

**Modelo de optimización multiobjetivo para el diseño de celdas de manufactura
dinámicas considerando balance de carga y disponibilidad de maquinaria**

Laura Yeraldín Escobar Rodríguez

Trabajo de investigación para optar al título de Magíster en Ingeniería Industrial

Director:

Edwin Alberto Garavito Hernández

Magíster en Ingeniería Industrial

Grupo de Investigación:

**Organización y Optimización de Sistemas Productivos, Administrativos y Logísticos
(ÓPALO).**

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Estudios Industriales y Empresariales

Maestría en Ingeniería Industrial

Bucaramanga

2020

Dedicatoria

A mi hermana Lyda, mi padre Jorge y mi madre Luz.

Y a ti, por ser luz en mi camino y acompañarme en este maravilloso proceso.

Agradecimientos

Al profesor Edwin garavito, por sus innumerables aportes a mi desarrollo personal y profesional, por ser mi guía y ejemplo en este proceso de aprender y enseñar.

A mi amigo y colega Leonardo Talero por siempre estar presente y brindarme su tiempo, su consejo y su amistad.

A Víctor Sanabria, mi amigo, colega y coequipero. Gracias por compartir este proceso conmigo, por apoyarme desde el día cero y permitirme conocer al profesional y al amigo del que todos los días aprendo.

A la profesora Aura Pedraza por su integridad, diligencia y constancia que, en definitiva, la han convertido en un referente para mi vida profesional.

A los profesores Henry, Javier, Carlos, Myriam, Néstor y Eliana, por su acompañamiento en los distintos momentos de mi proceso de formación.

A mi familia: Mi hermana Lyda, mi padre Jorge, mi mamita Luz y mi cuñado Oscar. Gracias por siempre estar presentes, por compartir mis alegrías y ser soporte en los momentos de dificultad.

A mis amigos por estar siempre prestos a apoyar, especialmente a David, Julio, Jennifer, Jessica, Rafael e Iván.

Al grupo de investigación Opalo, mi segunda familia.

A todo el equipo académico-administrativo de la Escuela de Estudios Industriales y Empresariales, especialmente a Patricia Almeida, Dubis Angarita, Alejandra Sánchez y Nathaly Albarracín.

A todos ustedes mi infinita gratitud.

Tabla de Contenido

Introducción	11
1. Generalidades del proyecto	14
1.1. Objetivo general	14
1.2. Objetivos específicos	14
1.3. Proposición	14
2. Definición del problema	15
3. Metodología	18
3.1. Definición del problema y recolección de datos	18
3.2. Formulación de un modelo matemático	19
3.3. Obtención de soluciones a partir del modelo	20
3.4. Prueba del modelo	20
4. Marco Teórico	20
4.1. Problema de optimización multiobjetivo	20
4.2. Combinación lineal de pesos	23
5. Revisión de Literatura	24
5.1. Objetivos de Diseño (Funciones Objetivo)	26

5.2.	Métodos de Solución	32
5.3.	Balance de Carga de Trabajo.....	37
5.4.	Disponibilidad de Maquinaria	38
5.5.	Discusión de la Revisión	39
6.	Formulación del modelo matemático	44
6.1.	Índices.....	45
6.2.	Parámetros de entrada.....	45
6.3.	Variables de Decisión.....	46
7.	Obtención de soluciones a partir del modelo	50
7.1.	Generación de instancias de prueba	50
7.2.	Modelo exacto	51
7.3.	Algoritmo NSGAII.....	53
8.	Prueba del modelo.....	62
8.1.	Modelo exacto	62
8.2.	Algoritmo NSGA-II.....	66
9.	Preparación para aplicar el modelo	69
10.	Discusión.....	72
11.	Conclusiones	76
	Referencias Bibliográficas	80

Lista de Tablas

Tabla 1. Estrategias de solución encontrados con mayor frecuencia en la literatura	34
Tabla 2. Convenciones para las funciones objetivo abordadas en la literatura	41
Tabla 3. Funciones objetivo abordadas en la literatura para el DCFP.....	42
Tabla 4. Grupos de instancias de prueba	50
Tabla 5. Parámetros del modelo.....	51
Tabla 6. Cantidad de variables y restricciones para cada grupo de instancias	62
Tabla 7. Ponderación de objetivos para los escenarios de prueba	63
Tabla 8. Solución óptima obtenida por GAMS para los escenarios del problema de prueba A1.	63
Tabla 9. Resultados obtenidos en GAMS para los escenarios del problema de prueba A2	65
Tabla 10. Resultados obtenidos en GAMS para los escenarios del problema de prueba A3	65
Tabla 11. Resultados obtenidos en GAMS para los escenarios del problema de prueba A4	66
Tabla 12. Parámetros para el algoritmo NSGAII.....	67
Tabla 13. Tiempo de cómputo del algoritmo NSGAII	68

Lista de Figuras

<i>Figura 1.</i> Fases metodológicas para la formulación del problema matemático.	18
<i>Figura 2.</i> Metodología para la revisión	19
<i>Figura 3.</i> Ilustración de un sistema de celdas de manufactura dinámicas.....	25
<i>Figura 4.</i> Frecuencia de utilización de las estrategias de solución.....	35
<i>Figura 5.</i> Estructura del algoritmo NSGAI implementado	54
<i>Figura 6.</i> Estructura del cromosoma	55
<i>Figura 7.</i> Estructura de la matriz auxiliar	56
<i>Figura 8.</i> Ejemplo de la asignación inicial	57
<i>Figura 9.</i> Ejemplo de cruce	61
<i>Figura 10.</i> Ejemplo de mutación	61
<i>Figura 11.</i> Configuración de celdas para el escenario 1.....	64
<i>Figura 12.</i> Matriz de asignación escenario 1 - periodo 1	64
<i>Figura 13.</i> Matriz de asignación escenario 1 - periodo 2	65
<i>Figura 14.</i> Variación del promedio de la función costo para 50 y 100 generaciones	67
<i>Figura 15.</i> Variación del promedio de la función balance para 50 y 100 generaciones.....	67
<i>Figura 16.</i> Variación del promedio de la función disponibilidad para 50 y 100 generaciones	68

<i>Figura 17.</i> Histograma del porcentaje de cardinalidad para cada tamaño de población y número de generaciones	69
<i>Figura 18.</i> Configuración de celdas.....	70
<i>Figura 19.</i> Balance de maquinaria.....	71
<i>Figura 20.</i> Matriz de asignación – Problema A4 – Periodo 1	71
<i>Figura 21.</i> Matriz de asignación – Problema A4 – Periodo 2	72
<i>Figura 22.</i> Matriz de asignación – Problema A4 – Periodo 3	72

Resumen

Título: Modelo de optimización multiobjetivo para el diseño de celdas de manufactura dinámicas considerando balance de carga y disponibilidad de maquinaria¹

Autora: Laura Yeraldín Escobar Rodríguez**

Palabras clave: Manufactura celular, Optimización Multiobjetivo, Balance de carga, Disponibilidad de maquinaria.

Descripción:

En el presente trabajo se aborda el problema de formación de celdas de manufactura dinámicas, a través del desarrollo de un modelo de optimización multiobjetivo en el que se integran simultáneamente la minimización de costos asociados a la producción, minimización de la variación del balance de carga de trabajo, y maximización de la disponibilidad de maquinaria que hace parte del sistema. Para dar solución al modelo propuesto se plantean dos estrategias basadas en el modelo matemático. La primera corresponde a un modelo de ponderación de objetivos implementado en el software GAMS; donde si bien se verifica que el modelo efectivamente es funcional, se evidencia la necesidad de involucrar al tomador de decisiones en el desarrollo y delimitación del modelo y, debido a la limitación de recursos computacionales, se hace necesario buscar una estrategia alternativa para problemas que involucren mayor cantidad de variables y restricciones. Como segunda de estrategia de solución, se plantea un algoritmo NSGAII desarrollado en el software MATLAB R2017A. Se encuentra que, para los tamaños más grandes de instancias el algoritmo genera conjuntos de soluciones no dominadas o eficientes, a partir de las cuales el tomador de decisiones puede seleccionar la que, según su criterio, se adapte de mejor manera a su contexto particular.

¹ Tesis de Maestría

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánica. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales, Maestría en Ingeniería Industrial. Director: Edwin Alberto Garavito Hernández, M.Sc. Ingeniería Industrial.

Abstract

Title: A Multiobjective mathematical model for the dynamic cell formation problem considering workload balance and machine availability.²

Author: Laura Yeraldín Escobar Rodríguez**

Keywords: Cell manufacturing, Multiobjective optimization, workload balance, machine availability.

Description:

In the present work, it is addressed the dynamic cell formation problem, through the development of a multi-objective optimization model. In this model, it is simultaneously integrated the cost-minimizing associated with the production, while minimizing the workload balance variation, and maximizing the machinery availability of the production system. To solve the proposed model, two strategies are postulated based on the mathematical model. The first one corresponds to the weighted sum method deployed in the GAMS software; where, besides being verified that the model is functional, it is shown the necessity of involving the decision-maker in the development and delimitation of the model. Moreover, due to the computational capacity limitation, it's needed to look for an alternative solution method to problems that involved the most variables and restrictions quantity. For the second solution strategy, an NSGAI algorithm is developed in MATLAB R2017A software. It is found that, for the largest sizes of instances, the algorithm generates sets of non-dominated solutions, from which the decision-maker can select the one that best suits his particular context according to his criteria.

² Master Thesis

**Faculty of Physical-Mechanics Engineering. School of Industrial and Business Studies, Master in Industrial Engineering. Advisor: Edwin Alberto Garavito Hernández, M.Sc. Industrial Engineering.

Introducción

La reciente tendencia hacia la globalización de los mercados ha dado lugar a un entorno cada vez más competitivo, por lo que la adaptación de las pequeñas y medianas empresas a este entorno se convierte en una necesidad imperiosa. De esta manera, contar con sistemas productivos que se enfoquen en atender los requerimientos del mercado, representa un esfuerzo en la planeación del diseño y organización de los procesos y recursos de la empresa. Entre los diversos elementos a considerar en la planeación, se encuentra el diseño de planta, el cual evalúa la distribución más apropiada -por producto, proceso o proyecto, entre otras- de acuerdo con las actividades a realizar en el proceso de producción, con el fin de mejorar las medidas de desempeño del sistema (costos, tiempos, distancias, nivel de servicio, entre otros).

Entre las alternativas de distribución de planta se destaca la manufactura celular, como una aplicación de la tecnología de grupos; en esta se busca separar sistemas de producción complejos en subsistemas de flujo a partir de la formación de grupos de máquinas llamadas celdas de manufactura, esta estrategia combina las ventajas de las distribuciones por proceso (flexibilidad en la producción de una amplia variedad de productos y disminución de los tiempos de ciclo) con las líneas de producción dedicadas (alta flexibilidad del sistema y tasas de producción), útil para organizaciones con niveles medios de demanda y portafolios de productos no tan amplios (Garavito Hernandez, 2016). El diseño y organización de celdas de manufactura es conocido como problema de formación de celdas (CFP), donde considerando una cantidad de productos a procesar, secuencia de operaciones, demanda y recursos disponibles, se busca formar familias de productos de acuerdo a características físicas (tamaño, forma o peso), o requerimientos de proceso en común;

y, familias de máquinas agrupadas en celdas que atenderán los procesos de los productos que le sean asignados (Papaioannou & Wilson, 2010).

Sin embargo, si bien este tipo de distribución proporciona flexibilidad al sistema, debido a los cortos ciclos de vida de los productos y las variaciones en la demanda, las celdas de manufactura diseñadas para determinado periodo de tiempo pueden perder vigencia una vez se presentan cambios en la demanda o en el portafolio de productos fabricados. Dado lo anterior, surge la necesidad de reconfigurar el sistema de manufactura de acuerdo a esos cambios. El diseño de las celdas de manufactura para un determinado horizonte de planeación es conocido como Problema de Formación de Celdas de Manufactura Dinámicas (*Dynamic Cell Formation Problem, DCFP*). Ahora bien, considerando la complejidad de los sistemas de manufactura, la presente investigación se propone desarrollar un modelo de optimización multiobjetivo que contemple aspectos aún no abordados simultáneamente, según la revisión de literatura realizada, como lo son la minimización de costos, el balance de carga y la disponibilidad de maquinaria. Teniendo en cuenta que el DCFP es clasificado como NP-hard (Tavakkoli-Moghaddam et al., 2005), se hace necesario explorar alternativas de solución como modelos de optimización y técnicas heurísticas o meta heurísticas que presenten buenos resultados en tiempos computacionales razonables; por tanto, en este trabajo se propone desarrollar un modelo exacto mediante la ponderación de objetivos y un algoritmo NSGA-II.

Este documento está estructurado en 12 secciones así: en las secciones 1 y 2 se presentan las generalidades del proyecto y la definición del problema; en la sección 3 detalla la metodología; en las secciones 4 y 5 se presentan el marco teórico y la revisión de literatura realizada sobre el tema de investigación; en la sección 6 se desarrolla la formulación del modelo multiobjetivo propuesto; en la sección 7, se detallan las fuentes para la generación de datos, así como las estrategias para

dar solución al modelo propuesto; en la sección 8 se documentan las pruebas realizadas a las dos estrategias y, en la sección 9 se presentan los resultados de la implementación del método de solución aproximado (NSGAI); en la sección 10 y 11 se realiza la discusión del trabajo y las conclusiones; y, finalmente se encuentran las referencias bibliográficas utilizadas en el documento.

.

1. Generalidades del proyecto

1.1. Objetivo general

Desarrollar un modelo de optimización multiobjetivo para el diseño de celdas de manufactura dinámicas considerando minimización de costos, balance de carga y disponibilidad de maquinaria.

1.2. Objetivos específicos

- Identificar formulaciones matemáticas de optimización enfocadas en el diseño de celdas de manufactura, a partir de una revisión de la literatura, caracterizando el problema y estableciendo los métodos de solución implementados.
- Formular un modelo de optimización multiobjetivo para el diseño de sistemas de celdas de manufactura dinámicas considerando balance de carga y disponibilidad de maquinaria.
- Construir un algoritmo para dar solución al problema de diseño de celdas de manufactura dinámicas.
- Evaluar el desempeño del algoritmo propuesto mediante la comparación a partir de instancias adaptadas de la literatura o a través de un análisis estadístico de los resultados.

1.3. Proposición

A partir del modelo matemático propuesto es posible integrar los costos asociados a la producción, balance de carga y disponibilidad de maquinaria en la decisión del diseño de celdas de manufactura dinámicas.

2. Definición del problema

La tendencia al cambio de los sistemas productivos, partiendo de sistemas de producción en masa a sistemas enfocados en los requerimientos del cliente, evidencia la importancia que se debe dar a los proyectos relacionados con instalaciones industriales, pues la decisión de una distribución de planta a implementar condiciona en gran medida la estrategia de producción de una compañía. Adicionalmente, la automatización y la integración tecnológica (industria 4.0) han traído cambios mucho más rápidos y mayores niveles de competitividad al mercado manufacturero. Según Niakan et al., (2016a) una distribución de planta adecuada y sostenible es capaz de manejar las variaciones y se considera un primer paso hacia la Industria 4.0, buscando mantener la fabricación de los productos requeridos en el momento oportuno, generando de esta manera una ventaja competitiva para las organizaciones.

Entre las alternativas de distribución de planta surge la manufactura celular, que es una aplicación de la tecnología de grupos en donde se busca separar sistemas de producción complejos en subsistemas de flujo a partir de la formación de grupos de máquinas llamadas celdas de manufactura, esta estrategia combina las ventajas de las distribuciones por proceso (disminuyendo los tiempos de ciclo) con las líneas de producción dedicadas (aumentando la flexibilidad del sistema), útil para organizaciones con niveles medios de demanda y portafolios de productos no tan amplios. El diseño de celdas de manufactura para un horizonte de planeación es conocido como problema de formación de celdas de manufactura dinámicas (DCFP), donde dado un número de partes a procesar, requerimientos de procesos, demanda y recursos disponibles, se busca formar familias de productos de acuerdo a su geometría o requerimientos de proceso en común,

luego, se agrupan las máquinas disponibles en celdas y, finalmente, las familias de productos son asignadas a las celdas formadas (Papaioannou & Wilson, 2010), este proceso se repite para cada periodo del horizonte de planeación.

Al dar solución al DCFP se busca minimizar los costos asociados a los procesos de producción, tales como adquisición, disposición y reubicación de maquinaria; transferencia o movimiento de materiales entre celdas o en entre máquinas, entre otros. Sin embargo, considerando la complejidad de los sistemas de manufactura, teniendo en cuenta la necesidad de integrar procesos, máquinas, personas, entre otros; diferentes autores han intentado involucrar a la formulación del problema, la mayor cantidad de factores, con el fin de aproximar en mayor medida, las condiciones del problema de optimización a la realidad. Teniendo en cuenta lo anterior, se propone para la presente investigación, desarrollar un modelo de optimización multiobjetivo que contemple aspectos aún no abordados simultáneamente. Adicional a la función objetivo asociada a los costos derivados del proceso de producción, se plantea establecer la variación del balance de carga de trabajo como criterio de optimización, considerando que un desbalance en la asignación de tiempos de producción a las máquinas y a las celdas que conforman un sistema, puede generar tiempos ociosos de maquinaria, bajos niveles de utilización de los recursos, entre otros.

De otra parte, debido a que tradicionalmente la formación de celdas y la asignación de trabajos a máquinas, se realizan con el supuesto de una fiabilidad del 100% de las máquinas y, que en la práctica las máquinas pueden fallar durante las operaciones, se define un tercer criterio de optimización asociado con la disponibilidad de las máquinas, buscando mitigar de esta manera el impacto generado por las averías, en las fechas de vencimiento de entrega de pedidos y otros criterios de rendimiento del sistema. Los tres objetivos ilustrados anteriormente están en conflicto; por ejemplo, cuando se busca maximizar la disponibilidad del sistema, las máquinas con una alta

tasa de fallas no se seleccionarán para el procesamiento de las operaciones de producto, por lo que se incrementará la subutilización de esas máquinas, que a su vez representa un desbalance en la asignación de cargas. Adicionalmente, cuando se busca minimizar los costos totales de producción, la fiabilidad del sistema se reduce porque las máquinas que son más baratas, generalmente tienen una fiabilidad más baja.

Ahora bien, debido a que el DCFP es clasificado como NP-hard (Tavakkoli-Moghaddam et al., 2005), se hace necesario explorar alternativas de solución como modelos de optimización y técnicas heurísticas o meta heurísticas que presenten buenos resultados en tiempos computacionales razonables. Para el presente trabajo se plantean dos enfoques de solución: (1) modelo exacto mediante la ponderación de objetivos y (3) el uso del el Algoritmo Genético Elitista de Ordenamiento No-dominado de segunda generación (*Nondominated Sorting in Genetic Algorithms type II*, NSGA-II) propuesto por Deb et al., (2000).

Haciendo referencia a la pertinencia práctica del presente trabajo, cabe resaltar que Colombia es un destino ideal para la industria manufacturera debido a los costos competitivos, el mercado interno atractivo, mano de obra calificada y apoyo del gobierno para inversión, factores que benefician la producción y distribución de bienes (PROCOLOMBIA, 2018), lo que impulsa la investigación en estrategias que busquen el fortalecimiento de empresas manufactureras de diferentes sectores (calzado, automotriz, suministros médicos, entre otras). Adicional a lo anterior, y haciendo referencia a la pertinencia teórica de la investigación, se considera que en la Escuela de Estudios Industriales y Empresariales, se han realizado investigaciones en diferentes áreas enfocadas en el Diseño de Sistemas Productivos, buscando solucionar problemas de sistemas de producción con diversos enfoques estratégicos. Por tanto, el presente trabajo busca aportar a la literatura en esta temática y ser punto de referencia para futuras investigaciones en las que se

consideren parámetros o atributos adicionales y/o se exploren o evalúen diferentes métodos de solución para el DCFP.

3. Metodología

La metodología planteada para direccionar la presente investigación, es una adaptación de la propuesta realizada por Hillier & Lieberman (2010) para abordar un estudio de investigación de Operaciones. Las fases metodológicas consideradas, se presentan en la *Figura 1* y son detalladas a continuación.



Figura 1. Fases metodológicas para la formulación del problema matemático.

3.1. Definición del problema y recolección de datos

En esta primera fase, se busca conocer la evolución del problema de formación de celdas de manufactura dinámicas y definir el problema de interés; para ello, se parte de una revisión de literatura siguiendo como metodología una adaptación de la declaración PRISMA propuesta por

Urrutia & Bonfill (2011) para mejorar las revisiones sistemáticas y meta-análisis (Ver Figura 2). A partir de esta metodología de revisión se busca caracterizar las formulaciones matemáticas utilizadas para describir el problema en cuestión, identificando en la literatura los principales objetivos de diseño (funciones objetivo), así como los métodos de solución utilizados para abordar dichos problemas. De otra parte, también se busca establecer de qué forma se han incorporado los conceptos de balance de carga de trabajo y disponibilidad de maquinaria al DCFP.

