

**PROPUESTA DE MEJORAMIENTO PARA EL REPARTO DE COMBUSTIBLE DE
MAQUINARIA DE LAS AREAS DE CAMPO Y COSECHA EN UN INGENIO
AZUCARERO UNA APROXIMACIÓN A TRAVÉS DE UN ALGORITMO GENETICO**

Pedro Daniel Medina Varela

Profesor Asistente
Universidad Tecnológica de Pereira
pemedin@utp.edu.co

Fernando José Betancourt Cortez

Profesor Instructor
Universidad Antonio Nariño, Roldanillo
fbetancourt@uan.edu.co

Claudia Patricia Clavijo Rayo

Ingeniera Industrial
Universidad Antonio Nariño, Roldanillo
clapatry@hotmail.com

Héctor Arbey Segura Ruiz

Ingeniero Industrial
Universidad Antonio Nariño, Roldanillo
hectorarbey011726@hotmail.com

RESUMEN

En éste artículo se muestra una propuesta de mejoramiento de las rutas de los vehículos repartidores de combustible de un ingenio azucarero del Valle del Cauca, por medio de un modelo de Problema de Ruteo de Vehículos (VRP) con la variante de capacidad limitada, específicamente el Problema de Ruteo de Vehículos con Capacidad (CVRP). Se plantea un algoritmo de solución basado en la metaheurística de Algoritmo Genético, para ser evaluado en una función de optimización. Se explica su funcionamiento, codificación y se da una perspectiva de una solución del Problema de Ruteo de Vehículos con capacidad para obtener la mínima distancia recorrida de cada una de las rutas.

PALAVARAS CHAVE. Algoritmos genéticos, Metaheurísticas, Problema de ruteo de vehículos

Metaheurísticas (MH)

ABSTRACT

On this paper there is a proposal to improve programming of routes for vehicles fuel dealers of a sugar mill located at Cauca Valley, through a model of Vehicle Routing Problem (VRP) with the variant of limited capacity, specifically Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP). We propose a solution through an algorithm based on Genetic Algorithm metaheuristic evaluated in an optimization function. It explains how it works, coding, and there is a prospect of solving the Vehicle Routing Problem with ability to obtain the minimum distance on each route.

KEYWORDS. Genetic Algorithms, metaheuristics, Vehicle Routing Problem

Metaheuristics

1. Introducción

En la industria azucarera se utiliza gran cantidad de maquinaria agrícola para realizar las diferentes labores de suelos, riego, alce y transporte de la caña. El suministro de combustible es una actividad muy importante para garantizar un sistema organizado, controlado y eficiente a nivel de operación y costos para la empresa.

Se propone la aplicación de un algoritmo con el que se puede obtener la mínima distancia recorrida de los dos vehículos repartidores de combustible, desde el ingenio (depósito) hasta cada una de las áreas en donde se encuentran los equipos a atender. En el análisis de costos de operación de cada uno de los vehículos repartidores, los rubros con mayor costo están representados en el combustible y el mantenimiento.

En este trabajo se presenta el modelo del Problema de Ruteo de Vehículos con Capacidad (CVRP) aplicando el Algoritmo Genético para su solución. Según Goldberg (1989) los Algoritmos Genéticos son técnicas de búsqueda basadas en la mecánica de la selección natural y la genética introducidos por John Holland, en 1970.

La propuesta del Algoritmo Genético es buscar aleatoriamente las posibles soluciones y evaluarlas en la función de optimización, hasta encontrar el mejor fitness.

2. Definición del problema

2.1 Descripción del problema

En el ingenio azucarero donde se realizó el estudio, se tienen a disposición dos vehículos repartidores de combustible, cada uno con una capacidad limitada de 1.500 galones, que recorren un área aproximada de 21.400 hectáreas.

