

MÉTODO DE COLONIA DE HORMIGAS PARA EL CORTE DE PIEZAS EN CHAPAS

(Ant Colony method for cutting sheet metal parts)

Arlys M. LASTRE ALEAGA

Facultad de Ciencias de la Ingeniería e Industrias-Universidad Tecnológica Equinoccial.
Santo Domingo de los Tsáchilas, CP- 230107/Ecuador. arlys.lastre@ute.edu.ec

Leonardo L. LORENTE LEYVA

Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas - Universidad Técnica del Norte.
Ibarra, CP- 230107/Ecuador. lllorente@utn.edu.ec

Alexis CORDOVÉS GARCÍA

Facultad de Ciencias de la Ingeniería e Industrias-Universidad Tecnológica Equinoccial.
Santo Domingo de los Tsáchilas, CP- 230107/Ecuador. alexis.cordoves@ute.edu.ec

RESUMEN

El presente trabajo comprende la concepción, desarrollo y la implementación de un procedimiento con el empleo del Método de Colonia de Hormigas para el corte de piezas en chapas, que concilia las restricciones del proceso tecnológico empleado y garantiza la obtención de soluciones con la menor trayectoria de corte. La concepción general del sistema propuesto fue implementada en la práctica durante la operación de una máquina de corte por plasma Merlin 6000GST. Como resultado práctico, se ha obtenido una aplicación soportada sobre AutoCAD, y desarrollada en lenguaje de programación AutoLISP y Opendcl, la cual se integra a un sistema CAD/CAPP obteniéndose una herramienta para la generación de trayectorias para el corte de piezas en chapas.

Palabras Claves: Trayectorias de corte; chapas; colonia de hormigas; CAD/CAPP/CAM..

1. INTRODUCCIÓN

El empleo de las técnicas informáticas y el desarrollo de la electrónica han tenido un gran impacto dentro de los procesos de manufactura, actualmente se emplean en una amplia gama de aplicaciones que incluyen el control y la optimización de los procesos, manejo de materiales, ensamblaje, pruebas de los productos y numerosas actividades administrativas. La búsqueda de un método o procedimiento que garantice la generación de buenas trayectorias de corte, a partir de soluciones de ordenamiento, las cuales obedezcan al mejor aprovechamiento de la materia prima, es actualmente uno de los puntos de mayor atención para los sectores involucrados principalmente para el *nesting*, dada la importancia que enmarca la conciliación de estos objetivos, unido al de ofrecer una o más soluciones en el menor tiempo posible. [3].

El uso y desarrollo de métodos o técnicas heurísticas, como algoritmos genéticos, redes neuronales, han sido principalmente los que han abordado de mejor manera este tema, a razón de

contar con los nuevos y continuos avances de la informática como base fundamental para su funcionamiento en general.

De esta forma surge como **problema de investigación**: El alto consumo de recursos y del tiempo empleado durante el corte de piezas en chapas.

Como **hipótesis** de la investigación se plantea que: El análisis de la distribución de las piezas, de las restricciones o condiciones tecnológicas para su corte, y el empleo del método de colonia de hormigas, permitirá la generación de la trayectoria de corte que asegure la disminución del consumo de recursos y el tiempo empleados para la fabricación de piezas en chapas.

De esta manera el **objetivo general** de la investigación consiste en: Desarrollar un procedimiento integrado a un sistema CAD/CAPP, que permita la generación de la trayectoria de corte para la fabricación de piezas en chapas y garantice el menor consumo de recursos y tiempo de manufactura.

Para trabajar con una aplicación CAD/CAM destinada a la generación automática de trayectorias de corte 2D, requiere conocer las problemáticas que presentan los procesos de corte a emplear [1]. Por otro lado, los problemas aportados por la experiencia de los especialistas, y relativos a temas técnicos como el control de los parámetros tecnológicos (espesor, velocidad) de cada proceso, influyen decisivamente a la hora de generar las trayectorias de corte [2].

