

## **FORMACIÓN DE CELDAS DE MANUFACTURAS DINÁMICAS PARA LA TOMA DE DECISIONES EN EL DISEÑO DE INSTALACIONES INDUSTRIALES: UNA REVISIÓN**

### **FORMATION OF DYNAMIC MANUFACTURING CELLS FOR DECISION-MAKING IN THE DESIGN OF INDUSTRIAL FACILITIES: A REVIEW**

Laura Y. Escobar-Rodríguez<sup>1</sup>  
Edwin A. Garavito-Hernández<sup>2</sup>  
Leonardo H. Talero-Sarmiento<sup>3</sup>

#### **Resumen**

Este trabajo presenta una revisión de literatura con el fin de caracterizar el Problema de Formación de Celdas de Manufactura Dinámicas, realizando la identificación de los criterios de optimización, las principales restricciones consideradas y los métodos de solución más usados. Para ello, se condujo una adaptación de la declaración PRISMA para revisiones sistemáticas, en conjunto con una metodología bola de nieve para la selección de los estudios a analizar; la búsqueda de documentos se realiza en las bases de datos Web of Science y Scopus, considerando una ventana de tiempo entre 2007 y 2019. Como resultados generales, se encuentra que la minimización de costos es el criterio de optimización utilizado con mayor frecuencia y que las restricciones usualmente consideradas están asociadas a la secuencia de operaciones, averías de máquinas, y variación del tamaño de lote de procesamiento. De otra parte, considerando la naturaleza altamente combinatoria de los problemas de optimización revisados, se encuentra que los métodos de solución metaheurísticos utilizados en mayor medida son algoritmos genéticos, y recocido simulado. Finalmente, se determinan tres tendencias de investigación primero, la incorporación de dos o más criterios de optimización en una formulación matemática; segundo, el desarrollo e implementación de algoritmos metaheurísticos híbridos y; tercero, la evaluación de los métodos de solución existentes a partir de problemas de referencia o aplicaciones industriales reales.

**Palabras clave:** Celdas de manufactura dinámicas, Planeación y diseño de instalaciones, Problema de formación de celdas de manufactura.

Fecha de recepción: Julio de 2019 / Fecha de aceptación en forma revisada: Diciembre 2019

---

<sup>1</sup> Candidata a Magíster en Ingeniería Industrial, Universidad Industrial de Santander. Carrera 27 con calle 9, Ciudad Universitaria, Escuela de Estudios Industriales y Empresariales, oficina 202, Bucaramanga, Colombia. Autor de correspondencia. Correo electrónico: [laura.escobar@correo.uis.edu.co](mailto:laura.escobar@correo.uis.edu.co) <https://orcid.org/0000-0003-3350-9113>

<sup>2</sup> Profesor Titular, Escuela de Estudios Industriales y Empresariales, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Carrera 27 con calle 9, Ciudad Universitaria, Escuela de Estudios Industriales y Empresariales, oficina 207-26, Bucaramanga, Colombia. [garavito@uis.edu.co](mailto:garavito@uis.edu.co) <https://orcid.org/0000-0002-0145-232X>

<sup>3</sup> Profesor Asistente, Escuela de Estudios Industriales y Empresariales, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga. Estudiante de Doctorado en Ingeniería de la Universidad Autónoma de Bucaramanga, Magíster en Ingeniería Industrial, Universidad Industrial de Santander. Carrera 27 con calle 9, Ciudad Universitaria, Escuela de Estudios Industriales y Empresariales, oficina 202, Bucaramanga, Colombia. [leonardo.talero@correo.uis.edu.co](mailto:leonardo.talero@correo.uis.edu.co) <https://orcid.org/0000-0002-4129-9163>

### Abstract

This paper presents a literature review to characterize the Dynamic Manufacturing Cell Formation Problem through the identification of optimization criteria, the most relevant restrictions needed for consideration, and the most frequently used solution methods. Hence, it is conducted the PRISMA statement for systematic reviews along with Snowball Methodology to select the studies to be analyzed. The document search is carried out in the Web of Science and Scopus databases, considering a time frame between 2007 and 2019. As an overall result, the cost minimization is the most frequently used optimization criterion, and the typically considered constraints are associated with part machine operation sequence, machine breakdowns, and lot size. On the other hand, considering the highly combinatorial nature of the optimization problems reviewed, it was found that metaheuristics are the most used solution method, and genetic algorithms, as well as simulated annealing, are the most frequently implemented. Finally, three research trends are determined: incorporation of two or more optimization criteria in a mathematical formulation, development, and implementation of hybrid metaheuristic algorithms, and comparison of the performance of the existing solution methods based on reference problems or real industrial applications.