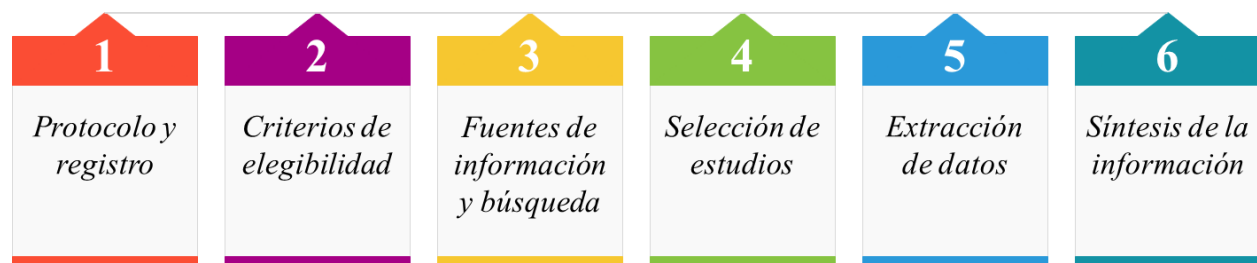


Figura 2. Metodología para la revisión

Una vez realizada la caracterización del problema, se seleccionan los atributos objeto de estudio en la presente investigación y, a su vez, se definen los insumos o parámetros necesarios para alimentar el modelo a construir. Asimismo, se identifican en la literatura posibles fuentes de datos o instancias que puedan ser adaptadas a la formulación matemática a proponer; para ello, se seleccionan estudios en los que se presenten propuestas de generación de parámetros contemplados o incorporados en el modelo matemático.

3.2. Formulación de un modelo matemático

Luego de definir el problema, se construye un modelo matemático que represente la esencia del problema, se establecen:

- Variables de decisión: variables enteras positivas o binarias, que pueden relacionarse con la asignación de los diferentes componentes del sistema.

- Funciones objetivo: involucran costos de procesamiento y costos asociados a la maquinaria, así como factores de balance de carga de trabajo y disponibilidad de maquinaria.
- Familias de restricciones: incluyen restricciones ligadas a la capacidad de producción, satisfacción de demanda, balance de máquinas en el sistema entre periodos, entre otras.

3.3. Obtención de soluciones a partir del modelo

Para dar solución al problema se plantean dos estrategias de solución basadas en el modelo matemático (Modelo exacto mediante ponderación de objetivos y Algoritmo NSGAII).

3.4. Prueba del modelo

Los métodos de solución propuestos son valorados mediante el análisis del ejercicio computacional. Para ello, se determinan las instancias adaptadas de la literatura (parámetros de entrada) de acuerdo a la información recopilada y se desarrolla cada método verificando el modelo propuesto.

4. Marco Teórico

4.1. Problema de optimización multiobjetivo

El problema de optimización multiobjetivo (*Multiobjective Optimization Problem, MOP*) (también llamado problema de optimización multicriterio, de rendimiento múltiple o de optimización vectorial) se puede definir como el problema de encontrar un vector de variables de decisión que satisface restricciones y optimiza una función vectorial cuyos elementos representan las funciones objetivo. Estas funciones forman una descripción matemática de los criterios de rendimiento que

suelen estar en conflicto entre sí. Por lo tanto, el término "optimizar" significa encontrar una solución que dé los valores de todas las funciones objetivo aceptables para el tomador de decisiones (Osyczka, 1985).

De forma generalizada el MOP consiste en encontrar el vector $\vec{x}^* = [x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*]^T$ que satisface las m restricciones de desigualdad:

$$g_i(\vec{x}) \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

p restricciones de desigualdad:

$$h_i(\vec{x}) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (2)$$

y optimiza la función vectorial:

$$\vec{f}(\vec{x}) = [f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_k(\vec{x})]^T \quad (3)$$

En otras palabras, se pretende determinar entre el conjunto de todos los números que satisfacen (1) y (2) el conjunto particular $x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*$ que arroja los valores óptimos de todas las funciones objetivo. Las restricciones dadas por (1) y (2) definen la región factible Ω cualquier punto $\vec{x}$ en Ω define una solución factible. La función vectorial $\vec{f}(\vec{x})$ es una función que mapea el conjunto Ω en el conjunto Λ que representa todos los valores posibles de las funciones objetivo. Las k componentes del vector $\vec{f}(\vec{x})$ representan los criterios no conmensurables que deben considerarse. Las restricciones $g_i(\vec{x})$ y $h_i(\vec{x})$ representan las restricciones impuestas sobre las variables de decisión. El vector $\vec{x}^*$ está reservado para denotar las soluciones óptimas (normalmente hay más de una) (Coello Coello et al., 2002).

Al tener varias funciones objetivo, la noción de "óptimo" cambia, porque en los MOP, el objetivo es encontrar buenos compromisos (o "compensaciones") en lugar de una única solución

como en la optimización global. La noción de "óptimo" más comúnmente adoptada es la propuesta originalmente por Francis Ysidro Edgeworth en 1881 y luego generalizada por Vilfredo Pareto en 1896 (Coello Coello et al., 2002).

Definición 1: Optimalidad de Pareto. $\vec{x}^*$ es llamado óptimo de Pareto si no existe un vector $\vec{x}$ factible que disminuiría algún criterio sin causar un aumento simultáneo en al menos otro criterio. Se considera que la frase "óptimo de Pareto" significa con respecto a todo el espacio de variables de decisión, a menos que se especifique lo contrario.

Definición 2. Dominancia de Pareto. Se dice que un vector $\vec{u} = (u_1, \dots, u_k)$ domina a $\vec{v} = (v_1, \dots, v_k)$ (denotado como $\vec{u} < \vec{v}$) si y solo si es parcialmente menor que v , i.e. $\forall i \in \{1, \dots, k\}, u_i \leq v_i \wedge \exists i \in \{1, \dots, k\}: u_i < v_i$.

Definición 3. Conjunto de óptimo de Pareto. Dado un MOP $\vec{f}(x)$, el conjunto de óptimo de Pareto ($\mathcal{P}^*$) es definido como:

$$\mathcal{P}^* := \{x \in \Omega \mid \neg \exists x' \in \Omega \vec{f}(x') \preceq \vec{f}(x)\} \quad (4)$$

Definición 4. Frente de Pareto. Dado un MOP $\vec{f}(x)$, y un conjunto de óptimo de Pareto $\mathcal{P}^*$, el frente de Pareto ($\mathcal{PF}^*$) es definido como:

$$\mathcal{PF}^* := \{\vec{u} = \vec{f} = (f_1(x), \dots, f_k(x)) \mid x \in \mathcal{P}^*\} \quad (5)$$

En general, no es fácil encontrar una expresión analítica de la línea o superficie que contiene estos puntos y en la mayoría de los casos resulta imposible hacerlo. El procedimiento normal para generar el frente de Pareto es calcular los puntos Ω y su correspondiente $f(\Omega)$. Cuando hay un número suficiente de estos, es posible determinar los puntos no dominados y producir el frente de Pareto.

4.2. Combinación lineal de pesos

Zadeh (1963) fue el primero en mostrar que la tercera de las condiciones de Kuhn-Tucker para soluciones no inferiores implica que estas soluciones no inferiores podrían encontrarse resolviendo un problema de optimización escalar en el que la función objetivo es una suma ponderada de los componentes de la función de valor vectorial original. Es decir, la solución al siguiente problema es, en general, no inferior:

$$\min \sum_{i=1}^k w_i f_i(\vec{x}) \quad (6)$$

Sujeto a:

$$\vec{x} \in \Omega \quad (7)$$

Donde $w_i \geq 0$ para todo i y es estrictamente positivo para al menos un objetivo. El conjunto no inferior y el conjunto de soluciones no inferiores se pueden generar variando paramétricamente los pesos w_i en la función objetivo. Esto fue demostrado inicialmente por Gass y Saaty (1955) para un problema de dos objetivos. Nótese que los coeficientes de ponderación no reflejan proporcionalmente la importancia relativa de los objetivos, sino que son solo factores que, cuando varían, ubican puntos en el conjunto óptimo de Pareto. Para los métodos numéricos que se pueden utilizar para buscar el mínimo de la ecuación (6), esta ubicación depende no solo de los valores de w_i , sino también de las unidades en las que se expresan las funciones (Coello Coello et al., 2002).

5. Revisión de Literatura

La Manufactura Celular es una aplicación de la tecnología de grupos que surge como respuesta a la necesidad de reducir los costos de operación y los tiempos de suministro y preparación, entre otros, asociados al proceso de producción (Heragu, 1994). De acuerdo con Wang & Roze (1997), el diseño de sistemas de celdas de manufactura está compuesto por dos problemas: la formación de familias de productos y la formación de grupos de máquinas llamadas celdas; así las cosas, se busca agrupar en familias a aquellos productos cuyas características físicas (tamaños, formas, pesos) o requerimientos de proceso son similares, y a su vez agrupar las máquinas requeridas para realizar el proceso de fabricación de cada familia en celdas, esto con el fin de combinar la flexibilidad propia de la distribución por talleres de trabajo o por proceso, así como el flujo eficiente y elevados niveles de producción alcanzados con la distribución por producto. El concepto de celda de manufactura dinámica fue presentado por Rheault, Drolet & Abdalnour (1995), el cual hace referencia a estaciones o máquinas movibles que pueden ser reubicadas con el fin de configurar una nueva celda, lo anterior buscando adaptar la disposición de dichas máquinas a los requerimientos de producción generados para un determinado horizonte de planeación (Ver *Figura 3*). Teniendo en cuenta lo anterior, surge la necesidad de diseñar sistemas conformados por celdas de manufactura, de manera que soporten los cambios generados en el proceso de producción en el horizonte de planeación. El diseño de dichas celdas se conoce como Problema de Formación de Celdas de Manufactura Dinámicas (*Dynamic Cell Formation Problem, DCFP*).

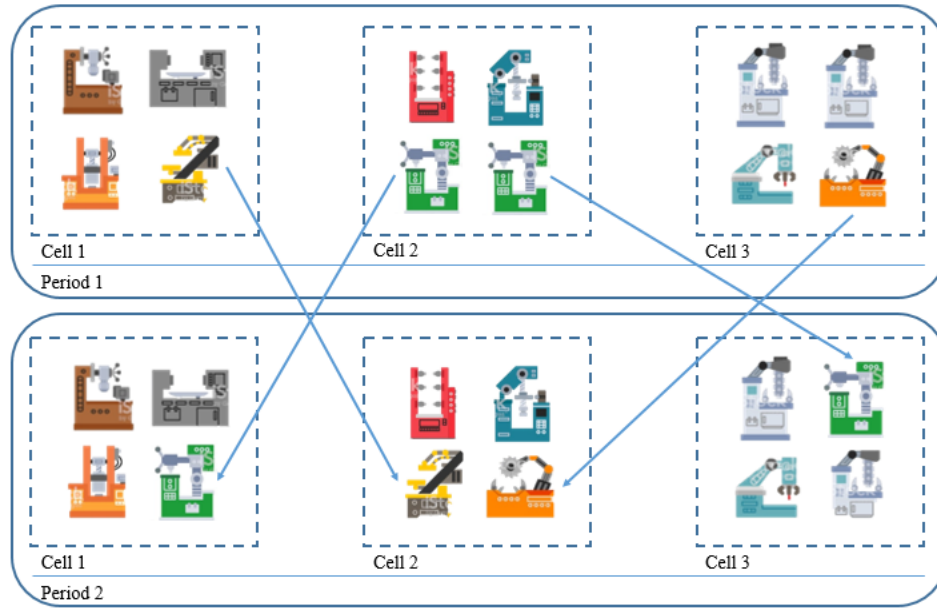


Figura 3. Ilustración de un sistema de celdas de manufactura dinámicas

De otra parte, debido a la complejidad propia de los sistemas de manufactura, en los que se integran máquinas, procesos, personas, entre otros; se han realizado diferentes investigaciones que buscan simplificar o complementar la formulación de un modelo matemático que describa o represente la realidad, dando a su vez solución DCFP. Un modelo de programación matemática para el DCFP, considera entre otros, supuestos asociados a la variación de demanda y reconfiguración del sistema o reubicación de las máquinas de un periodo a otro, en el marco de un horizonte de planeación. Para ello, en el modelo se tiene en cuenta la existencia de cierto conjunto de tipos de productos a fabricar ($i=1, \dots, I$) cuyo procesamiento requiere determinada cantidad de operaciones ($j= 1, \dots, J$); de igual forma, se asume la disposición de recursos o máquinas para realizar el proceso de producción ($m=1, \dots, M$), las celdas de manufactura ($k= 1, \dots, K$) conformadas por el grupo de máquinas que atenderán determinadas familias de productos y, finalmente, se incluyen los periodos ($t= 1, \dots T$) que conforman el horizonte de planeación.

Dado lo anterior, la presente revisión tiene como finalidad establecer los principales objetivos de diseño (funciones objetivo) considerados como criterios de optimización para el DCFP, identificar los métodos de solución usados para abordar el problema de diseño en cuestión y, finalmente, explorar en la literatura la incorporación de los conceptos de balance de carga y disponibilidad de maquinaria. Esta revisión incluye un análisis bibliométrico disponible en el Apéndice A.

5.1. Objetivos de Diseño (Funciones Objetivo)

Considerando que la presente investigación propone el desarrollo de un modelo de optimización multiobjetivo para el DCFP, en esta sección se presenta la caracterización las funciones objetivo trabajadas independientemente (1) minimización de costos y (2) minimización de elementos excepcionales; asimismo, se presentan las funciones objetivo abordadas en conjunto en modelos de optimización multiobjetivo.

5.1.1. Minimización de costos

La necesidad de metodologías de reducción de costos de producción, es uno de los motores impulsores de las diversas investigaciones relacionadas con la organización de los sistemas de manufactura; por tanto, numerosas formulaciones han involucrado como criterio de optimización la minimización del costo de diferentes componentes propios del proceso de producción. Un ejemplo de lo anterior, lo presentan Cao & Li, (2009) quienes proponen un enfoque para abordar el CFP en dos etapas, considerando el desempeño de las máquinas y definiendo como función objetivo la minimización del costo total de procesamiento de cada parte a través del proceso productivo.

Por otra parte, Tavakkoli-Moghaddam, Rahimi-Vahed, Ghodratnama, & Siadat, (2009) plantean la vinculación al CFP de un sub-problema asociado con la secuenciación de trabajos y para ello, presentan un modelo no lineal en el que buscan optimizar tres criterios en una sola función objetivo, estos son: (1) minimizar la suma total del costo asociado a demoras en entregas de productos, (2) minimizar el tiempo que una celda se encuentra desocupada y (3) maximizar el capital sin usar. Más adelante, Wang, Tang, & Yung, (2010) trabajan nuevamente con el objetivo de minimizar el costo asociado a demoras en entregas; adicionalmente, incorporan en el modelo matemático, un sub-problema de secuenciación teniendo en cuenta reglas de despacho. Más adelante, Ghezavati & Saidi-mehrabad, (2010) plantean un modelo no lineal en el que consideran como criterio a optimizar el costo total por demoras en entrega de pedidos, incluyendo en este criterio los costos asociados a la subcontratación de productos, así como la penalización por sub-utilización de recursos.

Dando continuidad a los trabajos anteriores, Gholipour-kanani, Tavakkoli-moghaddam, & Khorrami (2011) plantean como criterio de optimización la minimización del makespan, donde consideran demoras por el alistamiento dependiente de la secuencia; adicionalmente, incorporan a su formulación el costo por movimiento de materiales entre celdas de manufactura. Ahora bien, considerando el componente asociado al costo por movimiento de materiales, se encuentra en la literatura que numerosos autores lo han utilizado, ejemplo de ello son Aryanezhad & Aliabadi (2010), Arkat, Abdollahzadeh, & Ghahve (2012), Arkat, Farahani, & Hosseini (2012), entre otros, quienes buscan minimizar el número total de movimientos entre cada par de máquinas ubicadas en diferentes celdas y, por tanto, el costo asociado a dicho movimiento. Chung, Wu, & Chang (2011) retoman el costo de movimiento de material entre celdas y adicionan en su modelo matemático el costo asociado por averías de máquinas.

Por otra parte, diversos autores deciden incorporar en conjunto el costo asociado al movimiento de material entre celdas y entre máquinas de una misma celda, esto, considerando la existencia de máquinas multipropósito que pueden realizar diversos tipos de trabajos (Liu, Zhu, & Tanaka, 2009; Yin, 2009; Liu, Yin, Yasuda, & Lian, 2010; Jolai, Taghipour, & Javadi, 2011; Forghani, Mohammadi, & Ghezavati, 2013; Forghani et al., 2013). Asimismo, otros autores consideran los costos mencionados anteriormente e incluyen nuevos componentes de costo, ejemplo de ello son Chen & Murata (2010) quienes añaden el costo de operación y Jiajing & Dingzhong (2011) quienes consideran adicionalmente, el costo de adquisición u obtención de maquinaria para el proceso productivo. Arghish & Branch (2016) presentan un modelo de programación lineal entera mixta con el que buscan minimizar los costos asociados a la producción y a el uso de maquinaria, así como los costos de subcontratación de productos.

De modo similar, la minimización de costos ha sido el criterio planteado con mayor frecuencia como función objetivo para el problema de formación de celdas de manufactura dinámicas; la diferencia radica en que, al considerar múltiples periodos, se incurre en costos asociados a la reconfiguración del sistema productivo. Autores como Saidi-Mehrabad & Safaei (2007) plantean tres componentes para la función de costos propuesta en su modelo: amortización de máquinas, costo de manipulación de material entre celdas y costo de reconfiguración. Más adelante F. M. Defersha & Chen (2008) y F. Defersha & Chen (2008) proponen una nueva formulación en la que agregan los costos de mantenimiento, alistamiento y operación de máquinas y, consumo de herramientas. Un año más tarde, Aryanezhad, Deljoo, & Mirzapour Al-e-hashem (2009) presentan un nuevo modelo en el que incluyen la asignación de operarios, con ello, los costos de contratar, despedir y entrenar operarios son añadidos a la formulación propuesta. Otra función de costos es planteada por Rafiee, Rabbani, Rafiei, & Rahimi-Vahed (2011), quienes proponen considerar: (1)

costos de reconfiguración del sistema, (2) costos asociados al tiempo de alistamiento, (3) costos de operación, (4) costos de transferencia de materiales entre máquinas y entre celdas, (5) costo de subcontratación y (6) costos asociados al mantenimiento correctivo y preventivo al que haya lugar.

5.1.2. Elementos excepcionales

Los elementos excepcionales hacen referencia a aquellas máquinas que atienden a dos o más familias de productos o aquellas familias que son atendidas en dos o más celdas de manufactura, es decir, son aquellos elementos que generan interacción entre dos o más celdas de manufactura (Arıkan & Güngör, 2009a). La minimización de la cantidad de elementos excepcionales, busca que las celdas de manufactura se encuentren únicamente dedicadas a las familias de productos asignadas a ellas, evitando de esta manera, incurrir en costos asociados al desplazamiento de productos entre celdas. Satoglu, Durmusoglu & Ertay (2010) presentan un modelo de programación lineal entera para el diseño de sistemas de manufactura híbridos, en el que contemplan como función objetivo la minimización de el número total de operaciones excepcionales, es decir, aquellas que causen movimiento entre celdas.

Una nueva formulación no lineal es planteada por Sahin & Alpay, (2016), quienes incluyen en su modelo la asignación de operarios a máquinas y celdas, considerando como criterios de optimización la minimización del número total de vacíos y el número de elementos excepcionales, criterios agrupados en una función objetivo.

5.1.3. Formulaciones multiobjetivo

Las formulaciones multiobjetivo surgen como alternativa para aquellas circunstancias en las que se requiere una visión integral de un sistema, por lo que se hace necesario asociar la toma de decisiones de dicho sistema a más de un objetivo; más aún, cuando la optimización de una de las

funciones objetivo causa o deriva en el deterioro de los valores de las otras funciones, de tal forma que optimizar una función, implica sacrificar el desempeño de las otras (Pliego Martínez, 2012).

Una propuesta de modelamiento matemático multiobjetivo es presentada por Xiaoqing, Jiafu, Jun, & Mei (2008) quienes formulan un modelo con el que buscan simultáneamente maximizar la utilización de la capacidad instalada y minimizar la cantidad de productos que requieren ser procesados en más de una celda, relacionando este último con la minimización de la distancia recorrida por los productos y con ello los costos de transferencia de materiales. Ahora bien, en ese mismo año, Tavakkoli-Moghaddam, Minaeian, & Rabbani (2008) proponen un modelo matemático en el que integran la minimización de tres funciones objetivo: los costos dinámicos del sistema, la variación de la carga de trabajo en cada estación y la desviación entre el volumen de producción y la demanda recibida. Más adelante, la minimización de costos de demora en entregas, tiempo en que una celda permanece desocupada y la maximización del capital sin usar, son los tres componentes que tienen en cuenta Tavakkoli-Moghaddam, Rahimi-Vahed, Ghodratnama, & Siadat (2009) para dar solución al DCFP.

Por otra parte, Arıkan & Güngör (2009) proponen una extensión de un modelo multiobjetivo de programación paramétrica difusa, en ésta contemplan como función objetivo la minimización de costos asociados con cuellos de botella, duplicación de máquinas y transferencia de materiales entre celdas; adicionalmente, establecen dos nuevas funciones objetivo asociadas con (1) la maximización de la suma de la capacidad utilizada en el sistema y (2) minimización del número de operaciones realizadas fuera de las celdas.

