

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE CONTADURIA PUBLICA
Y ADMINISTRACION

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



APLICACION DE UN ALGORITMO GENETICO
GENERACIONAL PARA UN PROBLEMA DE
LOGISTICA DE RUTEO CON ENTREGA Y
RECOLECCION DE PRODUCTO Y CON
VENTANAS DE HORARIO NEGOCIABLES.

Presentada por:

JESUS FABIAN LOPEZ PEREZ

Disertación enviada como requisito parcial para obtener el Grado de
DOCTOR EN FILOSOFIA CON ESPECIALIDAD
EN ADMINISTRACION

San Nicolás de los Garza, Nuevo León

MAYO 2004.

TD

Z7164

.C8

FCPYA

2004

.L6



1020146139

Los más grandes logros de la humanidad, no siempre se alcanzan con el consenso de todos.
Cristóbal Colón.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CONTADURÍA PÚBLICA Y ADMINISTRACIÓN

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



APLICACIÓN DE UN ALGORITMO GENÉTICO GENERACIONAL PARA UN PROBLEMA DE LOGÍSTICA DE RUTEO CON ENTREGA Y RECOLECCION DE PRODUCTO Y CON VENTANAS DE HORARIO NEGOCIABLES.

Presentada por:

JESÚS FABIÁN LÓPEZ PÉREZ

Disertación enviada como requisito parcial para obtener el Grado de DOCTOR EN FILOSOFÍA CON ESPECIALIDAD EN ADMINISTRACIÓN.

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, MAYO 2004.

© Copyright 2004. Todos los derechos reservados.

978 831

TD

Z 7164

.Cg

FCPYA

2004

.L6



FONDO
TBS191

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CONTADURÍA PÚBLICA Y ADMINISTRACIÓN

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

**APLICACIÓN DE UN ALGORITMO GENÉTICO GENERACIONAL PARA UN PROBLEMA
DE LOGÍSTICA DE RUTEO CON ENTREGA Y RECOLECCION DE PRODUCTO Y
CON VENTANAS DE HORARIO NEGOCIABLES**

Presentada por

JESÚS FABIÁN LÓPEZ PÉREZ

APROBADA POR LA COMISION DE TESIS

DR. CARLOS GÓMEZ DÍAZ DE LEÓN (PRESIDENTE)

**DR. MIGUEL ÁNGEL PALOMO GZZ
SECRETARIO**

**DR. GUSTAVO ALARCÓN MARTÍNEZ
PRIMER VOCAL**

**DR. JOSÉ LUIS ABREU QUINTERO
SEGUNDO VOCAL**

**DR. MOHAMMAD H. BADI ZABEH
TERCER VOCAL**

**DR. BERNARDO VILLARREAL CELESTINO
(PROFESOR VISITANTE DISTINGUIDO)**

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, Mayo, 2004

Cualquier cosa que hagas será insignificante, pero es muy importante que tú lo hagas.

Mahatma Gandhi

D). PREFACIO DE LA TESIS.

La Ciencia de la Administración puede ser definida como un conjunto de conocimientos y técnicas que se utilizan para llevar a un organismo al logro de sus objetivos mediante la racionalización de sus recursos de operación. El racionalismo de Descartes y Kant manifiesta que las percepciones que recibimos de nuestro contacto con el mundo son inexactas. En ese sentido, las matemáticas a través de la historia, han jugado un papel importante en el desarrollo de la civilización dándole significado y organización. El presente trabajo está íntimamente asociado a la disciplina de la Investigación de Operaciones. No obstante su principal objetivo es cerrar la brecha entre la teoría de la optimización matemática versus su aplicación práctica en el contexto de la Ciencia de la Administración.

Tradicionalmente los problemas de optimización cuantitativa en el ámbito académico de la logística han sido atendidos mediante métodos de solución exacta. No obstante, la aplicación práctica de estos métodos para administrar la entrega y recolección de productos en empresas de distribución, frecuentemente ha sido rebasada por las limitantes de tiempo para la toma de decisiones del administrador del ruteo. Lo anterior origina la necesidad de investigar nuevas alternativas.

