

## OPTIMIZACIÓN DEL MANEJO DE MATERIALES EN UNA EMPRESA FABRICANTE DE CREMAS DENTALES MEDIANTE MÉTODOS EVOLUTIVOS

### Resumen / Abstract

Se presenta un algoritmo evolutivo utilizado para ubicar seis materiales distintos en seis tanques que alimentan dos líneas de producción en una empresa fabricante de cremas dentales. Trabajos previos han demostrado que los algoritmos evolutivos son una herramienta eficiente para la búsqueda y selección de buenas soluciones, en un tiempo de computación aceptable. El algoritmo desarrollado proporciona la mejor localización de los materiales en los tanques, minimizando costos de manejo de materiales y tiempo en la preparación de las líneas para producir cada lote. Así mismo, se pudo comprobar convergencia y robustez del algoritmo ante varios conjuntos de parámetros.

*This work presents an evolutionary algorithm used for locating six different materials in six tanks that serve a production line in a Tooth Paste Factory. Previous works have shown that the evolutionary algorithms are an efficient tool to be used on searching and selection of good solutions in an acceptable computing time. The proposed algorithm produces a set of several layouts of materials to tanks, which minimizes material handling costs and production line setup time for producing batches. Finally, it was shown the algorithm robustness to its parameters changes and its excellent convergence to better solutions.*

### Palabras clave / Key words

Manejo de materiales, localización de facilidades, algoritmo evolutivo

*Material handling, facility layout, evolutionary algorithms.*

## INTRODUCCIÓN

El manejo de materiales es una operación que está presente en todas las fases de producción, en la adquisición y almacenamiento de las materias primas, durante el proceso de transformación, y en el suministro de los productos terminados a los clientes, a través de los distintos canales de distribución. Este tipo de actividad, no agrega valor al producto y genera costos importantes dentro de cualquier organización, los esfuerzos que conscientemente se realicen en pro de su disminución y de la racionalización de los recursos empleados en ella, serán recompensados con un importante aumento de la productividad de la empresa. Dicho manejo, es un elemento a considerar dentro de cualquier proyecto de mejora industrial que se adelante, puesto que los costos de dicho manejo comprenden entre el 30 y el 75 % de los costos totales de manufactura,<sup>1</sup> por lo que una buena solución al problema de manejo de materiales contribuye a la eficiencia total de las operaciones; una pobre distribución puede conducir a la acumulación de inventario de producto en proceso, sobrecarga de los sistemas de manejo de materiales, puestas a punto ineficientes y largas colas.<sup>2</sup>

Cuando se habla de almacenamiento ya sea de materia prima, materiales en proceso o producto terminado, es necesario determinar: el espacio que requiere cada material para su resguardo, las condiciones de seguridad que ellos requieren, los equipos que se usarán para su traslado y cuál es

---

**Ninoska Maneiro Malavé:** Licenciada en Matemáticas, Máster en Matemáticas, Candidata a Doctora en Ingeniería Industrial, Escuela de Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela  
e-mail: nmaneiro@uc.edu.ve

**Ruth Yllada García:** Ingeniera industrial, Máster en Ingeniería, Escuela de Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela  
e-mail: ryllada@uc.edu.cu

Recibido: Enero del 2005

Aprobado: Marzo del 2005

la mejor localización de cada uno. En lo que respecta a este último aspecto, se estaría en presencia de una clase de problemas que se caracteriza por un espacio de soluciones que crece en forma combinatoria a medida que aumenta el número de ítems o materiales a ubicar, por lo que se hace necesario la utilización de técnicas heurísticas de búsqueda que suministren resultados satisfactorios, de calidad y a menor costo computacional.

Los algoritmos evolutivos forman parte de la familia de heurísticas denominada **métodos evolutivos** y han venido incrementando su popularidad como método de solución de difíciles problemas combinatorios, ya que constituyen una poderosa herramienta de búsqueda de soluciones para toda clase de problemas de optimización. Gracias a sus fortalezas se han encontrado aplicaciones en prácticamente todas las áreas de la ingeniería industrial donde se necesite optimizar funciones.<sup>3</sup>

El presente trabajo muestra una aplicación de un algoritmo evolutivo en una fábrica de cremas dentales, específicamente en el área de almacenamiento de materiales en proceso, en el que se van a localizar seis materiales en sus respectivos tanques, a fin de minimizar el recorrido de las tuberías provenientes de ellos hacia las respectivas líneas de llenado. Los resultados obtenidos demuestran la validez del enfoque evolutivo para la solución de esta clase de problemas, brindando múltiples alternativas de solución entre las cuales el analista podrá hacer una mejor selección de acuerdo con los criterios de mayor importancia para la empresa.

## DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

### Y SU PROBLEMÁTICA

La empresa investigada produce crema dental en diferentes presentaciones y fórmulas, producto de consumo masivo que se utiliza para la higiene y salud bucal. En el proceso de producción, el material más importante es la mezcla (monofluorofosfato de sodio, base, sacarina de sodio, laurel sulfato de sodio, dodecibenceno sulfonato de sodio, parabenos y otros), y esta varía según requerimientos de la marca que se fabricará. En el caso de estudio, se incluyen cuatro marcas cuyos volúmenes de producción se presentan en la tabla 1.

TABLA 1 Volúmenes de producción por marca		
Marca	Mezcla	Producción (%)
A	I	48
B	II	25
	III	
C	IV	16
D	V	11
	VI	

La producción se inicia en el proceso de mezclado (ubicado en la mezzanina), desde el cual se alimentan a los seis tanques de almacenamiento y alimentación de las dos líneas de llenado-empacado existentes. Ambas líneas ( $L_1$  y  $L_2$ ) están automatizadas, y pueden llenar, estuchar y empacar el producto, que luego será paletizado manualmente al final de las mismas. En la figura 1 se esquematiza la ubicación de los equipos y tanques con respecto a las líneas.

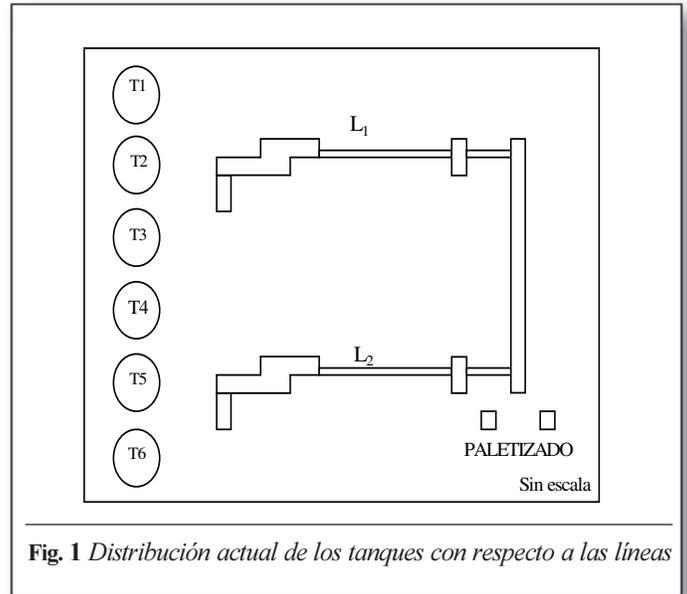


Fig. 1 Distribución actual de los tanques con respecto a las líneas

Tal y como se mencionó anteriormente, existen seis tanques en donde se almacenan seis mezclas base que se utilizan en la fabricación de cuatro marcas de producto. Estos tanques deben ser higienizados cada siete días, independientemente si se va a mantener o no la misma mezcla dentro de él, puesto que es un requerimiento establecido por las normas de higiene y calidad que debe tener el producto final.

En el proceso, tal como se realiza en la actualidad, cada mezcla es depositada en un tanque sin ninguna normalización, para luego realizar las conexiones a través de tuberías que conducen a los diferentes materiales hacia las dos líneas de producción, todo esto de acuerdo con el plan de producción que se consigne.

### MODELO MATEMÁTICO DEL PROBLEMA

En esta investigación, se usa el concepto de **facilidad**, como cualquier recurso físico necesario para que un individuo, ente u organización satisfaga una necesidad y el problema básico es la asignación de dichos recursos en determinados lugares, de manera de garantizar el mínimo costo.<sup>4</sup> El problema de localización, aquí abordado, pertenece a la clase de problemas combinatorios conocida como QAP (*Quadratic Assignment Problem*) y su objetivo es encontrar la asignación óptima de  $N$  facilidades (materiales) a  $N$  sitios, con el fin de disminuir el costo total de manejo de materiales, expresado como el producto del flujo de materiales y la distancia recorrida.