Asimismo, Sarayloo & Tavakkoli-Moghaddam (2010) presentan un modelo matemático en el que proponen la minimización simultanea de la variación de la carga de trabajo, el movimiento entre celdas y al interior de cada una, así como la suma de costos generados por la adquisición de

máquinas, planeación de la producción y reconfiguración de celdas. De igual forma, Nikbakhsh Javadian, Aghajani, Rezaeian, & Ghaneian Sebdani (2011) proponen un modelo en el que plantean dos funciones objetivo, la primera de ellas enfocada a la minimización de la variación de la carga de trabajo de cada celda y la segunda corresponde a una función de costos, donde además de los costos relacionados con la maquinaria y la transferencia de materiales, se incluyen los costos asociados a órdenes de pedido atrasadas, mantenimiento de inventario y subcontratación de productos.

Más adelante, Tavakkoli, Ranjbar, Amin, & Siadat (2012) desarrollan un modelo multiobjetivo en el cual consideran cuatro funciones objetivo, la primera de ellas enfocada a minimizar el costo de mantenimiento, adquisición y operación de maquinaria; la segunda, hace referencia a la minimización del número total de transferencias de materiales entre celdas; en tercera instancia, se plantea minimizar la desviación de la utilización de la maquinaria y, finalmente, la minimización de la desviación de la utilización de las celdas.

Otro punto de vista presentan Saeidi, Solimanpur, & Mahdavi (2014) quienes consideran minimizar la distancia viajada por partes excepcionales a causa de movimiento entre celdas, minimizar el costo de inversión en máquinas, así como la desviación total absoluta del balance de carga de trabajo en las celdas y, a su vez, maximizar de la utilización de máquinas. Torkul & Ustun, 2015) son autores que también involucran el concepto de partes excepcionales a su propuesta, buscando minimizarlo y al mismo tiempo, minimizar vacíos totales al interior de la celda y la variación de carga de cada celda.

Una aproximación más detallada a la realidad de las industrias es propuesta por Niakan, Baboli, Moyaux, & Botta-Genoulaz (2016) quienes proponen un modelo matemático que busca por una parte minimizar una función de costos que, además de costos de adquisición de maquinaria,

reconfiguración de celdas y transferencia de materiales, adiciona costos de mano de obra y un componente relacionado con la venta de máquinas en desuso; por otro lado, la segunda función objetivo del modelo considera aspectos sociales, tales como la maximización de oportunidades de trabajo, así como la minimización de peligros potenciales relacionados con las máquinas.

Por otra parte, Maleki, Ketabi, & Rafiei (2018) desarrollan un modelo matemático con el que buscan agrupar simultáneamente máquinas y productos; para ello, contemplan dos funciones objetivo. La primera enfocada en la minimización de los componentes de costo asociados con el movimiento entre celdas y entre máquinas y, la segunda, asociada a la maximización de la importancia o relevancia de asignar los productos a las celdas en lugar de priorizar la asignación a máquinas.

Finalmente, Rabbani, Farrokhi-Asl, & Ravanbakhsh (2019) presentan un modelo matemático multiobjetivo en el que consideran disponibilidad de maquinaria y rutas alternativas de procesamiento. Las funciones objetivo que contempla éste modelo son: (1) minimización de costos de adquisición de maquinaria, costos fijos y variables asociados al uso de maquinaria, costos de transferencia de materiales entre celdas y entre máquinas de una misma celda.

5.2. Métodos de Solución

Diversos métodos de solución han sido propuestos por autores para resolver el DCFP; sin embargo, debido a que éste es un problema clasificado como NP-hard, de acuerdo a su complejidad computacional, las heurísticas y meta heurísticas son los métodos de solución encontrados con mayor frecuencia en la literatura (Ver Tabla 1, Figura 4). Por ejemplo, Boulif & Atif (2008) plantean hacer uso de un algoritmo genético difuso (*Fuzzy Genetic Algorithm, FGA*) para dar solución a un modelo bi-objetivo en el que se consideran y comparan estrategias de conformación de celdas activas y pasivas.

De otra parte, Darla, Naiju, & Sagar (2014) hacen uso del algoritmo genético (*Genetic Algorithm, GA*) para minimizar la cantidad de movimientos entre celdas (producto de la formación de familias de máquinas y asignación de familias de productos a las máquinas) y la variación de la carga de trabajo de las celdas. Éste algoritmo es usado más adelante en diversos estudios como los presentados por M. Aghajani, Keramati, Moghadam, & Mirjavadi (2016), Sahin & Alpay (2016), Shafigh, Defersha, & Moussa (2017), Maleki et al. (2018), Subhaa & Natarajan (2018), Shahdi-Pashaki, Teymourian, & Tavakkoli-Moghaddam (2018), Feng, Xi, Xia, & Pan (2018), entre otros. Ahora bien, en cuanto a modelos matemáticos multiobjetivo, se encuentran propuestas de implementación del algoritmo genético por parte de Aghajani, Ahmadi Didehbani, Zadahmad, Hasan Seyedrezaei, & Mohsenian (2014), Saeidi et al. (2014), Torkul & Ustun (2015), entre otros.

Otra propuesta es realizada por Tavakkoli-Moghaddam, Safaei, et al. (2008) quienes dan solución al DCFP considerando rutas alternativas de procesamiento con la meta heurística recocido simulado (*Simulated Annealing, SA*) y un año más tarde Tavakkoli-Moghaddam et al. (2009) hacen uso de éste mismo algoritmo para solucionar un modelo en el que se consideran restricciones de capital. Éste algoritmo es nuevamente utilizado por Jayakumar & Raju (2014) quienes añaden complejidad a la toma de decisiones, considerando ahora, un ambiente de producción incierto, incluyendo, entre otros, variación del mix o tipos de productos a fabricar. Otros autores que han propuesto soluciones al problema haciendo uso de éste algoritmo son: M. Aghajani et al. (2016), Chunfeng Liu & Wang (2016), Shafigh et al. (2017), Feng et al. (2018), Iqbal & Al-Ghamdi (2018), entre otros.

Por otro lado, Wang et al. (2010) presentan un enfoque de búsqueda de dispersión (*Scatter Search, SS*) para un problema en el que pretenden simultáneamente dar solución al problema de formación de celdas de manufactura y a la programación de lotes de productos, considerando a su

vez, reglas de despacho. Un año más tarde, Gholipour-kanani et al. (2011) plantean un problema de programación de la producción multicriterio para un sistema de manufactura celular, buscando minimizar el makespan y los costos asociados a la producción. Más adelante, Tavakkoli et al. (2012) proponen el algoritmo SS para dar solución a CFP, buscando seleccionar el plan de producción de cada producto, generando el mínimo costo derivado de la formación de familias de productos y familias de máquinas (celdas de manufactura) simultáneamente. Otro ejemplo de aplicación de éste algoritmo, es presentado por Jabal-Ameli & Moshref-Javadi (2014) quienes resuelven el problema de formación de celdas de manufactura y a su vez, definen la disposición de celdas en la planta y de máquinas en las celdas.

Tabla 1.

Estrategias de solución encontrados con mayor frecuencia en la literatura

<i>Estrategias de solución</i>	<i>Sigla</i>
Genetic Algorithm	GA
Simulated Annealing	SA
Hybrid Algorithms	H
Particle Swarm Optimization	PSO
Tabu search	TS
Similarity Coefficient	COEF
Nondominated Sorting Genetic Algorithm	NSGA-II
Variable neighborhood search	VNS
Artificial Bee colony	ABC
Bertrand competition	BC
Bacteria Foraging Algorithm	BFA
Clonal Aelction Algorithm	CLA
Evolutionary Optimization Algorithm	EA
Group Search Optimization	GSO
Imperialistic Competitive Algorithm	ICA
Vibration Damping Optimization	VDO
Water Flowlike algorithm	WFL

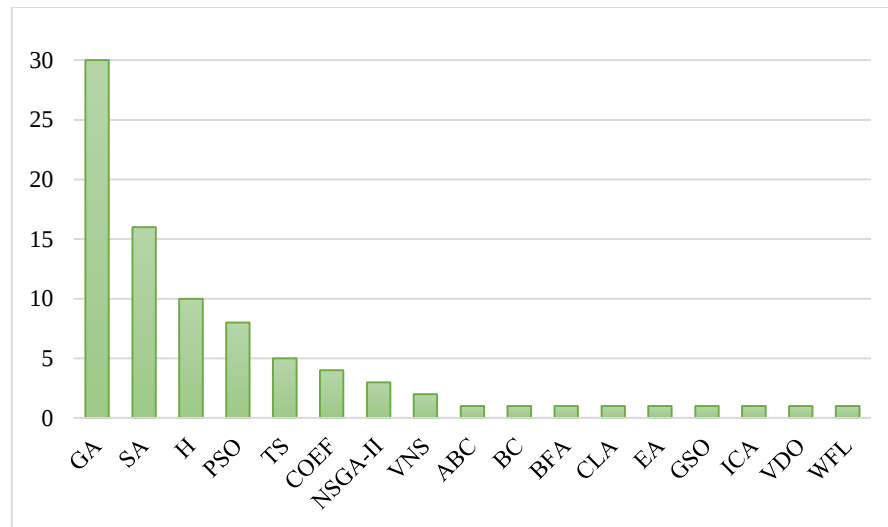


Figura 4. Frecuencia de utilización de las estrategias de solución

En 2010 un enfoque diferente es propuesto por Amiri & Ghodsi (2010) quienes integran el problema de formación de celdas de manufactura dinámicas con el problema de distribución de planta en un espacio continuo, considerando además, otros aspectos asociados a la planeación de la producción; para dar solución a éste problema, propone el uso del algoritmo búsqueda en el vecindario variable (*Variable Neighborhood Search*, VNS). Éste algoritmo es usado nuevamente por Jolai et al. (2011) quienes buscan determinar la distribución de celdas en una fábrica y a su vez, la distribución de máquinas dentro de cada celda.

Otro enfoque de solución encontrado en la literatura, es el propuesto por Sarayloo & Tavakkoli-Moghaddam (2010a), quienes desarrollan un algoritmo competitivo imperialista (*Imperialistic Competitive Algorithm*, ICA) para abordar el DCFP considerando la planeación de la producción para cada periodo del horizonte de planeación.

La Búsqueda Tabú (*Tabu Search*, TS) es otro método de solución encontrado con frecuencia en la literatura. Chung et al. (2011) presentan éste algoritmo en dos fases: (1) construcción inicial de la solución y (2) fase de mejoramiento, para un problema de formación de celdas de manufactura

considerando rutas alternativas de procesamiento, así como disponibilidad de maquinaria. De otra parte, Chang, Wu, & Wu (2013) proponen desarrollar nuevamente el algoritmo TS, ahora, abordando simultáneamente el proceso de diseño o formación de celdas de manufactura, la disposición de las celdas en la planta (Layout) y la secuencia de máquinas al interior de cada celda. Otro propuesta es presentada por Du, Wang, Yan, & Sang (2013) quienes desarrollan un algoritmo TS para resolver únicamente el problema de selección de rutas de procesamiento, insumo para el problema de diseño de celdas de manufactura dinámicas o reconfigurables.

La metaheurística optimización de enjambre de partículas (*Particle Swarm Optimization, PSO*), es planteada por Sarayloo & Tavakkoli-Moghaddam (2010b) para dar solución a un modelo con el que buscan simultáneamente minimizar la variación de carga de trabajo y los costos relacionados con transferencia de materiales y adquisición, disposición y reubicación de maquinaria. Más adelante, una aplicación de la optimización de enjambre de partículas multiobjetivo (*Multiobjective Particle Swarm Optimization, MOPSO*) es presentada por Azadeh, Pashapour, & Abdolhossein Zadeh (2016) para el diseño de celdas de manufactura, donde consideran estilo de decisión y personalidad y habilidades de operarios.

Otros algoritmos adaptados al problema son: (1) algoritmo de optimización de la vibración de amortiguadores (*Vibration Damping Optimization Algorithm, VDOA*) con el que se busca dar solución a un problema multiobjetivo en el que tienen en cuenta asignación y entrenamiento de operarios (Mehdizadeh et al., 2016) y el algoritmo forrajeo de bacterias integrado (*Integrated Bacteria Foraging Algorithm, IBFA*) propuesto por Chunfeng Liu, Wang, & Leung (2018) para un modelo que integra la transferencia de productos entre fábricas, planeación de la producción y múltiples periodos de procesamiento, enmarcados en la cadena de suministro.

5.3. Balance de Carga de Trabajo

El balance o equilibrio de la carga de trabajo, permite que el sistema funcione sin mayores problemas y genere mejores resultados en términos de rendimiento, *makespan*, tiempo de flujo y demoras, así como en niveles de inventario de producto en proceso (Saxena & Jain, 2011). La carga de trabajo asignada a las máquinas de cada celda es balanceada teniendo en cuenta el tiempo utilizado para el procesamiento de cada parte (Tavakkoli-Moghaddam et al., 2007). Este componente se ha tenido en cuenta principalmente en la función objetivo por autores como Xiaoqing et al., (2008) con el fin de disminuir los costos generados por la inversión de nueva maquinaria, duplicación de máquinas, reubicación de máquinas y mano de obra; así como por Bajestani, Rabbani, Rahimi-Vahed, & Khoshkhou (2009) quienes buscan minimizar la variación de la carga en las celdas. Más adelante, Lian, Liu, Li, Evans, & Yin (2014) presentan un modelo para la formación de celdas de manufactura en el que consideran múltiples máquinas idénticas, en éste involucran como función objetivo la minimización de la variación de la carga en las celdas, para lo cual definen la carga de cada celda como la suma del tiempo total de alistamiento y el tiempo total de procesamiento.

De otra parte, autores como Kheirkhah & Ghajari (2017) involucran el balance de carga entre celdas y entre máquinas, a diferencia de los enfoques presentados anteriormente, éstos investigadores proponen tener en cuenta dicho componente como restricciones del modelo, definiendo que cada máquina al menos una proporción (parámetro definido) del tiempo total de operación asignado a la respectiva celda y, que cada celda debe tener al menos una proporción (parámetro definido) del tiempo total de operación del sistema.

5.4. Disponibilidad de Maquinaria

Entre los factores que influyen en el rendimiento de los sistemas de manufactura celular se encuentra la fiabilidad de las máquinas en las celdas de fabricación, por tanto, un aspecto importante a tener en cuenta es la disponibilidad de las máquinas. Considerando un sistema de manufactura compuesto por un número de máquinas dispuestas para procesar familias de productos, la fiabilidad del sistema y de cada máquina está definida por su respectiva disponibilidad. La disponibilidad del sistema, hace referencia a la probabilidad de que éste se encuentre desempeñando la función correspondiente en un cualquier punto en la línea del tiempo o durante un período de tiempo establecido; de manera similar, la disponibilidad de maquinaria, hace referencia a la probabilidad de encontrar funcionando la máquina en un determinado punto en la línea del tiempo o al porcentaje de tiempo sobre determinado intervalo en el que la máquina se encuentra operando con normalidad (A. Aghajani et al., 2014).

Tradicionalmente, la formación de celdas y la asignación de trabajo se realizan con el supuesto de una fiabilidad del 100% de las máquinas; caso contrario se presenta en la práctica, donde las máquinas pueden fallar durante las operaciones, generando de esta manera impacto en las fechas de vencimiento y otros criterios de rendimiento del sistema. Considerando lo anterior, Saxena & Jain (2011) presentan un modelo en el que incorporan como una restricción la disponibilidad de las máquinas, calculando en primera instancia el tiempo medio entre fallas (*Mean Time Between Failures, MTBF*) y generando una relación entre éste y la fiabilidad de las máquinas, asimismo, se establece un costo unitario de reparación de máquinas a tener en cuenta en el modelo. De forma similar, Esmailnezhad, Fattahi, & Kheirkhah (2015) involucran a partir de parámetros asociados al MTBF y al tiempo medio para reparar fallas (*Mean Time To Repair, MTTR*) de cada máquina,

el concepto de disponibilidad de maquinaria en las restricciones del modelo con el que dan solución al CFP.

Un enfoque diferente es propuesto por A. Aghajani et al. (2014), quienes plantean como un criterio de optimización (función objetivo) la minimización de la tasa de fallas del sistema, para ello, relacionan una variable de decisión (asignación de determinada operación a determinada máquina) con un parámetro predefinido asociado a la tasa de fallas, ésta depende del tipo de máquina. Por otra parte, Karoum & Elbenani (2017) también involucran el concepto de disponibilidad de maquinaria en la función objetivo como un componente de costo, asociado a la penalización por falla de maquinaria en el sistema.

5.5. Discusión de la Revisión

A partir de la revisión realizada, se encuentra que el objeto de diseño o función objetivo utilizada con mayor frecuencia en los modelos de programación matemática presentes en la literatura, es la minimización de diferentes componentes del costo asociado al proceso de producción (ver Tabla 2 y Tabla 3). Ahora bien, considerando las formulaciones multiobjetivo, se encuentra que adicional a la minimización de costos, se han involucrado componentes asociados al balance de carga de trabajo, utilización de maquinaria, elementos excepcionales, entre otros.

Los componentes costos, balance de carga de trabajo y disponibilidad de maquinaria, han sido trabajados simultáneamente en diversos problemas, pero considerados en diferentes partes de la estructura del modelo, es decir, mientras uno de ellos es usado como criterio de optimización (función objetivo), los otros hacen parte las familias de restricciones como parámetros de entrada. Lo anterior da lugar a la presente investigación, reafirmando la importancia de minimizar los costos asociados a la producción, pero a su vez, procurando equilibrar la carga de trabajo buscando que el sistema funcione sin mayores problemas y considerando, además, la disponibilidad de

maquinaria teniendo en cuenta que es un factor que influye en el rendimiento de los sistemas de manufactura. Ahora bien, cabe resaltar que los tres objetivos ilustrados anteriormente están en conflicto; sin embargo, su análisis conjunto permite incorporar al modelado matemático elementos que pueden ser base para el desarrollo de herramientas que apoyen o soporten la toma de decisiones en sistemas reales. La estrategia de modelado multiobjetivo, responde a las características de los criterios involucrados, a manera de ejemplo, cuando se busca maximizar la disponibilidad del sistema, las máquinas con mayor tiempo de baja (*Downtime*), dado por el tiempo medio entre fallas y tiempo medio de reparación, no se seleccionarán para el procesamiento de las operaciones de producto, por lo que se incrementará la subutilización de esas máquinas, lo que a su vez representa un desbalance en la asignación de cargas. De otra parte, cuando se busca minimizar los costos totales de producción, la confiabilidad del sistema se reduce porque las máquinas que son más económicas, generalmente tienen una confiabilidad más baja (mayor tiempo de baja).

De otra parte, en cuanto a métodos de solución se encuentra que el algoritmo genético es el enfoque más utilizado por los investigadores para abordar el problema. Considerando las características de ese algoritmo y la analogía que se puede realizar, para la presente investigación se propone utilizar como alternativa de solución el algoritmo NSGA-II. Adicional a lo anterior, se toma en consideración los trabajos realizados por Ali Azadeh, Pashapour, & Zadeh, (2016), Rabbani et al., (2019), entre otros, quienes contrastan los resultados del algoritmo NSGA-II frente a otros algoritmos (por ejemplo el algoritmo MOPSO), encontrando que el algoritmo genético, reporta mayor cantidad de soluciones Pareto y, a su vez, el conjunto de soluciones es más diverso.

Tabla 2.

Convenciones para las funciones objetivo abordadas en la literatura

Convención	Característica
1a	Formulación monobjetivo
1b	Formulación multiobjetivo
2a	Minimización de Costos
2b	Maximizar Capacidad del Sistema
2c	Minimizar Elementos Excepcionales
2d	Minimizar Vacíos de Operaciones en las Celdas
2e	Maximizar Utilización del Sistema
2f	Minimizar la Desviación de la Utilización de las Máquinas
2g	Minimizar Variación de la Carga de Trabajo
2h	Minimizar Tasa de Fallas
2i	Minimizar Costo de Subcontratación
2j	Minimizar Inconsistencia en el Estilo de Decisión
2k	Maximizar Seguridad de Empleo
2l	Maximizar Importancia de Asignación a Celdas en Lugar de Máquinas
2m	Maximizar la Utilización de los Trabajadores

Tabla 3.

