

**Solución al problema de formación de celdas de manufactura dinámicas (Dynamic Cell Formation Problem, DCFP) a través del algoritmo Búsqueda Armónica (Harmony Search, HS).**

**Laura Yeraldín Escobar Rodríguez**

**Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniera Industrial**

**Director:**

**Edwin Alberto Garavito Hernández**

**Magíster en Ingeniería Industrial**

**Codirector:**

**Leonardo Hernán Talero Sarmiento**

**Ingeniero Industrial**

**Universidad Industrial de Santander**

**Escuela de Estudios Industriales y Empresariales**

**Bucaramanga**

**2018**

**DEDICATORIA**

*A mi padre Jorge, por sus consejos, sus constantes muestras de amor y su voz de aliento ante  
cada momento de dificultad.*

*A mi madre Luz y a mi hermana Lyda, por su incondicional apoyo.*

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

### **AGRADECIMIENTOS**

*A mi amigo, compañero y codirector Leonardo Talero, por sus invaluable aportes a mi proceso de formación personal y profesional; por su incondicional y constante apoyo, por estar siempre ahí para dar una voz de aliento y acompañarme en los diferentes proyectos académicos emprendidos. Asimismo, por ser ejemplo de compañerismo, lealtad, compromiso y humildad y, fundamentalmente, infinitas gracias por permitirme aprender cada día de su noble persona.*

*Agradezco especialmente al Profesor Edwin Garavito por todas sus enseñanzas, por depositar su confianza en mí, por su guía y acompañamiento en los últimos semestres, por creer en mis capacidades académicas y profesionales y sobre todo por su tiempo, dedicación y pasión por la labor docente, que lo han convertido en mi motivación y ejemplo a seguir.*

*A Juan Camilo Arias, mi colega y amigo, por sus valiosos aportes antes y durante la realización de este trabajo, por sus constantes abrazos y palabras de aliento.*

*A mis amigos y compañeros David Puentes, Julio Camacho, Sebastián Ortiz e Iván Londoño por compartir mis alegrías y mis apuros, por estar siempre ahí para impulsarme a continuar. A Oscar Arias y Mauricio Villamizar por estar siempre prestos a colaborar.*

*A mi familia, por el tiempo, el amor y la paciencia, especialmente a mi padre por estar presente en las madrugadas y en los trasnochos, en cada momento de dificultad y en cada logro obtenido.*

*A los amigos y compañeros que estuvieron presentes en esta etapa, por sus aportes en pro del cumplimiento de este objetivo, por sus palabras de ánimo, compañía, consejos y más que nada por su amistad.*

**Tabla de Contenido**

Introducción .....	16
1. Especificaciones del proyecto .....	18
1.1. Planteamiento del problema. ....	18
1.2. Justificación del proyecto. ....	19
2. Objetivos .....	21
2.1. Objetivo general .....	21
3. Marco de referencia.....	22
3.1. Revisión de literatura.....	22
3.2. Marco teórico.....	35
4. Modelo MILP ara el DCFP .....	40
4.1. Descripción del modelo.....	40
4.2. Notación .....	41
4.3. Implementación del Modelo MILP en GAMS .....	45
5. Algoritmo Búsqueda Armónica para el DCFP.....	53
5.1. Modelo.....	54
5.2. Parámetros .....	54
5.3. Representación de la solución. ....	55

5.4. Desarrollo del algoritmo..... 56

6. Resultados ..... 76

6.1. Implementación en GAMS..... 76

6.2. Desarrollo de la Búsqueda Armónica en MATLAB ..... 79

7. Conclusiones. .... 100

8. Recomendaciones..... 102

Referencias bibliográficas..... 103

**Lista de figuras**

Figura 1 Sistema de Celdas de Manufactura Dinámico.....	37
Figura 2. Pseudocódigo Búsqueda Armónica .....	40
Figura 3. Declaración y asignación de Conjuntos y Subconjuntos.....	49
Figura 4. Declaración y asignación de Parámetros.....	50
Figura 5 Definición de Variables.....	51
Figura 6 Definición de Ecuaciones.....	52
Figura 7 Definición del Modelo y de la Solución del mismo.....	52
Figura 8 Estructura del vector solución para asignación de procesos.....	56
Figura 9 Estructura del vector solución para la asignación de máquinas a celdas.....	56
Figura 10 Pseudocódigo para la ejecución del Módulo principal.....	58
Figura 11 Diagrama de flujo del Módulo Principal.....	59
Figura 12 Ejemplo de asignación de máquinas mediante una distribución uniforme continua con cota superior dinámica.....	61
Figura 13 Módulo Generador de Máquinas.....	62
Figura 14 Pseudocódigo para la ejecución del Módulo Generador de Máquinas.....	63
Figura 15 Pseudocódigo para la ejecución del Módulo de Generador de Procesos.....	65
Figura 16 Módulo Generador de Procesos.....	66

SOLUCIÓN AL DCFP CON EL ALGORITMO BÚSQUEDA ARMÓNICA	9
Figura 17 Pseudocódigo para la ejecución del Módulo de organizar.....	67
Figura 18 Pseudocódigo para la ejecución del Módulo de Función Objetivo.....	68
Figura 19 Módulo Función Objetivo.....	69
Figura 20 Módulo Búsqueda Armónica.....	71
Figura 21 Pseudocódigo para la ejecución del Módulo de Búsqueda armónica.....	72
Figura 22 Ejemplo de la aplicación de la búsqueda armónica a una solución de máquinas por celdas (cantidad de máquinas).....	73
Figura 23 Ejemplo de la aplicación de la búsqueda armónica a una solución de máquinas por celdas (Posiciones en el vector solución).....	74
Figura 24 Ejemplo de Función Objetivo antes de la armonización.....	75
Figura 25 Ejemplo de Función Objetivo después de la armonización.....	76
Figura 26 Comportamiento de la Función Objetivo respecto al Espacio Recorrido.....	77
Figura 27 Comportamiento de la Función Objetivo respecto al Espacio Recorrido.....	77
Figura 28 Gráficas de residuos de Función Objetivo.....	81
Figura 29 Gráfica de diagrama de Pareto de los efectos de la función objetivo.....	82
Figura 30 Gráfica de ajuste normal de los efectos.....	82
Figura 31 Gráfica de ajuste normal de los efectos absolutos.....	83
Figura 32 Gráfica de efectos principales para el error de la función objetivo.....	84

SOLUCIÓN AL DCFP CON EL ALGORITMO BÚSQUEDA ARMÓNICA	10
Figura 33 Gráfica de interacción para el error de la función objetivo.....	84
Figura 34 Gráfica de diagrama de Pareto de los efectos del tiempo.....	85
Figura 35 Gráfica de ajuste normal de los efectos absolutos (Tiempo).....	85
Figura 36 Gráfica de ajuste normal de los efectos.....	86
Figura 37 Resumen gráfico de error de la función objetivo por Factor HMS.....	87
Figura 38 Transformación de Johnson para el error de la función objetivo.....	88
Figura 39 Gráfica de efectos principales para el error de la función objetivo.....	92
Figura 40 Gráfica de distribución de datos y dispersión para niveles Bajo, Medio, Alto.....	94
Figura 41 Gráfica resumen de ANOVA para niveles Bajo, Medio, Alto.....	95
Figura 42 Solución de asignación de máquinas para las instancias de Nivel bajo.....	97
Figura 43 Solución de asignación de máquinas para las instancias de Nivel Medio.....	98
Figura 44 Solución de asignación de máquinas para las instancias de Nivel Alto.....	99

**Lista de tablas**

Tabla 1 Cumplimiento de Objetivos .....	18
Tabla 2 Atributos de los sistemas de manufactura estudiados.....	34
Tabla 3 Atributos de los sistemas de manufactura propuestos en la literatura para el DCFP .....	34
Tabla 4 Clases de Complejidad Computacional .....	38
Tabla 5 Caracterización de los Parámetros para Instancias de Nivel Medio y Alto .....	46
Tabla 6 Parámetros constantes para los tres niveles a evaluar.....	47
Tabla 7 Demandas por periodo para el Nivel Bajo.....	47
Tabla 8 Parámetros para los tipos de máquina en el Nivel Bajo .....	48
Tabla 9 Demandas por periodo para los Niveles Medio y Alto.....	48
Tabla 10 Resultados del modelo MILP .....	76
Tabla 11 Ejemplo de los resultados de asignación de procesos, a máquinas, en celdas para el periodo 1 .....	78
Tabla 12 Estructura del diseño de experimentos .....	80
Tabla 13 Información del factor .....	89
Tabla 14 Análisis de Varianza .....	89
Tabla 15 Análisis de Varianza sin normalizar .....	91
Tabla 16 Método de Tukey para HMS una confianza de 95% .....	92
Tabla 17 Método de Tukey para PAR una confianza de 95% .....	93

Tabla 18 Método de Tukey para SUBARMON una confianza de 95% ..... 93

Tabla 19 Método de Tukey para HMCR una confianza de 95% ..... 93

Tabla 20 Método de Tukey para MAXIMP una confianza de 95% ..... 93

**Lista de Apéndices**

Apéndice A. Análisis bibliométrico.....114

## Resumen

**Título del proyecto:** \*

“SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE FORMACIÓN DE CELDAS DE MANUFACTURA DINÁMICAS (DYNAMIC CELL FORMATION PROBLEM, DCFP) A TRAVÉS DEL ALGORITMO BÚSQUEDA ARMÓNICA (HARMONY SEARCH, HS)”.

**Autor:** Laura Yeraldin Escobar Rodríguez\*\*

**Palabras clave:**

Problema de Formación de Celdas de Manufactura Dinámicas, Celdas de Manufactura Multiperiodo, Programación Lineal Entera Mixta, Algoritmo Búsqueda Armónica, HS.

**Descripción:**

En la presente investigación se estudia el problema de formación de celdas de manufactura dinámicas (*Dynamic Cell Formation Problem, DCFP*) considerando múltiples periodos, diversos productos y la secuencia de producción. Para dar solución a este problema se diseña un modelo de programación lineal entera mixta implementado en el software GAMS® haciendo uso del solver CPLEX12 y como alternativa al modelo propuesto se desarrolla el algoritmo Búsqueda Armónica.

El algoritmo es desarrollado en Matlab® y sus parámetros (Memoria Armónica, HMS; Número de improvisaciones, MAXIMP; Tasa de consideración armónica, HMCR; Tasa de afinación, PAR; Tamaño de la Armonía, SUBARMON) son calibrados a través de un diseño experimental. El desempeño del algoritmo es comparado con los resultados obtenidos en el modelo MILP, haciendo uso de instancias adaptadas de la literatura (considerando niveles bajo, medio y alto, de acuerdo a la cantidad de máquinas a asignar). Como resultado se determina que el factor que más impacto tiene en el comportamiento de la función objetivo es la Memoria Armónica, y en cuanto al tiempo computacional la interacción entre la Memoria Armónica y la Tasa de Consideración Armónica. Adicionalmente, se establece que dividir el vector de soluciones en sub vectores denominados sub armonías, no genera una diferencia significativa, ni respecto a la función objetivo ni al tiempo computacional.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Director: MSc. Edwin Alberto Garavito Hernández, Codirector: Ing. Leonardo Hernán Talero Sarmiento

## Abstract

**Project title:** \*

“A SOLUTION TO THE DYNAMIC CELL FORMATION PROBLEM USING HARMONY SEARCH ALGORITHM”

**Author:** Laura Yeraldín Escobar Rodríguez\*\*

**Keywords:**

Dynamic Cell Formation Problem, Multi-period Cell Manufacturing, Mixed-Integer Linear Programming, Harmony Search Algorithm.

**Description:**

This research addresses the Dynamic Cell Formation Problem (DCFP) considering multiple periods, multiple products and the production sequence. In order to solve this problem, is developed a mixed-integer linear programming later, the model is implemented in GAMS® using the CPLEX12 solver, moreover a Harmonic Search algorithm is used as an alternative solution method.

The algorithm is developed in Matlab® and its parameters (Harmonic Memory, HMS, Number of improvisations, MAXIMP, Harmonic Consideration Rate, HMCR, Tuning Rate, PAR, Harmony Size, SUBARMON) are calibrated through an experimental design. The performance of the algorithm is compared with the results obtained with the MILP model, making use of instances found in the literature (considering low, medium and high levels, according to the quantity of machines to be assigned). It is determined that the factor that has the greatest impact on the objective function is the Harmonic Memory, and the interaction between the Harmonic Memory and the Harmonic Consideration Rate has the greatest impact on the computational time. Additionally, it is established that dividing the vector of solutions into sub vectors called sub harmonies, does not generate a significant difference, neither with respect to the objective function nor to the computational time.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Faculty of Physicomechanical Engineering. Industrial and Business School. Director: MSc. Edwin Alberto Garavito Hernández, Co-director: Eng. Leonardo Hernán Talero Sarmiento

## Introducción

En un entorno globalizado se hace necesario que las empresas adopten estrategias que les permitan ser competitivas y permanecer vigentes en el mercado. De esta manera, conocer la competencia, producir lo que el mercado demanda, alinear los procesos y recursos a la estrategia de la empresa, entre otros, son factores que representan una ventaja competitiva para una organización. Entre los diversos factores, la planeación de los aspectos relacionados con la producción juega un papel importante puesto que, busca mejorar los procesos de manufactura, atender las necesidades del mercado existente y disminuir los costos asociados a la fabricación. Una estrategia de producción es 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 minimizar costos, tiempos, distancias, entre otros, y a su vez, mejorar el nivel de servicio.

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 (Garavito Hernandez, 2016). El diseño de celdas de manufactura es conocido como problema de formación de celdas (CFP), donde dado un número de partes a procesar, requerimientos de procesos, 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, luego se agrupan las máquinas disponibles en celdas y finalmente las familias de productos son asignadas a las celdas formadas (Papaioannou & Wilson, 2010).

Sin embargo, 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 la demanda cambia o hay variación en el portafolio de productos manufacturados, por lo tanto, surge una formulación que busca atender las variaciones de demanda en determinados periodos de tiempo, para un horizonte de planeación definido (Balakrishnan & Hung Cheng, 2005), conocido como Problema de Formación de Celdas de Manufactura Dinámicas (*Dynamic Cell Formation Problem, DCFP*).

Dado lo anterior, en la presente investigación se presenta un modelo de programación lineal entera mixta (*Mixed-Integer Linear Programming, MILP*) con el cual se busca dar solución al DCFP siguiendo las recomendaciones de Venkatadri, Elaskari, & Kurdi (2017), quienes formulan el problema teniendo en cuenta la existencia de múltiples productos, considerando además, la reconfiguración del sistema y la secuencia de producción para cada producto a fabricar.

Como primera etapa, se realiza la revisión de literatura con el fin de comprender la estructura del problema a tratar; seguido, se presenta la formulación matemática y el desarrollo del modelo MILP, así como el desarrollo del algoritmo Búsqueda Armónica (*Harmony Search, HS*) propuesto por Zong Woo Geem, Joong Hoon Kim, & Loganathan (2001) y planteado como alternativa de solución del modelo propuesto. Los resultados de la experiencia computacional y su respectivo análisis son documentados y finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones para futuros trabajos. El cumplimiento de los objetivos planteados para la presente investigación, se presenta la Tabla 1.

**Tabla 1***Cumplimiento de Objetivos*

<i>Objetivos Específicos</i>	<i>Cumplimiento</i>
Identificar la estructura del DCFP a partir de una revisión de literatura con el propósito de caracterizar las variantes realizadas y los métodos de solución implementados.	Capítulo 3
Diseñar un modelo de programación matemática para el DCFP, solucionarlo haciendo uso de técnicas exactas y validarlo utilizando instancias encontradas en la literatura.	Capítulo 4
Solucionar el modelo matemático propuesto para el DCFP a través del algoritmo Búsqueda Armónica.	Capítulo 5
Evaluar el desempeño del algoritmo mediante la comparación con instancias de la literatura o a través de un análisis estadístico de los resultados.	Capítulo 6
Socializar los resultados de la investigación mediante la elaboración de un artículo de carácter publicable.	Apéndice

## 1. Especificaciones del proyecto

### 1.1. Planteamiento del problema.

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 cada una, entre otros. Debido a 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 atributos o parámetros propios de los procesos de producción. Para la presente investigación se plantea considerar múltiples productos, así como las secuencias de producción teniendo en cuenta que a partir de estas se pueden generar rutas alternativas de procesamiento, considerando que este es un factor relevante a la hora de calcular los costos de transferencia o movimiento de materiales, que a su vez hacen parte de un componente de la función de costos que se busca minimizar.

Ahora bien, debido a que el DCFP es clasificado como NP-hard (Tavakkoli-Moghaddam, Aryanezhad, Safaei, & Azaron, 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 plantea el uso de la meta heurística Búsqueda Armónica propuesta por Zong Woo Geem et al. (2001) que se caracteriza por manipular y combinar de manera inteligente mecanismos para un adecuado proceso de exploración y explotación de un espacio de búsqueda.

## **1.2. Justificación del proyecto.**

En Colombia y en particular en Santander se encuentran empresas manufactureras de diferentes sectores (calzado, automotriz, suministros médicos, entre otras) de mediano tamaño que manejan distintos niveles de demanda y pueden adoptar la manufactura celular como estrategia para posicionarse en el mercado, impulsando de esta manera la industria colombiana. Dicha estrategia 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, combinando así las ventajas de las distribuciones por proceso (disminuyendo los tiempos de ciclo) con las líneas de producción dedicadas (aumentando la flexibilidad del sistema) lo que resulta útil para organizaciones de nuestro entorno.

No obstante, a pesar de que esta estrategia brinda ventajas a los sistemas productivos es preciso tener en consideración los ciclos de vida de los productos y las variaciones en la demanda, dado que las celdas de manufactura son diseñadas para determinado periodo de tiempo pero pueden perder vigencia una vez la demanda cambia o hay variación en el portafolio de productos manufacturados, por lo tanto, surge una formulación que busca atender las variaciones de demanda en determinados periodos de tiempo, para un horizonte de planeación definido (Balakrishnan & Cheng, 2015), conocido como Problema de Formación de Celdas de Manufactura Dinámicas (Dynamic Cell Formation Problem, DCFP). De acuerdo con lo anterior, en la presente investigación se busca abordar este problema mediante un modelo de programación lineal entera mixta (*Mixed-Integer Linear Programming, MILP*) con el cual se busca dar solución al DCFP siguiendo las recomendaciones de Venkatadri, Elaskari, & Kurdi (2017), donde se sugiere la consideración de múltiples productos, reconfiguración del sistema y la secuencia de producción para cada producto a fabricar. Haciendo referencia ahora 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.

## 2. Objetivos

### 2.1. Objetivo general

Desarrollar un modelo matemático para dar solución al problema de formación de celdas de manufactura dinámicas (DCFP) considerando una formulación basada en múltiples productos y secuencias mediante el algoritmo de Búsqueda Armónica

### 2.2. Objetivos específicos

- Identificar la estructura del DCFP a partir de una revisión de literatura con el propósito de caracterizar las variantes realizadas y los métodos de solución implementados.
- Diseñar un modelo de programación matemática para el DCFP, solucionarlo haciendo uso de técnicas exactas y validarlo utilizando instancias encontradas en la literatura.
- Solucionar el modelo matemático propuesto para el DCFP a través del algoritmo Búsqueda Armónica.
- Evaluar el desempeño del algoritmo mediante la comparación con instancias de la literatura o a través de un análisis estadístico de los resultados.
- Socializar los resultados de la investigación mediante la elaboración de un artículo de carácter publicable.

### 3. Marco de referencia

#### 3.1. Revisión de literatura

El concepto de celda de manufactura dinámica fue presentado por Rheault, Drolet & Abdunour (1995) y éste 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. 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*). 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 que describa o represente la realidad dando a su vez solución al DCFP.

Dado lo anterior, Boulif & Atif (2008) mencionan dos estrategias para abordar el DCFP: (1) Problema de Formación de Celdas de Manufactura Activo (*Active Cell Formation Problem, ACFP*), que considera una serie de configuraciones de celdas de acuerdo a la necesidad generada en cada período del horizonte de planeación y; (2) Problema de Formación de Celdas de Manufactura Pasivo (*Passive Cell Formation Problem, PCFP*), que busca encontrar una única configuración que tolere los cambios de los planes de producción generados en cada período.

Por otra parte, en la literatura se evidencia una variación del DCFP y es denominado Problema de Formación de Celdas de Manufactura Dinámicas Virtuales (*Dynamic Virtual Cell Formation*

*Problem, DVCFP*), y se diferencia de la proposición original debido a que, si bien se presenta una nueva configuración de recursos para atender las necesidades de producción de determinados productos o familias de productos, esa configuración no se ve reflejada físicamente en la distribución de los recursos, por lo tanto, parámetros relacionados con los costos de reconfiguración (común del DCFP), no son tenidos en cuenta (Mahdavi, Aalaei, Paydar, & Solimanpur, 2009).

Asimismo, en otros trabajos se evidencian diferentes variaciones realizadas al problema original, buscando incorporar a un modelo matemático la mayor cantidad de parámetros reales de un sistema de manufactura. De acuerdo con Saxena & Jain (2011) existen múltiples parámetros o atributos a tener en cuenta en el DCFP; sin embargo, para el presente estudio se profundiza en los aportes realizados por diversos autores en torno a diez de esos parámetros y éstos son: *rutas alternativas de procesamiento, secuencia de operaciones, efecto de averías, duplicación de máquinas, balance de carga de trabajo, tamaño de lote, diseño o disposición de celdas y máquinas, condiciones de incertidumbre y aspectos relacionados con las personas*.

Por tanto, a continuación, se presentan los resultados de la revisión realizada en torno al DCFP; partiendo de la identificación de las funciones objetivo planteadas por diferentes autores, siguiendo con la evolución de los atributos anteriormente mencionados incluidos como parámetros en la formulación del modelo matemático, para finalmente determinar los principales métodos de solución empleados para resolver el DCFP.

**3.1.1. 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 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 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.

Por otra parte, 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. 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 componentes 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 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 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.

**3.1.2. 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, Bulgak, & Bektas, 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. En el modelo propuesto por Ahkioon, Bulgak, & Bektas (2009) también se asumen rutas alternativas de procesamiento; sin embargo, 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.

Un enfoque diferente se puede observar en el modelo planteado por Jayakumar V A Raju (2010) 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, el modelo 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.

**3.1.3. 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, 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.

**3.1.4. 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.

**3.1.5 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.

**3.1.6. 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.

**3.1.7. 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; sin embargo, el costo

depende de la distancia recorrida por el material que varía de acuerdo a la disposición de las máquinas y las celdas.

**3.1.8. 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.

**3.1.9. Condiciones de Incertidumbre.** En los estudios realizados por diferentes autores, se considera la variación de la demanda dada la naturaleza del DCFP; sin embargo, para dichos estudios, esta variación hace referencia a parámetros determinísticos conocidos para cada uno de los periodos del horizonte de planeación, tal es el caso de los trabajos realizados por Saidi-Mehrabad & Safaei, (2007); N. Safaei, Saidi-Mehrabad, & Jabal-Ameli, (2008); Tavakkoli-Moghaddam, Safaei, et al., (2008) y Ahkioon et al., (2009). Por otra parte, autores proponen la utilización de datos estocásticos para ciertos parámetros de entrada con el fin de tener en cuenta la fluctuación propia del ambiente dinámico en el que se desenvuelven las organizaciones hoy en día. Un modelo de programación difusa es propuesto por Nima Safaei et al., (2008) teniendo en cuenta la utilización de datos de entrada difusos para la demanda generada y la capacidad disponible de las máquinas; para este último se consideran los conceptos de capacidad actual y nominal con el fin de determinar el valor con el cual se va a trabajar el modelo.

Más adelante, Vafaeinezhad et al., (2016) asumen en su modelo que la demanda de productos para cada periodo es incierta y definida a través de escenarios, de manera similar, el parámetro que hace referencia al costo de adquisición de maquinaria también se considera incierto.

**3.1.10. Aspectos Relacionados a 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 el 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, así mismo 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) 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) plantea 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.

**3.1.11. Métodos de Solución.** Diversos métodos de solución han sido planteados 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. 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. Más adelante, Tavakkoli-Moghaddam, Safaei, et al. (2008) proponen solucionar el 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.

Por otra parte, Sarayloo & Tavakkoli-Moghaddam (2010b) plantean la meta heurística optimización de enjambre de partículas (*Particle Swarm Optimization, PSO*) 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. En ese mismo año, Sarayloo & Tavakkoli-Moghaddam (2010a) hacen uso del algoritmo competitivo imperialista (*Imperialistic Competitive Algorithm, ICA*) para abordar el DCFP considerando la planeación de la producción para cada periodo del horizonte de planeación. Asimismo, Mehdizadeh et al. (2016) proponen un algoritmo de optimización de la vibración de amortiguadores (*Vibration Damping Optimization Algorithm, VDOA*) con el que buscan dar solución a un problema multiobjetivo en el que tienen en cuenta asignación y entrenamiento de operarios.

