

Riesgos laborales y variables económicas en la secuenciación de manufactura de “bienes no estandarizados”¹

Germán Coca-Ortegón², Jorge Sierra-Suárez³

Resumen

Introducción. En el presente documento, se evalúa el comportamiento de los siguientes factores sociales y económicos de sostenibilidad: proporción “no conforme” generada por la fatiga del trabajador, nivel de intensidad del sonido, penalización del nivel de iluminación, tiempo de procesamiento (makespan) y costos directos de personal. **Objetivo.** En este sentido, se busca lograr la gestión equilibrada a nivel multiobjetivo de los mencionados factores de sostenibilidad, al momento de llevarse a cabo la secuenciación de un proceso de manufactura de “bienes no estandarizados”. **Materiales y Métodos.** Es así como, se desarrollan y comparan dos metodologías multiobjetivo. La primera hace referencia a un algoritmo híbrido; mientras que la segunda corresponde a un

algoritmo fundamentado en la determinación de sumas ponderadas. **Resultados.** Al cotejar los valores mínimos detectados en relación con los diversos factores de interés, se encuentra que tales valores son representativamente menores, cuando se compara el “primer método” respecto al “segundo método”. Igualmente, desde la perspectiva del parámetro C-Metric, el “método híbrido” obtiene un valor que aventaja en 567 % el rendimiento del “método de sumas ponderadas”. En cuanto a lo anterior, el primer método, presenta la habilidad de hallar una alta diversidad de soluciones “no dominadas”. **Conclusiones.** Dado el caso que se otorgue prioridad a la implementación de tiempos de proceso pequeños, es indispensable complementar tal decisión con criterios de carácter social, buscando que se garantice la

- 1 Artículo original proveniente de la Tesis titulada: Metodología multiobjetivo para la programación de producción de los sistemas de manufactura “Job Shop Flexible” del sector metalmecánico bajo un enfoque de sostenibilidad (Doctorado en Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales). Fuente de financiación: MinCiencias. Período de ejecución del proyecto: noviembre de 2016 a diciembre de 2020. Lugar de ejecución del proyecto: Medellín (Antioquia).
- 2 PhD en Ingeniería, M. Sc. en Ingeniería, Ingeniero Industrial, Docente de la Universidad EIA, Envigado, Colombia, ORCID: 0000-0002-6760-4111
- 3 M. Sc. en Administración, Ingeniero de Producción, Docente de la Universidad EIA, Envigado, Colombia. ORCID: 0000-0003-2173-2297

Autor para Correspondencia: german.coca@eia.edu.co
Recibido: 07/03/2022 Aceptado: 05/12/2022

* Los autores declaran que no tienen conflicto de interés

reducción de la exposición a determinados riesgos laborales. Adicionalmente, el presente estudio debe integrar a futuro conceptos propios de la dinámica de sistemas.

Palabras Clave: multiobjetivo, sostenibilidad, secuenciación, intensidad sonora, tiempo de proceso.

Occupational risks and economic variables in the manufacturing sequencing of “non-standardized goods”

Abstract

Introduction. In this document, the performance of the following social and economic sustainability factors is evaluated: “non-compliant” proportion generated by worker fatigue, sound intensity level, lighting level penalty, makespan time and direct labor costs. **Objective.** In this sense, it seeks to achieve balanced management at a multi-objective level of the sustainability factors, when carrying out the sequencing of a manufacturing process of “non-standardized goods”. **Materials and methods.** This is how two multi-objective methodologies are developed and compared. The first refers to a hybrid algorithm; while the second corresponds to an algorithm based on the

determination of weighted sums. **Results.** When comparing the minimum values detected in relation to the various factors of interest, it is found that such values are significantly lower, when the “first method” is compared to the “second method”. Likewise, from the perspective of the C-Metric parameter, “method one” obtains a value that exceeds the performance of “method two” by 567 %. It is determined that “method one” has the ability to find a high diversity of “non-dominated” solutions. **Conclusions.** Given the case that priority is given to the implementation of short process times, it is essential to complement such decision with criteria of a social nature, seeking to guarantee the reduction of exposure to certain occupational risks. Additionally, this study should integrate future concepts of system dynamics.

Keywords: multi-objective, sustainability, sequencing, sound intensity, makespan time.

Riscos ocupacionais e variáveis econômicas no sequenciamento de fabricação de “bens não padronizados”

Resumo

Introdução. Neste documento, avalia-se o comportamento dos seguintes fatores

de sustentabilidade social e econômica: proporção “não conforme” gerada pela fadiga do trabalhador, nível de intensidade sonora, penalidade do nível de iluminação, tempo de processamento (makespan) e custos diretos com pessoal. **Alvo.** Neste sentido, procura alcançar uma gestão equilibrada a nível multiobjetivo dos fatores de sustentabilidade mencionados, ao efetuar a sequenciação

de um processo de fabrico de “bens não padronizados”. **Materiais e métodos.** É assim que duas metodologias multiobjetivos são desenvolvidas e comparadas. A primeira refere-se a um algoritmo híbrido; enquanto o segundo corresponde a um algoritmo baseado na determinação de somas ponderadas.

Resultados. Ao comparar os valores mínimos detectados em relação aos diversos fatores de interesse, verifica-se que tais valores são significativamente inferiores, quando se compara o “primeiro método” ao “segundo método”. Da mesma forma, na perspectiva do parâmetro C-Metric, o “método um” obtém um valor que excede em 567 % o desempenho

do “método dois”. Em particular, determina-se que o “método um” tem a capacidade de encontrar uma alta diversidade de soluções “não dominadas”. **Conclusões.** Dado que se dá prioridade à implementação de prazos de processo reduzidos, é fundamental complementar essa decisão com critérios de cariz social, procurando garantir a redução da exposição a determinados riscos laborais. Adicionalmente, este estudo deve integrar conceitos futuros de dinâmica de sistemas.

Palavras-chave: multiobjetivo, sustentabilidade, sequenciamento, intensidade sonora, tempo de processo.

Introducción

En la presente contribución, se examinaron las operaciones productivas de una organización dedicada a la obtención de “bienes no estandarizados” del sector metalmecánico. Para esta entidad, se analizaron sus riesgos laborales y sus ventajas competitivas de fabricación. De este modo, se determinaron como prioritarios, los siguientes factores: proporción “no conforme” generada por la fatiga del trabajador, intensidad del sonido, penalización del nivel de iluminación, tiempo de procesamiento (makespan) y costos directos de personal.