Funciones objetivo abordadas en la literatura para el DCFP

<i>Referencia</i>	<i>Característica</i>														
	<i>1a</i>	<i>1b</i>	<i>2a</i>	<i>2b</i>	<i>2c</i>	<i>2d</i>	<i>2e</i>	<i>2f</i>	<i>2g</i>	<i>2h</i>	<i>2i</i>	<i>2j</i>	<i>2k</i>	<i>2l</i>	<i>2m</i>
Arikan & Güngör (2009)	✓		✓												
Cao & Li (2009)		✓	✓	✓	✓										
Liu et al. (2009)	✓		✓												
Tavakkoli-Moghaddam et al. (2009)	✓		✓												
Wang et al. (2010)	✓		✓												
Aliabadi, Aryanezhad, et al. (2010)	✓		✓												
Chen & Murata (2010)	✓		✓												
Ghezavati & Saidi-mehrabad (2010)	✓		✓												
Ghezavati, Saidi-Mehrabad, Jabal-Ameli, & Makui (2010)	✓		✓												
Jiajing & Dingzhong (2010)	✓		✓												
Chenguang Liu et al., (2010)	✓		✓												
Satoglu et al. (2010)	✓			✓											
Amiri & Ghodsi (2010)	✓		✓												
Ariafer, Ismail, Tang, Ariffin, & Firoozi (2011)	✓		✓												
Arkat, Hosseini, & Farahani (2011)		✓		✓		✓									
Chung et al. (2011)	✓		✓												
Gholipour-kanani et al. (2011)	✓		✓												
Jolai et al. (2011)	✓		✓												
Rafiee et al. (2011)	✓		✓												
Arkat, Abdollahzadeh, et al. (2012)	✓			✓											
Arkat, Farahani, et al. (2012)	✓		✓												
Tavakkoli et al. (2012)		✓	✓				✓	✓							
Askin (2013)	✓		✓												
Forghani et al. (2013)	✓		✓												
Nunkaew & Phruksaphanrat (2014)		✓		✓		✓									
Darla et al. (2014)		✓	✓							✓					
Raminfar, Zulkifli, Vasili, & Sai Hong (2013)	✓		✓												
Subhaa & Jawahar (2013)	✓		✓												
A. Aghajani et al. (2014)		✓	✓				✓				✓				
Azadeh, Rezaei-Malek, Evazabadian, & Sheikhalishahi (2015)	✓		✓												
V. R. Ghezavati (2015)		✓	✓				✓					✓			

Continuación Tabla 3. *Funciones objetivo abordadas en la literatura para el DCFP*

<i>Referencia</i>	<i>Característica</i>														
	<i>1a</i>	<i>1b</i>	<i>2a</i>	<i>2b</i>	<i>2c</i>	<i>2d</i>	<i>2e</i>	<i>2f</i>	<i>2g</i>	<i>2h</i>	<i>2i</i>	<i>2j</i>	<i>2k</i>	<i>2l</i>	<i>2m</i>
Jabal-Ameli & Moshref-Javadi (2015)		✓	✓	✓		✓									
Jayakumar & Raju (2015)	✓		✓												
Saeidi et al. (2015)		✓	✓				✓		✓						
Tang, Yan, Wang, & Zeng (2014)	✓			✓											
Ali Azadeh, Moghaddam, Nazari-Doust, & Jalalvand, (2015)	✓		✓												
Brown (2015)	✓			✓											
Erenay, Suer, Huang, & Maddisetty (2015)		✓		✓					✓						
Aljuneidi & Bulgak (2016)	✓		✓												
Arghish & Branch (2016)		✓	✓								✓				
Ali Azadeh et al. (2016)		✓	✓									✓	✓		
Sahin & Alpay (2016)	✓			✓											
Ebrahimi, Kia, & Komijan (2016)	✓		✓												
Navaei & ElMaraghy (2017)	✓		✓												
Aalaei & Davoudpour (2017)	✓		✓												
Aljuneidi & Bulgak (2017)	✓		✓												
Jawahar & Subhaa (2017)	✓		✓												
Karoum & Elbenani (2017)	✓		✓												
Shafigh et al. (2017)	✓		✓												
Wenbin & Yi (2018)	✓		✓												
Feng et al. (2018)	✓		✓												
Liu et al. (2018)	✓		✓												
Maleki et al. (2018)		✓	✓											✓	
Subhaa & Natarajan (2018)	✓		✓												
Soolaki, Arkat, & Ahmadizar (2018)	✓		✓												
Feng, Xia, Da, Xi, & Pan, (2019)	✓		✓												
Rabbani et al. (2019)		✓	✓						✓						✓

6. Formulación del modelo matemático

El modelo propuesto en el presente trabajo aborda el problema de formación de celdas de manufactura en un ambiente dinámico, considerando simultáneamente las funciones de costos, balance de carga, y disponibilidad de maquinaria como criterios de optimización. El problema es formulado como un modelo multiobjetivo de programación lineal entera mixta bajo los siguientes supuestos:

- El tiempo disponible en cada tipo de máquina es conocido y constante para todos los periodos del horizonte de planeación.
- El tiempo de operación de las máquinas es conocido y constante para todos los periodos del horizonte de planeación.
- Cada máquina puede desarrollar diversas operaciones, por tanto, las máquinas son multipropósito.
- Cada producto puede tener una o más rutas o alternativas de procesamiento.
- La demanda es determinística y conocida para cada periodo.
- En el periodo $t=0$ no hay máquinas disponibles en el sistema, es decir, para el primer periodo, todas las máquinas tendrán asociado un costo de adquisición.
- El costo de transferencia de materiales por producto entre celdas es conocido y constante para todos los periodos.
- Los costos de adquisición, disposición, reubicación y fijos asociados a la maquinaria son constantes y conocidos en todos los periodos.
- La demanda debe ser cubierta en su totalidad.

- El tiempo medio de reparación y tiempo medio entre fallas de cada tipo de máquina es conocido y constante para todos los periodos del horizonte de planeación.

6.1. Índices

i = Índice para el producto o tipo de producto ($i = 1, \dots, I$)

j = Índice para las operaciones requeridas por el producto i ($j = 1, \dots, J$)

m = Índice para el tipo de máquina ($m = 1, \dots, M$)

k = Índice para las celdas de manufactura ($k = 1, \dots, K$)

t = Índice para los periodos ($t = 1, \dots, T$)

6.2. Parámetros de entrada

Ca_m = Costo de adquirir una unidad de la máquina tipo m .

Cd_m = Costo de descartar una unidad de la máquina tipo m .

R_m = Costo de reubicar una unidad de la máquina tipo m .

f_m = Costo fijo de una unidad de la máquina tipo m .

D_{it} = Demanda del producto i en el periodo t .

H = Costo de transferencia de materiales entre celdas de cada unidad de producto.

q_{ijm} = Tiempo de realización del proceso j para una unidad del producto tipo i en la máquina tipo m .

Td_m = Tiempo disponible de una unidad de la máquina tipo m por periodo.

$MTTR_m$ = Tiempo medio de reparación de la máquina tipo m .

$MTBF_m$ = Tiempo medio entre fallas de la máquina tipo m .

LM = Número mínimo de máquinas por celda.

UM = Número máximo de máquinas por celda

$w_{ijm} = 1$ si la operación j correspondiente al producto tipo i se puede hacer en la máquina tipo m , 0 de lo contrario.

C_k = Coeficientes que acompañan la combinación lineal que cumple con las propiedades de un contraste, para el cálculo del balance de carga de trabajo entre celdas k .

6.3. Variables de Decisión

$X_{ijmkt} = 1$ si la operación j del producto i es asignada a la máquina m en la celda k en el periodo t , 0 de lo contrario.

n_{mkt} = Numero de máquinas tipo m disponibles en la celda k en el periodo t .

u_{mkt} = Numero de máquinas tipo m movidas a la celda k al inicio del periodo t .

v_{mkt} = Numero de máquinas tipo m removidas de la celda k al inicio del periodo t .

a_{mkt} = Numero de máquinas tipo m adquiridas en la celda k al inicio del periodo t .

b_{mkt} = Numero de máquinas tipo m descartadas en la celda k al inicio del periodo t .

$Ypos_{ijkt}$ = Variable auxiliar para la contabilización de movimientos intracelulares.

$Yneg_{ijkt}$ = Variable auxiliar para la contabilización de movimientos intracelulares.

$$\begin{aligned}
 Min Z_1 = & \sum_m \sum_k \sum_t (Ca_m a_{mkt} + R_m u_{mkt} + f_m n_{mkt} + Cd_m b_{mkt}) \\
 & + H \left[\sum_t \sum_i D_{it} \left(\sum_{j=1}^{J-1} \sum_{k=1}^K Ypos_{ijkt} \right) \right]
 \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned} \text{Min } Z_2 &= \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K C_k * \sum_i \sum_j \sum_m X_{ijmkt} * D_{it} \\ \text{Sujeto a.} \\ \sum_{k=1}^K C_k &= 0, C_k \neq 0 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\text{Min } Z_3 = \sum_t \sum_k \sum_m n_{mkt} * Td_m * \frac{MTTR_m}{MTBF_m} \quad (10)$$

Sujeto a:

$$n_{mkt} = a_{mkt} \quad \forall j, \forall k, t = 1 \quad (11)$$

$$n_{mkt} = n_{mk(t-1)} + a_{mkt} - b_{mkt} + u_{mkt} - v_{mkt} \quad \forall m, \forall k, \forall t > 1 \quad (12)$$

$$\sum_k u_{mkt} = \sum_k v_{mkt} \quad \forall m, \forall t > 1 \quad (13)$$

$$LM \leq \sum_m n_{mkt} \leq UM \quad \forall k, \forall t \quad (14)$$

$$\sum_k \sum_m w_{ijm} X_{ijmkt} \geq 1 \quad \forall i, \forall j, \forall t \quad (15)$$

$$\sum_i \sum_j q_{ijm} X_{ijmkt} D_{it} \leq n_{mkt} * Td_m * \left(1 - \frac{MTTR_m}{MTBF_m}\right) \quad \forall m, \forall k, \forall t \quad (16)$$

$$\sum_m X_{i(j+1)mkt} - \sum_m X_{ijmkt} = YPos_{ijkt} - Yneg_{ijkt} \quad \forall i, \forall j, \forall k, \forall t \quad (17)$$

$$X_{ijmkt}, YPos_{ijkt}, Yneg_{ijkt} \geq 0 \quad \forall i, \forall j, \forall m, \forall k, \forall t \quad (18)$$

$$\sum_i \sum_j \sum_m X_{ijmkt} * D_{it} - \sum_i \sum_j \sum_m X_{ijmk't} * D_{it} \geq 0, \forall k, \forall t, k \neq k' \quad (19)$$

$$X_{ijmkt}, Y_{pos_{ijkt}}, Y_{neg_{ijkt}} \in [0,1] \quad \forall i, \forall j, \forall m, \forall k, \forall t \quad (20)$$

$$n_{mkt}, a_{mkt}, b_{mkt}, u_{mkt}, v_{mkt} \in \mathbb{Z} \quad \forall m, \forall k, \forall t \quad (21)$$

En la formulación propuesta se establecen tres funciones objetivo. El primer objetivo (ecuación 8) minimiza la suma total de los costos asociados a la producción. El primer término calcula el costo total de adquisición, utilización, reubicación y disposición de maquinaria en los diferentes periodos del horizonte de planeación; el segundo término representa el costo total de transferencias de productos entre celdas, se incurre en este costo cuando dos operaciones consecutivas del mismo tipo de producto, son realizadas en celdas de manufactura diferentes, el rubro se obtiene a partir de la multiplicación del total de producción transferida entre celdas por el costo de transferir una unidad de producto. Es preciso aclarar que el cálculo de transferencia de material está dado inicialmente por la expresión $|\sum_m X_{i(j+1)mkt} - \sum_m X_{ijmkt}|$, multiplicada por la demanda correspondiente a cada tipo de producto; sin embargo, con el fin de trabajar con un modelo lineal, la expresión anterior es reemplazada introduciendo las variables auxiliares $Y_{pos_{ijkt}}$ y $Y_{neg_{ijkt}}$, y adicionando al modelo original las restricciones que relaciona las variables mencionadas anteriormente (ecuaciones 17 y 18). En la función objetivo se tiene en cuenta sólo uno de los dos conjuntos de variables auxiliares con el fin de evitar doble contabilización de las transferencias realizadas. La segunda función objetivo (ecuación 9) busca balancear la carga asignada a cada celda de manufactura, para ello se propone minimizar una combinación lineal de la producción asignada a las celdas para cada uno de los periodos en el horizonte de planeación, se resalta que la combinación lineal cumple con las propiedades de un contraste. La tercera función objetivo maximiza la disponibilidad de la maquinaria asignada, esto se logra seleccionando para el sistema aquellas máquinas que presenten menor tiempo de baja por daños y reparación. Dicho lo anterior,

la expresión de la ecuación 10 relaciona las máquinas asignadas al sistema con el tiempo de baja; al minimizar esta función se estará maximizando la disponibilidad del sistema.

El conjunto de restricciones de la ecuación 11 garantiza que las máquinas disponibles en el periodo $t=1$ en cada celda, es igual a la cantidad de máquinas adquiridas en ese mismo periodo. El conjunto de restricciones de la ecuación 12 representan el balance de máquinas de un periodo a otro, es decir, la cantidad de máquinas disponibles en cada celda para producción en los periodos $t > 1$, debe ser igual a las máquinas disponibles en el periodo anterior ($t-1$) más las máquinas adquiridas menos la cantidad de máquinas descartadas del sistema más las máquinas ingresadas provenientes de otra celda menos las máquinas sacadas para otra celda. El conjunto de restricciones de la ecuación 13, representan el balance de máquinas reubicadas para $t > 1$, por tanto, la suma de la cantidad de máquinas sacadas o removidas de las celdas, debe ser igual a la suma de la cantidad de máquinas ubicadas o reasignadas a las celdas.

El conjunto de restricciones de la ecuación 14 garantiza que el tamaño de la celda no debe exceder los límites establecidos. En familia de restricciones de la ecuación 15, se establece que todas las operaciones de cada tipo de producto deben ser asignadas en cada periodo del horizonte de planeación. En la ecuación 16 se presenta el conjunto de restricciones que garantiza que la capacidad en cada tipo de máquina y celda no sea excedida, para ello se relaciona la cantidad de productos a fabricar en cada máquina de cada celda para cada periodo de tiempo ($X_{ijmkt} * D_{it}$) y el tiempo tarda cada uno de esos productos en ser procesados (q_{jim}), con el número de máquinas de cada tipo disponibles en cada celda (n_{mkt}) por el tiempo disponible de cada una de ellas $\left(Td_m * \left(1 - \frac{MTTR_m}{MTBF_m}\right)\right)$. El conjunto de restricciones de las ecuaciones 17 y 18 relacionan las variables auxiliares incorporadas para el cálculo de movimientos intercelulares. La ecuación 19

corresponde a la función objetivo asociada al balance de carga; para ello, se calcula la diferencia entre la producción de cada par de celdas de manufactura y este valor debe ser mayor o igual a cero, es decir, no debe existir producción negativa. Finalmente, en los conjuntos de restricciones 20 y 21, se establece la naturaleza de las variables de decisión consideradas en el modelo.

7. Obtención de soluciones a partir del modelo

Para dar solución al problema se plantean dos estrategias basadas en el modelo matemático: Modelo exacto mediante ponderación de objetivos y Algoritmo NSGAI, que son verificados haciendo uso de instancias de la literatura.

7.1. Generación de instancias de prueba

Para la verificación del modelo propuesto se hace uso de cuatro grupos de instancias presentadas por Rabbani et al., (2019) y clasificadas como problemas de tamaño grande, de acuerdo a la cantidad de conjuntos de tipos de productos, operaciones, máquinas, celdas y periodos de tiempo a involucrar. En las tablas 4 y 5 se caracterizan los grupos de instancias y los datos de entrada para los diferentes conjuntos.

Tabla 4.
Grupos de instancias de prueba

Grupo	Operaciones	Tipos de producto	Tipos de máquina	Cantidad de celdas	Número de periodos
A1	2	12	10	3	3
A2	3	12	12	3	3
A3	3	16	18	3	3
A4	3	20	22	3	3

Tabla 5.

Parámetros del modelo

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Ca_m	U(10000,16000)	Td_m	U(600,800)
Cd_m	U(7000, 11000)	D_{it}	U(200,700)
R_m	U(50,80)	H	50
f_m	U(100,160)	LM	3
$MTTR_m$	U(50,100)	UM	8M/5K
$MTBF_m$	U(300,900)	q_{ijm}	U(0,1)

7.2. Modelo exacto

El modelo propuesto es implementado en la herramienta modelización algebraica general GAMS 23.5, la documentación del desarrollo del modelo se encuentra en el Apéndice B. Por la estructura del problema, se trabaja con el solver CPLEX. Una vez establecidas las instancias a trabajar, se desarrolla el modelo MILP acogiendo la estructura básica de modelado del software GAMS, que consta de 5 elementos:

- Conjuntos y subconjuntos (*Sets*): Los conjuntos corresponden en este caso a los subíndices (i, j, m, k, t) propuestos en la formulación del capítulo 6 y, sus valores son asignados de acuerdo al problema o instancia (ver sección 7.1) a evaluar. Adicionalmente, se hace uso de dos subconjuntos: el primero indica la cantidad de operaciones a realizar para cada tipo de producto (ji) y, el segundo, es un subconjunto auxiliar para el cálculo de transferencia de movimientos entre celdas (jia) .
- Datos: Corresponden a los parámetros del modelo. GAMS considera tres tipos de datos de entrada: (1) escalares (*Scalar*), (2) parámetros o listas (*Parameter*) y (3) tablas (*Table*). Para el modelo propuesto se hizo uso de escalares para la declaración y asignación del

costo de transferencia de materiales (H), así como los valores asociados a la restricción de tamaño de celda (UM , LM ; cantidad mínima y máxima de máquinas por celda). Como parámetros o listas se ingresan los costos asociados a la maquinaria (costo fijo (F), costo de adquirir (CA), reubicar (R) y descartar(CD)) y los datos de tiempo disponible por máquina (TD), tiempo medio entre fallas ($MTBF$) y, tiempo medio de reparación ($MTTR$). Los parámetros: demanda del producto (D) y tiempo requerido para completar la operación (q) son ingresados como tablas.

- Variables (*Variables*): Se establecen tres tipos de variables de acuerdo a la estructura de modelado en GAMS.
 - Variables enteras (*Integer variables*): Se consideran en esta categoría las variables máquinas disponibles (N), máquinas adquiridas (A), máquinas que ingresan o salen de las celdas (U , V) y, máquinas descartadas del sistema (B).
 - Variables binarias (*Binary variables*): En esta categoría se encuentra la variable de asignación (X), así como las variables auxiliares utilizadas para el cálculo de transferencia de materiales (Y_{pos} , Y_{neg}).
 - Variables libres: Esta categoría de variables puede tomar valores entre menos infinito e infinito, está reservada generalmente para declarar la variable que almacena el valor de la función objetivo. En este caso, se declaran como libres las variables: *COSTO* (almacena el valor de la función objetivo asociada costos), *BALANCE* (almacena el valor de la función objetivo asociada a balance de maquinaria), *DISPONIBILIDAD* (almacena el valor de la función objetivo asociada a disponibilidad de maquinaria), *OBJETIVO* (almacena el valor de la función ponderada que agrega los tres objetivos). Adicionalmente, para facilitar el cálculo

de la función objetivo asociada a los costos, se declaran de forma independiente las variables costo total de adquirir maquinaria (*cadquirir*), costo total de reubicar maquinaria (*creubicar*), costo total de descartar máquinas del sistema (*cdescartar*), costo fijo total asociado al uso de la maquinaria (*cfijo*) y, costo total de las transferencias intercelulares (*cti*).

- Ecuaciones (*Equations*): En este componente se declaran y presentan las relaciones utilizadas para las funciones objetivo y las restricciones del modelo. Si bien en lenguaje algebraico se denominan ecuaciones, también se pueden relacionar inecuaciones en este componente de la estructura de programación. Para el modelo propuesto se establecen nueve ecuaciones asociadas a la función objetivo (*función costo*, *función balance*, *función disponibilidad*, *función objetivo* y otras cinco ecuaciones que facilitan el cálculo de la función costo) y de doce a catorce (dependiendo del tamaño de la instancia a evaluar) asociadas a las restricciones.
- Declaraciones del modelo y de la solución del mismo: Antes de la declaración del modelo, se establecen restricciones para el número de iteraciones y tiempo de ejecución. Finalmente, se declara el modelo, se selecciona el solver a utilizar y se establece la función a minimizar (*función objetivo*).

7.3. Algoritmo NSGAII

Como método de solución alternativo se selecciona el algoritmo NSGAII. Este es programado en el software MATLAB2017A y la documentación del desarrollo del mismo, se encuentra disponible en el Apéndice C.

El algoritmo propuesto está dividido en siete funciones utilizadas de acuerdo a la estructura presentada en la *Figura 5* y dos funciones adicionales para reorganizar los datos, de tal forma que

se facilite la generación de la población inicial, así como el desarrollo de los operadores genéticos cruce y mutación.