**Tabla 2***Atributos de los sistemas de manufactura estudiados*

Convención	Atributo
1a	Formulación Mono-objetivo
1b	Formulación Multi-objetivo
2	Rutas alternativas de procesamiento
3	Secuencia de operaciones
4	Averías de máquinas
5	Duplicación de máquinas
6	Balance de Carga de Trabajo
7	Tamaño de lote de procesamiento y/o transferencia
8	Diseño o disposición de instalaciones
9a	Parámetros determinísticos
9b	Parámetros estocásticos
9c	Parámetros difusos
10	Aspectos relacionados a las personas

**Tabla 3***Atributos de los sistemas de manufactura propuestos en la literatura para el DCFP*

Artículo	1		2	3	4	5	6	7	8	9			10
	a	b								a	b	c	
(Saidi-Mehrabad & Safaei, 2007)	x		x	x		x		x		x			
(Tavakkoli-Moghaddam et al., 2007)		x	x	x		x	x	x					x
(Bouliif & Atif, 2008)		x		x						x	x		
(F. Defersha & Chen, 2008)	x		x	x		x	x	x		x			
(F. M. Defersha & Chen, 2008)	x		x	x		x	x	x		x			
(N. Safaei et al., 2008)	x		x	x		x		x		x			
(N. Safaei et al., 2008b)	x		x	x		x		x					x
(Tavakkoli-Moghaddam et al., 2008)	x		x	x		x		x		x			
(Xiaoqing et al., 2008)		x					x			x			
(Ahkioon et al., 2009)	x		x	x	x	x				x			
(Ah kioon et al., 2009)	x		x	x		x		x		x			
(Bajestani et al., 2009)	x		x				x	x		x			
(Aryanezhad et al., 2009)	x		x					x		x			x
(Dong, Wu, & Hou, 2009)	x								x				
(N. Javadian et al., 2009)	x							x		x			
(Mahdavi et al., 2009)	x									x			x
(N. Safaei et al., 2009)	x			x				x		x			
(N. Safaei et al., 2009b)	x			x				x		x			
(Tavakkoli-Moghaddam et al., 2009)	x							x		x			
(Wang et al., 2009)		x		x			x	x		x			
(Deljoo et al., 2010)	x		x					x		x			
(Jayakumar & Raju, 2010)	x		x	x			x	x		x			
(Sarayloo et al., 2010a)	x									x			
(Sarayloo et al., 2010b)		x					x			x			
(Ghotboddini et al., 2011)		x						x		x			x
(N. Javadian et al., 2011)		x				x				x			x
(Saxena & Jain, 2011)	x		x	x	x		x	x		x			
(Rezazadeh, Mahini, & Zarei, 2011)	x		x				x			x			
(Kia et al., 2012)	x		x	x			x	x			x		

**Continuación Tabla 3***Atributos de los sistemas de manufactura propuestos en la literatura para el DCFP*

(Soolaki, 2012)		x						x		x
(Babazadeh et al, 2013)	x						x	x		
(Fan & Cao, 2013)	x							x	x	
(Fan & Feng, 2013)	x		x				x	x	x	x
(Lv, Yuan, & Han, 2013)	x		x	x		x	x		x	
(Majazi Dalfard, 2013)	x						x		x	
(Nikoofarid & Aalaei, 2013)	x								x	x
(Rafiei & Ghodsi, 2013)		x					x	x	x	x
(Wei et al., 2013)	x								x	x
(Bootaki, Mahdavi, & Paydar, 2014)		x								x
(Mahdavi et al., 2014)		x							x	x
(Ossama, Youssef, & Shalaby, 2014)	x		x				x		x	
(Rabbani et al., 2014)		x					x		x	
(Deep & Singh, 2015)	x		x	x	x	x			x	
(Niakan et al., 2016a)		x		x			x	x	x	x
(Niakan et al., 2016b)		x		x			x	x		x
(M Rabbani et al., 2016)		x					x	x	x	x
(Deep & Singh, 2016)	x		x	x	x	x			x	
(Ghosh, Doloi, & Dan, 2016)		x		x					x	x
(Mehdizadeh & Rahimi, 2016)	x			x		x			x	x
(Mehdizadeh et al., 2016)		x	x	x		x			x	x
(Moradgholi et al., 2016)		x							x	
(Sakhaii et al, 2016)	x		x	x	x				x	x
(Vafaeinezhad et al., 2016)	x			x			x	x		x
(Zohrevand et al., 2016)		x		x					x	x
(M Rabbani et al., 2017)	x							x	x	x
(Venkatadri et al., 2017)	x		x	x					x	

**3.2. Marco teórico**

**3.2.1. Celda de Manufactura (CM).** La manufactura celular (*Cellular Manufacturing, CM*), es una aplicación de la tecnología de grupos (*Group Technology, GT*); ésta última, definida como una filosofía de manufactura que se basa en identificar partes o productos similares en geometría, requerimientos de procesamiento, entre otros, y agruparlos en familias, con el fin de obtener algún tipo de ventaja o beneficio a partir de dichas similitudes (Selim, Askin, & Vakharia, 1998). Una celda es un grupo de estaciones de trabajo, herramientas, equipos, personas y en general, recursos, dispuestos para crear un flujo para que productos agrupados en familias, puedan ser procesados de una estación a otra. Dado lo anterior, la manufactura celular ha sido aplicada en

diversas industrias, reportando beneficios como la disminución de costos de alistamiento, tiempos de ciclo, inventario de producto en proceso, costos de manipulación de materiales, disminución de la tasa de productos defectuosos, entre otros (Liu, Yin, Yasuda, & Lian, 2010).

**3.2.2. Problema de formación de celdas de manufactura.** El CFP trabaja en la identificación de familias de productos y la agrupación de las maquinas en celdas, donde dichas familias de productos serán procesadas. Una vez identificados los productos y máquinas del sistema de manufactura, el CFP puede ser reducido a tres decisiones: (1) identificación de familias de productos; (2) identificación de celdas; y (3) asignación de familias de productos a celdas o viceversa (Selim et al., 1998).

**3.2.3. Problema de formación de celdas de manufactura dinámicas.** El DCFP parte de la misma estructura del CFP; sin embargo, el enfoque dinámico tiene en cuenta el rediseño de las celdas cuando la demanda de los productos cambia en el tiempo, es decir, para un horizonte de planeación determinado y una demanda conocida para cada periodo, se busca encontrar la configuración de celdas adecuada que permita satisfacer dicha demanda y a su vez minimizar los costos asociados a los requerimientos de producción. En la *Figura 1* se observan cinco tipos de máquinas (1, 2, 3, 4 y 5) distribuidas en las celdas 1, 2 y 3 en el periodo 1; se considera un cambio de demanda para el periodo 2; por tanto, las máquinas son reubicadas y la configuración de las celdas 1, 2 y 3 cambia respondiendo a las nuevas necesidades de producción.



Figura 1 Sistema de Celdas de Manufactura Dinámico

**3.2.4. Optimización.** La optimización es una parte relevante dentro de la investigación operativa, consiste en la selección de una alternativa mejor, en algún sentido, que las demás alternativas posibles (Sánchez, Ramos, Ferrer, Barquín, & Linares, 2010). En general, los problemas de optimización integran estos tres componentes:

- **Función Objetivo:** Hace referencia a la medida cuantitativa del funcionamiento del sistema que se desea optimizar (maximizar o minimizar)
- **Variables:** Son la representación de las decisiones que se pueden tomar y que afectan el valor de la función objetivo. Se pueden clasificar en variables independientes y variables dependientes.
- **Restricciones:** Hacen referencia al conjunto de relaciones representadas por ecuaciones e inecuaciones, que algunas variables están obligadas a satisfacer.

Dar solución a un problema de optimización, consiste en encontrar el valor que deben tomar las variables, con el fin de hacer optima la función objetivo, satisfaciendo a su vez el conjunto de restricciones que componen el modelo.

**3.2.5. Complejidad Computacional.** Teniendo en cuenta la teoría de complejidad computacional, los problemas de optimización pueden ser clasificados de acuerdo al tiempo

computacional requerido para encontrar una solución en clases de complejidad (Ver Tabla 4) (Garey & Jhonson, 1979).

**Tabla 4***Clases de Complejidad Computacional*

Clase de Complejidad	de	Descripción
P		Contiene aquellos problemas de decisión que una máquina de Turing determinística puede resolver en tiempo polinómico. Este tipo de problemas pueden ser resueltos en un tiempo computacional razonable, por ejemplo, ejercicios de ordenación, búsqueda, entre otros.
NP		Esta clase está conformada por aquellos problemas que no pueden resolverse en un tiempo polinomial. Este conjunto de problemas puede ser resuelto en tiempo polinómico por una máquina de Turing no determinista. Cabe resaltar que los problemas de tipo NP son verificables en tiempos polinómicos, es decir, dada una posible solución para una instancia, es posible comprobar que es válida en un tiempo $n^k$ .
NP – Complete		Es un subconjunto de la clase NP, este tipo de problemas se caracterizan por ser los de mayor complejidad dentro de su grupo, esto quiere decir, que es menos probable encontrar una solución en tiempo polinómico para éstos dado que cualquier problema en NP se puede reducir a cada uno de los problemas de NP-Complete.
NP – Hard		En esta clase se encuentran los problemas que son por lo menos tan difíciles como los NP; sin embargo, no se encuentra establecida su complejidad, por tanto, puede ser más difícil un problema de esta categoría, que uno clasificado como NP-Complete. El tiempo de ejecución de un algoritmo que intenta solucionar un problema de clase NP-hard, aumenta de forma exponencial respecto al tamaño del problema.

**3.2.6. Programación lineal entera y programación lineal entera mixta.** Un modelo de programación lineal entera, es aquel en el que las variables son números enteros no negativos, de igual manera se hace uso de variables binarias que pueden representar decisiones como ausencia/presencia, si/no, entre otras. Por otra parte, cuando solo es necesario que algunas de las variables sean enteras y las demás continuas, se hace referencia a un modelo de programación lineal entera mixta; esta clasificación incluye modelos con variables enteras no negativas, continuas y binarias. La complejidad de estos problemas radica en la cantidad de variables presentes en los problemas.

**3.2.7. Métodos de solución.** Los métodos de solución para el CFP pueden clasificarse en:

- Métodos orientados al diseño: hace referencia al conjunto de métodos compuesto por técnicas de clasificación visual y clasificación por codificación; teniendo en cuenta aspectos físicos de los productos como forma, color, tamaño, entre otros.
- Métodos orientados al análisis del flujo de producción: consisten en la identificación de grupos conformados por tipos de partes y máquinas a partir de las rutas de procesamiento o matrices de incidencia parte/máquina. Dentro de esta categoría se encuentran: *los métodos por agrupamiento, teoría de grafos, programación matemática y algoritmos aproximados*. Asimismo, dentro de ésta última categoría, se encuentran las *heurísticas y meta heurísticas*.

**3.2.8. Branch and Cut.** Técnica de optimización combinatoria que integra el método de Branch and Bound con el de planos de corte, es decir, permite resolver problemas de programación entera mediante la relajación de las restricciones de integralidad y la acotación del espacio de búsqueda para impedir soluciones no enteras (planos de corte).

De acuerdo al procedimiento, si después de resolver una relajación lineal de un sub problema o rama no se puede cerrar el nodo correspondiente, entonces se busca un corte o desigualdad violada por el óptimo de relajación; si se encuentran desigualdades violadas, éstas se agregan a la formulación y se resuelve el problema lineal nuevamente, de lo contrario se continua con el proceso de subdivisión del problema. El objetivo es reducir significativamente el número de nodos del árbol mejorando la formulación de los sub problemas.

**3.2.9. Algoritmo Búsqueda Armónica (*Harmony Search, HS*).** Es un algoritmo meta heurística, fundamentada en procesos iterativos que orientan una heurística manipulando y combinando de manera inteligente mecanismos para un adecuado proceso de exploración y

explotación de un espacio de búsqueda. Fue propuesto por Geem et al., (2001) y basa su funcionamiento en el proceso de improvisación musical. Los pasos enmarcados en el proceso del algoritmo HS, son descritos en la *Figura 2*.

---

**Iniciar:**

- (1) Inicialización de la memoria armónica (*Harmony Memory, HM*)
  - (2) Improvisar una nueva armonía de la HM.
  - (4) Si la nueva armonía es mejor que la armonía mínima de la HM, es incluida a la HM.
  - (4) Si el criterio de parada no es satisfecho, se regresa al paso 2.
- 

*Figura 2* Pseudocódigo Búsqueda Armónica

## 4. Modelo MILP ara el DCFP

### 4.1. Descripción del modelo

El modelo propuesto en el presente trabajo aborda el problema de formación de celdas de manufactura en un ambiente dinámico, considerando variación de demanda, reubicación de máquinas y secuencia de operaciones para un horizonte de planeación. El problema es formulado como un modelo de programación lineal entera mixta con el que se busca minimizar los costos asociados al proceso de producción bajo los siguientes supuestos:

- El tiempo disponible en cada tipo de máquina es conocido y constante para todos los periodos del horizonte de planeación.

- 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.
- La demanda es determinística y conocida para cada periodo.
- El costo unitario de transferencia de materiales 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.

Las notaciones usadas en el modelo, la función objetivo y las restricciones son presentadas a continuación.

## 4.2. Notación

### 4.2.1. Índices

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

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

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

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

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

### 4.2.2. 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.

$H_t^1$  = Costo unitario de transferencia de materiales entre celdas del producto tipo i.

$q_{ijmk}$  = Tiempo de realización del proceso j para una unidad de la parte i en la máquina tipo m en la celda k.

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

$LM$  = Número mínimo de máquinas por celda.

$UM$  = Número máximo de máquinas por celda

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

$MM$  = Número entero muy grande

### 4.2.3. Variables de Decisión

$X_{ijmkt}$  = Numero de productos tipo i en la operación j a procesarse en la máquina tipo m en la celda k en el periodo t.

$Z_{ijmkt}$  = 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.

$YP_{ijmkt}$  = Variable auxiliar para la contabilización de movimientos intracelulares.

$YM_{ijmkt}$  = Variable auxiliar para la contabilización de movimientos intracelulares.

$$FO: \text{Min } Z = \sum_m \sum_k \sum_t (Ca_m a_{mkt} + R_m u_{mkt} + f_m n_{mkt} + Cd_m b_{mkt}) \quad (1.1)$$

$$+ \sum_t \sum_i \sum_j \sum_m \sum_k H_i^1 * YP_{ijmkt} \quad (1.2)$$

Sujeto a:

$$n_{mkt} = a_{mkt} \quad \forall j, \forall k, t = 1 \quad (2)$$

$$n_{mkt} = n_{mk(t-1)} + a_{mkt} - b_{mkt} + u_{mkt} - v_{mkt} \quad \forall m, \forall k, \forall t > 1 \quad (3)$$

$$\sum_k u_{mkt} = \sum_k v_{mkt} \quad \forall m, \forall t > 1 \quad (4)$$

$$LM \leq \sum_m n_{mkt} \leq UM \quad \forall k, \forall t \quad (5)$$

$$\sum_i \sum_j q_{jimk} X_{ijmkt} \leq Td_m n_{mkt} \quad \forall m, \forall k, \forall t \quad (6)$$

$$\sum_m \sum_k x_{ijmkt} \leq D_{it} \quad \forall j, \forall k, \forall t \quad (7)$$

$$X_{ijmkt} \leq MM * Z_{ijmkt} \quad \forall i, \forall j, \forall m, \forall k, \forall t \quad (8)$$

$$Z_{ijmkt} \leq X_{ijmkt} \quad \forall i, \forall j, \forall m, \forall k, \forall t \quad (9)$$

$$X_{ijmkt} \leq MM * w_{ijmkt} \quad \forall i, \forall j, \forall m, \forall k, \forall t \quad (10)$$

$$\sum_m X_{i(j+1)mkt} - \sum_m X_{ijmkt} = \sum_m YP_{ijmkt} - \sum_m YM_{ijmkt} \quad 0 \quad \forall i, \forall j, \forall k, \forall t \quad (11)$$

$$X_{imkt}, YP_{ijmkt}, YM_{ijmkt} \geq 0 \quad \forall i, \forall j, \forall m, \forall k, \forall t \quad (12)$$

$$Z_{ijmkt} \in [0,1] \text{ binario } \forall i, \forall j, \forall m, \forall k, \forall t \quad (13)$$

$$n_{mkt}, a_{mkt}, b_{mkt}, u_{mkt}, v_{mkt} \in \mathbb{Z} \quad \forall m, \forall k, \forall t \quad (14)$$

La función objetivo minimiza la suma total de los costos asociados a la producción. El primer término (ecuación 1.1) calcula el costo total de adquisición, utilización, reubicación y disposición de maquinaria en los diferentes periodos del horizonte de planeación. El segundo término (1.2) 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. Debido a que el cálculo de transferencia de material está dado inicialmente por la expresión  $|\sum_m X_{i(j+1)mkt} - \sum_m X_{ijmkt}|$  que representa la cantidad de productos en la operación  $j + 1$  menos la cantidad de productos en la operación  $j$  y que este término no lineal se encuentra únicamente en la función objetivo; se acogen las sugerencias de Ahkioon et al. (2009) linealizando la expresión a partir de la creación de las variables auxiliares  $YP_{ijmkt}$  y  $YM_{ijmkt}$  y adicionando al modelo original la restricción que relaciona las variables mencionadas anteriormente (ecuación 11). En la función objetivo se tiene en cuenta sólo una de las dos variables auxiliares con el fin de evitar doble contabilización de las transferencias realizadas.

El conjunto de restricciones de la ecuación 1 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 2 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 maquinas disponibles en el periodo anterior ( $t-1$ ) más las maquinas 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 3, 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 4 garantiza que la cantidad de máquinas en las celdas no puede ser ni menor ni mayor a los límites establecidos. En la ecuación 5 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 y el tiempo ( $X_{ijmkt}$ ) tarda cada uno de esos productos en ser procesados ( $q_{jmk}$ ), con el número de máquinas de cada tipo disponibles en cada celda ( $n_{mkt}$ ) por el tiempo disponible de cada una de ellas ( $Td_m$ ). El conjunto de restricciones de la ecuación 6 garantiza el cumplimiento de la demanda generada en cada periodo. Los conjuntos de restricciones 7, 8 y 9 relacionan las variables de decisión  $X_{ijmkt}$  (cantidad de productos fabricados) y  $Z_{ijmkt}$  (asignación de productos y operaciones a las máquinas y celdas en cada periodo. Finalmente, en los conjuntos de restricciones 12, 13 y 14, se establece la naturaleza de las variables de decisión consideradas en el modelo.

### 4.3. Implementación del Modelo MILP en GAMS

El modelo MILP propuesto se ejecuta en un computador con procesador Intel Core i5-4570 de 3,2 GHz, memoria RAM de 8 GB y un sistema operativo Windows 7 Home premium de 64 bits. La formulación es implementada en la herramienta de modelización algebraica general

GAMS/CPLEX 12, que permite resolver problemas de tipo MIP a través del algoritmo Branch and Cut.

Para la validación del modelo propuesto se hace uso de tres instancias clasificadas en niveles bajo, medio y alto de acuerdo a la cantidad máxima de máquinas a asignar en cada periodo de tiempo. Las instancias utilizadas para el nivel bajo, son presentadas por Wicks & Reasor (1999), consideradas por los autores de escala mediana de acuerdo a la variedad de productos y demandas establecidos. De otra parte, en las instancias utilizadas para niveles medio y alto se conserva la cantidad de productos diferentes a fabricar y el tipo de máquinas a utilizar, mientras que los datos correspondientes a demanda, tiempos de operación y disponibilidad por tipo de máquina, son creados a partir de una adaptación de la propuesta de generación de datos presentada por Mungwattana, (2000) (Ver Tabla 5).

**Tabla 5**

*Caracterización de los Parámetros para Instancias de Nivel Medio y Alto*

<i>Nivel</i>	<i>Demanda</i>	<i>Tiempo de Procesamiento</i>	<i>Tiempo Disponible</i>
Medio	U(500, 800)	U(1, 6)	12000
Alto	U(500, 1000)	U(1, 6)	8000

Para las tres instancias a utilizar se establecen los mismos parámetros correspondientes a tamaño mínimo y máximo de celda, costo de transferencia de materiales y costo de descartar maquinaria (Ver Tabla 6). Los datos correspondientes a la instancia de nivel bajo se encuentran en las Tablas 7 y 8, y las demandas de los niveles medio y alto son presentadas en la Tabla 9

**Tabla 6***Parámetros constantes para los tres niveles a evaluar*

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
LM: Número mínimo de máquinas por celda	3
UM: Número máximo de máquinas por celda	10
H1: Costo de transferencia de materiales	5
Cd: Costo de descartar maquinaria	1000

**Tabla 7***Demandas por periodo para el Nivel Bajo*

<i>Producto</i>	<i>Periodo</i>		
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
1	300	200	500
2	700	600	500
3	0	600	400
4	0	700	800
5	800	600	1000
6	600	300	0
7	0	900	800
8	400	800	200
9	300	200	600
10	400	1000	500
11	0	0	200
12	700	700	1000
13	100	600	800
14	100	200	0
15	0	0	300
16	500	800	500
17	100	900	400
18	1000	1000	400
19	0	700	1000
20	800	300	500
21	500	400	1000
22	0	100	100
23	400	500	800
24	0	0	500
25	0	0	400

**Tabla 8***Parámetros para los tipos de máquina el Nivel Bajo*

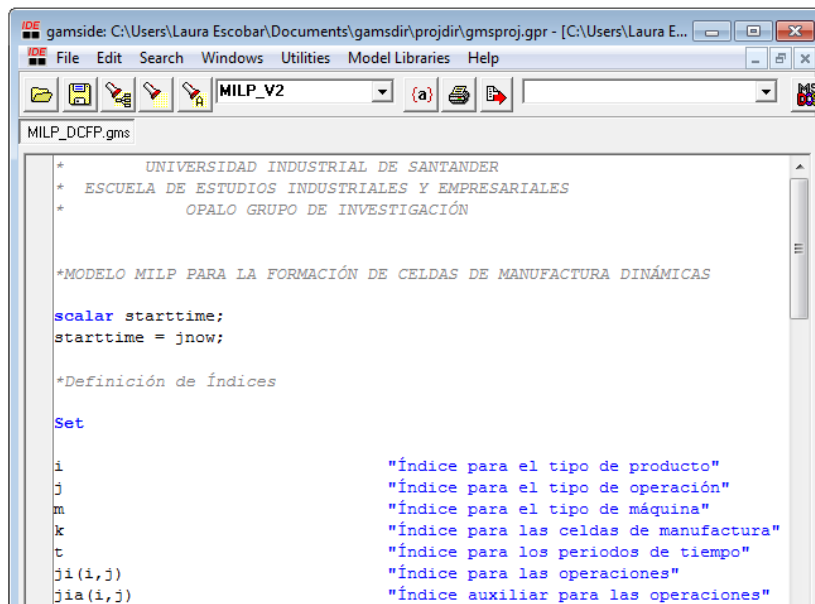
Tipo de Máquina	Costo de Adquirir	Costo de Reubicar	Capacidad (tiempo/máquina)	Costo fijo	Costo de disposición
A	8000	2000	15000	0	1000
B	14000	3500	18000	0	1000
C	10000	2500	18000	0	1000
D	18000	4500	19000	0	1000
E	10000	2500	25000	0	1000
F	6000	1500	17000	0	1000
G	18000	4500	17000	0	1000
H	14000	3500	19000	0	1000
I	10000	2500	18000	0	1000
J	16000	4000	15000	0	1000
K	6000	1500	19000	0	1000

**Tabla 9***Parámetros para los tipos de máquina el Nivel Medio*

<i>Producto</i>	<i>Medio</i>			<i>Alto</i>		
	<i>Periodo</i>			<i>Periodo</i>		
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
1	600	600	800	900	500	500
2	700	800	800	600	700	600
3	800	500	600	900	500	600
4	500	500	500	800	900	700
5	700	600	700	500	600	500
6	500	800	500	500	800	1000
7	600	800	800	700	500	1000
8	800	700	700	1000	800	700
9	500	700	600	700	600	700
10	800	700	700	800	800	700
11	800	800	700	600	900	1000
12	800	700	700	900	900	700
13	800	500	500	600	700	500
14	700	600	800	800	500	900
15	800	700	700	900	600	700
16	800	800	600	1000	1000	600
17	700	600	500	1000	500	700
18	600	800	800	800	900	500
19	800	800	600	500	800	500
20	800	700	800	500	1000	1000
21	800	600	500	600	500	1000
22	800	500	800	1000	700	800
23	500	600	800	600	500	500
24	500	800	800	900	1000	600
25	800	500	600	600	500	700

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*, *datos*, *variables*, *ecuaciones*, y *las declaraciones del modelo y de la solución del mismo*.

