

DESARROLLO DE UN ALGORITMO GENÉTICO PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE MANUFACTURA CELULAR A PARTIR DE UNA NUEVA FUNCIÓN DE APTITUD

NESTOR RAÚL ORTIZ PIMIENTO

Ingeniero Industrial
Escuela de Estudios Industriales y Empresariales, Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas,
Universidad Industrial de Santander
nortiz@uis.edu.co

SEBASTIÁN GÓMEZ GÓMEZ

Ingeniero Industrial
Escuela de Estudios Industriales y Empresariales, Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas,
Universidad Industrial de Santander
sgomezgomez@gmail.com

Fecha Recepción: 17/07/2007
Fecha Aceptación: 19/10/2007

RESUMEN

Este artículo desarrolla un algoritmo genético a través del cual es posible obtener una solución factible y satisfactoria al problema de conformación de celdas de manufactura. El algoritmo genético propuesto incluye un nuevo planteamiento de la función de aptitud tradicionalmente empleada para resolver este problema, permitiendo obtener una solución más ajustada a la realidad. Para validar el esquema y los operadores genéticos diseñados, se presenta un ejemplo de aplicación en donde se supone la existencia de una empresa que desea organizar de una manera eficiente cuatro celdas de trabajo, teniendo en cuenta la fabricación de 30 productos diferentes en 10 tipos de máquina.

PALABRAS CLAVE: Celdas de Fabricación, Tecnología de Grupos, Manufactura Celular, Algoritmos Genéticos.

ABSTRACT

This article shows a genetic algorithm that makes possible to find a feasible and acceptable solution to a manufacturing cell formation problem. The proposed genetic algorithm includes a new approach of the usually known aptitude function for this kind of problem resulting in a more exact solution. In order to validate the algorithm genetic operators this work includes a practical example with an imaginary company which wants to organize four manufacturing cells taking in account 30 different products using 10 machine types.

KEYWORDS: Manufacturing Cell, Group Technology, Cellular Manufacturing, Genetic Algorithms.

1. INTRODUCCIÓN

La fuerte competencia, los avances en la tecnología, la inestabilidad en la demanda y las exigencias cada vez más particulares de los clientes, son las características que describen el entorno de hoy [1], y para poder responder a éste, las organizaciones productivas necesitan sistemas flexibles que estén en capacidad de procesar eficiente y eficazmente una gran variedad de productos en volúmenes variables.

Es así, que la convencional distribución de plantas por procesos han dejado de ser razonable por los grandes tamaños de lote, elevados tiempos de espera y enormes cantidades de inventario necesario para la operación del sistema, la satisfacción del cliente y el aseguramiento de las economías de escala; mientras que la adaptación de nuevos modelos de producción y prestación de servicios, y los métodos de innovación de procesos, optimización de los recursos, incremento en la productividad y agilización de los ritmos de producción, se han convertido en elementos fundamentales dentro de cualquier estrategia corporativa que busque la construcción de ventajas competitivas frente a las expectativas del mercado.

La manufactura celular es un sistema alternativo de producción ideal para organizaciones con portafolios de productos y niveles de demanda medios que se beneficia tanto de la flexibilidad característica de los talleres de trabajo como de los flujos más eficientes de las líneas de producción convencionales, brindando fundamentos sobre los cuales pueden implementarse, por ejemplo, filosofías de gestión como justo a tiempo y teoría de restricciones.

Ahora, podría afirmarse que la investigación en algoritmos de agrupamiento para este problema específico ha alcanzado un alto nivel de saturación importante y que aunque son relativamente pocos los estudios que incorporan restricciones de diseño que tienen un mayor uso en la práctica y que facilitan los procesos de toma de decisiones en las empresas, éstos presentan formulaciones bastante acertadas.

En general, puede decirse que la investigación en algoritmos de agrupamiento y el problema de formación de celdas de manufactura ha sido significativa, siendo muchos los trabajos dedicados a éstos, algunos de los cuales incorporan elementos de diseño y funciones con múltiples objetivos que en la práctica son importantes pero que, aunque bastante acertados en su formulación, pueden ser ineficientes en términos computacionales.

Así, la tendencia clara y recomendaciones de los autores sobre el tema [2], señalan la necesidad de crear modelos de tipo heurístico o aproximado que se adapten a las formulaciones matemáticas más complejas y que aunque pueden no proporcionar la mejor solución, arrojen alternativas factibles de buena calidad en tiempos de ejecución razonables.

Desde su introducción por John Holland en 1975, los algoritmos genéticos y los procesos de computación evolutiva como herramientas para dar soluciones aproximadas a problemas de gran complejidad computacional, debido a su estructura y operadores simples, han sido usados de forma efectiva en manufactura [3] [4] [5].

Por todo lo anterior, el propósito de este artículo consiste en analizar la formulación tradicional de modelo matemático, de tal forma que pueda realizarse un planteamiento más adecuado de la función de aptitud que tradicionalmente ha sido empleada para resolver el problema de formación de celdas de manufactura mediante algoritmos genéticos.

Este artículo esta estructurado de la siguiente manera: en el numeral 2 se describe conceptualmente la manufactura celular, se define el problema de formación de celdas y se presentan los métodos de solución desarrollados hasta ahora; en el numeral 3, se presenta la formulación matemática general del problema y los supuestos involucrados en dicha formulación; en seguida (numeral 4), se realiza un breve análisis que hace evidente las deficiencias de la función objetivo tradicionalmente planteada. El numeral 5, hace referencia al cambio en la función objetivo original que posteriormente es asumida como la función de aptitud del algoritmo genético, el cual será implementado en el numeral 6 mediante un caso de aplicación. Al final del artículo aparecen los aportes y conclusiones más destacadas.