Fueron analizadas las características principales de los sistemas CAD/CAPP/CAM destinados a la automatización del proceso de corte en el sector industrial, dentro de los cuales se encuentran: Packopt; Optimizer Anyshape; Corte Certo; Lantek Expert Cut; Optimumcut-1D; MODCOR TOP; AutoForm-Nest; Nest Master; TurboNest. [3]

Del análisis realizado del estado de desarrollo de los sistemas CAD/CAPP/CAM para la distribución y corte de piezas en chapas, se pueden resumir las siguientes insuficiencias [4]:

- Gran parte de los sistemas estudiados no generan trayectorias de corte de forma automática.
- Los sistemas que generan trayectorias de corte de manera automática no consideran las restricciones tecnológicas propias del proceso empleado.

La integración de los sistemas CAD/CAPP/CAM encargados de la distribución y corte de piezas en chapas, obedece al sistema de dirección y planificación de mayor envergadura para la manufactura de las piezas que han de ser distribuidas en chapas y cortadas [5] [6]. La tarea de planeación del proceso de fabricación se subordina, al diseño del producto que debe fabricarse. Esta subordinación obedece necesariamente a los principios de organización de la estructura centralizada, pues se requiere fabricar exactamente la pieza que fue diseñada. El sistema CAPP es el encargado de generar las diferentes opciones de tecnologías de producción en las máquinas de corte, en calidad de propuestas al sistema de dirección de la producción del taller CAP, como se muestra en la *Figura 1*.

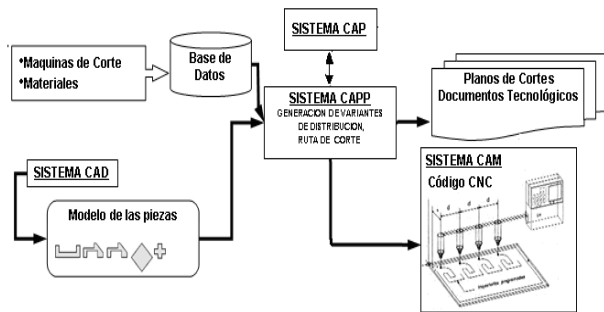


Figura 1. Esquema del sistema de dirección de mayor envergadura donde se ubica la distribución y corte de piezas.

Las propuestas de tecnologías de corte en cada máquina tienen que estar necesariamente asociadas a la secuencia de producción seleccionada por el sistema de dirección de la producción CAP para cada período de tiempo establecido [3].

La ejecución de las tareas productivas se debe realizar mediante la transferencia de información directiva desde el sistema CAPP al sistema CAM de cada máquina de corte del taller.

2. LA GENERACIÓN DE TRAYECTORIAS DE CORTE DE PIEZAS EN CHAPAS

Las variables de coordinación para el corte de piezas en chapas están constituidas por los planos de las piezas con sus restricciones constructivas, los requisitos relacionados con los volúmenes de producción y disponibilidad de materia prima asociada al lote de producción, los tiempos de entrega, disponibilidad del equipamiento tecnológico, secuencia que se seguirá en el taller, entre otras [5].

Así, entre las **variables de coordinación** más importantes se encuentran:

- Configuración geométrica y especificaciones técnicas de cada una de las piezas que deben ser producidas en un período.
- Materia prima (recursos para el corte) que se utilizará para garantizar los volúmenes de producción.
- Tecnología de corte que se empleará: **Tc**
- Disponibilidad de máquinas de corte de acuerdo a la tecnología: **Dmt,m**

A partir de entrevistas efectuadas a numerosos especialistas vinculados a la producción y del estudio de la literatura especializada [3] [4] en el proceso de corte de piezas en chapas, predominan en calidad de **indicadores de eficiencia** para la generación de opciones de solución los siguientes:

- Mínima trayectoria del útil de corte, determinada por el recorrido para cada chapa, de cada lote en cada máquina del taller y para cada opción de distribución, y que asegure el cumplimiento de las restricciones impuestas por la tecnología de corte empleada: **Dhc**
- Máxima “satisfacción” del fabricante por la solución propuesta, o al incluir la introducción de posibles ajustes a la misma.
- Máxima “satisfacción” de las restricciones impuestas por las variables de coordinación.