Cada vehículo está asignado y direccionado por un área operativa del ingenio. Un vehículo repartidor atiende la maquinaria que pertenece al área de campo, que es donde inician las labores de preparación de la tierra hasta la aplicación del madurante, que se realiza 60 días antes el corte. Este vehículo debe atender alrededor de 79 equipos como: Tractores de Oruga, Tractores Enllantados, Excavadoras de Oruga y Motobombas de Riego. El segundo vehículo repartidor atiende el área de Cosecha, que comprende las labores de corte, alce, y transporte de la caña desde los cultivos hasta los patios del ingenio. Este vehículo debe atender un total de 47 equipos, entre Tractores de Oruga, Alzadoras, Tractores Enllantados y Cosechadoras.

Al analizar los costos de operación de estos vehículos repartidores se encuentra que los más representativos son el combustible y el mantenimiento. Los cuales corresponden aproximadamente a un 73% y 81% de los costos para las áreas de campo y cosecha respectivamente.

Teniendo en cuenta la extensión de los terrenos donde se localiza la maquinaria a la que se le debe suministrar combustible y la ausencia de una ruta establecida para los dos vehículos repartidores de combustible, se ve la necesidad de implementar una ruta mejorada que permita mayor eficiencia y reducción de costos de operación de estos vehículos.

2.2 El modelo

El problema de ruteo de vehículos (Vehicle Routing Problem, VRP) surge como una generalización del problema clásico del Agente Viajero (Travelling Salesman Problem, TSP) en el que un vendedor tiene que recorrer una serie de clientes una sola vez, para luego volver al

lugar de partida. Dantzig y Ramser (1959), plantean que los primeros estudios de enrutamiento de vehículos se remontan al año 59, en este trabajo tratan un problema de despacho con camiones. En ellos se trata de averiguar las rutas de una flota de transporte para dar servicios a unos clientes, como lo describe la Figura 1.

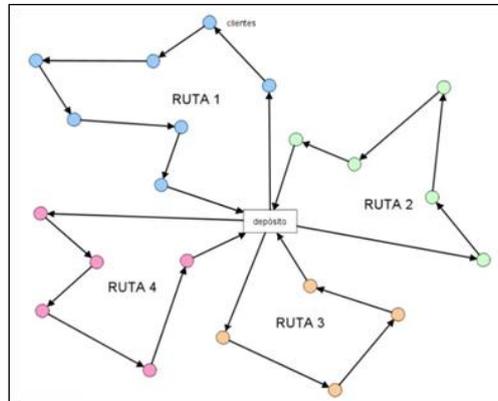


Figura 1. VRP Básico

Este tipo de problemas pertenece al campo de la optimización combinatoria. Las características de los clientes, depósitos y vehículos, así como diferentes restricciones operativas sobre las rutas, dan lugar a otras variantes del problema.

Una de estas variantes se refiere a la capacidad constante y limitada de los vehículos que deben distribuir los productos entre sus clientes de acuerdo a la demanda de cada uno de ellos. La demanda total para cada ruta no debe exceder la capacidad del vehículo. Este es el problema de ruteo de vehículos capacitados (Capacitated Vehicle Routing Problem, CVRP), Rodriguez (2007).

Rodriguez (2007), propone que el problema CVRP básico trata de determinar los recorridos de k vehículos de capacidad C_k , que partiendo de un origen común deben pasar por un conjunto de lugares de interés (clientes) para recoger o distribuir mercancías según una demanda d_i y volver de nuevo al origen, de manera que la distancia total recorrida (el coste o tiempo empleado) por el conjunto de vehículos sea mínima.

El modelo matemático para el problema CVRP es el siguiente, Rodriguez (2007) y Villareal, Delgado, Mendoza, Quintero y Serna (2010):

$$\text{Min} \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N \sum_{k=0}^M C_{ij} X_{ijk} \quad (1)$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$\sum_{k=1}^M \sum_{j=1}^N X_{ijk} \leq M \quad i=0 \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^M \sum_{j=0}^N X_{ijk} = 1 \quad \forall i \in [1, N] \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^N X_{ijk} = \sum_{i=1}^N X_{ijk} \quad \forall k \in \{1, M\}, \quad i=0 \quad (4)$$

$$\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N p_i x_{ijk} \leq P_k \quad \forall k \in \{1, M\} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \forall S \subseteq (V - \{0\}), \\ & |S| \geq 2, \\ & \sum_{\substack{i=1 \\ i \in S}} \sum_{\substack{j=1 \\ j \in S}} X_{ijk} \leq |S| - 1 \quad k \in \{1, M\} \\ & \forall i, j \in [1, N], \end{aligned} \quad (6)$$

$$X_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall k \in \{1, M\} \quad (7)$$

