

**SIMULACIÓN DE ENRUTAMIENTO ÓPTICO SOBRE  
WDN BASADO EN COLONIAS DE HORMIGAS  
ANTSYSTEM (AS)**



**Paola Andrea Guzman  
Omar Vidal Latorre**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICAIONES  
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES  
GRUPO I+D GNTT NUEVAS TECNOLOGÍAS EN TELECOMUNICACIONES  
Popayán  
2005**

## **INTRODUCCION**

Las redes ópticas, y en especial las redes de Multiplexación por División de Longitud de onda (WDM) representan el futuro de las telecomunicaciones y con el fin de aprovechar al máximo su gran capacidad los esfuerzos se concentran en la búsqueda de soluciones que permitan una eficiente transmisión de la información. De estas investigaciones están surgiendo numerosos estudios que dan paso a nuevas perspectivas tomadas desde diferentes áreas del conocimiento, tal como en este proyecto, basadas en el comportamiento de fenómenos naturales. Lo anterior marca el punto de partida para la elaboración de este trabajo, que no solo realiza un estudio, sino también muestra la importancia de la investigación en este campo, el cual tiene aún un gran camino por recorrer. Por este motivo se inicia en el Departamento de Telecomunicaciones una línea de investigación sobre el enrutamiento en redes ópticas WDM.

A pesar de los avances en el estudio de las redes ópticas, aún se presentan problemas de enrutamiento y asignación de longitud de onda que generan retardos y congestión de la red, lo cual ha incentivado a la creación de nuevos algoritmos que brindan solución a estos problemas, inspirados en modelos genéticos y en el comportamiento de las colonias de hormigas.

Este trabajo se concentra en la investigación de dichos algoritmos de enrutamiento; la primera parte se enfoca en aquellos basados en el proceso de la evolución de las especies al desarrollar individuos genéticamente mejorados y la segunda, en el modelo del comportamiento

de las colonias de hormigas durante la búsqueda de su alimento y como encuentran el camino más corto entre su nido y este. Como se muestra en el capítulo 4 es importante el estudio y análisis de estos dos algoritmos debido a que ambos representan soluciones adecuadas a problemas de enrutamiento y asignación de longitud de onda en redes ópticas.

Como complemento a esta investigación se realizó una herramienta de simulación que permite visualizar el proceso de aplicación del algoritmo de colonias de hormigas Ant System sobre un modelo de topología de red WDM.

Finalmente es importante resaltar el alto grado de interdisciplinariedad que contiene el proyecto al involucrar otras áreas de conocimiento como la biología y la genética dando soporte para la generación de soluciones a problemas en las telecomunicaciones.

## **1. CARACTERISTICAS Y COMPORTAMIENTO DE LOS ALGORITMOS GENETICOS**

Este capítulo contiene un estudio del funcionamiento y aplicación de los algoritmos genéticos que permitirá un acercamiento conceptual para una mejor comprensión del capítulo 4, en el cual se puede observar la importancia de este como solución eficaz a problemas de enrutamiento y asignación de longitud de onda en redes ópticas.

### **INTRODUCCION**

La computación evolutiva se fundamenta en la tesis propuesta por Charles Darwin sobre la "selección natural", la cual ha sido compartida por otros pensadores, como uno de los mecanismos impulsores de la evolución de las especies y esta no es más que la evolución de cromosomas y la búsqueda de su autopropagación y perfeccionamiento.

Los algoritmos genéticos se relacionan estrechamente con el campo de las ciencias naturales y pueden ser aplicados en diversos campos diferentes a la biología, ya que actualmente ingenieros de diferentes áreas están utilizando la simulación por computador de procesos evolutivos de las especies y han unificado esfuerzos para desarrollar secuencias de ordenes en lenguaje de computador, con el fin de simular el mecanismo de la reproducción, selección y adaptación al medio ocuriente en la naturaleza

y lograr así la optimización de procesos industriales, sistemas de redes de computadoras, etc.

Es importante citar que a diferencia de otros métodos metaheurísticos, los Algoritmos Genéticos han crecido de forma espectacular, hasta el punto de poder encontrar referencias sobre ellos en revistas de informática de carácter general. Además, muchos de los investigadores en este campo están trabajando para desarrollar los aspectos teóricos más relevantes, incorporando otras técnicas de búsqueda local en el esquema genético.

### **1.1 HISTORIA:**

Los Algoritmos Genéticos (AG) fueron introducidos por John Holland en 1970 inspirándose en el proceso observado en la evolución natural de los seres vivos [1], y corresponden a una familia de modelos computacionales que presentan un potencial método de búsqueda y resolución de problemas.

John Holland [1] desde pequeño se preguntaba cómo la naturaleza logra crear seres cada vez más perfectos, ya que todo se lleva a cabo a base de interacciones locales entre individuos y entre estos y lo que les rodea. No sabía la respuesta, pero tenía una cierta idea de cómo hallarla, tratando de hacer pequeños modelos de la naturaleza, que tuvieran alguna de sus características y ver cómo funcionaban, para luego extrapolar sus conclusiones a la totalidad.

En los años 50 entró en contacto con los primeros computadores, donde pudo llevar a cabo algunas de sus ideas, aunque no se encontró con un ambiente intelectual fértil para propagarlas. Fue a principios de los 60, en la Universidad de Michigan donde, dentro del grupo *Logic of Computers*, sus ideas comenzaron a desarrollarse y dar frutos, además,

leyendo un libro escrito por un biólogo evolucionista, R. A. Fisher, titulado *La teoría genética de la selección natural* [1], fue como comenzó a descubrir los medios para llevar a cabo sus propósitos de comprensión de la naturaleza; de este libro aprendió que la evolución era una forma de adaptación más potente que el simple aprendizaje y tomó la decisión de aplicar estas ideas para desarrollar programas bien adaptados para un fin determinado.

En esa universidad, Holland impartía un curso titulado *Teoría de sistemas adaptativos* y dentro de este curso y con una participación activa por parte de sus estudiantes, fue donde se crearon las ideas que más tarde se convertirían en los algoritmos genéticos.

Por tanto, cuando Holland se enfrentó a los algoritmos genéticos, los objetivos de su investigación fueron dos:

- Imitar los procesos adaptativos de los sistemas naturales.
- Diseñar sistemas artificiales (normalmente programas) que retengan los mecanismos importantes de los sistemas naturales.

Unos 15 años más adelante, **David Goldberg**, actual delfín de los algoritmos genéticos, conoció a Holland y juntos fueron los primeros en investigar sobre su aplicación a problemas industriales. Posteriormente, Goldberg escribió un algoritmo genético en un ordenador personal Apple II el cual, junto con otras aplicaciones creadas por estudiantes de Holland, convirtieron a los algoritmos genéticos en un campo suficientemente aceptado [1].

## **1.2 ALGORITMOS GENETICOS (AG):**

Los *algoritmos genéticos* son métodos sistemáticos para la resolución de problemas de búsqueda y optimización que aplican a estos los mismos métodos de la evolución biológica: selección basada en la población, reproducción sexual y mutación.

La idea básica de un AG es generar un conjunto de posibles soluciones frente a un problema específico. Busca dentro de un espacio de hipótesis candidatas la mejor hipótesis que optimice las características del sistema en que fueron formuladas.

Para una mejor comprensión del mundo de los algoritmos genéticos es necesario comprender cómo el proceso de selección natural puede aplicarse a conceptos o ideas creadas por el hombre, en la tabla 1.1 se muestra una analogía de esto:

<b>MODELO BIOLÓGICO</b>	<b>MODELO COMPUTACIONAL</b>
Naturaleza	Algoritmos genéticos
Código genético	Codificación simbólica
Cromosoma	Cadena de características
Gen	Característica del problema
Alelo (Número de opciones posibles)	Valor de la característica
Locus	Posición de la letra o número
Individuo	Problema/Solución
Generación	Ciclo

**Tabla 1.1 Analogía entre conceptos biológicos y elementos computacionales utilizados por los algoritmos genéticos.**

Cada solución del conjunto de soluciones va a ser llamada *individuo* y a dicho conjunto se le denominará *población*. Cada individuo tiene una información asociada a él y cuando se tienen problemas de optimización, el individuo corresponde a las variables libres, es decir, a aquellas a las que el algoritmo tiene que asignar un valor para que una función sea mínima o máxima para esos valores. Esa función es denominada *función de costo* y corresponde a un modelo biológico que se llamará *función de adaptación* si es el caso de un modelo aplicado a un problema, luego, con el modelo biológico se puede determinar el grado de adaptación de un individuo y a esta información ya determinada se le va a denominar *código genético*.

Las características de los individuos, sean beneficiosas o no, se van a llamar *fenotipos* y la información asociada a un individuo se compone de partes indivisibles denominados *cromosomas*. Un fenotipo puede estar en más de un cromosoma, en cuyo caso puede ser que el hijo herede un fenotipo que no tenía ni el padre ni la madre, sino una combinación de ambos. En caso de que el hijo tenga parte de los genes del padre y parte de los genes de la madre que intervienen en un fenotipo, se va a crear una característica nueva asociada a ese fenotipo.

### **1.3 GENERACION DE UN ALGORITMO GENETICO:**

Para un problema que se va a abordar se genera un conjunto de soluciones normalmente generado al azar. Posteriormente se realizan los pasos de codificación de variables y manipulación con operadores genéticos (que se explicarán mas adelante).



### 1.3.1 Codificación de las variables:

Los algoritmos genéticos requieren que el conjunto de soluciones se codifique en un *cromosoma*. Cada cromosoma está formado por varios genes los cuáles corresponden a los parámetros del problema. Para poder trabajar con estos genes en el procesador, es necesario codificarlos en una *cadena*, es decir, en un grupo de símbolos (números o letras) que generalmente va a estar compuesto de ceros y unos.

PARÁMETRO	POSICION
p1	0-2
p2	3-5

**Tabla 1.2 Parámetros p1 y p2 y su codificación en cadena de bits.**

Por ejemplo, en la tabla 1.2 se puede observar una cadena de bits cualquiera, el valor del parámetro *p1* ocupará las posiciones de 0 a 2, el *p2* las de 3 a 5. El número de bits usado para cada parámetro dependerá de la precisión que se quiera en el mismo o del número de opciones posibles (alelos) que tenga ese parámetro. Se puede codificar cada parámetro como un número entero de  $n$  bits o se puede utilizar también cualquier otra representación interna como un código BCD, código *Gray* o una codificación en forma de números reales, por ejemplo.

La mayoría de las veces, una codificación correcta es la clave de una buena resolución del problema. Generalmente, la regla heurística que se utiliza es la llamada *regla de los bloques de construcción*, es decir:

“parámetros relacionados entre sí deben estar cercanos en el cromosoma”, por esto, se puede ser bastante creativo con la codificación del problema, teniendo siempre en cuenta la regla anterior, usando cromosomas que tengan relaciones entre genes. En algunos casos, cuando no se conoce de antemano el número de variables del problema, se tienen en cuenta dos opciones: codificar también el número de variables, fijando un número máximo, o bien, algo mucho más natural, crear un cromosoma que no sea estático y que pueda variar su codificación. Para ello, claro está, se necesitan mecanismos de manipulación genética llamados “operadores genéticos” los cuáles alteran la codificación inicial del cromosoma.

Normalmente la codificación es estática, pero en casos de optimización numérica, el número de bits dedicados para codificar un parámetro puede variar, o incluso la representación de este (utilizando una cantidad mayor o menor de bits dependiendo del grado de exactitud que se desee en la solución del problema). Algunos paquetes de algoritmos genéticos adaptan automáticamente la codificación según van convergiendo los bits menos significativos de una solución.