Del estudio realizado al proceso de generación de la trayectoria de corte, se consideran como **variables de decisión**:

- La ubicación por coordenadas de cada punto que describe el contorno de la pieza en relación con otras piezas **DespX, DespY**

Entre las **variables intermedias** de cálculo más importantes se destacan:

- Tiempo de recorrido del útil según los parámetros tecnológicos utilizados: **Tr**
- Consumo de recursos durante el corte: **Crt**
- Presencia de bucle en las esquinas pronunciadas: **Pbes**
- Perímetro de trayectoria de corte del útil: **Ptc**

Entre los **datos de entrada** más importantes se destacan:

- Parámetros de corte según la tecnología: **Pct,m**
- Materiales disponibles para el corte y sus propiedades: **MDisp, Pmat**
- Conjunto de datos tecnológicos determinados por la tecnología empleada, entre los que se encuentra la distancia pieza-pieza: **Dispp**
- Ubicación de piezas en cavidades: **UCav**
- Compensación del útil de corte: **CHerr**
- Sentido del corte: **Scor**
- Gasto horario de recurso tecnológico: **Grt**
- Tipo de entrada y salida del útil de corte: **Tent, Tsal**
- Uso de puentes para el corte de piezas contiguas: **Ppza**
- Tipo de trayectoria (corte libre o barrido en un eje): **Ttray**

La minimización del recorrido del útil, a partir de las distribuciones previamente generadas, se puede expresar a través del modelo matemático conceptual de búsqueda de solución: Ec (1).

$$\text{Min } \{Z(u, x_n) / g_s(u, x_s) \geq 0\} \quad (1)$$

Donde, las restricciones $g_s(u, x_s) \geq 0$, responden a la obligatoriedad de realizar trayectorias factibles entre los nodos de cambio contorno – contorno y las restricciones tecnológicas mencionadas anteriormente.

Para determinar el recorrido del útil de corte es necesario considerar los perímetros de las piezas distribuidas previamente sobre la chapa (**Pzi**) y los desplazamientos del útil de corte de una pieza a otra (**Pvi,i+1**), ya sea en actividad de corte o con un movimiento rápido de la misma. La trayectoria del útil de corte, como se expresa en 2.1, es la suma de las magnitudes **T1** Ec (3) y **T2** Ec (4) respectivamente, las que toman en cuenta los valores de **Pzi**, **Pvi,i+1** y **Pzrh**.

La magnitud **T1**, expresada en Ec (3), es la suma de los perímetros de las diferentes piezas para cortar y considera las

zonas o aristas en contacto entre dos o más piezas. Las aristas comunes entre piezas presuponen un perímetro de coincidencia (Pzr_h), el cual no se considera si el útil de corte no garantiza que se obtengan las piezas con la calidad de fabricación requerida a ambos lados del eje central de corte. Para una distribución de piezas dada se tiene un valor determinado de T_1 . Una mala planificación de la secuencia de corte implica desplazamientos innecesarios del útil, lo cual aumenta el valor T_2 . De esta manera aumenta la trayectoria final del útil de corte y a su vez el consumo de los recursos según la tecnología utilizada [3] [5].

$$D_{hc} = T_1 + T_2 \quad (2)$$

$$T_1 = \sum_{i=1}^n Pz_i - \sum_{h=1}^p Pzr_h \quad (3)$$

$$T_2 = \sum_{i=1}^{i=n-1} P_{v_{i,i+1}} \quad (4)$$

Donde:

- Pz_i : Perímetro de la pieza.
 $P_{v_{i,i+1}}$: Perímetro de la distancia entre piezas.
 Pzr_h : Perímetro de aristas comunes entre piezas

Así, la función de minimización del recorrido del útil Ec (5), se puede expresar de una manera más precisa al minimizar la magnitud de D_{hc} Ec (2).

$$Z = [Min] D_{hc} \quad (5)$$

3. MÉTODO DE COLONIA DE HORMIGAS PARA LA GENERACIÓN DE TRAYECTORIAS DE CORTE

Los algoritmos de optimización basados en colonias de hormigas son procesos iterativos, en cada iteración de búsqueda de trayectorias se "lanza" una colonia de m hormigas y cada una de las hormigas de la colonia construye una solución al problema. Estas construyen las soluciones de manera probabilística, guiándose por un rastro de feromona artificial y por una información calculada a priori de manera heurística [7].