Particularmente, desde la perspectiva de la dimensión social de la sostenibilidad, la evaluación de los “riesgos ocupacionales” pretende mantener y mejorar la salud del ser humano en su sitio de trabajo (Hale, Legun, Campbell & Carolan, 2019; Hutchins,

Richter, Henry & Sutherland, 2019). Lo anterior corresponde específicamente al octavo objetivo, dentro del conjunto de los 17 propósitos de desarrollo sostenible, diseñados por la Organización de Naciones Unidas (ONU, 2014). El mencionado objetivo señala entre otros aspectos, la necesidad de garantizar la salud de las personas y la protección de los sistemas sanitarios en los contextos laborales. De acuerdo con lo expuesto, los riesgos ocupacionales referidos en el párrafo previo (“intensidad del sonido” y “penalización del nivel de iluminación”) forman parte del campo de estudio que compete a la dimensión social de la sostenibilidad. A su vez, los demás factores (proporción “no conforme”, tiempo de proceso y costos directos de personal) son afines a conceptos de orden económico (Coca, 2021).

Con base en lo ilustrado, se procede a describir enseguida, bajo el marco de la

empresa examinada, el comportamiento de las variables de interés: en lo que atañe a la proporción “no conforme”, la compañía es intensiva en el uso de mano de obra, por lo cual la probabilidad de obtener productos defectuosos aumenta al transcurrir la jornada laboral (Berti, Artigues, Battaña, Guillaume & Battini, 2019; Yung, Kulus, Wells & Neumann, 2020). Igualmente, la entidad detectó que la fatiga en los puestos de trabajo proviene de la exposición a: la manipulación de materiales de alto peso, las vibraciones y la temperatura ambiente.

En relación con la variable intensidad del sonido, la organización utiliza equipos con capacidad de emitir niveles de intensidad sonora próximos o superiores a 90 decibeles; por tanto, en el tiempo de proceso óptimo, el nivel de intensidad global de la planta se incrementará, debido a que tales equipos operarán de forma simultánea (Kempen, Casas, Pershagen & Foraster, 2018).

En el caso de la penalización del nivel de iluminación, se busca detectar aquellos programas de organización del trabajo cercanos al tiempo óptimo de proceso, cuya implementación permita que las tareas se ejecuten en presencia de iluminación natural o en su defecto, bajo condiciones normales de operación del sistema de iluminación artificial.

En lo concerniente al tiempo de procesamiento, se establece utilizando reglas de despacho (TOC, FVC, FIFO, LIFO, TOL). La aplicación de esta clase de reglas suscita bajo nivel de productividad en los sistemas de manufactura (Amiri, Shirazi & Tajdin, 2019; Gu, Huang & Liang, 2020).

En lo relativo a los costos directos de personal, la demanda altamente variable de la entidad ocasiona inconvenientes para establecer el método de organización del sistema de operaciones, asociado con el menor costo.

De modo global, se pretende caracterizar el horizonte de planeación del sistema de producción, capaz de cumplir las siguientes condiciones: generar el menor riesgo laboral (mínimo nivel de intensidad sonora; menor nivel de penalización en iluminación; y mínima exposición a riesgos que ocasionan la obtención de una mayor proporción de artículos no conformes), lograr oportunidad de entrega en el proceso de fabricación (identificación del mínimo tiempo de proceso) e igualmente, detectar el mínimo costo de personal.

En síntesis, en el presente trabajo se desarrolla el proceso de minimización multiobjetivo de las variables sociales y económicas de la sostenibilidad que se exponen enseguida: proporción “no conforme” generada por la fatiga del trabajador, intensidad del sonido, penalización del nivel de iluminación del sitio de labor, tiempo de procesamiento y costos directos de personal.

Respecto a la valoración de las variables observadas, se requiere establecer en primera instancia el tiempo mínimo de procesamiento. Consecuentemente, la estimación del parámetro en mención, dado que existan “T” trabajos y “C” centros de proceso, implica el análisis de T¹C¹ soluciones (Bissoli, Zufferey & Amaral, 2019; Rahmati, Zandieh & Yazdani, 2012) (Bissoli, Zufferey &

Amaral, 2019; Rahmati, Zandieh & Yazdani, 2012; Zhang, Bail, Yang & Qiang, 2022). ¡Por tanto, surge la dificultad de explorar con la oportunidad necesaria T! ^c puntos factibles (Gu, Huang & Liang, 2020; Nicoara, 2015; Ozturk, Bahadir & Teymourifar, 2018; Valenzuela, Cosío, Romero & Brizuela, 2022). De este modo, se propone en la actual contribución, obtener un algoritmo estructurado, a partir de la revisión de los conceptos inherentes a la técnica “algoritmos genéticos multiobjetivo” (Deb & Jain, 2014; Deb, Pratap, Agarwal & Meyarivan, 2002; Zitzler, Laumanns & Thiele, 2001). Es así como, el algoritmo diseñado permitirá optimizar de forma simultánea los factores seleccionados, una vez se halle el tiempo de procesamiento.

De igual forma, se ilustran enseguida algunos desarrollos pertenecientes a la herramienta metaheurística denominada “algoritmos genéticos”. Para este efecto, se establecen las siguientes “clases”: redefinición de operadores en producción de “bienes no estandarizados”, determinación de algoritmos en producción de “bienes no estandarizados”, análisis de sostenibilidad con enfoque básico de evaluación del consumo de energía y evaluación multiobjetivo en producción de “bienes no estandarizados”. Las “clases” previamente enumeradas, se exponen a continuación:

Redefinición de Operadores en producción de “bienes no estandarizados”. En esta categoría, se aprecian dos documentos. Los documentos en cuestión buscan garantizar la mayor dominancia de las soluciones en las nuevas generaciones a través de la reestructuración de las operaciones de cruce

y de mutación (Huang, Zhao & Ma, 2014; Sang, Tan & Liu, 2020).

Determinación de algoritmos en producción de “bienes no estandarizados”. A esta clase competen cuatro contribuciones. Su propósito se orienta a minimizar el tiempo de procesamiento y los costos directos de personal (Aschauer, Roetzer, Steinboeck & Kug, 2020; Geng, Yuan & Yuan, 2018; Safarzadeh & Kianfar, 2019; Zheng & Sui, 2019).

Análisis de sostenibilidad con enfoque básico de evaluación del consumo de energía. Se identifican en este caso 9 artículos, los cuales consideran el estudio exclusivo del consumo de energía como criterio relevante para examinar el desempeño en sostenibilidad (Golpira, Rehman & Zhang, 2018; Guo, Huang, Wang, & León, 2021; Huo, Xiao & Pan, 2020; Masmoudi, Delorme & Gianessi, 2019; Ren, Ye & Li, 2020; Renna & Materi, 2021; Salido, Escamilla, Barber & Giret, 2017; Wen et al, 2021; Zhao et al, 2019).

Evaluación multiobjetivo en producción de “bienes no estandarizados”. En esta clase se identifican siete contribuciones. Las contribuciones en mención pueden categorizarse en técnicas exactas o en técnicas heurísticas. En relación con la perspectiva de las técnicas exactas, se detectó un artículo orientado a explorar la secuenciación multiobjetivo en “Job Shop” (Nicoara, 2015).