También se deben tener en cuenta una serie de parámetros que se pueden fijar en cada ejecución, como los siguientes:

- **Tamaño de la población:** Debe de ser suficiente para garantizar la diversidad de las soluciones y tiene que crecer más o menos con el número de bits del cromosoma, por supuesto, depende también del procesador en el que se esté ejecutando.

- **Condición de terminación:** Normalmente la condición de terminación es la convergencia del algoritmo genético o un número prefijado de generaciones.

### 1.3.2 Operadores Genéticos:

Después de generar aleatoriamente una serie de cromosomas, el algoritmo genético procede de la siguiente forma:

- Realiza una evaluación y una selección de cada uno de los genes opcionales.
- Permite a cada uno de los individuos reproducirse.
- Empareja los individuos de la nueva población, haciendo que intercambien material genético y que alguno de los bits de un gen se vea alterado debido a una *mutación* espontánea.

Cada uno de los pasos anteriores consiste en una actuación sobre las cadenas de bits, es decir, la aplicación de un *operador genético* a una cadena binaria. Hay tres operadores genéticos principales: evaluación y selección, *crossover* o recombinación y *mutación*.

#### 1.3.2.1 Evaluación y selección:

Durante la evaluación, se decodifica el gen, convirtiéndolo en una serie de parámetros de un problema, se halla una solución a partir de esos parámetros y se le da una puntuación a esta en función de lo cerca que esté de la mejor; a dicha puntuación se le llama *fitness*.

El fitness determina siempre los cromosomas que se van a reproducir y aquellos que se van a eliminar, pero hay varias formas de considerarlo para seleccionar la población de la siguiente generación:

- Usando el orden o rango de cada cromosoma haciendo depender la probabilidad de permanencia o evaluación de la posición según dicho orden.
- En algunos casos, el fitness no es una sola cantidad, sino diversos números que tienen diferente consideración. Basta con que tal fitness forme un orden parcial, es decir, que se puedan comparar dos individuos y decir cuál de ellos es mejor, esto suele suceder cuando se necesitan optimizar varios objetivos.

Una vez evaluado el fitness, se tiene que crear la nueva población teniendo en cuenta que los *buenos* rasgos de los mejores se transmitan a esta, para ello hay que seleccionar a una serie de individuos encargados de tan ardua tarea y esta selección y la consiguiente reproducción se puede hacer de la siguiente manera:

- *Basada en el rango*: En este esquema se mantiene un porcentaje de la población, generalmente para la siguiente generación. Se coloca toda la población por orden de fitness y los individuos *menos* dignos son eliminados y sustituidos por otros individuos de la población que son descendientes de algunos de los *mejores*.
- *Rueda de ruleta*: Se crea un *grupo* formado por cromosomas de la generación actual, en una cantidad proporcional a su fitness, luego se escogen parejas aleatorias de cromosomas y se emparejan, sin importar incluso que sean del mismo progenitor.

- *Selección de torneo*: Se escogen aleatoriamente un número de individuos de la población y el que tiene puntuación mayor se reproduce, sustituyendo su descendencia al que tiene menor puntuación.

### **1.3.2.2 Crossover:**

Consiste en el intercambio de material genético entre dos cromosomas (a veces más). El *crossover* es el principal operador genético, hasta el punto que se puede decir que no es un algoritmo genético el que no tiene *crossover* y sin embargo, puede serlo perfectamente sin mutación, según descubrió Holland [1]

Para aplicar el *crossover*, se escogen aleatoriamente dos miembros de la población; inicialmente no es grave si se emparejan dos descendientes de los mismos padres; ello garantiza la perpetuación de un individuo con buena puntuación, sin embargo, si esto sucede a menudo, puede crear problemas, ya que, toda la población puede aparecer dominada por los descendientes de algún gen que, además, podría tener caracteres no deseados; este es uno de los principales problemas con los que se enfrentan los que aplican algoritmos genéticos.

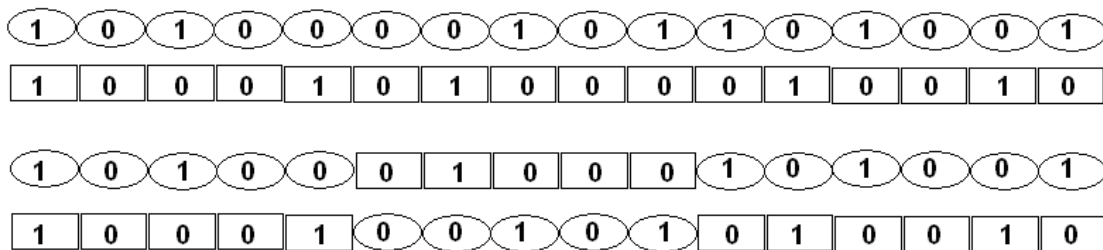
Existe un teorema utilizado por los AG llamado "el teorema de los esquemas", el cual se basa en la noción de *bloques de construcción* para hallar la mejor solución a un problema, combinando soluciones parciales por medio de la función *crossover*. Una buena solución a un problema está constituida por unos buenos bloques, igual que una buena máquina está hecha por buenas piezas. El *crossover* es el encargado de mezclar bloques buenos que se encuentren en los diversos progenitores y que

serán los que den a los mismos una buena puntuación. La presión selectiva se encarga de que sólo los buenos bloques se perpetúen y poco a poco vayan formando una buena solución.

El *teorema de los esquemas* viene a decir que la cantidad de *buenos bloques* se va incrementando con el tiempo de ejecución de un algoritmo genético y es el resultado teórico más importante en los AG.

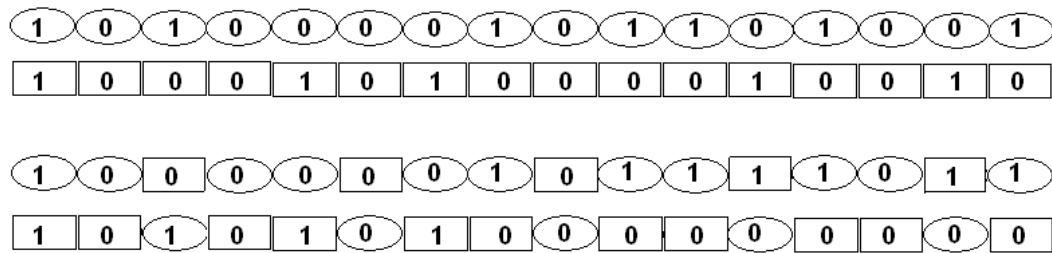
El intercambio genético se puede llevar a cabo de muchas formas, pero hay dos grupos principales:

- *Crossover n-puntos*: Los dos cromosomas se cortan por n puntos y el material genético situado entre ellos se intercambia. Lo más habitual es un crossover de un punto o de dos puntos (Figura 1.1).



**Figura 1.1 Crossover n-puntos. En esta figura se han cortado los dos cromosomas en dos puntos y se han intercambiado su material genético.**

- *Crossover uniforme*: Se genera un patrón aleatorio de unos y ceros y se intercambian los bits de los dos cromosomas que coincidan donde hay un 1 en el patrón, o bien, se genera un número aleatorio para cada bit y si supera una determinada probabilidad se intercambia ese bit entre los dos cromosomas (Figura 1.2).



**Figura 1.2 Crossover uniforme.**

**Cada tercer gen hay un intercambio de material genético.**

### 1.3.2.3 Mutación:

En la Evolución, una mutación es un suceso poco común (sucede aproximadamente una de cada mil replicaciones). En algunos casos las mutaciones son letales, pero en promedio contribuyen a la diversidad genética de la especie, de esta manera, en un algoritmo genético tendrán el mismo papel y la misma frecuencia (muy baja).

Una vez establecida la frecuencia de mutación, por ejemplo uno por mil, se examina cada bit de cada cadena cuando se vaya a crear al nuevo individuo a partir de sus padres (normalmente se hace de forma simultánea al crossover). Si un número generado aleatoriamente está por debajo de esa probabilidad, se cambiará el bit (es decir, de 0 a 1 o de 1 a 0) y si no, se dejará como está. Dependiendo del número de individuos que haya y del número de bits por individuo, puede resultar que las mutaciones sean extremadamente raras en una sola generación.

No se debe abusar de la mutación, es cierto que es un mecanismo generador de diversidad y por tanto, la solución cuando un algoritmo genético está estancado, pero también es cierto que reduce al algoritmo genético a una búsqueda aleatoria, entonces se puede decir que siempre

es más conveniente usar otros mecanismos de generación de diversidad, como aumentar el tamaño de la población, o garantizar la aleatoriedad de la población inicial.

Este operador, junto con el crossover y el método de selección de rueda de ruleta (explicado dentro del punto 1.3.2.1), constituyen un *algoritmo genético simple*.

### **1.3.3 Otros Operadores:**

No se usan en todos los problemas, sino sólo en algunos y en principio su variedad es infinita. Generalmente son operadores que exploran el espacio de soluciones de una forma más ordenada y que actúan más en las últimas fases de la búsqueda, en la cual se pasa de soluciones "casi buenas" a "buenas" soluciones.

#### **➤ Cromosomas de longitud variable:**

Hasta ahora se han descrito cromosomas de longitud fija, donde se conoce de antemano el número de parámetros de un problema, pero hay problemas en los que esto no sucede. Por ejemplo, en un problema de clasificación, donde dado un vector de entrada se desea agruparlo en una serie de clases, se puede no saber siquiera cuantas clases hay, o en diseños de redes neuronales, puede que no se sepa (de hecho, nunca se sabe) cuántas neuronas se van a necesitar y puede que no haya ninguna regla heurística aplicable; en ese caso se tendrán que utilizar los algoritmos genéticos para hallar el número óptimo de neuronas.

Si sucede esto, se necesitarán dos operadores más: *añadir* y *eliminar*; estos operadores se utilizan para añadir o eliminar un gen del cromosoma. La forma más habitual de añadir es *duplicar* uno ya



existente, el cual sufre mutación y se añade al lado del anterior, en este caso, los operadores del algoritmo genético simple (selección, mutación, crossover) funcionarán de la forma habitual. Estos operadores permiten además, crear un *algoritmo genético de dos niveles*: a nivel de cromosoma y a nivel de gen. Si se supone que en un problema de clasificación hay un gen por clase, se puede asignar una puntuación a cada gen en función del número de muestras que haya clasificado correctamente. Al aplicar estos operadores, se duplicarán los alelos con mayor puntuación o fitness y se eliminarán aquellos que hayan obtenido la menor, o cuya puntuación sea nula.

➤ **Operadores de nicho (ecológicos):**

Otros operadores importantes son los operadores de *nicho*; estos operadores están encaminados a mantener la diversidad genética de la población de forma que cromosomas similares sustituyan sólo a cromosomas similares y son especialmente útiles en problemas con muchas soluciones; un algoritmo genético con estos operadores es capaz de hallar todos los máximos, dedicándose cada especie a un máximo, entonces se puede decir, que más que operadores genéticos, son formas de enfocar la selección y la evaluación de la población.

➤ **Operadores especializados:**

En una serie de problemas hay que restringir las nuevas soluciones generadas por los operadores genéticos, pues no todas las soluciones generadas van a ser válidas, sobre todo en los problemas con restricciones. Por ello, se aplican operadores que mantengan la estructura del problema.

Para que estos operadores sean generadores de diversidad, pueden realizarlo de la siguiente manera:

**Zap:** Cambia un gen completo de un cromosoma en vez de cambiar un solo bit de un cromosoma.

**Creep:** Este operador aumenta o disminuye en 1 el valor de un gen; sirve para cambiar suavemente y de forma controlada los valores de los genes.