Para generar las trayectorias de corte a partir de un conjunto C de n piezas distribuidas en una chapa, las hormigas tienen como restricción que solo pueden recorrer las piezas del conjunto una sola vez en cada iteración, con el objetivo de encontrar la longitud mínima de recorrido entre estas piezas distribuidas. De esta manera la cantidad de hormigas artificiales $CantH$ utilizadas se determinan por la expresión siguiente:

$$MaxCantH = \sum_{i=0}^{n-1} C_i \quad (6)$$

Cada hormiga elige en forma probabilística la próxima pieza a visitar, realizando un cálculo de probabilidad p_{ij}^k está en función de la distancia y la cantidad de feromona depositada en

la trayectoria que une a las piezas origen i con las piezas destino j , esto está dado por:

$$p_{ij}^k = \frac{[\tau_{ij}]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_j [\tau_{ij}]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta} ; \text{ si } j \notin L_{istpirecor} \quad (7)$$

Donde:

α : parámetro que expresa la importancia relativa del sendero de feromonas.

β : parámetro que expresa la importancia relativa de la distancia entre las piezas.

Un alto valor de α significa que el sendero de feromonas es muy importante y que las hormigas tienden a elegir caminos por los cuales otras hormigas ya pasaron. Si por el contrario, el valor de β es muy alto, las hormigas tienden a elegir la pieza más cercana.

$\tau(i, j)$ Especifica la intensidad del rastro de las feromonas en la trayectoria (i, j) , y se actualiza según:

$$\tau(i, j) = \rho \cdot \tau_{ij} + \Delta \tau_{ij} \quad (8)$$

Donde:

ρ : es el coeficiente de persistencia de las feromonas ($0 \leq \rho \leq 1$).

De forma tal que $(1 - \rho)$ representa la evaporación de la feromona para el recorrido (i, j) , mientras que la cantidad de feromona depositada en una trayectoria (i, j) , está dada por:

$$\Delta \tau_{ij} = \sum_{k=1}^{MaxCantH} \Delta \tau_{ij}^k \quad (9)$$

Donde:

$\Delta \tau_{ij}$: representa la cantidad de feromona depositada en el recorrido (i, j) por la hormiga k .

Para satisfacer la restricción de que cada hormiga recorra cada pieza una sola vez, se asocia a cada hormiga k una estructura de datos denominada lista de piezas recorridas ($L_{istpirecor}$) en la cual se almacenan las piezas recorridas por cada hormiga. Mientras no hayan completado la ruta, las hormigas seguirán eligiendo piezas hasta llenar su lista $L_{istpirecor}$.

Una vez que todas las hormigas han completado sus recorridos se procede a actualizar la matriz de feromonas con las ecuaciones antes descritas, para ello se debe calcular la longitud de la trayectoria realizada por cada hormiga. Tras la actualización de la feromona puede comenzarse una nueva iteración, así el resultado final es la mejor solución encontrada a lo largo de todas las iteraciones realizadas. Esta solución, será la mínima distancia entre todas las piezas del conjunto, y representa la trayectoria a seguir por el útil de corte para fabricar el conjunto de piezas.

En la Figura 2 se muestra el esquema del algoritmo del procedimiento expuesto. Este comienza su evolución al recibir de forma manual o de un sistema CAD/CAPP las distribuciones y coordenadas de las piezas a cortar en la chapa, además del modo de generación de la trayectoria, el punto de inicio para el corte definidos por el tecnólogo del taller y los valores de los coeficientes que representan la importancia y evaporación del rastro de la feromona, y la distancias entre las piezas.