**Keywords:** Dynamic cell manufacturing systems, Facilities planning and design, Cell formation problem.

### Introducción

La Manufactura Celular es una aplicación de la tecnología de grupos que surge como respuesta a la necesidad de reducir los costos de operación, así como los tiempos de suministro y preparación 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, con lo anterior se busca agrupar en familias aquellos productos cuyas características físicas (tamaño, forma, peso, entre otras.), 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 en 1995 por Rheault, Drolet & Abdulnour (1995); 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 maquinas a los requerimientos de producción generados para un determinado horizonte de planeación. Surge entonces la necesidad de diseñar sistemas conformados por celdas de manufactura con configuraciones que puedan variar en el tiempo, a diferencia de las celdas de manufactura clásicas o estáticas donde la ubicación de las máquinas o centros de trabajo no se modifica durante el horizonte de planeación; buscando de esta manera soportar los cambios generados en el proceso de producción debido a la variación en la demanda de un periodo a otro. El diseño de dichas celdas se conoce como Problema de Formación de Celdas de Manufactura Dinámicas (*Dynamic Cell Formation Problem, DCFP*). Ahora bien, 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 ésta realidad.

De acuerdo con Saxena & Jain (2011), existen múltiples parámetros o atributos a tener en cuenta en el DCFP. Teniendo en cuenta la necesidad de implementar celdas de manufactura flexibles en el tiempo y que, hallar la configuración idónea implica el uso de modelos matemáticos cada vez más robustos en conjunto con algoritmos de solución más efectivos, en el presente trabajo se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿cuáles son las tendencias de modelamiento para dar solución al DCFP? Para dar respuesta a ello, se presenta una revisión de literatura asociada a los estudios realizados en el tema, donde en cada uno de los trabajos se identifica objeto de estudio, la función objetivo, las principales restricciones contempladas, y los métodos de solución utilizados para abordar el DCFP, todo ello para identificar futuras líneas de investigación y/o estrategias. Por lo tanto, este trabajo se divide en tres secciones, en primera instancia se presenta la metodología de investigación; luego, se exhiben los resultados agrupados según categoría (Función objetivo, Restricciones, y Métodos de solución) y, finalmente, se encuentra la sección de conclusiones y futuros trabajos.

### **Metodología**

La metodología que guía esta investigación es una adaptación de la declaración PRISMA propuesta por Urrutia & Bonfill (2011) para la realización de revisiones sistemáticas. Como primer paso se define el protocolo y registro; luego, se determinan los criterios de elegibilidad, para lo cual, se establecen términos de búsqueda que incluyen las palabras clave “dynamic”, “multiperiod”, “flexible”, “cell formation problem”, entre otras. Adicionalmente, y teniendo en cuenta el trabajo previo realizado por Balakrishnan & Cheng (2007), se considera para el presente estudio una ventana de tiempo entre los años 2007 y 2019. Estos criterios se usan para establecer la ecuación de búsqueda que es ingresada en las bases de datos Web of Science, Scopus y Science Direct. De la búsqueda anterior se deriva un total de 121 documentos; de los cuales se eliminan los registros duplicados, los documentos que no corresponden a artículos científicos, y aquellos cuyo contenido no se relaciona con el estudio del DCFP. Como resultado se consolidan 57 artículos científicos para ser analizados.

A partir de estos documentos, se realiza la síntesis de la información y el planteamiento de la estructura de la revisión, con la cual se busca caracterizar las formulaciones matemáticas utilizadas para describir y establecer tendencias del problema en cuestión, identificando en la literatura los objetivos de diseño (funciones objetivo), principales restricciones consideradas, así como los métodos de solución utilizados para abordar el problema.