**Transposición:** Similar al crossover, pero dentro de un solo cromosoma, así que dos genes intercambian sus valores, sin afectar al resto del cromosoma.

#### **1.4 APLICACIÓN DE LOS OPERADORES GENÉTICOS:**

En toda ejecución de un algoritmo genético hay que decidir con qué frecuencia se va a aplicar cada uno; en algunos casos, como en la mutación o el crossover, se debe añadir algún parámetro adicional que indique con qué frecuencia se va a aplicar dentro de cada gen del cromosoma.

La frecuencia de aplicación de cada operador estará en función del problema y se determina según los efectos que cause. Generalmente, la mutación y otros operadores que generen diversidad se suelen aplicar con poca frecuencia, pero a diferencia de esto, el crossover se suele aplicar con frecuencia alta.

En general, la frecuencia de los operadores no varía durante la ejecución del algoritmo, pero hay que tener en cuenta que cada operador es más efectivo en un momento determinado de la ejecución. Por ejemplo, al

principio, en la fase denominada de *exploración*, los más eficaces son la mutación y el crossover; posteriormente, cuando la población ha convergido en parte, el crossover no es útil, pues se está trabajando con individuos bastante similares y es poca la información que se intercambia, sin embargo, si se produce un estancamiento, la mutación tampoco es útil, pues está reduciendo al algoritmo genético a una búsqueda aleatoria y habría que aplicar otros operadores. En todo caso, se pueden usar operadores especializados.

#### **1.4.1 Combinación entre operadores:**

La notabilidad del paradigma se presenta al combinar las operaciones, principalmente:

### **SELECCIÓN + MUTACION = MEJORAMIENTO CONTINUO**

Juntas, la selección y la mutación son una forma de búsqueda por escalas, donde la mutación crea variantes en los alrededores de la solución actual y la selección acepta aquellos cambios con alta probabilidad, de esta manera se logra *escalar* hacia soluciones mejores.

La utilización de esta combinación, por sí sola, constituye una *evolución sencilla*, donde se plantea que la mutación se torna más productiva que el crossover, a medida que la población converge.

Continuar la exploración en un ambiente local es eficaz, pero si se contara con un mecanismo de búsqueda global, este debería permitir saltar inteligentemente a otra localidad cuando una solución óptima local es encontrada, por tal motivo surge la siguiente afirmación:

## **SELECCIÓN + CROSSOVER = INNOVACION**

Una manera de promover el salto inteligente es a través del efecto combinado de selección y crossover. Mediante estas operaciones, se produce una exploración de las combinaciones que obtengan mejores soluciones, que no necesariamente pertenecen a la misma localidad en el espacio de búsqueda, para luego seleccionar y reorganizar las más deseables.

Se puede decir que un algoritmo de optimización eficiente debe emplear dos técnicas para encontrar un máximo global: La *exploración*, para investigar nuevas y desconocidas áreas en el espacio de búsqueda y la *explotación*, para hacer uso del conocimiento encontrado en los puntos previamente visitados y así hallar los mejores. Estos requisitos son contradictorios y un buen algoritmo de búsqueda debe obtener una solución de compromiso entre ellos. Por ejemplo, una búsqueda aleatoria es buena en exploración, pero no hace explotación, mientras que un método de búsqueda a escalas, es bueno en explotación, pero realiza poca exploración.

Holland [2] mostró que un AG, en teoría, combina estas técnicas simultáneamente, sin embargo, en la práctica surgen problemas inevitables, pues para afirmar algunas hipótesis, se puede llegar a tener que considerar ciertas simplificaciones, como el tamaño de la población infinito o que los genes en los cromosomas no interactúan significativamente.

### **1.5 VENTAJAS DE LOS AG:**

- Lo más sorprendente y útil de los AG es que no es necesario disponer de un conocimiento profundo del problema a resolver, sino que se parte de estructuras simples que interactúan, dejando que sea la evolución quien haga el trabajo. Se puede decir que un AG es un método de programación opuesto al habitual; en lugar de descomponer un problema en sub-problemas, se crean los sub-problemas más sencillos que se puedan imaginar y se deja que se combinen entre sí, únicamente basta con ser capaces de identificar cualitativamente en qué casos las cadenas se acercan o se alejan de la solución buscada, para que el sistema se perfeccione automáticamente.
- Eliminan la necesidad de especificar todas las cualidades y particularidades del problema; en lugar de esto se plantean las características más relevantes para el proceso.
- Son adaptativos ya que son capaces de solucionar problemas que cambian en el tiempo.
- Permiten la solución de problemas considerados de imposible definición, dado que involucran múltiples variables desconocidas, teniendo en cuenta la múltiple interacción de condiciones.
- Se aborda la complejidad de los problemas con la complejidad del mecanismo de procesamiento.
- Permiten la ocurrencia de simultaneidad de acontecimientos y la pérdida de algunos cromosomas no implica una pérdida importante de información.

## **1.6 PROBLEMAS Y DESVENTAJAS DE LOS AG:**

La gran sencillez de los AG hace que sean muy atractivos para los programadores, pero existen casos en los que puede ser difícil, imposible o poco práctico aplicarlos, por esto, se puede hablar de algunos problemas que existen como son el problema de la variedad, el problema de la reproducción y el problema de la selección, para los que se van a proponer algunas soluciones.

### ➤ **El problema de la variedad:**

Un AG trata de explorar las regiones más prometedoras de un enorme espacio de posibilidades; al encontrar una zona con puntuación alta, ésta se explora más a fondo, pero hay que evitar que el algoritmo se estanque en una determinada zona, produciendo multitud de cadenas muy parecidas.

### ➤ **El problema de la reproducción:**

Las características positivas de los individuos deben poder transmitirse a la descendencia; esto se ha conseguido fácilmente en ejemplos sencillos, pero en otros problemas de mayor dificultad puede resultar muy complicado.

### ➤ **El problema de la selección:**

En cada ciclo de un AG se selecciona un subconjunto de las soluciones o individuos existentes, eliminando el resto. Los individuos seleccionados se reproducirán entre sí, generando nuevas soluciones. La función de evaluación es la encargada de decidir que entidades serán seleccionadas, pero esta algunas veces puede ser muy difícil o imposible de conseguir.

## **1.7 APLICACIONES DEL PARADIGMA EN INGENIERÍA:**

En esta parte se describen y analizan dos aplicaciones prácticas de la Computación Evolutiva, orientadas a los campos de la Ingeniería.

### **1.7.1 Diseño Automático de Circuitos Combinacionales con un Número Mínimo de Compuertas:**

El problema consiste en diseñar un circuito que lleve a cabo una función especial definida por una tabla de verdad dado un conjunto de compuertas lógicas disponibles. La técnica más empleada por los especialistas es el Mapa de Karnaugh (método gráfico).

El estudio de esta y otras técnicas, en comparación con el AG, muestra que este último presenta un desempeño superior, en función del número de compuertas, con pruebas realizadas con circuitos pequeños.

#### ➤ Representación Cromosómica:

El primer aspecto interesante es codificar las soluciones como cadenas de cromosomas. Una representación posible es una matriz bidimensional, donde cada elemento de la matriz es una compuerta que recibe dos entradas de cualquier otra compuerta.

Formalmente, cada circuito puede ser representado como un vector bidimensional de compuertas  $S_{i,j}$ , donde  $j$  indica el *nivel* de una compuerta (cuanto más pequeño, más cercana a la entrada está). Para cada  $j$ , el índice  $i$  varía respecto a las compuertas que están adyacentes en el circuito, aunque no estén necesariamente conectadas.

Los individuos de la población codifican la matriz usando ternas, donde los primeros dos elementos se refieren a cada entrada y el tercero es el tipo de compuerta (AND, NOT, OR, XOR y WIRE); el tipo WIRE indica una operación nula, es decir, la ausencia de una compuerta y se utiliza para mantener la regularidad en la representación.

La idea del AG es minimizar el número de compuertas que se puede traducir en maximizar el número de compuertas WIRE. Este enfoque permite la manipulación de cadenas más cortas que las que se deberían utilizar en los habituales esquemas binarios y aunque estos últimos ofrecen una mayor diversificación de la población, en dominios numéricos la convergencia del algoritmo es lenta y poco eficiente.

La utilidad del AG en esta representación reside en que, por ejemplo, un circuito con tres entradas y una salida puede tener **5<sup>75</sup>, 2, 6, 10<sup>52</sup>** posibilidades respectivamente en su espacio de búsqueda, lo cual implica la necesidad de utilizar un método heurístico.

➤ Función Fitness:

Una primera aproximación consiste en tomar en cuenta el número de operaciones efectuadas, sin embargo, es conveniente cotejar la salida del circuito bit por bit, porque así el AG posee más información para guiar la búsqueda en menos tiempo.

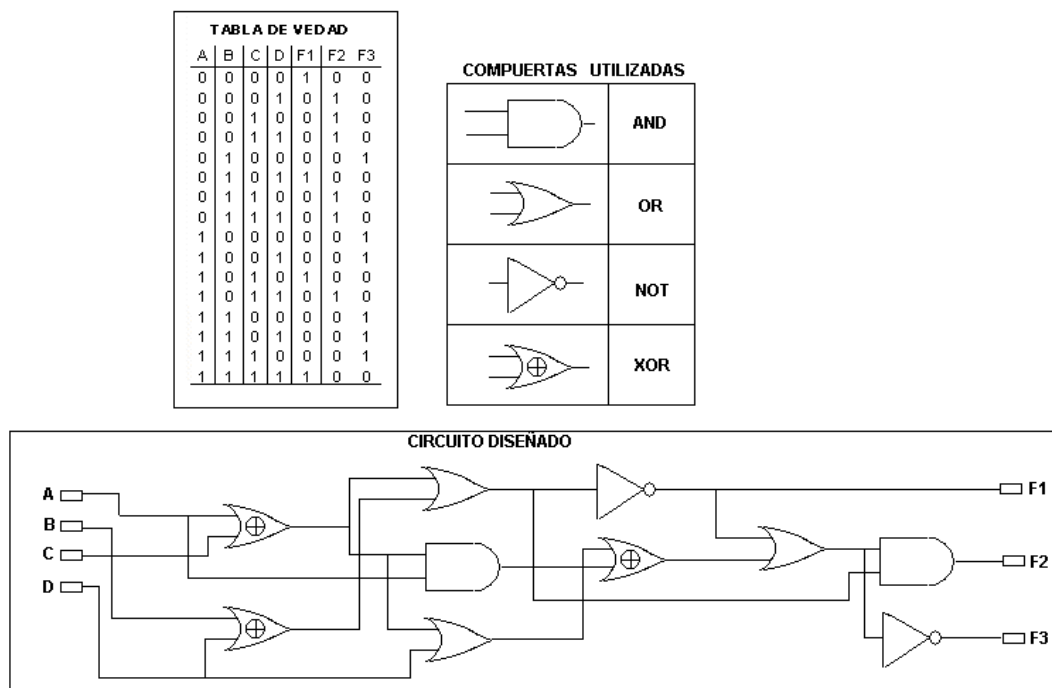
Por lo tanto, para evaluar la puntuación de un cromosoma, se obtienen todos los posibles valores de cada entrada y se computa el número de aciertos que la solución codificada es capaz de alcanzar respecto a las salidas deseadas en la tabla de verdad. Esto ocurre en dos etapas, al principio de la búsqueda solo se toman en cuenta la validación de las salidas (en este caso se realiza la *exploración*). Una vez que una solución funcional aparece, la función fitness es modificada de manera tal que



cada diseño válido producido se premia con cada WIRE que incluye y así el AG trata de encontrar el circuito con el mayor número de WIRES que efectúe la función requerida (en este punto se realiza la *explotación*).

