaceleración de los trabajos en rutas no críticas de la producción.	Programación lineal entera mixta (MILP)	Algoritmo hiper heurístico con Q-Learning (HHQL)
Producción por tarificación con precio variable de energía	Zheng X.; Zhou S.; Xu R.; Chen H	Flow shop	Programación de velocidad de maquinaria conforme a tarifas TOU y reducir makespan	Programación entera mixta (MIP)	Algoritmo de optimización de colonias de hormigas híbridas multiobjetivo (MHACO)
Control de velocidad de procesamiento de la maquinaria y secuenciación	Zhou B.; Liao X.	Job shop	Selección eficaz de grúas de desplazamiento para evitar movimientos innecesarios y secuenciación de maquinaria acorde	Programación entera mixta (MIP)	Algoritmo basado en filtro de partículas y vuelos de Lévy para la evolución multiobjetivo descompuesta híbrida con enjambre de partículas (PLMEAPS)

5.2.3.2 Enfoque de reducción de Huella de Carbono. La reducción de las emisiones de carbono en las operaciones manufactureras ha generado una creciente preocupación a nivel global. El incremento del consumo energético se traduce asimismo en una cantidad significativa de emisiones de carbono. En Alemania, las empresas manufactureras representan el 47% del consumo energético total del país, siendo responsables de aproximadamente el 20% de las emisiones totales de carbono (Fallahi et al., 2023; Li et al., 2020). A medida que las cuestiones ambientales se convierten en un tema cada vez más relevante, los consumidores con conciencia ambiental prefieren elegir productos con etiquetas de bajo carbono. Además, en varios países se han promulgado regulaciones sobre impuestos o aranceles al carbono; por consiguiente, es probable que se emitan en más países en un futuro cercano. La reducción de las emisiones de carbono en una empresa de producción personalizada ayudaría a mejorar la

competitividad de los productos y a disminuir los impuestos futuros sobre el carbono (Liu et al., 2017).

Las emisiones de carbono de las operaciones de fabricación representan una fuente primaria de contaminación ambiental y pueden reducirse mejorando el diseño de los procesos desde la programación de las operaciones (Hudaifah et al., 2024; Liu et al., 2021; Zhao, Zhang, et al., 2023).

La investigación sobre la programación sostenible de máquinas es crucial para encontrar un equilibrio entre la eficiencia energética y la puntualidad en la entrega. Si bien apagar las máquinas durante la inactividad puede reducir las emisiones de carbono, esto puede generar retrasos en la producción y aumentar las emisiones de distribución debido a la necesidad de más viajes de transporte. Por otro lado, minimizar las emisiones de distribución puede aumentar significativamente las emisiones de producción (Wang et al., 2019).

Una gran proporción de la huella de carbono proviene de las industrias manufactureras a nivel global, de ahí que desde la programación de la producción se busque reducir las emisiones de este elemento. Las emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente las emisiones de dióxido de carbono han suscitado una gran preocupación en todo el mundo. En aras de la protección del medio ambiente, los gobiernos buscan una economía baja en carbono mediante la promulgación de leyes estrictas sobre la reducción de las emisiones de carbono. Los consumidores más sensibles a las emisiones también han dirigido el mercado hacia productos limpios (Wang et al., 2019; Zhang et al., 2015).

En los talleres de manufactura, cada elemento o producto sigue un recorrido a través de diversas máquinas de acuerdo con la programación de producción. Dado que mayoritariamente no todos los productos comparten la misma secuencia de procesamiento, resulta desafiante calcular de manera precisa la huella de carbono asociada a los productos fabricados en el taller; no obstante, existen mecanismos que permiten medir la huella de carbono. En sistemas

productivos con talleres tipo *job shop*, usualmente la huella de carbono en una organización manufacturera se calcula con las emisiones totales del sistema de fabricación y no se asignan las emisiones a cada producto. Sin embargo, este método no resulta tan eficaz cuando se trata de diferentes productos y de diferentes procesos de mecanizado (Liu et al., 2017).

Por lo tanto, los gobiernos de todo el mundo han emitido diversas políticas y regulaciones que exigen que los fabricantes industriales adopten activamente medidas de ahorro de energía (Zhang y Chiong 2016). Por ejemplo, en 2020 el gobierno chino anunció oficialmente en la 75ª Asamblea General de las Naciones Unidas que implementaría varias políticas para garantizar la neutralidad de carbono para 2060.

El cálculo de la huella de carbono del producto en las tiendas de trabajo es un requisito esencial para proporcionar información precisa sobre las emisiones de carbono de los productos, lo que permite a las empresas tomar medidas para reducirlas (Liu et al., 2017).

Siguiendo la línea de programación de operaciones sostenible, con un enfoque en la reducción de la huella de carbono, He et al. (2023) propone un modelo de optimización multiobjetivo de dos etapas en el que se asegura la convergencia colaborativa entre la modificación estratégica de parámetros de corte y la programación de operaciones. Para ello, se establece la reducción de las emisiones de las máquinas de corte, en cuanto al consumo energético de éstas y el consumo de materiales en el proceso (principalmente fluidos de corte y el desgaste de las herramientas inherentes al proceso). El cambio de los parámetros corte incide en una mejor gestión energética en el mecanizado del material de las piezas de trabajo, el consumo de fluido de corte, el desecho de fluido residual y del consumo; asimismo, de las emisiones generadas por el consumo de la herramienta de corte (despreciando emisiones relativamente pequeñas productos del afilado de la herramienta). También, He et al. (2023) plantean un modelo de programación multiobjetivo en un taller *job shop* flexible de bajas emisiones de carbono considerando la incertidumbre de los parámetros de corte, el cual

propende la minimización tanto de las emisiones totales de carbono; así como, del tiempo de procesamiento. Al respecto, el autor emplea un algoritmo genético (NSGA) mejorado con optimización de Pareto, mediante la integración de un software que contiene en tiempo real toda la base de conocimiento del proceso y a través de sus módulos se gestionan los recursos de taller de trabajo, la información del usuario, especificaciones de los productos y de las piezas empleadas, denominado sistema de ejecución de manufactura (MES).

En concomitancia, este sistema de ejecución de manufactura también es empleado por Liu et al., (2017) de manera extendida para el desarrollo de un algoritmo en un taller de *job shop* flexible, con el propósito de ayudar a las empresas a reducir la huella de carbono en sus productos; de este modo, los investigadores proponen un modelo híbrido de optimización de mosca de fruta (HFOA por sus siglas en inglés pertenecientes a Hybrid Fruit Fly Optimization Algorithm) de resolución multiobjetivo basado en el algoritmo de optimización de mosca de fruta (FOA) propuesto por Pan (2012), el cual fija dos funciones objetivo: la primera, busca la minimización de la huella de carbono en la manufactura de productos; la segunda ecuación busca la aminoración del *makespan* de la producción en un taller de tipo *job shop* flexible.

Otra táctica valiosa en la reducción de la huella de carbono es la adopción de fuentes de energía renovable, bien sea la energía solar, la energía eólica, el uso de biocombustibles, entre otros. Es por esto que las organizaciones buscan de manera estratégica instaurar sistemas de generación energética renovable, a fin de disminuir su dependencia a la red eléctrica y ser más competitivas en términos de costos; por supuesto esto conlleva a reducir las emisiones de carbono (Zhai et al., 2017).

De ahí que, Zhai et al. (2017) indagan la reducción del impacto ambiental, así como de la huella de carbono desde la programación de la producción de un producto en una empresa manufacturera en Chicago, Estados Unidos que opera 8 horas al día. Presentan un problema de programación lineal entera mixta (MILP), con el objetivo de aminorar el costo total energético

(TEC) en un taller tipo *flow shop* en el que se explora el uso de energía renovable por conducto de una turbina de energía eólica y la programación de las operaciones conforme a la tarificación de la electricidad. Para ello, fue necesario el desarrollo de pronósticos actualizados dinámicamente tanto para la velocidad real del viento como para el costo energético. Su efectividad es puesta en juicio frente a otros dos casos con un *throughput* constante. Uno en el que se prioriza la minimización del *makespan*; y otro en el que se considera la disminución del costo total energético empleando únicamente la red eléctrica estándar, llegándose a concluir que el modelo de producción propuesto con una turbina de energía eólica proporciona un 14,6% menos de costo total, sin afectar de manera notable el *makespan*.

Por otro lado, Piroozfard et al. (2018) formulan un estudio que busca minimizar simultáneamente la huella de carbono y el criterio total de trabajo tardío, para un problema de programación de tipo *flow shop*. Al respecto, proponen un algoritmo competitivo imperialista multiobjetivo (MOICA por sus siglas en inglés pertenecientes a Multi-Objective Imperialist Competitive Algorithm) en el que busca un conjunto de soluciones no dominadas en que las operaciones se secuencien de manera óptima. Consideraron los estados de operación de la maquinaria (activo e inactivo) para un consumo energético inferior, el tiempo de procesamiento, adicional a la fecha de vencimiento de los trabajos. Lo anterior, puesto que al garantizarse la finalización oportuna de las tareas y pedidos, la necesidad de horas extras para la terminación de tareas críticas reduce la generación de huellas de carbono generadas por la maquinaria en procesamiento.

Por lo anteriormente expuesto, se deduce que el enfoque de reducción de huella de carbono responde al elevado índice de emisiones de carbono que generan las empresas manufactureras contaminando el sistema ambiental; para lo cual, desde la programación de operaciones en los talleres de manufactura se llevan a cabo métodos para calcular las emisiones de carbono en los sistemas de fabricación y de esta manera implementar modelos de

optimización multiobjetivo que gestionen parámetros de corte para disminuir desechos de fluido de corte, y también reducir el consumo energético relacionado con la generación de huella de carbono. Igualmente, este enfoque contempla la adopción de fuentes de energía renovable como la solar y eólica.

5.2.3.2.1 Subenfoque de integración con cadena de suministro. De otra parte, una correcta optimización conjunta de la programación de la producción y la logística de distribución puede confluir en la implementación de estrategias innovadoras que aborden de manera integral este desafío medio ambiental, dado que la inconsistencia entre la programación de producción y la entrega logística puede ser un factor clave que afecta el costo de inventario de las empresas (Liao & Wang, 2019).

A la luz de lo anterior, se destaca la relevancia de investigaciones focalizadas en esta estrategia de producción y distribución de manera sostenible. Wang et al., (2019) aborda un problema integrado de programación de *single machine* y enrutamiento de vehículos siguiendo el principio de procesamiento de primero entrar, primero en salir (PEPS). En este estudio, el objetivo es la minimización de las emisiones totales de carbonos; por lo cual, se debe determinar el tiempo de inicio para procesar cada trabajo, los periodos de preparación, inactividad y procesamiento de la maquinaria; así como, los lotes de distribución junto a sus rutas óptimas. De esta manera, se propone un algoritmo híbrido de búsqueda tabú (TS por siglas en inglés pertenecientes a Tabú Search) para la resolución del problema que ofrece un enfoque práctico para abordar la problemática ambiental desde la programación de operaciones y la mejora de la eficiencia operativa en la cadena de suministro en las organizaciones.

Ahora bien, en el caso de las empresas que manejan máquinas procesadoras por lotes (BPM por sus siglas en inglés pertenecientes a Bath Processing Machines); es decir, máquinas específicas que procesan conjuntos de trabajos agrupados en lotes (Fallahi et al., 2023; Shahidi-Zadeh et al., 2017) y con miras a analizar el impacto de las regulaciones al carbono impuestas

por la Unión Europea, adicional al impuesto al carbono y el denominado *cap and trade* (las entidades estatales establecen un límite de emisiones y de acuerdo con las emisiones presentadas por las empresas, estas pueden comprar y vender los derechos de estas emisiones); Fallahi et al. (2023) abordan un problema de programación de *parallel machine* por lotes no relacionadas, en las que se consideran las políticas anteriormente mencionadas, con el fin de involucrar a los directivos en la toma de decisiones operativas adecuadas. Se trata entonces de un problema de programación multiobjetivo que busca minimizar tanto el *makespan* como las emisiones de carbono derivadas del consumo de energía; para esto, los investigadores recurren a dos algoritmos metaheurísticos para considerar situaciones de gran tamaño. En concreto, el algoritmo genético de clasificación no dominado (NSGA-II) y algoritmo multiobjetivo de lobo gris (MOGWO por su siglas en inglés pertenecientes a Multi-Objective Grey Wolf Optimizer); en consecuencia, los resultados evidencian que las políticas impuestas al carbono se traducen en una reducción significativa de las emisiones implicando costos adicionales a los sistemas de producción.

Considerando las demandas cambiantes de los clientes, los sistemas flexibles de manufactura han tomado relevancia para satisfacer las necesidades de los consumidores mediante las celdas flexibles de manufactura (FMC), las cuales son un conjunto de máquinas interrelacionadas que llevan a cabo un proceso en particular de diferentes gamas de tamaño y variedad de piezas (Jain et al., 2013; Zhou & Lei, 2021). Dado este contexto y con avances tecnológicos como la implementación de robots de manejo de materiales en celdas flexibles de manufactura (FMC-R), Zhou & Lei, (2021) formulan un modelo basado en el algoritmo multiobjetivo de Lobo Gris (MOGWO), mejorado con la integración de vuelo de Levy y mecanismo de distancia ponderada con el fin mejorar el modelo, a fin de resolver el problema con dos objetivos fijados: la minimización del *makespan* y la energía total de consumo en el proceso, incluyendo la energía consumida por los robots que transportan materiales dentro del

taller de producción. Por lo anterior, se debe establecer un orden de los trabajos cuidadosamente, con el propósito de reducir los desplazamientos de los robots entre la maquinaria, para que los mecanismos fluctúen con astucia entre su estado de inactividad y su estado de procesamiento.