### **Análisis de resultados**

La estructura de la revisión se muestra en la Figura 1. Para cada uno de los estudios analizados se identifica como primera categoría la función objetivo definida por los autores, posteriormente, se realiza una clasificación de dichos trabajos de acuerdo a las principales restricciones (variaciones o atributos propios de los sistemas de manufactura considerados), estas son: rutas alternativas de procesamiento, secuencia de operaciones, efecto de averías, duplicación de máquinas, balance de carga de trabajo, tamaño de lote, diseño de la instalación (disposición de celdas y máquinas) y aspectos relacionados con las personas. Asimismo, los métodos de solución utilizados para abordar el problema, son identificados.

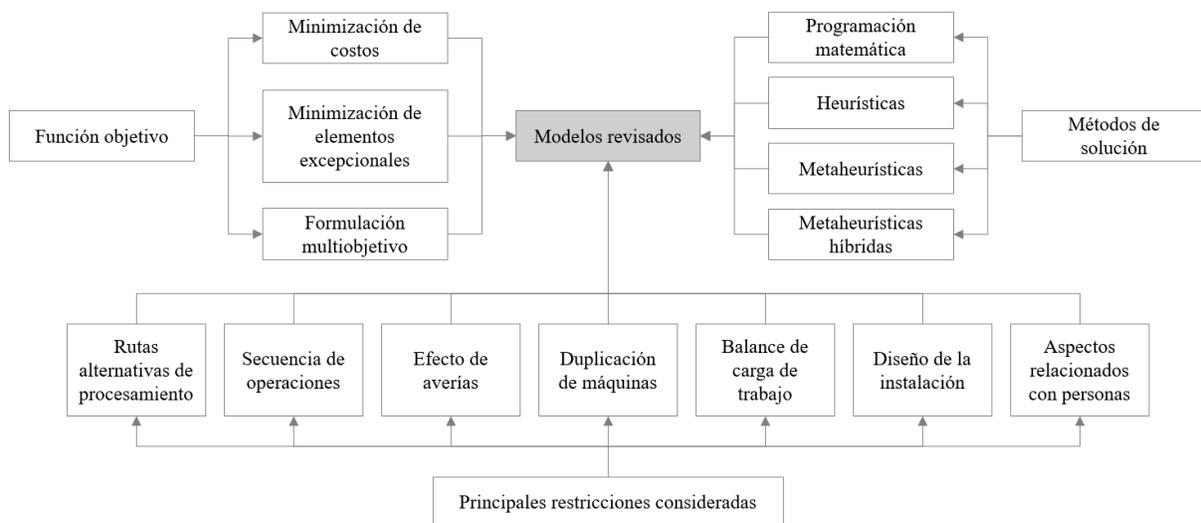


Figura 1. Estructura de la revisión

### ***Función Objetivo***

La función objetivo es uno de los primeros aspectos a revisar en la formulación de los modelos matemáticos propuestos para dar solución al DCFP. De acuerdo con lo anterior, en la literatura se encuentra que la minimización de costos ha sido el criterio planteado con mayor frecuencia; sin embargo, debido a la complejidad y el tiempo computacional requerido, no se han incorporado a un modelo todos los costos relacionados con el DCFP. A pesar de ello, algunos 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 costos de reconfiguración. Más adelante, Defersha & Chen (2008) proponen una nueva formulación en la que agregan los costos de mantenimiento, alistamiento y operación de máquinas y, finalmente, consumo de herramientas. Un año más tarde, Aryanezhad, Deljoo, & Mirzapour Al-e-hashem (2009) presentan un nuevo modelo en el que incluyen en el sistema a formar la asignación de operarios, con ello, los costos de contratar, despedir, y entrenar operarios son añadidos a la formulación propuesta.

De otra parte, 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, 2009). 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.

Ahora bien, algunos autores han formulado el DCFP como un modelo multi-objetivo, buscando considerar diversos elementos que permitan aproximar el modelo propuesto a la

realidad de las industrias (estas últimas suelen tomar decisiones basadas en buscar equilibrio entre objetivos que compiten entre sí). Ejemplo de ello, es el caso de Xiaoqing, Jiafu, Jun, & Mei (2008) quienes formulan un modelo multi-objetivo 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 objetivos que tienen en cuenta Tavakkoli-Moghaddam, Rahimi-Vahed, Ghodrathnama, & Siadat (2009) para dar solución al DCFP.

Asimismo, Sarayloo & Tavakkoli-Moghaddam (2010) presentan un modelo matemático en el que proponen la minimización simultánea 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. 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 la cual, además de costos de adquisición de maquinaria, reconfiguración de celdas y transferencia de materiales, adicionan costos de mano de obra y un componente relacionado con la venta de máquinas en desuso; por otra parte, 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.