2. ANTEDECENTES

Según Wang et al [6], el diseño de sistemas de manufactura celular empieza fundamentalmente con dos tareas: la formación de familias de productos y la formación de grupos de máquinas llamadas celdas. Con la formación de familias de productos se busca agrupar aquellos cuyas características geométricas o requerimientos de proceso son similares, y la formación de celdas implica consolidar grupos de máquinas generalmente disímiles para dedicarlas a la fabricación de una o más familias de productos.

De esta forma, con la manufactura celular se propone descomponer un sistema de manufactura complejo en subsistemas menores, grupos de máquinas llamadas celdas de manufactura, que atienden las necesidades de producción de familias enteras de productos y de sus respectivas operaciones, en los que el flujo de los productos, la secuenciación de los trabajos, la planeación de la capacidad y los procedimientos de control de procesos se simplifiquen, y con los que se obtengan beneficios como la reducción de tiempos de preparación, de los tiempos de espera, de los inventarios, etc.; teniendo como objetivo la minimización de rubros de costo entre los que generalmente se encuentran el costo de equipos o máquinas, el costo de las transferencias intercelulares, el costo de inventario, el costo de operación y el costo de preparación.

Los esfuerzos invertidos en la investigación de diferentes aspectos del diseño de sistemas de manufactura celular han sido considerables, alcanzando ciertos niveles de saturación pero abriendo nuevos horizontes a la incorporación de elementos que facilitarían los procesos de toma de decisiones estratégicas en el corto plazo.

Algunos autores [2] [7] [8] [9] [10], se han tomado el trabajo de abordar la literatura e investigaciones dedicadas a la manufactura celular y clasificarlos, identificando las ventajas y limitaciones de algunos de los métodos de solución propuestos, y proporcionando orientación para futuras investigaciones sobre el tema. Los métodos de solución, de acuerdo con la mayoría de los autores descritos, pueden clasificarse en dos grandes grupos: el primero es el conjunto de métodos orientados al diseño y el segundo es el conjunto de metodologías orientadas al análisis del flujo de producción.

Los métodos orientados al diseño agrupan los tipos de productos basados en atributos como la forma, dimensiones, materias primas, tolerancias requeridas y operaciones requeridas, entre otros [11].

Los métodos orientados al análisis del flujo de producción, denominados también métodos de análisis de agrupamiento, consisten en la identificación de grupos de tipos de partes y de máquinas mediante la inspección de las tarjetas de ruta o matrices de incidencia parte/máquina. Estos métodos pueden ser abordados a partir de tres estrategias de solución [12]: la estrategia de agrupamiento en familias de productos, la estrategia de agrupamiento de máquinas o la estrategia de agrupamiento simultáneo de productos y máquinas.

Las técnicas para el análisis de los métodos orientados al análisis del flujo de producción se clasifican en:

- Técnicas de agrupamiento matricial, en donde se destacan el BEA (*Bond Energy Algorithm*), el DCA (*Direct Clustering Algorithm*) y el ROC (*Rank Order Clustering*).
- Técnicas de clasificación basadas en coeficientes de similitud, siendo los más utilizados el SLC (*Single Linkage Clustering*) [13], el ALC (*Average Linkage Clustering*) [14] y el CLC (*Complete Linkage Clustering*) [15]. También son comunes el ISNC (*Ideal Seed Non Hierarchical Clustering*) [16], su versión mejorada: el ZODIAC [17], el GRAFICS (*Grouping Using Assignment Method for Inicial Seed Selection*) [18], y el modelo MACE (*Machine Component Cell Formation*) [19].
- Técnicas de programación matemática, como el *p*-medias [9], modelos de formación de celdas tipo *flow shop* [20], modelos de agrupamiento simultáneo de partes y máquinas [21] [22] y modelos de optimización multi-objetivo [23].
- Técnicas heurísticas, como aquellas basadas en redes neuronales [24] [25] [26] [27] o los trabajos basados en matemática *fuzzy* [28] [29] [30], también existen otras técnicas de inteligencia artificial como el recocido simulado (*Simulated Annealing*), la búsqueda de tabú (*Tabu Search*) y técnicas mixtas que han sido implementadas con algún grado de éxito al problema [5] [31] [32].

Los algoritmos genéticos son una técnica heurística, que pese a ser una técnica para resolver problemas combinatorios con niveles elevados de complejidad, su uso en el diseño de sistemas de manufactura celular es relativamente nuevo [33]. Uno de los primeros en aplicar algoritmos genéticos fueron Venugopal et al [33], luego aparecieron los trabajos de Gupta et al [33] quienes desarrollaron un algoritmo genético para minimizar los movimientos intra e intercelulares; posteriormente Falkenauer [34] y Joines et al [33] propusieron metodologías de trabajo novedosas: el primero planteó un algoritmo genético modificado que usa una representación cromosómica específica al problema y operadores genéticos especiales; y los segundos formularon un método para la solución del problema de formación de celdas de manufactura como un problema de programación entera haciendo uso de los algoritmos genéticos.

Morad et al [35] también usaron algoritmos genéticos para abordar dos problemas en los sistemas de manufactura: la formación de celdas de manufactura y la producción por lotes, usando criterios como la minimización de movimientos intercelulares, la minimización de las variaciones en las cargas de trabajo entre celdas y la maximización de la similitud entre ellas. Otras investigaciones incorporaron elementos novedosos en la metodología de trabajo: Dimopoulos et al [34], por ejemplo, examinaron el problema diseño de manufactura celular en una planta de una compañía farmacéutica, maximizando el número total de lotes procesados por año y minimizando el costo total proporcional al número de celdas en esta. Asimismo, Wu et al [3] presentaron un algoritmo genético para dar solución a la formación de celdas que incluye el uso de una estructura cromosómica jerárquica, un esquema de selección novedoso, y un operador de mutación grupal que incrementa la probabilidad de mutación a medida que el algoritmo se estanca.