Un problema cuadrático de asignación de facilidades (QAP) puede ser formulado como se muestra a continuación:

$$x_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{si el material } i \text{ es asignado al sitio } k \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad \dots (1)$$

y sea  $d_{ikjh}$ , la distancia entre las facilidades  $i$  y  $j$  localizadas en los sitios  $k$  y  $h$ , respectivamente, entonces el modelo general del QAP puede plantearse como sigue:

$$\min f(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{h=1}^n d_{ikjh} x_{ik} x_{jh} \text{ sujeto a}$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ik} = 1, \quad k = 1, \dots, n \quad \dots (2)$$

$$\sum_{k=1}^n x_{ik} = 1, \quad i = 1, \dots, n \quad x_{ik} = 0, 1 \text{ para todo } i, k$$

Los problemas cuadráticos de asignación de facilidades cubren una extensa clase de problemas, en asignaciones de áreas iguales o diferentes para las correspondientes facilidades,<sup>5</sup> problemas de asignación en líneas y transporte,<sup>6</sup> de allí que pueda utilizarse como modelo de resolución del problema de manejo de materiales considerado, ya que es necesario identificar la mejor localización de seis materiales dentro de seis tanques a fin de minimizar una función dada.

## ALGORITMOS EVOLUTIVOS

El término **algoritmos evolutivos** realmente engloba una serie de técnicas inspiradas biológicamente, por lo que se suele usar un vocabulario biológico para describirlos. Estos métodos se basan en generar, seleccionar, combinar y reemplazar un conjunto de soluciones, a diferencia de los métodos clásicos de mejora basados en seguimiento de trayectorias, en cada iteración del algoritmo no se tiene una única solución sino un conjunto de estas.<sup>7</sup>

Más formalmente, un algoritmo evolutivo es un proceso estocástico e iterativo que opera sobre un conjunto  $P$  de individuos (población), generado aleatoriamente, cada uno de los cuales contiene uno o más cromosomas que representan soluciones al problema considerado. Cada uno de los individuos de la población recibe, a través de una función de adecuación o aptitud, una medida de su bondad con respecto al problema que se desea resolver, que es empleado por el algoritmo para guiar la búsqueda.

Resumiendo, puede decirse que el algoritmo está estructurado en tres fases principales que se ejecutan de manera circular: selección, reproducción y reemplazo, las cuales se llevan a cabo de manera repetitiva. Cada una de las iteraciones del algoritmo se denomina **ciclo reproductivo básico o generación**, realizándose

este proceso hasta que se alcance un determinado criterio de terminación, en este caso, un número determinado de iteraciones o generaciones.<sup>8</sup>

Los algoritmos evolutivos han venido incrementando su popularidad como método de solución de difíciles problemas combinatorios, ya que constituyen una poderosa herramienta de búsqueda de soluciones para toda clase de problemas de optimización. Gracias a esto se han encontrado aplicaciones en prácticamente todas las áreas de la ingeniería industrial donde se necesite optimizar funciones.<sup>9</sup>

## APLICACIÓN EN EL PROBLEMA SELECCIONADO

### • Representación

Para representar los individuos de la población, se utilizaron permutaciones de seis elementos, donde cada una de las coordenadas representa la ubicación de un material en el tanque correspondiente. Sin embargo, el resultado final es mostrado al analista en forma matricial, análoga a la distribución real en planta.

### • Operadores evolutivos empleados

**Cruce:** Se utilizó el clásico operador de **cruce de un punto** (*one-point crossover* o *single-point crossover*) donde se escogen dos individuos (padres) a ser cruzados, seleccionándose una posición interior de las cadenas y se intercambian los segmentos de ambas cadenas a la izquierda de las mismas, obteniéndose como resultado dos nuevos individuos.

**Mutación:** Se empleó el operador de mutación por intercambio entre dos elementos, que consiste en la selección aleatoria de dos elementos del individuo a ser mutado, e intercambiar las posiciones respectivas de dichos elementos.