Dos de las revoluciones científicas más importantes del siglo XX fueron la invención de la computación electrónica y el desarrollo de las leyes que gobiernan los sistemas biológicos. Las Ciencias Computacionales, han sido utilizadas como medio para modelar y/o simular el proceso de evolución en los sistemas biológicos. A dicha modelación se le ha denominado “Algoritmos Genéticos”. Los Algoritmos Genéticos han sido vistos como una meta-heurística de optimización para problemas combinatorios, que aunque no asegura la obtención de la solución óptima exacta, si consigue obtener soluciones de buena calidad en tiempos de ejecución computacionales razonables para su aplicación en la práctica. Un algoritmo genético puede ser visto a través de tres binomios:

1. Selección + Mutación: éste binomio es el encargado de desarrollar el proceso de escalamiento u exploración del espacio solución alrededor de la solución local. Mientras el proceso de mutación genera variantes en el vecindario de la solución actual, el proceso de selección acepta solo aquellos cambios que tengan un mejor desempeño. Esto es lo que en términos humanos

diríamos, el proceso de mejora continua. Aunque este proceso de experimentación alrededor de la solución actual provee medios para el mejoramiento, no obstante carece de la innovación para inteligentemente saltar hacia lugares más prometedores del espacio solución.

2. **Selección + Reproducción:** éste binomio es el encargado de desarrollar en el algoritmo genético el proceso de innovación a diferencia del anterior relacionado a la mejora continua. Para ello, se parte del fundamento de que de la unión de características genéticas de dos organismos promedio, se puede conformar uno nuevo con la expectativa de que sea aún mejor. La idea primordial aquí tiene que ver con la identificación de aquellos bloques de material genético que convergen en las mejores soluciones. Así entonces, el proceso de innovación consiste en el intercambio apropiado de bloques genéticos.
3. **Población + Selección:** en éste binomio, diríamos que la verdad y la sabiduría recae en el “vox-populi”. La población no es solamente el origen de donde se obtienen los mejores individuos, sino también la prueba decisiva para legitimar cuando un organismo es óptimo.

A través del tiempo, la selección natural ha generado una amplia gama de formas vivientes las cuales están diseñadas para desempeñar óptimamente ciertas tareas especializadas. El éxito de la evolución natural, al menos en nuestro planeta, es innegable y provee evidencia suficiente de viabilidad para su aplicación en problemas de optimización matemáticamente intratables.

El propósito de la presente investigación es desarrollar y proponer un algoritmo genético que permita resolver de una manera útil para su aplicación en la práctica, el problema denominado “Ruteo de distribución para un vehículo con entrega y recolección de producto con restricciones de ventana de horario negociables (SPDP-sTW)”. Para comprobar la eficacia de la propuesta algorítmica se implementará un diseño experimental el cual hará uso de las soluciones óptimas obtenidas mediante un algoritmo de ramificación y corte sin límite de tiempo. Adicionalmente se incluye un breve análisis económico en lo referente al costo-beneficio que resulta de la implementación de la propuesta. Finalmente se añade un estudio predictivo mediante el cual se identifica la forma en la cual cada uno de los parámetros del algoritmo genético contribuyen a su eficiencia durante la exploración del espacio solución.

II). FILOSOFÍA DE LOS ALGORITMOS GENÉTICOS.

El principal tema en la filosofía de los algoritmos genéticos es en lo referente a la fuente de la inteligencia. La inteligencia existe en los cerebros de los seres vivos, en mayor o menor medida. No obstante, la inteligencia no existe sola, sino de manera asociada a la realidad a través de las interacciones con el medio ambiente. En esta interacción es que se desarrolla la evolución. Dicha interacción en la evolución de las sociedades humanas, se presenta a través de la inteligencia propia del individuo y así como en el nivel cultural del ambiente en donde se desarrolla. El ambiente cultural de una sociedad, intrínsecamente provee nuevas formas de inteligencia a sus integrantes. *ducto científico*.