La industria 4.0 es un paradigma de producción que sienta las bases para las organizaciones que actualmente fabrican, diseñan y distribuyen sus productos empleando tecnologías inteligentes que se integran de manera unificada e incontrovertible en el proceso de fabricación, junto a métodos numéricos y lógicos. Estos conforman la próxima revolución industrial para la manufactura, caracterizada por el aumento de la flexibilidad, la productividad, la eficiencia y la sostenibilidad, que en última instancia conducen a una mayor competitividad en el mercado global (Danishvar et al., 2021; Denno et al., 2018; Fu et al., 2018). En esta búsqueda incansable de las compañías en beneficio del desarrollo de métodos productivos que les permitan ser eficientes energéticamente, se destaca la irrupción de la robótica en la programación de operaciones, la utilización de robots para el transporte de piezas entre máquinas; en este sentido, la carga y descarga de las mismas no solo aumenta la eficiencia energética, también resulta asequible en comparación con otras tecnologías (Nejad et al., 2019).

En el mismo contexto de la reducción de emisiones de carbono en la industria, es pertinente mencionar sistemas productivos que implementan avances tecnológicos propios de la industria 4.0 como el *internet de las cosas* (IoT por siglas en inglés pertenecientes a Internet of Things), el cual ha permeado en la industria de producción desde que las máquinas funcionan en conjunto con la tecnología *big data*, tecnologías de automatización y análisis de datos para la toma de decisiones en las empresas, de modo que las máquinas, sistemas y procesos se conecten de forma más eficiente, mejorando la productividad y la calidad (Modoni et al., 2019). El desarrollo de la industria 4.0, así como la automatización en la producción, han generado un entorno dinámico que acrecienta la necesidad de las organizaciones a adaptarse constantemente

a las tecnologías emergentes, que integren estrategias ágiles y flexibles para mantenerse competitivas (Erol et al., 2016; Ivanov et al., 2020; Mourtzis et al., 2020; Thoben et al., 2017; Zhou & Lei, 2021).

Gracias a estos avances, Liao & Wang, (2019) desarrollan un sistema inteligente de manufactura combinando los avances de la industria 4.0 y el IoT para una empresa de comercio electrónico (e-commerce), a través de una plataforma de producción inteligente con arquitectura de IoT de tres capas: la capa de adquisición de datos; la plataforma de programación de operaciones y la capa de aplicación. La primera capa se refiere a la interconexión generalizada del taller en internet, mediante sensores inteligentes y una red *wi-fi*, lo que proporciona un monitoreo y seguimiento en tiempo real para ajustar de manera constante la programación de la producción y realizar ajustes pertinentes. La capa de programación de operaciones concierne la integración de los datos de la primera capa, con el apoyo de tecnologías como *big data* y *cloud computing*; de manera conjunta, con el IoT se realiza un análisis en tiempo real para aumentar la producción y la eficiencia. Finalmente, en la capa de aplicación, se determina la cantidad de trabajos a realizar y su secuenciación, de acuerdo con la retroalimentación dada por la plataforma de la programación de la producción, la cual se aloja en una base de datos.

Posterior al desarrollo de la plataforma constituida en arquitectura IoT, se establece un modelo de optimización verde colaborativo de la producción y entrega. Dicho modelo establece como objetivo la minimización del costo total de producción al divide en: costos relacionados con las emisiones de carbono y los alusivos a la operación de producción y entrega. El costo de las emisiones de carbono se refiere a las emisiones derivadas de la energía usada por la maquinaria en la operación y a las emisiones generadas por los vehículos en la entrega. Este modelo de optimización producción-entrega con bajas emisiones de carbono proporciona una

base teórico-práctica para la integración de la producción en empresas de comercio electrónico, de manera que los tiempos de entrega se realicen oportuna y eficientemente.

En entornos de talleres de producción es imprescindible que cada trabajo sea transportado a la siguiente máquina para continuar el proceso productivo, ya sea por cintas transportadoras, sistemas de transferencia lineal o vehículos guiados de manera autónoma (AGV), por cuanto el tiempo de transporte puede generar periodos de espera en las máquinas en la secuencia de operación. Por consiguiente, en ciertos problemas de programación de operaciones, los aspectos relacionados con el transporte entre unidades de procesamiento no pueden ser pasados por alto (Dai et al., 2019; Xu et al., 2023). Además, las operaciones de transporte de recursos naturalmente consumen una cantidad considerable de energía, debido a una pobre optimización desde la programación de la producción (Gadaleta et al., 2019; Moreira et al., 2019; Pastras et al., 2019).

En contextos de fabricación inteligente propios de la industria 4.0, los vehículos guiados de manera autónoma (AGV) son empleados como enlace clave entre plantas, los cuales llevan a cabo las tareas de transporte de trabajos entre máquinas sucesivas. La introducción de estrategias desde la programación de operaciones con el uso eficiente de estos AGV permite abordar problemas reales de producción con soluciones innovadoras como las planteadas por Liu et al. (2022) en un taller de manufactura flexible de múltiple velocidad, transporte con vehículos guiados de manera autónoma (AGV) y con bajas emisiones de carbono, empleando un modelo de programación lineal entera (MIP) con dos objetivos en concreto: la minimización total de consumo de energía en el proceso de operación de la máquina y de los AGV; así como, del *makespan* durante la producción. Para la resolución de esta problemática se diseñaron un modelo de estimación de distribución probabilística que genere posibles soluciones a los objetivos planteados con una estrategia heurística de programación con bajas emisiones de carbono hacia el medio ambiente.

En otra línea, Hudaifah et al. (2024) investigan un problema de programación temprana/tardía de *single machine* que considera las emisiones de carbono supeditadas a los niveles de velocidad específica de la maquinaria en el proceso, formulando un modelo multiobjetivo de programación entera mixta (MILP), con objetivos fijados de minimización de las emisiones de carbono, así como de la tardanza y prontitud de la producción. En dicho modelo, los trabajos se procesan con diferentes niveles de velocidad de mecanizados discretos. Para la resolución de esta problemática formularon un Algoritmo Genético con Intersección Normal de Límite (GANBI por sus siglas al inglés pertenecientes a Genetic Algorithm with Normal Boundary Intersection), como herramienta de gestión en la empresa analizada, estableciendo una conexión directa entre las decisiones operativas y financieras.

Conforme a lo expuesto, este subenfoque de integración con la cadena de suministro se centra en la convergencia de la programación de operaciones con la logística de distribución como estrategia clave para abordar de manera efectiva el desafío medioambiental. De ahí que las empresas que se enlistan en los documentos expuestos busquen gestionar de manera efectiva el tiempo y secuenciación de los trabajos de modo que al terminarse un producto para reducir el consumo energético y que, este pueda ser enviado a distribución en vehículos en el menor tiempo posible; respondiendo de mejor manera a la demanda e incurriendo en menor gasto de combustible. Asimismo, avances tecnológicos como el internet de las cosas (IoT) permiten que el manejo de los tiempos de entrega se realice de manera oportuna y eficiente gracias a la recopilación de datos en sistemas. Este subenfoque no solo contribuye a mitigar el impacto ambiental sino también fortalecer de manera simultánea la competitividad de las organizaciones con responsabilidad ambiental.

5.2.3.2.2 Gestión de ciclo de vida. Por otro lado, en el ámbito empresarial es importante ensalzar el concepto de la gestión del ciclo de vida de un producto como estrategia para la reducción de la huella de carbono. Esta práctica desde un enfoque holístico abarca la planificación, implementación, control y mejora continua de productos o servicios a lo largo de todas las etapas de su ciclo de vida, desde la concepción inicial hasta su eventual retirada o discontinuación (Lopes Silva et al., 2018). De esta premisa se originó una investigación enfocada en la integración de la gestión del ciclo de vida (LCM por sus siglas en inglés pertenecientes a Lyfe Cycle Management) del producto; a su vez, con la programación de operaciones. En este estudio, Prado et al. (2021) presentan un método híbrido basado en las heurísticas NEH propuestas por (Nawaz et al., 1983) y la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA por sus siglas en inglés pertenecientes a Lyfe Cycle Assesment) en el contexto de la programación de operaciones. Este modelo híbrido denominado NEH+LCA es aplicado en diferentes escenarios empleando datos reales de una empresa brasileña del sector automotriz. Con esta integración, el estudio estima la optimización de la eficiencia de los procesos con las heurísticas NEH, por cuanto los investigadores consideran la minimización del *makespan* y los impactos ambientales asociados al ciclo de vida de los productos fabricados, alineándose a un enfoque sostenible de producción.

En la tabla 6 se muestra la lista de manuscritos con enfoque en reducción de huella de carbono con su respectivo sistema de producción, técnica de modelamiento y algoritmo de resolución.

Tabla 6

Investigaciones con enfoque de reducción de huella de carbono

Subenfoque	Autores	Distribución de sistema de manufactura	Medida(s) de sostenibilidad (reducción de carbono)	Técnica de modelamiento	Algoritmo de solución
Integración con cadena de suministro	Fallahi A.; Shahidi-Zadeh B.; Niaki S.T.A.	Continuous manufacturing	Considera políticas de cap and trade al carbono impuestas por la unión europea y gestiona el consumo energético con	Programación Entera No Lineal Mixta (MINLP)	Algoritmo Genético de Clasificación no Dominada II (NSGA-II) y Optimizador

			cambios en la ruta de procesamiento		de Lobo Gris Multiobjetivo (MOGWO)
Reducción huella de carbono	He B.; Liu R.; Li T.	Job shop	Cambios en parámetros de corte (para reducir desgaste de herramientas y fluidos de corte) e implementación de sistema de ejecución de manufactura (MES) en la toma de decisiones.	Programación entera mixta (MIP)	Algoritmo Genético de Clasificación No Dominada (NSGA)
Integración con cadena de suministro	Hudaifah H.; Andriansyah A.; Al-Shareef K.; Darghouth M.N.; Saleh H.	Job shop	Los trabajos se procesan con diferentes niveles de velocidad de mecanizados discretos buscando el mejor balance de emisiones de carbono	Programación lineal entera mixta (MILP)	Algoritmo Genético con Intersección Normal de Límite (GANBI)
Reducción huella de carbono	Li Y.; Huang W.; Wu R.; Guo K.	Job shop	Gestión velocidades de procesamiento y cambios de estado	Programación entera mixta (MIP)	Algoritmo de colonia de abejas mejorado (IABC)
Integración con cadena de suministro	Liao W.; Wang T.	Job shop	Integración entre la producción y entrega con la tecnología del Internet de las cosas IoT, en el que se cuantifica el consumo energético de las máquinas, y las emisiones producidas en la operación y entrega	Programación No Lineal (NLP)	Algoritmo genético de dos capas
Reducción huella de carbono	Lin W.; Tian G.; Li Z.; Zhang Y.; Zhang C.	Flow shop	Gestión de secuencia de los trabajos y variación de niveles de procesamiento	Programación No Lineal (NLP)	Algoritmo multiobjetivo de Lobo Gris discreto (D-MOGWO)
Reducción huella de carbono	Liu Q.; Zhan M.; Chekem F.O.; Shao X.; Ying B.; Sutherland J.W.	Job shop	Método novedoso para cálculo de huella de carbono en productos, integración sistema de ejecución de manufactura (MES), cambios en rutas de procesamiento	Programación entera mixta (MIP)	Algoritmo híbrido de optimización de mosca de fruta (HFOA)
Integración con cadena de suministro	Liu Z.; Luo Q.; Wang L.; Tang H.; Li Y.	Continuous manufacturing	Gestión de secuencia de procesamiento de la pieza de trabajo, el estado de procesamiento de la maquinaria y el ruteo de los AGV	Programación entera mixta (MIP)	Algoritmo de distribución con una estrategia heurística de programación de bajas emisiones de carbono (EDA-LSHS)
Reducción huella de carbono	Piroozfard H.; Wong K.W.; Tiwari M.K.	Flow shop	Gestión de estados de operación de la maquinaria, gestión de la fecha de vencimiento de los trabajos, para evitar horas extras y la generación de huellas de carbono generadas por la maquinaria en procesamiento.	Programación entera mixta (MIP)	Algoritmo competitivo imperialista multiobjetivo (MOICA)
Gestión del ciclo de vida	Prado G.B.V.D.; Silva D.V.D.; Christoforo A.L.; Oliveira J.A.-D.; Toso E.A.V.; Silva D.A.L.	Flow shop	Planificación, implementación, control y mejora continua de productos o servicios a lo largo de todas las etapas de su ciclo de vida	Programación lineal entera mixta (MILP)	Algoritmo NEH (Nawaz-Enscore-Ham)
Integración con cadena de suministro	Wang J.; Yao S.; Sheng J.; Yang H.	Single machine	Integración conjunta entre la programación de operaciones y el enrutamiento de vehículos.	Programación lineal entera mixta (MILP)	Algoritmo híbrido de búsqueda tabu
Reducción huella de carbono	Zhang H.-L.; Qian B.; Sun Z.-X.; Hu R.; Liu B.; Guo N.	Single machine	Gestión de secuencia de procesamiento de la pieza de trabajo y estado de maquinaria en producción	Programación lineal entera mixta (MILP)	Algoritmo de programación dinámica (DPA) y enjambre de aves (BSA)

Reducción huella de carbono	Zhou B.; Lei Y.	Continuous manufacturing	Reducción de desplazamientos de los robots entre la maquinaria, para que las máquinas fluctúen con astucia entre su estado de inactividad y su estado de procesamiento.	Programación entera mixta (MIP)	Algoritmo metaheurístico híbrido de lobo gris multiobjetivo (LWMOGWO)
Integración con cadena de suministro	Zhou B.; Lei Y.	Continuous manufacturing	Reducción de desplazamientos grúas de desplazamiento	Programación entera mixta (MIP)	algoritmo metaheurístico híbrido de lobo gris multiobjetivo (LWMOGWO)

5.2.3.3 Enfoque de bienestar social. Cuando se habla de programación de operaciones sostenible en una empresa manufacturera, sería óptimo que hubiese un equilibrio tripartito entre la dimensión social, económica y ambiental (Eccles et al., 2014). Desafortunadamente, el enfoque de bienestar social es el menos explorado en la literatura científica. Las razones pueden ser atribuidas a que las prioridades empresariales y regulatorias tradicionalmente han favorecido la rentabilidad y las problemáticas concernientes a la eficiencia energética y a la reducción de la huella de carbono. Por otro lado, las consideraciones sociales en las empresas usualmente son implementadas en aspectos relacionados con cambios en la cultura organizacional, a nivel operativo su implementación se torna más complejo y su impacto directo en la producción es más difícil de apreciar (Guo et al., 2020).