Estos operadores fueron acompañados de una estrategia elitista que preservó el mejor individuo de cada generación para las generaciones siguientes, siendo este reemplazado solo cuando el proceso evolutivo de cómo resultado un mejor individuo.

### • Matrices requeridas

Para la aplicación del algoritmo, es necesario recoger toda la información del proceso, el producto, los materiales, los equipos, y el flujo o cantidad de material que viaja a través de las tuberías desde los tanques a las líneas. Esta es plasmada en cinco matrices que el algoritmo necesita para su correcto funcionamiento:

### • Matriz entrada

Esta **matriz**  $n \times 1$  contiene las probabilidades de cruce y mutación, el número de generaciones, y el número de individuos por cada generación. Para este problema se escogieron los siguientes valores de los parámetros evolutivos, como valores iniciales para este tipo de estudio sobre la base de estudios previos:<sup>9-11</sup>

Probabilidad de cruce = 0,85

Probabilidad de mutación = 0,25

Número de generaciones = 2 000

Número de individuos por generación = 60

Número de corridas = 20

**Matriz localidad**

Con ella se informa dónde se encuentran las localizaciones (Ver tabla 2.) La nomenclatura utilizada es la siguiente:

(-1): localidades, ocupadas o no, en la que la asignación de otra facilidad es imposible.

(-2,-3,...): localidad asignada a una facilidad previamente establecida, inamovible y que tiene relación directa con el proceso estudiado. En este caso, corresponden a las dos líneas de llenado.

(1,2,...): los números enteros positivos distintos de cero, se utilizan para indicar las posibles localizaciones de los seis materiales a ubicar.

TABLA 2 Matriz localidad		
1	-1	-1
2	-1	-2
3	-1	-1
4	-1	-1
5	-1	-3
6	-1	-1

**Matriz de flujo**

Aquí que se establece la cantidad de litros por hora, viajes por día, bolívars por metro, o cualquier otra unidad que permita medir un mismo patrón, el flujo de materiales hacia las líneas. Esta matriz de 6 \* 2, indica la cantidad de flujo de materiales que se dirigen a las dos líneas (destino). (Ver tabla 3.)

TABLA 3 Matriz flujo		
	L1	L2
I	48	0
II	13	12
III	13	12
IV	6	10
V	0	11
VI	0	11

**Matriz requerimiento**

Está compuesta por tres columnas, la primera identifica numéricamente los tanques o posibles localidades, en la segunda se coloca el número de localidades asignadas a cada mezcla, y en la tercera se acumula esta cantidad. En este caso, se asigna un solo tanque a cada mezcla, puesto que esos son sus requerimientos (tabla 4)

TABLA 4 Matriz requerimiento		
1	1	1
2	1	2
3	1	3
4	1	4
5	1	5
6	1	6

**Matriz distancia**

En esta se registra la longitud que existe entre las diferentes localidades posibles (tanques) para ubicar las mezclas y las líneas de producción. En este caso la matriz distancia ha sido simplificada, usando un paso equivalente a 3,5 m y se ha construido usando distancias rectilíneas, de centro a centro. (Ver tabla 5.)

Tabla 5 Matriz distancia		
	L1	L2
T1	3	6
T2	2	5
T3	3	4
T4	4	3
T5	5	2
T6	6	3

Una vez introducidas las matrices solo resta ejecutar el algoritmo para analizar la solución que este arroje, mostrando la distribución recomendada y el valor de la función objetivo.

**Especificaciones del algoritmo utilizado**

El algoritmo fue diseñado en C++, y para las corridas se utilizó un equipo Pentium IV 700Mhz, 256 MB de memoria RAM.

**RESULTADOS**

A continuación se presenta el análisis de los resultados obtenidos, un breve estudio de su convergencia y pruebas del algoritmo para diversos conjuntos de parámetros evolutivos.

Tras el análisis de las veinte corridas del algoritmo se obtuvieron 4 localizaciones diferentes, todas con la mejor solución. Es decir, existen cuatro formas de localizar las mezclas en los seis tanques, para un mismo valor mínimo de la función objetivo que es igual a 403, tal como se muestra en la figura 2.