➤ Operadores Genéticos y Adaptación del AG:

Se comienza con una matriz cuadrada de 5x5, que incrementará sus dimensiones si una solución admisible no es encontrada. El crossover utilizado es de dos puntos, con una muy baja probabilidad de mutación, proporcional al tamaño del cromosoma. El método de selección se realiza conservando a los mejores de cada generación (elitismo) y de esta manera se ejerce una mayor *presión selectiva*, favoreciendo el incremento de *buenos bloques constructores*. En la figura 1.3 se muestra un ejemplo con 4 entradas y 3 salidas obtenido por el AG.



**Figura 1.3** El AG obtuvo un diseño con 10 compuertas, mientras que el

**mapa de Karnaugh generó 19 compuertas.**

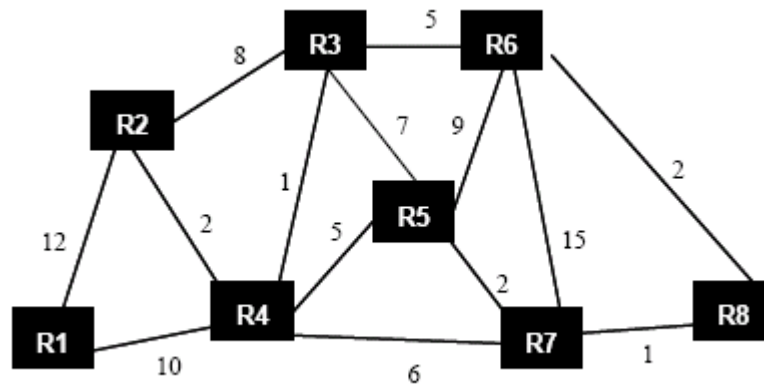
### **1.7.2 Aplicación de los AG en la configuración óptima de enrutadores:**

En las redes ópticas de los próximos 20 años, la limitación en el ancho de banda no dependerá del medio de transmisión, que es como se esperaría, sino más bien de los dispositivos entre nodos, entre los cuales están los routers, ya que estos deben ser capaces de seleccionar una ruta óptima de manera rápida y eficiente. En esta aplicación se presentan resultados de ensayos de algoritmos genéticos en la selección de rutas y se realizan las comparaciones estadísticas de los resultados obtenidos.

En la carrera por lograr cada día mayores velocidades de transmisión e interconexión de sistemas, los enrutadores se han consolidado como un dispositivo de gran importancia, esto ha influenciado en la eficiencia de los mismos y tiene que ver con sus cualidades, tales como principios de funcionamiento (electrónico, opto-electrónico, óptico), complejidad y algoritmos de enrutamiento. Por esta última propiedad se presenta una propuesta de selección de rutas, basada en los algoritmos genéticos, los cuáles permiten converger hacia una buena ruta con una metodología simple.

#### ➤ Descripción Del Sistema:

Para ilustrar la aplicación del algoritmo se ha considerado un sistema de 8 routers dispuestos como se indica en la figura 1.4:



**Figura. 1.4 Distribución de los routers**

Los costos han sido dispuestos y establecidos de manera aleatoria entre 1 y 15, estos se pueden observar en la tabla 1.3.

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
R1	0	12	G	10	G	G	G	G
R2	12	0	8	2	G	G	G	G
R3	G	8	0	1	7	1	G	G
R4	10	2	1	0	3	G	6	G
R5	G	G	7	3	0	9	2	G
R6	G	G	1	G	9	0	15	2
R7	G	G	G	6	2	15	0	1
R8	G	G	G	G	G	2	1	0

+

**Tabla 1.3 Tabla de costos entre los routers.**

**G:** Representa un enlace inexistente y se le asigna un costo relativamente alto, para que el algoritmo no lo seleccione.

**0:** Representa un enlace de característica reflexiva, es decir, sobre sí mismo, por lo tanto se le asigna un costo "0".

El algoritmo utilizará la tabla de costos para evaluar el costo entre genes y luego realizará la suma de todos los que están asociados a un mismo cromosoma. Posteriormente se buscará minimizar el costo, dando origen a la mejor ruta.

➤ Descripción del algoritmo:

Lo que se busca obtener, con rapidez y seguridad, la ruta óptima o en su defecto una buena ruta en forma oportuna, para ello se dispone de un arreglo (base de datos, "array", etc.) con un número de campos y un número de registros igual al número de routers, el cual servirá para guardar la tabla de costos antes mencionada. Esta tabla es una matriz de  $N_R \times N_R$  (donde  $N_R$  es el número de routers) y servirá para que los módulos puedan evaluar los costos de cada cromosoma (arreglo de  $N_R$  campos y 1 solo registro - arreglo de  $N_R \times 1$ ). Además se dispondrá de 2 nuevos arreglos con  $N_R + 2$  campos, pues además de los campos para los costos de los routers, deberán existir campos para la evaluación del costo y la puntuación (fitness-criterio de selección); a estos arreglos los llamaremos generación  $x$  y generación  $x+1$ .

Se realiza la elección aleatoria del número de cromosomas ( $N_R$ ) de la población inicial utilizando la siguiente relación:

$$N = 2 \cdot (50 \cdot \text{random}()) \leq 100$$

que genera un número aleatorio par entre 0 y 100. Luego se genera de manera aleatoria el número  $N_1$  de cromosomas que conformarán la población inicial. Una vez generados los  $N_1$  cromosomas, también de manera aleatoria, se realiza el cálculo del costo de cada cromosoma miembro de la población inicial utilizando las ecuaciones 1.1, con el apoyo de la tabla de costos a través del modelo de la figura 1.5.



**Figura 1.5 Cromosoma de routers.**

$$C_T = C_{R_1R_2} + C_{R_2R_3} + C_{R_3R_4} + C_{R_4R_5} + C_{R_5R_6} + C_{R_6R_7} + C_{R_7R_8}$$

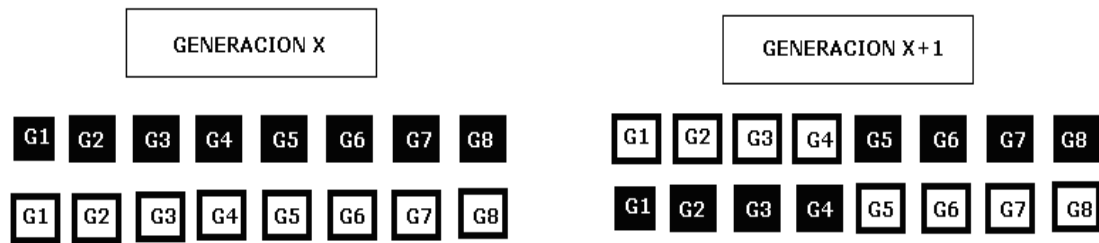
$$C_T = \sum_{i=1}^{n=\#GENES} C_{R_iR_{i+1}} \quad l=7$$

$$Aptitud = \frac{\sum_{i=1}^{n=\#GENES} C_{G_iG_{i+1}}}{N=\#Individuos} \quad l=7$$

**Ecuación. 1.1 Ecuaciones para hallar  $C_T$**

Donde  $C_T$ , es el costo total entre el cromosoma  $G_1$  y el cromosoma  $G_8$ . Los costos parciales son extraídos de la tabla de costos y la puntuación es la fracción de la suma total de costos de la generación.

A continuación se realiza el proceso reproductivo según la figura 1.6 realizando cambios en la generación  $x$  para obtener la generación  $x+1$ :



**Figura. 1.6 Reproducción de la generación x a x+1.**

En este algoritmo no se realizó mutación, proceso en el cual se cambia de manera aleatoria uno de los genes del cromosoma.

En seguida se traspasan los cromosomas de la generación  $x+1$  a la generación  $x$  y el ciclo se repite hasta que el número de iteraciones se cumpla o que el algoritmo converja (se realizaron 100 simulaciones consecutivas en el mismo PC). Una vez cumplido esto, significará que la generación  $x+1$  contiene los mejores cromosomas y se evalúa el de menor costo, tomándolo como solución del problema.

## **2. ALGORITMOS BASADOS EN LAS COLONIAS DE HORMIGAS. ANT SYSTEM**

### **INTRODUCCION**

El comportamiento colectivo de una colonia de hormigas ha servido para inspirar una novedosa técnica denominada Sistema de Hormigas (*Ant System*), una familia de algoritmos distribuidos para optimización combinatoria [3].

El método consiste en simular la comunicación indirecta que utilizan las hormigas para establecer el camino más corto desde su nido hasta la fuente de alimento y regresar. Esta técnica es llamada meta-heurística (técnica que sirve como apoyo a otra) destinada originalmente a problemas de optimización combinatoria. El algoritmo principal es realmente un sistema multiagente en el que las interacciones entre

agentes simples (llamados "hormigas") producen, en su conjunto, un comportamiento mucho más complejo, correspondiente a toda la colonia.

Casi todos los comportamientos de una colonia de hormigas, desde la construcción de estructuras, hasta la localización de comida, se pueden usar para la solución de algún tipo de problema de búsqueda. Esta familia de algoritmos se denomina *Optimización por Colonia de Hormigas* (*Ant Colony Optimization - ACO*).

Esta innovadora técnica basada en agentes simples (hormigas) nació con la tesis doctoral de Marco Dorigo (1992) [3] quien en 1996 publicó tres variantes del algoritmo para la resolución del Problema del Agente Viajero (que será explicado posteriormente). También fue un gran pionero de esta técnica el señor Jean-Louis Deneubourg de la *Université Libre de Bruxells* [3], que con sus estudios sobre la hormiga argentina *Linphitema humile*, muestra que colonias de este tipo de hormigas logran determinar caminos cortos hacia fuentes de alimentos a través de la búsqueda semi-aleatoria de un grupo de hormigas que depositan *feromonas*.

Las feromonas son un sistema de comunicación química entre animales de la misma especie que transmiten informaciones esenciales para la supervivencia como son el estado fisiológico, reproductivo y social, así como la edad, sexo y parentesco del animal emisor. Dichas señales son recibidas por el sistema olfatorio del animal receptor, quien las interpreta para decidir sobre su comportamiento posterior.

La feromona depositada constituye la información que permite la coordinación de los esfuerzos de la colonia en busca de comida, de esta manera una hormiga está más inclinada a seguir una trayectoria cuanto más fuerte sea el rastro de feromona depositada en ella. El mecanismo



para encontrar el camino más corto hasta el alimento se realiza cuando la hormiga que encuentra la comida primero (presumiblemente porque encontró un camino más corto hacia el alimento) también es la primera en depositar *el doble* de feromona sobre una trayectoria al seguir ésta en su camino de vuelta a la colonia. Otras hormigas preferirán esta trayectoria en comparación con otras que solo cuentan con la mitad de feromona en ellas y al hacerlo intensificarán el rastro de feromona haciendo la ruta aún más atractiva para nuevas hormigas. Como al principio el rastro de feromona no es muy fuerte, las primeras hormigas que siguen el camino hacia la comida pueden desviarse y encontrar atajos dentro del mismo, con lo que se perfecciona la *solución* propuesta.

Eventualmente la mayor parte de hormigas siguen el mejor camino hasta agotar la fuente de alimento.