Finalmente, Ahmed et al [32] utilizaron un algoritmo genético para dar solución a un modelo matemático no-lineal entero, cuyo esquema de codificación de cuatro genes estaba formado por matrices bidimensionales. Para ello debieron rediseñar los operadores genéticos de tal forma que pudieran adaptarse a la estructura genética presentada.

En general, como conclusión a los artículos revisados puede afirmarse que los algoritmos genéticos ofrecen ventajas que podrían ser muy convenientes para el diseño de sistemas de manufactura celular, y que a diferencia de los algoritmos genéticos clásicos, aquellos que incluyen elementos de conocimiento de dominio y son construidos específicamente para el problema, han demostrado ser más efectivos a la hora de encontrar configuraciones de celdas más apropiadas [34].

3. FORMULACIÓN MATEMÁTICA GENERAL

La formulación matemática general presentada para el diseño de sistemas de manufactura celular fue tomada de las publicaciones hechas por Vakharia et al [36], Mungwatanna [5], y Ahmed et al [32], la cual utiliza la estrategia de agrupamiento simultáneo de productos y máquinas, asignando individualmente cada operación a una determinada celda y calculando los requerimientos de máquina que corresponden a la satisfacción de su

demanda. Para implementar este modelo matemático se requiere conocer:

- La mezcla de productos, es decir, el conjunto de los productos a ser fabricados en el sistema productivo a lo largo del periodo.
- La demanda por tipo de producto en número de lotes por periodo.
- La secuencia de las operaciones para la fabricación de cada producto que hace parte de la mezcla y el tipo de máquina empleado.
- El tiempo requerido para fabricar un lote de producto por operación por tipo de producto.
- La Capacidad de cada máquina a lo largo del periodo considerado.
- El Costo de operación de cada máquina, es decir, el valor de la depreciación de una máquina de cada tipo en el periodo o de su arrendamiento en caso de ser subcontratada. Puede incluir costos como el de mantenimiento, consumo energético, útiles herramientas, etc.
- El Costo de transferencias intercelulares, el cual aparece cuando un lote de producto no puede ser terminado por completo en una misma celda de manufactura y debe ser transferido a otra celda para que esta lo haga.
- El número máximo y mínimo permitido de máquinas por celda en el sistema.

Por otra parte, el modelo matemático se supone que:

- Los parámetros señalados como datos de entrada son constantes y conocidos.
- La totalidad de la demanda debe ser satisfecha.
- El tiempo de producción de un lote de producto por operación por tipo de producto incluye, de haberlo, el tiempo de alistamiento de máquina.
- El transporte de los productos entre las celdas se hace por lotes y no requiere tiempo adicional.
- El costo de transportar un lote de cualquier producto entre cualquier par de celdas no depende de la distancia recorrida.
- Las máquinas de cada tipo son consideradas réplicas con idéntica capacidad e idéntico costo.
- Las máquinas dentro del sistema están disponibles desde el comienzo del periodo.
- Cada máquina dentro del sistema puede procesar una pieza a la vez.
- La capacidad de las máquinas en el sistema es 100% confiable.
- No se consideran productos defectuosos ni paradas de máquina.

- Los re-procesos no son permitidos en la operación del sistema, no se consideran tiempos de espera en producción y no se considera mantenimiento de inventarios.
- No se considera el valor del dinero en el tiempo a lo largo del periodo.

Las variables de decisión que se obtienen como solución del modelo, son:

- La asignación de las operaciones de cada producto a las celdas.
- El número de máquinas necesarias para la ejecución de dicha asignación de operaciones.

La función objetivo hace referencia a los costos de máquinas y los costos de transferencias intercelulares, los cuales deben ser minimizados en forma integrada. A continuación se presenta la formulación matemática general:

Minimizar Costo (C):

$$C = \sum_{c=1}^C \sum_{m=1}^M N_{mc} CM_m + CTI \left[\sum_{p=1}^P D_p \left(\sum_{j=1}^{Op-1} \sum_{c=1}^C |X^{(j+1)pc} - X_{jpc}| \right) \right] \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{c=1}^C X_{jpc} = 1 \quad \forall j, y \quad (2)$$

$$\sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^{Op} D_p t_{jp}^a X_{jpc} \leq CAP_m N_{mc} \quad \forall m, y \quad \forall c \quad (3)$$

$$\sum_{m=1}^M N_{mc} \geq TMin \quad \forall c \quad (4)$$

$$\sum_{m=1}^M N_{mc} \leq TMax \quad \forall c \quad (5)$$

$$X_{jpc} \in [0,1] \quad \text{(Binario)} \quad \forall j, y, p, y \quad \forall c \quad (6)$$

$$N_{mc} \geq 0 \quad \text{(Entero)} \quad \forall m, y \quad \forall c \quad (7)$$

En donde:

- c : Índice para las celdas de manufactura ($c = 1, \dots, C$).
- m : Índice para los tipos de máquina ($m = 1, \dots, M$).
- p : Índice para los productos ó tipos de producto ($p = 1, \dots, P$).
- j : Índice para las operaciones requeridas por el producto p ($j = 1, \dots, Op$).

Con los siguientes datos en entrada:

- D_p : Demanda del producto p para el periodo en número de lotes.
- A_{jpm} : 1, si la operación j del producto p es fabricada en la máquina tipo m ; 0, de lo contrario.
- t_{jp} : Tiempo de operación requerido para completar la operación j en un lote del producto tipo p (incluido el tiempo de alistamiento de máquina).
- CAP_m : Capacidad disponible de una máquina tipo m durante el periodo.
- CM_m : Costo de tener una máquina tipo m durante el periodo.
- CTI : Costo de transferir un lote de cualquier producto entre cualquier par de celdas.
- $TMin$: Número mínimo de máquinas por celda.
- $TMax$: Número máximo de máquinas por celda.