Independientemente de la inteligencia personal con que genéticamente haya sido dotado un individuo, éste puede nacer con o sin este ambiente cultural a su favor. No obstante, es razonable pensar que la cultura ayudará, ya sea a positiva o negativamente, a establecer los paradigmas del individuo ante su medio ambiente. En otras palabras, en la descendencia de un individuo no es decisivo su material genético, sino que también existen aspectos tales como la herencia económica, la educación y los valores que trasmite a sus hijos. No hay duda de que este tipo de herencia no es genética, sino más bien del orden cultural, la cual privilegia a sus descendientes sobre el resto de la población. Así entonces es fácilmente verificable que generar una población a través de una herencia o conocimiento previo es mucho mejor que hacerlo tan solo a partir de la aleatoriedad. Hacerlo del último modo, equivaldría a renegar de la cultura heredada de las generaciones anteriores.

Con el contexto anterior, damos finalmente pie a lo que denominamos “La peligrosa idea de Darwin”. Esta consiste en establecer que el origen del ser humano se debe tan solo a un proceso mecánico de selección, reproducción y mutación en el cual no existió la necesidad de un conocimiento o herencia divina para explicar el origen del hombre. ¿Podemos hacer que la dignidad y religiosidad de la vida humana se mantenga intacta de frente al Darwinismo?. La respuesta no es sencilla y cae en el ámbito de la metafísica. No obstante, no podemos descartar la existencia de un Dios todopoderoso que con su herencia y sabiduría haya bendecido a las primeras poblaciones humanas y que por ende el proceso natural de la evolución haya logrado hacer el resto de una manera más eficiente debido a lo primero.

III). AGRADECIMIENTOS.

Una tesis como la presente, solo es posible a través del apoyo y motivación de la gente que hace posible el desarrollo de la ciencia. En ese preciso sentido mi más sensible agradecimiento al Dr. José Barragán Codina y al Dr. Mohammed Badii, ambos responsables del programa doctoral y quienes con su labor diaria, han sembrado la semilla de la ciencia en todos nosotros. A la Lic. María Eugenia García, de quién recibí personalmente su ayuda durante el proceso administrativo de la presente tesis. De manera muy especial al MA Jorge Castillo Villarreal, quién como Director de la Facultad, facilitó en todo momento los medios y recursos para llegar a la presentación del siguiente producto científico.

Finalmente, mi agradecimiento a la compañía Embotelladoras ARCA SA de CV por el apoyo económico que recibí de parte de ellos; gracias por la oportunidad que me brindaron para este proyecto personal en el cual yo siempre procuré retribuirles al ser un mejor profesional en el área de la logística.

IV). RECONOCIMIENTOS.

Mi reconocimiento a todos los doctores que participaron durante los seminarios de mi formación doctoral. La mente brillante de todos ellos siempre me dio los elementos necesarios para mantenerme en la dirección correcta.

Un reconocimiento especial y muy merecido a los miembros del comité de tesis por sus valiosas aportaciones hacia el proyecto de investigación; cada uno apropiadamente en su área de especialidad ha dado lo mejor de sí para enriquecer el producto científico que aquí yo presento también en nombre de ellos.

Finalmente, al Dr. Carlos Gómez Díaz de León, por ser mi tutor, mi amigo y haberme mostrado el camino hacia una filosofía de la administración en un sentido mucho más humano y trascendental.

V). DEDICATORIA.