Las otras seis contribuciones corresponden al campo de la heurística. Particularmente, dos documentos atañen a la estructuración de algoritmos multiobjetivo (Shen, Zhang & Fu, 2014; Mu, 2019). A su vez, otros tres desarrollos proponen

la solución de problemas específicos, a través del diseño de algoritmos híbridos (Shokouhi, 2018; Zhang, Li, Zhang & Wang, 2020; Zhu, He & Li, 2017); mientras que la sexta contribución, expone las tendencias de la secuenciación multiobjetivo en la obtención de bienes “no estandarizados” (Renke, Piplani & Toro, 2021).

A partir de la revisión de literatura, se denota que el análisis simultáneo de las variables examinadas en el actual documento se ha realizado de forma superflua en las contribuciones evaluadas. De igual modo, el tema relativo a la seguridad y a la salud en el trabajo ha sido escasamente profundizado en la secuenciación de procesos de manufactura a nivel multiobjetivo (Dabbagh & Yousefi, 2019; Villicaña & Ponce, 2019).

Finalmente, el presente artículo se desarrollará así: en primera instancia, se expondrán los materiales y métodos; más adelante, se registrarán los resultados; después, se realizará su discusión y, por último, se expondrán las conclusiones. Enseguida, se procede a presentar las etapas previamente mencionadas.

Materiales y métodos

En esta sección, las etapas 1 a 6 describen la forma de operación del respectivo algoritmo híbrido (primer método), mientras que en el paso 7, se presenta la forma de operación del algoritmo correspondiente a la ejecución de sumas ponderadas (segundo método). De igual manera, en el paso 8 se muestra la comparación de los resultados obtenidos al ejecutar ambos métodos.

Paso 1 Obtención población inicio.

A partir de las características de la empresa evaluada, se observan n órdenes que deben examinarse. ¡Estas órdenes al intercambiar de posición, constituyen $n!$ soluciones. Cada solución incluye 6 subsoluciones. Una subsolución se representa a través de los segmentos de la tabla 1: “Solución”, “rotaciones de trabajo”, “horas jornal” y “labora 6 o 7 días por semana”.

Es así como, en el segmento “solución”, se ilustra el individuo: “5-9-1-4-6-3-8-2-7”. ¡Esta solución procede de una de $9!$ permutaciones posibles (nueve órdenes de trabajo en total). En la solución antes nombrada, se señala que la “orden 5” equivaldría al primer orden en transformarse; de este modo, la “orden 7” correspondería a la orden que se procesa en noveno lugar. En relación con cada solución, se identifican seis “formas” de estructurar las jornadas laborales. Estas “formas” se aprecian en los segmentos de la tabla 1: “Rotaciones de trabajo” y “horas jornal”. Según los datos de estos segmentos, se define que una solución puede programarse en tres tipos de jornada cada día, así: un turno de 8 horas (6 de la mañana a 14 en la tarde), dos turnos de 8 horas (6 a 14 y 14 a 22) o tres turnos de 8 horas (6 a 14, 14 a 22 y 22 a 6). De igual manera, en el segmento: “Labora 6 o 7 días por semana”, se indica que la solución puede analizarse en dos esquemas de trabajo: hasta el sábado (6 días) o con festivo dominical (7 días). A continuación, se registra la tabla 1.

Tabla 1: Formas de estructurar los turnos de trabajo.

Subsol número	Solución	Rotaciones de trabajo	Horas Jornal	Labora 6 o 7 días semana
1	5-9-1-4-6-3-8-2-7	6 a 14	8	Hasta sábado
2	5-9-1-4-6-3-8-2-7	6 a 14-14 a 22	16	Hasta sábado
3	5-9-1-4-6-3-8-2-7	6 a 14-14 a 22-22 a 6	24	Hasta sábado
4	5-9-1-4-6-3-8-2-7	6 a 14	8	Con domingo
5	5-9-1-4-6-3-8-2-7	6 a 14-14 a 22	16	Con domingo
6	5-9-1-4-6-3-8-2-7	6 a 14-14 a 22-22 a 6	24	Con domingo

Fuente: elaborada por los autores.

Cada subsolución registrada en la tabla 1, se le tratará desde este punto del documento como una solución específica. Consecuentemente, el esquema concerniente a la organización de una solución se registra en la tabla 2. En el esquema, se observan 11 segmentos. En nueve de ellos, se disponen las órdenes de trabajo. Para el caso, el “segmento 1” está asociado con la “orden 5”, representando que tal “orden” se programaría en primer término. Cuando se aumenta el número del segmento hasta llegar

al “segmento 9”, se establece que en dicho segmento está asignada la “orden 7”; por tanto, la orden antes mencionada, ingresará a la planta de producción en noveno lugar. Asimismo, en el “segmento 10”, se aprecia el número de horas laboradas cada día (en el ejemplo 8 horas: comienza a las 6 y finaliza a las 14). Por último, el “segmento 11” atañe al número de días programados por semana (7 para el ejemplo, ya que incluye el término: “con domingo”).

Tabla 2: Esquema y operativización de una solución.

Seg 1	Seg 2	Seg 3	Seg 4	Seg 5	Seg 6	Seg 7	Seg 8	Seg 9	Seg 10 Rotac trabajo	Seg 11 Labora 6 o 7 días semana
Ord 5	Ord 9	Ord 1	Ord 4	Ord 6	Ord 3	Ord 3	Ord 2	Ord 7	6 a 14	Con domingo

Fuente: elaborada por los autores.

De acuerdo con el contenido de la tabla 2, se generan de forma aleatoria “S” soluciones.

Paso 2 Definición de grupos.

La población de tamaño S se fracciona en cinco grupos. Cada grupo permitirá evaluar un objetivo y estará integrado por S/5 soluciones. Las soluciones por grupo son analizadas y clasificadas en orden ascendente. Más adelante, se retiran por grupo el 30 % de las soluciones cuyo valor sea superior.

Luego se establece el tiempo de procesamiento de cada grupo. La estimación de la variable en cuestión se realiza a partir de la aplicación de la Ecuación N° 1:

$$Desempeño_{T_{proceso}} = \min \left\{ \sum_{a=1}^I \sum_{b=1}^J O_{ab} \right\}$$

Ecuación N° 1

En ecuación 1: “I” corresponde a la cantidad de órdenes, “J” se refiere a la cantidad de equipos y “O_{ab}” atañe al tiempo de la orden a en el equipo b.

A continuación, los grupos se examinan a través de la implementación de técnicas de estimación, así:

Técnica de estimación para la proporción “no conforme”. Esta técnica se fundamenta en el tratamiento de los datos correspondientes a la fracción “no conforme” establecida por la organización examinada. Es así como, la proporción “no conforme” que se asigna a lo largo del horizonte de programación, dado que existan órdenes en proceso a

nivel horario, se totaliza y finalmente, se multiplica por 100.