**Conjuntos:** Hacen referencia a los índices contenidos en sus representaciones algebraicas. En la *Figura 3* se muestra los conjuntos primarios que corresponden a los índices de la formulación matemática general del problema y los subconjuntos  $ji(i,j)$  y  $jia(i,j)$  creados en función de los conjuntos primarios y que indican la longitud de la secuencia de producción de cada uno de los productos.



```
IDE gamside: C:\Users\Laura Escobar\Documents\gamsdir\projdir\gmsproj.gpr - [C:\Users\Laura E...
File Edit Search Windows Utilities Model Libraries Help
MILP_V2 (a)
MILP_DCFP.gms
*
* UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
* ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES
* OPALO GRUPO DE INVESTIGACIÓN
*
*MODELO MILP PARA LA FORMACIÓN DE CELDAS DE MANUFACTURA DINÁMICAS
scalar starttime;
starttime = jnow;
*Definición de índices
Set
i "índice para el tipo de producto"
j "índice para el tipo de operación"
m "índice para el tipo de máquina"
k "índice para las celdas de manufactura"
t "índice para los periodos de tiempo"
ji(i,j) "índice para las operaciones"
jia(i,j) "índice auxiliar para las operaciones"
```

*Figura 3.* Declaración y asignación de Conjuntos y Subconjuntos. Extraído de software, 2018 Disponible en <https://www.gams.com/download/>

**Datos:** Hacen referencia a los datos de entrada del modelo. En la *Figura 4* se presentan los parámetros establecidos para el modelo propuesto.

```

*Definición de parámetros
Parameters
Ca (m)          "Costo de adquirir una máquina tipo m"
Cd (m)          "Costo de descartar una máquina de tipo m"
R (m)           "Costo de reubicar una máquina tipo m"
f (m)           "Costo fijo de la máquina m por periodo"
D (i, t)        "Demanda del producto i"
Cm (i, j, m, k) "Costo de manufacturar una unidad del produc
q (i, j, m, k)  "Tiempo de realización del producto i para l
Td (m)          "Tiempo disponible de una unidad de la máqui
LM              "Número mínimo de máquinas por celda"
UM              "Número máximo de máquinas por celda"
MM              "Número entero muy grande"
MN              "Paarámetro auxiliar para definir el mínimo"
w (i, j, m, k) "Si para el producto i la operación j se pue

```

Figura 4. Declaración y asignación de Parámetros Extraído de software, 2018 Disponible en <https://www.gams.com/download/>

**Variables:** En la formulación presentada, se establecen cuatro tipos de variables. En la *Figura 5* y se presenta la declaración y definición de las variables utilizadas en el desarrollo del modelo:

- **Variables libres:** Pueden tomar cualquier valor entre menos infinito e infinito. Para el modelo desarrollado, las variables correspondientes a costos, son definidas como variables libres.
- **Variables Enteras:** Son necesariamente discretas y pueden tomar cualquier valor entre cero e infinito. Las variables asociadas a la cantidad de máquinas (adquiridas, reubicadas, descartadas, disponibles) son declaradas enteras.
- **Variables Binarias:** Solo pueden tomar valores discretos entre cero y uno. La variable de asignación ( $Z_{ijmkt}$ ) es declarada como binaria.
- **Variables positivas:** Toman valor entre cero e infinito. La variable de decisión correspondiente a la cantidad de productos a asignar ( $X_{ijmkt}$ ) y las variables auxiliares utilizadas para la linealización del modelo son enteras; sin embargo, debido a restricciones del software, se establecen como positivas.

```

*Definición de variables
Variables
cadq          "Costo de adquisición de maquinaria"
cprd          "Costo de producción"
cdesc        "Costo de descartar maquinaria"
creub        "Costo de reubicar maquinaria"
cint         "Costos de manejo de materiales entre celdas"
cost         "Costo total"

*Variables de decisión
X(i,j,m,k,t) "Número de partes tipo i en la operación j a
Z(i,j,m,k,t) "1 si la operación j de la parte i es asigna
n(m,k,t)     "Número de máquinas tipo m disponibles en la
a(m,k,t)     "Número de máquinas tipo m adquiridas para l
b(m,k,t)     "Número de máquinas tipo m descartadas de la
u(m,k,t)     "Número de máquinas tipo m movidas a la celd
v(m,k,t)     "Número de máquinas tipo m sacadas de la cel

integer variables  n(m,k,t), a(m,k,t), b(m,k,t), u(m,k,t), v(m,
positive variables cadq, cint, creub, cdesc, X(i,j,m,k,t), Yp(i
binary variables  Z(i,j,m,k,t);

```

Figura 5 Definición de Variables. Extraído de software, 2018 Disponible en <https://www.gams.com/download/>

**Ecuaciones:** De forma similar a las variables, las ecuaciones deben ser declaradas antes de ser utilizadas. En la *Figura 6* se presenta la declaración y asignación de las ecuaciones definidas en el modelo MILP.

**Declaración del Modelo y de la Solución del Mismo:** Para el presente modelo no se establece límite de tiempo de ejecución ni número de iteraciones ejecutadas por el solucionador, por tanto, se trabaja con los valores predeterminados por el software que son 1000 segundos y 1000 iteraciones respectivamente. Finalmente se declara el modelo para proceder a dar solución al mismo (Ver *Figura 7*). En el Apéndice C se presenta el código desarrollado para uno de los problemas desarrollados. Para dar solución al problema, el software realiza la siguiente rutina:

- i. Llamar el archivo Datos.xlsx en el que se encuentran los sets y los parámetros del modelo y leerlos haciendo uso del comando GDXXRW.

- ii. Leer el archivo .gdx en el que se escribieron los sets y parámetros importados de la hoja de cálculo.
- iii. Ejecutar el modelo MILP haciendo uso del solver CPLEX12.
- iv. Guardar en un archivo gdx los resultados para X, Z, n, a, b, u, v y elapsed.

```

*Definición de ecuaciones
equations
cadquisicion "Costo de adquisición de maquinaria"
cdescartar "Costo de descartar maquinaria"
creubicar "Costo de reubicar maquinaria"
cproduccion "Costo de producción de los diferentes tipos"
cintercelda "Costos de manejo de materiales entre celdas"
costo_total "Costo total"

rest_1 "El número de máquinas adquiridas en cada celda"
rest_21 "Balance de máquinas entre periodos para los periodos 1 y 2"
rest_31 "Balance de máquinas entrantes y salientes de la celda"
rest_41 "El número de máquinas en cada celda debe ser menor que el número de máquinas disponibles"
rest_42 "El número de máquinas en la celda debe ser menor que el número de máquinas disponibles"
rest_5 "El tiempo requerido para suplir la demanda de la celda"
rest_6 "La demanda debe ser satisfecha en su totalidad"
rest_7 "Relación entre las variables de asignación"
rest_8 "Relación entre las variables de asignación"
aux_1 "Restricción auxiliar para calcular el total"

;
cadquisicion.. cadq=g=sum ( ( m, k, t ) , a ( m, k, t ) *Ca ( m ) );

```

Figura 6 Definición de Ecuaciones. Extraído de software, 2018 Disponible en <https://www.gams.com/download/>

```

display Ca, Cd, R, D, Td, w, q, ji, jia;
Option optcr=0.00001;
model MILPDCFP/All/;

MILPDCFP.OptFile=1;

solve MILPDCFP using mip minimizing cost;

scalar elapsed; elapsed = (jnow - starttime)*24*3600;

```

Figura 7 Definición del Modelo y de la Solución del mismo. Extraído de software, 2018 Disponible en <https://www.gams.com/download/>

## 5. Algoritmo Búsqueda Armónica para el DCFP

La búsqueda armónica (*Harmony Search, HS*) es un algoritmo meta heurístico tipo poblacional y evolutivo, basado en procesos iterativos que orientan una heurística manipulando y combinando de manera inteligente mecanismos para un adecuado proceso de exploración y explotación de un espacio de búsqueda (Geem et al. 2001). La versión inicial orientada a problemas discretos fue propuesta Geem et al. (2001) y más adelante, Geem (2009) propone la versión para problemas de tipo continuo. El algoritmo basa el mejoramiento a partir del concepto de improvisación musical, característica que no todo músico posee y en el cual la experiencia y el previo conocimiento de las armonías aportan a la calidad de la pieza musical resultante, en la que se busca producir una armonía agradable determinada por el estándar estético auditivo (Yang, 1995).

- Toca alguna melodía conocida que ha aprendido con anterioridad. (Memory)
- Toca algo similar a lo mencionado en el punto anterior. (Tone)
- Compone una nueva melodía a partir de sus conocimientos musicales para seleccionar de manera aleatoria nuevas notas. (Improvisation)

En la improvisación musical, cada músico toca una nota dentro de un posible rango, (formando un vector armónico). Si el conjunto de notas tocadas por los músicos es considerado como una buena armonía (Solución factible), ésta es guardada en la memoria de cada músico, incrementando la posibilidad de hacer una buena armonía la próxima vez. Cada nota es el valor de una variable de decisión (con valores aleatorios al inicio del algoritmo), formando un vector solución por cada improvisación musical ( $\vec{x}$ ) o conjunto de melodías. De acuerdo a lo anterior, desde el punto de vista algorítmico, la búsqueda armónica es un proceso iterativo y estocástico que construye, en cada iteración, un vector solución ( $\vec{x}$ ) con fundamento en tres pautas básicas, a saber:

- Búsqueda en la matriz de memoria armónica
- Ajuste a una solución previa por improvisación
- Búsqueda aleatoria

### 5.1. Modelo

Se puede exponer el modelo de búsqueda armónica como aquella solución que optimiza un vector el cual está restringido entre límites superiores e inferiores:

$$\min ( \max ) f(x) \mid LB_i < x_i < UB_i \quad (15)$$

Donde:

$f(x)$ : Función objetivo

$x$ : Vector de solución de longitud N y  $(x_i)$  variables de decisión.

$LB_i, UB_i$ : Son los límites inferiores y superiores para cada variable.

### 5.2. Parámetros

Los parámetros seleccionados para aplicar la metaheurística como método de solución, son tomados de trabajos previos realizados por Garavito Hernandez (2016) (HMS, HMCR, PAR, MAXIMPROV).

- Tamaño de memoria armónica, (*HMS*). {100, 1000}
- Tasa de consideración de la memoria armónica (*HMCR*). {50%, 90%}
- Tasa de ajuste de tono (*PAR*). {10%, 50%}
- Número máximo de improvisaciones (*MAXIMPROV*). {100, 5000}

Además, teniendo en cuenta las estrategias de diversificación del espacio de búsqueda propuestas por Gao, Wang, Ovaska, & Zenger (2012) se propone trabajar con la estrategia de sub-armonías, con el propósito de generar múltiples vectores armónicos.

- Número de sub-armonías ( $SUBARMO$ ){1,50}

### 5.3. Representación de la solución.

La solución del DCFP a través de la metaheurística HS, es lograda a partir de la representación de la solución mediante un vector de tamaño  $[NP * NJ * NM * NK * NT]$

Donde:

$NP$  es el número total de productos a fabricar

$NJ$  es la cantidad máxima de procesos que puede requerir un producto.

$NM$  es la cantidad total de máquinas requeridas para fabricar los productos.

$NK$  indica el número máximo de celdas donde se realizará la producción.

$NT$  es la cantidad total de periodos.

En la *Figura 8* se representa el tamaño del vector (donde la solución es la columna correspondiente a Valor y presenta valores tipo entero) y se consigna la manera en la cual cada posición se relaciona con las características de Periodo, Celda, Máquina, Producto y Operación.

PERIODO	CELDA	MÁQUINA	PRODUCTO	OPERACIÓN	Valor	Posición
1	1	1	1	1		1
1	1	1	1	2		2
1	1	1	1	3		3
1	1	1	2	1		4
1	1	1	2	2		5
1	1	1	2	3		6
...	...	...	...	...	...	...
3	3	11	24	1		7420
3	3	11	24	2		7421
3	3	11	24	3		7422
3	3	11	25	1		7423
3	3	11	25	2		7424
3	3	11	25	3		7425

Figura 8 Estructura del vector solución para asignación de procesos

En adición, durante el presente trabajo se propone la integración de un vector auxiliar de solución el cual indica la ubicación de cada máquina (y cómo se relaciona con el vector solución mencionado en la Figura 8), en las diferentes celdas durante los periodos del horizonte de planeación y es utilizado durante la etapa de la armonización de una solución, en el módulo de organizar datos. La estructura del vector auxiliar de decisión se indica en la Figura 9 y se presentan los niveles de los índices de manera similar a la figura anterior.

PERIODO	CELDA	MÁQUINA	Posición Inicial en el vector solución de procesos	Valor
1	1	1	1	
1	1	2	76	
1	1	3	151	
1	1	4	226	
1	1	5	301	
...	...	...	...	...
3	3	7	7051	
3	3	8	7126	
3	3	9	7201	
3	3	10	7276	
3	3	11	7351	

Figura 9 Estructura del vector solución para la asignación de máquinas a celdas

### 5.4. Desarrollo del algoritmo

En este trabajo, se propone la configuración de seis módulos relacionados con la ejecución de la búsqueda armónica, para la solución de un problema de asignación de celdas de manufactura en

un entorno dinámico. El primer Módulo (Principal), es la interfaz del usuario y es donde se asignan todos los parámetros de entrada y se obtiene la salida final de la metaheurística. El segundo Módulo está enfocado en la generación del vector de memorias armónico para máquinas en celdas (Solución Máquinas); posteriormente, en el Módulo 3 se desarrolla el vector de memorias armónicas para la asignación de procesos (Solución Procesos), en el Módulo 4 (Organizar datos) se recodifica el vector solución en vectores auxiliares y matrices para facilitar los cálculos posteriores. El Módulo 5 se utiliza para el cálculo de la Función Objetivo; finalmente, el Módulo 6 está destinado a ejecutar la búsqueda armónica con un subproceso destinado a armonizar la solución.

**5.4.1 Módulo principal:** Es el módulo de ejecución del algoritmo, encargado de activar los diferentes módulos, organizar la información y cargar los distintos parámetros del modelo. Una vez ejecutado el modelo, se limpian las variables y se cargan aquellas relacionadas con las restricciones del modelo (Cantidad de máquinas mínima y máxima por cada celda, tipos de productos, cantidad diferente de máquinas, relación de asignación de procesos, etc.); además, en esta parte del código se establece cuántos procesos pueden ser asignados a cada máquina, y por tanto, a partir del cómputo de los tiempos de procesamiento para cada operación y cada tipo de producto, se estima el requerimiento mínimo de máquinas para satisfacer la demanda. A partir de dicho requerimiento, se formulan los límites que tendrán las diferentes variables aleatorias uniformemente distribuidas para la asignación de máquinas y procesos.

Posterior a la definición de los parámetros del modelo, se configuran diversas variables auxiliares que facilitan la transición entre vectores y matrices, con el fin de generar el vector solución y vector solución auxiliar; éstos contienen el número de máquinas por celda, así como la cantidad de producto de cada proceso que se hace en cada máquina en cada celda para cada periodo

de tiempo. En la *Figura 10* se describe el proceso mediante un pseudocódigo el cual se acompaña con la información de diagramas de la *Figura 11*.

---

**Iniciar**: Cargar los datos de entrada, crear y limpiar las variables.

**Establecer** todos los parámetros de las armonías

**Definir** la cantidad de máquinas requeridas y su mínima y máxima disposición en las celdas

**Iniciar Bucle** Se comienzan a recorrer el vector de memoria armónica.

**Ejecutar** los diferentes módulos.

**Calcular** la mejor solución y almacenarla.

---

*Figura 10* Pseudocódigo para la ejecución del Módulo principal

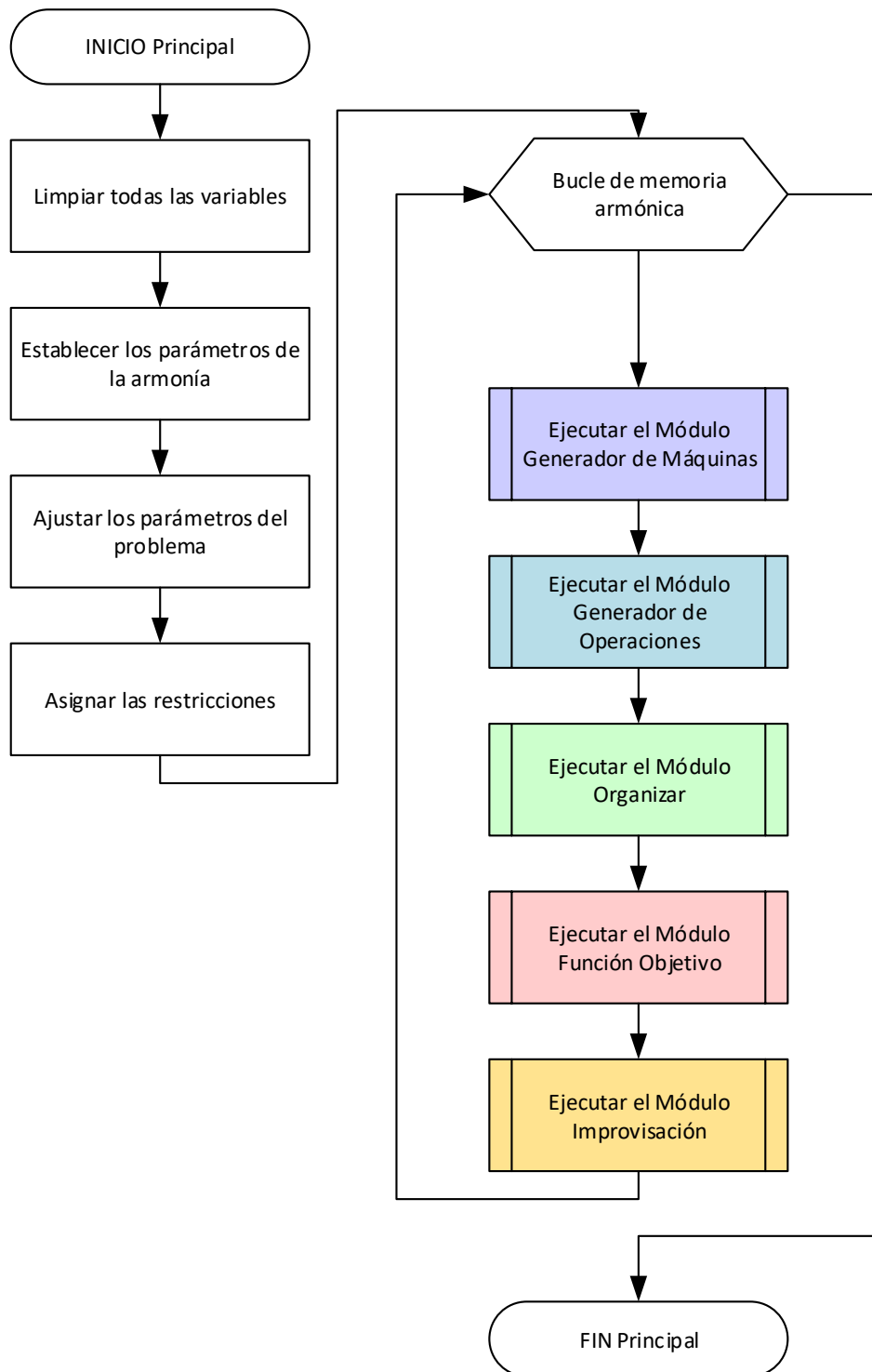


Figura 11 Diagrama de flujo del Módulo Principal

Una vez ejecutado el módulo principal, se comienza a alimentar el vector de soluciones, el cual tiene un número de filas igual a la memoria armónica; posterior a ello, se ejecuta un par de módulos

para hallar la solución del problema de asignación de máquinas en celdas con sus respectivos procesos, se hacen dos etapas: en el primer módulo se determina cuál tipo de máquina y en qué cantidad se asigna en cada una de las tres celdas y cómo se distribuyen período a periodo, por su parte, en el segundo módulo, se asignan las operaciones a cada tipo de máquina.

**5.4.2. Módulo Solución Máquinas:** El Módulo empieza ejecutando una subrutina que genera las variables para almacenar los cálculos, seguido, comienza un bucle en el cual se seleccionan de manera aleatoria las máquinas que van a ser asignadas a cada celda; éste bucle se divide en dos etapas. En la primera etapa se seleccionan de manera aleatoria todos los tipos de máquinas requeridas para satisfacer la demanda, posterior a ello, se asigna un número de máquinas aleatorio el cual va a empezar por la primera celda y mediante una variable aleatoria continua de cota superior dinámica, se asigna la cantidad de máquinas por celda. Un ejemplo del acotamiento dinámico de las variables de asignación aleatoria se aprecia en la *Figura 12*. Además, en la *Figura 13* y la *Figura 14* se expone el módulo y el pseudocódigo del mismo.

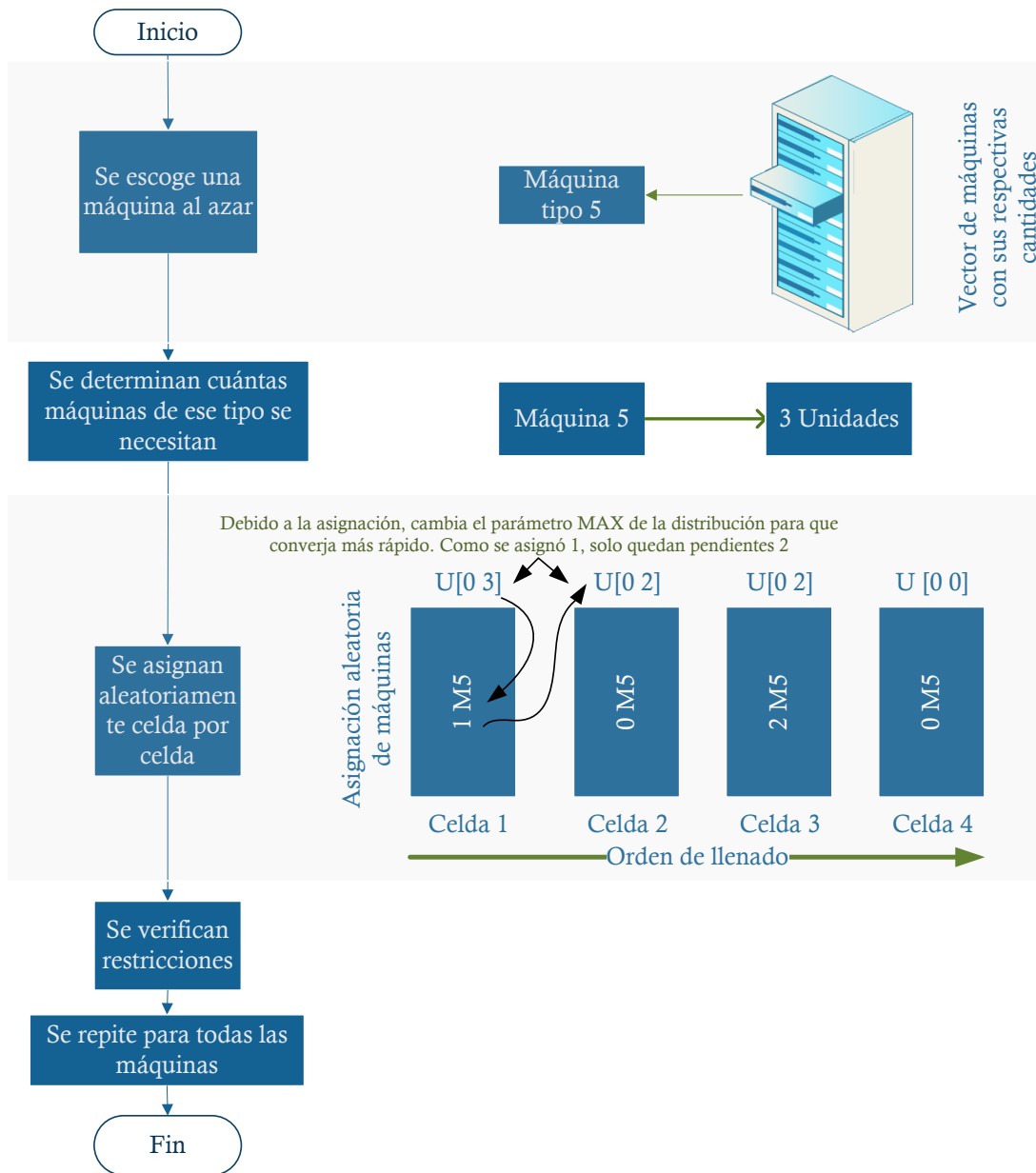


Figura 12 Ejemplo de asignación de máquinas mediante una distribución uniforme continua con cota superior dinámica. Tomado de Garavito Hernandez (2016).

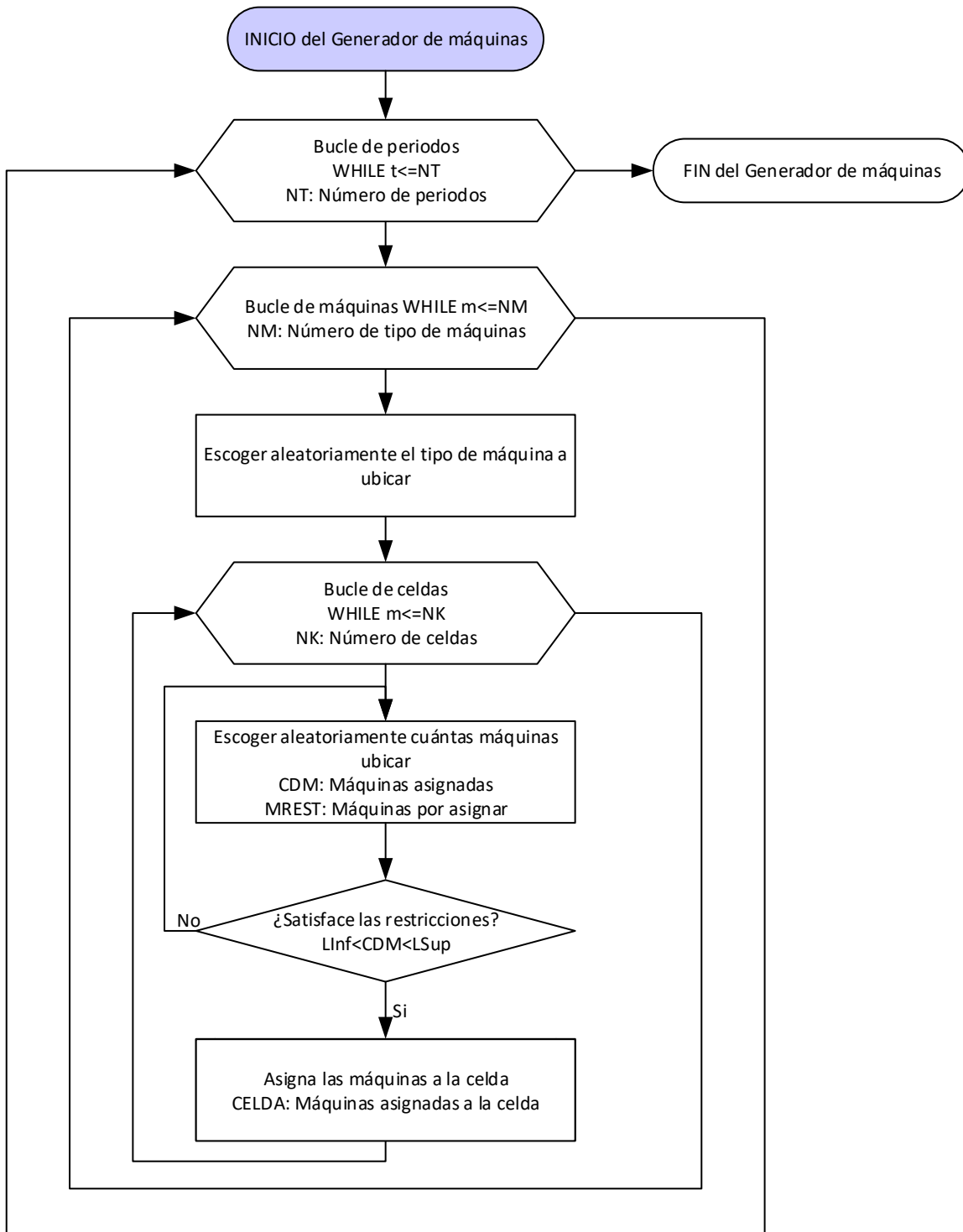


Figura 13 Módulo Generador de Máquinas

---

**Iniciar**: Cargar los datos de entrada, crear y limpiar las variables.

**Repetir** la siguiente secuencia hasta alcanzar el criterio de parada  $t \leq NT$

**Repetir** la siguiente secuencia hasta alcanzar el criterio de parada  $b \leq NM$

(1) Seleccionar aleatoriamente la cantidad de máquinas de tipo  $m$  a ubicar.