No obstante, es importante destacar aquellas investigaciones que contemplan el impacto directo e indirecto que tiene una empresa manufacturera tanto en sus trabajadores como en la comunidad circundante. Uno de los desafíos relevantes en este campo es la contaminación auditiva que se produce debido a las diferentes velocidades de procesamiento de las máquinas disponibles en el taller, las cuales a su vez son asociadas a niveles específicos de emisiones sonoras. Cuanto mayor es la velocidad de procesamiento de una máquina, mayor es su emisión de ruido y viceversa. Desde este punto de vista, la correcta secuenciación de trabajos en un taller permitirá lograr un equilibrio óptimo entre el tiempo de entrega y las emisiones de ruido de la maquinaria (Jia et al., 2022; Yin et al., 2017). Esto se debe a que la contaminación acústica representa efectos adversos para la salud y las emociones de los empleados, por lo cual no debe ignorarse en los procesos de manufactura (Jia et al., 2022; Lu et al., 2019, 2021).

Por esta razón, Jia et al. (2022), consideran como objetivos primordiales, la minimización simultánea del tiempo de tardanza/entrega y las emisiones de ruidos en un taller de producción de máquina única; al respecto, proponen un algoritmo de colonia de abejas artificial discreto multiobjetivo (MODABC), considerándose con igual importancia el aspecto social y el productivo. Para ello, diseñaron un mecanismo de codificación de dos capas basado en permutación discreta para adaptarse a las características del problema, dado que el algoritmo de colonia de abejas artificial (ABC) estándar es empleado mayoritariamente para resolver problemas de un único objetivo.

En otra línea, se tiene que en países como China, el 85,98% de los empleados se enfrentan a un agotamiento laboral debido a la pérdida de interés en las tareas que desempeñan en su trabajo actual (Lu et al., 2020). Esto significa que las organizaciones deben considerar el bienestar de sus trabajadores y mantenerlos interesados en sus tareas actuales; de lo contrario, se enfrentarán a una mayor rotación de empleados que puede generar inherentemente un impacto considerable en la gestión de la producción y las operaciones (Kolus et al., 2018; Quan et al., 2023).

Por este motivo, Quan et al. (2023) formulan una investigación en la que buscan un esquema de asignación de puestos de trabajo a las personas más adecuadas según su capacidad individual, teniendo en cuenta aspectos como edad, género, experiencia, habilidades, entre otras, que pueden afectar de manera directa o indirecta la calidad del producto. Esto con el fin de velar por el bienestar de los trabajadores y a su vez maximizar los beneficios económicos de la empresa (Liu et al., 2021). Asimismo, contemplan los costos de transporte entre la maquinaria y los costos de procesamiento. Con base en esto desarrollan un modelo de optimización con cuatro funciones objetivo: la primera busca maximizar la asignación adecuada de los empleados a puesto de trabajo más favorable; la segunda y la tercera, se refieren a la minimización del costo de transporte y procesamiento respectivamente. El cuarto objetivo hace

alusión a la aminoración del *makespan*. Para la resolución de este modelo plantean un método de optimización de cuatro etapas basado en el algoritmo de colonia de hormigas (ACO), junto a la adopción de la Técnica de Evaluación y Reducción de Errores, el Modelo de Regresión Lineal Múltiple y el algoritmo genético de clasificación no dominado NSGA-III (Quan et al., 2023).

Por otra parte, en un caso de estudio real en una planta de Toyota en China que presta el servicio de pintura para automóviles, Yang et al. (2021) exponen un modelo de programación no lineal entera multiobjetivo con el propósito de contribuir al enfoque de triple resultando, planteando un objetivo para cada dimensión del desarrollo sostenible mencionadas anteriormente. Para la dimensión económica, buscan la aminoración del *makespan* del proceso operativo mediante variaciones estratégicas en la combinación de las tareas y cargas en maquinaria; para la dimensión ambiental, el propósito consiste en la reducción de las emisiones totales contaminantes (TPE por sus siglas en inglés pertenecientes a Total Pollutant Emissions), centrándose en las producidas por el disolvente para limpiar el spray de la pintura cada que haya que pintar un carro de otro color; para ello, se gestionan la secuenciación de las tareas de manera que si dos vehículos se deben pintar del mismo color, no resulta necesario emplear el disolvente entre tareas. Por otro lado, para la dimensión social se tiene como objetivo la aminoración del indicador denominado insatisfacción total percibida por los clientes (TCPDS por sus siglas en inglés pertenecientes a Total Customers Perceived Dissatisfaction). Este último, a diferencia de los indicadores anteriores, abarca aspectos cualitativos, dado que se involucran sentimientos de los clientes y es diligenciado por los trabajadores al momento de la entrega, obteniéndose los 3 escenarios posibles al concretar la pintura de un automóvil: (i) entrega de vehículos anticipada, en que la percepción de satisfacción tiende a mejorar; (ii) entrega de vehículos a tiempo, corresponde a la satisfacción con el servicio; (iii) entrega de vehículos tardada, que afecta la percepción y deja insatisfacción. Para dar solución a esta

problemática, los investigadores emplean un algoritmo genético computacional con el que se realiza un análisis de la frontera de Pareto del modelo, obteniéndose un 7,9% del *makespan*, se disminuyen las emisiones contaminantes en un 37,5% y la insatisfacción total percibida por los clientes (TCPDS) decrece en un 157,3%.

Este enfoque de bienestar social tratado responde a la dimensión social del desarrollo sostenible para lo cual se centra en los trabajadores y en la comunidad en la cual está inmersa la empresa. Busca ante todo disminuir en determinados casos las emisiones sonoras que se presentan en las fábricas en los procesamientos de maquinaria; mediante algoritmos como el de colonia de abejas multiobjetivo (MOABC). En segunda instancia, en este enfoque se define como problemática el cansancio laboral que puede mitigarse por medio de la implementación de sistemas de asignación de trabajadores a puestos de trabajo donde según sus perfiles y capacidades puedan desempeñarse de la manera óptima desde lo ocupacional como lo social. Finalmente, se tiene en cuenta la satisfacción percibida por los clientes desarrollando indicadores para medir los niveles de satisfacción e implementados en modelos de programación.

En la tabla 7 se exponen las investigaciones pertenecientes al enfoque de bienestar social, detallando su distribución de sistema de manufactura, medida de sostenibilidad, técnica de modelamiento y algoritmo de solución.

Tabla 7

Investigaciones con enfoque de bienestar social

Autores	Distribución de sistema de manufactura	Medida(s) de sostenibilidad	Técnica de modelamiento	Algoritmo de solución
Jia J.; Lu C.; Yin L.	Single machine	Cambios en velocidad de procesamiento para disminuir emisiones sonoras y gasto energético	Programación lineal entera mixta (MILP)	Algoritmo de Colonia de Abejas Artificiales Multiobjetivo (MODABC)
Quan B.; Li S.; Wu K.-J.	Job shop	Asignación de puestos de trabajo a las personas más adecuadas según su capacidad individual y gestión de transportador entre máquinas	Programación lineal entera mixta (MILP)	Algoritmo de colonia de hormigas (ACO)

Shim S.-O.; Park K.B.; Choi S.Y.	Flow shop	Programación de rutas de procesamiento para satisfacción del cliente con fecha de vencimiento	Programación de enteros mixtos (MIP)	Algoritmo heurístico basado en reglas de despacho, tamaño de lote mol y programación centrada en cuellos de botella (HDLB)
Yang Q.; Meng X.; Zhao H.; Cao C.; Liu Y.; Huisingh D.	Continuous manufacturing	Optimización de la secuencia de tareas para minimizar el cambio de color y satisfacción de los clientes en tres escenarios: entrega anticipada (mejora la percepción), entrega a tiempo (satisfacción) y entrega tardía (insatisfacción)	Modelo de Programación No Lineal Entera (MINLP)	Algoritmo genético y enfoque de optimización de Pareto

5.2.4 Efectividad de la programación de operaciones sostenible en la optimización de procesos industriales

Si bien desde la programación de operaciones se plantean soluciones de optimización en la producción desde fundamentos teóricos y prácticos, en la mayoría de los casos, los modelos se encuentran altamente restringidos a entornos excesivamente controlados. No obstante, con avances significativos en la automatización de las máquinas, las herramientas, la adaptabilidad de la fuerza laboral; así como, de los sistemas de gestión y su uso en talleres de manufactura, a medida que el sistema industrial evoluciona hacia la cuarta generación conocida como “industria 4.0” es posible obtener una visión más precisa de las capacidades y limitaciones de las plantas (Danishvar et al., 2021; Dolgui et al., 2019; Parente et al., 2020; Zhang et al., 2019).

Considerando las limitaciones inherentes a los sistemas de producción, constituye un punto de investigación crucial la utilización de modelos matemáticos para la descripción de problemas de programación. Dada la complejidad y las restricciones que caracterizan el entorno de producción actual, la exploración detallada y la aplicación de modelos matemáticos discretos, se erigen como una piedra angular en la investigación. La necesidad de abordar eficazmente los desafíos asociados con la programación en este contexto específico justifica la adopción de enfoques matemáticos precisos y detallados, a fin de modelar y ajustar adecuadamente los problemas de programación que surgen en el contexto actual considerando la sostenibilidad ambiental, económica y social (Liu et al., 2022).

En tanto los problemas de programación de operaciones analizados se emplean para grandes volúmenes, la naturaleza de éstos corresponde mayoritariamente a problemas NP-Hard que se presentan principalmente en los problemas de producción. Los algoritmos metaheurísticos han recibido un creciente interés en resolver problemas de optimización complejos (Wang & Tan, 2017).

Las investigaciones desarrolladas en torno al desempeño de la programación de operaciones con base en medida de sostenibilidad en las organizaciones abarcan mayoritariamente problemas de manufactura en cuatro aspectos fundamentales: descripción del problema, modelado del problema, diseño de algoritmo y aplicación/comprobación del algoritmo. El primer aspecto, referente al modelo del problema en el escenario de la sostenibilidad implica el análisis y conceptualización del problema pertinente, qué se quiere mejorar desde la programación de operaciones y el ámbito sustentable; de ahí, se despliega el desarrollo algorítmico que se aborda con una metodología rigurosa en cada taller de manufactura para finalmente aplicarse de manera óptima y mejorar el proceso, una vez es comparado frente a otros algoritmos para demostrar su eficacia frente a otros métodos.

En el contexto del desempeño ambiental es esencial adoptar enfoques sostenibles, alusivos a apagar las máquinas inactivas y reducir la distancia recorrida en entregas, con el fin de disminuir las emisiones de carbono. En un segundo plano, para alcanzar los objetivos generales de una empresa industrial, es imperativo lograr una completa coordinación entre varios departamentos en el proceso de toma de decisiones. La estrategia implica la creación simultánea de planes para todos los departamentos y la optimización del objetivo general. En tercer lugar, debido a la robustez tanto del modelo como del algoritmo utilizados, la minimización de las emisiones totales de carbono se alinea de manera casi constante con la reducción de los costos totales. Esto subraya la pertinencia de investigaciones que buscan

integrar prácticas sostenibles y coordinación eficiente en la gestión operativa de las empresas industriales (Wang et al., 2019).

La evaluación del rendimiento de los algoritmos propuestos para una programación de producción con enfoque sostenible es una tarea compleja que se hace de múltiples maneras. Un aspecto fundamental consiste en verificar la eficacia de un modelo de programación de operaciones, sumado a la evaluación de su desempeño frente a otros métodos ya existentes o que hayan sido aplicados con anterioridad. Para los problemas de optimización multiobjetivo el rendimiento del algoritmo suele evaluarse mediante varias métricas (Xue & Wang, 2023), dado que para problemas de optimización multiobjetivo es complejo establecer una métrica unificada para la evaluación del desempeño de los algoritmos, puesto que todo algoritmo de alto rendimiento debe mantener la diversidad de la distribución de la solución en el espacio y al mismo tiempo, con el propósito de garantizar la convergencia de la solución al conjunto óptimo de Pareto (Deb et al., 2002; Xin et al., 2023) .