Técnica de estimación de la intensidad sonora. Para implementar la técnica en consideración, se identifica en primera instancia, la intensidad sonora durante cada hora de trabajo. Después, se determina su participación porcentual en relación a 90 decibelios. Esta participación, se registra en cada una de las horas que integran el horizonte de fabricación. Luego, se efectúa la sumatoria de las participaciones previamente nombradas. Por último, se relaciona la sumatoria anterior respecto a la cantidad de turnos proyectados.

Técnica de estimación del nivel de iluminación. En este caso, se establece en primera instancia, el nivel de iluminación real por hora en cierta área de trabajo. Más adelante se estima el grado de cumplimiento horario, en cuanto a nivel de iluminación se refiere. Este grado de cumplimiento se determina, hallando la equivalencia matemática entre los niveles de iluminación real y requerido en el área evaluada. Por ejemplo, si las necesidades de iluminación de tal área ascienden a 1000 luxes y la medición directa, arroja un resultado de 800 luxes, se lograría un grado de cumplimiento de 80 %. Con posterioridad, se obtiene el nivel de penalización por hora, el cual está dado al calcular la diferencia entre la meta ideal de 100 % y el grado de cumplimiento definido para el área bajo análisis. Finalmente, se consolidan las penalizaciones identificadas por cada una de las horas que integran el plan de fabricación proyectado. Es así como, se cuantifica el puntaje total que será examinado.

Técnica de estimación de los costos directos de personal. La presente estimación se obtiene, a partir de los programas laborales expuestos enseguida: 6 a 22 o 22 a 6, en día hábil o dominical. A cada hora de cada programa de fabricación según el tipo de día (hábil o dominical), le atañe cierta puntuación. Esta puntuación proviene del sobrepago porcentual respecto a la base salarial en jornada normal. En consecuencia, se procede a ejecutar la sumatoria de la puntuación definida por cada hora y por cada puesto de trabajo observado en el plan de fabricación proyectado.

Paso 3 Establecer la primera estructura poblacional.

La primera estructura poblacional se integra según lo registrado a continuación: cada grupo de 0,75/5 soluciones, se fracciona en cinco segmentos. De cada uno de los segmentos se eliminan al azar 0,025 soluciones. En conjunto los grupos proveen 0,55 soluciones a la primera población. Estas 0,55 soluciones se afectan con una proporción de cruce de 96 %. La tarea se ejecuta hasta generar una cantidad adicional correspondiente al 40 % de la población. Tal cruce se efectúa intercambiando entre soluciones aquellos genes que incluyen los órdenes de trabajo. A su vez, 8 % de las soluciones se determinan aplicando la operación de mutación con 10 % de probabilidad al 90 % de la población de tamaño S_{ya} creada. Además, con el propósito de fortalecer la diversidad, el restante 2 % de las soluciones, se extrae del total de soluciones posibles. De modo adicional, se indica que, para ejecutar las operaciones

propias de los algoritmos genéticos, cruzamiento y mutación, no se consideran los segmentos (genes) relativos a las horas o días proyectados respectivamente por día o por semana.

Paso 4 Determinar la estructura de Pareto en la población definida.

Las soluciones de la primera población se evalúan en las diversas funciones objetivo; enseguida, se comparan los valores estimados para cada solución en relación a los valores determinados para las demás soluciones en la población en mención. De forma consecuente, se segregan las soluciones “dominantes”, es decir, las soluciones cuyos valores sean estrictamente inferiores en las diversas funciones objetivo o en su defecto que, siendo iguales en algunas de ellas presenten a la vez valores inferiores en las otras funciones. Respecto a lo indicado, el primer grupo de soluciones obtenidas constituye el primer frente de Pareto. Después, se aplica el proceso previamente explicado a las soluciones dominadas de la población hasta identificar cada vez un nuevo nivel de mejores individuos.

Paso 5 Establecer la segunda estructura poblacional.

La segunda estructura poblacional se conforma así: 0,55 soluciones provienen de los primeros frentes de Pareto establecidos en el paso 4; para este efecto, se emplea como orden de asignación prioritario, el nivel de dominancia correspondiente a cada frente. A su vez, 0,35 soluciones se originan en el cruce aleatorio de los individuos que conforman los

tres primeros frentes; dado el caso que solo haya dos o un único frente, se procedería a realizar la operación de cruzamiento entre las soluciones de los frentes existentes. Además, 0,18S soluciones proceden de la mutación al azar de los 0,8S individuos anteriormente obtenidos. Para cerrar 0,02S soluciones, se toman aleatoriamente del conjunto total de soluciones, con el fin de asegurar la divergencia de la población.

Paso 6. Definir la estructura de Pareto de la población identificada en el paso 5.8

Se determina según lo registrado en el paso 4, la estructura de Pareto de la población que se identificó en el paso 5.

Paso 7. Determinación del desempeño de una función lineal por solución (segundo método)

En cada ciclo del programa, se ejecutan las actividades expuestas enseguida: generar al azar S soluciones; estimar las funciones objetivo por cada solución generada; establecer el desempeño de la función lineal por solución y, por último, escoger la solución que atañe al mayor valor de tal función lineal. Luego, consolidar las soluciones seleccionadas en una sola población; estimar de nuevo el desempeño de la función lineal por solución para el conjunto de soluciones elegidas y, por último, identificar la solución de mejor comportamiento, es decir, la solución de mayor desempeño en cuanto a la función lineal aplicada.

A continuación, se ilustran las Ecuaciones empleadas para estimar la función lineal de interés:

$$PI(Y_b)_a = \left[\frac{PO(l_a)}{\sum_{c=1}^T PT(l_c)} \right] \left[\frac{l_a^{sup} - l_a(y_b)}{l_a^{sup} - l_a^{inf}} \right]$$

Ecuación N° 2

En la ecuación 2: l_a^{sup} = valor superior en el conjunto de soluciones de respuesta por función examinada; l_a^{inf} = valor inferior en el conjunto de soluciones de respuesta por función evaluada; $l_a(y_b)$ = valor de cada solución y_b por función; PO = valor ponderado; $PO(l_a)$ = valor ponderado de l_a (su determinación proviene de la decisión del equipo de trabajo en la compañía, pudiendo fluctuar entre 0 y 100); $PT(l_c)$ = total de los factores ponderados de las funciones (el consolidado es 1); T = cantidad de funciones a evaluar; $PI(Y_b)_a$ = peso ponderado de cada solución en cada función analizada; Y_b = solución en el total de individuos revisados.

Después de estimar $PI(Y_b)_a$, se establece:

$$PI(Y_b) = \sum_{a=1}^T PI(Y_b)_a \quad PI(Y_b) = \sum_{a=1}^T PI(Y_b)_a$$

Ecuación N° 3

En la ecuación 3: T = cantidad de funciones a evaluar; $PI(Y_b)$ = suma ponderada de la solución “b”; $PI(Y_b)_a$ = peso ponderado de cada solución en cada función analizada; Y_b = solución en el total de individuos revisados.