Y las siguientes variables de decisión:

- N_{mc} : Número de máquinas tipo m a asignar a la celda c durante el periodo.
- X_{jpc} : 1, si la operación j del producto p es asignada a la celda c ; 0, de lo contrario.

La restricción 2 limita la asignación de cada operación de cada tipo de producto a una sola celda dentro del sistema, el conjunto de restricciones 3 garantiza que las capacidades

de cada tipo de máquina y cada celda en el sistema no sean excedidas y que puedan satisfacer los requerimientos de la demanda. Los conjuntos de restricciones 4 y 5 establecen que el número de máquinas por cada celda no puede ser ni menor al valor establecido como mínimo, ni mayor al valor establecido como máximo. Finalmente, las ecuaciones 6 y 7 señalan la naturaleza de las variables de decisión dentro del modelo, siendo las X_{jpc} y las N_{mc} variables binarias y enteras positivas respectivamente.

4. EVALUACIÓN DE LA FUNCIÓN DE APTITUD DEL ALGORITMO GENÉTICO

Como primera medida, vale la pena aclarar que la función de aptitud del algoritmo genético que se propone en este trabajo, será equivalente a la función objetivo de la formulación matemática general.

Dicha función de aptitud, es una función es no lineal debido a la presencia de una expresión en valor absoluto, y aunque además es no diferenciable, su uso en problemas de optimización es bastante frecuente. En este caso, la no linealidad del modelo puede ser corregida (como lo harían inicialmente Vakharia et al [36], y posteriormente Mungwatanna [5]) introduciendo las variables auxiliares $Y_{pos_{jpc}}$ y $Y_{neg_{jpc}}$, incorporando los conjuntos de restricciones dados por las ecuaciones 8, 9 y 10, y reformulando el segundo término de la función objetivo (ecuación 1) como se muestra en la ecuación 11.

$$X_{(j+1)pc} - X_{jpc} = Y_{pos_{jpc}} - Y_{neg_{jpc}} \quad \forall j, \forall p, \forall c \quad (8)$$

$$Y_{pos_{jpc}} \in [0,1] \quad \text{(Binario)} \quad \forall j, \forall p, \forall c \quad (9)$$

$$Y_{neg_{jpc}} \in [0,1] \quad \text{(Binario)} \quad \forall j, \forall p, \forall c \quad (10)$$

$$CTI \left[\sum_{p=1}^P D_p \left(\sum_{j=1}^{Op-1} \sum_{c=1}^C (Y_{pos_{jpc}} + Y_{neg_{jpc}}) \right) \right] \quad (11)$$

Dichas variables auxiliares representan las transferencias intercelulares del producto tipo p en la celda c entre las operaciones j y $(j + 1)$, y podrían definirse de la siguiente forma:

$$Y_{pos_{jpc}} : \begin{cases} 1, \text{ si } X_{(j+1)p} - X_{jpc} = 1; \\ 0, \text{ de lo contrario.} \end{cases}$$

$$Y_{neg_{jpc}} : \begin{cases} 1, \text{ si } X_{(j+1)p} - X_{jpc} = -1; \\ 0, \text{ de lo contrario.} \end{cases}$$

Ahora bien, teniendo en cuenta la definición dada de las variables auxiliares $Y_{pos_{jpc}}$ y $Y_{neg_{jpc}}$, al examinar detalladamente la función de aptitud (ecuación 11), puede concluirse que las transferencias intercelulares de productos en el sistema están siendo doblemente contabilizadas.

Para explicarlo mejor, en la **Tabla 3** está representado el escenario de asignación hipotético para las tres operaciones de la secuencia de producción del producto p .

Tabla 1. Asignación hipotética de operaciones para el producto p .

PRODUCTO p	
Operación	Celda
1	1
2	1
3	2

En ésta, las dos primeras operaciones se asignaron a la celda 1 mientras que la tercera se asignó a la celda 2, indicando que solo existen transferencias de producto desde o hacia las celdas entre las operaciones 2 y 3; de acuerdo con lo anterior, las **Tablas 4, 5 y 6** muestran los valores asumidos por las variables X_{jpc} , $Y_{pos_{jpc}}$ y $Y_{neg_{jpc}}$.

Tabla 2. Variable X_{jpc} de acuerdo al escenario planteado

Operación	Celda	
	1	2
1	1	0
2	1	0
3	0	1

Tabla 3. Variable $Y_{pos_{jpc}}$ de acuerdo al escenario planteado

Operación	Celda	
	1	2
1	0	0
2	0	1

Tabla 4. Variable $Y_{neg_{jpc}}$ de acuerdo al escenario planteado

Operación	Celda	
	1	2
1	0	0
2	1	0

Así, al desarrollar la doble sumatoria entre paréntesis mostrada en la función de aptitud, reemplazando los valores de las variables se obtiene lo siguiente:

$$\sum_{j=1}^{Op-1} \sum_{c=1}^C (Y_{pos_{jpc}} + Y_{neg_{jpc}}) = 2$$

De esta forma, pese a ser transferidos solo una sola vez, el resultado obtenido refleja que las movimientos de lotes de producto entre las celdas son contabilizados dos veces y, como consecuencia de ello, su costo doblemente cargado.