**Repetir** la siguiente secuencia hasta alcanzar el criterio de parada  $i \leq NK$

- i. Si la celda tiene capacidad para la cantidad de máquinas, asignar. Caso contrario, continúe la asignación en la siguiente celda ( $i=i+1$ ).
- ii. Si quedan máquinas de tipo  $m$  por ubicar, continúe la asignación en la siguiente celda ( $i=i+1$ ). Caso contrario, continúe con el siguiente tipo de máquina ( $b=b+1$ ).

Si las restricciones de límite inferior y superior se cumplen y todos los tipos de máquinas, fueron asignados, pase al siguiente periodo ( $t=t+1$ ). Caso contrario, vuelva a iniciar la asignación ( $b=1$ ).

---

*Figura 14* Pseudocódigo para la ejecución del Módulo Generador de Máquinas

En síntesis, para cada periodo se selecciona de manera aleatoria una máquina a ser ubicada y, a partir de una variable aleatoria se determina la cantidad restante de máquinas a asignar. En un primer instante, la cantidad de máquinas máxima a asignar es igual al requerimiento de máquinas; sin embargo, la cota superior va disminuyendo según el número máquinas que se han asignado previamente en otras celdas (*Figura 12*). Como estrategia de asignación se propone ubicar el mínimo valor posible entre el número total de máquinas requeridas, el número de máquinas por asignar y la capacidad que tiene la celda (siempre y cuando sean valores superiores a cero, sí y sólo sí, ya no quede demanda por satisfacer). Luego, se determina si esa asignación cumple con los requisitos y restricciones del modelo original; de ser así se almacena dicha solución (cantidad

de máquinas por celda) y se continúa con la siguiente máquina hasta finalizar, si no, no se tiene en cuenta la posible asignación y se avanza a la siguiente celda.

**5.4.3. Módulo Solución Operaciones:** En éste módulo se toma como elemento de entrada la solución de máquinas asignadas a celdas para cada período calculada en el módulo anterior. Enseguida, se determina cuál es la demanda que debe satisfacer cada uno de los diferentes procesos de cada producto a asignar a las distintas máquinas. Para realizar la ubicación, se parte de la selección aleatoria del tipo de producto que va a ser asignado (de manera similar a la selección aleatoria de máquinas); luego se seleccionan aquellos procesos que pueden ser ejecutados, es decir, aquellos donde la demanda el producto es mayor a cero. De esta manera se ejecutan diversos bucles para seleccionar las distintas máquinas; posteriormente, se realiza un recorrido por las distintas celdas con el fin de identificar en cuál de éstas se encuentra disponible la máquina requerida para realizar el proceso actual, una vez ubicada en cada relación (máquina-celda) se realiza una asignación análoga a la asignación de máquinas en celdas, sólo que en este caso es cantidad de producto a procesar en dicha máquina. En la *Figura 15* se describe el pseudocódigo de este módulo.

Para la asignación es necesario calcular la capacidad de cada máquina para satisfacer los procesos en la respectiva celda; si cumple con la capacidad permitida (es decir, si es posible asignar ese proceso a esa celda en esa máquina específica) se asigna toda la demanda del proceso posible, el cuál va a ser el mínimo entre la capacidad de la máquina y el total de producto en el proceso a fabricar. Una vez realizado esto, se evalúan las diferentes restricciones relacionadas con la asignación de procesos en máquinas y de producto a fabricar; si la solución generada cumple con las restricciones originales del modelo, continúa con los índices de los diferentes bucles, si no, se reinicia el bucle respectivo. Una vez finalizada la asignación en el primer periodo se procede a

realizar el mismo procedimiento para los demás períodos contemplados en el modelo. Una vez ejecutados los módulos de generación de máquinas y generación de procesos, el algoritmo se ubica nuevamente en el módulo principal donde se ejecuta el siguiente módulo denominado Organizar Datos. En la *Figura 16* se representa la estructura del Módulo.

---

**Iniciar**: Cargar la solución del Módulo de Solución de Máquinas

**Repetir** la siguiente secuencia hasta alcanzar el criterio de parada  $t \leq NT$

**Repetir** la siguiente secuencia hasta alcanzar el criterio de parada  $f \leq NI$

(1) Seleccionar aleatoriamente e tipo de producto a asignar.

**Repetir** la siguiente secuencia hasta alcanzar el criterio de parada  $g \leq NJ$

**Repetir** la siguiente secuencia hasta alcanzar el criterio de parada  $h \leq NK$

- i. Si la celda tiene la máquina requerida para desarrollar el proceso actual y capacidad disponible, asignar. Caso contrario ( $h=h+1$ ).
- ii. Si quedan procesos del producto actual por asignar, continúe la asignación en la siguiente celda ( $i=i+1$ ). Caso contrario, continúe con el siguiente tipo tipo de producto ( $f=f+1$ ).

Si las restricciones de capacidad se cumplen y todos los productos y sus respectivos procesos han sido asignados, pase al siguiente periodo ( $t=t+1$ ). Caso contrario, vuelva a iniciar la asignación ( $f=1$ ).

---

*Figura 15* Pseudocódigo para la ejecución del Módulo de Generador de Procesos

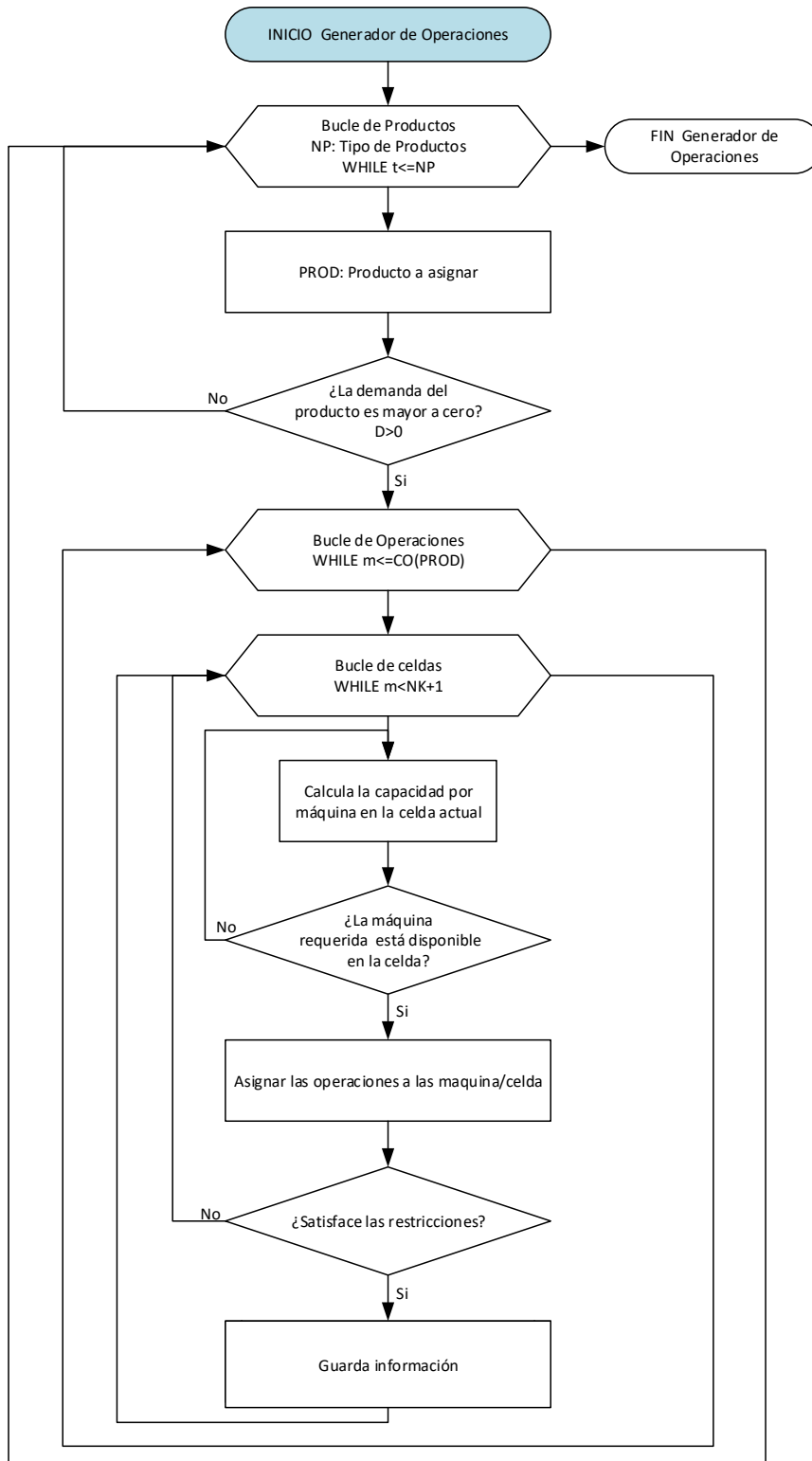


Figura 16 Módulo Generador de Procesos

**5.4.4. Módulo Organizar Datos:** En este módulo se realiza una transformación con el fin de almacenar la información de máquinas y la información de procesos en un vector solución, el cual contempla la respuesta para cada periodo, cada celda y las respectivas cantidades de máquinas y procesos ejecutados. Asimismo, se generan variables alternativas o auxiliares que van a permitir la realización de cálculos entre los diferentes parámetros. Una vez ejecutado del módulo de organizar datos, el algoritmo regresa al módulo principal y se evalúa la solución generada mediante un módulo denominado Función Objetivo. En la *Figura 17* se presenta el pseudocódigo del Módulo actual.

---

**Iniciar:** Cargar los vectores solución de los Módulos Solución de Máquinas y Solución de Operaciones

**Crear** diferentes variables con el propósito de generar matrices que faciliten el cálculo de la función objetivo y la armonización

**Crear** una copia de respaldo de las variables solución para ser comparadas en el módulo de búsqueda armónica.

---

*Figura 17* Pseudocódigo para la ejecución del Módulo de organizar

**5.4.5. Módulo Función Objetivo:** El módulo de función objetivo comienza calculando matrices auxiliares que van a permitir evaluar los cambios de asignación de máquinas en cada periodo (lo cual facilita determinar cuáles máquinas han sido compradas, descartadas y reubicadas periodo a periodo). Una vez establecidas dichas matrices, se calcula la diferencia de cada máquina en cada celda en los diferentes períodos, luego se ejecuta una subrutina en la que se determina si son adquiridas en ese período o si son descartadas distintas cantidades de máquinas. Las

diferencias restantes son pasadas a valor absoluto, sumadas y divididas en 2 con el fin de evitar la doble contabilidad de las reubicaciones; el valor resultante es multiplicado por el costo respectivo.

Posteriormente, se calcula el costo de adquirir y/o descartar máquinas a partir de la pre multiplicación entre los costos respectivos asociados a cada máquina y la cantidad de máquinas. Una vez calculado éste costo, se ejecuta una subrutina que reorganiza el vector de solución con el fin de generar una matriz organizada así: en las filas son ubicadas las máquinas y los procesos y en las columnas las celdas y los periodos; lo anterior con el propósito de calcular las diferencias y así determinar los movimientos de productos entre celdas. Finalmente, el costo total se obtiene a partir de la sumatoria de los costos de mover máquinas, costos de adquisición, costos de descarte y costos de transferencia entre celdas. Una vez finalizado el módulo de cálculo de la función objetivo, se regresa el módulo principal donde los vectores de solución y el respectivo valor de la función objetivo, son almacenados en los vectores de memoria y vectores de solución, y así sucesivamente hasta finalizar la asignación de soluciones en el vector de memoria armónica. Una vez realizada la última asignación se ejecuta el módulo de búsqueda armónica. El pseudocódigo y su respectivo diagrama se presentan en las *Figura 18* y *Figura 19*.

---

**Iniciar**: Cargar los datos requeridos del Módulo Organizar Datos

- (1) Calcular la cantidad de máquinas reubicadas de un periodo a otro
  - (2) Calcular el costo de reubicación de máquinas
  - (3) Calcular la cantidad de máquinas en cada periodo
  - (4) Calcular el costo de adquisición de máquinas
  - (5) Calcular la cantidad de máquinas descartadas del sistema
  - (6) Calcular el costo de máquinas descartadas
  - (7) Calcular la cantidad de transferencias de productos entre celdas
  - (8) Calcular el costo de transferencia de material
  - (9) Sumar los costos de reubicar, adquirir y descartar maquinaria y el costo de transferencia de materiales
- 

*Figura 18* Pseudocódigo para la ejecución del Módulo de Función Objetivo

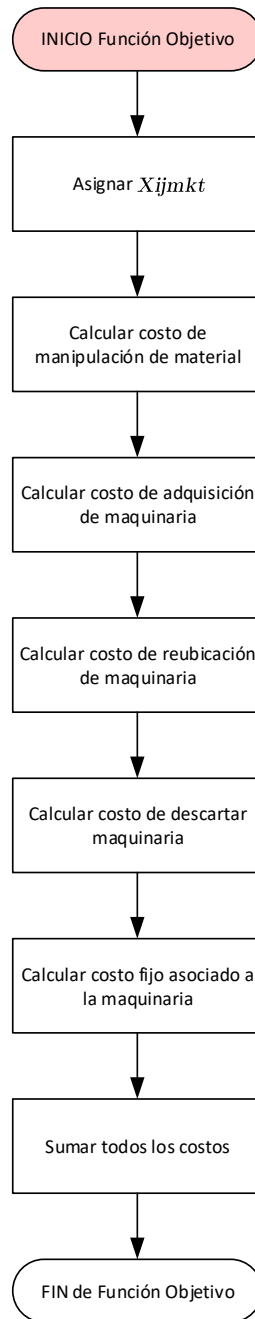


Figura 19 Módulo Función Objetivo

**5.4.6 Módulo Búsqueda Armónica:** El módulo comienza calculando el tamaño de cada subespacio de búsqueda (sub-armonía, SUBARMON); éste corresponde al tamaño total del vector de memoria armónica dividido por la cantidad de sub-armonías. Una vez realizado el cálculo, se comienza un bucle que va desde la primera sub-armonía hasta el total de sub-armonías, se calcula

el límite inferior y superior de ese vector de búsqueda y se genera un número aleatorio con el propósito de seleccionar una melodía o solución al azar de ese vector que está contenido dentro del vector de solución mayor. Los datos relacionados con la posición, valor de la función objetivo y vector solución son almacenados en variables auxiliares con el propósito de evitar borrar la información original.

Una vez almacenada la información en las variables auxiliares, se calcula un número aleatorio el cual se contrasta con la tasa de consideración armónica (HMCR), si la tasa de consideración armónica es menor al número aleatorio, entonces se genera otro número aleatorio con el fin de ser contrastado con la probabilidad de ajuste de tono (PAR). Si este nuevo número es igual al ajuste de tono, se realiza el módulo armonizar en el cual se reorganiza la solución y se evalúa la misma mediante el módulo Función Objetivo, de lo contrario no se ejecuta ninguna mejora. Luego, se contrasta la solución armonizada con la mejor solución hallada en el vector sub-armonía, y se concentra la solución en el espacio de búsqueda, igualando ambas soluciones a la mejor de las dos. El diagrama y pseudocódigo se muestran en la *Figura 20* y *Figura 21*.

Ahora bien, para generar el ajuste de armonía en la sub rutina respectiva, el algoritmo parte de los datos organizados según cada periodo en cada máquina para las tres celdas como se ve en la parte izquierda de la *Figura 22*. Una vez organizada la información según el módulo de organizar datos, de manera aleatoria se reasignan las ubicaciones en el mismo periodo de la misma máquina en las diferentes celdas (aunque es posible que quede la misma máquina en la posición original).

Con el fin de determinar cuántos procesos hay en las máquinas reubicadas (y así posteriormente calcular las transferencias entre celdas o movimientos de productos) a la par de modificar el vector solución, se guarda en otra variable auxiliar las nuevas posiciones que serán contrastadas con el vector solución.

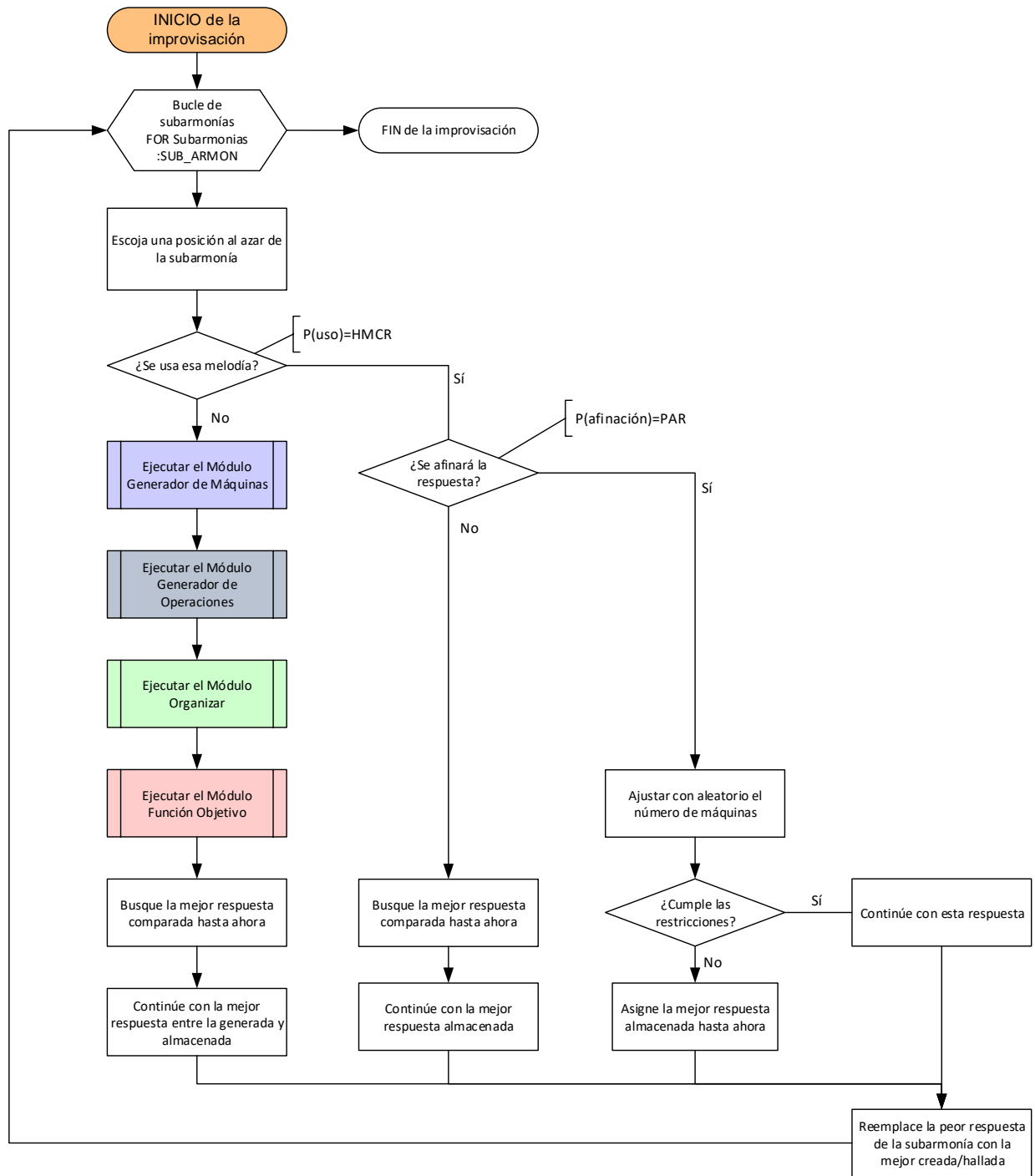


Figura 20 Módulo Búsqueda Armónica

---

**Iniciar**: Establecer el número de Subarmonías

**Repetir** la siguiente secuencia hasta alcanzar el criterio de parada Subarmonías:SUB\_ARMON

- (1) Escoja una posición al azar de la subarmonía.
- (2) Genere un aleatorio A
- (3) Verifique que el aleatorio A cumpla con la tasa de memoria armónica
- (4) ¿ $A < HMCR$ ?
- (5) Sí: Continúe con la afinación.
  - i. Genere un aleatorio B
  - ii. Verifique que el aleatorio B cumple con el tono de afinación.
    1. ¿B es menor que el tono de afinación? ( $B < PAR$ )
    2. Sí: Se recalcula la solución escogida reorganizando las posiciones de las máquinas en el vector solución.
      - a. Si cumple con las restricciones, la nueva solución reemplaza la peor respuesta de la subarmonía con la mejor creada/hallada. Caso contrario, la nueva solución es igual a la mejor solución almacenada hasta el momento.
    3. No: Busque la mejor respuesta comparada hasta ahora
      - a. Continúe con la mejor respuesta almacenada.
  - iii. End
- (6) No: Ejecute los Módulos Generador de Máquinas, Generador de Operaciones, Organizar y Función Objetivo.
  - i. Buscar la mejor respuesta comparada hasta ahora.
  - ii. Continuar con la mejor respuesta entre la generada y almacenada.
- (7) End

---

*Figura 21* Pseudocódigo para la ejecución del Módulo de Búsqueda armónica

En la *Figura 23* se presenta un ejemplo de la aplicación de la búsqueda armónica a una solución de máquinas por celdas, se parte de las posiciones de las máquinas en un vector solución. Antes de armonizar se puede observar que la máquina correspondiente a la posición 1, es asignada a la celda 1, después de armonizar la máquina correspondiente a la posición 1, es asignada a la celda 3.

		Antes de armonizar			Después de armonizar		
		Celda			Celda		
Periodo	Maquina	1	2	3	1	2	3
		1	1	1	0	0	0
1	2	0	1	0	0	1	0
1	3	0	1	0	0	1	0
1	4	1	0	0	0	1	0
1	5	1	0	0	1	0	0
1	6	1	0	0	0	1	0
1	7	0	0	1	0	0	1
1	8	0	0	1	0	0	1
1	9	0	1	0	0	1	0
1	10	1	0	0	1	0	0
1	11	0	0	1	1	0	0
2	1	1	0	0	1	0	0
2	2	0	1	0	0	1	0
2	3	0	1	0	0	1	0
2	4	1	1	0	1	1	0
2	5	1	0	0	1	0	0
2	6	2	0	0	0	0	2
2	7	0	0	1	1	0	0
2	8	0	0	1	0	0	1
2	9	0	1	0	1	0	0
2	10	1	0	0	0	0	1
2	11	0	0	1	0	1	0
3	1	1	1	0	1	0	1
3	2	0	1	0	1	0	0
3	3	1	1	0	0	1	1
3	4	0	1	0	0	1	0
3	5	1	0	0	1	0	0
3	6	0	0	0	0	0	0
3	7	0	0	1	1	0	0
3	8	0	0	1	0	1	0
3	9	0	1	0	0	1	0
3	10	1	0	0	0	0	1
3	11	0	0	1	0	0	1

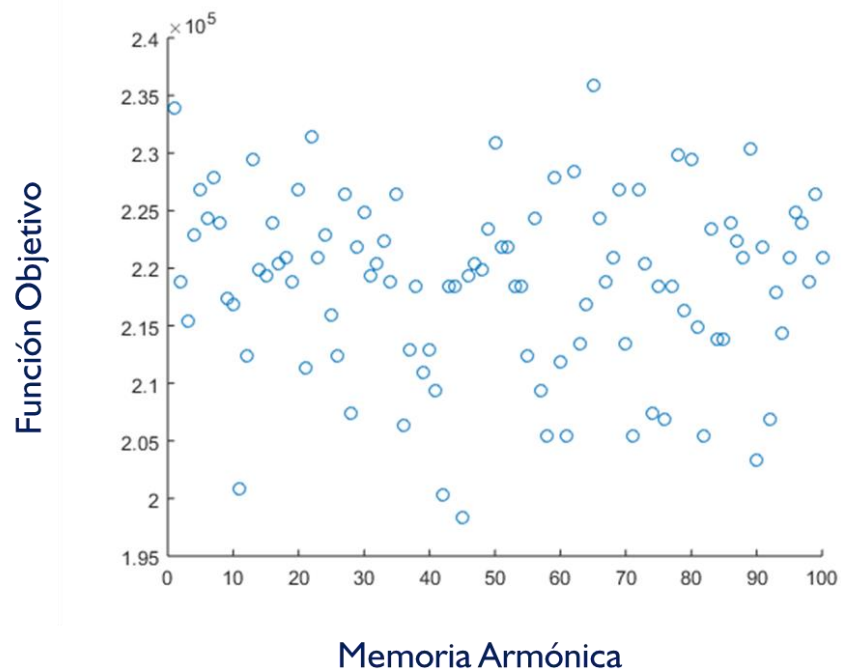
Figura 22 Ejemplo de la aplicación de la búsqueda armónica a una solución de máquinas por celdas (cantidad de máquinas)

		Antes de armonizar Celda			Después de armonizar Celda		
Periodo	Máquina	1	2	3	1	2	3
		1	1	1	0	0	0
1	2	0	901	0	0	901	0
1	3	0	976	0	0	976	0
1	4	226	0	0	0	226	0
1	5	301	0	0	301	0	0
1	6	376	0	0	0	376	0
1	7	0	0	2101	0	0	2101
1	8	0	0	2176	0	0	2176
1	9	0	1426	0	0	1426	0
1	10	676	0	0	676	0	0
1	11	0	0	2401	2401	0	0
2	1	2476	0	0	2476	0	0
2	2	0	3376	0	0	3376	0
2	3	0	3451	0	0	3451	0
2	4	2701	3526	0	3526	2701	0
2	5	2776	0	0	2776	0	0
2	6	5702	0	0	0	0	5702
2	7	0	0	4576	4576	0	0
2	8	0	0	4651	0	0	4651
2	9	0	3901	0	3901	0	0
2	10	3151	0	0	0	0	3151
2	11	0	0	4876	0	4876	0
3	1	4951	5776	0	5776	0	4951
3	2	0	5851	0	5851	0	0
3	3	5101	5926	0	0	5926	5101
3	4	0	6001	0	0	6001	0
3	5	5251	0	0	5251	0	0
3	6	0	0	0	0	0	0
3	7	0	0	7051	7051	0	0
3	8	0	0	7126	0	7126	0
3	9	0	6376	0	0	6376	0
3	10	5626	0	0	0	0	5626
3	11	0	0	7351	0	0	7351

Figura 23 Ejemplo de la aplicación de la búsqueda armónica a una solución de máquinas por celdas (Posiciones en el vector solución)

Retomando las otras opciones de la búsqueda armónica, si la probabilidad de ajuste de tono no es significativa, entonces se ejecuta la segunda parte del bucle, enfocada en generar de manera aleatoria una nueva solución que satisface todas las restricciones; para ello, se ejecutan los módulos de Solución máquinas, Solución operaciones, Organizar datos y Función objetivo; nuevamente se contrastan las soluciones y se concentra la solución en el espacio de búsqueda igualando ambas soluciones a la mejor de las dos.