Sin embargo, si por algún azar, una hormiga encuentra el "camino largo" antes de que otra encuentre el corto (lo cual es probabilísticamente posible), entonces la colonia adoptará el camino largo y "convergerá" a una solución que no es óptima. El método no es infalible, pero la mayoría de las veces el camino corto es el favorecido porque también es el que tiene mayor probabilidad de ser encontrado mediante una búsqueda aleatoria.

En general se puede decir que las *hormigas* tienen en común, las *feromonas* y un *entorno en el cual se desarrolla la labor* de la colonia.

Si se desea transplantar el comportamiento de hormigas reales a un entorno cibernético, se debe proveer a las "hormigas artificiales" de vida, espacio, objetivos y reglas. Estas hormigas, a diferencia de las reales, tendrán cierta memoria, no serán totalmente ciegas y vivirán en un ambiente donde el tiempo es discreto. De hecho las hormigas (agentes)

son programas que corren sobre un sistema adecuado que puede ser una computadora o red de computadoras donde estos programas cobran vida en los momentos en que su código está siendo ejecutado.

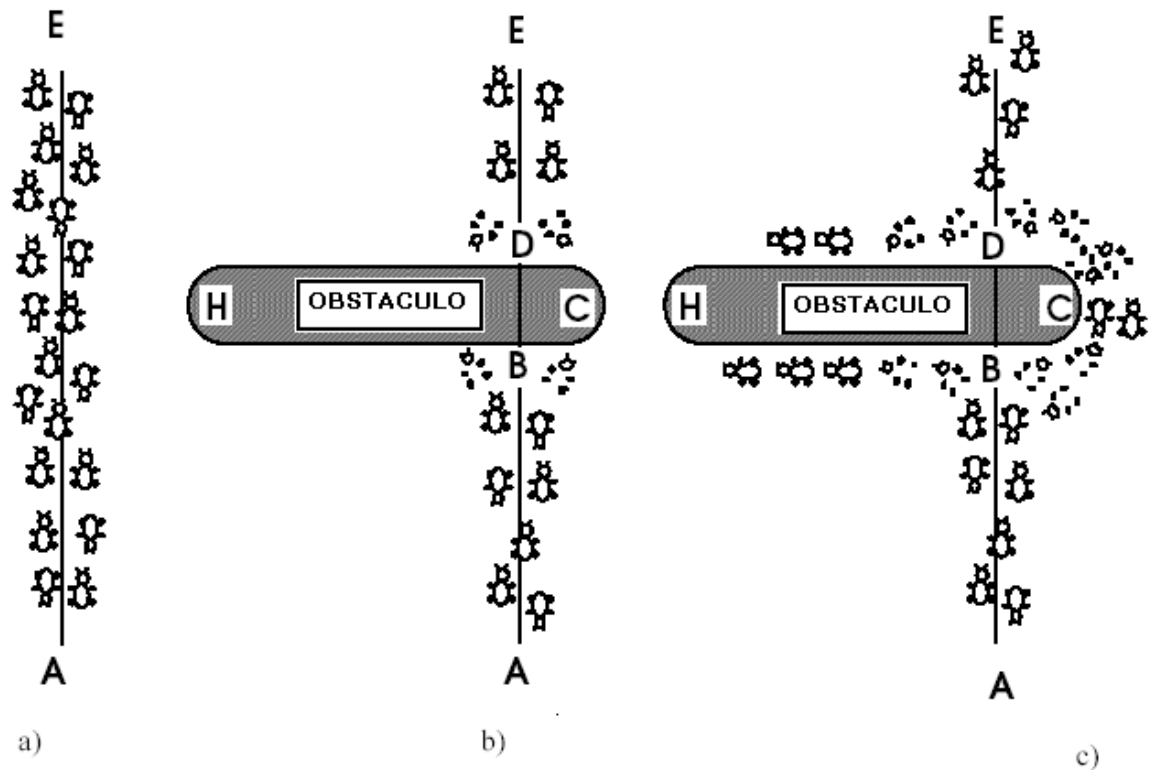
El espacio es la memoria de la computadora o computadoras involucradas y los objetivos dependen del problema a resolver; las reglas de interacción local son las decisiones embebidas en el programa de los agentes que les indican cómo obtener información del universo (la memoria) y reaccionar a ella, tanto ejecutando alguna acción como marcando al mismo tiempo el universo para transmitir información a futuros agentes que visiten la misma región.

Así pues, las hormigas son programas casi independientes que tienen un objetivo e interactúan con el universo, que es alguna estructura de datos adecuada que provee información al mismo tiempo que es susceptible de ser modificada y por lo tanto también es depositaria de información.

### **2.1. ANT SYSTEM (AS):**

Resulta fascinante entender como animales casi ciegos, moviéndose aproximadamente al azar, pueden encontrar el camino más corto desde su nido hasta la fuente de alimentos y regresar.

En la Figura 2.1 se puede observar detalladamente el comportamiento de la colonia de hormigas:



**Figura 2.1** Comportamiento de una Colonia de Hormigas en busca de alimento.

**a)** Las hormigas siguen una trayectoria entre los puntos A y E.

**b)** Un obstáculo está interpuesto; las hormigas pueden elegir rodearlo siguiendo una de las dos diversas trayectorias con igual probabilidad.

**c)** En la trayectoria más corta se coloca más feromona.

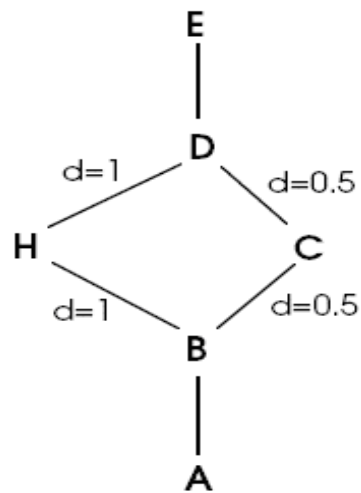
Inicialmente existe una trayectoria a lo largo de la cual las hormigas están caminando (desde la fuente de alimento A hasta el punto E y viceversa. Figura. 2.1a).

Un obstáculo aparece repentinamente y corta la trayectoria. Así que en la posición B las hormigas que caminan desde A hacia E (o las que están en la posición D que caminan en dirección opuesta) tienen que decidir si dar

vuelta a la derecha o a la izquierda (Figura. 2.1b) con igual probabilidad de elección, ya que no hay feromonas anteriores depositadas en las dos trayectorias alternativas). Las hormigas que deciden dar vuelta a la derecha por la trayectoria BCD donde el camino es más corto que en la trayectoria BHD, alcanzarán D antes que las primeras hormigas que escogieron seguir la trayectoria BHD (figura. 2.1c).

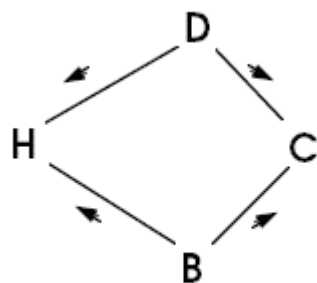
El resultado es que una hormiga que vuelve desde E hacia D encontrará un rastro más fuerte en la trayectoria DCB, causado por la mitad de todas las hormigas que por el azar decidieron acercarse al obstáculo vía DCBA y por las ya llegadas que venían por la trayectoria BCD, por lo tanto ellas preferirán (en probabilidad) la trayectoria DCB en lugar de la trayectoria DHB. Por consiguiente, el número de hormigas que siguen la trayectoria BCD por unidad de tiempo será más alto que el número de hormigas que siguen la trayectoria BHD. Esto hace que la cantidad de feromonas en la trayectoria más corta crezca rápidamente que en la más larga y por lo tanto la probabilidad con la cual cualquier hormiga sola elige la trayectoria para seguir adelante se predispone rápidamente hacia la más corta. El resultado final es que todas las hormigas elegirán rápidamente la trayectoria más corta.

Para un mejor entendimiento de este sistema ver la figura 2.2a, donde se puede suponer que las distancias entre D y H, entre B y H y entre B y D por la vía C son iguales a 1 y C es la mitad colocada en el camino entre D y B. Ahora se debe considerar qué sucede en los intervalos regulares discretos de tiempo ( $t=0, 1, 2\dots$ ).



**Figura 2.2a. Distancias entre los puntos del sistema de colonia de hormigas.**

Si se supone que 30 nuevas hormigas vienen a B desde A y 30 a D desde E cada unidad de tiempo, cada hormiga camina a una velocidad de 1 por unidad de tiempo y mientras camina coloca en el tiempo  $t$  un rastro de feromona de intensidad 1, que, para hacer el ejemplo más simple, se evapora total e instantáneamente en la mitad del intervalo de tiempo sucesivo  $(t+1, t+2)$ .



**Figura 2.2b. 15 hormigas de cada nodo van hacia H y 15 hacia C.**

En la figura 2.2b, para  $t=0$  no hay algún rastro (omitiendo el paso de E a D y A a B) todavía, pero 30 hormigas están en B y 30 en D. Su opción

sobre cual camino escoger es totalmente al azar. Por lo tanto, un promedio de 15 hormigas de cada nodo irán hacia H y 15 hacia C.

En  $t=1$  las 30 nuevas hormigas que vienen a B desde A encuentran un rastro de intensidad 15 en la trayectoria que conduce a H, puesto por las 15 hormigas que fueron por el camino desde B hacia H y un rastro de intensidad 30 en la trayectoria que conduce a C, obtenido como la suma de los rastros puestos por las 15 hormigas que fueron por el camino de B a D y por las 15 hormigas que alcanzaron a B viniendo desde D, ambos vía C. La probabilidad de elegir una trayectoria por lo tanto se predispone, de modo que el número previsto de hormigas que van hacia C sea el doble de los que van hacia H: 20 contra 10 respectivamente. Igualmente esto es cierto para las 30 hormigas nuevas en D que vienen desde E.

Este proceso continúa hasta que todas las hormigas elijan eventualmente la trayectoria más corta.

## **2.2. VENTAJAS DE ANT SYSTEM (AS):**

- Es un algoritmo natural puesto que se basa en el comportamiento de las hormigas al establecer el camino mas corto desde su colonia hasta la fuente de alimento.
- Es paralelo y distribuido puesto que trata de una población de agentes que se mueven simultáneamente, de manera independiente y sin algún supervisor.
- Es cooperativo puesto que cada agente elige una trayectoria en base a la información de los rastros de feromonas puestos por los otros agentes que han seleccionado previamente la misma trayectoria.

- Es versátil ya que puede ser aplicado a versiones similares del mismo problema; por ejemplo, hay una extensión directa del problema del agente viajero (TSP) al problema asimétrico del agente viajero (ATSP).
- Es robusto ya que puede ser aplicado, con algunos mínimos cambios, a otros problemas de optimización.

### **2.3. APLICACIONES DEL ALGORITMO AS:**

#### **2.3.1. Problema del Agente Viajero (PAV):**

**Problema PAV:** Dadas  $N$  ciudades y las distancias entre estas idénticas en ambos sentidos, se desea encontrar el camino más corto que permita recorrer las  $N$  ciudades, regresando al punto de partida, sin pasar por una misma ciudad más de una vez.

Marco Dorigo [3] publicó tres variantes del algoritmo AS para la resolución del Problema del Agente Viajero - PAV - (*TSP - Traveling Salesman Problem*) que se diferencian simplemente en el momento y la manera de actualizar una matriz de feromonas:

- *Ant-density*: Con actualización constante de las feromonas por donde pasa una hormiga.
- *Ant-quantity*: Con actualización de feromonas inversamente proporcional a la distancia entre 2 ciudades recorridas.
- *Ant-cycle*: Con actualización de feromonas inversamente proporcional al trayecto completo, al terminar un recorrido. Este último presentó mejores resultados y las siguientes investigaciones se centraron en él.