Quiero dedicar esta tesis a quiénes han sido mi fuente de fortaleza y esperanza:

- A Dios, por haberme dado la oportunidad de conocer su más grande misterio y aún después, seguir creyendo en él con una fe renovada.
- A mis padres, Don Fabián López Laurel y Doña María Judith Pérez Muñoz, por todos sus sacrificios y haberme enseñado el valor de la honestidad y la disciplina.
- A mis hermanos, José Felipe, Judith y Ruth, por su paciencia y apoyo moral durante todos estos años. A ellos les digo que el esfuerzo y la persistencia vale la pena.
- Al padre de mi esposa, Don Pablo Méndez Martínez quién ha sido para mi un ejemplo de trabajo constante y ayuda al prójimo en su labor en el Hospital Universitario.
- A mis dos hijos, David y Alejandra, por todo el tiempo que no pude estar con ustedes. Quiero decirles que lo más importante que deben aprender en la vida, es el saber encontrar su felicidad.
- Y finalmente a mi esposa Betty, la fuente de todas mis inspiraciones. Gracias a ti, por mostrar siempre interés en todas mis ideas y pacientemente motivarme para llegar al fin de este proyecto. Después de haber ido y regresado a través este viaje intelectual, el mejor método que tengo para explicarte lo que encontré, es con la sencillez de nuestro amor.

No se como el mundo me verá a algún día, pero yo solo me siento como un niño que juega en la playa del mar y que jugando, encuentra de vez en cuando un guijarro mas liso o una concha más bonita de lo normal, mientras que el océano de la verdad yace desconocido ante mis ojos.

Isaac Newton

INDICE GENERAL.

Prefacio y reconocimientos.....	(i-viii)
Glosario de Términos.....	2
Lista de Tablas.....	3
Lista de Figuras.....	5
Tabla de Contenido.....	7
Primera parte: Antecedentes del proyecto.	
1. Introducción a la investigación de operaciones y a la logística.....	12
2. El factor educativo en la aplicación de la investigación de operaciones.....	33
Segunda parte: Marco conceptual.	
3. Exposición de problemas generales en la logística.....	56
4. Fundamentos matemáticos para problemas de logística de ruteo.....	96
5. Fundamentos del algoritmo genético como meta-heurística propuesta.....	124
Tercera parte: Desarrollo del proyecto de investigación.	
6. Planteamiento del problema de investigación.....	158
7. Planteamiento de objetivos e hipótesis del proyecto de investigación.....	188
8. Diseño experimental.....	213
9. Resultados.....	246
10. Conclusiones.....	282
Anexos.....	288
Referencias Bibliográficas.....	323

Glosario de términos

APS: Advanced Planning Scheduling, Sistema de Planeación y Programación Avanzada

BC: Branch & Cut, Método de Ramificación y Corte

ERP: Enterprise Resource Planning, Sistema de Planeación de Recursos Empresariales

GA: Genetics Algorithms, Algoritmo Genético

INFORMS: International Federation of Operation Research and Management Science,

IP: Integer Programming, Programación Entera

LP: Linear Programming, Programación Lineal

MIP: Mixed Integer Programming, Programación Mixta Entera / Binaria

MRP: Materials Requirements Planning, Sistema para Planeación de Requerimientos de Materiales

MS: Management Science, Ciencia de la Administración

NLP: Non Linear Programming, Programación NO Lineal

NP-Hard: Non Polinomial Hard, Problema con tiempo de ejecución NO Polinomial

OR: Operations Research, Investigación de Operaciones

PDP-TW: Pickup & Delivery Problem with Time Windows,

Problema de entrega y recolección con ventana de horario

QAP: Quadratic Assignment Problem, Problema de Asignación Cuadrático

SA: Simulated Annealing, Enfriamiento Simulado

SCHEDULING: Secuenciación / Programación

SCM: Supply Chain Management, Administración de Cadena de Suministro

SOLVER: Optimizador

SPDP-sTW: Single pickup and delivery problem with soft time window

Problema de vehículo único con entrega y recolección y con ventana de horario negociable