Dónde:

El modelo plantea que para un conjunto i, j de nodos del grafo, se expresa la función objetivo que intentará minimizar el coste total de todos los arcos recorridos en la solución.

C_{ij} costo asignado entre el arco i y el arco j .

X_{ijk} es la variable binaria que indica si el vehículo k recorrió la distancia entre el cliente i y el cliente j .

P_i es la variable que indica si la demanda de cada cliente será atendida por el vehículo k .

M capacidad de la flota de vehículos k .

P_k es la capacidad de los vehículos k .

S conjunto de clientes visitados.

V conjunto de nodos que representan las ciudades o clientes.

La restricción 2, indica que del nodo origen debe partir máximo M vehículos. Las restricciones 3 y 4, garantizan que cada nodo cliente sólo puede ser atendido por un vehículo (en el problema básico del CVRP). La restricción 5 de capacidad, indica que la demanda P_i atendida por el vehículo k no debe exceder su capacidad P_k . Las restricciones 6 y 7 de eliminación de sub-rutas y valores admisibles para las variables de decisión. El objetivo es encontrar la solución que minimice la distancia que recorren los vehículos cumpliendo las anteriores restricciones.

Entre los métodos metaheurísticos de solución de Problema de Ruteo de Vehículos Capacitados se encuentran, **Colonia de Hormigas (Ant Colony System ACS)** que estudia los sistemas artificiales de las hormigas, inspirados en la conducta colectiva de hormigas reales, para resolver problemas de optimización combinatoria, Almirón y Baran (2002). **Búsqueda Tabú (Tabu Search, ST)** técnica para resolver problemas combinatorios de gran dificultad que está basada en los principios generales de la Inteligencia Artificial, Cobos (2004). El último método y el escogido para éste trabajo corresponde a los **Algoritmos Genéticos (Genetic Algorithms, GA)** que son técnicas de búsqueda basadas en la mecánica de la selección natural y la genética Goldberg (1989).

3. Algoritmo Genético

Este tipo de algoritmo es usado para la resolución de problemas en donde el espacio de solución tiende a ser infinito. A grandes rasgos, el algoritmo genético busca aleatoriamente las posibles soluciones y las evalúa en una función de optimización. Si la solución hace que ésta función

disminuye, el algoritmo empieza a buscar en las zonas cercanas dicha solución, si por el contrario la solución propuesta hace que la función de optimización aumente, el algoritmo descarta dicha solución. Los pasos que se deben llevar a cabo en un algoritmo genético simple son, Gestal, Rivero , Rabuñal, Dorado y Pazos (2010) y Wang y Lu (2009):

Paso 1: Generar de forma aleatoria una población inicial n.

Paso 2: Evaluar cada uno de los individuos de la población, en la función de optimización para obtener su fitness.

Paso 3:

- Seleccionar las parejas de padres teniendo en cuenta la probabilidad de selección de cada uno de ellos. El número de parejas que se selecciona es igual al tamaño de la población dividido en dos.
- Cruzar los individuos de cada pareja, teniendo en cuenta la probabilidad de cruce. De cada cruce se obtienen dos hijos.
- Mutar los dos descendientes de cada pareja, con cierta probabilidad.
- Computar el fitness de los nuevos individuos.
- Formar la nueva generación con los nuevos individuos

Paso 4: Repetir el Paso 3 y generar una nueva población hasta que se cumpla el criterio de parada, por ejemplo: número máximo de generaciones.