En problemas de programación multiobjetivo, las cuales han sido fundamentales en esta investigación, se identificó que cuando se trata de hallar soluciones, una de las opciones resulta ser fundamental al obtener un mejor desempeño en al menos un objetivo, sin demostrar inferioridad respecto al cumplimiento de los demás. El algoritmo de optimización multiobjetivo tiene la tarea de encontrar el conjunto de soluciones de Pareto (aproximadas) y el frente de Pareto (aproximado) (Xue & Wang, 2023).

Modelos como el propuesto por los autores Liao & Wang (2019), en que se hace una integración colaborativa entre la producción y entrega de una empresa de comercio electrónica con la tecnología del Internet de las Cosas IoT, al cuantificar el consumo energético de las máquinas y las emisiones producidas en la operación y entrega, desarrollan un algoritmo de dos capas en el que los resultados computacionales muestran el efecto significativo del modelo para resolver el problema, dado que la solución reduce el costo total en un 14,58% y el costo

de las emisiones de carbono en la producción se ve restringido en un 9,46%; asimismo, la entrega disminuye en un 11,04%, en comparación con el modelo propuesto por Griffiths & Ooi (2018).

Desde la perspectiva de cómo los autores evalúan el desempeño de los algoritmos, se encontraron casos como el de Xin et al. (2023), quienes evalúan el desempeño de su algoritmo multiobjetivo de iterado codicioso (MOIG) en un problema de tipo *flow shop*, frente a dos algoritmos meta heurísticos: algoritmo genético de clasificación no dominado (NSGA-II) y algoritmo Evolutivo Multiobjetivo basado en Descomposición (MOEA/D). Para lo cual, establecen 6 métricas: en primera instancia, se analizan el número de soluciones no dominadas (DS) de cada algoritmo, dado que entre mayor sea el número de soluciones no dominadas, el rendimiento es mayor (Wang et al., 2020). En segunda instancia, el número de soluciones no dominadas obtenidas en un conjunto P^* (NDS) (Han et al., 2021); en tercera instancia, se comparan empleando la métrica de convergencia (DR) presentada por Ishibuchi et al. (2003), la cual mide la distancia entre el conjunto de soluciones no dominadas contra un frente de referencia S^* , que puede ser el frente de Pareto del problema o conjunto donde se combinan todas las soluciones no dominantes encontradas en la ejecución del algoritmo valorado. En cuarta estancia, está la métrica de distancia generacional (GD), la cual estima cuán lejos se encuentran los elementos en el conjunto de soluciones no dominadas en el frente S^* (Coello et al., 2004). En quinta instancia, obtuvieron la métrica de relación de soluciones no dominadas, la cual evalúa la capacidad de exploración y la dirección de búsqueda de un algoritmo (Gao et al., 2021). Para finalizar, compararon el tiempo de cálculo del algoritmo, concluyéndose que entre menor sea este, el rendimiento es superior.

Asimismo, los autores Lu et al. (2017) determinan el rendimiento de su algoritmo de búsqueda híbrida con *backtracking* y algoritmo genético (HMOBSA) para un problema *flow shop* frente a algoritmos NSGA-II y MOEA/D, empleando las mismas métricas estándar: (i) la

distancia generacional (GD), (ii) la distancia generacional invertida (IGD), que mide cuán cerca están las soluciones de referencia del conjunto de soluciones generadas por el algoritmo y finalmente, (iii) la métrica de spread o dispersión, con el que se evalúa cómo las soluciones están distribuidas a lo largo de los frentes de Pareto (conjunto de soluciones no dominadas).

Del mismo modo, Dai et al. (2019) evalúan la eficiencia de algoritmo genético mejorado (EGA), propuesto para la resolución de una problemática en un taller de tipo *job shop* eficiente energéticamente con restricciones en el transporte de vehículos guiados de manera autónoma (AGV), frente al algoritmo genético multiobjetivo (MOGA) propuesto por May et al. (2015), a partir de la métrica de hipervolumen (HV) y distancia generacional invertida (IGD). En términos de *makespan* y consumo de energía, las soluciones de Pareto del EGA fueron superiores a las del MOGA.

Por otro lado, Xue & Wang (2023) estiman la eficiencia de su algoritmo de evolución diferencial discreta multiobjetivo, frente a algoritmos tradicionales NSGA-II, SPEA2 (por sus siglas en inglés pertenecientes a Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2) y MOEA/D, por medio de la métrica de número de soluciones no dominadas (DS), la métrica de convergencia o distancia (DR); además de la métrica de cobertura, la cual evalúa qué tan bien un conjunto de soluciones de Pareto aproximadas abarca el frente de Pareto verdadero en el espacio de los objetivos. Cuanto mayor sea la cobertura, mejor se aproximarán las soluciones al verdadero frente de Pareto. Finalmente, emplean la métrica de espacio de distribución, referida a la uniformidad de distribución del frente de Pareto; es decir, entre menor sea esta métrica, las soluciones se distribuyen más uniformemente en el frente de Pareto.

Asimismo, Zhou & Liao, (2020) verifican el rendimiento del algoritmo híbrido eficiente basado en filtro de partículas y vuelos de Lévy para la evolución multiobjetivo descompuesta híbrida con enjambre de partículas (PLMEAPS), presentado para la resolución del problema de un taller *job shop* flexible ecológico con grúas de transportadoras (FJSGSP-CT), respecto a

otros dos algoritmos de optimización: búsqueda local genética multiobjetivo (Ishibuchi et al., 2003) y algoritmo multiobjetivo de Lobo Gris (MOGWO) (Mirjalili et al., 2016). Para lo cual, emplearon las métricas de hipervolumen (HV), distancia generacional invertida (IGD) y de espacio de distribución (ES).

Del mismo modo, Jia et al. (2022) también emplean un algoritmo MODABC modificado, en el que buscan la disminución total de las emisiones sonoras generadas en la producción, comparan los resultados frente a algoritmos conocidos en la literatura NSGA-II (Deb et al., 2002), SPEA2 (Zitzler et al., 2001), MOEA/D (Zhang & Li, 2007); a partir de la misma métrica empleada por Wang et al. (2023). Alusiva a la distancia generacional (GD), distancia generacional invertida (IGD) y la empleada por Lu et al. (2017), referida a la métrica de dispersión; por lo cual, el algoritmo MODABC propuesto termina siendo ligeramente superior a los que fueron puestos en comparación.

De estos estudios se obtiene que la efectividad de los algoritmos de programación de operaciones con enfoque sostenible debe evaluarse mediante diferentes métricas que permitan identificar la calidad de las soluciones generadas, buscando su integración con un equilibrio entre eficiencia económica, responsabilidad ambiental y social.

En la tabla 8 se pueden apreciar los ejemplos de los algoritmos expuestos en esta sección; aquellos que su efectividad fue puesta en tela de juicio frente a otros algoritmos existentes en la literatura con algunas métricas mencionadas, denotando la importancia de la evaluación de su desempeño frente a otros métodos para adoptar el algoritmo más eficiente.

Tabla 8

Ejemplos de métricas de desempeño en algoritmos multiobjetivo

Autor	Algoritmo	Sistema de producción	Métricas	Algoritmos comparados
(Xin et al., 2023)	MOIG	Flow shop	Número de soluciones no dominadas (DS), NDS en P*, Convergencia (DR), Distancia generacional (GD), Relación de soluciones no dominadas, Tiempo de cálculo	NSGA-II, MOEA/D

(C. Lu et al., 2017)	HMOBSA	Flow shop	Distancia generacional (GD), Distancia generacional invertida (IGD), Spread	NSGA-II, MOEA/D
(Dai et al., 2019)	EGA	Job shop con AGV	Hipervolumen (HV), Distancia generacional invertida (IGD), Makespan, Consumo de energía	MOGA
(Xue & Wang, 2023)	MDDE	Flow shop	Número de soluciones no dominadas (DS), Convergencia (DR), Cobertura, Espacio de distribución	NSGA-II, SPEA2, MOEA/D
(B. Zhou & Liao, 2020)	PLMEAPS	Flow shop	Hipervolumen (HV), Distancia generacional invertida (IGD), Espacio de distribución (ES)	MOGLS, MOGWO
(Jia et al., 2022)	MODABC	Flow shop	Distancia generacional (GD), Distancia generacional invertida (IGD), Spread	NSGA-II, SPEA2, MOEA/D

5.2.5 Discusión de los algoritmos en la programación de operaciones sostenible

Es pertinente analizar las diferentes metodologías implementadas en la resolución de los problemas complejos expuestos desde la programación de operaciones con enfoque sostenible, en las que se exponen algoritmos de solución que presentan mejoras en aspectos productivos, económicos, ambientales y/o sociales. A partir de los sistemas de manufactura tratados en la revisión sistemática que se clasifican en cuatro grupos mayoritarios en concomitancia a los expuestos por Kapoor et al., (2023), los cuales son *flow shop*, *job shop*, *parallel machine* y *single machine*. Dichos sistemas de producción para grandes instancias requieren el diseño de mecanismos de búsqueda robustos considerando su naturaleza *NP-Hard*. Esto se constituye en las opciones válidas para que en cualquier taller de manufactura estudiosos y profesionales interesados en la producción de este sector se ubiquen en dichas alternativas para su posterior implementación y evaluación.

Con fundamento en las Tablas 5,6 y 7 en las que se detallan las problemáticas abordadas por cada enfoque ambiental es importante mencionar que, el modelo matemático predominante es el de programación entera mixta (MIP), el cual se manifiesta en 37 de los manuscritos (72%); gracias a las ventajas que ofrece en el uso de variables enteras y continuas para modelar las situaciones prácticas a detalle y el uso de múltiples restricciones.

De igual modo, los modelos objeto de investigación presentan diferentes heurísticas para resolver los enfoques de manera más eficiente y eficaz, para que la toma decisiones a nivel

operativo se haga de manera más ágil. Las heurísticas empleadas mayoritariamente se tratan de algoritmos basados en algoritmos genéticos (GA) con un 32% de la población total. Este algoritmo de búsqueda evolutiva es uno de los más extendidos para tratar problemas de optimización de tareas y de naturaleza Np-Hard (De Jong et al., 1998).

Al realizar un análisis comparativo entre los algoritmos de solución empleados en los problemas de tipo flow shop, es evidente que el algoritmo genético (aun cuando es el más reconocido en la literatura e implementado en la práctica) no resulta tan eficiente debido a que, en la secuenciación de los trabajos, se caracteriza por su alta rigidez en la producción en masa y la escasa variabilidad de los productos. Esto se evidencia al analizar la literatura por cuanto en los otros tres sistemas de producción (*job shop*, *parallel machine* y *single machine*) el algoritmo genético, es el más empleado, demostrándose en las cifras, al señalar que aproximadamente el 50% de las resoluciones presentadas para estos sistemas se derivan de la heurística de algoritmo genético; por el contrario, en problemas de taller *flow shop* solo se aplica en un 10%. De ahí que, en el caso de que se implementen algoritmos genéticos en entornos *flow shop*, deben ser complementados con otros métodos como la búsqueda local para mejorar la eficiencia del algoritmo.

Al realizar un análisis crítico de la literatura, se arguye que el algoritmo genético debe hibridarse con otras heurísticas con el propósito de obtener mejoras significativas en el rendimiento para la resolución de problemas *flow shop*. Al respecto, J. Guo et al., (2022) presenta un algoritmo genético híbrido (HGA) como respuesta a un problema de eficiencia energética que logra una disminución del consumo total energético entre un 5 y 10%; con un tiempo de cálculo computacional menor en comparación con el algoritmo NSGA-II. Por su parte, Dai et al., (2019) desarrolla un algoritmo genético mejorado (EGA) con optimización por enjambre de partículas (PSO), frente a otro problema de eficiencia energética con consideraciones en el transporte, obteniendo una aminoración notable en el *makespan* de 7.2%

y en el consumo energético un aproximado de 9,4%. Al parangonar estos algoritmos de forma híbrida con el algoritmo genético (GA), se encuentran ventajas significativas como el aumento en la capacidad para dimensionar problemas complejos de tipo *flow shop*, y por ende soluciones eficientes, alcanzar mejores óptimos locales y disminución en el tiempo de cálculo computacional.

El hecho de que el algoritmo genético no sea directamente tan eficiente sin hibridarse, deriva que en la literatura se encuentran indistintamente otros algoritmos que resultan más adecuados como el IMOEA/D, planteado por Lian et al., (2021) para un empresa metalmecánica en un taller híbrido *flow shop* eficiente energéticamente, en el cual se presenta una fluctuación del consumo de energía con tendencia a disminuir en porcentaje entre 4,4% y 56,8%, aproximadamente.

En este orden de ideas, al hacer un parangón entre el algoritmo IMOEA/D frente al NSGA-II, el SPEA2 y el MOHGALS (por sus siglas en inglés, pertenecientes a Multi-Objective Hybrid Guided Local Search and Simulated Annealing), se deduce que el primero mejora significativamente en comparación con los otros en referencia a las métricas GD, RD e IGD. En términos cuantitativos, el GD, es aproximadamente un 72.23% mejor que NSGA-II, un 48.60% mejor que SPEA2 y un 28.18% mejor que MOHGALS. Para RD, el IMOEA/D es un 74.22% mejor que NSGA-II, un 84.75% mejor que SPEA2 y un 72.83% mejor que MOHGALS. En la métrica IGD, el MOEA/D supera a NSGA-II en un 11.36%, a SPEA2 en un 28.68% y a MOHGALS en un 77.55%. Por esta razón, el análisis demuestra que los resultados ponderan en superioridad el IMOEA/D en la optimización de la convergencia, la distribución y el rendimiento general en problemas de programación de producción *flow shop* híbrido.