Cualquiera de estas soluciones proporciona el mínimo costo de manejo de materiales, menor tramo de tubería para el transporte de las mezclas hasta las líneas, menor tiempo de puesta a

punto, es decir, menor consumo de tiempo en la preparación de las líneas para producir cada lote de crema dental y como consecuencia mayor tiempo productivo de las líneas.

Así mismo, el uso del algoritmo permitirá a la empresa evaluar periódicamente, cuál es la mejor localización de las mezclas en función de las variaciones de la demanda y por ende de la planificación de la producción, adaptando el proceso continuamente y extrayendo el máximo provecho de la condición obligada de higienizar los tanques que sirven de depósito a las mezclas. De esta forma, las mezclas serán localizadas de mejor forma posible, garantizando adaptación y menor costo de manejo, constantemente. Para ello, únicamente sería necesario cambiar los valores de la matriz flujo con la nueva planificación de la producción, y ejecutar el algoritmo evolutivo diseñado, obteniendo rápidamente la nueva solución para cada fluctuación de la de la demanda. Este beneficio debe ser visto en forma sistémica, por el impacto que esta mejor distribución hace a su vez sobre la planificación de la producción, al dar respuesta más rápidamente ante bruscos cambios en la demanda.

### ANÁLISIS DEL ALGORITMO

Cuando se diseña un algoritmo evolutivo para un determinado problema es siempre importante estudiar la convergencia del mismo en la búsqueda de la solución a través de las generaciones; para ello se hizo un análisis con respecto al número de generaciones a evolucionar, los valores probabilidad de cruce y mutación, y la convergencia del mejor individuo de cada generación. Se tomó como parámetro fijo el tamaño de la población, siendo esta de 60 individuos.

La tabla 7 muestra los resultados obtenidos para 2 000 generaciones y algunos valores de cruce y mutación, graficados has-

ta la generación 100, alcanzando todas el valor mínimo 403 y manteniéndose dicho valor hasta terminar la evolución. Esto puede deberse fundamentalmente al tamaño del problema, y como dicho comportamiento se mantuvo para todas las combinaciones de parámetros, se decidió que para el resto de las pruebas podían utilizarse solo 100 generaciones, lo que disminuye además el costo computacional. La gráfica también muestra la convergencia del algoritmo al mejor valor, independientemente de la combinación cruce/mutación utilizada.

En cuanto a los parámetros cruce/mutación, se hicieron 20 corridas de 100 generaciones cada una, para cada una de las combinaciones dadas en la tabla 6.

La figura 3 muestra la convergencia del algoritmo en dos corridas diferentes, para la combinación de cruce y mutación escogida como la mejor. La elección en este caso se basó en la convergencia más rápida del algoritmo hacia la solución, pues cualquiera de las combinaciones estudiadas dio como resultado el valor 403, por lo que realmente no podría hablarse de superioridad de una combinación con respecto a la otra. La combinación cruce/mutación 0,5-0,2 proporcionó corridas donde ya en la tercera generación se había alcanzado el óptimo y la peor corrida en la generación 97, lo que indica además que el algoritmo continúa en la búsqueda del mejor valor hasta las últimas generaciones.

En ambas gráficas, (figuras 3 y 4) puede observarse también la convergencia del algoritmo en el descenso brusco de las curvas a medida que avanza el número de generaciones, mostrando su comportamiento evolutivo al producir cada vez mejores **más aptos** individuos e independientemente de cuán alto sea el valor inicial del mejor individuo. También se observan en las gráficas como la diferencia entre soluciones de las corridas es muy pequeña, lo que da una medida de la robustez del algoritmo .