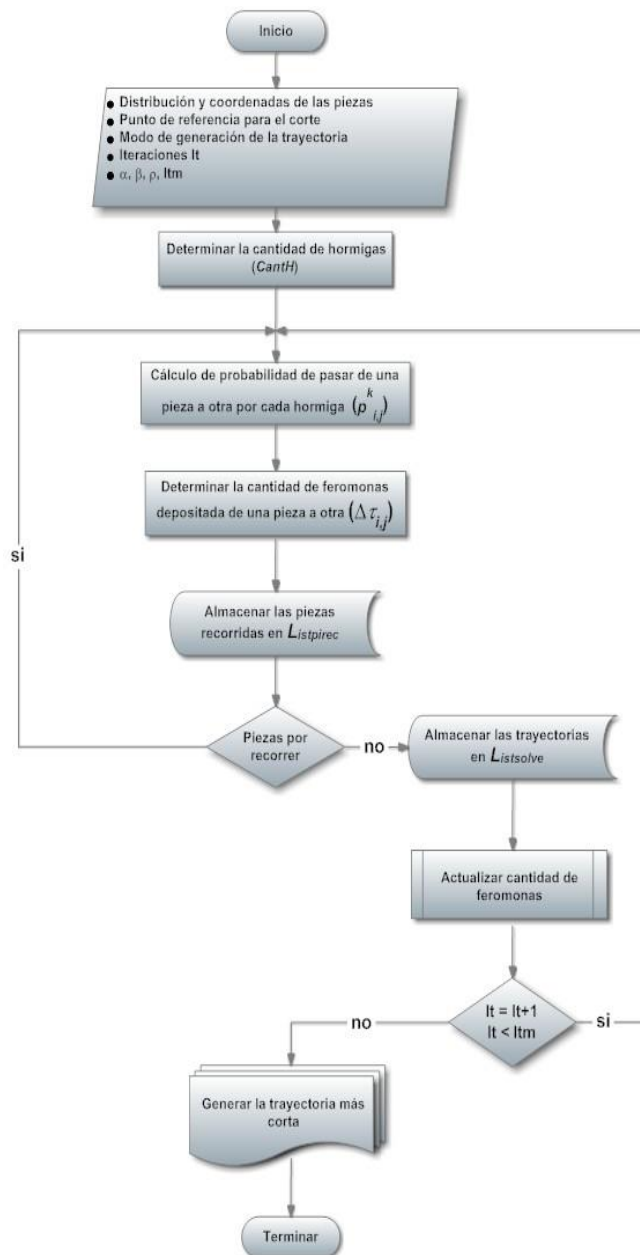


Figura 2. Esquema del algoritmo del método de colonia de hormigas para la generación de trayectorias de corte.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la comparación del Algoritmo de Colonia de Hormigas (ACO) y el Algoritmo de Vecindad (AV) para la cantidad de piezas analizadas. Los algoritmos fueron diseñados en el lenguaje de programación AutoLISP y las pruebas se desarrollaron en PC con sistema operativo Windows 8.0, procesador Intel I5 2.00 GHz y 2 GB de memoria RAM. Se considera que el sistema al ejecutarse no demanda más memoria que la disponible en la PC y por lo tanto no se requirió mejorar la configuración de Hardware.

Los resultados obtenidos del Algoritmo de Vecindad más cercana fueron tomados para la comparación de investigaciones realizadas. Este fue seleccionado ya que se dispone de la información necesaria y está implementado en iguales

condiciones y plataforma que el ACO propuesto para la generación de las trayectorias de corte. El mismo será insertado en el sistema general para el corte de piezas en chapas DIPRONEST, en el cual está implementado el AV. A partir de la comparación con este procedimiento se obtendrán los valores de mejora de las soluciones alcanzadas por el método propuesto.

Los parámetros que se utilizaron en el ACO para las corridas son los siguientes:

- Coeficiente de persistencia de las feromonas (ρ): 0,7
- Importancia relativa del sendero de feromonas (α): 0,5
- Importancia relativa de la distancias entre piezas (β): 0,5
- Número de Iteraciones del Algoritmo: 200

Para las corridas se analizaron 10 distribuciones de piezas, a partir de estas se ejecutaron los algoritmos y se obtuvieron los mejores valores de perímetro de cada distribución.