Una vez finalizada la búsqueda armónica, se almacenan los datos de la mínima solución generada correspondiente a todo el conjunto de búsqueda (memoria armónica) y se guardan en una variable. En la *Figura 24* y la *Figura 25* se presenta un ejemplo del comportamiento de la función objetivo antes de armonizar y un ejemplo del comportamiento de la misma después de la armonización.



*Figura 24* Ejemplo de Función Objetivo antes de la armonización. Extraído de software para análisis matemático MATLAB 2017 b. Disponible en <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>

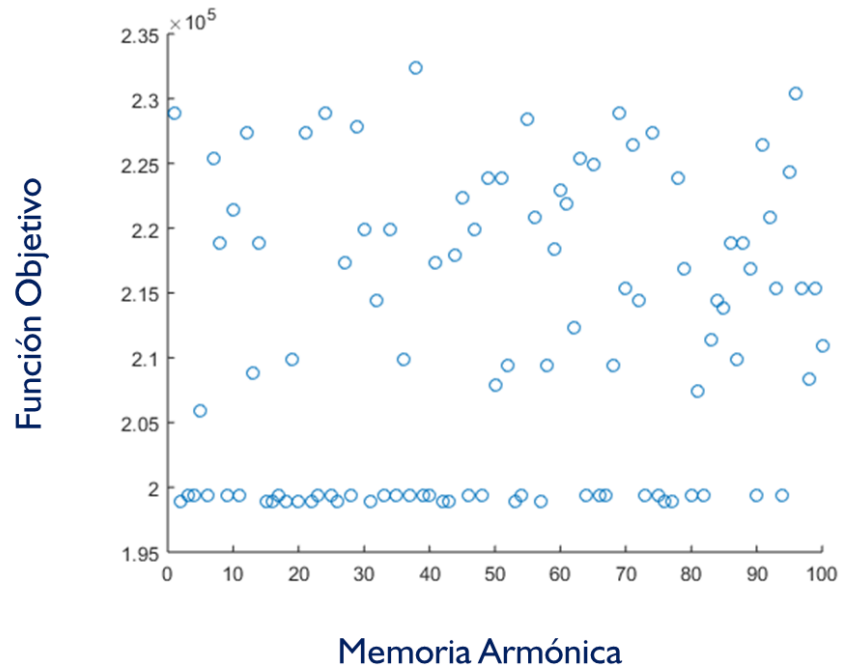


Figura 25 Ejemplo de Función Objetivo después de la armonización. Extraído de software para análisis matemático MATLAB 2017 b. Disponible en <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>

## 6. Resultados

### 6.1. Implementación en GAMS

El modelo logra encontrar soluciones factibles en los tres niveles de instancias. En la Tabla 10 se presentan los resultados correspondientes a función objetivo y los rubros que la componen. En la Tabla 11 se presenta un ejemplo de los resultados de la asignación de procesos a máquinas.

**Tabla 10**

*Resultados del modelo MILP*

<b>Rubro</b>	<b>Valor</b>		
	<b>Bajo</b>	<b>Medio</b>	<b>Alto</b>
Función Objetivo	\$186,500	\$239,700	\$326,000
Costo de Adquisición	\$184,000	\$1,700	\$0,0
Costo de Movimiento de Material	\$2,500	\$0,0	\$0,0
Costo de Reubicar Maquinaria	\$0,0	\$0,0	\$0,0
Costo de Descartar Maquinaria	\$0,0	\$0,0	\$0,0

Como es de esperarse, el valor de la función objetivo disminuye a medida que el espacio de búsqueda recorrido aumenta (*Figura 26*). Caso contrario, el tiempo computacional requerido aumenta a medida que es espacio restante de búsqueda es menor (*Figura 27*). Finalmente, en la Tabla 11 se presenta un ejemplo de la asignación de procesos, máquinas y celdas.

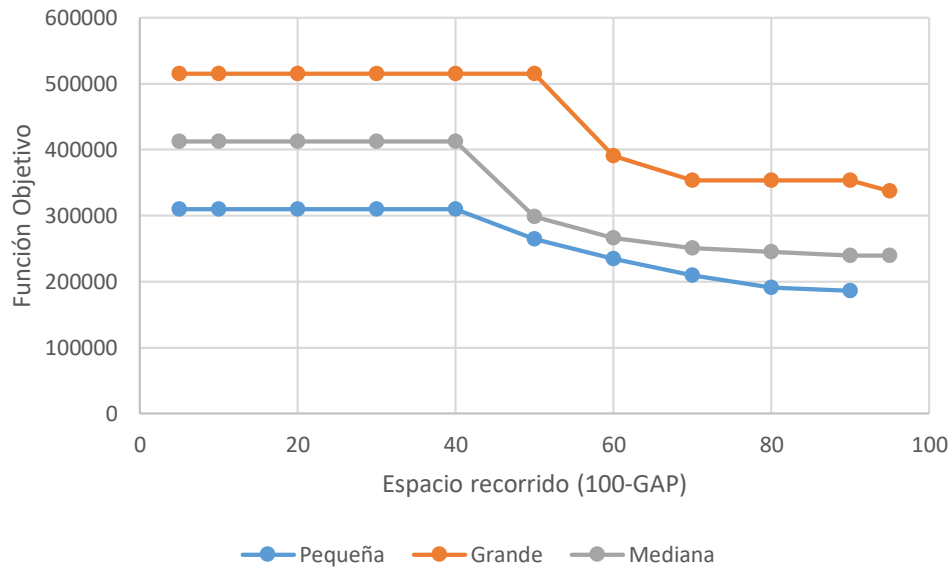


Figura 26 Comportamiento de la Función Objetivo respecto al Espacio Recorrido.

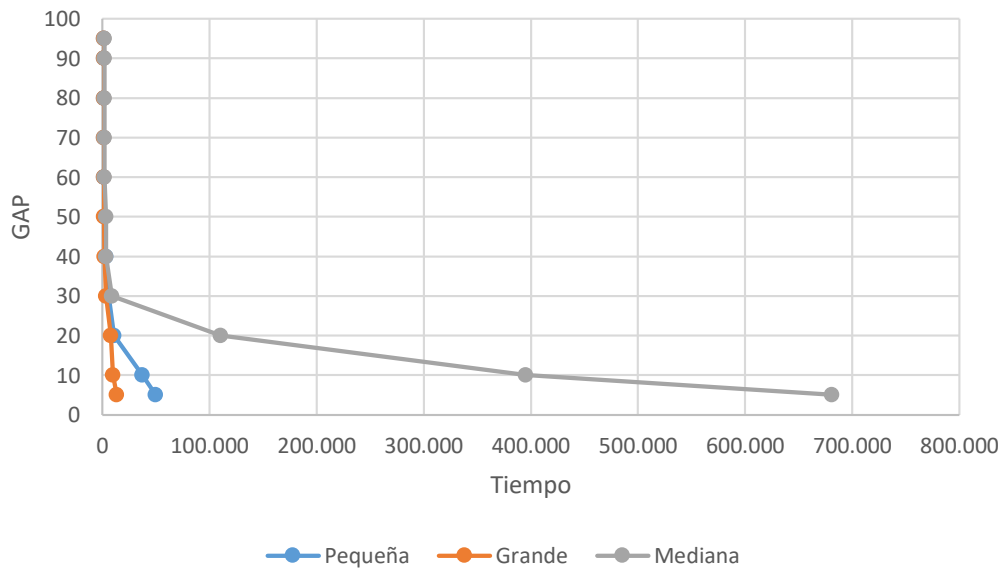


Figura 27 Comportamiento de la Función Objetivo respecto al Espacio Recorrido

**Tabla 11**

*Ejemplo de los resultados de asignación de procesos, a máquinas, en celdas para el periodo 1*

Periodo 1	i10	i11	i15	i1	i12	i13	i14	i16	i17	i18	i2	i20	i21	Total
k1	2	1	1											4
m11	1													1
m3	1	1	1											3
k2	<i>Subtotal</i>													58
m1		1		1	1					1				5
m10				1			1	1		1				9
m11												1		5
m2														5
m4		1	1					1				1		5
m5						1			1		1			6
m6									1	1				6
m7					1	1	1						1	6
m8							1				1		1	4
m9			1	1	1							1		7
k3	<i>Subtotal</i>													9
m10														2
m3														2
m5														2
m6														3
Total	<i>Subtotal</i>													71

Periodo 1	i22	i23	i24	i25	i3	i5	i6	i8	i9	i4	i7	i19	Total
k1													4
m11													1
m3													3
k2	<i>Subtotal</i>												58
m1						1							5
m10	1	1						1		1		1	9
m11	1					1			1	1			5
m2	1		1	1	1	1							5
m4									1				5
m5						1	1					1	6
m6		1		1						1		1	6
m7			1	1									6
m8							1						4
m9		1				1		1					7
k3	<i>Subtotal</i>												9
m10										1	1		2
m3										1		1	2
m5											1	1	2
m6										1	1	1	3
Total	<i>Subtotal</i>												71

## 6.2. Desarrollo de la Búsqueda Armónica en MATLAB

Una vez desarrollada la meta heurística y con el propósito de determinar si el algoritmo logra dar soluciones al problema de formación de celdas de manufactura -el cual se ha resuelto previamente mediante el método de programación lineal en el software GAMS-, se realiza un análisis de los diferentes parámetros de la búsqueda armónica. Para ello el análisis de resultados se divide en tres grandes etapas, las cuales se describen a continuación:

- En la primera etapa se realiza un diseño experimental  $2^k$ , el cual, a partir de una réplica evalúa la incidencia de los factores o parámetros de la meta heurística sobre el valor de la función objetivo.
- En la segunda etapa se realiza un análisis de varianza (ANOVA) a partir de la ejecución de 40 réplicas. Lo anterior con el propósito de estudiar el comportamiento de los residuales de la función objetivo y para ello se realizan dos aproximaciones: 1) Análisis de los valores de la función objetivo transformados a una distribución normal. 2) Análisis del error de la función objetivo respecto a la mejor solución obtenida en GAMS.
- En la tercera etapa se tienen en cuenta los niveles de la búsqueda armónica identificados en el análisis de varianza y se realiza un estudio respecto a los problemas de formación de celdas de manufactura dinámicas. Para ello se propone cambiar la demanda, con lo cual varía el requerimiento de máquinas y asignación de procesos a máquinas. En esta etapa se busca estudiar los parámetros de la meta heurística seleccionados y determinar cómo se comporta el error de estimación para los diferentes niveles de demanda.

**6.2.1. Primera etapa: diseño experimental:** Una vez determinados los parámetros de la búsqueda armónica (y sus niveles respectivos), se procede a realizar un diseño experimental tipo  $2^5$ . Para ello son considerados los niveles (bajo y alto) de los 5 parámetros utilizados y descritos a

continuación. El primer parámetro es la memoria armónica (HMS), ésta representa la cantidad de soluciones almacenadas; el segundo parámetro es el número máximo de improvisaciones (MAXIMP); el tercer parámetro es la tasa de consideración armónica (HMCR) y hace referencia a la probabilidad de seleccionar una solución almacenada para ser armonizada; el cuarto parámetro es la tasa de afinación (PAR) y se relaciona con la probabilidad de generar aleatoriamente la solución inicial; finalmente, el quinto parámetro es el número de subarmonías (SUBARMON) que representa cómo se va a dividir el vector de soluciones en múltiples sub vectores donde cada uno es ajustado mediante la meta heurística.

Luego, se agregan los niveles a cada factor respecto al orden en el que se desarrolló el diseño experimental. En la Tabla 12 se consignan los respectivos niveles y el orden de las corridas.

**Tabla 12***Estructura del diseño de experimentos*

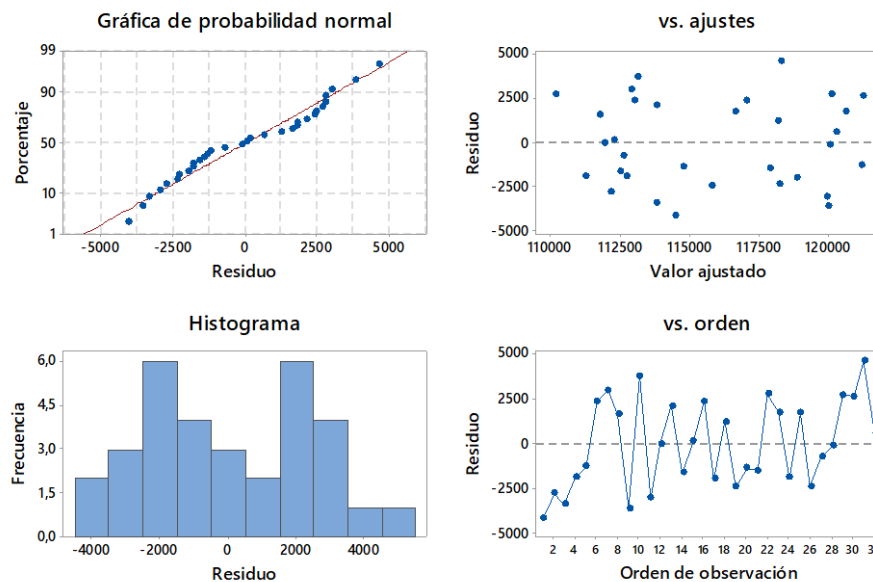
Memoria armónica (HMS)	Numero de improvisaciones (MAXIMP)	Tasa de consideración armónica (HMCR)	Tasa de afinación (PAR)	Tamaño de la armonía (SUBARMON)	OrdenEst	F.O	Tiempo	Error F.O
1	-1	1	1	-1	1	203375	9.2458	0.0905
1	-1	-1	1	1	2	194375	87.574	0.0422
1	1	-1	1	1	26	196375	88.364	0.0529
1	1	1	1	-1	24	194375	67.033	0.0422
-1	-1	-1	1	-1	29	197875	7.0513	0.061
-1	-1	1	-1	1	4	194375	83.996	0.0422
1	-1	1	-1	-1	14	198375	69.865	0.0637
-1	1	1	-1	-1	12	194875	83.05	0.0449
-1	1	1	-1	1	21	199875	6.6369	0.0717
-1	1	-1	1	-1	18	193875	82.607	0.0395
-1	1	-1	-1	-1	15	198875	7.0203	0.0664
-1	1	1	1	1	20	196875	85.803	0.0556
-1	1	-1	-1	1	22	200375	66.238	0.0744
1	1	-1	1	-1	30	194375	71.088	0.0422
1	-1	1	1	1	10	194375	83.35	0.0422
1	-1	1	-1	1	9	193375	8.7235	0.0369
-1	-1	1	-1	-1	13	200875	7.0261	0.0771
-1	-1	1	1	-1	17	195375	8.9777	0.0476
1	1	1	-1	1	8	199875	64.703	0.0717
-1	-1	-1	-1	1	6	193875	64.873	0.0395
-1	-1	1	1	1	11	200375	8.0325	0.0744
1	-1	-1	-1	-1	31	195875	7.286	0.0503
1	-1	-1	1	-1	7	197875	6.7465	0.061
1	1	1	1	1	28	196375	85.812	0.0529

**Continuación Tabla 12**

*Estructura del diseño de experimentos*

1	-1	-1	-1	1	3	198875	9.2465	0.0664
-1	1	-1	1	1	19	193375	8.2229	0.0369
-1	-1	-1	-1	-1	16	198375	70.227	0.0637
1	1	-1	-1	-1	27	192875	8.6693	0.0342
1	1	1	-1	-1	32	194875	70.935	0.0449
-1	-1	-1	1	1	25	197375	9.1293	0.0583
-1	1	1	1	-1	5	203875	5.939	0.0932
1	1	-1	-1	1	23	194875	6.5084	0.0449

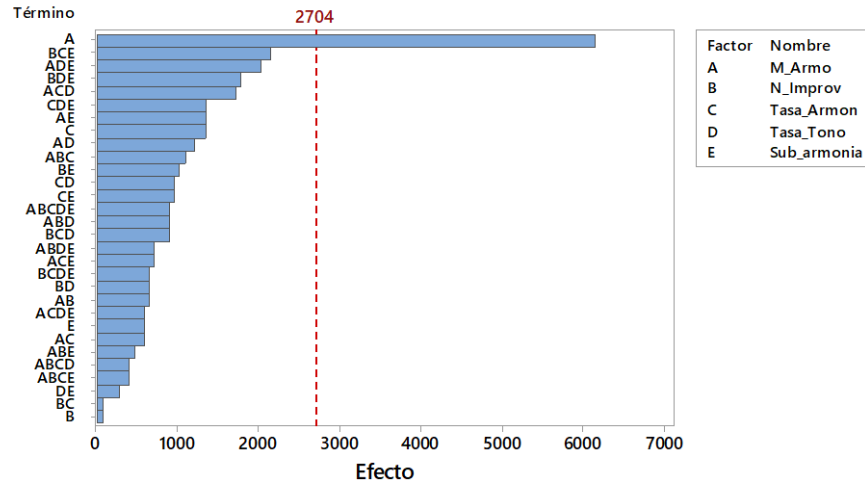
Una vez organizados los datos, éstos son analizados utilizando el software Minitab. Haciendo el análisis estadístico se puede apreciar en la *Figura 28*, que la distribución de los datos correspondientes a la función objetivo parece indicar que no hay cambio en la variabilidad de los residuales ni se ve una aparente tendencia en el orden de corridas; sin embargo, teniendo en cuenta la gráfica de normalidad, es posible inferir que los datos no se comportan como dicha distribución.



*Figura 28* Gráficas de residuos de Función Objetivo. Extraído de software estadístico MINITAB 18, 2018  
 Disponible en <http://www.minitab.com/es-mx/products/minitab/>

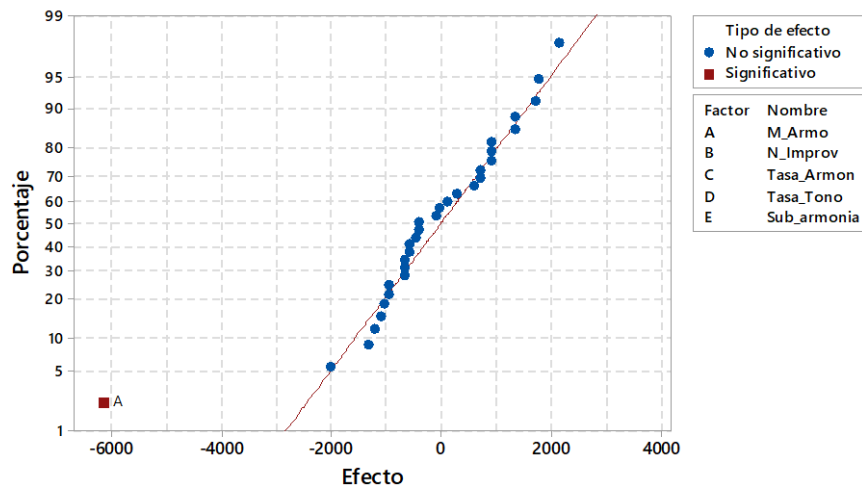
Ahora bien, si se observa la contribución de cada factor a la resolución del problema en la *Figura 29* se encuentra que el único factor que aparentemente incide sobre el desempeño del algoritmo es el tamaño de memoria almacenada (HMS), lo cual se puede corroborar en la *Figura*

30 y en la *Figura 31* donde se concluye que el efecto de este parámetro es el único significativo o que más incide, al disminuir el valor de la función objetivo.



PSE de Lenth = 1218,75

*Figura 29* Gráfica de diagrama de Pareto de los efectos de la función objetivo. Extraído de software estadístico MINITAB 18, 2018 Disponible en <http://www.minitab.com/es-mx/products/minitab/>



PSE de Lenth = 1218,75

*Figura 30* Gráfica de ajuste normal de los efectos. Extraído de software estadístico MINITAB 18, 2018 Disponible en <http://www.minitab.com/es-mx/products/minitab/>

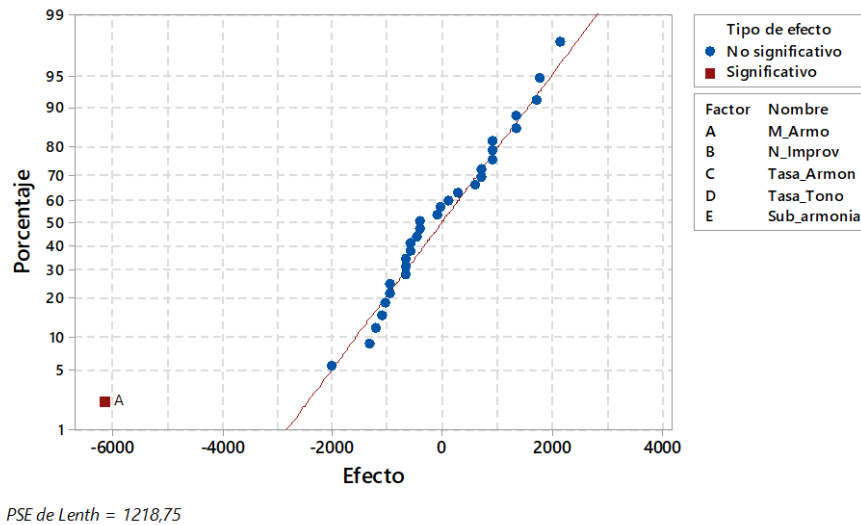


Figura 31 Gráfica de ajuste normal de los efectos absolutos. Extraído de software estadístico MINITAB 18, 2018 Disponible en <http://www.minitab.com/es-mx/products/minitab/>

Luego, se hace un análisis del efecto de los parámetros y sus respectivas interacciones mediante el error de la función objetivo obtenido a partir de la solución óptima. En la *Figura 32* se puede apreciar que el parámetro que más incidencia tiene sobre dicha función es la memoria armónica, (HMS) la cual, en el nivel alto ofrece una mejor solución. La tasa de consideración armónica (HMCR) y el tamaño de la armonía (SUBARMON) ofrecen una mejor solución con el nivel bajo. Para los parámetros restantes (PAR y N\_IMPROV) indiferente del nivel que se tome, no afectan la función objetivo, por lo que lo mejor sería escoger el nivel bajo con el fin de ahorrar recursos.

Se considera ahora, el error hallado en las interacciones de los parámetros con el fin de determinar cómo inciden en la función objetivo de acuerdo a su interacción y nivel. Tomando algunos ejemplos de acuerdo a la *Figura 33*, se puede decir que para el parámetro memoria armónica, (HMS) el cual, tiene interacción con los parámetros Número de improvisaciones (MAXIMP) Tasa de afinación (PAR) Tamaño de la armonía (SUBARMON), la mejor combinación de niveles en cada interacción sería bajo-bajo con cada uno, ya que ofrece un mejor

resultado en la función objetivo. Este análisis se hace para los demás parámetros e interacciones, con el fin de hacer combinaciones que mejoren la función objetivo.