Finalmente, considerando la necesidad de metodologías de reducción de costos relacionadas con la organización de los sistemas de manufactura, 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. Ahora bien, para aquellas circunstancias en las que se requiere una visión integral de un sistema, surge como alternativa las formulaciones multiobjetivo; para el caso del DCFP, debido a la complejidad propia de los sistemas de manufactura, en los que se integran máquinas, procesos, personas, entre otros, la tendencia está orientada a asociar la toma de decisiones 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.

### *Principales restricciones consideradas*

#### ***Rutas Alternativas de Procesamiento***

Una ruta es definida como la secuencia específica de máquinas o centros de trabajo que un material o producto debe visitar con el fin de completar todas las operaciones requeridas.

Estas rutas pueden ser predefinidas o seleccionadas de una serie de opciones (rutas alternativas de procesamiento) de acuerdo a determinado criterio. Existen rutas alternativas de procesamiento cuando en el modelo se asumen máquinas multipropósito, es decir, pueden realizar diferentes operaciones, se presenta duplicación de máquinas, o existe más de una secuencia de producción para el procesamiento de los productos (Ahkioon et al., 2009).

En el estudio presentado por Tavakkoli-Moghaddam, Minaeian, et al. (2008) se asume la existencia de rutas alternativas de procesamiento debido a que las máquinas que conforman el sistema pueden ejecutar diversas operaciones. Por otro lado, en el modelo propuesto por Ahkioon, Bulgak, & Bektas (2009) también se asumen rutas alternativas de procesamiento; no obstante, las rutas a utilizar en el modelo formulado para dar solución al DCFP son seleccionadas en una etapa previa, donde se realiza una comparación de los costos generados por cada una de las rutas opcionales. En ese mismo año, Ahkioon, Bulgak, & Bektas (2009) proponen un modelo que considera adicional a las rutas alternativas de procesamiento, rutas de contingencia con el fin de permitir que el sistema en general siga operando de forma continua cuando se presenten eventos no planeados como averías en las máquinas, teniendo en cuenta que estas nuevas rutas, no alteren el procesamiento de otros productos.

Jayakumar V A Raju (2010) plantea un enfoque diferente presentando un modelo en el que se asumen máquinas multipropósito y si todas se encuentran disponibles, generan rutas alternativas de procesamiento; el modelo establece la mejor ruta comparando los tiempos de procesamiento que son dados por la suma de los tiempos acumulados en la producción de determinado producto por cada una de las rutas posibles. De igual forma, en el modelo presentado por Kia et al., (2012) se trabaja con máquinas multipropósito y, adicional a ello, en el mismo no permite descartar máquinas, es decir, si una de ellas no está en uso en determinado periodo del horizonte de planeación, se asume disponible lo que a su vez implica la generación de rutas alternativas de procesamiento. Unos años más tarde, Vafaeinezhad, Kia, & Shahnazari-Shahrezaei (2016) formulan un modelo en el que se asume la presencia de máquinas multipropósito y no se presenta variación en el costo por realizar diferentes operaciones en una misma máquina.

### ***Secuencia de Operaciones***

La secuencia de operaciones influye directamente en la formación de rutas asignadas al proceso de manufactura de cada producto. La importancia de la vinculación de este parámetro al DCFP, radica en el cálculo de las veces que un producto o un lote de productos debe desplazarse de una máquina a otra, o entre celdas; esto deriva a su vez en el cálculo del costo de manipulación de material, donde un componente que busca ser minimizado en la función objetivo de diversos modelos. La secuencia de operaciones es incorporada en el modelo propuesto por Ahkioon et al. (2009) con el fin de asegurar el cálculo adecuado del costo de manipulación de material en cada celda y entre celdas. Asimismo, Venkatadri, Elaskari, & Kurdi (2017) presentan una formulación basada en flujo de redes para resolver el DCFP, en dicha proposición, se establece la existencia de secuencias alternativas de procesamiento, por tanto, los requerimientos de producción de determinada parte o producto, pueden ser realizados en diferentes rutas de procesamiento.