Paso 8 Cotejar los métodos diseñados.

El análisis de las poblaciones identificadas de acuerdo con la implementación de los métodos propuestos se lleva a cabo

empleando como parámetro de cotejo el valor correspondiente al indicador C-Metric (indicador de dominancia al comparar los resultados de los métodos multiobjetivo) (Autuori, Hnaien & Yalaoui, 2016; Zhang & Chiong, 2016).

Resultados

Enseguida, se analizan tanto las poblaciones determinadas por medio de la aplicación de los métodos diseñados como también el cotejo de los métodos en cuestión.

Población establecida de acuerdo con la implementación del método híbrido (primer método).

Según lo descrito en los seis primeros pasos de la sección de “materiales y métodos”, se ilustran en la tabla 3 los resultados hallados para 2 soluciones en relación con los 210 especímenes que conforman la estructura poblacional de respuesta. A su vez, para tal población se observan los valores correspondientes al promedio y al coeficiente de variación por cada variable examinada. En las tablas 3, 4, 5 y 6, las estimaciones se registran en puntos.

Tabla 3. Resumen de resultados (primer método).

Posición solución en la población	T proceso (horas)	T proceso (semanas)	Estimación costos	Estimación proporción	Estimación sonido	Estimación iluminación
4	190	1,97	0	1606	787	1424
32	198	1,38	1930	1848	771	1672
Promedio	235,90	2,01	1305,21	1721,38	694,29	1686,01
Coefficient Variación	0,10	0,52	0,93	0,19	0,34	0,31

Fuente: elaborada por los autores.

De acuerdo con el contenido de la tabla 3, se determina la siguiente caracterización en número de soluciones en la estructura de Pareto: 68 en primer frente, 61 en segundo frente, 39 en tercer frente, 25 en cuarto frente y 17 en quinto frente.

Población determinada según la implementación del método basado en una función lineal (segundo método).

En la tabla 4, se reportan los resultados provenientes de la aplicación del paso 7 de la sección “materiales y métodos”. Al respecto, se registran 2 soluciones de las 210 soluciones detectadas en la población final de respuesta. Igualmente, para ésta última población se registran los valores que atañen al promedio y al coeficiente de variación por variable.

Tabla 4. Resumen de resultados (segundo método).

Posición solución en la población	T proceso (horas)	T proceso (semanas)	Estimación costos	Estimación fracción	Estimación sonido	Estimación iluminación
2	207	2,15	0	1484	753	1396
210	173	1,85	0	1700	821	1462
Promedio	195,32	2,98	0	1548,26	776,72	1441
Coefficient Variación	0,034	0,21	0/0	0,10	0,11	0,14

Fuente: elaborada por los autores.

Asimismo, el análisis de dominancia de la segunda población de respuesta permite concluir que la totalidad de las soluciones constituye un único frente de Pareto. Además, el valor correspondiente a la función lineal para los individuos presentados en la tabla anterior se observa enseguida: al individuo número 2 le concierne un nivel de 48,71 %, y a su vez, al individuo número 210 le atañe una puntuación de 44,95 %.

Cotejo de los métodos propuestos:

Al evaluar la información registrada en las tablas 5 y 6, se determina que los valores examinados (coeficiente de variación y valor máximo), son superiores cuando se coteja el “método uno” en referencia al “método dos”.

Debido al hecho anteriormente descrito, se señala que el algoritmo híbrido presenta mejor habilidad en la tarea concerniente a la detección de la dispersión de las soluciones que integran el conjunto total de posibles respuestas. En consecuencia, con lo descrito el indicador C-Metric correspondiente al “método 1” asciende a 94,11 puntos, es decir, 94,11 % de sus soluciones “no dominadas” (64 de 68 soluciones en el primer frente de Pareto) conservan esta característica después de compararse con las soluciones “dominantes” que fueron encontradas por medio de la ejecución del “método 2” (210 soluciones en el frente óptimo). De este modo, se anota que, para el indicador en cuestión, el “algoritmo híbrido” aventaja al método de “sumas ponderadas” en 597 %.

Tabla 5. Dispersión y C-Metric (tiempo de procesamiento y costos directos de personal).

Parámetro	Primer método						Segundo método					
	T Proceso (horas)		T Proceso (semanas)		Estimación costos		T Proceso (horas)		T Proceso (semanas)		Estimación costos	
C Variación	0,10		0,52		0,93		0,03		0,21		0/0	
Min	159	272	0,91	5,66	0	3520	170	242	1,51	4,31	0	0
C-Metric	94,11						13,34					

Fuente: elaborada por los autores.

Tabla 6. Dispersión y C-Metric (“no conformes”, sonido e iluminación).

Parámetro	Primer método						Segundo método					
	Estimación no conformes		Estimación Sonido		Estimación iluminación		Estimación no conformes		Estimación sonido		Estimación iluminación	
C Variación	0,19		0,34		0,31		0,10		0,108		0,14	
Mín. Máx.	1352	2410	622	850	1200	1820	1364	1740	682	827	1258	1520

Fuente: elaborada por los autores.

Con base en lo expuesto, la compañía examinada decide implementar el “primer método” de tal forma que pueda emplearlo en la secuenciación de su sistema productivo. Es así como, para las soluciones pertenecientes al primer frente de Pareto,

se establece en consenso con el equipo directivo de dicha compañía, una agrupación específica de datos por tiempo de proceso (en semanas). La agrupación en mención se registra en la tabla 7.

Tabla 7. Sistematización información primer frente (método híbrido).

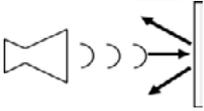
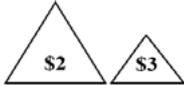
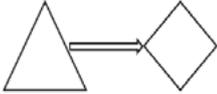
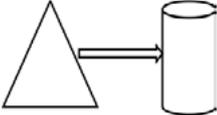
Número Segmento	Cota Inferior (Tiempo)	Cota Superior (Tiempo)	Cantidad Soluciones	Porcentaje (%)	Tendencias de la demanda		
					Estable	Crece	Decrece
1	0,91	1,80	12	17,64		✓	
2	1,80	3,00	41	60,29	✓	✓	
3	3,00	3,70	06	08,82	✓		
4	3,70	4,20	04	05,88	✓		✓
5	4,20	5,50	05	07,35			✓

Fuente: elaborada por los autores.

Al estudiar los datos registrados en la tabla 7, la compañía deberá determinar para la época del año que se esté analizando, cuál es la tendencia de la demanda de mercado. De esta forma, procederá a segregar aquel individuo, cuyo tiempo de proceso corresponda al menor tiempo dentro del respectivo intervalo. Con posterioridad,

tal compañía definirá y aplicará decisiones relacionadas con las otras variables de interés: costos directos de personal, proporción “no conforme”, intensidad del sonido y nivel de iluminación. En la tabla 8, se exponen algunas de las acciones generales que la empresa en cuestión podría tomar según el individuo elegido para cada intervalo en específico.