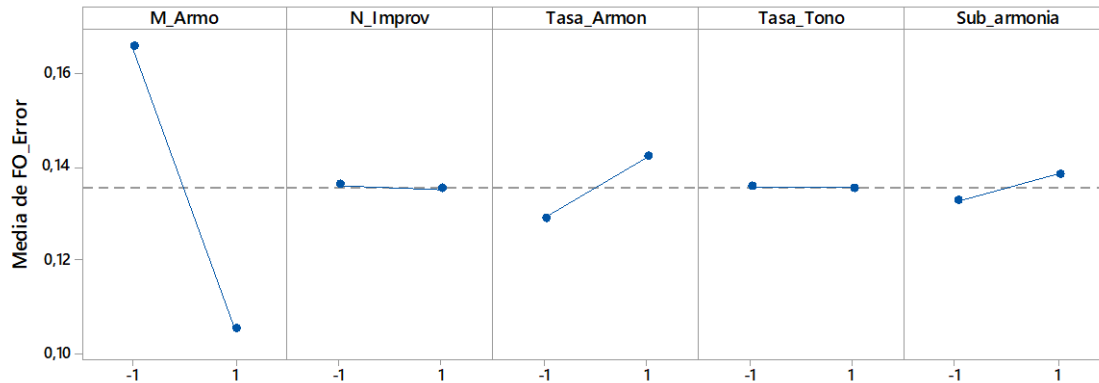


Figura 32 Gráfica de efectos principales para el error de la función objetivo. Extraído de software estadístico MINITAB 18, 2018 Disponible en <http://www.minitab.com/es-mx/products/minitab/>

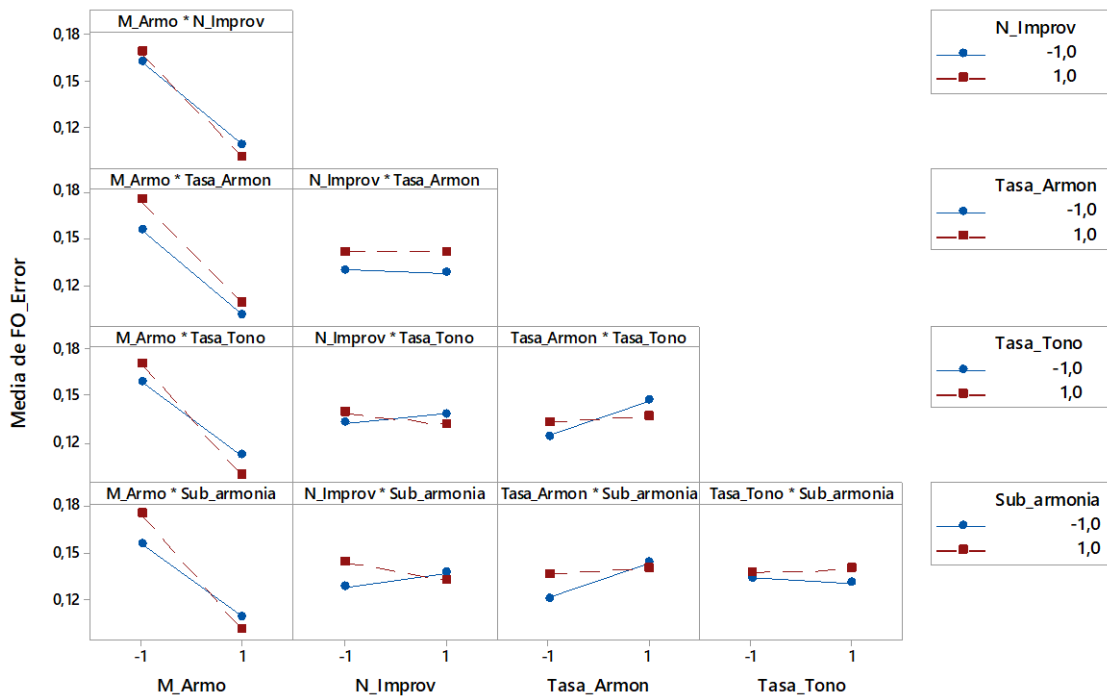
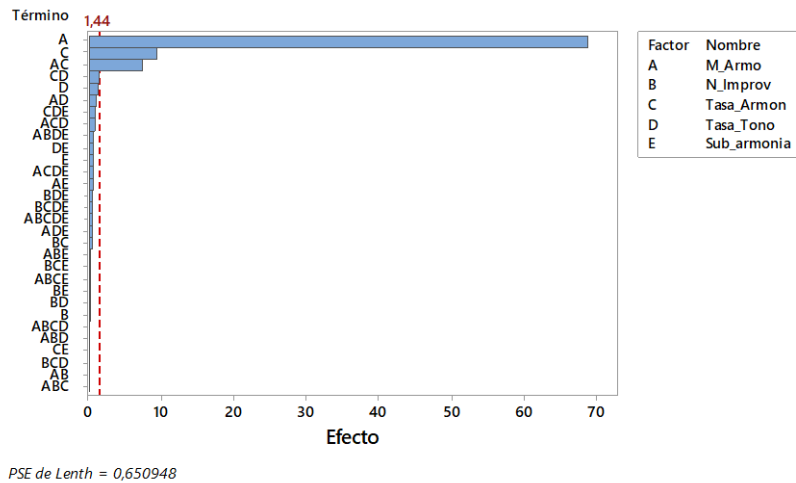


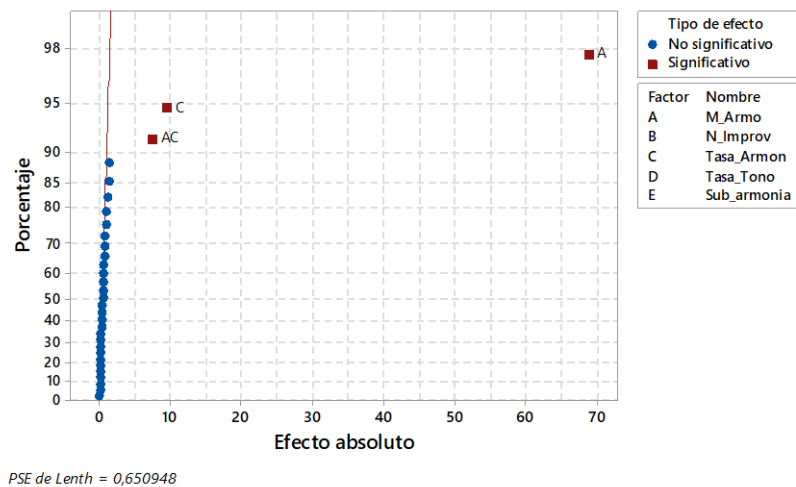
Figura 33 Gráfica de interacción para el error de la función objetivo. Extraído de software estadístico MINITAB 18, 2018 Disponible en <http://www.minitab.com/es-mx/products/minitab/>

Por otra parte, cuando se analiza el tiempo de cómputo requerido para llegar a la respuesta del algoritmo como se muestra en la *Figura 34*, se encuentra que el factor memoria armónica (HMS) y la tasa de consideración armónica (HMCR) junto con su interacción, son los que más inciden en el tiempo computacional.



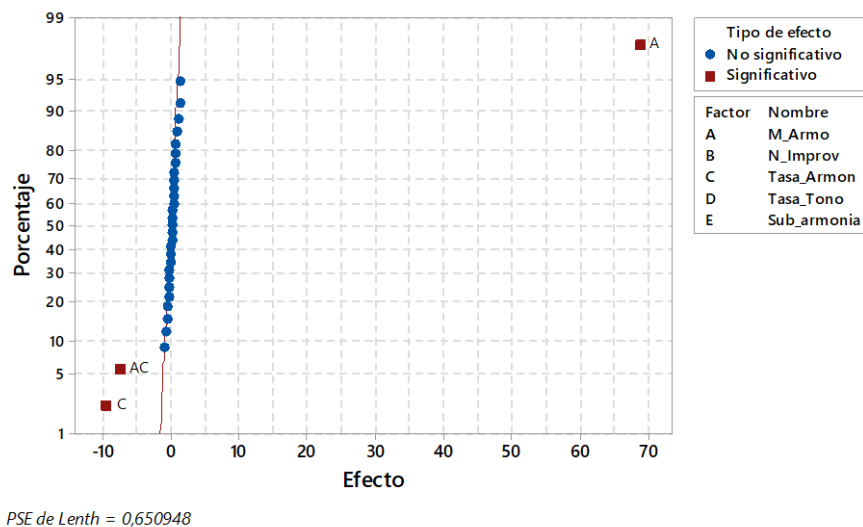
*Figura 34* Gráfica de diagrama de Pareto de los efectos del tiempo. Extraído de software estadístico MINITAB 18, 2018 Disponible en <http://www.minitab.com/es-mx/products/minitab/>

Lo anterior, puede ser corroborado en la *Figura 35*, donde dichos factores y su interacción aparecen al lado derecho a la gráfica.



*Figura 35* Gráfica de ajuste normal de los efectos absolutos (Tiempo). Extraído de software estadístico MINITAB 18, 2018 Disponible en <http://www.minitab.com/es-mx/products/minitab/>

Ahora bien, al analizar *Figura 36*, se encuentra que el factor de memoria armónica (HMS) es el que más agrega tiempo computacional al modelo, lo cual es coherente teniendo en cuenta que en su nivel alto implica que tendrá más variables para ser analizadas. Por otra parte, su interacción con la tasa armónica (HMCR) es la que más reduce el tiempo computacional, lo cual podría deberse a que la tasa armónica indica la probabilidad de aplicar la meta heurística de reorganización, donde esta consume menos recursos computacionales que la generación de una nueva solución.



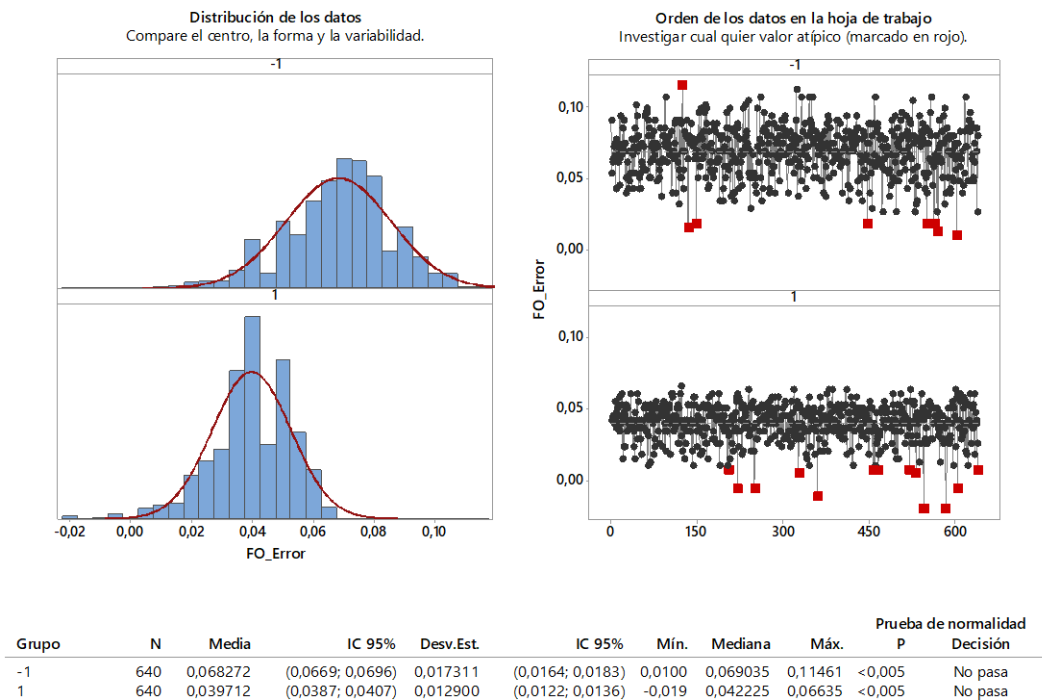
*Figura 36* Gráfica de ajuste normal de los efectos. Extraído de software estadístico MINITAB 18, 2018 Disponible en <http://www.minitab.com/es-mx/products/>

Sin embargo, teniendo en cuenta que los datos no se comportan como una distribución normal y con el fin de determinar la incidencia de los diferentes niveles en las variables bajo estudio, se realizarán múltiples réplicas y para así contrastar los intervalos de confianza y adicionalmente verificar si la selección de los niveles es significativa respecto al desempeño de la variable Función Objetivo (FO).

**6.2.2. Segunda etapa: Análisis de varianza:** Una vez realizadas las réplicas (40 en total) de la meta heurística para los diferentes niveles de la calibración propuestos en el capítulo anterior,

se realiza un análisis descriptivo de la frecuencia de respuestas dividida según el número de soluciones almacenadas en la memoria armónica (HMS), ya que a partir de los resultados del diseño experimental se encuentra que es el parámetro que mayor efecto tiene sobre la variable respuesta.

De lo anterior, se obtienen dos niveles dentro del parámetro HMS, de 100 y 1000 respuestas almacenadas respectivamente, con 640 valores; lo anterior se puede observar en la *Figura 37* dónde se aplica una prueba de normalidad y se determina que la distribución de los datos no sigue dicho comportamiento.



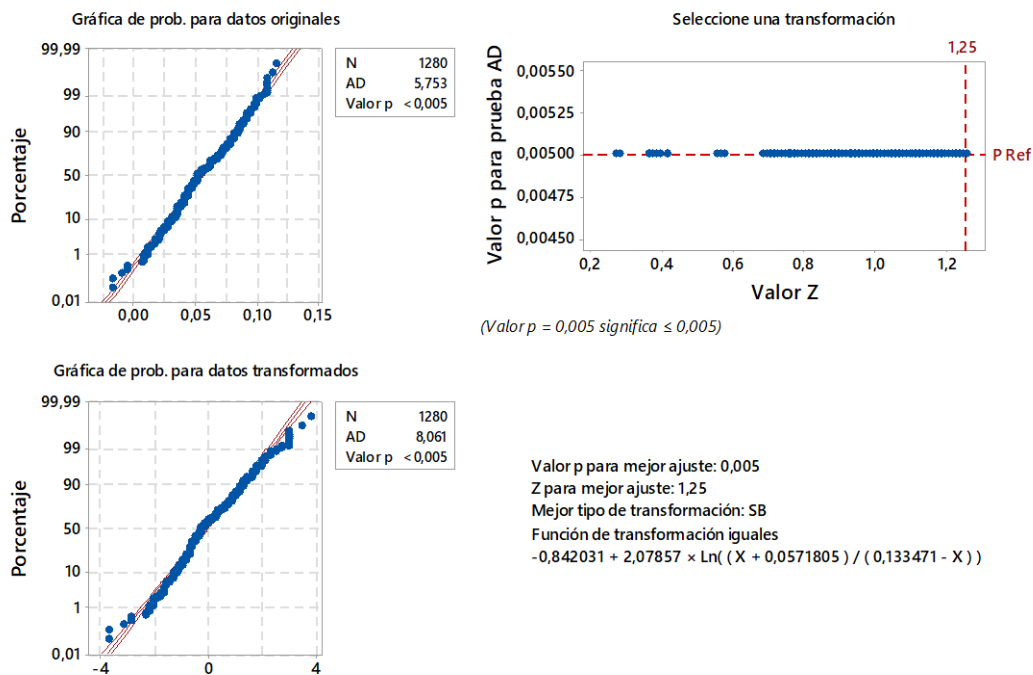
*Figura 37* Resumen Gráfico de error de la función objetivo por Factor HMS. Extraído de software estadístico MINITAB 18, 2018 Disponible en <http://www.minitab.com/es-mx/products/minitab/>

De acuerdo a lo anterior, para el presente trabajo se propone realizar dos estudios para el análisis de la incidencia de los parámetros en la función objetivo con la replicas obtenidas.

- En el primer estudio se realiza una transformación de los valores de la función objetivo con el fin de convertirlos en una secuencia que siga una distribución normal y así aplicar el análisis de varianza (ANOVA).
- En el segundo estudio se realiza el análisis de varianza con los datos sin transformar del error de la función objetivo, con el fin de determinar mediante las dos metodologías si coinciden los factores que más inciden en la variable respuesta.

**6.2.2.1. Primer estudio:** Haciendo uso del software Minitab, se realiza la transformación de Johnson con un nivel de significancia de 0.005. En la *Figura 38* se encuentra el valor de ajuste con un Z de mejor ajuste 1.25, de acuerdo a la siguiente ecuación de transformación:

$$Y = -0.842031 + 2.07857 * \ln \left( \frac{X + 0.0571805}{0.133471 - X} \right)$$



*Figura 38* Trasmformación de Johnson para el error de la función objetivo. Extraído de software estadístico MINITAB 18, 2018 Disponible en <http://www.minitab.com/es-mx/products/minitab>

Una vez los datos son normalizados, se realiza un modelo de regresión lineal general respecto a los factores y cada uno de los niveles según se codifica como aparece en la Tabla 13.

**Tabla 13***Información del factor*

Factor	Tipo	Niveles	Valores
HMS	Fijo	2	-1; 1
MAXIMP	Fijo	2	-1; 1
HMCR	Fijo	2	-1; 1
PAR	Fijo	2	-1; 1
SUBARMON	Fijo	2	-1; 1

Una vez codificados los valores, se realiza el análisis de varianza cuyos valores se consignan en la Tabla 14.

**Tabla 14***Análisis de Varianza*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
HMS	1	583.17	583.168	1088.46	0
MAXIMP	1	1.48	1.477	2.76	0.097
HMCR	1	0.55	0.546	1.02	0.313
PAR	1	2.8	2.804	5.23	0.022
SUBARMON	1	13.84	13.836	25.82	0
Error	1274	682.58	0.536		
Falta de ajuste	26	19.65	0.756	1.42	0.078
Error puro	1248	662.92	0.531		
Total	1279	1284.41			

De la anterior tabla se puede concluir con un nivel de significancia del 5%, que los factores o parámetros que más inciden de los valores transformados en la función objetivo son:

- La memoria armónica (HMS)
- La tasa de afinación (PAR)
- Tamaño de la armonía (SUBARMON)

Ahora bien, al revisar los coeficientes de ajuste en el resumen del modelo, se encuentra que este modelo lineal se ajusta en un 46.35% (R cuadrado ajustado), lo cual puede indicar que aún existen ciertos parámetros que no son tenidos en cuenta y que inciden en la calidad del modelo. A partir del análisis de varianza obtenido mediante el modelo lineal, se fórmula la siguiente ecuación de regresión:

$$\begin{aligned}
 F.O_{Norm} = & -0.1011 + 0.675HMS_{bajo} - 0.675HMS_{alto} + 0.034MAXIMP_{bajo} \\
 & - 0.034MAXIMP_{alto} - 0.0207HMCR_{bajo} + 0.0207HMCR_{alto} \\
 & + 0.0468PAR_{bajo} - 0.0468PAR_{alto} - 0.104SUBARMON_{bajo} \\
 & + 0.104SUBARMON_{alto}
 \end{aligned}$$

Donde ésta determina los niveles de los parámetros a utilizar con el fin de disminuir el valor de la función objetivo.

**6.2.2.2. Segundo estudio:** Para el segundo estudio, el análisis de varianza se realiza con el error de la función objetivo, como se mencionó al comienzo de esta etapa, dichos datos no se comportan como una distribución normal. De manera análoga al tratamiento realizado con los datos normalizados, se trabajan los diferentes parámetros en los mismos niveles y por tanto la codificación es la misma (ver Tabla 13) y se obtiene la ANOVA consignada en la Tabla 15.

**Tabla 15***Análisis de Varianza sin normalizar*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
HMS	1	0.261028	0.261028	1145.91	0
MAXIMP	1	0.000597	0.000597	2.62	0.106
HMCR	1	0.000203	0.000203	0.89	0.346
PAR	1	0.001404	0.001404	6.16	0.013
SUBARMON	1	0.005415	0.005415	23.77	0
Error	1274	0.290204	0.000228		
Falta de ajuste	26	0.007452	0.000287	1.27	0.169
Error puro	1248	0.282752	0.000227		
Total	1279	0.55885			

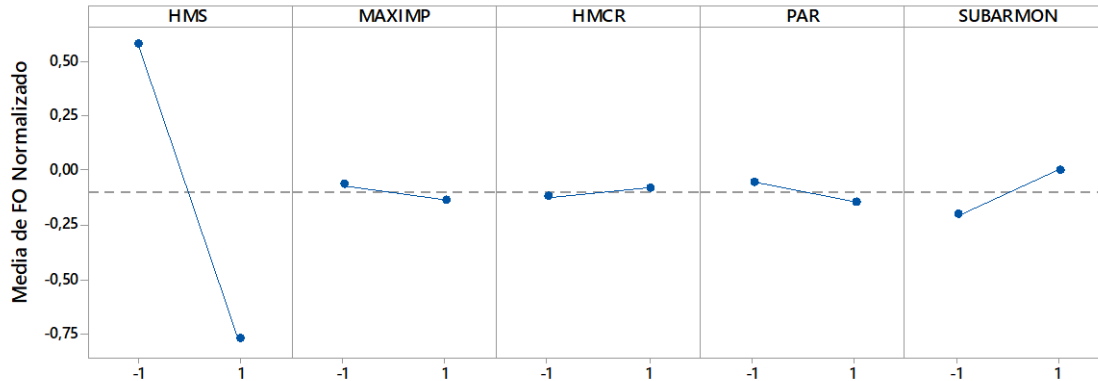
Respecto a la tabla anterior, para los datos no normalizados se encuentra que de manera similar a los datos normalizados los tres parámetros que tienen incidencia sobre el valor de la función objetivo son:

- La memoria armónica (HMS)
- La tasa de afinación (PAR)
- Tamaño de la armonía (SUBARMON)

Igualmente, se puede determinar que presenta un valor de ajuste del 47.29% y al observar la ecuación de regresión se encuentra que los parámetros en los que se debe trabajar la función son:

$$\begin{aligned}
 F.O_{error} = & 0.053992 + 0.01428HMS_{bajo} - 0.014285HMS_{alto} + 0.000683MAXIMP_{bajo} \\
 & - 0.000683MAXIMP_{alto} - 0.000398HMCR_{bajo} + 0.000398HMCR_{alto} \\
 & + 0.0001047PAR_{bajo} - 0.0001047PAR_{alto} - 0.002057SUBARMON_{bajo} \\
 & + 0.002057SUBARMON_{alto}
 \end{aligned}$$

Con el fin de interpretar los resultados de la regresión, se grafican los efectos principales de la función objetivo. (Ver *Figura 39*)



*Figura 39* Gráfica de efectos principales para el error de la función objetivo. Extraído de software estadístico MINITAB 18, 2018 Disponible en <http://www.minitab.com/es-mx/products/minitab/>

Donde se corrobora el impacto o efecto de los diferentes factores; ahora bien, para corroborar la significancia entre los niveles, se procede a realizar un estudio sobre los efectos, a partir de la comparación por parejas de Tukey.

Respecto al parámetro HMS se encuentra que existe diferencia significativa entre los dos niveles, siendo el nivel bajo el que presenta una mayor medida y por tanto el nivel a seleccionar es el alto ver Tabla 16.

**Tabla 16**

*Método de Tukey para HMS una confianza de 95%*

HMS	N	Media	Agrupación
-1	640	0.0682725	A
1	640	0.0397118	B

*Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

En el parámetro PAR se encuentra que existe diferencia significativa entre los dos niveles, siendo el nivel bajo el que presenta una mayor medida y por tanto el nivel a seleccionar es el alto (ver Tabla 17).

**Tabla 17***Método de Tukey para PAR una confianza de 95%*

PAR	N	Media	Agrupación
-1	640	0.0550394	A
1	640	0.0529449	B

*Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

Respecto al parámetro SUBARMON se encuentra que existe diferencia significativa entre los dos niveles, siendo el nivel bajo el que presenta una menor medida y por tanto es éste el nivel a seleccionar (ver Tabla 18). Para los parámetros restantes, (MAXIMP y HMCR) no existe diferencia significativa entre sus niveles (Ver Tabla 19 y Tabla 20), por tanto se recomienda trabajar con niveles bajos.