TB: Tabú Search, Búsqueda Tabú

TSP: Traveling Salesman Problem, Problema del Agente Viajero

TSP-TW: Traveling Salesman Problem with Time Windows,

Problema del Agente Viajero con Ventana de Horario

VRP-TW: Vehicle Routing Problem with Time Windows,

Problema de Ruteo de Vehículos con Ventana de Horario

Lista de Tablas

Tabla 2.1 Niveles de importancia relativa.....	44
Tabla 2.2 Clasificación de la muestra de acuerdo al tipo de empresa donde labora el profesional.....	47
Tabla 2.3 Clasificación de acuerdo a la escuela de procedencia.....	47
Tabla 2.4 Clasificación de acuerdo a la carrera de procedencia.....	47
Tabla 2.5 Clasificación de acuerdo al año de graduación de la carrera profesional.....	48
Tabla 2.6 Clasificación de acuerdo al puesto ejercido.....	48
Tabla 2.7 Clasificación de acuerdo al área de desempeño profesional.....	48
Tabla 2.8 Incidencia porcentual de la aplicación de las matemáticas en la toma de decisiones.....	49
Tabla 2.9 Incidencia del grado de importancia atribuida a cada variable.....	49
Tabla 2.10 Incidencia del grado de importancia nivel “5” atribuido a cada variable.....	50
Tabla 2.11 Porcentajes de variabilidad explicada para cada variable.....	51
Tabla 2.12 Porcentajes de variabilidad explicada y confiabilidad para cada constructo.....	52
Tabla 2.13 Porcentajes de variabilidad explicada para las variables del constructo compuesto.....	53
Tablas 3.1 (a) y (b) Comparativa de software para optimización para aplicaciones de ruteo.....	87
Tablas 3.2 (a) y (b) Comparativa software de optimización para aplicaciones de ruteo (2da parte)....	88
Tablas 3.3 (a) y (b) Comparativa del software para planificación de rutas.....	90
Tabla 3.4 Distribución de empresas del AMM de acuerdo al sector industrial.....	91
Tabla 3.5 Estratificación de empresas de acuerdo al tipo de problema logístico.....	92
Tabla 3.6 Estratificación de empresas de acuerdo al tipo de solución que están llevando a cabo.....	92
Tabla 3.7 Estratificación de empresas que han implementado algún tipo de sistema ERP o APS.....	92
Tabla 3.8 Estratificación de empresas de acuerdo al tipo de secuenciación que requieren resolver.....	92
Tabla 4.1 Tiempo computacional de acuerdo al grado de complejidad de un problema.....	99
Tabla 4.2 Tabla esquemática de los métodos propuestos para la solución del TSP.....	120
Tabla 5.1 Ejemplificación del método de selección de la ruleta.....	135
Tabla 5.2 Cantidad de publicaciones hechas por año de Algoritmos Genéticos en la Logística.....	148
Tabla 5.3 Publicaciones por país de los Algoritmos Genéticos en la Logística respecto al total.....	148
Tabla 5.4 Publicaciones por Tema de Investigación de los Algoritmos Genéticos en la Logística...	149
Tabla 5.5 Publicaciones por Tema de Investigación de los Algoritmos Genéticos en la Logística....	149

Tabla 6.1 Resultados del experimento para la solución del ATSP-TW a través de BC.....	181
Tabla 6.2 Resumen comparativo de los estudios de investigación previos.....	183
Tabla 8.1 Matriz resultante del diseño del experimento.....	243
Tabla 8.2 Matriz de probabilidades para la prueba de la hipótesis.....	244
Tabla 9.1 Matriz de frecuencias para los 16 grupos experimentales.....	247
Tabla 9.2 (a) Matriz de valores calculados para el estadístico “T”.....	249
Tabla 9.2 (b) Matriz experimental de probabilidades “P Valor” para la prueba “T”.....	251
Tabla 9.3: Costos relacionados a la propuesta de solución basado en la aplicación de un Algoritmo Genético para solucionar el problema de ruteo SPDP-sTW en una empresa del AMM.....	255
Tabla 9.4: Ahorro potencial por ruta a ser disminuida de la flota vía eficiencia en el ruteo.....	256
Tabla 9.5: Análisis Costo-Beneficio derivado de la implementación del algoritmo propuesto.....	258
Tabla 9.6. Análisis comparativo de los beneficios obtenidos en términos de las distancias a recorrer entre una ruta de distribución actual versus la ruta optimizada propuesta por el algoritmo genético.....	260
Tabla 9.7: Diseño experimental para los parámetros N y G.....	266
Tabla 9.8: Diseño experimental para los parámetros FC y FM.....	267
Tabla 9.9: Diseño experimental para los parámetros N, G, FC y FM.....	267
Tabla 9.10: Análisis de Varianza Univariado: Prueba de efectos entre predictores.....	268
Tabla 9.11: Estimación estadística de los coeficientes e intervalos de confianza para los parámetros de operación del algoritmo genético.....	269
Tabla 9.12: Coeficientes obtenidos para el modelo polinomial.....	272
Tabla 9.13: Distribución estadística del costo en la función objetivo para el espacio solución.....	274