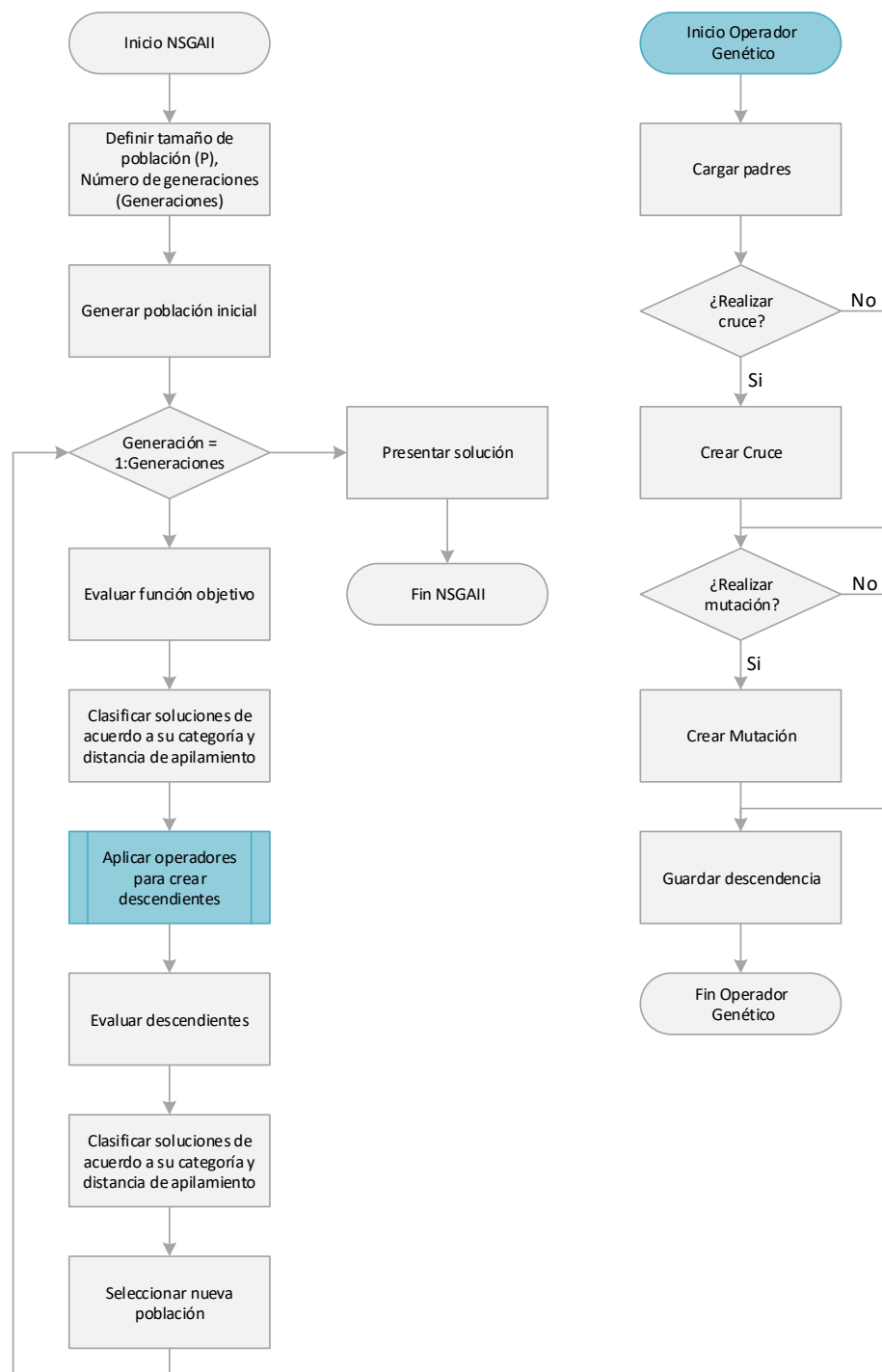


Figura 5. Estructura del algoritmo NSGAI implementado

7.3.1. Estructura de la solución

Considerando los conjuntos de variables de decisión presentes en el modelo (tres conjuntos binarios y cinco enteros) y la relación existente entre estos, se decide hacer uso de la variable de asignación binaria X_{ijmkt} para definir la estructura del cromosoma. De esta manera, el cromosoma corresponde a un vector de tamaño $I \times J \times M \times K \times T$, en el que cada posición representa una decisión de asignación, en la que se almacena la información correspondiente a la operación, tipo de producto, de máquina, celda y periodo de tiempo involucrado en dicha decisión. En la *Figura 6* se presenta la estructura del cromosoma; a manera de ejemplo, la primera posición del vector (color verde) ha tomado un valor de 1, lo que define que la primera operación del primer producto se va a realizar en la máquina uno, disponible en la primera celda y, esta decisión corresponde al primer periodo del horizonte de planeación. Los valores de 0 indican que no se realizará la asignación del producto correspondiente a esa posición.

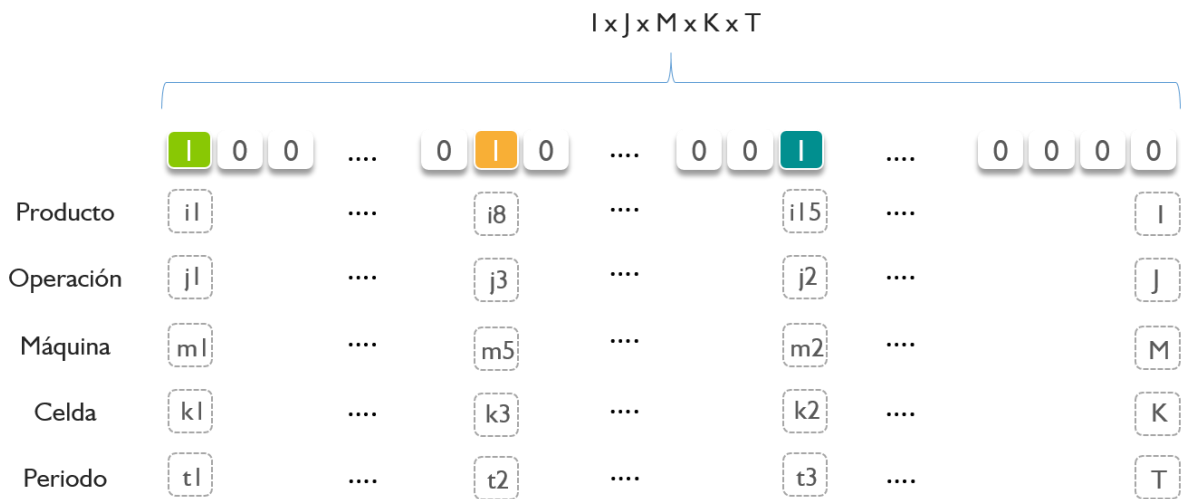


Figura 6. Estructura del cromosoma

Con el fin de facilitar el manejo de los datos a través del algoritmo, se decide hacer uso de una matriz auxiliar en la que se almacena la misma información del cromosoma. El tamaño de la matriz

corresponde a $M \times K$ filas, $I \times J \times T$ columnas. Cada columna representa una operación de cada tipo de producto para el periodo del horizonte de planeación correspondiente y, cada fila representa una máquina que puede o no estar disponible en la celda correspondiente. La estructura de la matriz se presenta en la *Figura 7*.

		I x J x T																
Periodo		1	1	1	...	2	2	2	2	...	T							
Operación		1	1	1	...	2	2	2	2	...	J							
Producto		1	2	3	...	15	16	17	18	...	I							
M x K	1	1	0	0	1	...	1	0	0	0	...	0						
	1	2	0	1	0	...	0	1	0	0	...	0						
	⋮	⋮	⋮															
	2	9	0	0	0	...	0	0	0	0	...	0						
	2	10	1	0	0	...	0	0	0	0	...	1						
	2	11	0	0	0	...	0	0	1	1	...	0						
	⋮	⋮	⋮															
	K	M	0	0	0	...	0	0	0	0	...							
	Celda	Máquina																

Figura 7. Estructura de la matriz auxiliar

7.3.2. Generación de la población inicial

Considerando que, de acuerdo a los supuestos del modelo, las máquinas son multipropósito, la generación de la población inicial se realiza de forma aleatoria para cada operación de cada tipo de producto, considerando como alternativas únicamente a las máquinas en las que es posible realizar la operación. En la *Figura 8* se presenta un ejemplo de la asignación inicial: la operación uno ($j1$) del producto uno ($i1$), en el primer periodo del horizonte de planeación, se puede realizar

en las máquinas uno, nueve, diez y once ($m1$, $m9$, $m10$ y $m11$); por tanto, se selecciona de forma aleatoria entre esas opciones para realizar la asignación inicial.

Ahora bien, considerando que otro supuesto del modelo es que toda la demanda debe ser cubierta, se debe realizar la asignación de todos los productos y sus operaciones correspondientes, dado lo anterior, el proceso de asignación se realiza para todas las columnas hasta que se recorran todas las operaciones de todos los productos en todos los periodos del horizonte de planeación.

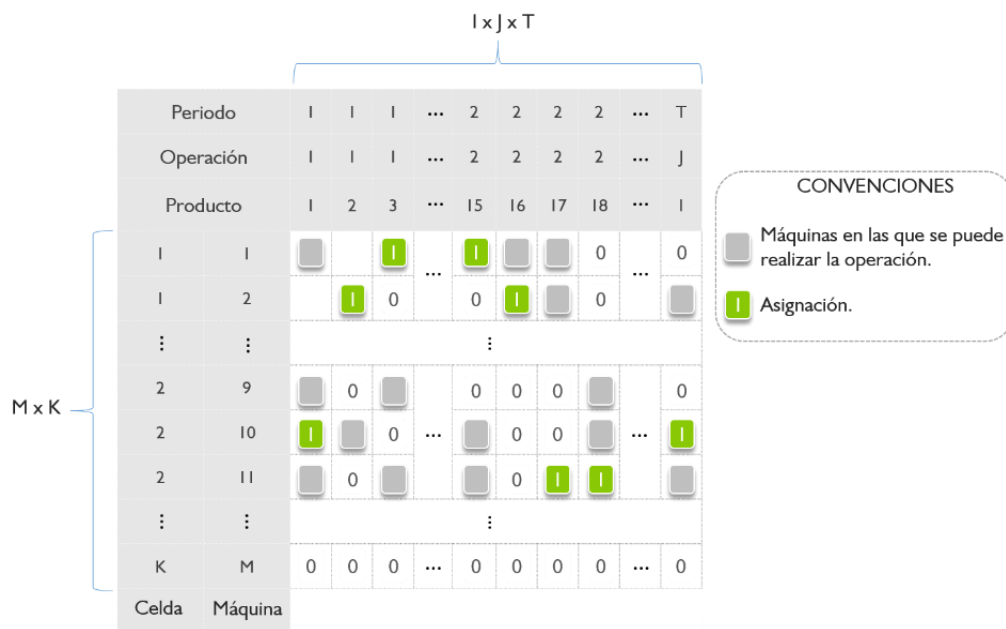


Figura 8. Ejemplo de la asignación inicial

7.3.3. Funciones de ajuste

Las funciones de ajuste (*fitness*) se establecen a partir de las funciones objetivo presentadas en el capítulo 6. A partir del cromosoma, se realiza el cálculo de las variables a_{mkt} , u_{mkt} , n_{mkt} , b_{mkt} y v_{mkt} , necesarias para evaluar las funciones de ajuste.

La primera función de ajuste (ecuación 22) corresponde a la evaluación de los costos de producción asociados a la decisión, más *Penalizaciones* (funciones de castigo). Estas funciones de castigo penalizan a cada solución que: (1) no cumple con el balance de maquinaria, (2) no se ajusta

a los tamaños de celda (mínimo o máximo) y, (3) presenta una capacidad instalada inferior a la demandada, ocasionando que la demanda no sea cubierta en su totalidad. Estas penalizaciones son establecidas a partir de las restricciones del modelo presentado en el capítulo 6.

$$\begin{aligned} \text{Min } Z_1 = & \sum_m \sum_k \sum_t (Ca_m a_{mkt} + R_m u_{mkt} + f_m n_{mkt} + Cd_m b_{mkt}) \\ & + H \left[\sum_t \sum_i D_{it} \left(\sum_{j=1}^{J-1} \sum_{k=1}^K \left| \sum_{m=1}^M X_{i(j+1)mkt} - \sum_{m=1}^M X_{i(j)mkt} \right| \right) \right] + \text{Penalizaciones} \end{aligned} \quad (22)$$

La segunda función de ajuste (ecuación 23) está asociada al balance de carga entre celdas, más *Penalizaciones*; en este caso se castiga a las soluciones que presenten un mayor desbalance de carga.

$$\begin{aligned} \text{Min } Z_2 = & \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K C_k * \sum_i \sum_j \sum_m X_{ijmkt} * D_{it} + \text{Penalizaciones} \\ \text{Sujeto a.} & \\ & \sum_{k=1}^K C_k = 0, C_k \neq 0 \end{aligned} \quad (23)$$

La tercera función de ajuste corresponde al cálculo del tiempo que las máquinas asignadas al sistema no se usan por daños y reparación. Esta función no tiene asignadas penalizaciones.

$$\text{Min } Z_3 = \sum_t \sum_k \sum_m n_{mkt} * Td_m * \frac{MTTR_m}{MTBF_m} \quad (24)$$

7.3.4. Determinación de la dominancia

Para determinar cuáles soluciones se deben clasificar como buenas y cuáles no, se considera el concepto de dominancia. Se dice que $A(x1|y1|z1)$ domina a $B(x2|y2|z2)$, si la solución $A(x1|y1|z1)$ es igual o mejor que $B(x2|y2|z2)$ en todos los objetivos (ecuación 25) y, es estrictamente mejor en por lo menos un objetivo (ecuación 26).

$$(x1 \leq x2, y1 \leq y2, z1 \leq z2) \quad (25)$$

$$(x1 < x2 \text{ o } y1 < y2 \text{ o } z1 < z2) \quad (26)$$

Si alguna de estas condiciones no se cumple, se dice que $A(x1|y1|z1)$ no domina $B(x2|y2|z2)$. En ese sentido, cuando se realiza un análisis entre un par de soluciones y no se cumple la primera condición para ninguna de éstas, se dice que son soluciones no dominadas. El procedimiento ahora consiste en clasificar todas las soluciones generadas, e identificar si son o no dominadas. El conjunto no dominado, está conformado por aquellas soluciones que no son dominadas por otras, y es llamado frente de Pareto. En el desarrollo del algoritmo, estas soluciones son clasificadas o categorizadas en la frontera uno. Las soluciones que no hacen parte de esta primera frontera, también deben ser clasificadas; para ello, se repite el procedimiento, excluyendo temporalmente las soluciones que ya han sido categorizadas.

La selección de soluciones o individuos para ser promocionados, se realiza considerando como primer criterio el frente o categoría a la que pertenece. En dado caso que este criterio no sea suficiente para realizar la selección, se establece como segundo criterio la distancia de apilamiento (*Crowding Distance*, cd) que representa el espacio de búsqueda alrededor de una solución, que no ha sido explorado, y se calcula de acuerdo a la ecuación 27; donde cd_i corresponde a la distancia de apilamiento de la solución i ; las expresiones $o(max)$, $o(min)$ representan el valor máximo y mínimo de la función objetivo; y, $o(i + 1)$, $o(i - 1)$ son las soluciones vecinas de la solución i . Al tratarse de tres objetivos, la distancia de apilamiento total corresponde a la suma de la distancia de apilamiento en cada uno de estos.

$$cd_i = cd_i + \frac{o(i + 1) - o(i - 1)}{o(max) - o(min)} \quad (27)$$

7.3.5. Operadores genéticos

Como operadores genéticos para generar las poblaciones descendientes se plantean el cruce y la mutación. Para el primer operador se trabaja con cruce de un punto (*Single Point Crossover*) y la mutación corresponde a un reemplazo aleatorio.

Cruce. Para el cruce se hace uso de la matriz auxiliar. Del conjunto de padres se eligen aleatoriamente cuatro, de los cuales se seleccionarán dos para ser cruzados. Esta selección se realiza por torneo, considerando como primer criterio de elección la categoría y, en caso de existir empate, se toma la decisión considerando la máxima distancia de apilamiento. Una vez seleccionados los padres, se calcula aleatoriamente un punto de cruce que señala la información que heredarán los hijos de cada padre. En la *Figura 9* se presenta un ejemplo de cruce de un punto entre dos padres y la información que heredan los hijos.

Mutación. Al igual que en el cruce, para la mutación de los descendientes se trabaja con la matriz auxiliar. Para este caso, la mutación consiste en modificar la asignación de la operación de un producto a una máquina. En ese sentido, aleatoriamente se selecciona una columna que guarda la información de la máquina y celda a la que se ha asignado la operación del producto correspondiente y, de forma aleatoria se reasigna esa operación a otra máquina. En la *Figura 10* se presenta un ejemplo de mutación, en este caso la operación dos ($j2$) del producto dieciséis ($i16$) se encuentra asignada a la máquina dos ($m2$) en la primera celda ($k1$), luego de la mutación esa misma operación es reasignada a la máquina tres ($m3$) de la celda dos ($k2$).

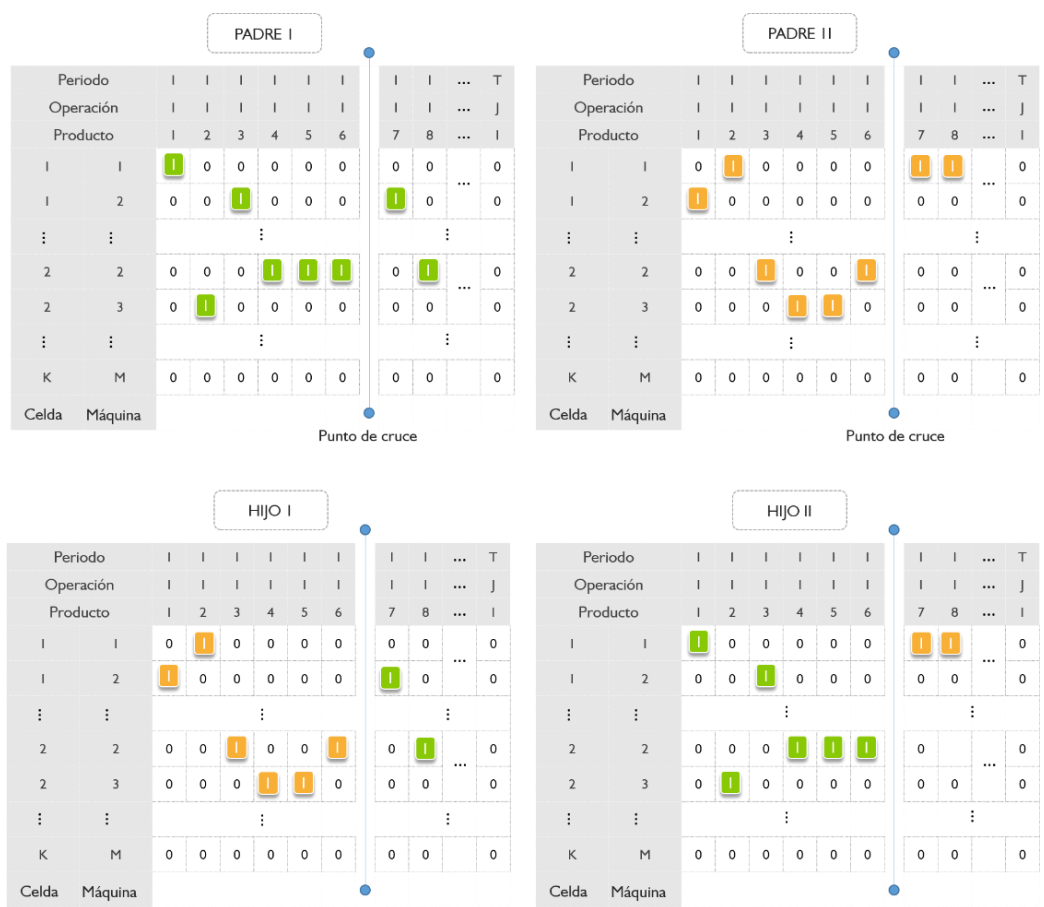


Figura 9. Ejemplo de cruce

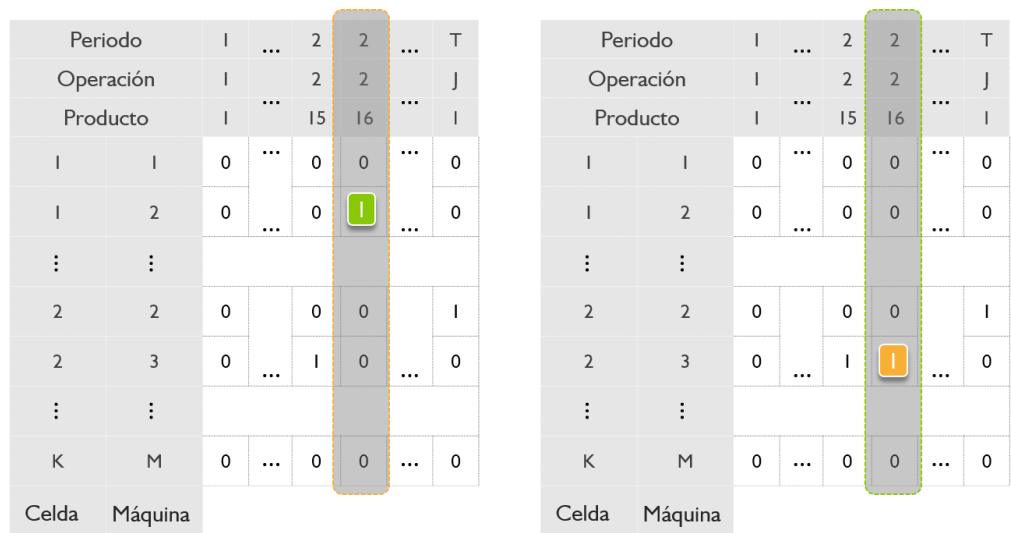


Figura 10. Ejemplo de mutación

8. Prueba del modelo

8.1. Modelo exacto

La formulación propuesta corresponde a un modelo de programación lineal entera mixta, en el que la cantidad de variables y restricciones a considerar, depende directamente de los conjuntos I , J , M , K y T , presentados en el capítulo 6. De esta manera, el cálculo de las variables involucradas en el modelo está dado por la ecuación 28 y la cantidad de restricciones se puede calcular a partir de la ecuación 29.

$$Cant.de\ variables = I * J * M * K * T + 5 * (M * K * T) + 2 * (I * J * K * T) \quad (28)$$

Cant.de restricciones

$$= 4 * (M * K * T) M * T + I * J * T + I * J * K * T + 2 * (I * J * M * K * T) + K * T \quad (29)$$

En la Tabla 6 se presenta la cantidad de variables y restricciones involucradas en cada grupo de instancias seleccionadas para el ejercicio computacional.