5. ALGORITMO GENÉTICO PROPUESTO

Para evitar el inconveniente planteado en el numeral anterior, se propone replantear el segundo término de la función de aptitud utilizando cualquiera de las ecuaciones mostradas a continuación (ecuación 12 y 13).

$$CTI \left[\sum_{p=1}^P D_p \left(\sum_{j=1}^{Op-1} \sum_{c=1}^C Y_{pos_{jpc}} \right) \right] \quad (12)$$

$$CTI \left[\sum_{p=1}^P D_p \left(\sum_{j=1}^{Op-1} \sum_{c=1}^C Y_{neg_{jpc}} \right) \right] \quad (13)$$

El esquema de codificación genético de cada solución (individuo) debe contener la información que permita determinar la celda a la que ha de asignarse cada operación de cada tipo de producto contenido en la mezcla para el periodo y el número de máquinas por tipo a asignarse a cada celda durante el periodo, por ello se utilizó una matriz C_{jp} con $J \times P$ elementos, donde J es el número máximo de operaciones por producto y P es el número de productos de la mezcla, definidos como la celda a la que fue asignada la operación j del producto tipo p :

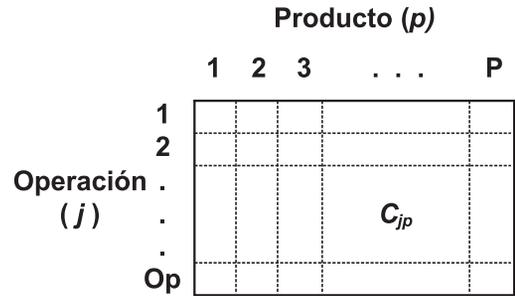


Figura 1. Esquema de codificación empleado

Con el propósito de garantizar la diversidad en la estructura y una buena representación del espectro de posibles soluciones al problema planteado, el código genético de los individuos de la población inicial se generó utilizando un método constructivo, el cual toma cada operación en la secuencia de producción de cada producto y la asigna a la celda que presente menor costo total; a continuación se muestra el conjunto de pasos empleados en este método:

1. Inicializar la variable requerimientos de máquina por tipo de máquina por celda igual a cero.
2. Seleccionar un tipo de producto de la mezcla a ser considerado.
3. Seleccionar una operación de la secuencia de operaciones del producto seleccionado en el paso 1 a ser considerada.
4. Si el producto seleccionado es el primero de la mezcla y la operación considerada es la primera en la secuencia de producción de dicho producto, ir al paso 5. De lo contrario ir al paso 6.
5. Asignar a cada celda (candidato) un costo marginal total (calificación) igual a cero. Ir al paso 11.
6. Si la operación considerada es la primera en la secuencia de producción del producto seleccionado, ir al paso 7. De lo contrario ir al paso 8.
7. Asignar a cada celda (candidato) un costo de transferencias intercelulares igual a cero. Ir al paso 9.
8. Calcular el costo de transferir los lotes del producto desde la celda a la que fue asignada la operación inmediatamente anterior hacia cualquiera de las celdas (el costo de transferir los lotes hacia la misma celda es igual a cero).
9. Calcular el costo marginal de máquina que corresponde al costo de incluir los requerimientos de máquina de la operación y producto seleccionados en cualquiera de las celdas del sistema.

10. Calcular el costo marginal total de cada celda sumando el costo marginal de máquina y el costo de transferencias intercelulares.
11. Asignar la operación y producto seleccionados a la celda con menor costo marginal total. De haber empates, asignar aleatoriamente.
12. Actualizar la variable requerimientos de máquina por tipo de máquina por celda de acuerdo con la asignación hecha en el paso 11.
13. De haber considerado todas las operaciones de la secuencia de producción del producto seleccionado, seguir al paso 14. De lo contrario volver al paso 3.
14. De haber considerado todos los tipos de producto contenidos en la mezcla, terminar. De lo contrario volver al paso 2.

Aunque el esquema de codificación utilizado y la forma en que es calculada la función de aptitud garantiza que los individuos cumplen con las restricciones 2 y 3, el método de generación de la población inicial y los operadores genéticos que se proponen más adelante para la generación de nuevos individuos, no garantizan que éstos cumplan con las restricciones 4 y 5 (tamaño de la celda). Esto implica que el algoritmo genético admite soluciones no factibles, pero penaliza su aptitud con una cantidad proporcional al número total de máquinas por celda que se encuentran por encima o por debajo de los límites establecidos.

A continuación se muestra la secuencia de pasos con la que se calcula la aptitud de cada individuo en el algoritmo genético:

1. Calcular los requerimientos de máquina por tipo de máquina por celda de acuerdo con el código genético del individuo.
2. Calcular los costos de máquina multiplicando las necesidades de máquina con los costos de tener máquinas operando en el sistema.
3. Calcular los costos de las transferencias intercelulares multiplicando el número total de lotes de cualquier producto a movilizar entre cualquier par de celdas con su costo asociado.
4. Calcular la aptitud de la solución sumando los costos de máquina y de transferencias intercelulares.
5. Verificar si el individuo cumple las restricciones de tamaño de celda.
6. De cumplir con todas las restricciones, terminar. De lo contrario, ir al paso 7.
7. Calcular el número de máquinas por encima o por debajo de las restricciones insatisfechas y penalizar la aptitud calculada de acuerdo con dicho número. Terminar.

La selección de individuos que se convertirán en padres de la siguiente generación, se basa en el valor de su función de aptitud, ya que a partir de ésta, se calcula su probabilidad de selección:

$$P_{seleccion_n} = \frac{\left(\frac{1}{F_{Aptitud_n}}\right)}{\sum_{n=1}^N \left(\frac{1}{F_{Aptitud_n}}\right)} \quad (14)$$

Donde

- N: Tamaño de la población.
 Pselección_n: Probabilidad de que el individuo n sea seleccionado.
 FAptitud_n: Valor de la función de aptitud para el individuo n.