Cuando se va a aplicar el algoritmo AS al Problema del Agente Viajero se procede creando una estructura de datos que liste las ciudades a visitar, las rutas entre ellas y la cantidad de feromona depositada en cada ruta. Al inicio esta cantidad es pequeña y la misma en cada ruta.

Las hormigas se distribuyen aleatoriamente en este universo y cada una tiene una lista de las ciudades a visitar. Su objetivo es visitar todas las ciudades de manera que ninguna ciudad se visite más de una vez, con excepción de la primera puesto que se comienza y termina en ella.

La mejor solución es aquella que produce un circuito de longitud mínima.

Al encontrarse en una ciudad la hormiga tiene a su disposición la siguiente información:

- La lista que lleva consigo, que le indica qué ciudades aún no visita.
- La información local que le indica a qué ciudades se puede acceder inmediatamente desde ésta, cuáles son las distancias y cuántas hormigas ya han tomado cada ruta.
- Una hormiga estará tentada a seguir una ruta corta hacia alguna ciudad no visitada, pero esto compite con su tendencia a transitar por caminos que ya han sido frecuentados por otras hormigas. Es decir que la probabilidad de tomar una ruta (hacia una ciudad no visitada) es inversamente proporcional a la distancia y directamente proporcional a la cantidad de feromona depositada en la ruta.

➤ Solución Matemática:

Inspirado en el comportamiento de las hormigas, Dorigo [3] propone el algoritmo *Ant System (AS)*, presentado a continuación:

Se considera un conjunto de  $MAXC$  ciudades que deben ser visitadas una sola vez con el objeto de encontrar la longitud mínima de recorrido y se define  $bi(t)$  con  $(i=1, \dots, MAXC)$  como el número de hormigas en la ciudad



$i$  en el tiempo  $t$ . Por consiguiente, el número total de hormigas  $MAXH$ , estará dado por la ecuación 2.1:

$$MAXH = \sum_{i=1}^{MAXC} bi(t)$$

**Ecuación 2.1**

Para satisfacer la restricción de que una hormiga visite todas las ciudades una sola vez, se asocia a cada *hormiga*  $k$  una estructura de datos llamada lista tabú (**tabuk**), que guarda las ciudades ya visitadas por dicha hormiga. Una vez que todas las ciudades hayan sido recorridas, el trayecto o tour (ciclo) es completado, la lista tabú se vacía y nuevamente la hormiga está libre para iniciar un nuevo recorrido. Se define como **tabuk(s)** al elemento  $s$ -ésimo de la lista tabú de la *hormiga*  $k$ .

El punto de partida para la solución del problema PAV es la matriz de distancias  $D = \{d_{ij}$ , distancia entre las ciudades  $i, j\}$ ; a partir de esta matriz se calcula la visibilidad  $\eta_{ij} = 1/d_{ij}$ .

Igualmente, se denota como  $\tau = \{\tau_{ij}\}$  a la matriz de feromonas que va a ser utilizada para consolidar la información que va siendo recogida por las hormigas; en otras palabras, la cantidad de feromona que se va almacenando entre cada par de ciudades  $(i, j)$ .

Durante la ejecución del algoritmo *Ant System*, cada *hormiga* elige en forma probabilística la próxima ciudad a visitar, realizando un cálculo de probabilidad que es función de la distancia y la cantidad de feromona

depositada en el arco que une a las ciudades origen-destino, esto es dado por la ecuación 2.2:

$$P_{ij}(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \times [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{j \in Tabuk} [\tau_{ij}(t)]^\alpha \times [\eta_{ij}]^\beta} & \text{si } j \notin Tabuk \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases}$$

**Ecuación 2.2**

donde  $\alpha$  y  $\beta$  son constantes que expresan la importancia relativa del sendero de feromonas y la distancia entre las ciudades respectivamente. Así, un alto valor de  $\alpha$  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  $\beta$  es muy alto, una hormiga tiende a elegir la ciudad más cercana. Se resalta aquí que cada hormiga debe realizar un tour legal o sea, no puede viajar a una ciudad ya visitada con anterioridad hasta que complete su tour.

En el instante  $t$  las *hormigas* se mueven de una ciudad a la siguiente (movimiento llamado iteración), en donde se encontrarán en el instante  $t+1$ . Lógicamente al cabo de  $(MAXC - 1)$  iteraciones, las hormigas han visitado la última ciudad y están en condiciones de regresar a su ciudad

origen, posiblemente para actualizar la matriz de feromonas con la información recogida en el tour completo.

La matriz  $\tau_{ij}(t)$  que especifica la intensidad de las feromonas del arco  $(i, j)$  en el tiempo  $t$  se actualiza según la ecuación 2.3:

$$\tau_{ij}(t+1) = \rho \times \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij}(t, t+1)$$

**Ecuación 2.3**

donde  $\rho$  es el coeficiente de persistencia de las feromonas, de forma tal que  $(1 - \rho)$  representa la evaporación de la sustancia entre  $t$  y  $t+1$  mientras que la cantidad de feromona depositada en un arco  $(i, j)$  en dicho intervalo de tiempo, está dada por la ecuación 2.4:

$$\Delta \tau_{ij}(t, t+1) = \sum_{k=1}^{MAXH} \Delta \tau_{ij}^k(t, t+1)$$

**Ecuación 2.4**

con  $\Delta \tau_{ij}^k(t, t+1)$  representando la cantidad de feromona depositada en el arco  $(i, j)$  por la hormiga  $k$ -ésima entre  $t$  y  $t+1$ .

El proceso se repite iterativamente hasta que se cumpla algún criterio de terminación. El proceso termina si el contador de tour alcanza un número máximo de ciclos  $NCMAX$  (definido por el usuario) o todas las hormigas realizan el mismo tour. En este último caso, es evidente que las hormigas han dejado de buscar nuevas soluciones, lo que constituye un criterio de convergencia del algoritmo.

La cantidad de feromonas depositada en el trayecto es proporcional a la distancia del tour completo encontrado y por lo tanto, es de esperar una

apreciable capacidad de búsqueda de soluciones globales. Para esto, se realiza el siguiente cálculo de  $\Delta\tau_{ij}^k$  por medio de la ecuación 2.5:

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{L_k} & \text{si la hormiga k-esima camina por el arco (i,j)} \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases}$$

**Ecuación 2.5**

donde  $Q$  es una constante y  $L_k$  es la longitud del tour completo realizado por la hormiga  $k$ .

- Ant Quantity:

En esta variante del algoritmo la hormiga  $k$  que viaja desde la ciudad  $i$  a la ciudad  $j$ , deposita en el trayecto una cantidad de feromonas inversamente proporcional a la distancia  $d_{ij}$ , esto es dado por la ecuación 2.6:

$$\Delta\tau_{ij}^k(t, t+1) = \begin{cases} \frac{Q_1}{d_{ij}} & \text{si la hormiga k-esima camina por el arco (i,j) entre t y t+1} \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases}$$

**Ecuación 2.6**

donde  $Q_1$  es una constante.

- Ant Cycle:

A diferencia del *Ant Quantity*, en esta variante la cantidad de feromonas depositada en el trayecto es proporcional a la distancia del tour completo encontrado y por lo tanto, es de esperar un rendimiento superior en la capacidad de búsqueda de soluciones globales. Esta variante realiza el siguiente cálculo por medio de la ecuación 2.7:

$$\Delta \tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q_2}{L_k} & \text{si la hormiga k-esima camina por el arco (i,j)} \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases}$$

**Ecuación 2.7**

donde  $Q_2$  es una constante y  $L_k$  es la longitud del tour completo realizado por la hormiga  $k$ .

➤ Implementación:

Es importante saber que una colonia que se programa para resolver el PAV puede correr en un único computador, mientras que otra que busca información en la Internet podría constar de hormigas que físicamente se trasladan (haciendo copias de sí mismas en otras máquinas) de máquina en máquina para inspeccionar contenidos y al hallar la información de

interés, regresan al computador anfitrión marcando el camino para que otras puedan seguirlo.

Para la implementación del sistema en el problema PAV se aplica una búsqueda local donde el paralelismo es inherente al funcionamiento del algoritmo, es decir, un conjunto de agentes cooperativos intercambian información de manera indirecta, pero independientes unos de otros.

Se presentan dos soluciones que se han propuesto como estrategias de paralelización, una implementación paralela síncrona y otra parcialmente asíncrona que utilizan barrera de sincronización y se resumen a continuación:

a) Implementación paralela síncrona:

Un proceso inicial (*master*) levanta a un conjunto de procesos hijos, uno para cada hormiga. Después de distribuir la información inicial acerca del problema, cada proceso inicia la construcción del camino y calcula la longitud del tour encontrado.

Después de terminar este procedimiento, los resultados son enviados al master, quien se encarga de actualizar el nivel de feromonas y calcular el mejor tour encontrado hasta ese momento. Se inicia una nueva iteración con el envío de la nueva matriz de feromonas.

b) Implementación parcialmente asíncrona:

Se propone reducir la frecuencia de la comunicación, para esto, cada hormiga realiza un cierto número de iteraciones del algoritmo secuencial, independientemente de las otras hormigas. Solo después de estas iteraciones locales, se realiza una sincronización global.

Siendo la segunda opción la implementación que demostró los mejores resultados se resuelve el problema en un ambiente totalmente asíncrono, en una red de computadoras personales de uso no exclusivo, utilizando una propuesta paralela de *Ant System* que utiliza agentes computacionales muy simples llamados *hormigas que* trabajan en cada procesador de la red. Cada uno de estos agentes va construyendo su tour en el computador en el que se encuentra, con la única restricción de no viajar a una ciudad ya visitada con anterioridad y dejando en la matriz de feromonas un rastro por los caminos ya transitados, sin una comunicación directa con las demás hormigas. Cada agente explora el espacio de soluciones, comunicando en forma asíncrona a los demás procesadores los resultados más alentadores, consolidando la información recogida en *matrices de feromonas* propias de cada procesador, que servirán para guiar la búsqueda de mejores soluciones en cada uno de los procesadores de la red, sin necesidad de sincronizar los procesos.

El asincronismo elimina los tiempos muertos producidos por la espera en la sincronización de la comunicación debido al importante cuello de botella que representa la sincronización en las implementaciones paralelas. Esta solución propone que las hormigas migren de un procesador a otro en forma asíncrona, respetando políticas migratorias definidas por los siguientes parámetros:

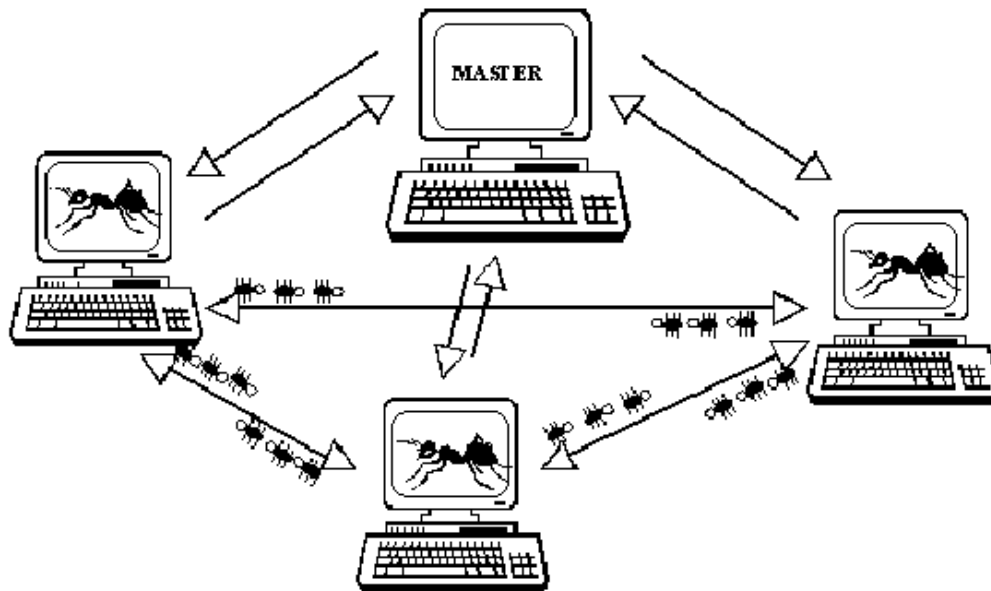
- *El intervalo de migración:* Establece cada cuantos ciclos cierta cantidad de hormigas migrarán de un procesador a otro.
- *La tasa de migración:* Indica cuantas hormigas han de comunicarse a los otros procesadores destino cuando se cumpla el intervalo de migración. Generalmente solo migra la mejor solución.