Tabla 6.

Cantidad de variables y restricciones para cada grupo de instancias

Grupo	Operaciones	Tipos de producto	Tipos de máquina	Cantidad de celdas	Número de periodos	Cantidad de variables	Cantidad de restricciones
A1	2	12	10	3	2	2028	3338
A2	3	12	12	3	3	5076	8685
A3	3	16	18	3	3	9450	16839
A4	3	20	22	3	3	13950	25347

Con el fin de verificar el modelo propuesto, se hace uso de los conjuntos de instancias presentados en la sección 7.1. A manera de ejemplo se detalla a continuación el desarrollo del ejercicio computacional del conjunto de instancias A1.

En el método de ponderaciones cada objetivo se multiplica por un peso o factor no negativo y, luego, todos los objetivos ponderados son agregados en una única función objetivo. La optimización de dicha función ponderada y agregada genera un elemento del conjunto eficiente. Considerando que la definición de dichas ponderaciones depende del tomador de decisiones, para ilustrar el ejercicio computacional se detallan tres escenarios (Ver Tabla 7) para los valores relativos de cada objetivo.

Tabla 7.

Ponderación de objetivos para los escenarios de prueba

Escenario	Z_1	Z_2	Z_3
1	0,1	0,8	0,1
2	0,34	0,33	0,33
3	0,2	0,4	0,4

Se establecen dos criterios de parada, el tiempo de ejecución y el número de iteraciones realizadas. El programa detiene su ejecución una vez se cumple alguno de estos criterios, arrojando los resultados presentados en la Tabla 8.

Tabla 8.

Solución obtenida en GAMS para los escenarios del problema de prueba A1

Escenario	Z_1	Z_2	Z_3	Función Objetivo agregada
1	114021	628	1619,46	12066,44
2	109421,2	2578	1668,98	38604,71
3	109808	2356	1668,98	23571,59

Ahora bien, si se considera que la importancia relativa que el tomador de decisiones le da a cada uno de los objetivos, es la presentada en el escenario 1, se tiene como resultado que se deben adquirir nueve máquinas en el primer periodo. Para el segundo periodo se hace uso de las mismas máquinas; sin embargo, por los cambios generados en el plan de producción, es necesario reubicar dos máquinas, la máquina 6 pasa de la celda 2 a la celda 3 y, la máquina 5 pasa de la celda 3 a la celda 2. Esta asignación es presentada en la *Figura 11*.

En la *Figura 12* y *Figura 13* se presenta la asignación de productos y operaciones a celdas y máquinas para el primer y segundo periodo, respectivamente. En las filas se encuentran los productos y en las columnas las máquinas asignadas a cada celda. El número en corchete, representa la operación del producto asignada a la máquina y celda correspondiente.

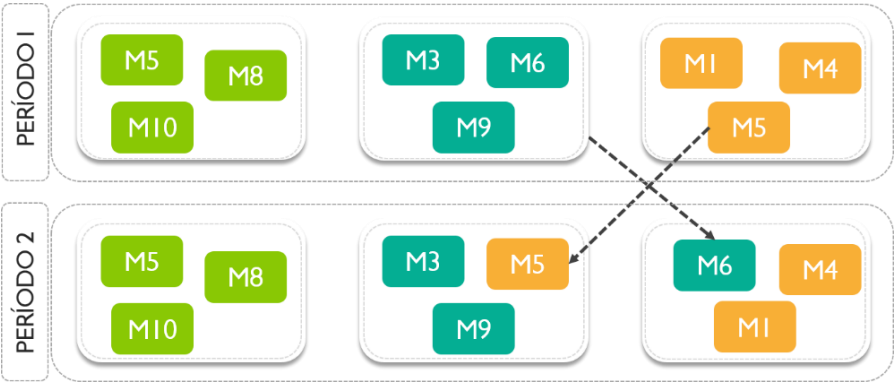


Figura 11. Configuración de celdas para el escenario 1.

Producto	Celda 1			Celda 2			Celda 3		
	M5	M8	M10	M3	M6	M9	M1	M4	M5
1	{1}		{2}						
2				{1}-{2}					
3		{1}	{2}						
4		{1}	{2}						
5							{1}	{2}	
6					{1}	{2}			
7							{2}	{1}	
8							{1}-{2}		
9							{2}	{1}	
10	{1}		{2}						
11				{1}		{2}			
12						{1}-{2}			

Figura 12. Matriz de asignación escenario 1 - periodo 1

Producto	Celda 1			Celda 2			Celda 3		
	M5	M8	M10	M3	M5	M9	M1	M4	M6
1					{1}-{2}				
2				{1}-{2}					
3				{2}		{1}			
4	{2}	{1}							
5								{1}	{2}
6							{1}	{2}	
7	{1}	{2}							
8								{2}	{1}
9							{2}	{1}	
10	{1}		{2}						
11				{1}		{2}			
12						{1}-{2}			

Figura 13. Matriz de asignación escenario 1 - periodo 2

Los demás conjuntos de instancias (A2, A3 y A4) también fueron implementados en el software GAMS 23.5.1. Sin embargo, en estos casos no se llegó a la mejor solución para los escenarios planteados en la Tabla 7. Los resultados de la ejecución se encuentran en la Tabla 9, Tabla 10 y Tabla 11.

Tabla 9.

Resultados obtenidos en GAMS para los escenarios del problema de prueba A2

Escenario	Z_1	Z_2	Z_3	Función Objetivo agregada	Tiempo de ejecución (s)	Número de iteraciones	GAP relativo
1	139849,5	1026	2899,1	15095,66	6447	74832807	21,46%
2	139849,5	6318	2899,1	50590,47	6327	60674792	20,32%
3	115943,6	4878	2127,66	25990,98	9220	75119277	6,57%

Tabla 10.

Resultados obtenidos en GAMS para los escenarios del problema de prueba A3

Escenario	Z_1	Z_2	Z_3	Función Objetivo agregada	Tiempo de ejecución (s)	Número de iteraciones	GAP relativo
1	182200,2	2238	4450,81	20455,50	10193	26901126	33,69%
2	189673,8	3678	4539,92	67201,01	20225	146444517	29,81%
3	195998,9	2922	4348,49	42107,97	17824	126622465	32,41%

Tabla 11.

Resultados obtenidos en GAMS para los escenarios del problema de prueba A4

Escenario	Z_1	Z_2	Z_3	Función Objetivo agregada	Tiempo de ejecución (s)	Número de iteraciones	GAP relativo
1	167439,1	459	3895,28	17500,63	86400	550902367	36,56%
2	147004,2	171	3458,11	51179,03	86400	501473848	26,1%
3	147932,8	2655	3388,88	32004,11	34153	224347290	28,39%

8.2. Algoritmo NSGA-II

Para los parámetros probabilidad de cruce y mutación, se hace uso de los valores propuestos por Rabbani et al., (2019); de otra parte, se ejecutan dos escenarios para el número generaciones y tres para el tamaño de la población (ver Tabla 12). Como métricas de valoración, se propone utilizar la evolución de la función de ajuste (costos, balance y disponibilidad), así como la cardinalidad del frente de Pareto. El ejercicio computacional se desarrolla en el software Matlab R2017a en un equipo con procesador Intel® Core™ i7-6820HQ CPU2.7GHz, memoria RAM de 8.00 GB y sistema operativo Windows 10.

En ese sentido, en las *Figura 14*, *Figura 15* y *Figura 16*, se presentan los resultados de los valores medios de cada una de las funciones objetivo para cada escenario. Se observa que, para la variación promedio del valor de la función objetivo asociada al balance, no existe una clara diferencia respecto a la cantidad de generaciones utilizada. Con respecto a las funciones asociadas al costo de la decisión y la disponibilidad de maquinaria, se observa que, en el escenario de 100 generaciones, se presentan fuertes cambios en la tendencia de las funciones para un tamaño de población igual a 50 individuos. Dicho lo anterior, en las figuras se evidencia que la evolución de

los valores de las funciones objetivo presenta un mejor comportamiento para una población de 150 individuos y 100 generaciones.

Tabla 12.

Parámetros para el algoritmo NSGAI

Parámetro	Valor
Probabilidad de cruce	0,85
Probabilidad de mutación	0,3
Tamaño de población	{50, 100, 150}
Número de generaciones	{50, 100}

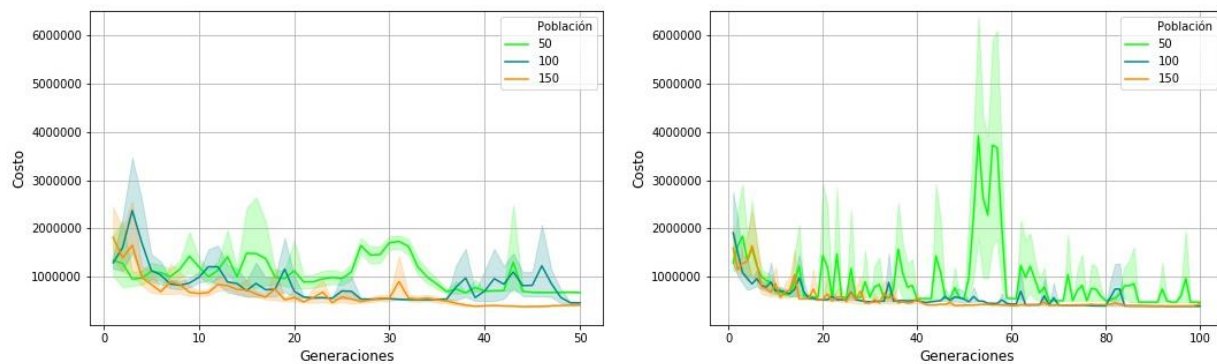


Figura 14. Variación del promedio de la función costo para 50 y 100 generaciones

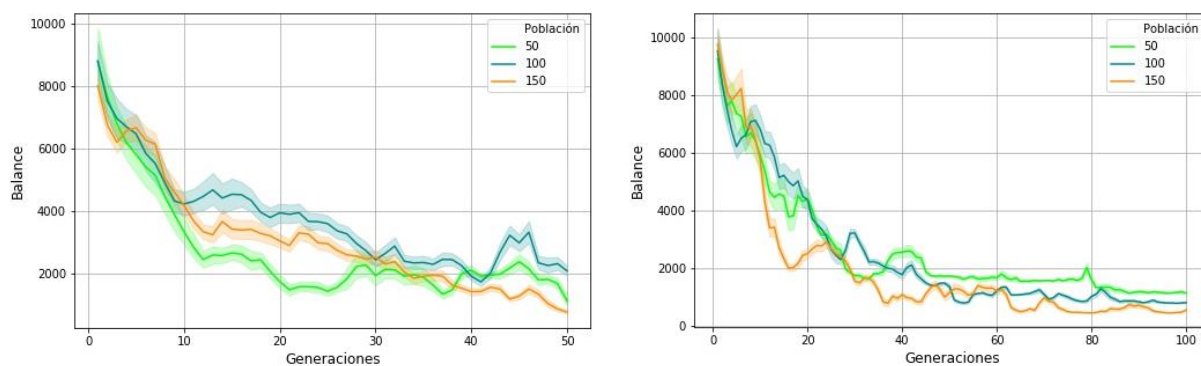


Figura 15. Variación del promedio de la función balance para 50 y 100 generaciones

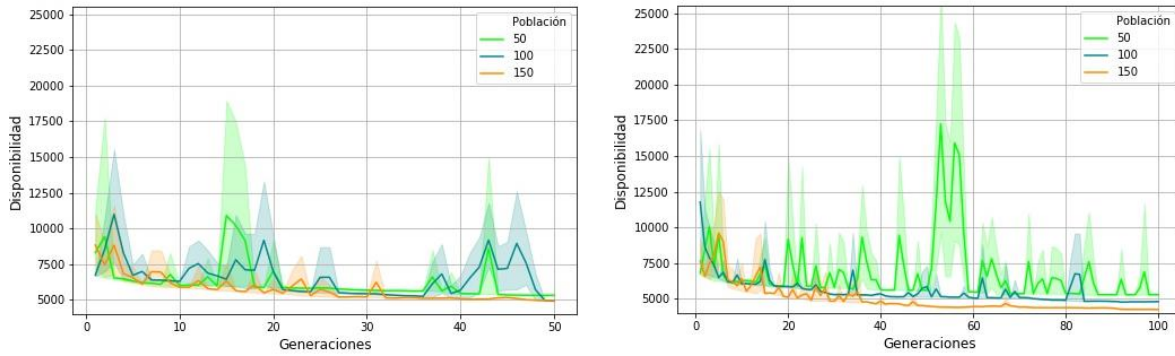


Figura 16. Variación del promedio de la función disponibilidad para 50 y 100 generaciones

En cuanto al porcentaje de cardinalidad, en la *Figura 17* se presentan los resultados. Si bien se puede observar que los histogramas para 50 generaciones en los tres tamaños de población están más centrados, se debe considerar que esta información es relativa a la cantidad de generaciones. De otra parte, considerando en conjunto los resultados de los valores medios de las funciones objetivo y la cardinalidad relativa, se decide realizar el ejercicio computacional con una población de 150 individuos y 100 generaciones. Cabe resaltar que, de acuerdo a la información presentada en la Tabla 13 esta decisión implica un tiempo de cómputo mayor que en los otros escenarios; no obstante, se decide que este no es un criterio para discriminar debido a la magnitud y diferencia entre los tiempos para cada escenario.

Tabla 13.

Tiempo de cómputo del algoritmo NSGAI

Número de generaciones	Tamaño de población	Tiempo de cómputo (s)
50	50	33,49
50	100	72,18
50	150	113,57
100	50	70,13
100	100	138,42
100	150	212,31

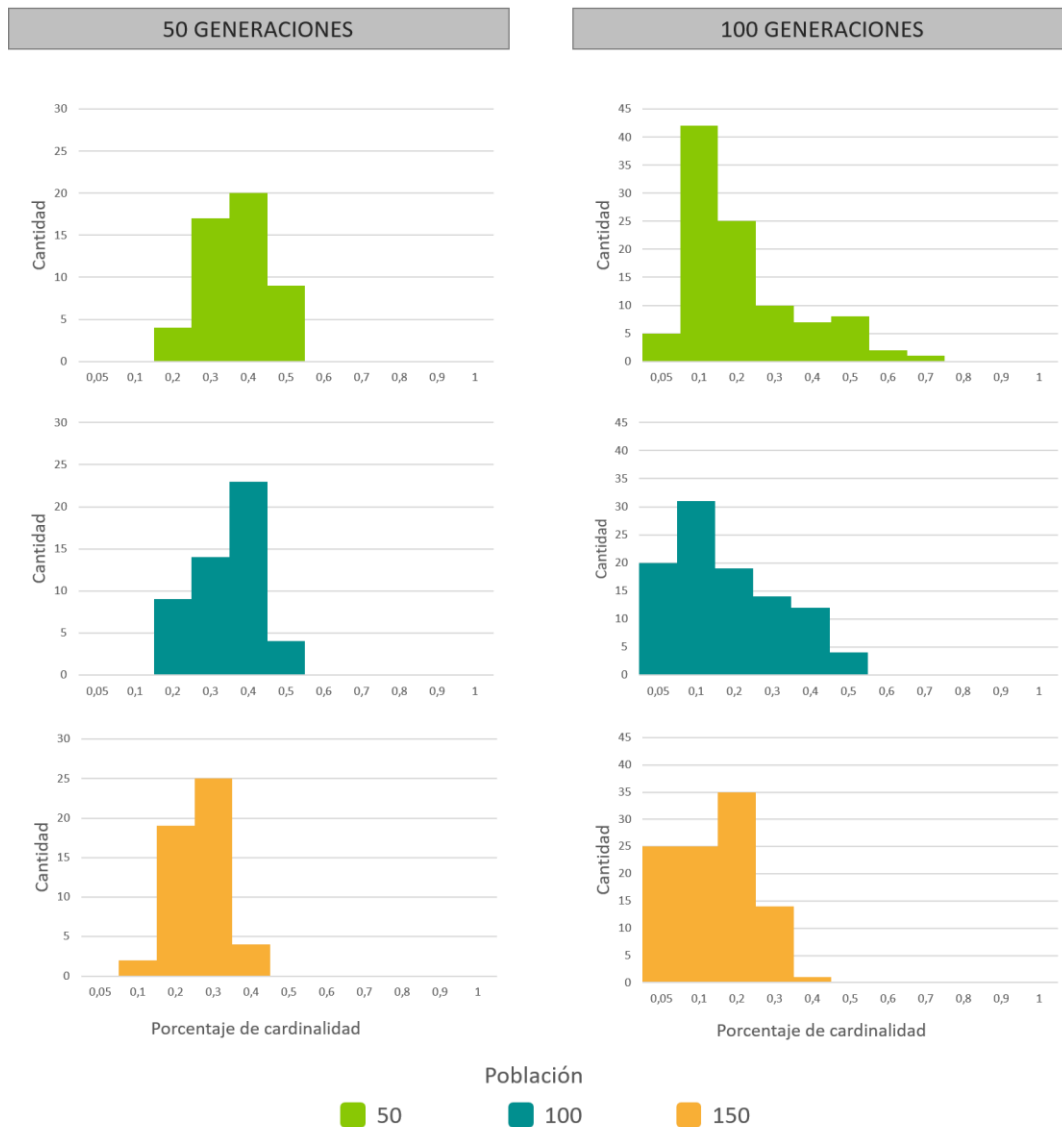


Figura 17. Histograma del porcentaje de cardinalidad para cada tamaño de población y número de generaciones

9. Preparación para aplicar el modelo

Con el fin de evaluar los resultados obtenidos con el algoritmo propuesto, a manera de ejemplo se desarrolla el problema A4. Los datos de entrada empleados se generan siguiendo las características presentadas en el capítulo 7. En cuanto a los parámetros del algoritmo NSGAI se plantea utilizar la probabilidad de mutación y cruce presentada por Rabbani et al., (2019) quienes determinan estos

parámetros a partir de un diseño de experimentos. De otra parte, de acuerdo a lo establecido en el capítulo 8, el algoritmo será implementado con 100 generaciones y una población de 150 individuos.

Una vez ejecutado el algoritmo, se selecciona una solución del frente de Pareto para explicar la decisión. De acuerdo con la solución seleccionada, la configuración de celdas (máquinas disponibles) para cada periodo del horizonte de planeación se presenta en la *Figura 18*.



Figura 18. Configuración de celdas

En la *Figura 19* se detallan las características de conformación de cada celda en cada periodo, es decir, máquinas adquiridas, máquinas descartadas y, máquinas reubicadas en cada periodo y, para evidenciar la reconfiguración de celdas, se presenta el movimiento de máquinas de un periodo a otro. De otra parte, en las Figuras 20, 21, y 22 se presentan las asignaciones de operaciones-productos a máquina-celda, para cada periodo del horizonte de planeación.