La Figura 2 resume los anteriores pasos:

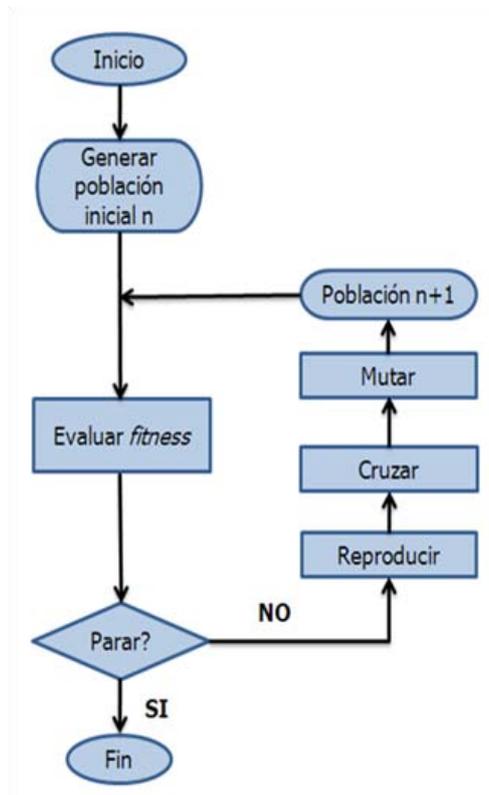


Figura 2. Funcionamiento Algoritmo Genético

3.1 Funcionamiento del Algoritmo Genético

Generación de La población inicial

Villareal, Delgado, Mendoza , Quintero y Serna (2010), argumentan que para la codificación del cromosoma se puede utilizar números enteros entre el 1 y el número de clientes n , cada uno de estos valores representan a los genes y el conjunto de estos valores es lo que se denomina cromosoma. Además que cada individuo está representado por un cromosoma y un conjunto de individuos forman una población. Teniendo en cuenta que la población inicial se genera de forma aleatoria.

Evaluación de individuos en la función de optimización

A cada individuo o cromosoma se le aplica la función de optimización y por medio de ésta función se le asigna un número real que se denomina el fitness del individuo.

Selección de padres por el método de la ruleta

Gestal, Rivero , Rabuñal, Dorado y Pazos (2010), describen que el método de la ruleta consiste en asignar la mayor probabilidad de selección a los individuos con mayor valor de fitness. Se escogen dos números aleatorios entre el intervalo $[0...1]$ que van a indicar qué padres son los escogidos, teniendo en cuenta que los mejores tienen la mayor probabilidad de ser seleccionados.

Cruce de los padres seleccionados

Para la forma básica se establece una probabilidad de cruce comprendida entre 0,5 y 1.0 que indica el porcentaje de cromosomas a ser cruzados. Se genera un número aleatorio con rango $[1, \text{tamaño del cromosoma}]$ para determinar si los padres se cruzan, Marulanda y Gamboa (2010). Los descendientes heredan genes de cada uno de los padres, como se muestra en la Figura 3 que tiene una probabilidad de cruce de 0,8 y punto de cruce: 5. Cuando no se presenta cruce, los hijos son el duplicado de los padres, Villareal, Delgado, Mendoza, Quintero y Serna (2010).

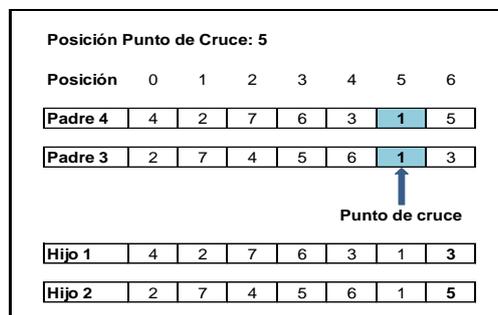


Figura 3. Cruce de los padres

Reparación de los hijos

Cuando en los nuevos hijos no se cumple la restricción que un cliente debe ser visitado sólo una vez, se debe recurrir a la reparación, como se muestra en la Figura 4.