Los operadores genéticos que se presentan a continuación y que fueron empleados en el ejemplo de aplicación, se basan en los resultados obtenidos mediante un estudio estadístico (diseño factorial 2k) aplicado a problemas que involucraban 30 tipos de productos y 10 tipos de máquina agrupadas en 4 celdas de manufactura [37]:

Tabla 5. Operadores Genéticos

PARAMETRO	TIPO O VALOR
Tipo de Operador de Cruce	SIMPLE
Tipo de Esquema de Cruce	ALTERNATIVO
Tipo de Operador de Mutación	GEN A GEN
Probabilidad de Cruce	0,9
Probabilidad de Mutación	0,01
Tamaño de la Población	500
Número de Generaciones	500

Con el operador de cruce simple se generaran nuevas soluciones mediante la combinación de dos cromosomas padres, determinando de forma aleatoria un punto a partir del cual se intercambié la información genética de los individuos seleccionados. Para cada pareja de padres se genera aleatoriamente un esquema de cruce alternativo, el cual podrá ser por filas, columnas o bloques¹.

El operador de mutación gen a gen efectúa el cambio de asignación en cada uno de los elementos del esquema de

¹ El esquema de cruce alternativo por *bloques* combina simultáneamente los esquemas de cruce alternativo por columnas y por filas.

codificación, evaluando por separado con la probabilidad de mutación igual a 0,01 para cada operación de cada producto, si su implementación es pertinente.

Una vez ejecutados los operadores genéticos el algoritmo actualiza la población introduciendo de generación en generación los individuos construidos como resultado de los mismos, sustituyendo a los cromosomas con menor valor de aptitud, para enriquecer los procesos de selección, reproducción y mutación.

6. SIMULACIÓN DE RESULTADOS

El siguiente caso de aplicación hace referencia a una empresa que fabrica 30 productos en 10 tipos de máquina diferentes. La empresa debe formar cuatro celdas de fabricación teniendo en cuenta que en cada una de ellas podrá incluir entre dos y 10 máquinas; el costo de transferencia intercelular es de \$1. En las **Tablas 6, 7 y 8**, se detalla el costo de operación de cada máquina, su capacidad de producción, la secuencia de operaciones y los tiempos de fabricación:

Tabla 6. Costo y Capacidad por máquina.

Tipo de máquina	Costo unitario	Capacidad
1	286	480
2	468	480
3	477	480
4	944	480
5	1.225	480
6	1.590	480
7	457	480
8	340	480
9	441	480
10	855	480

Tabla 7. Secuencias de Producción

Operación	PRODUCTO														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	7	4	5	7	5	8	7	9	10	7	4	5	10	9	10
2	3	6	10	2	4	10	5	7	6	5	5	1	3	2	3
3	6	8	8	10			3		7	1	4	10	4	1	
4	4	7	1						9	9	2	3			
5	3								5	8					
6	9								8	2					

Operación	PRODUCTO														
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	10	8	4	4	4	4	4	3	10	10	1	1	5	6	2
2	7	4	9	1	1	7	10	7	6	9	3	6	1	9	5
3	8		6	9		3	8	10	2	5	9		3	8	
4	6			5			10		5				5		2
5							2		3						
6							10		1						

Tabla 8. Tiempos de fabricación

Operación	PRODUCTO														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	5	9	2	7	4	2	5	10	7	4	7	5	6	6	4
2	3	5	5	8	4	2	7	9	8	5	2	6	5	10	9
3	9	5	10	10			3		9	5	2	10	9	2	
4		3	4	7						2	3	8	10		
5		4								9	2				
6		4								4	4				

Operación	PRODUCTO														
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	9	10	7	9	6	2	5	7	3	4	2	8	8	8	9
2	8	7	8	3	3	5	6	6	2	5	6	10	5	3	7
3	10		6	5		7	10	6	9	10	9		5		6
4	8			2			7		9				5		4
5							8		4						
6							10		5						

Además de lo anterior, se supone que la demanda para el próximo periodo es la siguiente:

Tabla 9. Demanda por producto.

Producto	Demanda
1	24
2	23
3	21
4	23
5	17
6	16
7	19
8	24
9	22
10	25
11	24
12	12
13	14
14	18
15	16

Producto	Demanda
16	10
17	15
18	17
19	15
20	11
21	10
22	21
23	22
24	12
25	17
26	22
27	20
28	13
29	22
30	25

El algoritmo genético diseñado en el numeral anterior fue desarrollado en el paquete informático de apoyo MATLAB y para hacerlo, fue necesario codificar cada uno de los elementos del algoritmo genético formulado (población inicial, la función de aptitud, los operadores

genéticos y la actualización de la población) en el lenguaje técnico computacional propio de la aplicación.

Por otra parte, para obtener mejores resultados se generaron 5 poblaciones iniciales, las cuales permitieron escoger como mejor solución, la replica que obtuvo el menor costo total.

Los resultados obtenidos para este caso de aplicación se resumen en las siguientes tablas:

Tabla 10. Resultados por réplica del algoritmo genético

Estadística	Prom.	RESULTADO POR RÉPLICA				
		Rép. 1	Rép. 2	Rép. 3	Rép. 4	Rép. 5
COSTO	22.194	22.177	22.148	22.221	22.259	22.165
TIEMPO DE EJECUCIÓN	608,34	655,63	621,09	586,31	587,58	591,09

Como puede observarse, el menor costo se ha obtenido en la réplica 2 y su tiempo de ejecución ha sido de 521,09 segundos; esta réplica es considerada como la mejor respuesta al conformar celdas de fabricación para el problema planteado, su solución se presenta en las Tablas 11 y 12:

Tabla 11. Celda asignada a cada producto y a cada operación

Operación	PRODUCTO														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	3	2	2	3	2	4	3	4	4	4	2	2	1	3	4
2	3	1	2	2	2	4	2	4	4	2	2	2	1	2	4
3	3	1	3	2			1		3	2	2	2	1	2	
4		1	3	2						3	3	2	1		
5		1								4	3				
6		1								4	3				