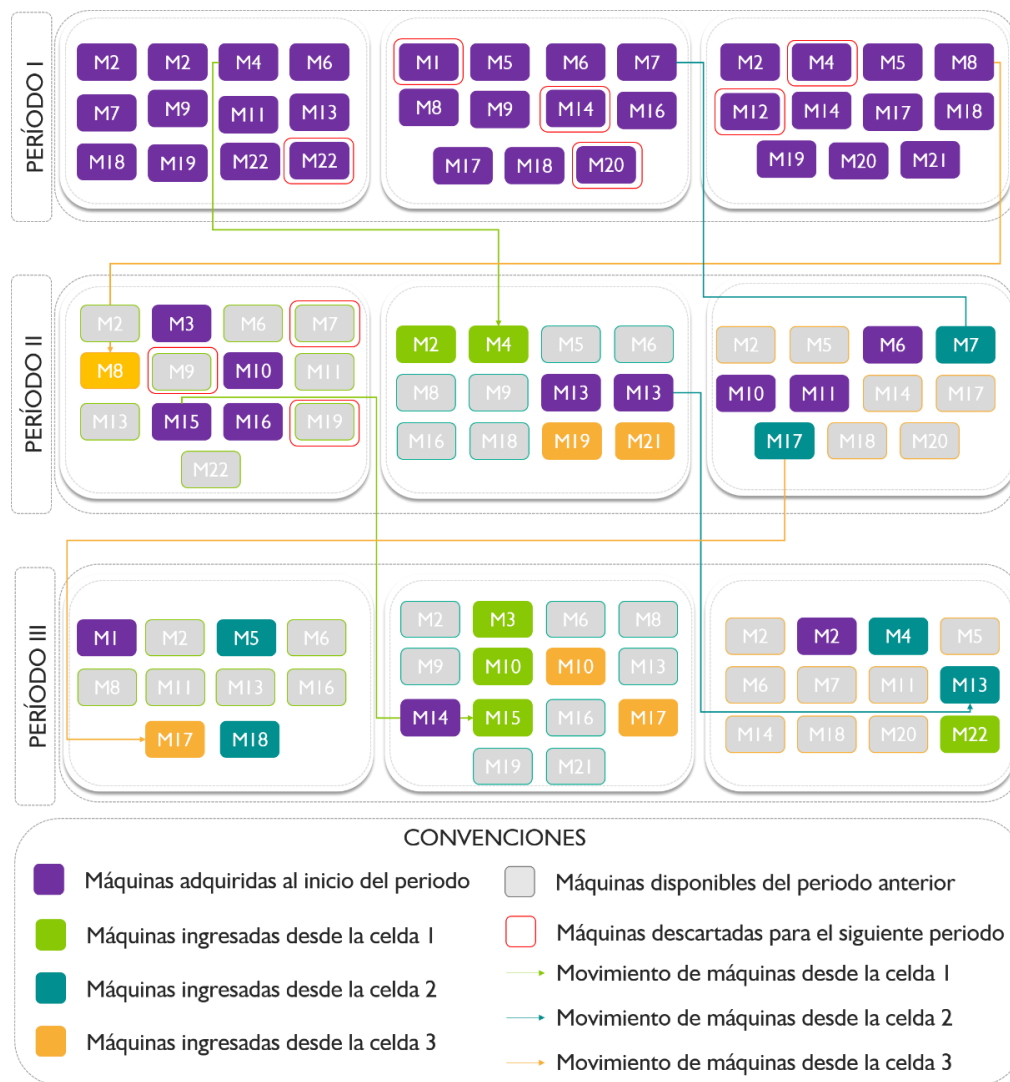


Figura 19. Balance de maquinaria

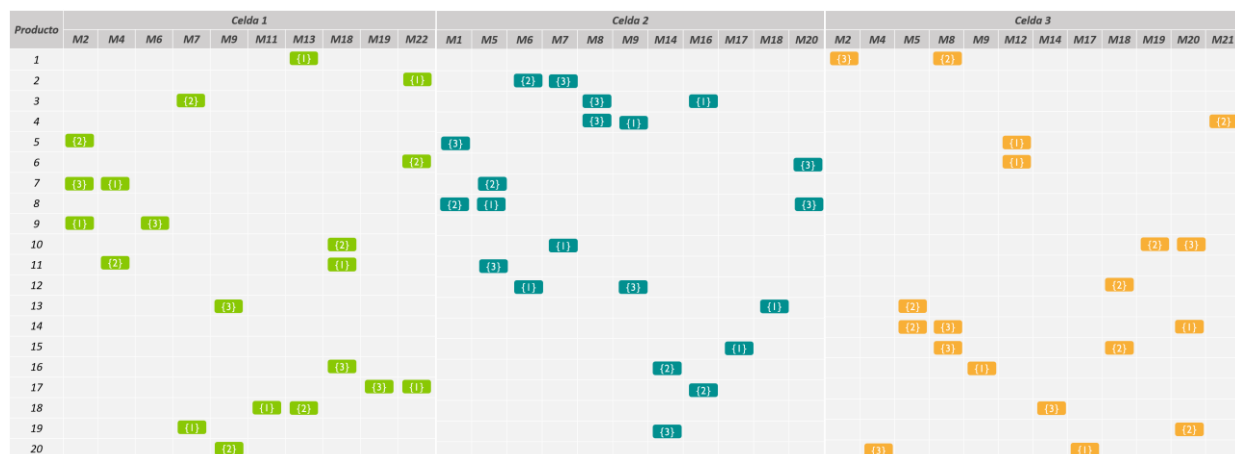


Figura 20. Matriz de asignación – Problema A4 – Periodo 1

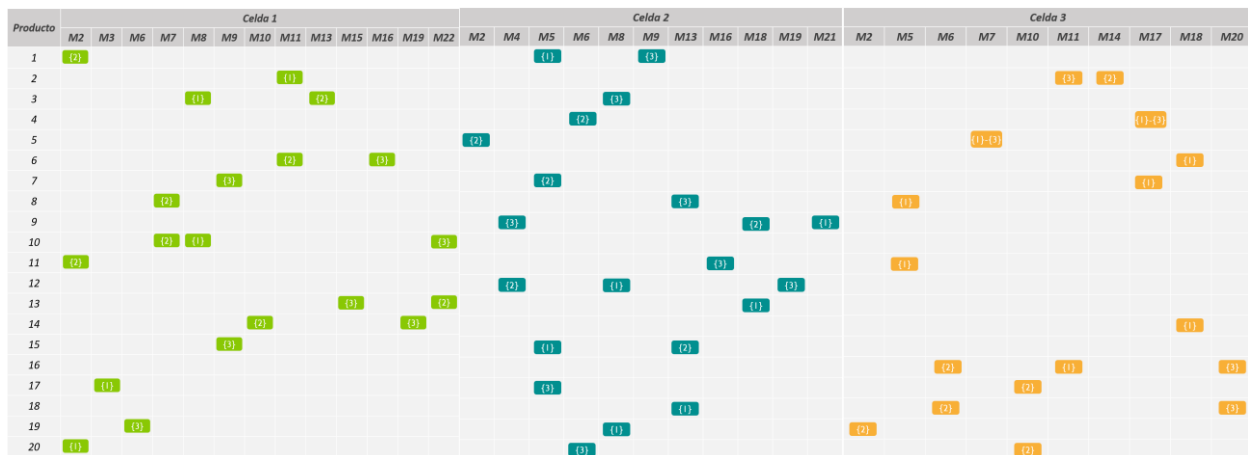


Figura 21. Matriz de asignación – Problema A4 – Periodo 2

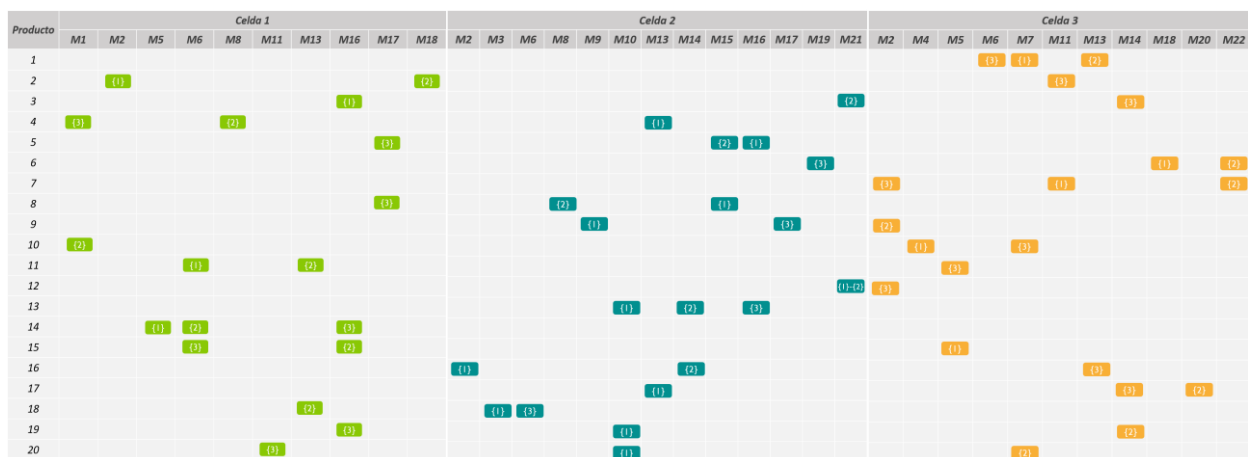


Figura 22. Matriz de asignación – Problema A4 – Periodo 3

10. Discusión

El presente proyecto de investigación se desarrolló con el propósito de dar solución al problema de celdas de manufactura dinámicas considerando balance de carga y disponibilidad de maquinaria. Para tal fin, se propone una metodología que parte de la revisión de la literatura científica existente, seguida de la formalización de un modelo matemático que represente el

problema, en tercera instancia se propone una estrategia para dar solución y, finalmente se evalúa la funcionalidad del modelo y de la estrategia de solución.

En la revisión de literatura realizada se identifica que, para problemas con un único objetivo, la minimización de diferentes componentes del costo asociado al proceso de producción, es el criterio de optimización utilizado con mayor frecuencia. Sin embargo, considerando la complejidad de los sistemas de manufactura, también se identifican formulaciones que involucran en el modelo matemático más de un criterio de optimización, buscando considerar factores más cercanos a la realidad de un contexto particular. En ese sentido, los componentes de costo, balance de carga de trabajo y disponibilidad de maquinaria, han sido abordados simultáneamente en diversos problemas, pero considerados en diferentes partes de la estructura del modelo.

Estos antecedentes son el marco de referencia para el desarrollo de la presente investigación, reafirmando la importancia de minimizar los costos asociados a la producción, y, a su vez, procurando equilibrar la carga de trabajo buscando que el sistema funcione sin mayores problemas. Adicional a lo anterior, es necesario considerar la disponibilidad de maquinaria teniendo en cuenta que es un factor que influye en el rendimiento de los sistemas de manufactura. Por consiguiente, existe un campo de investigación asociado a identificar otros atributos propios de éstos sistemas a incorporar en la decisión de diseño, que, al igual que el balance de carga y disponibilidad de maquinaria, aproximen el modelo a la realidad particular de un entorno productivo.

En cuanto a estrategias de solución se encuentra que el algoritmo genético es el enfoque más utilizado por los investigadores para abordar el problema; por tanto, en la presente investigación se desarrolló un algoritmo genético para problemas multiobjetivo conocido como NSGA-II. Particularmente, se propone para futuros trabajos implementar otras estrategias de solución,

incorporando a su vez el desarrollo de una interfaz con el fin de trasladar las soluciones y el análisis de las mismas al tomador de decisiones.

Dicho lo anterior, en el modelo de decisión se involucra como criterio de optimización la variación del balance de carga asignada a las celdas, teniendo presente que este criterio permite evaluar el rendimiento de las celdas formadas. Adicionalmente, considerando que la configuración de celdas de manufactura hace parte del diseño de un sistema productivo, el balance de carga tiene un gran impacto en el cumplimiento del cronograma y la sincronización de la producción, componentes del sistema que se analizan en etapas posteriores como la planeación y secuenciación de trabajos. Debido a su importancia en este contexto, el balance de carga ha sido trabajado por diversos autores como Won & Logendran (2015); Rabbani et al., (2019); Torkul & Ustun, (2015); Wu et al., (2018); sin embargo, de acuerdo a la revisión de literatura realizada, en la mayor parte de los estudios encontrados se identifica una formulación no lineal, ejemplo de ello es el trabajo de Saeidi et al., (2014), quienes utilizando el módulo o valor absoluto, calculan la desviación total absoluta de la carga en todas las celdas. En ese sentido, la propuesta de esta investigación para abordar el balance de carga, corresponde al segundo objetivo donde se relacionan las cargas asignadas a cada celda a través de una combinación lineal cumple con las propiedades de un contraste; lo anterior permite mantener una estructura de ecuaciones lineales, por lo cual se garantizan las condiciones de optimalidad.

De otra parte, considerando que en los últimos años se ha intentado delegar mayor cantidad de actividades a las máquinas, es necesario que las herramientas que apoyan la toma de decisiones involucren componentes asociados a la confiabilidad, teniendo presente que, esta hace referencia a la probabilidad de que un equipo o sistema desempeñe la función que tiene asignada, durante un periodo de tiempo establecido y bajo condiciones estándares de operación (Mesa Grajales et al.,

2006). En ese sentido, al aumentar la confiabilidad en el sistema, se puede aumentar la disponibilidad del mismo, es decir, aumentar el tiempo que el sistema cumple con las condiciones para operar o producir. En esta investigación, se relaciona el tiempo medio de reparación (MTTR) y el tiempo medio entre fallas (MTBF) para determinar la proporción total de tiempo total de inactividad de las máquinas, es decir, el tiempo que no están operando; al minimizar esta relación se está maximizando la disponibilidad del sistema. Para futuros trabajos, se pueden plantear otras estrategias para involucrar no solo la confiabilidad y disponibilidad del sistema, sino también la mantenibilidad del mismo. Adicionalmente, es apropiado involucrar componentes estocásticos asociados a la forma de modelar el tiempo medio entre fallas y tiempo medio de reparación.

En cuanto al desarrollo del ejercicio computacional, se plantearon dos estrategias para dar solución al modelo propuesto, que a su vez fueron verificadas en estructura y funcionalidad, considerando los conjuntos de instancias presentadas por Rabbani et al., (2019). La primera estrategia corresponde a un modelo de ponderación de objetivos implementado en el software GAMS; en ese sentido, se encuentra que, si bien se verifica que el modelo efectivamente es funcional, se evidencia la necesidad de involucrar al tomador de decisiones en el desarrollo y delimitación del modelo. Lo anterior toma mayor fuerza considerando la particularidad de cada sistema; por ejemplo, en un contexto específico puede darse mayor importancia a evitar el transporte de materiales, con lo que, la penalización por la existencia de este componente es alta, ocasionando que se les reste importancia a otros atributos como la subutilización de la maquinaria y con ello, la disponibilidad de espacio para la disposición física de los elementos. Lo anterior se resalta como oportunidad de investigación, debido a que, en el proceso de modelado, las instancias utilizadas son determinísticas, por consiguiente, en futuros trabajos se pueden involucrar componentes estocásticos para la definición de parámetros, aún con un mayor aporte si se realizan

trabajos de campo para caracterizar algunos de estos datos de entrada en tipos específicos de industrias.

Finalmente, como segunda de estrategia de solución, se plantea un algoritmo genético para problemas multiobjetivo que fue desarrollado en el software MATLAB. Al implementar el algoritmo NSGA-II se genera un conjunto de alternativas, de las cuales, el tomador de decisiones puede seleccionar la que considere se adecúa más a sus necesidades y contexto particular. Por consiguiente, para futuros trabajos se propone integrar una interfaz, de tal manera que esas soluciones puedan ser presentadas al tomador de decisiones mediante estrategias gráficas.

11. Conclusiones

En el presente trabajo se aborda el problema de formación de celdas de manufactura dinámicas, a través del desarrollo de un modelo de optimización multiobjetivo en el que se integran simultáneamente la minimización de costos asociados a la producción, minimización de la variación del balance de carga de trabajo, y maximización de la disponibilidad de maquinaria que hace parte del sistema.

A partir de la revisión realizada se caracterizan las formulaciones matemáticas utilizadas para abordar el DCFP, encontrando que los principales objetivos de diseño para modelos con una única función objetivo son la minimización de costos asociados a la producción y la minimización de elementos excepcionales. De otra parte, para formulaciones multiobjetivo se encuentra que, adicional a la minimización de costos, se han involucrado componentes asociados al balance de carga de trabajo, utilización de maquinaria, elementos excepcionales, entre otros. Asimismo, se

establece que el balance de carga de trabajo y la disponibilidad de maquinaria, han sido trabajados simultáneamente en diversos problemas, pero considerados en diferentes partes de la estructura del modelo, es decir, mientras uno de ellos es usado como criterio de optimización (función objetivo), los otros hacen parte las familias de restricciones como parámetros de entrada. En cuanto a las estrategias de solución, se identifica que el algoritmo genético es el enfoque más utilizado para dar solución al problema.

Ahora bien, la formulación propuesta corresponde a un modelo de programación lineal entera mixta en el que se consideran tres conjuntos de variables binarias (dos de éstos variables auxiliares) asociadas al proceso de formación de celdas y asignación de productos y, cinco tipos de variables enteras que representan el cambio en la configuración de las celdas para los diferentes periodos del horizonte de planeación. Respecto a los criterios de optimización, se propone: una primera función asociada a los costos de maquinaria y movimiento de materiales; la función de balance de carga con la que se busca minimizar la variación en la carga de trabajo asignada a cada celda; y, la función con la que se espera maximizar la disponibilidad de maquinaria.

Para dar solución al problema se plantean dos estrategias de solución computacionales basadas en el modelo matemático: Modelo exacto mediante ponderación de objetivos y Algoritmo NSGAI. En cuanto al modelo exacto se encuentra que, debido a la cantidad de conjuntos de variables y restricciones que se generan a medida que crece el problema, se hace necesario implementar un método diferente para generar soluciones prácticas a problemas cuyo tamaño, con esta estrategia de solución, representa inversiones en de tiempo y memoria RAM altas y no garantiza la convergencia del modelo. En ese sentido, el algoritmo NSGAI se desarrolla para generar conjuntos de soluciones no dominadas o eficientes, a partir de las cuales el tomador de

decisiones puede seleccionar la que, según su criterio, se adapte de mejor manera a su contexto particular.

En cuanto a la valoración del desempeño del algoritmo, se comparan los valores medios de las funciones de ajuste y la cardinalidad del frente de Pareto, generadas por seis escenarios en los que se varía el tamaño de población y el número de generaciones. Se encuentra que, el algoritmo presenta un mejor desempeño con tamaños de población superiores para los dos escenarios de número de generaciones, esto cobra sentido, considerando la estructura del cromosoma y la estrategia de generación de la población inicial, para la que se considera asignar operaciones y productos a las máquinas en las que pueden ser realizados.

Respecto a la cardinalidad, se encuentra que, a mayor número de generaciones se presenta un mayor porcentaje de soluciones no dominadas, por tanto, el tomador de decisiones tendría un conjunto más amplio de elementos para seleccionar. De otra parte, se plantea trabajar con una probabilidad de mutación de 0.3, encontrando que, para algunos escenarios, éste parámetro favorece la diversificación del espacio de búsqueda considerando la naturaleza altamente combinatoria del problema; lo anterior se evidencia en las variaciones de las funciones de ajuste asociadas a las funciones de costo y disponibilidad.

Para finalizar, con el desarrollo metodológico y los resultados presentados en los capítulos anteriores, se valida la proposición planteada en este proyecto: “A partir del modelo matemático propuesto es posible integrar los costos asociados a la producción, balance de carga y disponibilidad de maquinaria en la decisión del diseño de celdas de manufactura dinámicas”. Asimismo, a partir de los resultados parciales de este proyecto se da la publicación de un artículo de revisión y, la presentación de dos ponencias en dos eventos académicos internacionales.

Para futuros trabajos se propone el desarrollo de una interfaz, así como la integración del tomador de decisiones en la definición de los parámetros del modelo, con el fin de determinar la importancia relativa entre los elementos que hacen parte de cada uno de los criterios de optimización. En ese sentido, considerando la necesidad de integración de la academia con el sector productivo, se puede procurar el desarrollo de sistemas de apoyo a la toma de decisiones (*Decision Support System, DSS*) los cuales permitan no sólo comparar las alternativas desde el punto de vista de las funciones objetivo, sino muestren el diseño de planta propuesto, así como sus cambios en el tiempo.