Posición	0	1	2	3	4	5	6
Hijo 1	6	7	2	5	7	6	4
Hijo 2	3	1	2	3	1	4	5

Primera Reparación

Posición	0	1	2	3	4	5	6
Hijo 1	6	7	2	5	1	6	4
Hijo 2	3	1	2	3	7	4	5

Segunda Reparación

Posición	0	1	2	3	4	5	6
Hijo 1	6	7	2	5	1	3	4
Hijo 2	3	1	2	6	7	4	5

Figura 4. Reparación de los hijos

Mutación de los nuevos hijos

Se compara con los procesos evolutivos naturales, cuando en ocasiones se pueden producir alteraciones que mejoran los genes de un individuo. No se dan con tanta regularidad y toman un tiempo considerable. Después de haber reparado los nuevos hijos, se realiza la mutación con una probabilidad muy baja, por lo general entre 0,5% y 2.0%, Gestal, Rivero, Rabuñal, Dorado y Pazos (2010).

4. Aplicación y resultados

En ésta sección se muestra un ejemplo de aplicación de la metodología del Problema de Ruteo de Vehículos Capacitados (CVRP) para determinar rutas mejoradas en la distribución de combustible en las áreas de Campo y Cosecha en el ingenio azucarero donde se realizó el estudio. Se definen como clientes a cada uno de los equipos o maquinaria que deben ser atendidas por los vehículos surtidores de combustible, con su correspondiente demanda en cada una de las áreas, como se muestra en la Tabla 1 y Tabla 2.

Tabla 1. Maquinaria Gerencia Campo.
Fuente: Departamento Ingeniería Ingenio.

Descripción del Equipo	Cantidad Equipos	Capacidad tanque
Tractores de oruga	5	110
Tractores enllantados	15	240
Excavadoras de oruga	5	120
Motobombas de riego	54	100
TOTALES	79	570

Tabla 2. Maquinaria Gerencia Cosecha.
Fuente: Departamento Ingeniería Ingenio

Descripción del Equipo	Cantidad Equipos	Capacidad tanque
Tractores de oruga	9	110
Alzadoras	12	110
Tractores enllantados	20	240
Cosechadoras	6	150
TOTALES	47	610

Estos equipos pueden estar dispuestos en cualquiera de las 297 áreas de trabajo dentro de los 16 municipios en los que tiene presencia este ingenio azucarero. Se tiene un depósito ubicado dentro de las instalaciones del ingenio y de dónde parten los vehículos surtidores de combustible. En la parte de vehículos, el ingenio azucarero cuenta con dos vehículos, cada uno con una capacidad de 1.500 galones de combustible (flota homogénea). Cada vehículo repartidor debe abastecer las diferentes áreas de trabajo donde se encuentran los grupos de máquinas. Estas áreas de trabajo están agrupadas en tres zonas: Norte, Centro y Sur. Para el funcionamiento del Algoritmo Genético se va a tomar la información de un subgrupo, correspondiente a ocho municipios y 28 áreas de trabajo, como se muestra en la Figura 5 y Tabla 3.

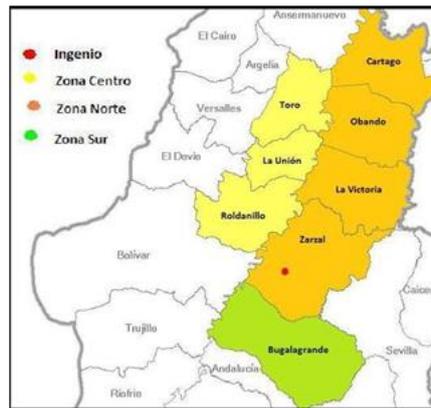


Figura 5. Zonas de Trabajo

La demanda de combustible corresponde a la sumatoria de equipos o maquinaria ubicada dentro de cada área de trabajo o cliente. Por ejemplo, en la zona Sur se ubica el área de trabajo denominada Guabito, en la que se encuentra la siguiente maquinaria: un Tractor Oruga con una demanda de combustible de 110 galones, dos Tractores Enllantados, cada uno con una capacidad de 240 galones de combustible, para una demanda total de 590 galones. La Tabla 3 muestra el consolidado de las 28 áreas de trabajo agrupadas en las tres zonas y consideradas como las más importantes, desde el punto de vista de la demanda que generan:

Tabla 3. Relación Área de Trabajo – Demanda

Zonas de trabajo	Nodo	Cientes	Demanda (gal)
S U R	1	Guabito	590
	2	Peralonso	1.330
	3	Media Luna	1.460
	4	Samaria	300
	5	Luserna	450
	6	Miraflores	980
	7	El Cedrito	1.010
	8	Charco de Oro	850
N O R T E	9	Tesorito	750
	10	El Placer	600
	11	Las Lajas	240
	12	La Cabaña	720
	13	La Glorieta	300
	14	La Mesa	900
	15	Gran Colombia	500
	16	Buenos Aires	300
	17	Manchuria	1.010
	18	La Siberia	800
C E N T R O	19	Izugu	300
	20	El Rodeo	120
	21	Iyoma	400
	22	San Jorge	350
	23	La Sofia	280
	24	Asturias	1.000
	25	Corcega	200
	26	Bola Roja	650
	27	La Punta	700
	28	La Enea	900

Se trabaja una matriz de distancias promedio dada en kilómetros entre el sitio de salida (nodo cero) y cada uno de los clientes y entre cada cliente, teniendo en cuenta que el Cliente 0 es el Ingenio Azucarero. Para resolver el modelo CVRP se utiliza el Algoritmo Genético, codificado en lenguaje Java, evaluado en un computador marca Compaq, Intel Celeron M Processor 420 (1,6 GHz, 1MB L2 cache, 533MHzFSB) memoria RAM de 512 MB y disco duro de 80GB. Se realizaron cinco corridas por cada combinación de datos con los siguientes parámetros que se muestran en la Tabla 4, identificando como “N” el Número de Individuos, con “n” el Número de Generaciones, la Probabilidad de Cruce como “Pc” y la Probabilidad de Mutación como “Pm”. Para todas las corridas se utilizan dos vehículos con capacidad de 1500 galones cada uno y asumiendo que las 28 áreas de trabajo deben ser atendidas. Los resultados se representan como “D” distancia en Km obtenida y el número de viajes como “V”, ver Tabla 4.

Tabla 4. Datos corridas

PARAMETROS		RESULTADOS CORRIDAS				
		1	2	3	4	5
1	N: 1000 n: 100 Pc: 0,8 Pm: 0,1	D: 1000	D: 999	D: 990	D: 986	D: 991
		V: 14	V: 14	V: 14	V: 14	V: 14
2	N: 1000 n: 1000 Pc: 0,8 Pm: 0,2	D: 953	D: 961	D: 970	D: 943	D: 964
		V: 14	V: 16	V: 14	V: 14	V: 14
3	N: 500 n: 500 Pc: 0,7 Pm: 0,025	D: 986	D: 978	D: 983	D: 951	D: 954
		V: 14	V: 14	V: 15	V: 14	V: 14

Los datos sombreados corresponden a los mejores resultados encontrados con cada una de las combinaciones de parámetros. En este ejercicio la mejor solución se obtuvo calculando el Algoritmo Genético con los parámetros 2, es decir con 1000 individuos, 1000 generaciones, 0,8 de probabilidad de cruce y 0,2 de probabilidad de mutación. La mejor distancia recorrida obtenida es de 943 Km, realizando 14 rutas entre los dos vehículos que conforman la flota, el tiempo de corrida del algoritmo fue de 8 segundos y corresponde a la ruta originada en la corrida No. 4: 12-11-27-18-6-7-23-28-25-22-21-17-3-24-20-19-13-8-16-2-5-26-4-15-14-9-10-1. Comparando este resultado de distancia recorrida con el dado en el parámetro 1, la mejora es de un 4,4% y con el parámetro 3 es de 0,84%. El número de rutas es igual para cada una de las mejores soluciones, dando como resultado 14 rutas entre los dos vehículos distribuidores de combustible. Con estos ejercicios se demuestra que el modelo CVRP puede permitirle al ingenio azucarero ser una empresa con ventaja competitiva al tener varias opciones y escoger la que más le favorezca y que cumpla el objetivo de encontrar el conjunto de rutas para cada vehículo minimizando el total de la distancia recorrida y el tiempo, satisfaciendo la restricción de operación como es la capacidad de los dos vehículos surtidores de combustible.