**Tabla 18***Método de Tukey para SUBARMON una confianza de 95%*

SUBARMON	N	Media	Agrupación
1	640	0.0560489	A
-1	640	0.0519353	B

*Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.***Tabla 19***Método de Tukey para HMCR una confianza de 95%*

HMCR	N	Media	Agrupación
1	640	0.0543901	A
-1	640	0.0535942	A

*Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.***Tabla 20***Método de Tukey para MAXIMP una confianza de 95%*

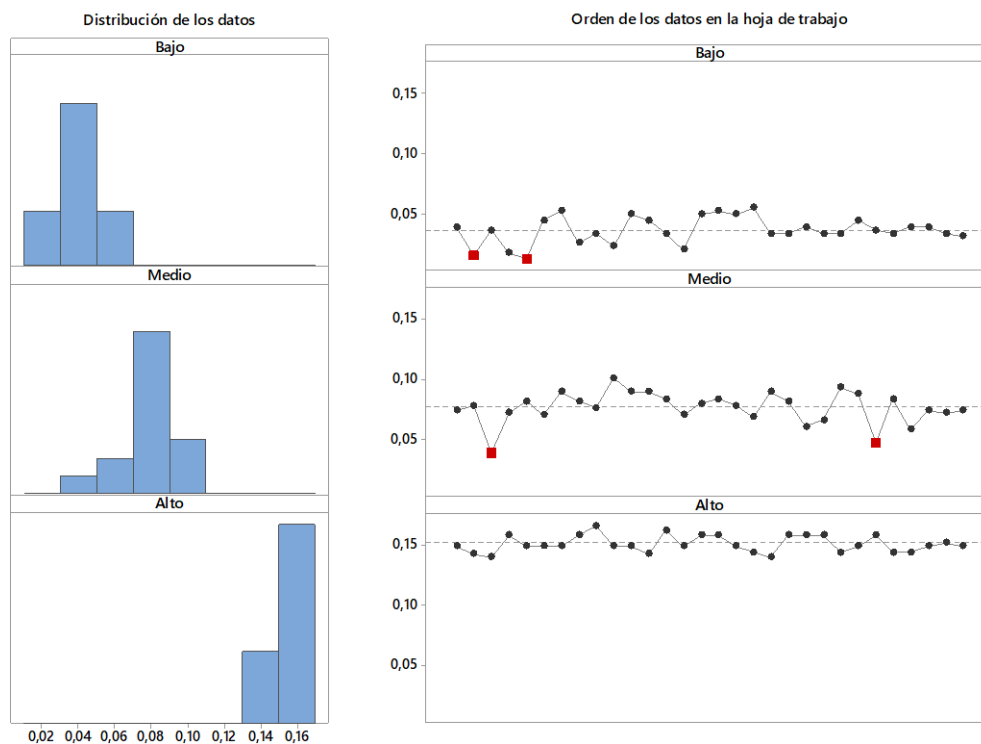
MAXIMP	N	Media	Agrupación
-1	640	0.0546749	A
1	640	0.0533093	A

*Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

En conclusión, para la tercera etapa se propone trabajar con la metaheurística en los siguientes niveles:

*Niveles Búsqueda Armónica:  $HMS_{alto}$ ,  $MAXIMP_{alto}$ ,  $HMCR_{bajo}$ ,  $PAR_{alto}$ ,  $SUBARMON_{bajo}$*

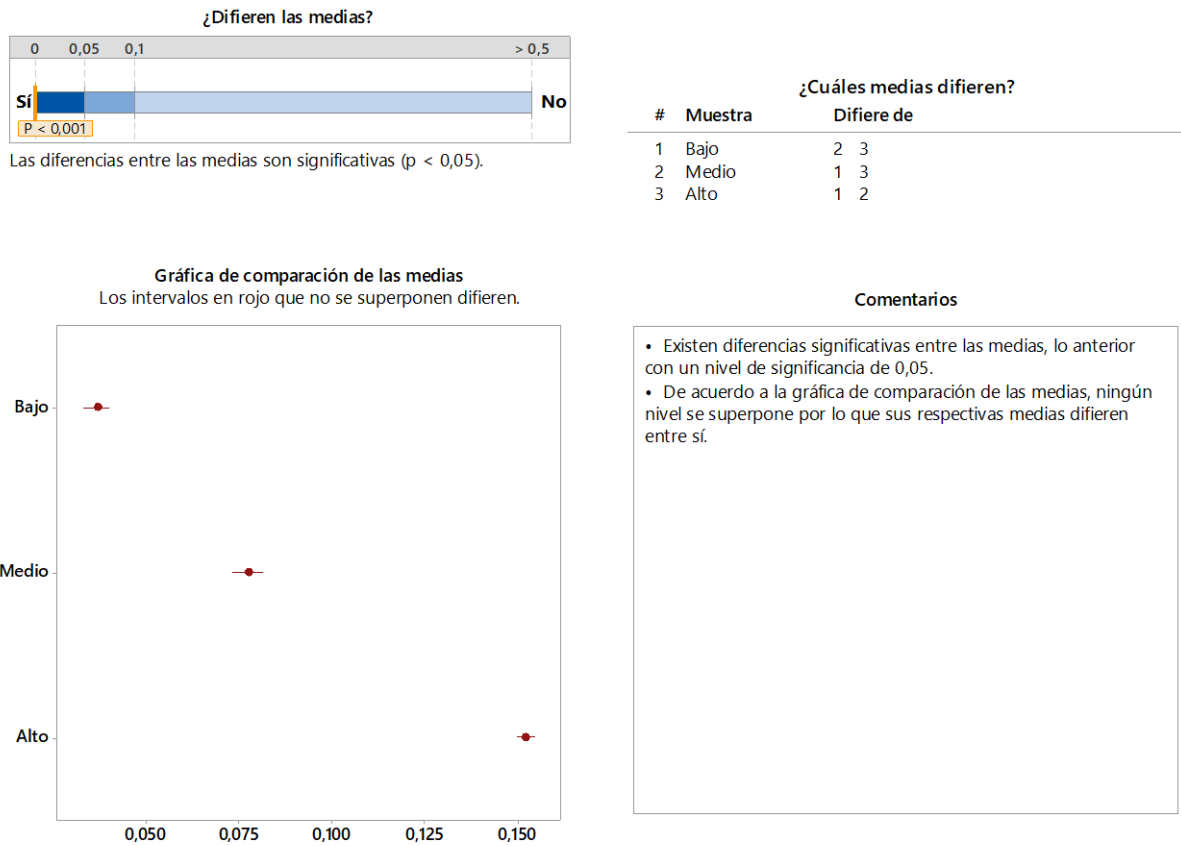
**6.2.3. Tercera etapa: Evaluación de desempeño para tres niveles:** Una vez estudiados los parámetros de la meta heurística en las anteriores etapas, se hace un estudio para determinar cómo se comporta el error de estimación en diferentes instancias. Para ello se realizan 30 réplicas a partir de tres instancias (Bajo, Medio, Alto) y se hace una ANOVA con el fin de compararlas entre sí. En la *Figura 40* se presenta un acercamiento de cómo se comporta la distribución de los datos y su respectiva dispersión para cada nivel de las instancias



*Figura 40* Gráfica de distribución de datos y dispersión para niveles Bajo, Medio, Alto. Extraído de software estadístico MINITAB 18, 2018 Disponible en <http://www.minitab.com/es-mx/products/minitab/>

De acuerdo a la figura anterior, se puede observar que no existe diferencia aparente entre el nivel bajo y medio, a diferencia del nivel alto que claramente se diferencia de ambos aumentando

el error de estimación del modelo en esta instancia. En la *Figura 41* se presenta una mejor perspectiva del comportamiento de los datos.



*Figura 41* Gráfica resumen de ANOVA para niveles Bajo, Medio, Alto. Extraído de software estadístico MINITAB 18, 2018 Disponible en <http://www.minitab.com/es-mx/products/minitab/>

De la gráfica anterior se puede concluir, que existen diferencias significativas entre las medias y que a medida que va aumentando el nivel o la instancia también aumenta la media en el error de estimación de la meta heurística haciendo el modelo menos confiable.

Finalmente, en las *Figura 42*, *Figura 43* y *Figura 44*, se presenta la solución de asignación de máquinas para las instancias de nivel bajo, medio y alto –respectivamente–, clasificadas de acuerdo

a la metodología para encontrar la solución. En primer lugar (columna), se encuentra la solución generada a partir de los módulos Generar Máquinas y Generar Procesos; en segundo lugar, se presenta la solución generada a partir del módulo de improvisación de la meta heurística y; finalmente, se presenta el resultado obtenido con el software GAMS: Cabe resaltar que en estas soluciones se evidencia la diferencia entre las estrategias de llenado o de asignación de la meta heurística y del modelo exacto. Al no existir una restricción de balance de carga de trabajo, el modelo desarrollado en GAMS, procurará asignar la mayor cantidad de máquinas y por tanto productos a una sola celda para así evitar incurrir en costos de transferencia de materiales.

**Instancia Pequeña**

Tipo de Máquina	Generada			Metaheurística			Optimo			Periodo
	Celda			Celda			Celda			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1		1				1	1			1
2		1		1			1			
3	1				1		1			
4	1					1		1		
5			1		1		1		1	
6	1			1			1		1	
7			1	1			1			
8			1	1			1			
9			1			1	1		1	
10	1				1		1	1		
11		1		1			1	1		
1			1			1	1			2
2			1	1			1			
3			1		1		1			
4			1			1		1		
5	2				2		1		1	
6		2		2			1		1	
7	1			1			1			
8		1		1			1			
9	1					1	1		1	
10		2		1	1		1	1		
11		1			1		1	1		
1	1					1	1			3
2	1			1			1			
3			1		1		1			
4		1		1				1		
5			1			1	1		1	
6	1		1		2		1		1	
7		1		1			1			
8			1	1			1			
9		1				1	1		1	
10	1					1	1	1		
11		1			1		1	1		

**FO**      **236375**                  **191875**                  **186500**

Figura 42 Solución de asignación de máquinas para las instancias de Nivel bajo

**Instancia Mediana**

Tipo de Máquina	Generada			Metaheurística			Optimo			Periodo
	Celda			Celda			Celda			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1	1			1					1	1
2	1	1				2	1		1	
3	2			1		1		1	1	
4		1		1				1	1	
5	1	1		2			1		1	
6			2	1	1		1		1	
7		2		2			1		1	
8	1			1			1			
9		1	1	2				1	1	
10		2		2			1		1	
11	2				1	1	1		1	
1			1	1					1	2
2		1				1	1		1	
3			1		1			1	1	
4		1		1				1	1	
5		2		2			1		1	
6	1		1		1	1	1		1	
7	1		1	2			1		1	
8	1			1			1			
9		2		1		1		1	1	
10			2	1	1		1		1	
11			1		1		1		1	
1	1			1					1	3
2		1		1			1		1	
3			1		1			1	1	
4		2	1	1				1	1	
5	1		1	2			1		1	
6	3			2	1		1		1	
7	2			2			1		1	
8		1		1			1			
9	2			-1		3		1	1	
10	1			1		1	1		1	
11	1				1		1		1	
<b>FO</b>	<b>328875</b>			<b>251875</b>			<b>239700</b>			

Figura 43 Solución de asignación de máquinas para las instancias de Nivel Medio

**Instancia Grande**

Tipo de Máquina	Generada			Metaheurística			Optimo			Periodo
	Celda			Celda			Celda			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1	1			1			1	1		1
2	2			2			1	1		
3			2	2			1		1	
4	1				1		1	1	1	
5	2				1	1	1	1	1	
6	2				2		1	1	1	
7		1	1			2	1	1		
8			2		1	1	1	1		
9		1	1		1	1		1	1	
10	1					1	2	1	1	
11	2				2			1	1	
1	1			1			1	1		2
2		1		1			1	1		
3	1			1			1		1	
4	1				1		1	1	1	
5		1	1	1	1		1	1	1	
6	2			2			1	1	1	
7	2					2	1	1		
8	1			1			1	1		
9	2	1		1		2		1	1	
10	1	1			1	1	2	1	1	
11		1		1				1	1	
1		1	1	1		1	1	1		3
2	1	1		1		1	1	1		
3			1	1			1		1	
4	1				1		1	1	1	
5	2			1	1		1	1	1	
6	2	1		2		1	1	1	1	
7	2					2	1	1		
8	1			1			1	1		
9	1				1			1	1	
10	2				2		2	1	1	
11	1			1				1	1	

**FO**      **358600**                  **350400**                  **326000**

Figura 44 Solución de asignación de máquinas para las instancias de Nivel Alto.

## 7. Conclusiones.

A partir del análisis bibliométrico se logra identificar la vigencia del DCFP como tema de investigación, asimismo, analizando el entorno cambiante en el que se desenvuelven las empresas hoy en día, cobra importancia el análisis de sistemas de manufactura flexible que se adapten a las condiciones dinámicas del ambiente. Se puede generar una oportunidad de desarrollar trabajos que relacionen el DCFP en el marco de la investigación de operaciones.

El modelo implementado en el software GAMS logra encontrar soluciones factibles en los tres niveles de instancias, cabe resaltar esto, debido a que la mayor parte de investigaciones analizadas en la etapa de revisión de literatura, plantean solucionar el DCFP como un modelo de programación no lineal entera mixta, lo que a su vez genera aumentos considerables en el tiempo computacional y puede no encontrarse una solución factible. Teniendo en cuenta lo anterior, uno de los aportes del presente trabajo es modificar el modelo propuesto por Venkatadri et al. (2017) incluyendo como toma de decisión la asignación de máquinas, abordando el problema con estrategia de solución de programación lineal.

Del ejercicio de calibración de la meta heurística, es posible concluir que la propuesta de dividir el vector de soluciones en sub vectores denominados sub armonías, no genera una diferencia significativa, ni respecto a la función objetivo ni al tiempo computacional, puesto que este último no se ve afectado debido a que la cantidad máxima de improvisaciones no se realiza para cada una de las sub armonías, sino que ese número de improvisaciones se divide de forma equitativa para cada subarmonía; por tanto, se puede establecer que el factor que más incide es el tamaño de la memoria armónica (HMS) acompañado de la probabilidad

del ajuste de tono (PAR), ya que la modificación de armonías consume menos recursos computacionales que la generación de una nueva solución.

En el análisis estadístico se puede concluir que realizar las pruebas utilizando los datos normalizados y los no transformados, puede disminuir la incertidumbre sobre la significancia del efecto de los factores, ya que se obtienen resultados similares cuando se contrastaron las pruebas y de esta manera se procura evitar caer en los dos tipos de errores estadísticos.

Respecto al ejercicio de valorar el desempeño de la meta heurística calibrada y la etapa de calibración, se encuentra que para las tres diferentes instancias la meta heurística tiene un comportamiento significativamente diferente y a medida que aumenta la cantidad de máquinas a asignar, disminuye la eficacia de la meta heurística, puesto que aumenta el error respecto al valor encontrado con el software GAMS. Lo anterior, puede ser explicado por la estrategia de llenado o asignación de máquinas, productos y procesos a las celdas de cada una de las dos metodologías propuestas. En el modelo exacto se contemplan simultáneamente los diversos factores que intervienen en la asignación, caso contrario, en la meta heurística se tienen en cuenta de forma independiente, es decir, los productos y procesos requeridos para su fabricación, no tienen incidencia en la generación o formación de las celdas manufactura.

## 8. Recomendaciones

Para futuras investigaciones se sugiere:

Tener en cuenta nuevas consideraciones, parámetros o atributos propios de los sistemas de manufactura, buscando de esta manera aproximar el modelo matemático a la realidad. Por ejemplo, puede plantearse la inclusión de un factor de balance de carga de trabajo entre celdas como una restricción del modelo, para evaluar cuál sería la estrategia de asignación a utilizar.

Se recomienda generar nuevas instancias para el modelo actual o para un modelo modificado con el fin de comparar el desempeño del algoritmo búsqueda armónica en diferentes tamaños de instancias.

Evaluar nuevamente el algoritmo búsqueda armónica haciendo uso de una estrategia de llenado en la que se considere simultáneamente la asignación de máquinas, productos y procesos a las celdas, con el fin de evaluar su desempeño.

Se recomienda evaluar un posible senario de celdas de manufactura dinámicas virtuales con el fin de comparar los costos generales asociados a la producción es decir si cuesta más mover toda la maquinaria o reubicar la maquinaria o dejarla en un mismo sitio y en su lugar asociar costos de transferencia de materiales de acuerdo a la distancia recorrida entre cada par de máquinas.

**Referencias bibliográficas**

- 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>
- 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>
- Babazadeh, R., Rafiei, H., & Rabbani, M. (2013). A dynamic sustainable cell formation problem in agile production systems. *International Journal of Operational Research*. <https://doi.org/10.1504/IJOR.2013.052714>
- 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., & Hung Cheng, C. (2005). Dynamic cellular manufacturing under multiperiod planning horizons. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 16(5), 516–530. <https://doi.org/10.1108/17410380510600491>
- Bootaki, B., Mahdavi, I., & Paydar, M. M. (2014). New bi-objective robust design-based utilisation towards dynamic cell formation problem with fuzzy random demands.

*International Journal of Computer Integrated Manufacturing.*

<https://doi.org/10.1080/0951192X.2014.880949>

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>

Deep, K., & Singh, P. K. (2015). Design of robust cellular manufacturing system for dynamic part population considering multiple processing routes using genetic algorithm. *Journal of Manufacturing Systems*, 35, 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.09.008>

Deep, K., & Singh, P. K. (2016). Dynamic cellular manufacturing system design considering alternative routing and part operation tradeoff using simulated annealing based genetic algorithm. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*. <https://doi.org/10.1007/s12046-016-0530-7>

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>

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>

Dong, M., Wu, C., & Hou, F. (2009). Shortest path based simulated annealing algorithm for

- dynamic facility layout problem under dynamic business environment. *Expert Systems with Applications*, 36(8), 11221–11232. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.02.091>
- 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>
- Gao, X. Z., Wang, X., Ovaska, S. J., & Zenger, K. (2012). A hybrid optimization method of harmony search and opposition-based learning. *Engineering Optimization*, 44(8), 895–914. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2011.628387>
- Garavito Hernandez, E. A. (2016). *Búsqueda Armónica Aplicada a la Conformación de Celdas de Manufactura*. Universidad de Puerto Rico - Recinto Universitario Mayagüez.
- Garey, M., & Jhonson, D. (1979). *A Guide to the Theory of NP-Completeness*. New York: W. H. FREEMAN AND COMPANY.
- Geem, Z. W. (2009). *Music-inspired harmony search algorithm: theory and applications*. Springer Verlag. (Springer, Ed.). Springer.
- Geem, Z. W., Kim, J. H., & Loganathan, G. V. (2001). A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search. *Simulation*, 76(2), 60–68. <https://doi.org/10.1177/003754970107600201>
- Ghosh, T., Doloi, B., & Dan, P. K. (2016). Applying soft-computing techniques in solving dynamic multi-objective layout problems in cellular manufacturing system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8070-6>

- Ghotboddini, M. M., Rabbani, M., & Rahimian, H. (2011). A comprehensive dynamic cell formation design: Benders' decomposition approach. *Expert Systems with Applications*, 38(3), 2478–2488. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.08.037>
- 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>
- Javadian, N., Seyyedi, I., & Rezaeian, J. (2009). A genetic algorithm approach for a dynamic cell formation problem. In *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*. <https://doi.org/10.3182/20090603-3-RU-2001.0121>
- 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.
- Kia, R., Baboli, A., Javadian, N., Tavakkoli-Moghaddam, R., Kazemi, M., & Khorrami, 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., 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>
- Lv, J., Yuan, J., & Han, W. (2013). Multi-period virtual cell formation: a new methodology based on non- linear mixed-integer programming model. *Applied Mechanics an Materials*, 278,

2210–2217. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.278-280.2210>

Mahdavi, I., Aalaei, A., Paydar, M. M., & Solimanpur, M. (2009). Production Planning and Cell Formation in Dynamic Virtual Cellular Manufacturing Systems with Worker Flexibility. *International Conference on Computers & Industrial Engineering*, 663–667.

Mahdavi, I., Aalaei, A., Paydar, M. M., & Solimanpur, M. (2014). Multi-objective cell formation and production planning in dynamic virtual cellular manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 49(21), 6517–6537. <https://doi.org/10.1080/00207543.2010.524902>

Majazi Dalfard, V. (2013). New mathematical model for problem of dynamic cell formation based on number and average length of intra and intercellular movements. *Applied Mathematical Modelling*. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.04.034>

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>

Mehdizadeh, E., & Rahimi, V. (2016). An integrated mathematical model for solving dynamic cell formation problem considering operator assignment and inter/intra cell layouts. *Applied Soft Computing Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.01.012>

Moradgholi, M., Mohammad Mahdi Paydar, B., Iraj Mahdavi, B., & Jouzdani, J. (2016). A genetic algorithm for a bi-objective mathematical model for dynamic virtual cell formation problem. *Journal of Industrial Engineering International*, 12, 343–359. <https://doi.org/10.1007/s40092-016-0151-0>

Mungwattana, A. (2000). Design of cellular manufacturing systems for dynamic and uncertain

production requirements with presence of routing flexibility. *ProQuest Dissertations and Theses*, 233 p.

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>

Nikoofarid, E., & Aalaei, A. (2013). Production planning and worker assignment in a dynamic virtual cellular manufacturing system. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 7(2), 89–95. <https://doi.org/10.1080/17509653.2012.10671211>

Ossama, M., Youssef, A. M. A., & Shalaby, M. A. (2014). A multi-period cell formation model for reconfigurable manufacturing systems. In *Procedia CIRP*. <https://doi.org/10.1016/i.procir.2014.01.120>

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>

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>

- Rabbani, M., Habibnejad-Ledari, H., Raaei, H., & Farshbaf-Geranmayeh, A. (2016). A bi-objective mathematical model for dynamic cell formation problem considering learning effect, human issues, and worker assignment. *Scientia Iranica E*, 23(5), 2341–2354.
- Rabbani, M., Samavati, M., Ziaee, M. S., & Rafiei, H. (2014). Reconfigurable dynamic cellular manufacturing system: A new bi-objective mathematical model. *Res*, 48, 75–102. <https://doi.org/10.1051/ro/2013054>
- Rafiei, H., & Ghodsi, R. (2013). A bi-objective mathematical model toward dynamic cell formation considering labor utilization. *Applied Mathematical Modelling*. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.05.015>
- Rezazadeh, H., Mahini, R., & Zarei, M. (2011). Solving a dynamic virtual cell formation problem by linear programming embedded particle swarm optimization algorithm. *Applied Soft Computing Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2010.12.018>
- Rheault, M., Drolet, J. R., & Abdunour, 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)
- Safaei, N., Saidi-Mehrabad, M., & Jabal-Ameli, M. S. (2008). A hybrid simulated annealing for solving an extended model of dynamic cellular manufacturing system. *European Journal of Operational Research*, 185(2), 563–592. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.12.058>
- 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>
- Safaei, N., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2009). An extended fuzzy parametric programming-

based approach for designing cellular manufacturing systems under uncertainty and dynamic conditions. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*.  
<https://doi.org/10.1080/09511920802616773>

Safaei, N., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2009). Integrated multi-period cell formation and subcontracting production planning in dynamic cellular manufacturing systems. *International Journal of Production Economics*, 120(2), 301–314.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2008.12.013>

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>

Sakhaii, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Bagheri, M., & Vatani, B. (2016). A robust optimization approach for an integrated dynamic cellular manufacturing system and production planning with unreliable machines. *Applied Mathematical Modelling*, 40(1), 169–191.  
<https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.05.005>

Sánchez, P., Ramos, A., Ferrer, J., Barquín, J., & Linares, P. (2010). Modelos matemáticos de optimización. *Universidad Pontificia Comillas*, 55.  
[https://doi.org/http://www.doi.icae.upcomillas.es/intro\\_simio.htm](https://doi.org/http://www.doi.icae.upcomillas.es/intro_simio.htm)

Sarayloo, F., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2010a). Imperialistic competitive algorithm for solving a dynamic cell formation problem with production planning. In *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.

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>

Selim, H. M., Askin, R. G., & Vakharia, A. J. (1998). Cell Formation in Group Technology: Review, Evaluation and Directions for Future Research\*. *Computers Ind. Engng*, 34(1), 3–20. [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(97\)00147-2](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(97)00147-2)

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>

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. In

- Journal of the Operational Research Society*. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602436>
- 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>
- Wei, N.-C., Liao, T.-J., Chao, I.-M., Wu, P., & Chang, Y.-C. (2013). An electromagnetism-like mechanism method for solving dynamic cell formation problems. *Journal of Asian Scientific Research*, *3*(10), 1022–1035.
- Wicks, E. M., & Reasor, R. J. (1999). Designing cellular manufacturing systems with dynamic part populations. *IIE Transactions*, *31*(November 2014), 11–20. <https://doi.org/10.1080/07408179908969801>
- Xiaoqing, W., Jiafu, T., Jun, G., & Mei, C. (2008). A Nonlinear Multi-Objective Model of Dynamic Cell Formation. *Chinese Control Ad Decision Conference*.
- Yang, Z. (1995, August). *Analysis and Design of Cellular Manufacturing Systems: Machine-Part Cell Formation and Operation Allocation*. Case Western Reserve University / OhioLINK.
- 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>

## Apéndices

### Apéndice A: Análisis Bibliométrico

El Problema de Formación de Celdas de Manufactura (CFP) ha sido estudiado desde principios del siglo XX; sin embargo, fue hasta mediados de la década de los 90 cuando se empezó a incorporar el horizonte de planeación en la formulación del problema, lo que a su vez derivó en el concepto de Problema de Formación de Celdas de Manufactura Dinámicas (DCFP). Con el fin de realizar un primer acercamiento a la estructura del DCFP, se plantea la realización de la búsqueda de los principales aportes y variaciones propuestas por investigadores en torno a esta temática.

En primer lugar, se propone una búsqueda de estudios realizados en torno al CFP, seguido se plantea una nueva búsqueda enfocada únicamente al DCFP haciendo uso de las bases de datos multidisciplinarias disponibles en la Universidad Industrial de Santander.

#### **Primera etapa: Problema de Formación de Celdas Manufactura**

En primera instancia, se revisan los trabajos relacionados con el CFP, para ello se selecciona como criterio de búsqueda la presencia de las frases “Cell Formation Problem” y “Cell Manufacturing System” en el título, resumen o palabras claves de los trabajos. Con el fin de evitar filtración de documentos de otras áreas de estudio, se hace uso en la ecuación de búsqueda del operador representado con comillas, garantizando de esta manera que las tres palabras (y su respectiva familia) de cada frase estén presentes en el documento en el estricto orden en que se realiza la búsqueda (Ver Figura 1).

---

**Web of Science:** *Tema:* ("cell formation problem") OR *Tema:* ("cell\* manufacturing system\*")

**Scopus:** (*TITLE-ABS-KEY* ("cell formation problem") OR *TITLE-ABS-KEY* ("cell\* manufacturing system\*"))

**Science Direct:** *TITLE-ABSTR-KEY* ("CELL FORMATION PROBLEM") or *TITLE-ABSTR-KEY* ("CELL\* MANUFACTURING SYSTEM\*")

---

*Figura 1.* Ecuación de búsqueda – Primera etapa

El total de documentos encontrados en cada una de las bases de datos se encuentra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, en los que se incluyen artículos de investigación, capítulos de libros, revisiones, entre otros. De este primer acercamiento se evidencia que un gran número de los estudios encontrados en las bases de datos Web of Science y Science Direct, también están presentes en Scopus, lo anterior debido a que gran parte de las revistas indexadas en las dos primeras bases de datos, también se encuentran en el portafolio de Scopus. Dado lo anterior, se selecciona la base de datos Scopus para realizar el análisis de los resultados obtenidos, así como para la siguiente etapa de la búsqueda a realizar.

**Tabla 1.**

*Número de artículos encontrados en cada base de datos para el CFP*

<i>Base de datos</i>	<i>Web of Science</i>	<i>Scopus</i>	<i>Science Direct</i>
<i>Documentos encontrados</i>	529	1393	346

Con el fin de refinar los resultados obtenidos, se aplican los filtros mencionados en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, obteniendo de esta manera 1288 documentos, a partir de los cuales se realiza el análisis presentado a continuación.

**Tabla 2.***Filtros de área de estudio y tipo de documento utilizados para el CFP*

<i>Área de estudio</i>	<i>Tipo de documento</i>
▪ Engineering	▪ Article
▪ Computer Sciences	▪ Conference Paper
▪ Decision Sciences	▪ Conference Review
▪ Business, Management and Accounting	▪ Review
▪ Mathematics	▪ Article in Press
▪ Multidisciplinary	▪ Short Survey

En la *Figura 2* se presenta la cantidad de publicaciones por año del problema de formación de celdas de manufactura, se evidencia una tendencia positiva en la década de los 80's y 90's; asimismo, hay presencia de un crecimiento en la cantidad de publicaciones en la primera década del siglo XXI; sin embargo, en los últimos 8 años, no se evidencia una tendencia que represente la producción de conocimiento enfocada a este problema.