Referencias Bibliográficas

- Aalaei, A., & Davoudpour, H. (2017). A robust optimization model for cellular manufacturing system into supply chain management. *International Journal of Production Economics*, 183, 667–679. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.01.014>
- Aghajani, A., Ahmadi Didehbani, S., Zadahmad, M., Hasan Seyedrezaei, M., & Mohsenian, O. (2014). A multi-objective mathematical model for cellular manufacturing systems design with probabilistic demand and machine reliability analysis. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 75, 755–770. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6084-0>
- Aghajani, M., Keramati, A., Moghadam, R. T., & Mirjavadi, S. S. (2016). A mathematical programming model for cellular manufacturing system controlled by kanban with rework consideration. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83(5–8), 1377–1394. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7635-8>
- Aliabadi, J., Aryanezhad, M. B., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2010). A comparative study for designing cellular manufacturing systems with assembly aspects by a new approach. *IEEM2010 - IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 1747–1751. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2010.5674571>
- Aljuneidi, T., & Bulgak, A. A. (2016). A mathematical model for designing reconfigurable cellular hybrid manufacturing-remanufacturing systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87(5–8), 1585–1596. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9141->

z

- Aljuneidi, T., & Bulgak, A. A. (2017). Designing a Cellular Manufacturing System featuring remanufacturing, recycling, and disposal options: A mathematical modeling approach. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 19, 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2017.04.005>
- Amiri, A. S., & Ghodsi, R. (2010). A variable neighborhood search method for an integrated cellular manufacturing systems with production planning and system reconfiguration. *AMS2010: Asia Modelling Symposium 2010 - 4th International Conference on Mathematical Modelling and Computer Simulation*, 181–186. <https://doi.org/10.1109/AMS.2010.47>
- Arghish, O., & Branch, G. (2016a). Designing cellular manufacturing system under risk conditions. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 8, 1308–3120.
- Arghish, O., & Branch, G. (2016b). Designing Cellular Manufacturing System Under Risk Conditions. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 8, 1308–3120.
- Ariafar, S., Ismail, N., Tang, S. H., Ariffin, M. K. A. M., & Firoozi, Z. (2011). Facility layout design for hybrid cellular manufacturing systems. *International Journal of Physical Sciences*, 6(14), 3551–3556. <https://doi.org/10.5897/IJPS11.1012>
- Arıkan, F., & Güngör, Z. (2009a). Modeling of a manufacturing cell design problem with fuzzy multi-objective parametric programming. *Mathematical and Computer Modelling*, 50(3–4), 407–420. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2009.04.017>
- Arıkan, F., & Güngör, Z. (2009b). Modeling of a manufacturing cell design problem with fuzzy multi-objective parametric programming. *Mathematical and Computer Modelling*, 50(3–4), 407–420. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2009.04.017>

- Arkat, J., Abdollahzadeh, H., & Ghahve, H. (2012a). A new branch and bound algorithm for cell formation problem. *Applied Mathematical Modelling*, 36(10), 5091–5100. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.12.047>
- Arkat, J., Abdollahzadeh, H., & Ghahve, H. (2012b). A new branch and bound algorithm for cell formation problem. *Applied Mathematical Modelling*, 36(10), 5091–5100. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.12.047>
- Arkat, J., Farahani, M. H., & Hosseini, L. (2012). *Integrating cell formation with cellular layout and operations scheduling*. 637–647. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3733-4>
- Arkat, J., Hosseini, L., & Farahani, M. H. (2011). Minimization of exceptional elements and voids in the cell formation problem using a multi-objective genetic algorithm. *Expert Systems with Applications*, 38(8), 9597–9602. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.01.161>
- Aryanezhad, M. B., & Aliabadi, J. (2010). *Considering Assembly Operations and Product Structure for Manufacturing Cell Formation*. 4(2), 174–178.
- Aryanezhad, M., Deljoo, V., & Mirzapour Al-e-hashem, S. (2009). Dynamic cell formation and the worker assignment problem: a new model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 41(3–4), 329–342. <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1479-4>
- Askin, R. G. (2013). Contributions to the design and analysis of cellular manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 51(23–24), 6778–6787. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.825745>
- Azadeh, A., Moghaddam, M., Nazari-Doust, B., & Jalalvand, F. (2015). Fuzzy and stochastic mathematical programming for optimisation of cell formation problems in random and uncertain states. *Int . J . Operational Research J . Operational Research European Journal*

of Operational Research and International Journal of Production Research, 22(2), 129–147.
<https://doi.org/10.1504/IJOR.2015.067341>

Azadeh, A., Pashapour, S., & Abdolhossein Zadeh, S. (2016). Designing a cellular manufacturing system considering decision style, skill and job security by NSGA-II and response surface methodology. *International Journal of Production Research*, 54(22), 6825–6847.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1178407>

Azadeh, A., Pashapour, S., & Zadeh, S. A. (2016). Designing a cellular manufacturing system considering decision style , skill and job security by NSGA-II and response surface methodology. *International Journal of Production Research*, 7543(May), 0.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1178407>

Azadeh, A., Rezaei-Malek, M., Evazabadian, F., & Sheikhalishahi, M. (2015). Improved design of CMS by considering operators decision-making styles. *International Journal of Production Research*, 53(11), 3276–3287. <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.975860>

Bajestani, M. A., Rabbani, M., Rahimi-Vahed, A. R., & Khoshkhou, G. B. (2009). A multi-objective scatter search for a dynamic cell formation problem. *Computers & Operations Research*, 36, 777–794. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2007.10.026>

Boulif, M., & Atif, K. (2008). A new fuzzy genetic algorithm for the dynamic bi-objective cell formation problem considering passive and active strategies. *International Journal of Approximate Reasoning*. <https://doi.org/10.1016/j.ijar.2007.03.003>

Brown, J. R. (2015). A capacity constrained mathematical programming model for cellular manufacturing with exceptional elements. *Journal of Manufacturing Systems*, 37, 227–232.
<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.09.005>

- Cao, L., & Li, S. (2009). A Two-Stage Cell Formation Approach with Machine Performance Le Cao. *Applied Mechanics and Materials*, 19, 738–742.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.16-19.738>
- Chang, C., Wu, T., & Wu, C. (2013). An efficient approach to determine cell formation , cell layout and intracellular machine sequence in cellular manufacturing systems. *Computers & Industrial Engineering*, 66(2), 438–450. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.07.009>
- Chen, M., & Murata, T. (2010). *A Method for the Configuration of Hybrid Cellular Manufacturing System. III*(2004).
- Chung, S., Wu, T., & Chang, C. (2011a). An efficient tabu search algorithm to the cell formation problem with alternative routings and machine reliability considerations q. *Computers & Industrial Engineering*, 60(1), 7–15. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2010.08.016>
- Chung, S., Wu, T., & Chang, C. (2011b). Computers & Industrial Engineering An efficient tabu search algorithm to the cell formation problem with alternative routings and machine reliability considerations q. *Computers & Industrial Engineering*, 60(1), 7–15. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2010.08.016>
- Coello Coello, C. A., Van Veldhuizen, D. A., & Lamont, G. B. (2002). *Evolutionary algorithms for solving multiobjective problems*.
- Darla, S. P., Naiju, C. D., & Sagar, P. V. (2014). *Optimization of Inter Cellular Movement of Parts in Cellular Manufacturing System Using Genetic Algorithm Optimization of Inter Cellular Movement of Parts in Cellular Manufacturing System Using Genetic Algorithm*. January. <https://doi.org/10.19026/rjaset.7.235>
- Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A., & Meyarivan, T. (2000). A fast elitist non-dominated sorting

- genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 1917, 849–858. https://doi.org/10.1007/3-540-45356-3_83
- Defersha, F., & Chen, M. (2008). A parallel genetic algorithm for dynamic cell formation in cellular manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 46(22), 6389–6413. <https://doi.org/10.1080/00207540701441962>
- Defersha, F. M., & Chen, M. (2008). A parallel multiple Markov chain simulated annealing for multi-period manufacturing cell formation problems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 37, 140–156. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-0947-6>
- Du, J., Wang, G., Yan, Y., & Sang, Q. (2013). Tabu Search-based Formation of Reconfigurable Manufacturing Cells Jingjun Du 1,. *Applied Mechanics an Materials*, 400(1), 34–41. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.397-400.34>
- Ebrahimi, A., Kia, R., & Komijan, A. R. (2016). Solving a mathematical model integrating unequal-area facilities layout and part scheduling in a cellular manufacturing system by a genetic algorithm. *SpringerPlus*, 5(1). <https://doi.org/10.1186/s40064-016-2773-5>
- Erenay, B., Suer, G. A., Huang, J., & Maddisetty, S. (2015). Comparison of layered cellular manufacturing system design approaches. *Computers and Industrial Engineering*, 85, 346–358. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.02.021>
- Esmailnezhad, B., Fattahi, P., & Kheirkhah, A. S. (2015). A stochastic model for the cell formation problem considering machine reliability. *Journal of Industrial Engineering International*, 11(3), 375–389. <https://doi.org/10.1007/s40092-015-0108-8>
- Feng, H., Xi, L., Xia, T., & Pan, E. (2018). Concurrent cell formation and layout design based on

- hybrid approaches. *Applied Soft Computing Journal*, 66, 346–359.
<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.02.021>
- Feng, H., Xia, T., Da, W., Xi, L., & Pan, E. (2019). Concurrent design of cell formation and scheduling with consideration of duplicate machines and alternative process routings. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30(1), 275–289. <https://doi.org/10.1007/s10845-016-1245-7>
- Forghani, K., Mohammadi, M., & Ghezavati, V. (2013). *Designing robust layout in cellular manufacturing systems with uncertain demands*. 4, 215–226.
<https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2012.012.002>
- Garavito Hernandez, E. A. (2016). *Búsqueda Armónica Aplicada a la Conformación de Celdas de Manufactura*. Universidad de Puerto Rico - Recinto Universitario Mayagüez.
- Ghezavati, V. R. (2015). Designing integrated cellular manufacturing systems with tactical decisions. *Journal of the Chinese Institute of Engineers, Transactions of the Chinese Institute of Engineers, Series A/Chung-Kuo Kung Ch'eng Hsueh K'an*, 38(3), 332–341.
<https://doi.org/10.1080/02533839.2014.970350>
- Ghezavati, V. R., Saidi-Mehrabad, M., Jabal-Ameli, M. S., & Makui, A. (2010). Optimizing expected holding cost in cellular manufacturing systems with stochastic extensionsg. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 225(6), 943–958. <https://doi.org/10.1177/2041297510393449>
- Ghezavati, V., & Saidi-mehrabad, M. (2010). *Designing integrated cellular manufacturing systems with scheduling considering stochastic processing time*. 701–717.
<https://doi.org/10.1007/s00170-009-2322-2>
- Gholipour-kanani, Y., Tavakkoli-moghaddam, R., & Khorrami, A. (2011). *Solving a multi-criteria*

- group scheduling problem for a cellular manufacturing system by scatter search.* 669.
<https://doi.org/10.1080/10170669.2010.549663>
- Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2010). *Investigación de operaciones* (9na edición). McGraw-Hill.
- Iqbal, A., & Al-Ghamdi, K. A. (2018). Energy-efficient cellular manufacturing system: Eco-friendly revamping of machine shop configuration. *Energy*, 163, 863–872.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.168>
- Jabal-Ameli, M. S., & Moshref-Javadi, M. (2015). Concurrent cell formation and layout design using scatter search. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71(1–4), 1–22. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5342-x>
- Javadian, N., Aghajani, A., Rezaeian, J., & Ghaneian Sebdani, M. J. (2011). A multi-objective integrated cellular manufacturing systems design with dynamic system reconfiguration. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 56, 307–317.
<https://doi.org/10.1007/s00170-011-3164-2>
- Jawahar, N., & Subhaa, R. (2017). An adjustable grouping genetic algorithm for the design of cellular manufacturing system integrating structural and operational parameters. *Journal of Manufacturing Systems*, 44, 115–142. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2017.04.017>
- Jayakumar, V., & Raju, R. (2014). A Simulated Annealing Algorithm for Machine Cell Formation Under Uncertain Production Requirements. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(10), 7345–7354. <https://doi.org/10.1007/s13369-014-1306-1>
- Jiajing, F. A. N., & Dingzhong, F. (2010). *Model Construction and Application of Integration Cellular Manufacturing System.* 547–552.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.156-157.547>

- Jiajing, F. A. N., & Dingzhong, F. (2011). *Model Construction and Application of Integration Cellular Manufacturing System*. 547–552.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.156-157.547>
- Jolai, F., Taghipour, M., & Javadi, B. (2011). *A variable neighborhood binary particle swarm algorithm for cell layout problem*. 327–339. <https://doi.org/10.1007/s00170-010-3039-y>
- Karoum, B., & Elbenani, Y. B. (2017). A clonal selection algorithm for the generalized cell formation problem considering machine reliability and alternative routings. *Production Engineering*, 11(4–5), 545–556. <https://doi.org/10.1007/s11740-017-0751-6>
- Kheirkhah, A. S., & Ghajari, A. (2017). A three-phase heuristic approach to solve an integrated cell formation and production planning problem. *Uncertain Supply Chain Management*, 6, 213–228. <https://doi.org/10.5267/j.uscm.2017.7.001>
- Lian, J., Liu, C., Li, W., Evans, S., & Yin, Y. (2014). Formation of independent manufacturing cells with the consideration of multiple identical machines. *International Journal of Production Research*, 52(5), 1363–1400. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.843797>
- Liu, C., & Wang, J. (2016). Cell formation and task scheduling considering multi-functional resource and part movement using hybrid simulated annealing. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 9(4), 765–777.
<https://doi.org/10.1080/18756891.2016.1204123>
- Liu, C., Wang, J., & Leung, J. Y. T. (2018). Integrated bacteria foraging algorithm for cellular manufacturing in supply chain considering facility transfer and production planning. *Applied Soft Computing Journal*, 62, 602–618. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.10.034>
- Liu, C., Yin, Y., Yasuda, K., & Lian, J. (2010). A heuristic algorithm for cell formation problems

- with consideration of multiple production factors. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2170-0>
- Liu, C., Zhu, L., & Tanaka, K. (2009). An Algorithm for the Design of Manufacturing Cells. *Fifth International Conference on Natural Computation An*, 207–211. <https://doi.org/10.1109/ICNC.2009.688>
- Maleki, R., Ketabi, S., & Rafiei, F. M. (2018a). Grouping both machines and parts in cellular technology by Genetic Algorithm. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 1015, 1–11. <https://doi.org/10.1080/21681015.2017.1411402>
- Maleki, R., Ketabi, S., & Rafiei, F. M. (2018b). Grouping both machines and parts in cellular technology by Genetic Algorithm. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 1015, 1–11. <https://doi.org/10.1080/21681015.2017.1411402>
- Mehdizadeh, E., Daei Niaki, S. V., & Rahimi, V. (2016). A vibration damping optimization algorithm for solving a new multi-objective dynamic cell formation problem with workers training. *Computers and Industrial Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.08.012>
- Mesa Grajales, D., Pinzón Candelario, M., & Ortiz Sánchez, Y. (2006). La confiabilidad, la disponibilidad y la mantenibilidad, disciplinas modernas aplicadas al mantenimiento. *Scientia et Technica*, 1(30), 155–160. <https://doi.org/10.22517/23447214.6513>
- Navaei, J., & ElMaraghy, H. (2017). Grouping and sequencing product variants based on setup similarity. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 30(6), 664–676. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2016.1190464>
- Niakan, F., Baboli, A., Moyaux, T., & Botta-Genoulaz, V. (2016a). A bi-objective model in sustainable dynamic cell formation problem with skill-based worker assignment. *Journal of*

Manufacturing Systems. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2015.11.001>

Niakan, F., Baboli, A., Moyaux, T., & Botta-Genoulaz, V. (2016b). A new multi-objective mathematical model for dynamic cell formation under demand and cost uncertainty considering social criteria. *Applied Mathematical Modelling*. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.09.047>

Nunkaew, W., & Phruksaphanrat, B. (2014). Lexicographic fuzzy multi-objective model for minimisation of exceptional and void elements in manufacturing cell formation. *International Journal of Production Research*, 52(5), 1419–1442. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.843801>

Osyczka, A. (1985). Multicriteria optimization for engineering design. *Design Optimization*, 193–227.

Papaioannou, G., & Wilson, J. M. (2010). The evolution of cell formation problem methodologies based on recent studies (1997-2008): Review and directions for future research. *European Journal of Operational Research*, 206(3), 509–521. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.10.020>

Pliego Martínez, O. A. (2012). *Programación Lineal Multiobjetivo: Análisis, técnicas y casos de aplicación*. 86. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/5090/TESIS.pdf?sequence=1>

Rabbani, M., Farrokhi-Asl, H., & Ravanbakhsh, M. (2019). Dynamic cellular manufacturing system considering machine failure and workload balance. *Journal of Industrial Engineering International*, 15(1), 25–40. <https://doi.org/10.1007/s40092-018-0261-y>

- Rafiee, K., Rabbani, M., Rafiei, H., & Rahimi-Vahed, A. (2011). A new approach towards integrated cell formation and inventory lot sizing in an unreliable cellular manufacturing system. *Applied Mathematical Modelling*, 35(4), 1810–1819. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.10.011>
- Raminfar, R., Zulkifli, N., Vasili, M., & Sai Hong, T. (2013). An Integrated Model for Production Planning and Cell Formation in Cellular Manufacturing Systems. *Journal of Applied Mathematics*, 2013, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2013/487694>
- Rheault, M., Drolet, J. R., & Abdounour, G. (1995). Physically reconfigurable virtual cells: A dynamic model for a highly dynamic environment. *Computers and Industrial Engineering*, 29(1–4), 221–225. [https://doi.org/10.1016/0360-8352\(95\)00075-C](https://doi.org/10.1016/0360-8352(95)00075-C)
- Saeidi, S., Solimanpur, M., & Mahdavi, I. (2014). A multi-objective genetic algorithm for solving cell formation problem using a fuzzy goal programming approach. 1635–1652. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5392-0>
- Sahin, Y. B., & Alpay, S. (2016a). A metaheuristic approach for a cubic cell formation problem. *Expert Systems With Applications*, 65, 40–51. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.08.034>
- Sahin, Y. B., & Alpay, S. (2016b). A metaheuristic approach for a cubic cell formation problem. *Expert Systems With Applications*, 65, 40–51. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.08.034>
- Saidi-Mehrabad, M., & Safaei, N. (2007). A new model of dynamic cell formation by a neural approach. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0518-2>
- Sarayloo, F., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2010a). Imperialistic competitive algorithm for solving a dynamic cell formation problem with production planning. *Lecture Notes in*

Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). https://doi.org/10.1007/978-3-642-14922-1_34

Sarayloo, F., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2010b). □Multi Objective Particle Swarm Optimization for a Dynamic Cell Formation Problem. *World Congress of Engineering*, 3.

Satoglu, S. I., Durmusoglu, M. B., & Ertay, T. (2010). *A mathematical model and a heuristic approach for design of the hybrid manufacturing systems to facilitate one-piece flow*. 7543. <https://doi.org/10.1080/00207540903089544>

Saxena, L. K., & Jain, P. K. (2011). Dynamic cellular manufacturing systems design—a comprehensive model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2842-9>

Shafigh, F., Defersha, F. M., & Moussa, S. E. (2017). A linear programming embedded simulated annealing in the design of distributed layout with production planning and systems reconfiguration. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88(1–4), 1119–1140. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8813-z>

Shahdi-Pashaki, S., Teymourian, E., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2018). New approach based on group technology for the consolidation problem in cloud computing-mathematical model and genetic algorithm. *Computational and Applied Mathematics*, 37(1), 693–718. <https://doi.org/10.1007/s40314-016-0362-4>

Soolaki, M., Arkat, J., & Ahmadizar, F. (2018). Modeling the Trade-off between Manufacturing Cell Design and Supply Chain Design. *International Journal of Engineering*, 31(4), 640–647. <https://doi.org/10.5829/ije.2018.31.04a.16>

Subhaa, R., & Jawahar, N. (2013). ILOG CPLEX OPL modelling for machine cell formation.

International Journal of Engineering and Technology, 5(5), 3734–3741.

- Subhaa, R., & Natarajan, J. (2018). Service level-based production smoothening model for robust cellular manufacturing system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(1–4), 475–496. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0863-3>
- Tang, J., Yan, C., Wang, X., & Zeng, C. (2014). Using lagrangian relaxation decomposition with heuristic to integrate the decisions of cell formation and parts scheduling considering intercell moves. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 11(4), 1110–1121. <https://doi.org/10.1109/TASE.2014.2325860>
- Tavakkoli-Moghaddam, R., Aryanezhad, M. B., Safaei, N., & Azaron, A. (2005). Solving a dynamic cell formation problem using metaheuristics. *Applied Mathematics and Computation*, 170(2), 761–780. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2004.12.021>
- Tavakkoli-Moghaddam, R., Minaeian, S., & Rabbani, M. (2007). A New Multi-Objective Model for Dynamic Cell Formation Problem With Fuzzy Parameters. *IJE Transactions A: Basics*, 21(2).
- Tavakkoli-Moghaddam, R., Rahimi-Vahed, A. R., Ghodratinama, A., & Siadat, A. (2009). A simulated annealing method for solving a new mathematical model of a multi-criteria cell formation problem with capital constraints. *Advances in Engineering Software*. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2008.04.008>
- Tavakkoli-Moghaddam, R., Safaei, N., & Sassani, F. (2008). A new solution for a dynamic cell formation problem with alternative routing and machine costs using simulated annealing. *Journal of the Operational Research Society*. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602436>
- Tavakkoli, R., Ranjbar, M., Amin, G. R., & Siadat, A. (2012). *A cell formation problem*

- considering machine utilization*. 1127–1139. <https://doi.org/10.1007/s10845-010-0395-2>
- Torkul, O., & Ustun, O. (2015). *Proposal of a nonlinear multi-objective genetic algorithm using conic scalarization to the design of cellular manufacturing systems*. 30–57. <https://doi.org/10.1007/s10696-014-9194-y>
- Urrutia, G., & Bonfill, X. (2011). Declaración PRISMA : una propuesta para mejorar la publicación de revisiones sistemáticas y metaanálisis. *Medicina Clínica*, 135(11), 507–511. <https://doi.org/10.1016/j.medcli.2010.01.015>
- Wang, X., Tang, J., & Yung, K. (2010). *A scatter search approach with dispatching rules for a joint decision of cell formation and parts scheduling in batches*. 7543. <https://doi.org/10.1080/00207540902922828>
- Wenbin, G., & Yi, W. (2018). An artificial intelligence application for cellular manufacturing system inspired by the endocrine mechanism. *Proceedings of the 2017 IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference, ITNEC 2017, 2018–Janua*, 1516–1520. <https://doi.org/10.1109/ITNEC.2017.8285049>
- Won, Y., & Logendran, R. (2015). Effective two-phase p-median approach for the balanced cell formation in the design of cellular manufacturing system. *International Journal of Production Research*, 53(9), 2730–2750. <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.977457>
- Wu, L., Cai, F., Li, L., & Chu, X. (2018). Cross-Trained Worker Assignment Problem in Cellular Manufacturing System Using Swarm Intelligence Metaheuristics. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2018/4302062>
- Xiaoqing, W., Jiafu, T., Jun, G., & Mei, C. (2008). A Nonlinear Multi-Objective Model of Dynamic Cell Formation. *Chinese Control And Decision Conference*.

Yin, Y. (2009). The economic cell number. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 44, 625–630. <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1854-1>