Lista de Figuras

Figura 1.1 Escuelas del pensamiento en la administración.....	12
Figura 1.2 Historial de los primeros 50 años del OR/MS.....	14
Figura 1.3 La decadencia del OR/MS.....	15
Figura 1.4 Efectos de las recomendaciones de INFORMS.....	15
Figura 1.5 El árbol de las técnicas del OR/MS.....	16
Figura 1.6 Mapa multidisciplinario del proyecto de investigación.....	18
Figura 1.7 Proceso básico para el ciclo de modelación.....	20
Figura 1.8 Metodología aplicada para el ciclo de modelación.....	25
Figura 1.9 Diagrama esquemático acerca de la relación entre el OR/MS y su aplicación en la logística...32	
Figura 2.1 Competencias buscadas en el OR/MS.....	37
Figura 2.2 Formato de encuesta para el estudio de campo para profesionistas de empresas del AMM....43	
Figura 2.3 Diagrama esquemático acerca del factor educación en la aplicación del OR/MS.....	54
Figura 3.1: Seis problemas generales en la práctica de la logística.....	56
Figura 3.2 Relación de los sistemas ERP con el OR/MS en el proceso de toma de decisiones.....	82
Figura 4.1 Intratabilidad matemática del TSP.....	100
Figura 4.2 Un tour en un TSP de ocho ciudades.....	101
Figura 4.3 Diagrama de flujo del algoritmo basado en la “búsqueda tabú”.....	114
Figura 4.4 Heurística del tipo “k2-opt” para el TSP.....	115
Figura 4.5: Ejemplo de un ruteo factible en un VRP.....	122
Figura 5.1 Acontecimientos históricos en el desarrollo de los algoritmos genéticos.....	126
Figura 5.2 Variantes del algoritmo genético.....	127
Figura 5.3 Fundamento del algoritmo genético.....	131
Figura 5.4 Desarrollo de la estructura cromosómica y política poblacional.....	134
Figura 5.5 Ruleta que representa los valores de aptitud de la tabla 5.1.....	136
Figura 5.6 Funcionamiento del operador de selección genético.....	137
Figura 5.7 Un solo punto de cruce. Cada pareja de organismos da origen a 2 descendientes.....	138
Figura 5.8 Dos puntos de cruce.....	138
Figura 5.9 Proceso de cruce genético y reproducción.....	140
Figura 5.10 Proceso de escalamiento para la búsqueda de la solución óptima.....	141
Figura 5.11 Afectación del factor de mutación y elitismo en el algoritmo genético.....	142

Figura 5.12 Pseudo-código del algoritmo genético simple.....	143
Figura 5.13 Funcionamiento del algoritmo genético.....	144
Figura 5.14 Relación entre la cantidad de aplicaciones de los Algoritmos Genéticos en el campo de la Logística con respecto al total.....	147
Figura 5.15 Ventajas en la aplicación de los algoritmos genéticos.....	153
Figura 7.1 Diagrama de flujo para la propuesta de solución del SPDP-sTW.....	210
Figura 8.1 Proceso de bifurcación en el procedimiento de ramificación y corte.....	217
Figura 8.2 Cálculo del tamaño de la muestra a partir de información disponible de las muestras.....	236
Figura 9.1: Distribución de frecuencias para la suma aritmética de parámetros del algoritmo genético.....	274
Figura 9.2: Distribución Acumulada del espectro del Espacio Solución del problema.....	275

Tabla de Contenido

Primera parte: Antecedentes del proyecto.