Por otra parte, en la *Figura 3* se presenta la cantidad de publicaciones de acuerdo con el país en el que éstas fueron desarrolladas, cabe resaltar que Estados Unidos, Irán e India, son los países responsables del 54.76% de los trabajos realizados en torno al tema, cada uno con una participación de 25.09%; 17.84% y 11.82% respectivamente. Por otra parte, en la *Figura 5* se registra la cantidad de publicaciones por autor; es de resaltar la participación de Tavakkoli-Moghaddam y Mahdavi con 55 y 36 documentos respectivamente. De igual forma, sobresalen los aportes al CFP realizados por University of Tehran y Mazandaran University of Science and Technology con 87 y 65 publicaciones respectivamente (Ver *Figura 5*). Adicionalmente se destaca al International Journal Of Production Research y el Computers And Industrial Engineering Journal como las fuentes de

información con mayor cantidad de publicaciones, 175 y 111 respectivamente (Ver Tabla 3).

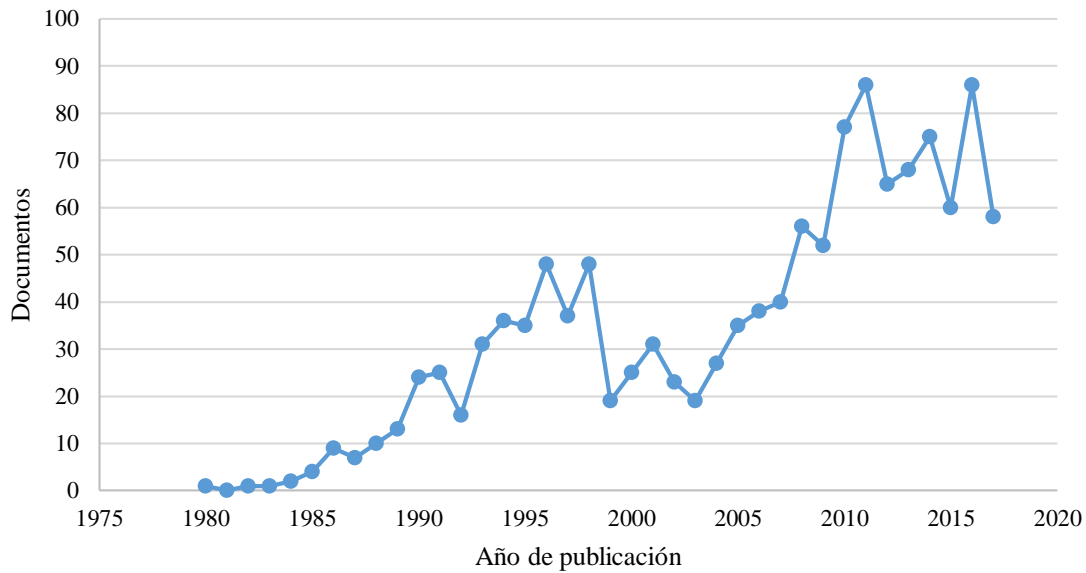


Figura 2. Publicaciones por año para el CFP

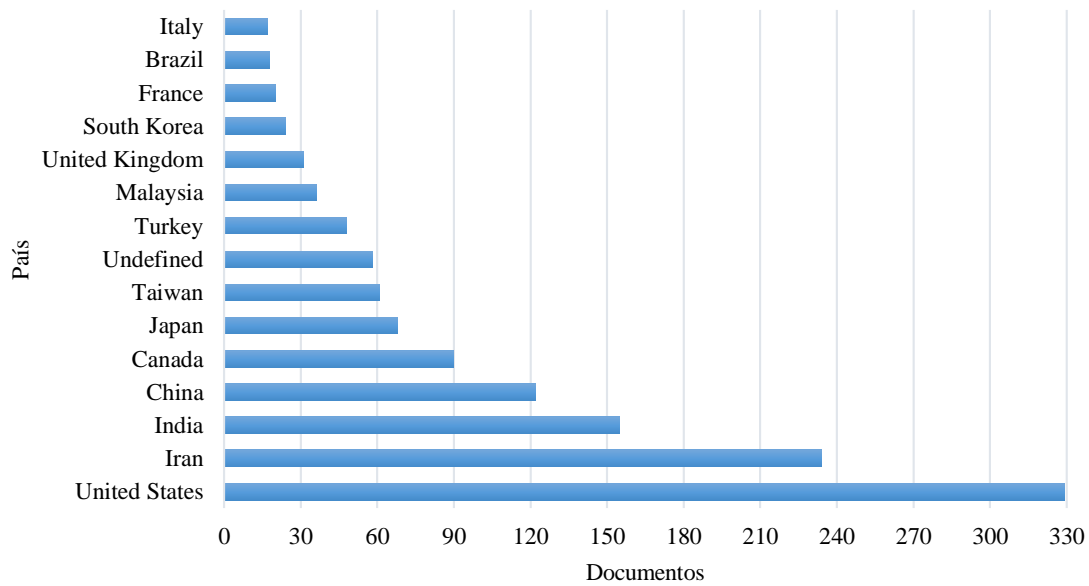
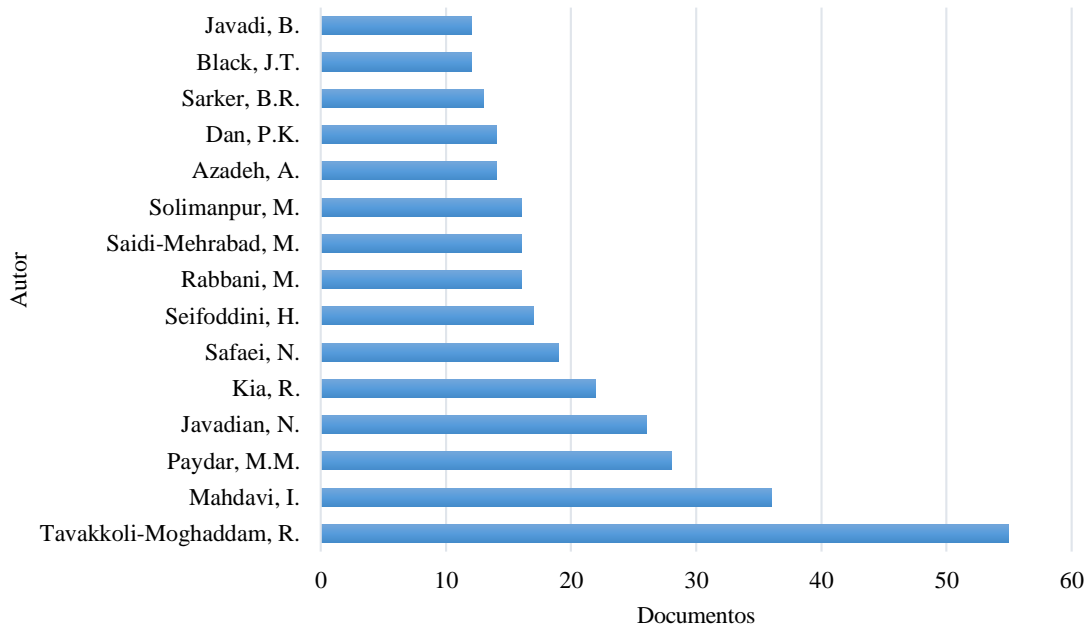


Figura 3. Publicaciones por país para el CFP

**Tabla 3.***Principales fuentes de información para el CFP*

<i>Siglas</i>	<i>Fuente</i>	<i>Documentos</i>
IJPR	International Journal Of Production Research	175
CIE	Computers And Industrial Engineering	111
IJAMT	International Journal Of Advanced Manufacturing Technology	80
JMS	Journal Of Manufacturing Systems	28
EJOR	European Journal Of Operational Research	23
IJCIM	International Journal Of Computer Integrated Manufacturing	20
IIE	IIE Transactions Institute Of Industrial Engineers	19
PPC	Production Planning And Control	17
JIM	Journal Of Intelligent Manufacturing	16
ESA	Expert Systems With Applications	15
LNCS	Lecture Notes In Computer Science	15
AMM	Applied Mathematical Modelling	13
AMAM	Applied Mechanics And Materials	12
IJSOM	International Journal Of Services And Operations Management	12
COR	Computers And Operations Research	11

*Figura 4. Publicaciones por autor para el CFP*

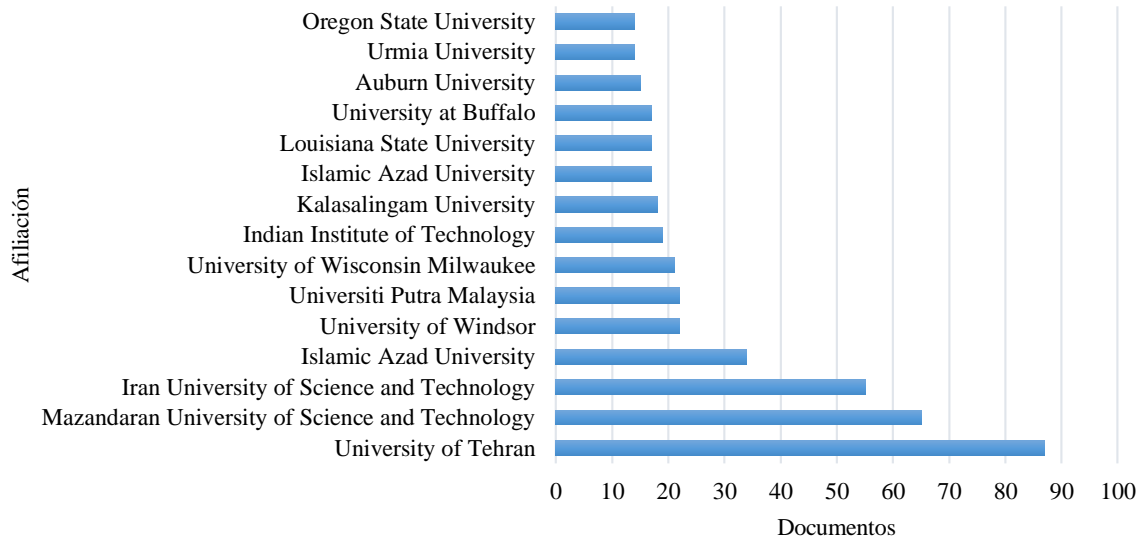


Figura 5. Publicaciones por afiliación del autor para el DCFP

### Segunda etapa: Problema de Formación de Celdas Manufactura Dinámicas

Para esta segunda etapa se plantea enfocar el análisis al DCFP, por tanto, en la ecuación de búsqueda se consideran las palabras: *Dynamic*, *Multiperiod*, *Multi-period*, *Flexible*; además del nombre propio del problema: *Cell Formation Problem* (Ver Figura 6).

---

**Ecuación de búsqueda:** (TITLE-ABS-KEY (multiperiod) OR TITLE-ABS-KEY (dynamic) OR TITLE-ABS-KEY(multi-period) OR TITLE-ABS-KEY (flexible) AND TITLE-ABS-KEY ("cell formation problem")).

---

Figura 6. Ecuación de búsqueda - Segunda etapa

De la anterior ecuación se obtienen 164 artículos; sin embargo, el presente análisis parte del trabajo realizado por Balakrishnan & Cheng (2007) en el que se realiza una revisión de los sistemas de manufactura celular multiperiodo, por tanto, se incluye en el filtro inicial de la ecuación de búsqueda el periodo de tiempo comprendido entre 2007 y 2017. Por consiguiente, los trabajos

objeto de estudio en el presente proyecto se derivan de los resultados obtenidos por la ecuación descrita en la *Figura 7*.

---

**Ecuación de búsqueda:** (*TITLE-ABS-KEY* (multiperiod) OR *TITLE-ABS-KEY* (dynamic)  
OR *TITLE-ABS-KEY* (multi-period) OR *TITLE-ABS-KEY* (flexible) AND *TITLE-ABS-KEY* ("cell formation problem")) AND *PUBYEAR* > 2006

---

*Figura 7.* Ecuación de búsqueda - Segunda etapa con filtro de tiempo

Se encuentran un total de 114 documentos; de los cuales se eliminan los registros duplicados y aquellos cuyo contenido no corresponda al estudio del DCFP. Como resultado se consolida una base de datos con 51 artículos analizados a continuación.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se registra la cantidad de publicaciones por año del DCFP, en ésta se evidencia que no existe una tendencia que defina el comportamiento de la cantidad de publicaciones consultadas en los últimos 10 años; sin embargo, es de resaltar que la mayor cantidad de trabajos se presentan en el año 2016 y que si bien para el 2017 se registran únicamente 2 documentos, esto puede ser causado por la fecha en la que se es realizada la consulta en la base de datos.

Por otra parte, en la *Figura 9* se evidencia que el país líder en cantidad de publicaciones enfocadas al DCFP es Irán con una participación del 52.54%; adicionalmente, se resalta que a pesar de ser el líder en la producción de trabajos correspondientes al CFP, Estados Unidos no figura en el listado de países que han aportado en los últimos diez años al DCFP. Asimismo, es de destacar que existen muy pocos trabajos realizados en asociación entre varios países, Irán y Canadá son los países que más publicaciones han presentado en conjunto con un total de tres documentos (Ver *Figura 10*)..

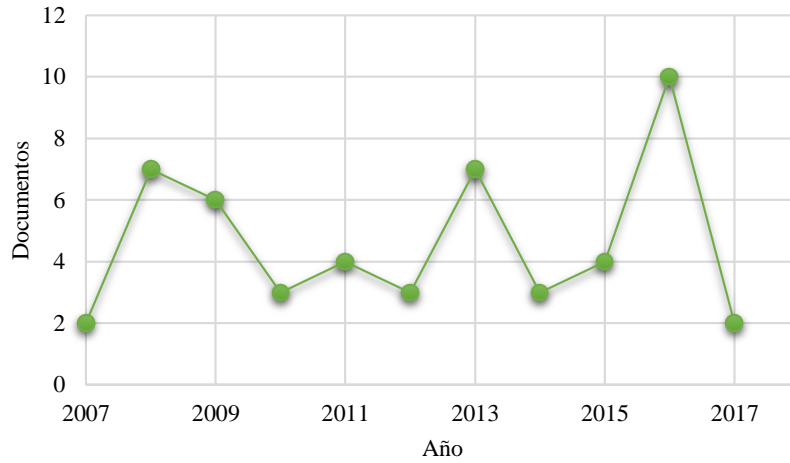


Figura 8. Publicaciones por año para el DCFP

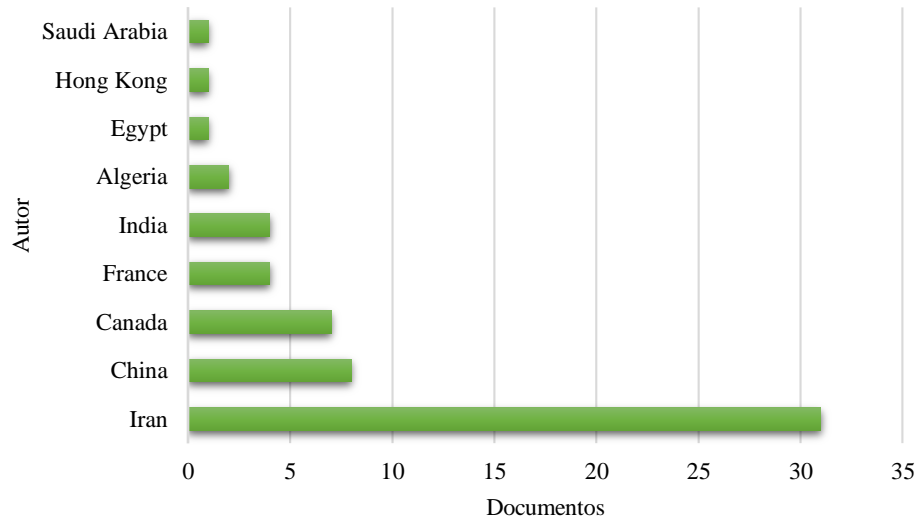


Figura 9. Publicaciones por país para el DCFP

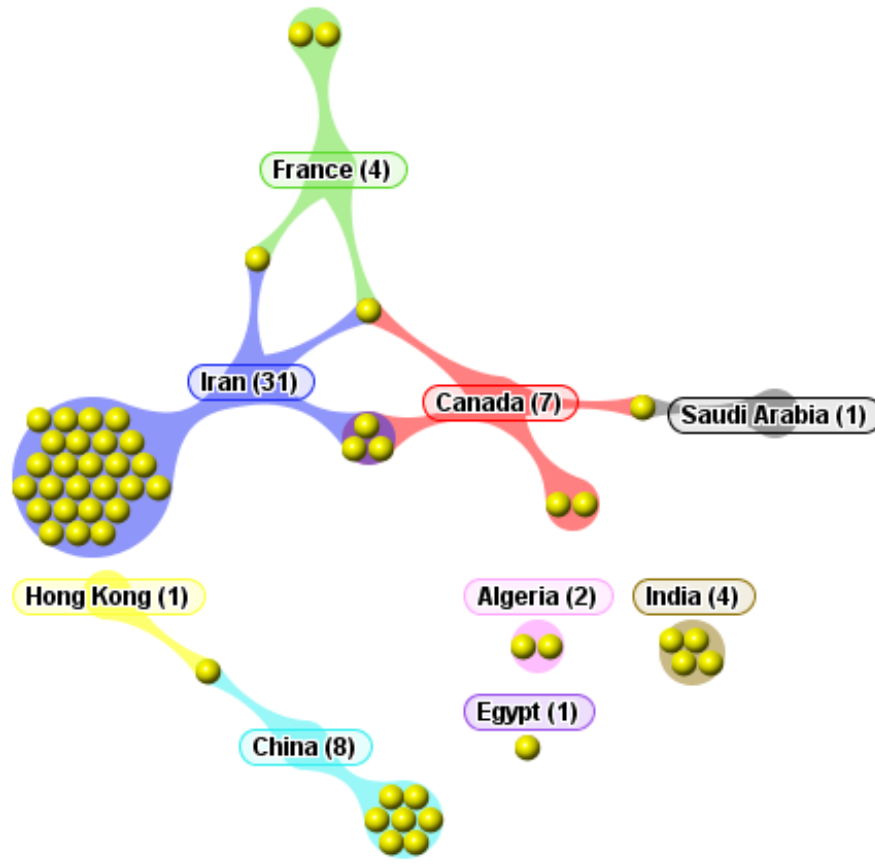


Figura 10. Aduna de países para el DCFP. Gráfica extraída de Software Vantage Point, 2018. Disponible en: <https://www.thevantagepoint.com/login.html>

Continuando con el análisis de los documentos, en la *Figura 11.45* se presenta el listado de los diez autores que más aportes han realizado al DCFP, así como la cantidad de trabajos con los que han contribuido. Se evidencia, además, que Tavakkoli-Moghaddam es el autor que más aportes ha hecho al DCFP con un total de ocho publicaciones en los últimos diez años; adicionalmente, es de resaltar que éste autor también lidera el listado de publicaciones para el CFP. Otro aspecto a valorar, es que los autores con más de una publicación han realizado asociaciones o trabajos en conjunto con otros autores; por ejemplo, Tavakkoli-Moghaddam comparte la autoría de sus ocho investigaciones con nueve investigadores de otras instituciones (Ver *Figura 12*).

En cuanto a la fuente de información, se evidencia en la Figura 12. Aduna de autores para el DCFP. Gráfica extraída de Software Vantage Point, 2018. Disponible en: <https://www.thevantagepoint.com/login.html>

Tabla que la mayor cantidad de trabajos han sido publicados por el *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, *Applied Mathematical Modelling* y el *International Journal Of Production Research* con 7, 4 y 3 documentos respectivamente.

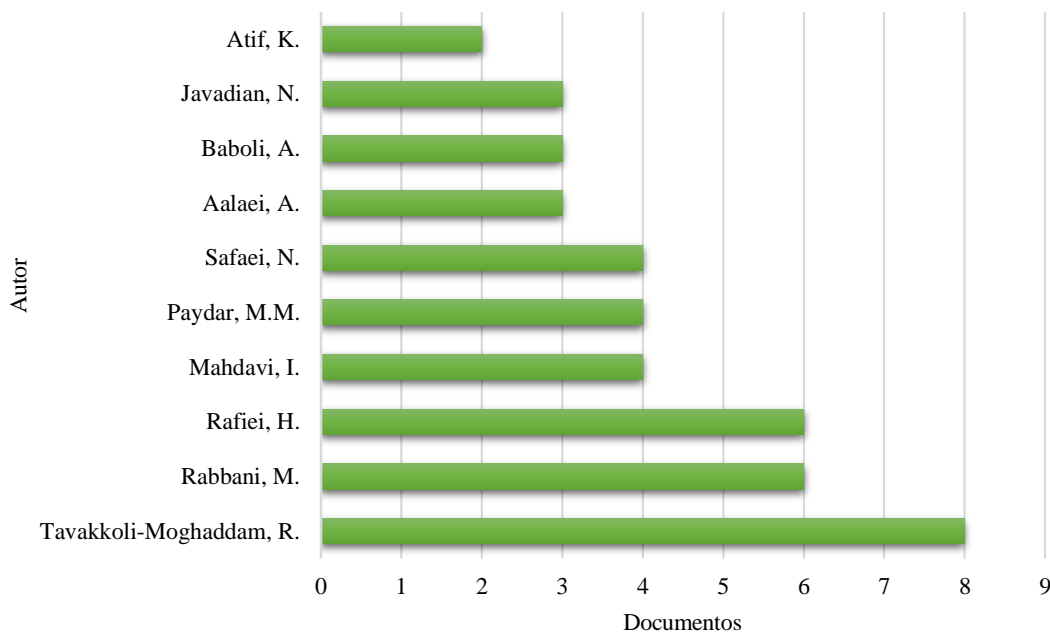


Figura 11.45 Publicaciones por autor para DCFP

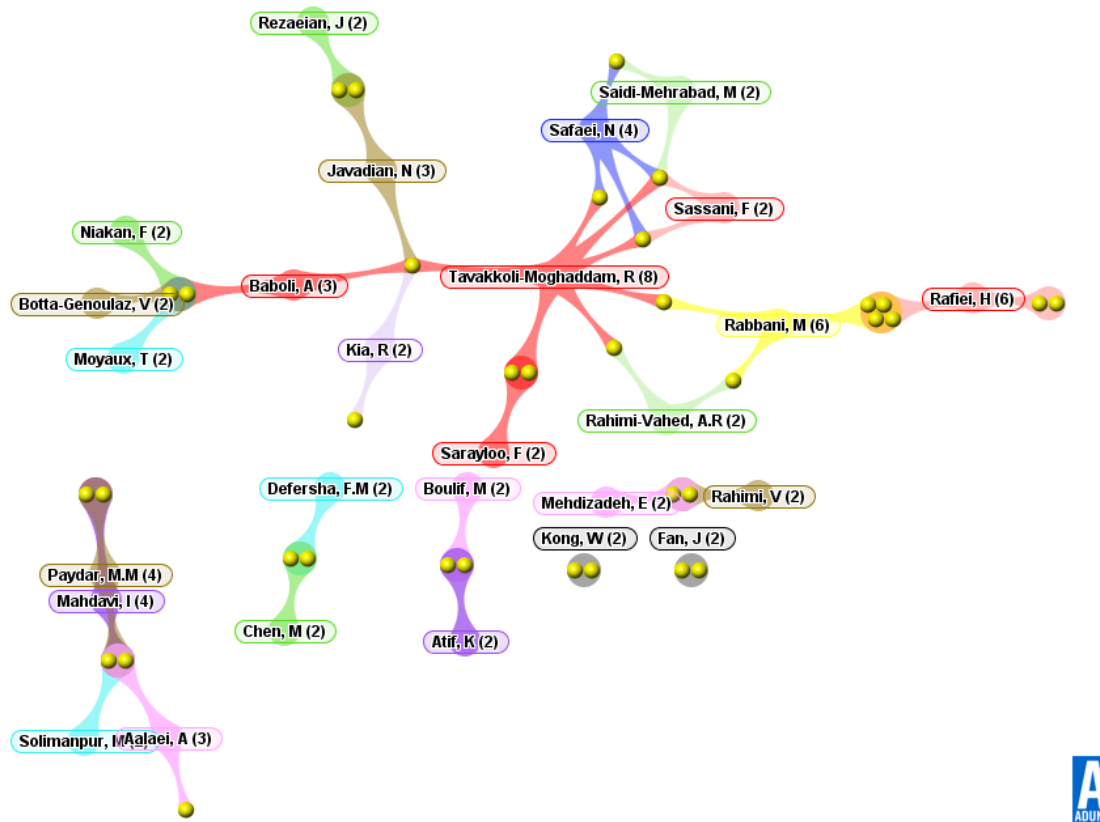


Figura 12. Aduna de autores para el DCFP. Gráfica extraída de Software Vantage Point, 2018. Disponible en: <https://www.thevantagepoint.com/login.html>

**Tabla 4.**

Principales fuentes de información para el CFP

<i>Siglas</i>	<i>Fuente</i>	<i>Documentos</i>
IJAMT	International Journal Of Advanced Manufacturing Technology	7
AMM	Applied Mathematical Modelling	4
IJPR	International Journal Of Production Research	3
ASCJ	Applied Soft Computing Journal	2
CIE	Computers And Industrial Engineering	2
COR	Computers And Operations Research	2
IJCIM	International Journal Of Computer Integrated Manufacturing	2
JIEI	Journal Of Industrial Engineering International	2
AES	Advances In Engineering Software	1
AM&M	Applied Mechanics And Materials	1

Teniendo en cuenta los resultados anteriores, se confirma la vigencia del tema de planteado para el presente estudio, así como la oportunidad de investigación, teniendo en cuenta la necesidad

de continuar realizando contribuciones a problemas reales de las industrias desde los conocimientos adquiridos en la academia.