### ***Efecto de Averías***

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 el efecto de las averías de las máquinas en el sistema de producción. Las máquinas son elementos clave de los sistemas de fabricación; sin embargo, no siempre es posible manejar sus averías tan rápido como los requisitos de producción.

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. De los trabajos consultados, pocos han tenido en cuenta el efecto de averías en la formulación; sin embargo, autores como Ahkioon et al. (2009) consideran este factor al incluir en el modelo formulado, rutas de contingencia con el fin de no presentar alteraciones en los procesos de producción cuando se presenten averías en las máquinas. Por otra parte, Saxena & Jain (2011) presentan un modelo en el que incorporan este factor, calculando en primera instancia el tiempo medio entre fallas (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. Por otra parte, en los trabajos realizados por Saidi-Mehrabad & Safaei, (2007); entre otros, no se considera el efecto de las averías en la formulación del modelo.

### ***Duplicación de Máquinas***

La duplicación de máquinas o el uso de máquinas multipropósito puede darse dentro de una misma celda o en todo el sistema, ésta consideración contribuye en la formación de un sistema más flexible, debido a que se cuenta con más rutas alternativas de procesamiento para las partes a procesar (Ah kioon et al., 2009). Con el fin de disminuir el movimiento intercelular y cumplir los requerimientos de capacidad, en el trabajo presentado por F. Defersha & Chen (2008) se permite la duplicación de máquinas.

### ***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.

### ***Tamaño de Lote Para Procesamiento y Transferencia***

El tamaño de lote para procesamiento y transferencia, tiene gran influencia en el cálculo de costo de manipulación de material, que es uno de los componentes más comunes en la función de costos que se busca minimizar en el DCFP. En algunos casos el tamaño y el costo de procesamiento y transferencia de material es constante, como es el caso de los modelos propuestos por Tavakkoli-Moghaddam, Minaeian, et al., (2008); Wang et al., (2009) y Deljoo et al. (2010).

Caso contrario, autores como Nima Safaei et al. (2008), consideran la variación de los tamaños y costos de los lotes de transferencia entre celdas y entre máquinas pertenecientes a

una misma celda (2008). Por otra parte, Ahkioon et al. (2009) asumen para el modelo propuesto el tamaño de lote igual a uno para las etapas de transferencia de materiales y el mantenimiento de inventario. Un año más tarde, Jayakumar V A Raju, (2010) proponen un modelo en el que se considera tamaño y costo diferente para cada tipo de producto, teniendo en cuenta que cada uno de estos, puede tener tamaño y forma diferente; sin embargo, con el fin de reducir la complejidad del modelo, el costo unitario de transferencia es considerado constante y varía de acuerdo a la distancia recorrida por el lote de productos.

Más adelante, Vafaeinezhad et al., (2016) formulan un modelo en el que se modifica el tamaño de lote para mover productos entre celdas durante el periodo de planeación; sin embargo, los lotes entre celdas y al interior de cada celda, tienen diferentes tamaños y el costo de transporte de estos es incierto. Un año después, Rabbani, Farrokhi-Asl, Rafiei, & Khaleghi, (2017) proponen un modelo en el que se considera nuevamente el tamaño de lote constante; no obstante, cabe resaltar que el costo depende de la distancia recorrida por el material que varía de acuerdo a la disposición de las máquinas y las celdas.

### ***Diseño de la Instalación***

Al resolver el DCFP se obtiene como resultado la asignación de operaciones a máquinas, máquinas a celdas y productos o familias de productos a celdas. Sin embargo, la disposición de las máquinas en la planta antes y después de realizar la formación de celdas de manufactura no es un factor tenido en cuenta con frecuencia en la formulación de modelos. Lo anterior puede derivar en una solución no factible, debido a que no se consideran las condiciones físicas de la planta y se parte de una disposición inicial ideal que se adapta a las posibles soluciones arrojadas por el modelo más no a la realidad del sistema. Dado lo anterior, en los trabajos realizados por Fan & Cao (2013) y Fan & Feng (2013) se plantea la formulación del problema de formación de celdas de manufactura cuasi dinámico (*Quasi-Dynamic Cell Formation Problem, QDCFP*) en el que se busca encontrar la mejor agrupación para un único periodo considerando el diseño inicial del sistema productivo; se describe dicho modelo como cuasi-dinámico debido al cambio que hay en la configuración de planta desde el instante cero (configuración actual o predeterminada del sistema) hasta la determinada como solución al modelo planteado.