Tabla 8. Descripción de acciones generales a tomar.

Número Segmento	Desempeño tiempo	Desempeño otras variables	Medidas a tomar	Descriptor
1	Muy pequeño	Muy alto de variables sociales.	Aislar sonido en fuente.	
			Mejorar uso iluminación natural	
			Reducir niveles de fatiga	
2	Pequeño	Alto de variables sociales	Similares a lo propuesto en uno con menor inversión.	
3	Mediano	Mediano de variables sociales	Afines a lo definido en dos con menor inversión.	
4	Alto	Bajo de variables sociales. Reducción de demanda	Rediseñar los productos para mercados actuales.	
5	Muy alto	Muy bajo de variables sociales. Pérdida de mercados.	Diseñar nuevos productos para mercados nuevos y actuales.	

Fuente: elaborada por los autores.

Discusión de resultados

De forma independiente al hecho de que en la literatura revisada (Bissoli, Zufferey & Amaral, 2019; Dabbagh & Yousefi, 2019; Gu, Huang & Liang, 2020; Guo, Huang, Wang, & León, 2021; Huo, Xiao & Pan, 2020; Renke, Piplani & Toro, 2021; Shokouhi, 2018; Zhang, Bail, Yang & Qiang, 2022; Zhang, Li, Zhang & Wang, 2020; Zhu, He & Li, 2017) y su soporte teórico, los desarrollos investigativos de los procesos de manufactura concernientes a

la obtención de bienes “no estandarizados” que emplean técnicas fundamentadas en métodos metaheurísticos, se hayan extendido ampliamente desde finales de la década de 1990; se señala que las variables asociadas con ciertos riesgos laborales (sonido, iluminación y factores incidentes sobre el comportamiento de la proporción de producción “no conforme” –exposición a: vibraciones, peso manipulado y temperatura ambiente-) y, asimismo,

con determinados aspectos de carácter económico (tiempo de procesamiento y costos directos de personal), no se han valorado simultáneamente, ni tampoco se han analizado con la profundidad requerida. De igual manera, el área problemática es de vital importancia, puesto que permite aplicar la sostenibilidad en las operaciones de las organizaciones manufactureras, tomando como base dos referentes teóricos complementarios, de un lado la gestión de los riesgos laborales y del otro las misiones de fabricación (flexibilidad y costos). En consecuencia, se busca garantizar la proyección de la organización, en un mercado global que exige a las entidades actuar de forma socialmente responsable.

Al considerar dos indicadores críticos de evaluación, se detecta que el método híbrido (primer método) aventaja en rendimiento al método de sumas ponderadas (segundo método). Es así como, el primero de los indicadores en mención corresponde al indicador C-Metric. Para el caso, se encuentra que el valor concerniente a tal parámetro es mayor en 567 %, cuando se realiza el respectivo cotejo del “algoritmo híbrido” en referencia al método de “sumas ponderadas”. Consecuentemente, se afirma que, entre los dos protocolos examinados, el algoritmo híbrido es más hábil en relación con la detección de soluciones dominantes. A su vez, el segundo de los indicadores se refiere a la cantidad superior de frentes establecidos por medio de la aplicación del ya mentado método híbrido, evidenciándose de este modo, su mayor destreza para representar soluciones diversas en una estructura óptima de Pareto.

Igualmente, también se detecta que los valores mínimos en las diversas variables examinadas son inferiores, cuando se coteja el método híbrido respecto al método de sumas ponderadas, así: en 6,91 % en lo inherente al tiempo de procesamiento (expresado en horas), en 65,93 % en lo referente al tiempo de procesamiento (expresado en semanas), en 1 % en lo concerniente a la proporción de producción “no conforme”, en 9,64 % en lo relativo a la variable intensidad sonora y, por último, en 4,83 % en lo pertinente a la variable penalización de nivel de iluminación.

Complementariamente, se expresa que la compañía debe evaluar las tendencias del mercado, procediendo a seleccionar del intervalo de interés, aquel individuo de menor tiempo de fabricación (ver tabla 10). Sin embargo, es necesario analizar sí la implementación del anterior individuo, genera situaciones de riesgo laboral en el sistema productivo, cuyo impacto pudiera ser potencialmente nocivo para la salud de las personas. Con base en lo expuesto, se señala que la Organización debe tomar las medidas apropiadas, dada la identificación de las mencionadas situaciones de riesgo. Es así como, las medidas anteriores deberían privilegiar: en el caso del ruido, el aislamiento de la fuente y en el caso de la iluminación, el montaje de sistemas eficientes, bajo los cuales se priorice en lo posible iluminar de forma natural.

Conclusiones

Con base en lo definido en las secciones anteriores, se concluye que el método

estructurado muestra características relevantes de desempeño tales como: número significativo de soluciones dominantes de acuerdo con la medición realizada al aplicar el indicador C-Metric; cantidad representativa de frentes de Pareto según el examen de “no dominados” que se ejecutó en cada generación y, a su vez, detección de valores mínimos de interés, los cuales se obtuvieron a partir del cruzamiento de los mejores individuos de los primeras capas de las estructuras óptimo-paretianas identificadas por ciclo. Asimismo, se llevó a cabo una exposición pormenorizada de los ocho pasos relativos a los métodos diseñados, sus actividades y sus secuencias específicas, las técnicas y expresiones usadas en la estimación de las variables, los esquemas empleados para lograr convergencia (cruzamiento) o divergencia (mutación y generación de aleatorios) e, igualmente, se efectuó la descripción de las formas de medición de la eficiencia de los algoritmos. Lo previamente explicado, permitirá que los métodos propuestos, sean replicados por parte de la comunidad académica interesada en esta clase de tópico. Además, dado que se seleccione cierto valor de tiempo de proceso del primer frente de Pareto, con el objetivo de adaptar la organización a las tendencias predominantes en el mercado, es necesario evaluar los posibles efectos sobre los trabajadores, como consecuencia del incremento potencial en la exposición a determinados riesgos laborales. Es así como, para aquellos casos requeridos, se deberán definir e implementar las correspondientes medidas preventivas. En este sentido, si los tiempos de proceso son bajos habrá mayor exposición a riesgos laborales. Al

respecto, la organización examinada deberá diseñar y aplicar un conjunto de medidas que permitan: aislar en la fuente los altos niveles de intensidad sonora, mejorar el uso de los sistemas de iluminación natural y reducir los niveles de fatiga. De manera general, la decisión de otorgar mayor importancia a determinado valor de tiempo de proceso, se encuentra relacionada con el comportamiento del sistema económico; por tanto, es indispensable complementar dicha decisión, procediendo a incorporar criterios relevantes de carácter social.