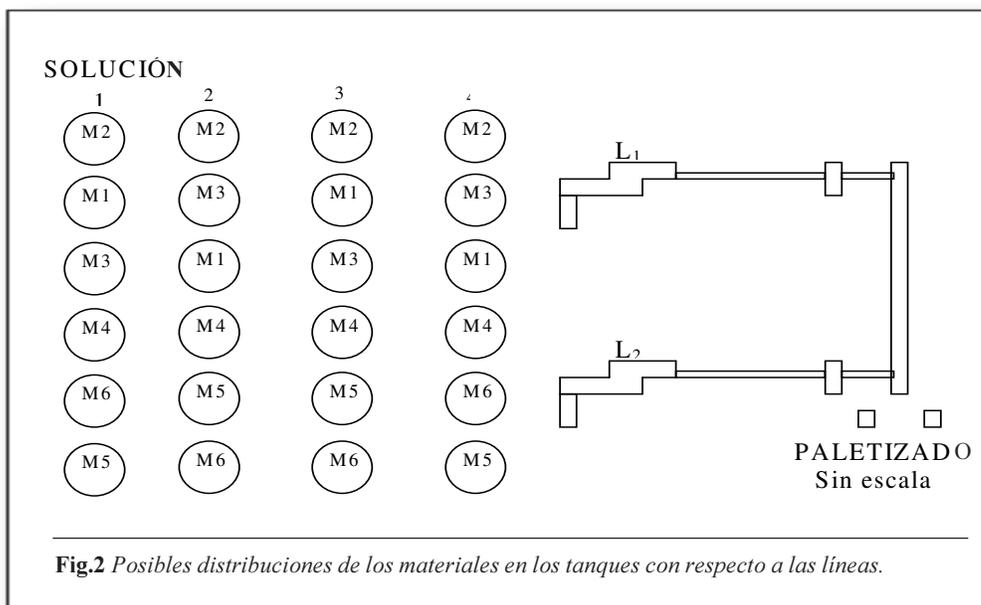
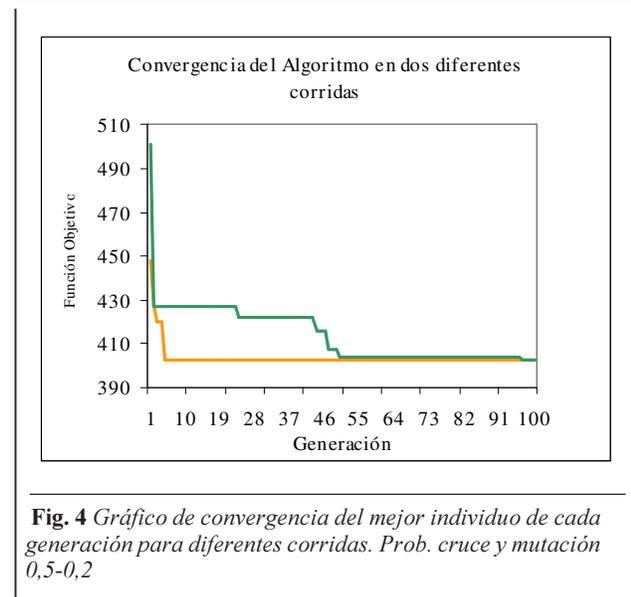
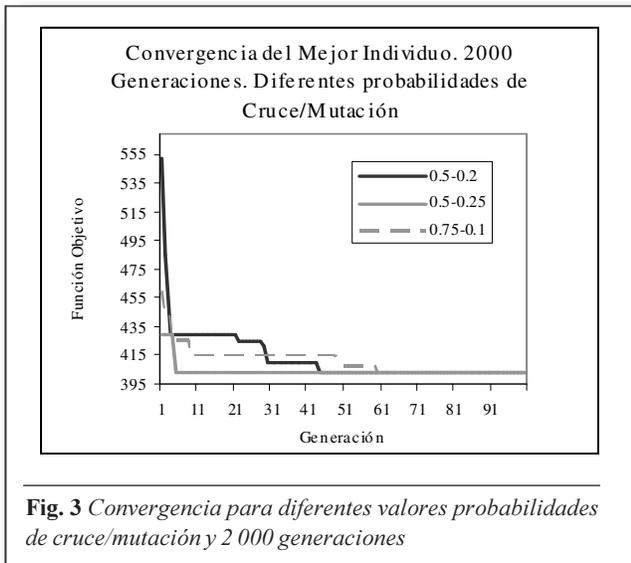


Fig.2 Posibles distribuciones de los materiales en los tanques con respecto a las líneas.