Por otra parte, en el modelo propuesto por Rabbani et al (2017) se puede determinar la disposición de las máquinas asignadas a cada celda, así como la disposición de las celdas en la planta, con el fin de establecer los costos de manipulación de material al interior de cada celda y entre ellas, teniendo en cuenta la distancia recorrida por el material, para ello se considera que todas las máquinas cuentan con las mismas dimensiones y existe un espacio rectangular dispuesto para cada celda.

### ***Aspectos Relacionados con las Personas***

Diversos aspectos relacionados con el papel de los operarios en el proceso de producción se han ido involucrando recientemente en la formulación del DCFP. Teniendo en cuenta lo anterior, Aryanezhad et al (2009) presenta un modelo en el que se incluye la asignación de operarios de acuerdo con las habilidades que estos posean; para el modelo planteado se tiene en cuenta la clasificación de habilidades en niveles, de acuerdo al tiempo de permanencia del trabajador en la organización, es decir, las personas que llevan más tiempo trabajando se consideran en un nivel superior que aquellas que han sido contratadas recientemente. Se considera, además, el entrenamiento de los operarios en diferentes periodos de planeación con el fin de que estos puedan operar máquinas cuyo nivel o grado de dificultad sea mayor al que

tiene actualmente, el salario es un parámetro de entrada y depende de las habilidades que posea el trabajador.

De manera similar, Soolaki (2012) plantea un modelo en el que se incluye la asignación de operarios de acuerdo a sus habilidades; asimismo, se establece que un operario es despedido cuando su trabajo no es requerido en el sistema, se deben contratar nuevos operarios cuando se requiera y el sueldo debe ser pagado a los operarios que estén contratados sin importar si se encuentran realizando una operación o si están desocupados. En el QDCFP planteado por Fan & Feng, (2013), se asume que los operarios pueden manipular más de una máquina, teniendo en cuenta que dichas máquinas deben encontrarse en la misma celda, así mismo se debe establecer si los operarios tienen habilidad de aprendizaje para que, en caso de ser necesario, sean entrenados para manejar una máquina diferente.

En el modelo propuesto por Vafaeinezhad et al. (2016) se conoce el total de operarios necesarios para operar en todos los periodos y no se admite contratar ni despedir empleados. Caso contrario, en la formulación realizada por Zohrevand et al. (2016) donde se tiene en cuenta el costo de contratar y despedir operarios y adicional a esto se plantea maximizar la utilización de los mismos. En ese mismo año, Mehdizadeh et al. (2016) plantean un modelo de programación matemática entera mixta en el que incluye costos de contratar, despedir, entrenar y salario de operarios para ello se deben conocer las capacidades en cuanto a manejo de maquinaria para tener en cuenta quienes podrían acceder a entrenamiento para manipulación de otras máquinas con el fin de contar con flexibilidad de operarios para realizar la mejor asignación de estos.

### ***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 altamente combinatorio 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. 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, Najju, & 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), así como 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*), la cual es usada un año más tarde por Tavakkoli-Moghaddam et al. (2009) para solucionar un modelo en el que se consideran restricciones de capital. Éste algoritmo es nuevamente implementado 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.

Ahora bien, 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.

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.

En cuanto a 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) propone 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. Otra 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.

Respecto a la metaheurística optimización de enjambre de partículas (*Particle Swarm Optimization, PSO*), ésta 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, 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) el algoritmo de optimización de 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), (2) 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 y (3) el algoritmo búsqueda armónica (*Harmony Search, HS*), adaptado por Garavito-Hernandez, Talero-Sarmiento, & Escobar-Rodriguez (2019) para el problema, el resultado del algoritmo aplicado a casos particulares se contrasta con los resultados óptimos generados por un modelo de programación lineal para evaluar su desempeño.

### Conclusiones

El propósito del presente trabajo es determinar ¿cuáles son las tendencias de modelamiento para dar solución al DCFP?, para dar respuesta a dicho interrogante se realizó una revisión literatura relacionada con el problema de formación de celdas de manufactura dinámicas. Esta revisión se basó en una adaptación de la declaración PRISMA para revisiones sistemáticas, lo que implica que no fueron considerados documentos de literatura gris, memorias de congreso, ni documentos de trabajo; este acotamiento si bien limita la cantidad y variedad de documentos consultados que están en fases finales de desarrollo, confiere a los trabajos revisados la calidad propia de las investigaciones publicadas bajo revisión por pares, e indexadas en bases de datos con alto impacto. En este sentido, es posible ampliar la búsqueda a otras bases de datos o considerar otro tipo de documentos, de manera tal que exista la posibilidad de incluir más consideraciones de modelamiento y algoritmia.