Adicionalmente, se establece la necesidad de integrar al presente estudio, conceptos pertinentes de la dinámica de sistemas y, a la vez, de algunas tendencias emergentes de la programación multiobjetivo. De esta forma, se podría estructurar un modelo robusto capaz de explicar holísticamente el comportamiento del subsistema de operaciones, tanto en el contexto de la organización como en el contexto del mercado bajo una perspectiva de sostenibilidad.

Referencias

- Amiri, F., Shirazi, B., & Tajdin, A. (2019). Multi-objective simulation optimization for uncertain resource assignment and job sequence in automated flexible job shop. *Applied Soft Computing Journal*, 75 190–202. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.11.015>.
- Aschauer, A., Roetzer, F., Steinboeck, A., & Kugi, A. (2020). Efficient scheduling of a stochastic no-wait job shop with controllable processing times. *Expert Systems with Applications*, 162, art. no.

113879. Recuperado de <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0.085089828562&doi=10.1016%2Fj.eswa.2020.113879&partnerID=40&md5=3cd5ca582d44b-1fa0af7421215880226> DOI: 10.1016/j.eswa.2020.113879.
- Berti, N., Artigues, C., Battaïa, O., Guillaume, R., & Battini, D. (2019). Heuristic approaches for scheduling manufacturing tasks while taking into account accumulated human fatigue. *IFAC-PapersOnLine*, 52 (13), 963-968. Recuperado de <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85078919506&doi=10.1016%2Fj.ifacol.2019.11.319&partnerID=40&md5=879b708e0373fadee7f50f33e-4fe0c68> DOI:10.1016/j.ifacol.2019.11.319.
- Bissoli, D., Zufferey, N., & Amaral, A. (2019). Lexicographic optimization-based clustering search metaheuristic for the multiobjective flexible job shop scheduling problem. *International Transactions in Operational Research*, 1-26.
- Coca, G. (2021). Metodología multiobjetivo para la programación de producción de los sistemas de manufactura "Job Shop Flexible" del sector metalmecánico, bajo un enfoque de sostenibilidad. *Universidad Nacional de Colombia*.
- Dabbagh, R., & Yousefi, S. A. (2019). Hybrid decision-making approach based on FCM and MOORA for occupational health and safety risk analysis. *Journal of Safety Research*, 71, 111-123. Recuperado de <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85075192622&doi=10.1016%2Fj.jsr.2019.09.021&partnerID=40&md5=806b62ceea5643e-1dc05fb6694029da> DOI: 10.1016/j.jsr.2019.09.021.
- Deb, K., & Jain, H. (2014). An Evolutionary Many-Objective Optimization Algorithm Using Reference-Point-Based Nondominated Sorting Approach, Part I: Solving Problems With Box Constraints. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 18(4), 577-601. Recuperado de <http://doi.org/10.1109/TEVC.2013.2281535>.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, 6(2), 182-197.
- Geng, Z., Yuan, J., & Yuan, J. (2018). Scheduling with or without precedence relations on serial-batch machine to minimize makespan and maximum cost. *Applied Mathematics and Computation*, 332, pp. 1-18. Recuperado de <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85044445804&doi=10.1016%2Fj.amc.2018.03.001&partnerID=40&md5=23011d9d51a6be78cfac1e19d50f4273> DOI: 10.1016/j.amc.2018.03.001.
- Gu, X., Huang, M., & Liang, X. (2020). A Discrete Particle Swarm Optimization Algorithm With Adaptive Inertia Weight for Solving Multiobjective Flexible Job-shop Scheduling Problem. *IEEE Access*, 8, 33125- 33136.
- Golpîra, H., Rehman K., & Zhang, Y. (2018). Robust Smart Energy Efficient Produc-

- tion Planning for a general Job-Shop Manufacturing System under combined demand and supply uncertainty in the presence of grid-connected microgrid. *Journal of Cleaner Production*, 202, 649-665. Recuperado de <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85053175943&doi=10.1016/j.jclepro.2018.08.151&partnerID=40&md5=24844f1094c89c95b45683fd2aac3fa9> DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.08.15.
- Guo, Y., Huang, M., Wang, Q., & Jorge, V. (2021). "Single-Machine Rework Rescheduling to Minimize Total Waiting Time With Fixed Sequence of Jobs and Release Times," in *IEEE Access*, vol. 9. 1205-1218. Recuperado de doi: 10.1109/ACCESS.2019.2957132.
- Hale, J., Legun, J., Campbell, H., & Carolan, M. (2019). Social sustainability indicators as performance. *Geoforum*, 103, 47-55. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2019.03.008>.
- Huang, W., Zhao, Y. & Ma, X. (2014). An improved genetic algorithm for job-shop scheduling problem with process sequence flexibility. *International Journal of Simulation Modeling*, 13(4), 510-522. Recuperado de http://m.ijssimm.com/Full_Papers/Fulltext2014/text.
- Huo, D.X., Xiao, X.J., & Pan, Y.J. (2020). Multi-objective energy-saving job-shop scheduling based on improved NSGA-II. *International Journal of Simulation Modelling*, 19 (3), 494-504. Recuperado de <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85095782317&doi=10.2507/2f1JSIMM19-3-CO12&partnerID=40&md5=3ddf77a22f45cec3728725498599cd88> DOI: 10.2507/2f1JSIMM19-3-CO12.
- Hutchins, M., Richter, J., Henry, M., & Sutherland, J. (2019). Development of indicators for the social dimension of sustainability in a U.S. business context. *Journal of Cleaner Production*, 212, 687- 697. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.199>.
- Kempen, E., Casas, M., Pershagen, G., & Foraster, M. (2018). WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Cardiovascular and Metabolic Effects: A Summary. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15 (379), 1.59. Recuperado de doi:10.3390/ijerph15020379.
- Masmoudi, O., Delorme, X., & Gianessi, P. (2019). Job-shop scheduling problem with energy consideration. *International Journal of Production Economics*, 216, 12-22. Recuperado de <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85064642145&doi=10.1016/j.ijpe.2019.03.021&partnerID=40&md5=6ba46704855089661f2a0ea20455d88b> DOI: 10.1016/j.ijpe.2019.03.021.
- Mu, H.P. (2019). Disruption management of flexible job shop scheduling considering behavior perception and machine fault based on improved NSGA-II algorithm. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 52 (2), 149-156. Recuperado de <https://doi.org/10.18280/jesa.520206>.