Operación	PRODUCTO														
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	4	1	1	2	2	2	1	3	3	3	4	4	4	1	3
2	4	2	1	2	2	3	1	3	3	3	4	4	4	1	3
3	4		1	3		3	1	3	3	3	4		3		3
4	4			3			1		4				3		3
5								3		4					
6								3		4					

Tabla 12. Asignación de máquinas

Celda	TIPO DE MÁQUINA										Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	6
2	1	1	0	2	1	0	0	0	0	1	6
3	0	2	1	0	1	1	2	1	1	1	10
4	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	8
Total	2	3	3	3	3	3	3	3	3	4	

Las Figuras 2 y 3 ilustran la evolución de la aptitud y del número de individuos factibles para cada una de las réplicas corridas por el algoritmo genético. Estas muestran, en general, convergencias rápidas con reducción significativa del costo a partir de la generación número 60.

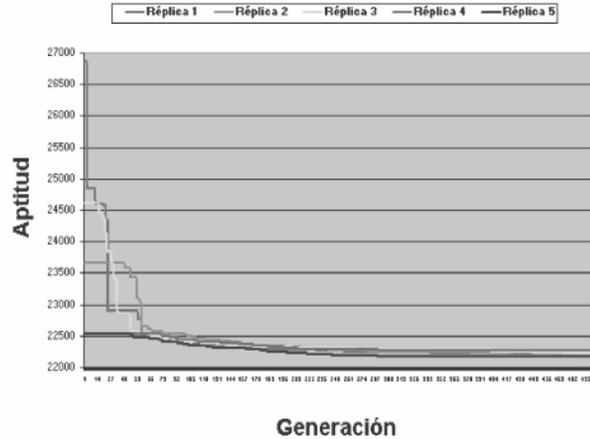


Figura 2. Evolución de la Aptitud

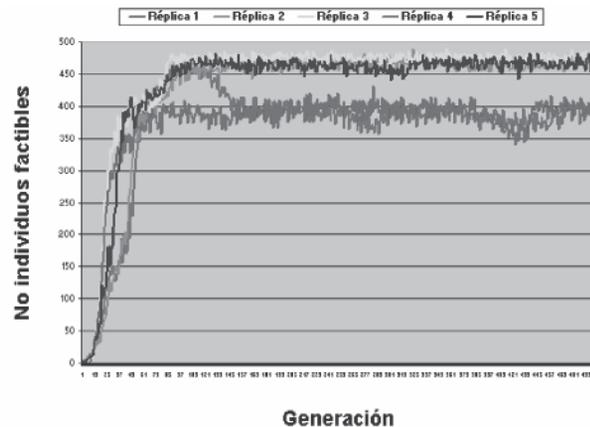


Figura 3. Individuos factibles por generación

7. CONCLUSIONES

En este artículo se ha propuesto un algoritmo genético como técnica heurística que permite resolver el problema de conformación de celdas de fabricación, evitando el esfuerzo computacional que se requeriría al aplicar cualquiera de las técnicas básicas de programación matemática.

El aporte fundamental del artículo, ha sido el replanteamiento de la función de aptitud que tradicionalmente había sido empleada para resolver dicho problema; esta nueva función de aptitud permitirá obtener soluciones confiables al no contabilizar doblemente los costos de transferencias intercelulares.

El algoritmo genético propuesto, puede ser considerado como un algoritmo eficiente, ya que permite una rápida convergencia para la función de aptitud y para la cantidad de individuos factibles en cada generación.

8. REFERENCIAS

[1] Evolución de los Enfoques y Conceptos de la Logística. Available: <http://dialnet.unirioja.es/servlet/oaiart?codigo=140184> [citado 20 de septiembre de 2007].

[2] Re-aligning research objectives in Cellular Manufacturing System Design: A User's perspective. Available: <http://www.iimb.ernet.in/~mahadev/cmsurvey.pdf> [citado 20 de septiembre de 2007].

[3] X. Wu, C. Chu, Y. Wang and W. Yang, "A Genetic Algorithm for Integrated Cell Formation and Layout Decisions", IEEE 0-7803-7282-4, 2002, pp. 1866-1872.

[4] ABDUELMOLA, A.I. Modelling of Cellular Manufacturing Systems with Productivity Considerations: a Simulated Annealing algorithm. [PhD Thesis]. Windsor, Canadá, University of Windsor, 2000.

[5] MUNGWATANNA, A. Design of Cellular Manufacturing Systems for Dynamic and Uncertain Production requirements with Presence of Routing Flexibility. [PhD Thesis]. Blacksburg, Estados Unidos: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2000.

[6] J. Wang and C. Roze. "Formation of machine cells and part families: a modified p-median model and a

comparative study". International Journal of Production Research, Vol. 35, No. 5, May 1997, pp. 1259-1286.

[7] S. Heragu. "Group technology and cellular manufacturing", Transactions on systems, man, and cybernetics, Vol. 24, No. 2, February 1994, pp. 203-215.

[8] J. R. King and V. Nakornchai. "Machine-component group formation in group technology: review and extension". International Journal of Production Research. Vol. 20, No. 2, 1982, pp. 117.

[9] A. Kusiak and W. Chow. "Decomposition of Manufacturing Systems". IEEE, Journal of robotics and automation. Vol. 4, No. 5, 1988, pp. 457.

[10] N. Singh. "Design of cellular manufacturing systems: An invited review". European Journal of Operational Research, Vol. 69, September 1993, pp. 284-291.

[11] S. Heragu. "Group technology and cellular manufacturing", Transactions on systems, man, and cybernetics, Vol. 24, No. 2, February 1994, pp. 205.