1. Introducción a la investigación de operaciones y a la logística.....	12
1.1 Introducción a la investigación de operaciones (OR/MS).....	12
1.2 Introducción a la modelación matemática.....	20
1.3 El enfoque evolutivo en el proceso de la modelación matemática.....	22
1.4 Etapas incluidas en el proceso de modelación matemática.....	24
1.5 Definición de la función logística.....	26
1.6 Aplicación del OR/MS en la práctica de la logística.....	28
1.7 Comentarios finales: El arte en la aplicación del OR/MS y el arte en la práctica de la logística.....	30
2. El factor educativo en la aplicación de la investigación de operaciones.....	33
2.1 Introducción: el proceso de enseñanza y aprendizaje en el OR/MS.....	33
2.2 La práctica profesional del OR/MS en las empresas.....	35
2.3 Las competencias requeridas para la aplicación del OR/MS.....	37
2.4 El desarrollo de competencias en México.....	40
2.5 Caso de estudio: La aplicación de las matemáticas por parte de los profesionistas de las empresas del área metropolitana de la ciudad de Monterrey.....	42
2.6 Comentarios finales de la problemática educativa en la aplicación del OR/MS.....	54

Segunda parte: Marco conceptual.

3. Exposición de problemas generales en la logística.....	56
3.1 Introducción.....	56
3.2 Primer problema de la logística: planeación estratégica de red e infraestructura.....	57
3.3 Segundo problema de la logística: programación de la producción para ambientes continuos..	67
3.4 Tercer problema de la logística: programación de la producción para ambientes discretos.....	74
3.5 Cuarto problema de la logística: programación de la distribución (Ruteo).....	80
3.6 La relación de los sistemas MRP, ERP y APS con el OR/MS.....	82
3.7 Identificación y análisis comparativo respecto a las alternativas de software comercial tipo APS disponibles en el mercado para problemas de distribución de ruteo.....	86
3.8 Caso de estudio: revisión de las estrategias de solución implementadas en la ciudad de Monterrey para el apoyo en la toma de decisiones de la función logística.....	91
3.9 Comentarios finales.....	95
4. Fundamentos matemáticos para problemas de logística de ruteo.....	96
4.1 Introducción: significado del concepto “problema difícil de resolver” (NP-Hard).....	96
4.2 Introducción al problema del agente viajero (TSP).....	101
4.3 Aplicación del TSP en problemas generales de secuenciamiento en manufactura.....	103
4.4 Clasificación de los métodos propuestos para solución del TSP.....	105
4.5 Revisión de métodos basados en heurísticas para la solución del TSP.....	107
4.6 Revisión de la meta-heurística “tabu-search” para la solución del TSP	111
4.7 Revisión del método basado en programación dinámica para la solución del TSP.....	117
4.8 Revisión de métodos basados en ramificación y corte para la solución del TSP.....	118
4.9 Comentarios finales: resumen esquemático y otras variantes del TSP	120

5. Fundamentos del algoritmo genético como meta-heurística propuesta.....	124
5.1 Introducción: breve historia del antecedente de los algoritmos genéticos.....	124
5.2 La versión americana y la versión alemana del algoritmo genético.....	125
5.3 Introducción a los parámetros de operación del algoritmo genético.....	128
5.4 La población de organismos y la función de desempeño.....	132
5.5 La definición del cromosoma del organismo y sus genes.....	133
5.6 El operador de selección.....	135
5.7 El operador de cruce o reproducción.....	138
5.8 El Operador de mutación.....	141
5.9 Funcionamiento general del algoritmo genético simple.....	143
5.10 El problema de la codificación de la solución (genoma) en los algoritmos genéticos.....	145
5.11 Trabajos previos de investigación: aplicación de los algoritmos genéticos para optimización en problemas de logística.....	147
5.12 Ventajas y desventajas del algoritmo genético como estrategia de solución.....	153
5.13 Variantes adicionales en los algoritmos genéticos.....	155
5.14 Comentarios finales.....	157

Tercera parte: Desarrollo del proyecto de investigación.