Ahora bien, los resultados de esta investigación dan cuenta de que la minimización de costos, es la función objetivo utilizada con mayor frecuencia en diferentes formulaciones matemáticas; sin embargo, teniendo en cuenta la complejidad de los sistemas de manufactura y teniendo en cuenta la necesidad de integrar procesos, máquinas, personas, entre otros; en diferentes estudios se 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. Dado lo anterior, existe una tendencia hacia la incorporación de diversos criterios de optimización en un solo modelo matemático, es decir, formulaciones con múltiples objetivos, así como la incorporación de restricciones del sistema de manufactura real asociadas a la secuencia de operaciones, averías de máquinas, variación del tamaño de lote de procesamiento, entre otras. Más aún, considerando el auge de la automatización y la integración tecnológica (industria 4.0) en el sector manufacturero, aspectos relacionados con el papel de los operarios en el sistema de producción se han ido involucrando recientemente en la formulación del problema, convirtiéndose en una creciente tendencia para modelar la interacción que se genera entre las máquinas y las personas y, de esta manera, evidenciar el trabajo conjunto que desempeñan en un sistema productivo.

Desde el punto de vista de la resolución del problema de optimización, se evidencia que las formulaciones de programación matemática para el problema son difíciles de implementar debido a limitaciones computacionales para problemas a gran escala. Debido a la naturaleza NP-hard del DCFP, se han empleado con mayor frecuencia metodologías tales como estrategias heurísticas, metaheurísticas, y metaheurísticas híbridas para integrar sistemas a mayor escala que cumplan con los requisitos actuales. Las metaheurísticas más populares empleadas en la

última década son GA y SA; sin embargo, nuevos estudios se enfocan en adoptar metaheurísticas utilizadas en otras aplicaciones con el fin de evaluar su desempeño para el DCFP, ejemplo de ellas son VDOA, IBFA y HS. Por tanto, futuros trabajos están llamados a enfocarse en el desarrollo e implementación de algoritmos metaheurísticos híbridos, con el fin de proporcionar soluciones prácticas en tiempos computacionales razonables. Dicho lo anterior, también se evidencia la necesidad de evaluar las diferentes metodologías de solución propuestas en la literatura y obtener criterios de rendimiento generales, es decir, aplicabilidad, practicidad, comparándolos a partir de problemas de referencia o aplicaciones industriales reales. En síntesis, se determinan tres tendencias de investigación: 1) la incorporación de dos o más criterios de optimización en una formulación matemática; 2) el desarrollo e implementación de algoritmos metaheurísticos híbridos y; 3) la evaluación de los métodos de solución existentes a partir de problemas de referencia o aplicaciones industriales reales.

### Referencias bibliográficas

- 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>
- Ah kioon, S., Bulgak, A. A., & Bektas, T. (2009). Integrated cellular manufacturing systems design with production planning and dynamic system reconfiguration. *European Journal of Operational Research*, 192(2), 414–428. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.09.023>
- Ahkioon, S., Bulgak, A. A., & Bektas, T. (2009). Cellular manufacturing systems design with routing flexibility, machine procurement, production planning and dynamic system reconfiguration. *International Journal of Production Research*, 47(6), 1573–1600. <https://doi.org/10.1080/00207540701581809>
- 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>
- Arıkan, F., & Güngör, Z. (2009). 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>
- 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>
- 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>