- *El criterio de selección:* Determina la política a seguir para la selección de las hormigas que han de migrar. Puede ser que se elijan al azar o solo las mejores, siendo esta última la opción que ha dado resultados óptimos.

Cuando cada procesador recibe a las hormigas migrantes de otros procesadores (Figura 2.3), estas compiten con la colonia local de hormigas a fin de que solamente la mejor solución de todas actualice la matriz de feromonas.

Se puede decir que esta implementación realiza corridas independientes del algoritmo en cada procesador hijo, el cual utiliza su propia matriz de feromonas, lo que resulta en procesadores independientes (no sincronizados) con diferentes características de búsqueda, dado que en general las matrices de feromonas son diferentes en cada procesador, pero que trabajan en equipo al compartir buenas soluciones que llevan en general a la convergencia de las matrices de feromonas a una misma solución global.





**Figura 2.3. Estrategia de paralelización**

### **2.3.2 Sistema de Control De Red Basado en Hormigas y Manejo de Agentes:**

Esta aplicación del algoritmo AS es realizada por David Legge y Meter Baxendale en el Centro para redes de Telecomunicaciones de la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Dirham en Gran Bretaña [4].

Se construye un sistema de enrutamiento basado en hormigas y se encuentran y demuestran estrategias óptimas de encaminamiento bajo condiciones estáticas, ya que si se realiza la introducción de situaciones dinámicas de tráfico sobre la red, las hormigas no siempre despliegan comportamientos óptimos debido a la baja probabilidad de encontrar rutas no óptimas.

Se propone utilizar un agente en cada nodo de la red a utilizar, para que este pueda adaptarse a las condiciones cambiantes en la red. Esto puede

lograrse manipulando los parámetros con los cuales las hormigas funcionan, puesto que el agente está clasificando diversos estados y las acciones asociadas que lo satisfacen de la mejor manera posible.

En la solución propuesta, una ruta razonable que no necesariamente es la óptima se encuentra muy rápidamente, en esta ruta la cantidad de tráfico podría ser aceptado. El tiempo inicial requerido para esto, antes de que se haya encontrado el equilibrio, debe ser tan corto como sea posible. Puesto que la predicción es esencialmente una tarea infructuosa, el papel de cada agente empleado para adaptar el sistema de control de una red debe ser el de reaccionar lo más rápidamente ante posibles situaciones.

La ruta elegida por las hormigas es la que tiene la probabilidad más alta y esta ruta será idealmente la mejor, pero generalmente hay algún retraso inevitable en la respuesta. Se debe considerar también que la conmutación constante de rutas puede causar problemas en el reordenamiento de los datos en el extremo de recepción si llega fuera de secuencia.

Para un mejor entendimiento se pueden considerar dos nodos conectados por dos rutas, uno con acoplamiento directo y el otro con una ruta indirecta implicando muchos saltos. Todo el tráfico será enviado por la ruta directa, cuando esta ruta se congestiona llevará un tiempo largo para que las probabilidades cambien y la hormiga pueda realizar un cambio de ruta; en este caso sería ventajoso que las hormigas tengan parámetros adaptables y esto requerirá de un control inteligente. Se asume la ruta más corta con una probabilidad del 80% comparado con un 20% para la más larga. Si cada hormiga tiene que cambiar la probabilidad, tomará diez a quince hormigas para igualar las probabilidades de las rutas;

durante este tiempo es probable que el tráfico pueda ser desechado o pueda causar aún más congestión con esquemas de retransmisión.

El objetivo es demostrar que un agente inteligente se puede utilizar para modificar los parámetros asociados con Ant System y poder lograr la convergencia dando respuesta rápida a los cambios de las condiciones dentro de la red.

Los parámetros se cambian a través de un nodo, es decir, un agente de cada nodo controla los parámetros usados en este. Esto significa que en esta etapa, los agentes están actuando independientemente uno de otro, aunque Ant System aplica una forma implícita de comunicación entre agentes. Esto se puede describir como un sistema de control completamente distribuido, aunque hay comunicación inherente entre los nodos por medio de las hormigas. Un agente podría observar cómo otros agentes están actuando, comprobando los parámetros llevados por las hormigas que se originan de otros nodos.

El Sistema usado se basa en muchas entidades simples que actúan exhibiendo un comportamiento complejo en macroescala. Las hormigas son paquetes pequeños de datos, que se mantienen tan simples como sea posible. Dentro de la hormiga se lleva la fuente, el destino, la cantidad de feromona y la tasa de deposición. El código que lleva cada hormiga, es procesado por cada nodo; esto reduce al mínimo la cantidad de control de tráfico requerido, que es una consideración importante en una red real.

El índice de producción de hormigas es un parámetro explicativo de sí mismo ya que en la generación de cada hormiga se da un destino que es elegido de manera uniformemente aleatoria según los nodos conocidos de

la red. Cada hormiga también se califica con una cantidad inicial de feromona y de una tasa de deposición (juntas describen su longevidad). Una vez que esté generado esto en cada nodo a lo largo del viaje, se selecciona el siguiente salto para la generación de un número uniformemente aleatorio de hormigas y la consulta de la tabla local de probabilidad asociada al destino final de estas. Cuando la hormiga llega a un nodo deposita una feromona, teniendo en cuenta que esta no ha vuelto a su fuente, si esto pasa la hormiga se desecha. La cantidad de feromona dejada por la hormiga es un porcentaje simple (definido por la tasa de deposición) de la cantidad actual que la hormiga tiene. Antes de que esto se agregue a la tabla de probabilidad (tabla de feromonas) la cantidad de feromona es multiplicada por el tamaño (relativo) disponible del tráfico para el enlace usado por la hormiga. La cantidad resultante de feromonas se agrega a la tabla local con respecto a la fuente de la hormiga, es decir la hormiga refuerza la ruta de vuelta, no la ruta que está tomando actualmente.

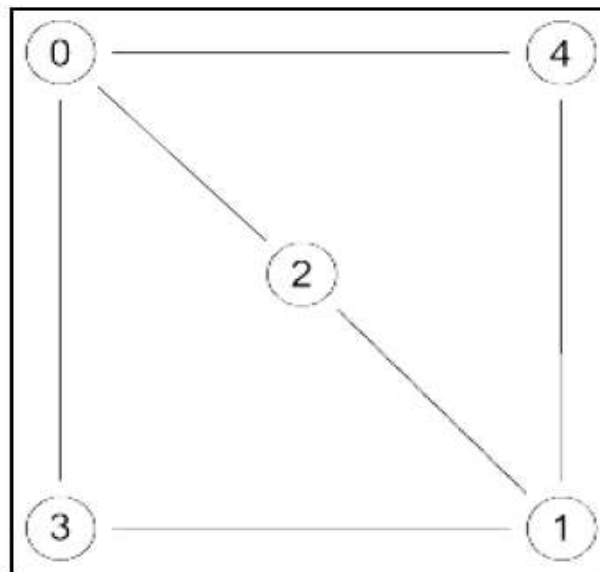
Un agente está presente en cada nodo y supervisa una colonia de hormigas en ese nodo. Este agente recibe informes de la colonia regularmente cuando ocurre un cambio de la ruta. También es informado de todos los parámetros asociados a las hormigas y conoce el valor de umbral para el cambio de la ruta, teniendo la cualidad de poder ajustar todos estos valores según sea necesario. Además este agente indica la probabilidad actual de la ruta preferida, así como su desviación.

Es importante aclarar que Ant System es una entidad separada y puede funcionar con o sin el agente ya que este proporciona solo un papel de supervisión y control que es la idea principal de este sistema [4].

El simulador que se utilizó es el Network Simulator [4] que se usa para modelar las redes TCP/IP. Estas redes son sin conexión; es decir, los paquetes de datos se transmiten sin establecer primero una ruta definida; esto significa que en cada salto los paquetes están encaminados según la mejor ruta instantánea y los paquetes con igual flujo no siguen necesariamente la misma trayectoria.

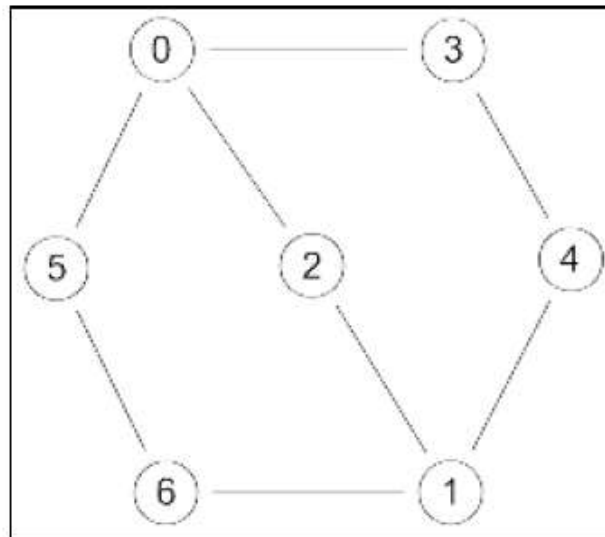
A continuación se presentan las dos redes que fueron simuladas (Fig 2.4 a,b):

➤ RED 1:



**Figura 2.4a. Diagrama de la red con numerosas rutas más cortas.**

➤ RED 2:



**Figura 2.4b. Diagrama de la red con una ruta más corta definida.**

La red 1 que se muestra en la figura 2.4a es una red simple de cinco nodos cuya característica importante es que hay tres rutas largas iguales entre el nodo 0 y el nodo 1 (0-2-1, 0-3-1, 0-4-1), una de las cuales es congestionada ocasionalmente.

La red 2 cuya topología se muestra en la figura 2.4b, existe cuando hay una ruta mas corta distinta entre dos nodos así como también rutas alternativas más largas sin compartir algún enlace. En la parte en que la ruta más corta se congestiona, las hormigas deben reaccionar lo más rápidamente posible a la congestión y deben superar una cantidad grande de inercia representada por la alta probabilidad construida por la ruta más corta ya que esta inercia es mayor que la de la red 1.

Ambos escenarios de la red requieren transmitir ciertos datos de usuario en tiempo real; este será transportado desde el nodo 0 al nodo 1 en

ambas topologías de la red y el tráfico será ofrecido a la red continuamente para una duración de 25s.

Después de realizar varias pruebas se demuestra que Ant System es una buena opción para encontrar soluciones óptimas de enrutamiento bajo condiciones estáticas por medio de una solución que utiliza un agente que controla y gestiona, para poder adaptarse a las condiciones cambiantes de la red, modificando los diferentes parámetros que variarán la operación del algoritmo.