- Naciones Unidas (2018). La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe LC/G. 2681-P/Rev. Recuperado de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Nicoara, E. (2015) Multi-objective Flexible Job Shop Scheduling Optimization Models. *Economic Inshights-Trends and challenges*, 49 (2), 79-86. Recuperado de http://upg-bulletin-se.ro/old_site/archive/2012-2/7.%20Nicoara.pdf
- Ozturk,G., Bahadir,O., & Teymourifar,A. (2019). Extracting priority rules for dynamic multiobjective flexible job shop scheduling problems using gene expression programming. *International Journal of Production Research*, 57 (19), 3121-3137. <https://doi-org.ezproxy.unal.edu.co/10.1080/00207543.2018.1543964>.
- Rahmati, S., Zandieh, M., & Yazdani, M. (2012). Developing two multi-objective evolutionary algorithms for the multi-objective flexible job shop scheduling problem. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64 (5-8), 915-932. <http://doi.org/10.1007/s00170-012-4051-1>.
- Ren, J., Ye, C., & Li, Y. (2020). A two-stage optimization algorithm for multi-objective job-shop scheduling problem considering job transport. *Journal Europeen des Systemes Automatises*, 53 (6), 915-924. Cited 1 time. Recuperado de <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85098644253&doi=10.18280%2fjesa.530617&partnerID=40&md5=9db58715651e37839f087fbc47c75639> DOI: 10.18280/jesa.530617
- Renna, P., & Materi, S. (2021). Switch off policies in job-shop manufacturing systems including workload evaluation. *International Journal of Management Science and Engineering Management*. Recuperado de <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85108334897&doi=10.1080%2f17509653.2021.1941369&partnerID=40&md5=0ac63ebaab59fb4fb6e48ba8765e9cb4> DOI: 10.1080/17509653.2021.1941369
- Renke L., Piplani R., & Toro C. (2021). A Review of Dynamic Scheduling: Context, Techniques and Prospects. In: Toro C., Wang W., Akhtar H. (eds) *Implementing Industry 4.0. Intelligent Systems Reference Library*. 202. Springer, Cham. Recuperado de https://doi-org.ezproxy.unal.edu.co/10.1007/978-3-030-67270-6_9
- Safarzadeh, H., & Kianfar, F. (2019) Job shop scheduling with the option of jobs outsourcing. *International Journal of Production Research*, 57 (10), 3255-3272. Recuperado de <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85063687900&doi=10.1080%2f00207543.2019.1579934&partnerID=40&md5=d8bdae1e860c9260b6ec808c4cac2b74> DOI: 10.1080/00207543.2019.1579934
- Shen, X., Zhang, M., & Fu, J. (2014) Multi-objective Dynamic Job Shop Scheduling a Survey and Prospects. *International Journal of Innovative*, 10 (6), 2113-2126.

- Shokouhi, E. (2018). Integrated multi-objective process planning and flexible job shop scheduling considering precedence constraints. *Production & Manufacturing Research*, 6 (1), 61-89, Recuperado de <https://doi.org/10.1080/21693277.2017.1415173>.
- Salido, M., Escamilla, J., Barber, F & Giret, A. (2017). Rescheduling in job-shop problems for sustainable manufacturing systems. *Journal of Cleaner Production*, 162 (20), 121-132, Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.002>.
- Safarzadeh, H., & Kianfar, F. (2019). Job shop scheduling with the option of jobs outsourcing International. *Journal of Production Research*, 57 (10), 3255-3272. Recuperado de <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85063687900&doi=10.1080%2f00207543.2019.1579934&partnerID=40&md5=d8bdae1e860c9260b6ec808c4cac2b74> DOI: 10.1080/00207543.2019.1579934.
- Valenzuela, V., Cosío, M., & Romero A. (2022). A cooperative coevolutionary algorithm approach to the no-wait job shop scheduling problem. *Expert Systems With Applications*, 194. Recuperado de DOI: 10.1016/j.eswa.2022.116498.
- Villicaña, E., & Ponce, J.M. (2019). Sustainable strategic planning for a national natural gas energy system accounting for unconventional sources. *Energy Conversion and Management*, 181, 382-397. Recuperado de <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85058699069&doi=10.1016%2fj.enconman.2018.12.023&partnerID=40&md5=6cecd4e247a8adba34ac3ac0a3a0c8dd> DOI: 10.1016/j.enconman.2018.12.023.
- Wen, X., Wang, K., Li, H., Sun, H., Wang, H., & Jin, L. (2021). Two-stage solution method based on NSGA-II for Green Multi-Objective integrated process planning and scheduling in a battery packaging machinery workshop. *Swarm and Evolutionary Computation*, 61 (100820). Recuperado de <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85098463439&doi=10.1016%2fj.swevo.2020.100820&partnerID=40&md5=9167460f47549c1b95cd99b9eb10ae25> DOI: 10.1016/j.swevo.2020.100820.
- Yung, M., Kolus, A., Wells, R., & Neumann, W.P. (2020). Examining the fatigue-quality relationship in manufacturing. *Applied Ergonomics*, 82, (102919). Recuperado de <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85070999698&doi=10.1016%2fj.apergo.2019.102919&partnerID=40&md5=11f02e9a3810e897ef40a1a2d9973737> DOI: 10.1016/j.apergo.2019.102919.
- Zhang, F., Bail, J., Yang D., & Wang, O. (2022). Digital twin data-driven proactive job-shop scheduling strategy towards asymmetric manufacturing execution decision. *Scientific reports*, (12) 1, 1546. Recuperado de DOI: 10.1038/s41598-022-05304-w.

- Zhang, S., Li, X., Zhang, B., & Wang, S. (2020). Multi-objective optimisation in flexible assembly job shop scheduling using a distributed ant colony system. *European Journal of Operational Research*, 283 (2), 441-460. Recuperado de <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85076543901&doi=10.1016/j.ejor.2019.11.016&partnerID=40&md5=0a9b882dee0c111d6bc884a-22f35ebc3> DOI: 10.1016/j.ejor.2019.11.016
- Zheng, F., & Sui, Y. (2019). Bi-objective Optimization of Multiple-route Job Shop Scheduling with Route Cost. *IFAC-PapersOnLine*, 52 (13) 881-886. Recuperado de <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85078931450&doi=10.1016/j.ifacol.2019.11.241&partnerID=40&md5=9a4525c1659b-07b9249078e6981c3f11> DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.11.241
- Zhao, J., Peng, S., & Li, T. *et al.* (2019). Energy-aware fuzzy job-shop scheduling for engine remanufacturing at the multi-machine level. *Front. Mech. Eng.* 14, 474-488. Recuperado de <https://doi-org.ezproxy.unal.edu.co/10.1007/s11465-019-0560-z>
- Zhu, H., He, B., & Li, H. (2017). Modified Bat Algorithm for the Multi-Objective Flexible Job Shop Scheduling Problem. *International Journal of Performability Engineering*, 13 (7), 999-1012. Recuperado de [doi:10.23940/ijpe.17.07.p1.9991012](https://doi.org/10.23940/ijpe.17.07.p1.9991012).
- Zitzler, E., Laumanns, M & Thiele, L. (2001). SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm. *ETH Zentrum. Research Collection*, 1-22. Recuperado de <https://doi.org/10.3929/ethz-a-004284029>.