- 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>
- Balakrishnan, J., & Cheng, C. H. (2007). Multi-period planning and uncertainty issues in Cellular Manufacturing: a review and future directions. *European Journal of Operational Research*, *177*, 281–309.
- 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>
- 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>
- Chung, S., Wu, T., & Chang, C. (2011). An efficient tabu search algorithm to the cell formation problem with alternative routings and machine reliability considerations. *Computers & Industrial Engineering*, *60*(1), 7–15. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2010.08.016>
- 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>
- 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>
- Deljoo, V., Mirzapour Al-e-hashem, S. M. J., Deljoo, F., & Aryanezhad, M. B. (2010). Using genetic algorithm to solve dynamic cell formation problem. *Applied Mathematical Modelling*. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2009.07.019>
- Du, J., Wang, G., Yan, Y., & Sang, Q. (2013). Tabu Search-based Formation of Reconfigurable Manufacturing Cells. *Applied Mechanics and Materials*, *400*(1), 34–41. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.397-400.34>
- Fan, J., & Cao, M. (2013). Study on the quasi-dynamic cell-formation problem. *Journal of Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3923/jas.2013.2813.2818>
- Fan, J., & Feng, D. (2013). Design of cellular manufacturing system with quasi-dynamic dual resource using multi-objective GA. *International Journal of Production Research*. <https://doi.org/10.1080/00207543.2012.748228>
- 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>
- Garavito-Hernandez, E. A., Talero-Sarmiento, L. H., & Escobar-Rodriguez, L. Y. (2019). Aplicación de la Búsqueda Armónica para el problema de formación de celdas de manufactura. *INGE CUC*, *15*(2), 155–167. <https://doi.org/10.17981/ingecuc.15.2.2019.15>
- Gholipour-kanani, Y., Tavakkoli-moghaddam, R., & Khorrami, A. (2011). *Solving a multi-criteria group scheduling problem for a cellular manufacturing system by scatter search*. *0669*. <https://doi.org/10.1080/10170669.2010.549663>
- 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>
- Jayakumar, V., & Raju, R. (2010). An adaptive cellular manufacturing system design with routing flexibility and dynamic system reconfiguration. *European Journal of Scientific Research*, 47(4), 595–611.
- 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>
- 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>
- Kia, R., Baboli, A., Javadian, N., Tavakkoli-Moghaddam, R., Kazemi, M., & Khorrani, J. (2012). Solving a group layout design model of a dynamic cellular manufacturing system with alternative process routings, lot splitting and flexible reconfiguration by simulated annealing. *Computers and Operations Research*. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2012.01.012>
- 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>
- Maleki, R., Ketabi, S., & Rafiei, F. M. (2018). 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>
- Niakan, F., Baboli, A., Moyaux, T., & Botta-Genoulaz, V. (2016). 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>
- Rabbani, M., Farrokhi-Asl, H., Rafiei, H., & Khaleghi, R. (2017). Using metaheuristic algorithms to solve a dynamic cell formation problem with consideration of intra-cell layout design. *Intelligent Decision Technologies*, 11, 109–126. <https://doi.org/10.3233/IDT-160281>
- 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>
- Safaei, N., Saidi-Mehrabad, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Sassani, F. (2008). A fuzzy programming approach for a cell formation problem with dynamic and uncertain conditions. *Fuzzy Sets and Systems*, 159, 215–236. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2007.06.014>
- Sahin, Y. B., & Alpay, S. (2016). 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](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>
- Shafiq, 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. (2012). A multi-objective integrated cellular manufacturing systems design with production planning, worker assignment and dynamic system reconfiguration. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*. <https://doi.org/10.1504/IJISE.2012.049412>
- 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>
- 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., Ghodrathnama, 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>
- Vafaeinezhad, M., Kia, R., & Shahnazari-Shahrezaei, P. (2016). Robust optimization of a mathematical model to design a dynamic cell formation problem considering labor utilization. *Journal of Industrial Engineering International*, 12, 45–60. <https://doi.org/10.1007/s40092-015-0127-5>
- Venkatadri, U., Elaskari, S. M., & Kurdi, R. (2017). A multi-commodity network flow-based formulation for the multi-period cell formation problem. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91, 175–187. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9673-2>
- Wang, X., Tang, J., & Yung, K.-L. (2009). Optimization of the multi-objective dynamic cell formation problem using a scatter search approach. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 44, 318–329. <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1835-4>
- 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>
- Xiaoqing, W., Jiafu, T., Jun, G., & Mei, C. (2008). A Nonlinear Multi-Objective Model of Dynamic Cell Formation. *Chinese Control Ad Decision Conference*.
- Zohrevand, A. M., Rafiei, H., & Zohrevand, A. H. (2016). Multi-objective dynamic cell formation problem: A stochastic programming approach. *Computers & Industrial Engineering*, 98, 323–332. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.03.026>