Otro algoritmo especializado para este tipo de problemas es el algoritmo heurístico de Nawaz-Enscore-Ham (NEH) (Nawaz et al., 1983), el cual fue implementado por dos autores.

En primer lugar por Prado et al., (2021) para la resolución de un problema en un taller *flow shop* con enfoque de reducción de huella de carbono y el segundo por Öztóp et al., (2020) en un problema de *flow shop* de permutación que propende la eficiencia energética; de la literatura se infiere que en ambas situaciones se demuestran mejoras significativas en los objetivos propuestos; en los dos casos, los autores implementan un modelado de programación lineal entera mixta (MILP), lo cual hipotéticamente hablando, la eficiencia presentada puede deberse a la coincidencia en el uso de dicha programación, siendo relevante continuar con un proceso de indagación al respecto de análisis comparativo casuístico para validar esta proposición.

En el caso de las investigaciones tipo *job shop*, la elección de un algoritmo o heurística para dar resolución a este tipo de problemas, depende de ciertas características que deberán ser analizadas a detalles al momento del planteamiento del problema, como las máquinas, el tamaño de la producción, el número de restricciones, entre otras. Es por ello por lo que sería una falacia afirmar que un algoritmo puede ser mejor que otro. Asimismo, hay que tener en cuenta que todo esto es permeado por el enfoque sostenible específico que se esté abarcando.

Aquello que es importante decir es que, aproximadamente el 50% de los *modelos job shop* tratados planteados presentan heurísticas basadas en algoritmo genético gracias a su facilidad de implementación dado que los problemas *job shop* abarcan un gran número de diferentes combinaciones de posibles secuencias, y los algoritmos genéticos son bastante efectivos en espacios de soluciones grandes y adaptables con sus operadores (Z. Liu et al., 2022). Por eso resulta importante destacar las investigaciones presentadas por (N. Liu et al., 2019) quien presenta problema de un taller *job shop* ultra flexible formulado en programación lineal entera mixta (MILP) con el objetivo de disminuir el consumo total energético y la minimización de la tardanza de los pedidos. En esta investigación se demuestra la importancia de incluir heurísticas en la resolución de estos problemas de taller al comparar el modelo MILP resuelto computacionalmente frente al algoritmo genético planteado; denotándose que el

tiempo de cálculo computacional empieza a crecer exponencialmente en grandes instancias y con mayor espacio de soluciones, permitiendo obtener respuestas más eficiente energéticamente.

Por otro lado, al considerar los sistemas de manufactura *parallel machine* y *single machine*, la elección del algoritmo heurístico más adecuado, al igual que en los sistemas *job shop*, depende de las características específicas del problema, tanto sus objetivos de optimización y las variables involucradas. Por lo tanto, que no es pertinente afirmar que un algoritmo es superior a otro sin dar cabida a análisis detallado y específico del problema en cuestión. Por esta razón, con base en lo anteriormente expuesto, no es posible afirmar de manera concluyente qué algoritmo resulte ser más eficaz para un sistema de producción con enfoque sostenible en específico. Para obtener una comparación robusta, se debe indagar cada problema en específico en entornos controlados y utilizando parámetros comunes para comparar de manera certera el desempeño entre los algoritmos. El problema en este caso en que, al tratarse de problemas diferentes entre sí, y con pocos parámetros en común, limita la capacidad para identificar el algoritmo más óptimo y eficiente.

Adicionalmente, son pocos los estudios que llevan a cabo una comparación exhaustiva con diferentes metodologías por lo cual, se recomienda como mejora a esta investigación, que se hagan estudios casuísticos comparativos para lograr determinar qué mecanismo de solución es el adecuado para problemas concretos desde la programación de operaciones.

Finalmente, de acuerdo al proceso desarrollado en la investigación titulada “Análisis del desempeño de la programación de operaciones con base en medidas de sostenibilidad en las organizaciones: una revisión sistemática de literatura”, y conforme al perfil contemplado del egresado de Ingeniería Industrial de la Universidad Industrial de Santander, el autor del presente documento considera que los resultados que las metodologías implementadas para la resolución de los problemas existentes en la programación de operaciones con enfoque

sostenible son fundamentales para que el futuro ingeniero industrial pueda dirigir, mejorar e innovar procesos en el sector manufacturero orientados a incrementar la productividad y la rentabilidad de las organizaciones respetando al ser humano y su entorno. Aplicando precisamente mejoras en los aspectos productivos, económicos, ambientales y sociales. De igual manera los hallazgos relacionados con los sistemas de manufactura, *flow shop*, *job shop*, *parallel machine*, *single machine*, y las heurísticas y algoritmos diseñados para la resolución de ese tipo de problemas son susceptibles de aplicarse en el área de la ingeniería desde la identificación del problema diagnóstico y la solución de problemas en el contexto manufacturero con mejoras para optimizar procesos productivos identificando ventajas en las diferentes propuestas desarrolladas, como lograr una buena calidad de soluciones con un bajo tiempo de cálculo computacional. Todo esto desde la aplicación de principios éticos y el marco regulatorio nacional e internacional.

Desde las diferentes perspectivas propuestas en los documentos analizados, se deben considerar que no existe un sistema de manufactura óptimo; el ingeniero industrial debe contextualizar la complejidad del problema identificado mediante un diagnóstico considerando los diferentes sistemas, y responsabilizarse por realizar un análisis crítico de los diferentes modelos y heurísticas desarrolladas y asumir el compromiso de innovar procesos distintivos con base en las investigaciones y prácticas desarrolladas por los diferentes grupos de interés como investigadores e integrantes del sector productivo, con el propósito de generar prototipados que a su vez sean publicados en revistas de alto impacto y sean referente a su vez de otros procesos que busquen mejorar en el desempeño.

6. Agendas de Investigación Propuesta

En primer lugar, es importante tener en cuenta que los resultados emanados de este proceso investigativo se constituyan en fundamento para la generación de estudios y proyectos de extensión relacionados, con el objetivo de generar líneas de investigación e intervención.

Asimismo, se recomienda profundizar en la temática de programación de operaciones con enfoque sostenible, para poder efectuar de manera consistente la toma de decisiones a nivel operativo, enfáticamente en el uso de nuevas tecnologías y cómo éstas ayudan de a la optimización de la producción responsablemente. En este contexto, y posterior al análisis exhaustivo de los manuscritos seleccionados, se han identificado áreas clave y oportunidades para guiar futuras exploraciones en la temática. A continuación, se enlistan a cabalidad algunas recomendaciones para líneas de investigaciones posteriores:

- i. Análisis de las regulaciones mundiales e internacionales sobre impuestos, aranceles y exenciones ante el impacto de la huella de carbono, el consumo energético y la emisión de gases de efecto invernadero generado por la programación de operaciones en empresas generadoras de bienes.
- ii. Responsabilidad social corporativa en las organizaciones como garantía de la salud y seguridad en el trabajo en el marco de la programación de operaciones en empresas de manufactura.
- iii. Determinación de metodologías implementadas en la programación de la producción para ahorro energético desde el desarrollo de medidas de sostenibilidad en empresas manufactureras.
- iv. Perspectivas innovadoras para el aprovechamiento de energía proveniente de fuentes de energía renovable en procesos de producción ante precios de electricidad variable.

- v. Tendencias del impacto ambiental y social, incluidos trabajadores y comunidad del área de influencia en empresas manufactureras en América Latina desde la programación de operaciones sostenible.

Por último, se recomienda hacer la publicación de los resultados de estas futuras líneas de intervención en una revista de acceso libre, para que pueda lograrse una apropiación social por parte de las comunidades científicas.

7. Conclusiones

A manera de conclusión para la presente investigación, es necesario destacar el cumplimiento a cabalidad de los objetivos propuestos. Entonces, en primer lugar, se tiene que el objetivo general de la investigación era el caracterizar teorías, enfoques y metodologías en torno al desempeño de la programación de operaciones con base en medidas de sostenibilidad en las organizaciones; al respecto comparativamente hablando de los hallazgos obtenidos en los documentos analizados no se esbozan explícitamente teorías que orientan a la programación de operaciones sostenible. No obstante, en los resultados se visibiliza una perspectiva innovadora de programación sostenible a partir de enfoques que trascienden los paradigmas tradicionales de programación de producción; integrando variables medioambientales, y sociales como una forma de transformar los desafíos de la eficiencia operativa. De ahí que, en los diferentes sistemas de manufactura aludidas en los resultados de la revisión sistemática se categorizaron tres enfoques: eficiencia energética, reducción de huella de carbono y enfoque de bienestar social. Dichos enfoques contienen estrategias específicas que análogamente constituyen en metodologías que responden a problemáticas identificadas en los diferentes artículos objeto de investigación. Justamente en la mayoría de los casos la propuesta para afrontar dichas situaciones se hace a partir del prototipados de modelo matemáticos (programación lineal entera mixta, programación lineal entera entre otros) resueltos mediante algoritmos heurísticos y metaheurísticos tales como el algoritmo genético no dominado (NSGA-II) y algoritmo de optimización de lobo gris (GWO), entre otros.

Respecto a los objetivos específicos del proyecto, en primer lugar, se concretó la identificación de la bibliografía relacionada al tema objeto de estudio. Esta identificación se logró través de una búsqueda preliminar que permitió divisar la pertinencia de la investigación y, en consecuencia, seleccionar la metodología de revisión sistemática para realizar el compendio de los artículos.

En cuanto al segundo objetivo específico, se realizó el análisis bibliométrico de la literatura a partir de un protocolo de búsqueda y la construcción de una ecuación definitiva aplicado en la base de datos SCOPUS; permitiendo ejecutar la exploración cuantitativa del conocimiento científico acumulado evolutivamente en el dominio del tema de investigación. El análisis abarcó aspectos como la producción científica anual, revistas con mayor número de publicaciones, artículos más citados, co-ocurrencia de palabras clave y redes de co-citación.

Referente al tercer objetivo específico, mediante la revisión sistemática de literatura se llevó a cabo la discusión de los enfoques y metodologías desde la programación de operaciones tal como se mencionó al inicio en el cumplimiento del objetivo general, siendo importante mencionar que el componente económico no es abordado a profundidad dado que el beneficio económico es inherente a todas las organizaciones, en cuanto que todo negocio busca ser rentable y generar ganancias para sus inversores y accionistas. Asimismo, cabe mencionar que, aunque los enfoques en el componente ambiental son preponderantes sobre el social no significa que este último sea menos relevante, dado que, desde la sostenibilidad, se busca un equilibrio tripartito entre las dimensiones económica, social y ambiental. En conclusión, el presente trabajo de investigación desarrolló el cumplimiento a cabalidad de los objetivos planteados inicialmente en el plan de proyecto.

Finalmente la presente investigación fue presentada en el XVII Encuentro de Semilleros de Investigación UNAB 2023 "Ingeniería en la Era de la Inteligencia Artificial: Ética, Retos y Tendencias" y también en el marco del evento de divulgación de la Escuela de Estudios Industriales y Empresariales IN-SCIENCE "Conexión al conocimiento" realizado el 24 de abril de 2024 en Universidad Industrial de Santander, en los cuales se mostraron los avances del estudio y se recibieron valiosos aportes y/o sugerencias que enriquecieron el desarrollo de esta tesis, aportando nuevas perspectiva y refinando el enfoque de investigación.