Tabla 1. Ejemplos corridos con el Método de Colonia de Hormigas.

Ejemplos corridos con Colonia de Hormigas		
	Perímetro (mm)	Cantidad Piezas (u)
Eje 1	124091,00	120
Eje 2	30284,00	18
Eje 3	64280,60	36
Eje 4	36722,90	26
Eje 5	74537,00	52
Eje 6	150762,00	104
Eje 7	35384,70	19
Eje 8	71018,30	38
Eje 9	69845,10	44
Eje 10	138565,00	88

Tabla 2. Ejemplos corridos con el Método de Teoría de Vecindad.

Ejemplos corridos con Teoría de Vecindad		
	Perímetro (mm)	Cantidad Piezas (u)
Eje 1	134848,00	120
Eje 2	30813,70	18
Eje 3	64761,60	36
Eje 4	37385,40	26
Eje 5	76360,20	52
Eje 6	153879,00	104
Eje 7	36398,20	19
Eje 8	73026,40	38
Eje 9	70978,80	44
Eje 10	141987,00	88

En la *Figura 3* se muestra la comparación de los resultados obtenidos por ambos algoritmos y las mejoras en la obtención y disminución de los perímetros de las trayectorias de corte generadas. Además en la *Figura 4* se demuestra que al aumentar el número de piezas analizadas la calidad de las soluciones aumentan y se obtienen mejores resultados con el ACO.

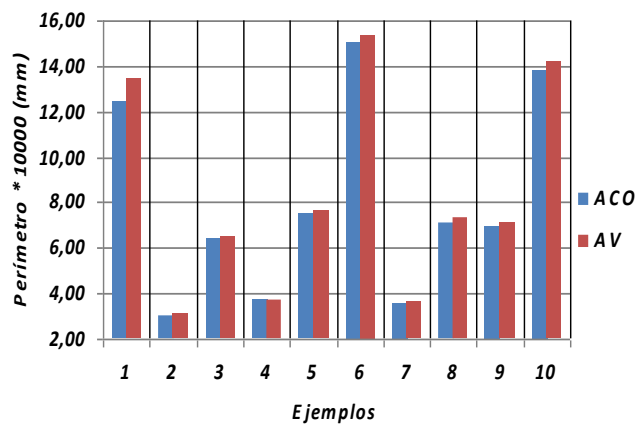


Figura 3. Comparación de los Algoritmos de Colonia de Hormigas y de Vecindad.

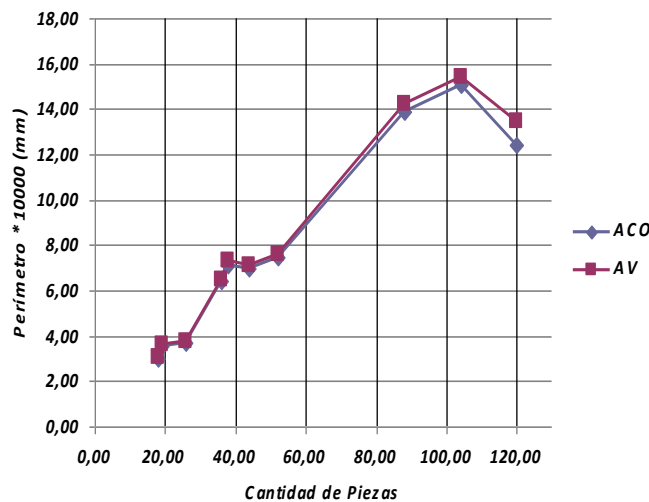


Figura 4. Comportamiento de los Algoritmos de Colonia de Hormigas y de Vecindad al aumentar la cantidad de piezas.

Estos resultados alcanzados representan cuantitativamente la disminución de los tiempos de manufactura y el consumo de recursos, durante el corte de las piezas distribuidas en la chapa y avalan la implementación del procedimiento propuesto. Dadas las características de los procedimientos desarrollados, la propuesta de concepción del sistema y las insuficiencias de los sistemas automatizados expuestas anteriormente, se hace necesario establecer una estructura para el desarrollo de un sistema computacional, encargado de automatizar el proceso de generación de la trayectoria de corte, según las condiciones tecnológicas empleadas.