[12] A. Ballakur and H. Steudel. "A Within-Cell Utilization Based Heuristic for Designing Cellular Manufacturing Systems". International Journal of Production Research, Vol. 25, No. 5, May 1987, pp. 639-665.

[13] J. McAuley. "Machine grouping for efficient production". The Production Engineer. Vol. 51, 1972, pp. 53-57.

[14] H. Seifoddini and B. Tjahjana. "Part-Family Formation for Cellular Manufacturing: A Case Study at Harnischfeger". International Journal of Production Research, Vol. 37, No. 14, September 1999, pp. 3262-3273.

[15] C. T. Mosier. "An experiment investigating the application of clustering procedures and similarity coefficient to the GT machine cell formation problem". International Journal of Production Research, Vol. 27, October 1989, pp. 1811-1835.

[16] M. P. Chandrasekharan and R. Rajagopalan. "An ideal seed non-hierarchical clustering algorithm for cellular manufacturing". International Journal of Production Research. Vol. 24, No. 2, 1986, pp. 451-464.

[17] M. P. Chandrasekharan and R. Rajagopalan. "ZODIAC: An algorithm for concurrent formation of part families and machine cells". International Journal of Production Research, Vol. 25, No. 6, June 1987, pp. 835-850.

- [18] G. Srinivasa and T. Narendran. "GRAFICS – a non hierarchical clustering algorithm for group technology". *International Journal of Production Research*, Vol. 29, No. 3, March 1991, pp. 463-478.
- [19] P. H. Waghodekar and S. Sahu. "Machine-component cell formation in group technology: MACE". *International Journal of Production Research*, Vol. 22, No. 6 November 1984, pp. 937-948.
- [20] Group Technology with Flow Shop Cells. Available: <http://web.dia.uniroma3.it/ricerca/rapporti/rt/1998-33.pdf> . [citado 20 de septiembre de 2007].
- [21] Approaches to the General Cell Formation Problem. Available: <https://dspace.lboro.ac.uk/dspace/handle/2134/2027> . [citado 20 de septiembre de 2007].
- [22] An Integrated Formulation of Manufacturing Cell Formation with Capacity Planning and Multiple Routings. Available: <http://www.acsu.buffalo.edu/~nagi/pubs/annor.pdf> . [20 de septiembre de 2007].
- [23] C. Dimopoulos. "Explicit consideration of multiple objectives in cellular manufacturing". *Engineering Optimization*. Vol. 39, No. 5, July 2007, pp. 551-565.
- [24] Y. B. Moon and S. C. CHI. "Generalized Part Family Formation Using Neural Network Techniques". *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 11, No. 3, January 1992, pp. 149-159.
- [25] S. C. Chi and S. Y. Liu. "A Flexible Neural Network Approach for Machine Cell Formation". *IEEE*, 0-7803-2559-1, 1995, pp. 2064-2069.
- [26] Z. Yang. *Analysis and Design of Cellular Manufacturing Systems: Machine-Part Cell Formation and Operation Allocation* . [PhD Thesis]. Cleveland, United States. Case Western Reserve University, 1995.
- [27] N. C. Suresh, J. Slomp and S. Kaparthi. "Sequence-dependent clustering of parts and machines: a Fuzzy ART neural network approach". *International Journal of Production Research*. Vol. 37, No. 12, August 1999, pp. 2793-2816.
- [28] C. C. Tsai, C. H. Chu and T. A. Barta. "Modelling and analysis of manufacturing cell formation problem with fuzzy mixed-integer programming". *IIE Transactions*, Vol. 29, July 1997, pp. 533-547.
- [29] A new fuzzy-c-means and assignment-technique-based cell formation algorithm to perform part-type-clusters and machine-type-clusters. Available: <http://public.rz.fh-wolfenbuettel.de/~hoeppnef/bib/paper/Susanto-PPC-10-4.pdf> . [citado 20 de septiembre de 2007]
- [30] J. Li, C. Chu, Y. Wang and W. Yan. "An Improved Fuzzy C-Means Algorithm for Manufacturing Cell Formation". *IEEE* 0-7803-7280-8, 2002, pp. 1505-1510.
- [31] S. Lee and H. P. Wang. "Manufacturing cell formation: A dual-objective simulated annealing approach". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 7, October 1992, pp.: 314-320.
- [32] A Comparison of Heuristic Methods for Solving a Cellular Manufacturing Model in a Dynamic Environment. Available: http://www.wlv.ac.uk/PDF/uwbs_04%20WP007-04%20Ahmed%20et%20al.pdf . [citado 20 de septiembre de 2007]
- [33] C. H. Chu and C. C. Tsai. "A Heuristic Genetic Algorithm for Grouping Manufacturing Cells". *IEEE*, 0-7803-6657-3, 2001, pp. 310-317.
- [34] C. Dimopoulos and A. Zalzalá. "Optimization of Cell Configuration and Comparisons using Evolutionary Computation Approaches". *IEEE* 0-7803-4869-9, 1998, pp. 148-153.
- [35] N. Morad and A. Zalzalá. "Formulations for Cellular Manufacturing and Batch Scheduling Using Genetic Algorithms". *UKACC International Conference on CONTROL*, Conference Publication, No. 427, 1996, pp. 473- 478.
- [36] A. J. Vakharia and Y. L. Chang. "Cell formation in group technology: a combinatorial search approach". *International Journal of Production Research*. Vol. 35, No. 7, July 1997, pp. 2025-2043.
- [37] Gomez S, Cervantes M, Ortiz N. *Formulación y Evaluación de un modelo heurístico para el diseño de sistemas de manufactura celular mediante la implementación de algoritmos genéticos*. [Trabajo de Grado]. Bucaramanga, Colombia, Universidad Industrial de Santander. 2007.