Referencias Bibliográficas

- Ahmadian, M. M., Khatami, M., Salehipour, A., & Cheng, T. C. E. (2021). Four decades of research on the open-shop scheduling problem to minimize the makespan. *European Journal of Operational Research*, 295. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.03.026>
- Ahmed, M. D., & Sundaram, D. (2012). Sustainability modelling and reporting: From roadmap to implementation. *Decision Support Systems*, 53(3), 611-624. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2012.02.004>
- Akbar, M., & Irohara, T. (2018). Scheduling for sustainable manufacturing: A review. *Journal of Cleaner Production*, 205, 866-883. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.100>
- Albhirat, M. M., Rashid, A., Rasheed, R., Rasool, S., Zulkiffli, S. N. A., Zia-ul-Haq, H. M., & Mohammad, A. M. (2024). The PRISMA statement in enviropreneurship study: A systematic literature and a research agenda. *Cleaner Engineering and Technology*, 18, 100721. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100721>
- Alhaddi, H. (2015). Triple Bottom Line and Sustainability: A Literature Review. *Business and Management Studies*, 1. <https://doi.org/10.11114/bms.v1i2.752>
- An, X., Si, G., Xia, T., Wang, D., Pan, E., & Xi, L. (2023). An energy-efficient collaborative strategy of maintenance planning and production scheduling for serial-parallel systems under time-of-use tariffs. *Applied Energy*, 336, 120794. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120794>
- Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). *bibliometrix*: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959-975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Arisha, A., Young, P., & Baradie, M. E. (2001). Job Shop Scheduling Problem: An Overview. *Conference papers*. <https://doi.org/10.21427/D7WN5Q>

- Aryadoust, V., & Ang, B. H. (2021). Exploring the frontiers of eye tracking research in language studies: A novel co-citation scientometric review. *Computer Assisted Language Learning*, 34(7), 898-933. <https://doi.org/10.1080/09588221.2019.1647251>
- Asadkhani, J., Fallahi, A., & Mokhtari, H. (2022). A sustainable supply chain under VMI-CS agreement with withdrawal policies for imperfect items. *Journal of Cleaner Production*, 376, 134098. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134098>
- Atkinson, L. Z., & Cipriani, A. (2018). How to carry out a literature search for a systematic review: A practical guide. *BJPsych Advances*, 24(2), 74-82. <https://doi.org/10.1192/bja.2017.3>
- Barrera Salgado, C. A., & Millán Pineda, C. david. (2018). *Modelo para la programación de la producción en ambientes Job Shop flexibles aplicado a un caso de estudio*. Universidad del Valle.
- Bihari, A., Tripathi, S., & Deepak, A. (2023). A review on h-index and its alternative indices. *Journal of Information Science*, 49(3), 624-665. <https://doi.org/10.1177/01655515211014478>
- Bonilla-Valencia, P. del C., & Castro-Daza, D. P. de. (2021). La escritura colaborativa en ambientes educativos presenciales, virtuales y con diferentes mediaciones de la tecnología digital*. *Revista Interamericana de Investigación, Educación y Pedagogía*, 14(2). <https://www.redalyc.org/journal/5610/561070063008/html/>
- Bunker Whittington, K., King, M. M., & Cingolani, I. (2024). Structure, status, and span: Gender differences in co-authorship networks across 16 region-subject pairs (2009–2013). *Scientometrics*, 129(1), 147-179. <https://doi.org/10.1007/s11192-023-04885-1>
- Cai, Y., Li, G., Wen, L., & Liu, C. (2024). Intellectual landscape and emerging trends of big data research in hospitality and tourism: A scientometric analysis. *International Journal of Hospitality Management*, 117, 103633. <https://doi.org/10.1016/j.ijhm.2023.103633>

- Caldeira, R. H., Gnanavelbabu, A., & Vaidyanathan, T. (2020). An effective backtracking search algorithm for multi-objective flexible job shop scheduling considering new job arrivals and energy consumption. *Computers & Industrial Engineering*, 149, 106863. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106863>
- Cárcamo, E. A. B., Payares, F. G., Castro, C. V., & Cárcamo, D. B. (2022). Educación virtual durante la pandemia del Covid-19. Una revisión bibliométrica. *Revista Boletín Redipe*, 11(2), Article 2. <https://doi.org/10.36260/rbr.v11i2.1673>
- Chebo, A. K., & Dhliwayo, S. (2024). Scientific mapping and thematic progression of digitalization of social entrepreneurship in developing countries. *Sustainable Futures*, 7, 100153. <https://doi.org/10.1016/j.sfr.2024.100153>
- Chen, Y., Feng, M., Shi, G., Jiang, M., & Jiang, M. (2023). Bibliometrics-based Research Hotspots and Development Trends in Eco-hydrology of Dammed Rivers. *Chinese Geographical Science*, 33(6), 1153-1164. <https://doi.org/10.1007/s11769-023-1395-4>
- Chofreh, A. G., & Goni, F. A. (2017). Review of Frameworks for Sustainability Implementation. *Sustainable Development*, 25(3), 180-188. <https://doi.org/10.1002/sd.1658>
- Civicioglu, P. (2013). Backtracking Search Optimization Algorithm for numerical optimization problems. *Applied Mathematics and Computation*, 219(15), 8121-8144. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2013.02.017>
- Coca Ortégón, G. A. (2021). *Metodología multiobjetivo para la programación de producción de los sistemas de manufactura «Job Shop Flexible» del sector metalmecánico, bajo un enfoque de sostenibilidad* [Tesis doctoral, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/79474>
- Coello, C. A. C., Pulido, G. T., & Lechuga, M. S. (2004). Handling multiple objectives with particle swarm optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 8(3),

- 256-279. IEEE Transactions on Evolutionary Computation.
<https://doi.org/10.1109/TEVC.2004.826067>
- Communication from the Commission – Guidelines on State Aid for Climate, Environmental Protection and Energy 2022 (2022). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?toc=OJ%3AC%3A2022%3A080%3ATOC&uri=uriserv%3AOJ.C_.2022.080.01.0001.01.ENG
- Cui, W., & Lu, B. (2021). Energy-aware operations management for flow shops under TOU electricity tariff. *Computers & Industrial Engineering*, 151, 106942.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106942>
- Dai, M., Tang, D., Giret, A., & Salido, M. A. (2019). Multi-objective optimization for energy-efficient flexible job shop scheduling problem with transportation constraints. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 59, 143-157.
<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.04.006>
- Danishvar, M., Danishvar, S., Katsou, E., Mansouri, S. A., & Mousavi, A. (2021). Energy-Aware Flowshop Scheduling: A Case for AI-Driven Sustainable Manufacturing. *IEEE Access*, 9, 141678-141692. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3120126>
- De Jong, K., William, J., & Spears, W. (1998). *Using Genetic Algorithms to Solve NP-Complete Problems*.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182-197. IEEE Transactions on Evolutionary Computation.
<https://doi.org/10.1109/4235.996017>
- Denno, P., Dickerson, C., & Harding, J. A. (2018). Dynamic production system identification for smart manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, 192-203.
<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.04.006>

- Diaz Tautiva, J. A., Rifo Rivera, F. I., Barros Celume, S. A., & Rifo Rivera, S. A. (2024). Mapping the research about organisations in the latin american context: A bibliometric analysis. *Management Review Quarterly*, 74(1), 121-169. <https://doi.org/10.1007/s11301-022-00296-3>
- Dolgui, A., Ivanov, D., Sethi, S. P., & Sokolov, B. (2019). Scheduling in production, supply chain and Industry 4.0 systems by optimal control: Fundamentals, state-of-the-art and applications. *International Journal of Production Research*, 57(2), 411-432. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1442948>
- Dyllick, T., & Hockerts, K. (2002). Beyond the Business Case for Corporate Sustainability. *Business Strategy and the Environment*, 11, 130-1141. <https://doi.org/10.1002/bse.323>
- Eccles, R. G., Ioannou, I., & Serafeim, G. (2014). The Impact of Corporate Sustainability on Organizational Processes and Performance. *Management Science*, 60(11), 2835-2857. <https://doi.org/10.1287/mnsc.2014.1984>
- Eichler, G. M., & Schwarz, E. J. (2019). What Sustainable Development Goals Do Social Innovations Address? A Systematic Review and Content Analysis of Social Innovation Literature. *Sustainability*, 11(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/su11020522>
- Erol, S., Jäger, A., Hold, P., Ott, K., & Sihn, W. (2016). Tangible Industry 4.0: A Scenario-Based Approach to Learning for the Future of Production. *Procedia CIRP*, 54, 13-18. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.162>
- Fallahi, A., Shahidi-Zadeh, B., & Niaki, S. T. A. (2023). Unrelated parallel batch processing machine scheduling for production systems under carbon reduction policies: NSGA-II and MOGWO metaheuristics. *Soft Computing*, 27(22), 17063-17091. <https://doi.org/10.1007/s00500-023-08754-0>
- Farrukh, A., Mathrani, S., & Sajjad, A. (2022). A Systematic Literature Review on Environmental Sustainability Issues of Flexible Packaging: Potential Pathways for

- Academic Research and Managerial Practice. *Sustainability*, 14(8), 4737.
<https://doi.org/10.3390/su14084737>
- Fazel Zarandi, M. H., Sadat Asl, A. A., Sotudian, S., & Castillo, O. (2020). A state of the art review of intelligent scheduling. *Artificial Intelligence Review*, 53(1), 501-593.
<https://doi.org/10.1007/s10462-018-9667-6>
- Fernandes, J. M. R. C., Homayouni, S. M., & Fontes, D. B. M. M. (2022). Energy-Efficient Scheduling in Job Shop Manufacturing Systems: A Literature Review. *Sustainability*, 14(10), 6264. <https://doi.org/10.3390/su14106264>
- France, E. F., Cunningham, M., Ring, N., Uny, I., Duncan, E. A. S., Jepson, R. G., Maxwell, M., Roberts, R. J., Turley, R. L., Booth, A., Britten, N., Flemming, K., Gallagher, I., Garside, R., Hannes, K., Lewin, S., Noblit, G. W., Pope, C., Thomas, J., ... Noyes, J. (2019). Improving reporting of meta-ethnography: The eMERGe reporting guidance. *BMC Medical Research Methodology*, 19(1), 25. <https://doi.org/10.1186/s12874-018-0600-0>
- Fu, Y., Ding, J., Wang, H., & Wang, J. (2018). Two-objective stochastic flow-shop scheduling with deteriorating and learning effect in Industry 4.0-based manufacturing system. *Applied Soft Computing*, 68, 847-855. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.12.009>
- Gadaleta, M., Pellicciari, M., & Berselli, G. (2019). Optimization of the energy consumption of industrial robots for automatic code generation. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 57, 452-464. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.12.020>
- Gahm, C., Denz, F., Dirr, M., & Tuma, A. (2016). Energy-efficient scheduling in manufacturing companies: A review and research framework. *European Journal of Operational Research*, 248(3), 744-757. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.07.017>

- Gao, P., Yue, S., & Chen, H. (2021). Carbon emission efficiency of China's industry sectors: From the perspective of embodied carbon emissions. *Journal of Cleaner Production*, 283, 124655. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124655>
- Garey, M. R., Johnson, D. S., & Sethi, R. (1976). The Complexity of Flowshop and Jobshop Scheduling. *Mathematics of Operations Research*, 1(2), 117-129.
- Ghadiri Nejad, M., Vatankhah Barenji, R., Güleriyüz, G., & Shavarani, S. M. (2023). Energy consumption optimization for sustainable flexible robotic cells: Proposing exact and metaheuristic methods. *Energy & Environment*, 0958305X231193868. <https://doi.org/10.1177/0958305X231193868>
- Ghaleb, M., Zolfagharinia, H., & Taghipour, S. (2020). Real-time production scheduling in the Industry-4.0 context: Addressing uncertainties in job arrivals and machine breakdowns. *Computers & Operations Research*, 123, 105031. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.105031>
- Giret, A., Trentesaux, D., & Prabhu, V. (2015). Sustainability in manufacturing operations scheduling: A state of the art review. *Journal of Manufacturing Systems*, 37, 126-140. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2015.08.002>
- Griffiths, F., & Ooi, M. (2018). The fourth industrial revolution—Industry 4.0 and IoT [Trends in Future I&M]. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 21(6), 29-43. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. <https://doi.org/10.1109/MIM.2018.8573590>
- Guo, J., Wang, L., Kong, L., & Lv, X. (2022). Energy-efficient flow-shop scheduling with the strategy of switching the power statuses of machines. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53, 102649. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102649>

- Guo, W., Li, P., Yang, M., Liu, J., & Jiang, P. (2020). Social Manufacturing: What are its key fundamentals? *IFAC-PapersOnLine*, 53(5), 65-70.
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.04.126>
- Guo, Y.-M., Huang, Z.-L., Guo, J., Li, H., Guo, X.-R., & Nkeli, M. J. (2019). Bibliometric Analysis on Smart Cities Research. *Sustainability*, 11(13), Article 13.
<https://doi.org/10.3390/su11133606>
- Han, W., Deng, Q., Gong, G., Zhang, L., & Luo, Q. (2021). Multi-objective evolutionary algorithms with heuristic decoding for hybrid flow shop scheduling problem with worker constraint. *Expert Systems with Applications*, 168, 114282.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.114282>
- Hasnaeen, S. Md. N., Rahman, S., & Uddin, Md. F. (2019). Load Scheduling of a Refrigerated Warehouse with Homogeneous Compressors Under Dynamic Pricing. *2019 1st International Conference on Advances in Science, Engineering and Robotics Technology (ICASERT)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICASERT.2019.8934558>
- He, B., Liu, R., & Li, T. (2023). Integrated carbon footprint with cutting parameters for production scheduling. *Journal of Cleaner Production*, 412, 137307.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137307>
- Hilbert, M., Dellnitz, A., & Kleine, A. (2023). Production planning under RTP, TOU and PPA considering a redox flow battery storage system. *Annals of Operations Research*, 328(2), 1409-1436. <https://doi.org/10.1007/s10479-023-05338-x>
- Hirsch, J. E. (2005). An index to quantify an individual's scientific research output. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(46), 16569-16572.
<https://doi.org/10.1073/pnas.0507655102>
- Hudaifah, H., Andriansyah, A., Al-Shareef, K., Darghouth, M. N., & Saleh, H. (2024). Genetic algorithm with normal boundary intersection for multi-objective early/tardy scheduling

- problem with carbon-emission consideration: A Pareto-optimum solution. *Neural Computing and Applications*, 36(5), 2493-2506. <https://doi.org/10.1007/s00521-023-09146-z>
- Isfandyari-Moghaddam, A., Saberi, M. K., Tahmasebi-Limoni, S., Mohammadian, S., & Naderbeigi, F. (2023). Global scientific collaboration: A social network analysis and data mining of the co-authorship networks. *Journal of Information Science*, 49(4), 1126-1141. <https://doi.org/10.1177/01655515211040655>
- Ishibuchi, H., Yoshida, T., & Murata, T. (2003). Balance between genetic search and local search in memetic algorithms for multiobjective permutation flowshop scheduling. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 7(2), 204-223. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. <https://doi.org/10.1109/TEVC.2003.810752>
- Ivanov, D., Tang, C., Dolgui, A., Battini, D., & Das, A. (2020). Researchers' perspectives on Industry 4.0: Multi-disciplinary analysis and opportunities for operations management. *International Journal of Production Research*, 1-24. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1798035>
- Jain, A., Jain, P. K., Chan, F. T. S., & Singh, S. (2013). A review on manufacturing flexibility. *International Journal of Production Research*, 51(19), 5946-5970. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.824627>
- Jia, J., Lu, C., & Yin, L. (2022). Energy Saving in Single-Machine Scheduling Management: An Improved Multi-Objective Model Based on Discrete Artificial Bee Colony Algorithm. *Symmetry*, 14(3), 561. <https://doi.org/10.3390/sym14030561>
- Jiang, E., & Wang, L. (2019). An improved multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition for energy-efficient permutation flow shop scheduling problem with sequence-dependent setup time. *International Journal of Production Research*, 57(6), 1756-1771. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1504251>