El algoritmo general del sistema, comienza su tratamiento a través de la entrada de datos, los cuales pueden ser introducidos manualmente o de fuentes externas, como conjuntos de variantes de distribuciones provenientes de sistemas CAD/CAPP, donde se cumplan con los parámetros tecnológicos propios del proceso y se tengan en cuenta las características de la máquina de corte a emplear. Después de terminada la fase inicial, se selecciona el tratamiento de la chapa para garantizar la estabilidad de la misma durante la fijación en la máquina de corte, es decir si la trayectoria se generará con eje de barrido o libre. Para realizar el cálculo y generación de las trayectorias para el corte se ejecuta el Algoritmo de Colonia de Hormigas descrito anteriormente, las trayectorias de corte obtenidas

pueden ser modificadas manualmente por el tecnólogo, si así lo considera. Siempre se garantiza que el consumo de recursos y los tiempos de manufactura sean los menores posibles.

Para el diseño de esta interfaz de trabajo se ha utilizado el editor visual de diálogos OpenDCL Studio 6.0.0.23., el cual es un software libre concebido para la creación de interfaces para AutoCAD. Este sistema para la generación de trayectorias para el corte de piezas en chapas ha sido diseñado con el uso del lenguaje de programación AutoLISP, que constituye el lenguaje original de soporte en aplicaciones sobre AutoCAD (Autocad, 2016) [8].

La disponibilidad de que el proceso de preparación para la fabricación transcurra en el mismo sistema CAD, crea mejores condiciones para la integración de los datos de diseño con los de la preparación para la manufactura del producto, y permite el uso de un formato común para el tratamiento de la información gráfica. La posibilidad de usar el mismo ambiente de trabajo, facilita la interface de usuario y reduce el tiempo de aprendizaje para la utilización del sistema.

Como se muestra en la Figura 5, para realizar los cálculos correspondientes a la norma de tiempo, será necesario seleccionar en el cuadro de diálogo representado varios parámetros de primordial utilidad, como el material y espesor de la chapa a cortar, entre otros.

Pieza	Perímetro(mm)	Cant	Pt./Pieza
1	1700	10	17000
2	1800	5	9000
3	2050	4	8200
4	2670	7	18690
5	3000	2	6000
6	3550	4	14200

Figura 5. Diálogo para realizar el cálculo de la norma de tiempo.

En las Figura 6, se visualiza el diálogo para la configuración de los parámetros y restricciones que definen el campo de soluciones para el algoritmo de colonia de hormigas.

Figura 6. Dialogo de configuración del Algoritmo Colonia de Hormigas

En el cuadro de diálogo mostrado en la *Figura 7*, se representan las diferentes variantes propuestas por el sistema de distribución de piezas en chapas, descritas por el código que las identifica y el valor del por ciento de aprovechamiento de material de la chapa correspondiente a cada una de ellas.

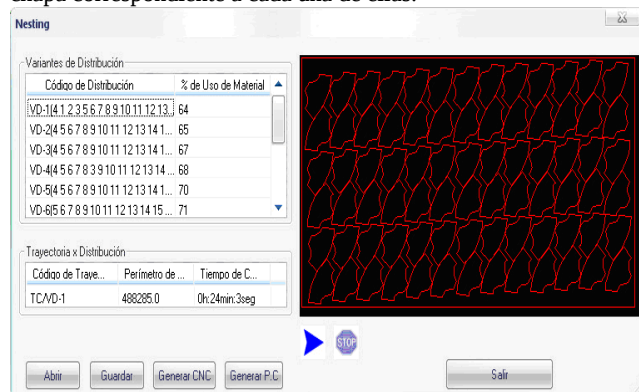


Figura 7. Diálogo para visualizar la generación de la trayectoria de corte por cada variante de distribución.