Tabla 6 Combinaciones de parámetros cruce-mutación utilizado	
Probabilidad de cruce	Probabilidad de mutación
0,5	0,25
0,5	0,2
0,85	0,25
0,75	0,1



## CONCLUSIONES

En este estudio, se encontró la mejor solución al problema de **manejo de materiales** en una empresa fabricante de cremas dentales, demostrándose además que la metodología evolutiva es válida y eficaz para la solución de problemas industriales reales. Las 4 soluciones obtenidas proporcionan al analista múltiples alternativas entre las cuales decidir la más conveniente, de acuerdo con criterios económicos, técnicos o de espacio físico.

La principal ventaja del uso del algoritmo es que puede tratar fácilmente problemas de mayor tamaño, considerando un número mayor de tanques que suministren material, o líneas adicionales, sin hacer más cambios que la adición de los valores en las matrices correspondientes.

Los algoritmos evolutivos requieren de un cuidadoso estudio del problema investigado y, en muchos casos, del diseño o combi-

naciones de operadores adaptados al problema, que hagan aún más efectivos sus resultados. Además, requiere de una estrategia elitista para asegurar la convergencia del algoritmo hacia el óptimo.

Se demostró con un problema real que la clase QAP funciona mejor con probabilidades de cruce y mutación consideradas altas para otros problemas (Véanse ejemplos en las referencias 6 y 9). Esto concuerda con los resultados de investigaciones previas en problemas teóricos y prácticos,<sup>10-12</sup> que demostraron que dichos valores eran apropiados para el QAP.

La convergencia del algoritmo hacia la solución es excelente en todos los casos, entre corridas y para diferentes combinaciones de parámetros, lo que demuestra excelente desempeño en la búsqueda del óptimo, y a un bajo costo computacional.

## REFERENCIAS

1. **CHIANG, W. C. AND C. CHIANG:** "Intelligent Local Search Strategies for Solving Facility Layout Problems with the Quadratic Assignment Problem Formulation", *European Journal of Operational Research*, 106, pp. 457-48, 1998.
2. **JAJODIA, S et al.:** "Computerized Layout Solutions Using Simulated Annealing", *European Journal of Operational Research* 30, 1992.
3. **ALANDER, JARMO:** *An Indexed Bibliography of Genetic Algorithms in Manufacturing*, Department of Information Technology and Production Economics, University of Vaasa, Report Series No. 94-1-MANU, Finlandia, 1995.
4. **FRANCIS, RICHARD L. ANDA, JOHN WHITE:** *Facility Layout and Location*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1974.
5. **KOCHHAR, S.; B. FOSTER, AND S. HERAGU:** Hope: "A Genetic Algorithm for the Unequal Area Facility Layout Problem". *Computers Ops Res.* Elsevier Science Ltd. Vol. 25, No. 7/8, pp. 583-594, 1998.
6. **GEN, MITSUO AND RUNWEI CHEN:** *Genetic Algorithm and Engineering Optimization*, Wiley, USA, 2000.
7. **CALEGARI, PATRICE:** "Parallelization of Population-Based Evolutionary Algorithms for Combinatorial Optimization Problems". PhD Thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Francia, 1999.
8. **COELLO, CARLOS:** "Introducción a la Computación Evolutiva, (Notas de Curso)", CINVESTAV-IPN. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Sección de Computación, Instituto Politécnico Nacional, México, 2004.
9. **MANEIRO, NINOSKA:** "Algoritmo evolutivo para problemas unidimensionales para localización de máquinas. Caso de Estudio: El problema generalizado de flujo de líneas", Trabajo de Ascenso. Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, 2002.
10. **MANEIRO, NINOSKA AND JAQUELINE LOYO:** "Enfoque Evolutivo para problemas de localización de facilidades en líneas de ensamble con Backtracking". *Revista Ingeniería UC*, Vol.6, N0. 2, pp. 60-69, Agosto, 2003.
11. **TATE, D. AND A. SMITH:** "A Genetic Approach to the Quadratic Assignment Problem", *Computers & Operations Research* Vol. 22, (1), pp. 73-83, Volume 22, 1995.
13. **YLLADA, RUTH; NINOSKA MANEIRO Y ISAAC, CIRA:** "Técnicas evolutivas para la localización de facilidades en una empresa productora de envases de aluminio", *Revista Ingeniería UC*, Vol.6, No. 2, pp. 70-78, Agosto 2003,