- Jiang, T., Zhang, C., Zhu, H., Gu, J., & Deng, G. (2018). Energy-Efficient Scheduling for a Job Shop Using an Improved Whale Optimization Algorithm. *Mathematics*, 6(11), 220. <https://doi.org/10.3390/math6110220>
- Jiang, Z., Zhao, X., Wang, Z., & Herbert, K. (2024). Safety leadership: A bibliometric literature review and future research directions. *Journal of Business Research*, 172, 114437. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2023.114437>
- Johri, A., Joshi, P., Kumar, S., & Joshi, G. (2024). Metaverse for Sustainable Development in a bibliometric analysis and systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 435, 140610. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140610>
- Kapoor, E., Kumar, A., & Singh, D. (2023). Energy-Efficient Flexible Flow Shop Scheduling With Due Date and Total Flow Time. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 11(2s), 259-267. <https://doi.org/10.17762/ijritcc.v11i2s.6145>
- Kolus, A., Wells, R., & Neumann, P. (2018). Production quality and human factors engineering: A systematic review and theoretical framework. *Applied Ergonomics*, 73, 55-89. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.05.010>
- Kumar, R. S., Raghav, L. P., Raju, D. K., & Singh, A. R. (2021). Intelligent demand side management for optimal energy scheduling of grid connected microgrids. *Applied Energy*, 285, 116435. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116435>
- Lazebnik, T., Beck, S., & Shami, L. (2023). Academic co-authorship is a risky game. *Scientometrics*, 128(12), 6495-6507. <https://doi.org/10.1007/s11192-023-04843-x>
- Li, B., Li, Q., Rong, Y., Zeng, Y., & Zhang, R. (2022). 3D Trajectory Optimization for Energy-Efficient UAV Communication: A Control Design Perspective. *IEEE Access*, 21(6), 4579-4593. <https://doi.org/10.1109/TWC.2021.3131384>

- Li, J.-Q., Peiyong, D., Jinde, C., Xiao-Ping, L., & Yu-Yan, H. (2018). A Hybrid Pareto-Based Tabu Search for the Distributed Flexible Job Shop Scheduling Problem With E/T Criteria | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore. *IEEE Access*, 6, 58883-58897. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2873401>
- Li, L., Li, C., Tang, Y., & Yi, Q. (2017). Influence factors and operational strategies for energy efficiency improvement of CNC machining. *Journal of Cleaner Production*, 161, 220-238. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.084>
- Li, Y., Huang, W., Wu, R., & Guo, K. (2020). An improved artificial bee colony algorithm for solving multi-objective low-carbon flexible job shop scheduling problem. *Applied Soft Computing*, 95, 106544. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106544>
- Lian, X., Zheng, Z., Wang, C., & Gao, X. (2021). An energy-efficient hybrid flow shop scheduling problem in steelmaking plants. *Computers & Industrial Engineering*, 162, 107683. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107683>
- Liao, W., & Wang, T. (2019). A Novel Collaborative Optimization Model for Job Shop Production–Delivery Considering Time Window and Carbon Emission. *Sustainability*, 11(10), 2781. <https://doi.org/10.3390/su11102781>
- Liu, N., Zhang, Y. F., & Lu, W. F. (2019). Improving Energy Efficiency in Discrete Parts Manufacturing System Using an Ultra-Flexible Job Shop Scheduling Algorithm. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 6(2), 349-365. <https://doi.org/10.1007/s40684-019-00055-y>
- Liu, Q., Liu, J., Dong, Z., Zhan, M., Mei, Z., Ying, B., & Shao, X. (2021). Integrated optimization of process planning and scheduling for reducing carbon emissions. *Journal of Industrial and Management Optimization*, 17(3), 1025-1055. <https://doi.org/10.3934/jimo.2020010>

- Liu, Q., Zhan, M., Chekem, F. O., Shao, X., Ying, B., & Sutherland, J. W. (2017). A hybrid fruit fly algorithm for solving flexible job-shop scheduling to reduce manufacturing carbon footprint. *Journal of Cleaner Production*, 168, 668-678. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.037>
- Liu, Y., Dong, H., Lohse, N., Petrovic, S., & Gindy, N. (2014). An investigation into minimising total energy consumption and total weighted tardiness in job shops. *Journal of Cleaner Production*, 65, 87-96. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.060>
- Liu, Y., Zhang, L., & Teng, S. (2021). An Improved Nondominated Sorting Genetic Algorithm-II for Multi-objective Flexible Job-shop Scheduling Problem Considering Worker Assignments | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore. *International Conference on Communications, Information System and Computer Engineering (CISCE)*, 837-843. <https://doi.org/10.1109/CISCE52179.2021.9445969>
- Liu, Z., Luo, Q., Wang, L., Tang, H., & Li, Y. (2022). The Low-Carbon Scheduling Optimization of Integrated Multispeed Flexible Manufacturing and Multi-AGV Transportation. *Processes*, 10(10), 1944. <https://doi.org/10.3390/pr10101944>
- Lopes Silva, D. A., de Oliveira, J. A., Padovezi Filleti, R. A., Gomes de Oliveira, J. F., Jannone da Silva, E., & Ometto, A. R. (2018). Life Cycle Assessment in automotive sector: A case study for engine valves towards cleaner production. *Journal of Cleaner Production*, 184, 286-300. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.252>
- Lu, C., Gao, L., Gong, W., Hu, C., Yan, X., & Li, X. (2021). Sustainable scheduling of distributed permutation flow-shop with non-identical factory using a knowledge-based multi-objective memetic optimization algorithm. *Swarm and Evolutionary Computation*, 60, 100803. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2020.100803>

- Lu, C., Gao, L., Li, X., & Chen, P. (2016). Energy-efficient multi-pass turning operation using multi-objective backtracking search algorithm. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1516-1531. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.029>
- Lu, C., Gao, L., Li, X., Pan, Q., & Wang, Q. (2017). Energy-efficient permutation flow shop scheduling problem using a hybrid multi-objective backtracking search algorithm. *Journal of Cleaner Production*, 144, 228-238. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.011>
- Lu, C., Gao, L., Pan, Q., Li, X., & Zheng, J. (2019). A multi-objective cellular grey wolf optimizer for hybrid flowshop scheduling problem considering noise pollution. *Applied Soft Computing*, 75, 728-749. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.11.043>
- Lu, C., Yin, L., & Wang, R. (2023). An improved iterated greedy algorithm for the distributed hybrid flowshop scheduling problem. *Engineering Optimization*, 1-19. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2023.2198768>
- Lu, Y., Zhang, Z., Gao, S., Yan, H., Zhang, L., & Liu, J. (2020). The Status of Occupational Burnout and Its Influence on the Psychological Health of Factory Workers and Miners in Wulumuqi, China. *BioMed Research International*, 2020, e6890186. <https://doi.org/10.1155/2020/6890186>
- Luan, F., Zhao, H., Liu, S. Q., He, Y., & Tang, B. (2023). Enhanced NSGA-II for multi-objective energy-saving flexible job shop scheduling. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 39, 100901. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2023.100901>
- Mansouri, A., & Aktas, E. (2016). Minimizing Energy consumption and makespan in a two-machine flowshop scheduling problem. *Journal of the Operational Research Society*, In press, 1-13. <https://doi.org/10.1057/jors.2016.4>

- Manterola, C., Astudillo, P., Arias, E., & Claros, N. (2013). Revisiones sistemáticas de la literatura. Qué se debe saber acerca de ellas. *Cirugía Española*, 91(3), 149-155. <https://doi.org/10.1016/j.ciresp.2011.07.009>
- Martínez-Garrido, C., & Murillo, F. J. (2024). La colaboración en grupos de investigación a través del análisis de redes sociales. *Revista Colombiana de Educación*, 90, Article 90. <https://doi.org/10.17227/rce.num90-14492>
- May, G., Stahl, B., Taisch, M., & Prabhu, V. (2015). Multi-objective genetic algorithm for energy-efficient job shop scheduling. *International Journal of Production Research*, 53(23), 7071-7089. <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1005248>
- Meng, L., Zhang, C., Shao, X., & Ren, Y. (2019). MILP models for energy-aware flexible job shop scheduling problem. *Journal of Cleaner Production*, 210, 710-723. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.021>
- Miguel, S., Moya-Anegón, F., & Herrero-Solana, V. (2007). El análisis de co-citas como método de investigación en Bibliotecología y Ciencia de la Información. *Investigación Bibliotecológica: archivonomía, bibliotecología e información*, 21(43), Article 43. <https://doi.org/10.22201/iibi.0187358xp.2007.43.4129>
- Min, C., Pan, Y., Dai, W., Kawsar, I., Li, Z., & Wang, G. (2023). Trajectory optimization of an electric vehicle with minimum energy consumption using inverse dynamics model and servo constraints. *Mechanism and Machine Theory*, 181, 105185. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2022.105185>
- Mirjalili, S., Saremi, S., Mirjalili, S. M., & Coelho, L. dos S. (2016). Multi-objective grey wolf optimizer: A novel algorithm for multi-criterion optimization. *Expert Systems with Applications*, 47, 106-119. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.10.039>
- Modoni, G., Trombetta, A., Veniero, M., Sacco, M., & Mourtzis, D. (2019). An event-driven integrative framework enabling information notification among manufacturing

- resources. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 32, 1-12.
<https://doi.org/10.1080/0951192X.2019.1571232>
- Moreira, L. C., Li, W. D., Lu, X., & Fitzpatrick, M. E. (2019). Energy-Efficient machining process analysis and optimisation based on BS EN24T alloy steel as case studies. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 58, 1-12.
<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.01.011>
- Mota, B., Rua, O. L., & Neira-Gómez, I. (2024). New advances in science mapping and performance analysis of the open innovation and tourism relationship. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 10(1), 100154.
<https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2023.100154>
- Mourtzis, D., Angelopoulos, J., & Dimitrakopoulos, G. (2020). Design and development of a flexible manufacturing cell in the concept of learning factory paradigm for the education of generation 4.0 engineers. *Procedia Manufacturing*, 45, 361-366.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.035>
- Muneer, M. A., Chen, X., Wang, H., Munir, M. Z., Afridi, M. S., Yan, X., Ji, B., Li, W., Wu, L., & Zheng, C. (2024). Unraveling two decades of phyllosphere endophytes: Tracing research trends and insights through visualized knowledge maps, with emphasis on microbial interactions as emerging frontiers. *Stress Biology*, 4(1), 12.
<https://doi.org/10.1007/s44154-024-00148-y>
- Nawaz, M., Ensore, E. E., & Ham, I. (1983). A heuristic algorithm for the m -machine, n -job flow-shop sequencing problem. *Omega*, 11(1), 91-95. [https://doi.org/10.1016/0305-0483\(83\)90088-9](https://doi.org/10.1016/0305-0483(83)90088-9)
- Nidhra, S., Yanamadala, M., Afzal, W., & Torkar, R. (2013). Knowledge transfer challenges and mitigation strategies in global software development—A systematic literature

- review and industrial validation. *International Journal of Information Management*, 33(2), 333-355. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2012.11.004>
- Öztop, H., Tasgetiren, M. F., Eliyi, D. T., Pan, Q.-K., & Kandiller, L. (2020). An energy-efficient permutation flowshop scheduling problem. *Expert Systems with Applications*, 150, 113279. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113279>
- Page, M. J., Moher, D., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... McKenzie, J. E. (2021). PRISMA 2020 explanation and elaboration: Updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n160. <https://doi.org/10.1136/bmj.n160>
- Pan, W.-T. (2012). A new Fruit Fly Optimization Algorithm: Taking the financial distress model as an example. *Knowledge-Based Systems*, 26, 69-74. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2011.07.001>
- Parente, M., Figueira, G., Amorim, P., & Marques, A. (2020). Production scheduling in the context of Industry 4.0: Review and trends. *International Journal of Production Research*, 58(17), 5401-5431. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1718794>
- Pastras, G., Fysikopoulos, A., & Chrysosolouris, G. (2019). A theoretical investigation on the potential energy savings by optimization of the robotic motion profiles. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 58, 55-68. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.02.001>
- Patterson, M. G. (1996). What is energy efficiency?: Concepts, indicators and methodological issues. *Energy Policy*, 24(5), 377-390. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(96\)00017-1](https://doi.org/10.1016/0301-4215(96)00017-1)
- Pinedo, M. (2008). *Scheduling: Theory, Algorithms, And Systems*.