La *Figura 8* muestra un ejemplo del código CNC generado para una variante de corte seleccionada. Este diálogo permite además de la visualización del código, su almacenamiento o salva para ser ejecutado posteriormente y además se cuenta con la acción de ejecutar directamente el código generado para su fabricación en la máquina de corte, esta última variante dependerá de los protocolos de comunicación establecidos con el control numérico de la misma.

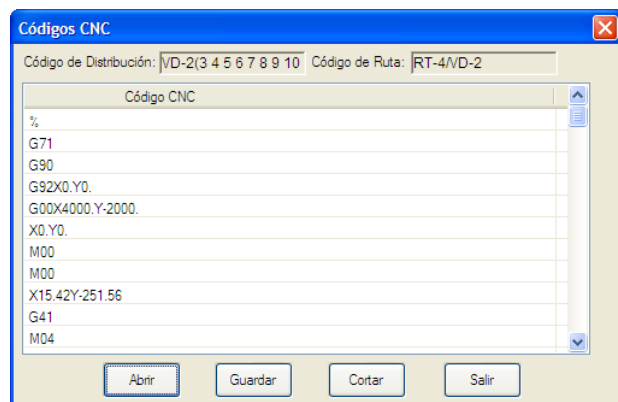


Figura 8. Diálogo que representa el código CNC generado.

En el caso de no contar con la tecnología CNC y el corte se realice de forma convencional, será necesario la generación de los patrones que definan la dirección y orden de los diferentes cortes a realizar por el operador. De esta manera se genera la información necesaria para el tecnólogo de taller, que le permitirá la ejecución de los planes de producción establecidos.

5. CONCLUSIONES

Luego del análisis, estudio y desarrollo de las diferentes etapas y tareas enmarcadas en la presente investigación, para la determinación de la trayectoria de corte que satisfaga las condiciones tecnológicas empleadas durante el corte de piezas en chapas, se pueden definir como conclusiones más significativas las siguientes:

1. Con el análisis de la evolución de los sistemas automatizados para la generación de trayectorias de corte y código CNC a partir de la distribución de piezas en superficies planas, se determinaron las vías para el perfeccionamiento de las principales insuficiencias presentadas en los mismos, lo que permitió la concepción de un sistema para una mejor solución de la tarea en estudio.
2. Se implementaron los procedimientos elaborados en un sistema CAD/CAPP para la distribución y corte de piezas en chapas.
3. El empleo del método de colonia de hormigas garantiza la generación de trayectorias de corte con menor recorrido del útil que el método de la teoría de vecindad, y logra un mejor desempeño en la medida en que aumentan las piezas consideradas en las distribuciones analizadas.

6. REFERENCIAS

- [1] Adamowicz, M., & Albano, A. Nesting two dimensional shapes in rectangular modules. *Computer Aided Design* 8 (1), 27–33.1976.
- [2] Baldacci, R., M. A. Boschetti. A cutting-plane approach for the two-dimensional orthogonal non-guillotine cutting problem. *European Journal of Operational Research*, Volume 183, Issue 3. 2007. 1136-1149.
- [3] Lastre, A. M. Optimización de la distribución y corte de piezas de forma geométrica irregular en chapas. Tesis en opción del grado científico de Doctor en Ciencias, CE CAD/CAM, Universidad de Holguín, Cuba. 2010.
- [4] Lorente L. “Sistema para la generación de trayectorias de corte a partir de distribuciones de piezas en chapas con anidamiento bidimensional (Nesting)”. Tesis de Grado para obtener el título de Ingeniero Mecánico. CE-CAD/CAM, Universidad de Holguín, Cuba. 2009.
- [5] Arzola, J. *Análisis y Síntesis de Sistemas de Ingeniería*. ISBN-978-959-261-299-0. 2010.
- [6] Ávila, R. et. al. CAPP, Elemento de Integración entre el CAD y el CAM. CYTED. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. RIBAMEC. Red Iberoamericana de Automatización de los Procesos de Mecanizado. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia. 1998.
- [7] Dorigo, M., Stützle, T. “Ant Colony Optimization”, MIT Press. ISBN 0-262-04219-3, 2006.
- [8] Manual de AutoCAD, Referencias de programadores en AutoLISP, Autodesk; Inc. USA, 2016.