6. Planteamiento del problema de investigación.....	158
6.1 Introducción al problema de investigación.....	158
6.2 Planteamiento formal del problema de investigación:	
Ruteo de distribución para un vehículo con entrega y recolección de producto con restricciones de ventana de horario negociables (SPDP-sTW).....	161
6.3 Modelación matemática del problema de investigación.....	163
6.4 Aproximaciones para la solución del SPDP-sTW vía algoritmos basados en el TSP.....	170
6.5 Aproximaciones para la solución del SPDP-sTW basadas en el TSP-TW y en VRP-TW.....	173
6.6 Revisión algorítmica referente a trabajos de investigación previos al problema PDP-TW.....	175
6.7 Identificación del estado del arte para el problema de investigación.....	179
6.8 Comentarios finales: delimitación y diferenciación de la variante del problema de investigación.....	184
7. Planteamiento de objetivos e hipótesis del proyecto de investigación.....	188
7.1 Introducción.....	188
7.2 Planteamiento del objetivo central del proyecto de investigación.....	190
7.3 Planteamiento de los objetivos específicos y entregables del proyecto de investigación.....	191
7.4 Delimitación del proyecto de investigación.....	192
7.5 Justificación científica del problema de investigación.....	194
7.6 Relevancia práctica del problema de investigación.....	197
7.7 Propuesta metodológica para la solución del problema de investigación.....	198
7.8 Declaración de la hipótesis de trabajo del proyecto de investigación.....	211
7.9 Comentarios finales: taxonomía general del proyecto de investigación.....	212
8. Diseño experimental.....	213
8.1 Introducción: objetivos del esquema general del experimento.....	213
8.2 Aplicación del procedimiento algorítmico de ramificación y corte (BC) como grupo control para la prueba experimental.....	216
8.3 Técnica estadística para la prueba de la hipótesis de investigación.....	222
8.4 Terminología empleada en el diseño de experimentos.....	224

8.5 Metodología empleada para la planificación del experimento.....226

8.6 Estrategia para la asignación de las unidades experimentales en el experimento.....229

8.7 Posibles errores en el diseño de experimentos.....230

8.8 Definición de los parámetros a ser manipulados en el experimento.....231

8.9 Medición de las variables para la prueba experimental.....232

8.10 Estudio descriptivo de las instancias numéricas a ser utilizadas en el experimento.....233

8.11 Cálculo para el tamaño de la muestra.....235

8.12 Planteamiento de la prueba experimental.....238

8.13 Implementación del experimento.....241

9. Resultados.....246

9.1 Introducción.....246

9.2 Prueba de la hipótesis de investigación.....248

9.3 Análisis costo-beneficio para la aplicación del Algoritmo Genético propuesto.....254

9.4 Estudio analítico para los parámetros de operación del Algoritmo Genético.....263

9.5 Diseño experimental para la predicción de los parámetros del Algoritmo Genético.....266

9.6 Significancia de los parámetros del Algoritmo Genético en relación a su eficacia.....276

9.7 Comentarios finales.....281

10. Conclusiones.....282

11. Anexos.....288

i. Anexo A: Fase de descomposición basada en el método SPP para el análisis y explotación topológica de la versión original de la red logística288

ii. Anexo B: Fase de compresión vía estrategia de clusterización mediante criterios de maximización de afinidad291

iii. Anexo C: Fase de compresión discriminante de arcos basada en la heurística de los “k” nodos vecinos más cercanos para obtener la versión compacta de la red294

iv. Anexo D: Fase de generación agresiva de cortes aplicada a la versión compacta de la red.297

v. Anexo E: Fase evolutiva generacional para explotar el “pool” de cortes generados313

vi. Anexo F: Fase de descompresión de la ruta propuesta para la versión original de la red...319

12. Referencias Bibliográficas.....323