- Piroozfard, H., Wong, K. Y., & Tiara, M. K. (2018). Reduction of carbon emission and total late work criterion in job shop scheduling by applying a multi-objective imperialist competitive algorithm: *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 11(1), 805. <https://doi.org/10.2991/ijcis.11.1.62>
- Pooja, & Sood, S. K. (2024). Scientometric analysis of quantum-inspired metaheuristic algorithms. *Artificial Intelligence Review*, 57(2), 22. <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10659-1>
- Prado, G. B. V. D., Silva, D. V. D., Christoforo, A. L., Oliveira, J. A.-D., Toso, E. A. V., & Silva, D. A. L. (2021). Sustainable scheduling: Development and application of an integrated method combining NEH heuristic and life cycle assessment. *International Journal of Sustainable Engineering*, 14(6), 1665-1679. <https://doi.org/10.1080/19397038.2021.1970853>
- Quan, B., Li, S., & Wu, K.-J. (2023). A hybrid metaheuristic algorithm to achieve sustainable production: Involving employee characteristics in the job-shop matching problem. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 40(4), 246-270. <https://doi.org/10.1080/21681015.2023.2184426>
- Racetin, I., Kilić Pamuković, J., Zrinjski, M., & Peko, M. (2022). Blockchain-Based Land Management for Sustainable Development. *Sustainability*, 14(17), Article 17. <https://doi.org/10.3390/su141710649>
- Ramos, A. G., & Leal, J. (2017). ILP model for energy-efficient production scheduling of flake ice units in food retail stores. *Journal of Cleaner Production*, 156, 953-961. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.086>
- Ramos Zhunio, G. O., & Freire Barrera, R. D. (2019). *Revisión documental de la aplicación de meta-heurísticas aplicadas a la programación de la producción en un taller de trabajo (job shop)*. Universidad Estatal de Milagro.

- Reina-Guaña, E. (2024). Un análisis bibliométrico de evaluaciones de calidad de datos en sistemas de gestión académica. *Revista Digital Novasinergia*, 7(1), 163-179. <https://doi.org/10.37135/ns.01.13.10>
- Romero Parias, P. de P. (2021). *Modelo de programación lineal para un problema de programación de la producción con consideraciones de sostenibilidad*. Universidad de Sevilla.
- Romero-Rodríguez, J.-M., Ramírez-Montoya, M.-S., Aznar-Díaz, I., & Hinojo-Lucena, F.-J. (2020). Social Appropriation of Knowledge as a Key Factor for Local Development and Open Innovation: A Systematic Review. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 6(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/joitmc6020044>
- Rose, J., & Johnson, C. (2020). Contextualizing reliability and validity in qualitative research: Toward more rigorous and trustworthy qualitative social science in leisure research. *Journal of Leisure Research*, 51. <https://doi.org/10.1080/00222216.2020.1722042>
- Sala, S. (2020). Chapter 3—Triple bottom line, sustainability and sustainability assessment, an overview. En J. Ren, A. Scipioni, A. Manzardo, & H. Liang (Eds.), *Biofuels for a More Sustainable Future* (pp. 47-72). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815581-3.00003-8>
- Salmond, S., & Holly, C. (2011). Systematic Review as the Basis for Evidence Based Practice. *Comprehensive Systematic Review for Advanced Nursing Practice*.
- Sang, Y., & Tan, J. (2022). Many-Objective Flexible Job Shop Scheduling Problem with Green Consideration. *Energies*, 15(5), 1884. <https://doi.org/10.3390/en15051884>
- Sanz-Valero, J., & Casterá, V. T. (2014). Estudio bibliométrico de la producción científica publicada por la Revista Panamericana de Salud Pública/ Pan American Journal of Public Health. *Rev Panam Salud Publica*.

- Schirone, M. (2024). The formation of a field: Sustainability science and its leading journals. *Scientometrics*, 129(1), 401-429. <https://doi.org/10.1007/s11192-023-04877-1>
- Scholz, S., & Meisel, F. (2022). Coordination of heterogeneous production equipment under an external signal for sustainable energy. *Journal of Cleaner Production*, 338, 130461. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130461>
- Scopus Analyze search results. (2024). <https://www.scopus.com/home.uri>
- Shahidi-Zadeh, B., Tavakkoli-Moghaddam, R., Taheri-Moghadam, A., & Rastgar, I. (2017). Solving a bi-objective unrelated parallel batch processing machines scheduling problem: A comparison study. *Computers & Operations Research*, 88, 71-90. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.06.019>
- Srinivasan, K., & Yadav, V. K. (2023). An integrated literature review on Urban and peri-urban farming: Exploring research themes and future directions. *Sustainable Cities and Society*, 99, 104878. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104878>
- Strbac, G. (2008). Demand side management: Benefits and challenges. *Energy Policy*, 36(12), 4419-4426. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.030>
- Strozzi, F., Colicchia, C., Creazza, A., & Noè, C. (2017). Literature review on the ‘Smart Factory’ concept using bibliometric tools. *International Journal of Production Research*, 55(22), 6572-6591. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1326643>
- Sweileh, W. M., AbuTaha, A. S., Sawalha, A. F., Al-Khalil, S., Al-Jabi, S. W., & Zyoud, S. H. (2017). Bibliometric analysis of worldwide publications on multi-, extensively, and totally drug – resistant tuberculosis (2006–2015). *Multidisciplinary Respiratory Medicine*, 11(1), 45. <https://doi.org/10.1186/s40248-016-0081-0>
- Thoben, K.-D., Wiesner, S., & Wuest, T. (2017). «Industrie 4.0» and Smart Manufacturing – A Review of Research Issues and Application Examples. *International Journal of Automation Technology*, 11, 4-19. <https://doi.org/10.20965/ijat.2017.p0004>

- Tsao, Y.-C., Thanh, V.-V., & Hwang, F.-J. (2020). Energy-efficient single-machine scheduling problem with controllable job processing times under differential electricity pricing. *Resources, Conservation and Recycling*, 161, 104902. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104902>
- UN Secretary-General, & World Commission on Environment and Development. (1987). *Report of the World Commission on Environment and Development: Note /: by the Secretary-General*. 1-374.
- Vallejo Cifuentes, P. E. (2017). *Uso de Algoritmos Genéticos para el logro de la eficiencia energética en plantas de manufactura bajo un enfoque de Programación de Operaciones* [Tesis doctoral, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/60992>
- Van Eck, N. J., & Waltman, L. (2020). *VOSviewer Manual*. Universiteit Leiden.
- Wang, G.-G., & Tan, Y. (2017). Improving Metaheuristic Algorithms With Information Feedback Models. *IEEE Transactions on Cybernetics*, PP, 1-14. <https://doi.org/10.1109/TCYB.2017.2780274>
- Wang, J., Yao, S., Sheng, J., & Yang, H. (2019). Minimizing total carbon emissions in an integrated machine scheduling and vehicle routing problem. *Journal of Cleaner Production*, 229, 1004-1017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.344>
- Wang, S., Wang, X., Chu, F., & Yu, J. (2020). An energy-efficient two-stage hybrid flow shop scheduling problem in a glass production. *International Journal of Production Research*, 58(8), 2283-2314. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1624857>
- Wang, W., Zhang, B., & Jia, B. (2023). A Multiobjective Optimization Approach for Multiobjective Hybrid Flowshop Green Scheduling with Consistent Sublots. *Sustainability*, 15(3), 2622. <https://doi.org/10.3390/su15032622>

- Waschneck, B., Reichstaller, A., Belzner, L., Altenmüller, T., Bauernhansl, T., Knapp, A., & Kyek, A. (2018, mayo 3). *Deep reinforcement learning for semiconductor production scheduling*. <https://doi.org/10.1109/ASMC.2018.8373191>
- Weber, C. L., & Matthews, H. S. (2008). Quantifying the global and distributional aspects of American household carbon footprint. *Ecological Economics*, 66(2), 379-391. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.09.021>
- Xin, X., Jiang, Q., Li, C., Li, S., & Chen, K. (2023). Permutation flow shop energy-efficient scheduling with a position-based learning effect. *International Journal of Production Research*, 61(2), 382-409. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.2008041>
- Xu, D., Yin, X., Zhou, S., Jiang, Y., Xi, X., Sun, H., & Wang, J. (2022). A review on the remediation of microplastics using constructed wetlands: Bibliometric, co-occurrence, current trends, and future directions. *Chemosphere*, 303, 134990. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134990>
- Xu, G., Bao, Q., & Zhang, H. (2023). Multi-objective green scheduling of integrated flexible job shop and automated guided vehicles. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 126, 106864. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106864>
- Xue, L., & Wang, X. (2023). A multi-objective discrete differential evolution algorithm for energy-efficient two-stage flow shop scheduling under time-of-use electricity tariffs. *Applied Soft Computing*, 133, 109946. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.109946>
- Yan, J., Li, L., Zhao, F., Zhang, F., & Zhao, Q. (2016). A multi-level optimization approach for energy-efficient flexible flow shop scheduling. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1543-1552. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.161>
- Yang, M., Bao, Q., Shen, Y., & Qu, Q. (2023). Thirty years of research on driving behavior active intervention: A bibliometric overview. *Journal of Traffic and Transportation*

- Engineering (English Edition)*, 10(5), 721-742.
<https://doi.org/10.1016/j.jtte.2023.06.002>
- Yang, Q., Meng, X., Zhao, H., Cao, C., Liu, Y., & Huisingh, D. (2021). Sustainable operations-oriented painting process optimisation in automobile maintenance service. *Journal of Cleaner Production*, 324, 129191. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129191>
- Yin, L., Li, X., Gao, L., Lu, C., & Zhang, Z. (2017). A novel mathematical model and multi-objective method for the low-carbon flexible job shop scheduling problem. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 13, 15-30.
<https://doi.org/10.1016/j.suscom.2016.11.002>
- Zandi, A., Ramezani, R., & Monplaisir, L. (2020). Green parallel machines scheduling problem: A bi-objective model and a heuristic algorithm to obtain Pareto frontier. *Journal of the Operational Research Society*, 71(6), 967-978.
<https://doi.org/10.1080/01605682.2019.1595190>
- Zhai, Y., Biel, K., Zhao, F., & Sutherland, J. W. (2017). Dynamic scheduling of a flow shop with on-site wind generation for energy cost reduction under real time electricity pricing. *CIRP Annals*, 66(1), 41-44. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.099>
- Zhang, J., Ding, G., Zou, Y., Qin, S., & Fu, J. (2019). Review of job shop scheduling research and its new perspectives under Industry 4.0. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30(4), 1809-1830. <https://doi.org/10.1007/s10845-017-1350-2>
- Zhang, L., Wang, J., & You, J. (2015). Consumer environmental awareness and channel coordination with two substitutable products. *European Journal of Operational Research*, 241(1), 63-73. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.07.043>
- Zhang, Q., & Li, H. (2007). MOEA/D: A Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 11(6), 712-731.

- IEEE Transactions on Evolutionary Computation.
<https://doi.org/10.1109/TEVC.2007.892759>
- Zhang, Y., Liu, Q., Zhou, Y., & Ying, B. (2017). Integrated optimization of cutting parameters and scheduling for reducing carbon emissions. *Journal of Cleaner Production*, 149, 886-895. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.054>
- Zhao, F., Di, S., & Wang, L. (2023). A Hyperheuristic With Q-Learning for the Multiobjective Energy-Efficient Distributed Blocking Flow Shop Scheduling Problem. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 53(5), 3337-3350.
<https://doi.org/10.1109/TCYB.2022.3192112>
- Zhao, F., Zhang, H., & Wang, L. (2023). A Pareto-Based Discrete Jaya Algorithm for Multiobjective Carbon-Efficient Distributed Blocking Flow Shop Scheduling Problem. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 19(8), 8588-8599. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. <https://doi.org/10.1109/TII.2022.3220860>
- Zhao, J., Liu, H., Zhang, S., Qi, Y., Dong, H., Zhang, X., & Zhang, W. (2023). Advancements in Rumor Detection Research Based on Bibliometrics and S-curve Technology Evolution Theory. *SAGE Open*, 13(4), 21582440231217724.
<https://doi.org/10.1177/21582440231217724>
- Zhou, B., & Lei, Y. (2021). Bi-objective grey wolf optimization algorithm combined Levy flight mechanism for the FMC green scheduling problem. *Applied Soft Computing*, 111, 107717. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107717>
- Zhou, B., & Liao, X. (2020). Particle filter and Levy flight-based decomposed multi-objective evolution hybridized particle swarm for flexible job shop greening scheduling with crane transportation. *Applied Soft Computing*, 91, 106217.
<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106217>

- Zhou, J., Li, P., Zhou, Y., Wang, B., Zang, J., & Meng, L. (2018). Toward New-Generation Intelligent Manufacturing. *Engineering*, 4(1), 11-20. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.01.002>
- Zhu, H., Chen, M., Zhang, Z., & Tang, D. (2019). An Adaptive Real-Time Scheduling Method for Flexible Job Shop Scheduling Problem With Combined Processing Constraint. *IEEE Access*, PP, 7. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2938548>
- Zhu, Y., Kim, D., Jiang, T., Zhao, Y., He, J., Chen, X., & Lou, W. (2024). Dependency, reciprocity, and informal mentorship in predicting long-term research collaboration: A co-authorship matrix-based multivariate time series analysis. *Journal of Informetrics*, 18(1), 101486. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2023.101486>
- Zitzler, E., Laumanns, M., & Thiele, L. (2001). *SPEA2: Improving the strength pareto evolutionary algorithm* [Application/pdf]. 21 p. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-004284029>
- Zwack, C. C., Haghani, M., & de Bekker-Grob, E. W. (2024). Research trends in contemporary health economics: A scientometric analysis on collective content of specialty journals. *Health Economics Review*, 14(1), 6. <https://doi.org/10.1186/s13561-023-00471-6>