5. Conclusiones

Este trabajo muestra un estudio del ruteo de vehículos con limitaciones de capacidad (CVRP) se propone y se desarrolla un algoritmo de solución con un enfoque moderno mediante la utilización de algoritmos computacionales no convencionales, más concretamente, Algoritmos Genéticos y se parte de ahí para encontrar una solución al problema.

Mediante la aplicación del Algoritmo Genético, se puede obtener la mínima distancia recorrida de cada una de las rutas desde el depósito hacia cada uno de los clientes (la función objetivo del problema) valiéndose de la mejor combinación de parámetros que presenta la minimización de la función objetivo.

Esta disminución en la distancia recorrida de la ruta también genera la minimización de tiempos de operación y mejor utilización de los vehículos surtidores, lo cual se puede ver reflejado a nivel de los costos de operación de estos equipos, que van a cumplir su labor con menos consumo de combustible y menos horas de trabajo.

La aplicación del Algoritmo Genético permite generar mejoras paulatinas en la distancia total recorrida y número de rutas a utilizar, generando varios resultados como apoyo para la toma de decisiones de las gerencias encargadas de ésta operación en el Ingenio Azucarero.

6. Referencias

Almiron, M. y Baran, B. (2002), Colonia de Hormigas en un Ambiente Paralelo Asíncrono. Universidad Nacional de Asunción. <http://www.cnc.una.py/cms/invest/download.php?id=250344,48,1> [consultado 25 de Agosto de 2011].

Cobos, Z.N. (2004), Búsqueda Tabú para un problema de diseño de red multiproducto con capacidad finita en las aristas, <http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1020148412.PDF> [consultado 25 de Agosto de 2011].

Dantzig, G.B y Ramser, R.H. (1959), The Truck Dispatching Problem, *Management Science*, vol. 6, 80-91.

Gestal, M., Rivero, D., Rabuñal, R.H., Dorado, J. y Pazos, A. (2010), Introducción a los Algoritmos Genéticos y la Programación Genética, Depto. Tecnologías de la Información y las comunicaciones, Servicio de publicaciones Universidad de Coruña.

Goldberg, D.E. (1989), Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, *Addison- Wesley Publishing Company*, 412.

Marulanda, J y Gamboa J. (2010), Formulación de un Algoritmo Genético para el Problema de Programación de Órdenes de Trabajo de una Empresa de Artes Gráficas, Fundación Universitaria Konrad Lorenz, Santafé de Bogotá. http://www.konradlorenz.edu.co/images/investigaciones/matematicas/proyecto_de_grado_agl.pdf [consultado 6 de Mayo de 2012].

Miller, C., Tucker A. y Zemlin R. (1960), Integer programming formulations and traveling salesman problems, *Journal of the ACM*, 7, 326-329.

Rodriguez, A. (2007), Integración de un SIG con modelos de cálculo y optimización de rutas de vehículos CVRP y software de gestión de flotas, *Congreso de Ingeniería de Organización CIO 2007*, <http://www.adingor.es/Documentacion/RevistaInforme/REIN00001.pdf> [consultado 21 de Marzo de 2012].

Villareal, N., Delgado D, Mendoza A, Quintero A y Serna I. (2010), Algoritmos genéticos en la solución de problemas de ruteo de vehículos con capacidad CVRP, http://eecsgroup.com/DD_Publications_files/ARTICULO-AG-5CCC - Paola y Dario.pdf [consultado 10 de Septiembre de 2011].

Wang, C.H.y Lu, J.Z. (2009), A hybrid genetic algorithm that optimizes capacitated vehicle routing problems, *Expert Systems with Applications*. vol. 36, 2921-2936.,