La introducción de este agente ha demostrado que produce un gran potencial para que se mejoren los resultados en la estabilidad de la red, pérdidas de tráfico y otros inconvenientes de la comunicación. Ambos esquemas fueron comparados a través de ideas humanas estratégicas con un completo conocimiento de la situación de la red, que es idealmente óptima. Con un agente estratégico en cada nodo se representa un sistema de control de red completamente distribuido pero todavía hay un gran potencial para investigar en el área de las comunicaciones y es probable mejorar mas adelante los resultados encontrados en estos sistemas simulados como el que se muestra, el cual representa un híbrido entre el control centralizado y distribuido que es a menudo la solución más óptima.

#### **2.4. OTRAS VARIACIONES DEL PARADIGMA AS:**

Dorigo y Gambardella trabajaron en varias versiones extendidas del paradigma AS [3]. Entre estas están:

- *Ant-Q: Es un híbrido entre AS y Q-learning, un conocido algoritmo de aprendizaje con realimentación positiva.*

- *Ant Colony System (ACS)*: Es una extensión de *Ant-Q* que presenta mejoras del algoritmo en tres aspectos principales que son:
  - Una regla de transición de estados, con la que se ofrece un balance entre la exploración de nuevos caminos y explotación del conocimiento acumulado acerca del problema.
  - Una regla de actualización global que permite actualizar la matriz de feromonas solo con el mejor tour encontrado hasta el momento.
  - Una regla de actualización local que permite a todas las hormigas actualizar la matriz de feromonas al terminar su tour. En esta regla se aplica además una búsqueda local que intenta reducir la longitud encontrada intercambiando los arcos, realizando tres cortes en un tour encontrado e intercambiando las ciudades destino, evitando de este modo invertir el sentido de las ciudades visitadas.
  
- *Max-Min Ant System (MMAS)*: Permite actualizar la matriz de feromonas solo a la hormiga con el mejor tour. Esto acelera la convergencia, pero puede llevar a estancamientos en soluciones subóptimas.

Con el fin de evitar convergencias prematuras, propone poner un límite máximo y mínimo dentro del cual puede variar la cantidad de feromonas. Esta aplicación realizada con búsqueda local mejora notoriamente los resultados experimentales.



### **3. REDES WDM Y EL PROCESO DE ENRUTAMIENTO**

#### **INTRODUCCION**

La tecnología actual avanza de acuerdo a las necesidades con que se va enfrentando el hombre en su vida cotidiana como en el caso de las comunicaciones vía fibra óptica. Esta se encuentra en una etapa de evolución, desde su entrada en el mercado comercial de los pasados años 70's y ha madurado encontrando una gran aceptación en las telecomunicaciones, principalmente en las redes de datos.

Las principales aplicaciones en telecomunicaciones incluyen sistemas "trunking" terrestres para comunicación entre diferentes oficinas o áreas de trabajo y largos sistemas de transporte submarino y entre las aplicaciones de datos se encuentran las Redes de Áreas Locales (LAN's - Local Area Network), una gran cobertura de Redes de Área Metropolitana (MAN's - Metropolitan Area Network) y Redes de Área Extensa (WAN's - Wide,Area Network).

Actualmente, las comunicaciones ópticas están ganando más terreno debido al creciente campo de investigación que estas representan y las grandes ventajas hasta ahora encontradas, como lo son las altas velocidades de transmisión del orden de gigabits (Gb/s) y el buen desempeño ante la probabilidad de error. Se puede hablar de más de cinco generaciones de comunicaciones ópticas donde se han resuelto algunos problemas intermedios relacionados con las técnicas y materiales de construcción de la fibra, pero aún se presentan inconvenientes que

limitan la comunicación los cuales corresponde a la interfaz electro-óptica y específicamente al procesamiento de la información.

En este capítulo se tratan las redes ópticas como una tecnología fundamental de nueva generación de redes de transmisión de datos y en particular, la *multiplexación por división en longitud de onda* (WDM - Wavelength División Multiplexing) ya que por medio de esta se logra aprovechar el enorme ancho de banda que ofrece el uso de la fibra óptica como medio físico y más concretamente en las llamadas *WRONs* (*Wavelength Routed Optical Networks*) o Redes con Enrutamiento por Longitud de Onda. Estas redes son una opción especialmente valorada para redes de área amplia o regional porque su concepto clave es el *camino de luz* que se define como un enlace totalmente óptico establecido entre un par de nodos de la red no necesariamente adyacentes [5], así, la transmisión entre los nodos finales del camino de luz, no requiere procesado electrónico ni almacenamiento en buffers en los nodos intermedios, ya que cada camino de luz utiliza una longitud de onda determinada y dos caminos pueden usar la misma longitud de onda siempre y cuando no compartan un enlace físico, por lo tanto, es posible la reutilización de la longitud de onda.

Finalmente, con el análisis de este capítulo se puede tener una base más clara sobre el procesamiento de la información en redes ópticas y entender porque los algoritmos basados en la naturaleza anteriormente descritos pueden ser una solución a los problemas de asignación de ruta y de longitud de onda que tienen las redes WDM, ya que estos ofrecen un mecanismo de búsqueda eficiente que en futuro próximo puede llegar a constituir la mejor forma de implementar modelos basados en fenómenos naturales y llegar a aplicarlos en el campo de las telecomunicaciones para la solución de posibles problemas que se presenten en un futuro.

### **3.1. REDES OPTICAS Y WDM:**

Una red óptica generalmente se divide en un plano de transporte, un plano de gestión y un plano de control.

El plano de transporte proporciona la transmisión óptica y la amplificación de las señales, el plano de gestión proporciona mecanismos de configuración, gestión de fallos y de prestaciones así como funciones de seguridad y provisión de conexiones y por último, el plano de control que se encarga de facilitar la configuración rápida y eficiente de las conexiones dentro de la capa de transporte, reconfigurar o modificar las conexiones previamente establecidas y realizar funciones de protección y restablecimiento en caso de fallos.

Actualmente el gran atractivo que poseen los sistemas de comunicaciones ópticas se debe a la capacidad que posee la fibra para transportar grandes cantidades de información sobre trayectos extensos sin utilizar repetidores. Este es un medio de transmisión que presenta un ancho de banda el cual excede tanto a la velocidad a la cual puede ser accesada por los medios actuales, como a la tasa de bit a la que será usada.

Operando entre un rango de 1.3 a 1.6  $\mu\text{m}$ , la fibra presenta atenuaciones en la transmisión del orden de los 0.2 dB/Km, haciendo posible implementar sistemas de transmisión de larga distancia cuya separación entre repetidores puede alcanzar los 200 Km, reduciendo de esta forma los costos y complejidad del sistema. En esta región de bajas pérdidas una fibra óptica monomodo posee un ancho de banda superior a 25 THz.

De esta manera se puede usar este extenso ancho de banda para realizar funciones orientadas a redes y sistemas, tales como enrutamiento, conmutación y servicios.

Para poder aprovechar todo este ancho de banda disponible se pueden multiplexar numerosos canales a diferente longitud de onda sobre una misma fibra, técnica que se conoce como Multiplexación por División de Longitud de Onda "WDM-Wavelength Division Multiplexing".

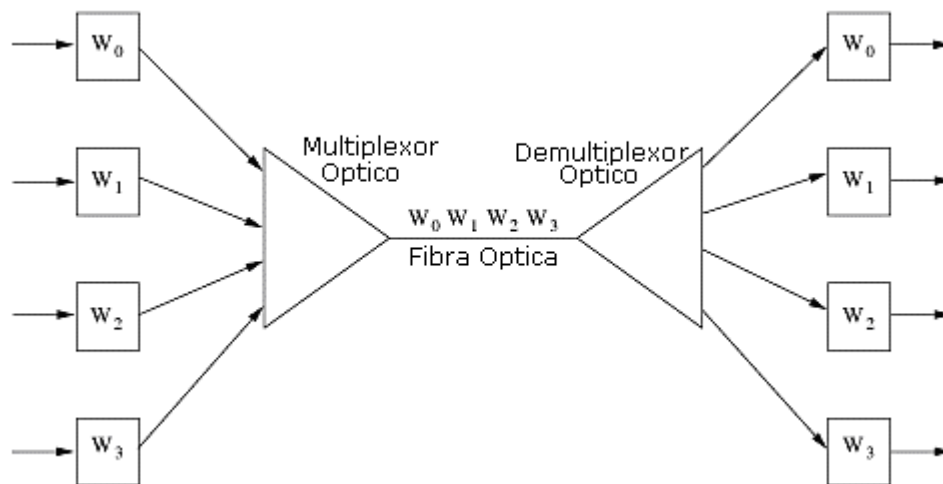
La premisa básica del tema en redes ópticas sobre la multiplexación por división de longitud de onda (WDM) es, que más y más usuarios han comenzado a usar las redes de datos y como sus patrones de uso se desarrollan incluyendo más servicios y mayor ancho de banda para todas las aplicaciones de las redes de trabajo tales como búsqueda de datos en Internet, aplicaciones java, video conferencia, etc., emerge una aguda necesidad sobre el alto tráfico de información que se transporta en el ancho de banda, cuyas capacidades van mucho mas allá que las actuales redes de altas velocidades pueden proporcionar.

### **3.1.1. Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM):**

Se puede decir que la clave para diseñar redes de comunicaciones ópticas y explotar el gran ancho de banda de la fibra, es introducir concurrencia (simultaneidad) entre transmisiones múltiples de usuario en las arquitecturas y los protocolos de red.

Específicamente, WDM es una técnica de multiplexación analógica donde las señales originales son alternadas en frecuencias para ocupar diferentes porciones del espectro en el medio de transmisión. Esta es la

tecnología de multiplexación actual favorita para comunicaciones de largas distancias en redes ópticas, puesto que todo el equipo de usuario final necesita funcionar solamente en un canal WDM, el cual se puede elegir arbitrariamente alcanzando la máxima velocidad de procesamiento electrónica; es importante aclarar que solamente canales múltiples WDM de diversos usuarios finales se pueden multiplexar en una misma fibra (Figura 3.1).



**Figura 3.1 Multiplexación por División de Longitud de Onda.**

La Multiplexación por división de Longitud de Onda (WDM) es un aprovechamiento que puede explotar la enorme incompatibilidad opto-electrónica en el ancho de banda, por lo tanto, los proveedores principales dedican actualmente todos sus esfuerzos significativos para desarrollar y aplicar tecnologías WDM en sus negocios.

Mediante WDM, el espectro óptico de transmisión está dividido en un número de bandas de longitud de onda "nonoverlapping" (que no se superponen o traslapan), donde cada longitud de onda apoya un solo

canal de comunicación y permite que los canales múltiples WDM coexistan en una sola fibra.

El comienzo de WDM fue al final de los 80's usando dos longitudes de onda extensamente espaciadas en las regiones de 1310 nm y 1550 nm (o 850 nm y 1310 nm) llamada WDM Banda Ancha. A inicios de los 90's se consideró una segunda generación de WDM llamada WDM Banda Estrecha en la cual se utilizaron de dos a ocho canales. Estos canales fueron espaciados en un intervalo cercano a los 400 Ghz en la ventana de 1550 nm. A mediados de 90's, los sistemas densos WDM llamados DWDM emergen con dieciséis a cuarenta canales y estaban espaciados a partir 100 a 200 Ghz. Al final de los 90's, los sistemas DWDM se habían desarrollado hasta un punto de poder utilizar 160 canales paralelos, densamente empaquetados en los intervalos de 50 o 25 Ghz.

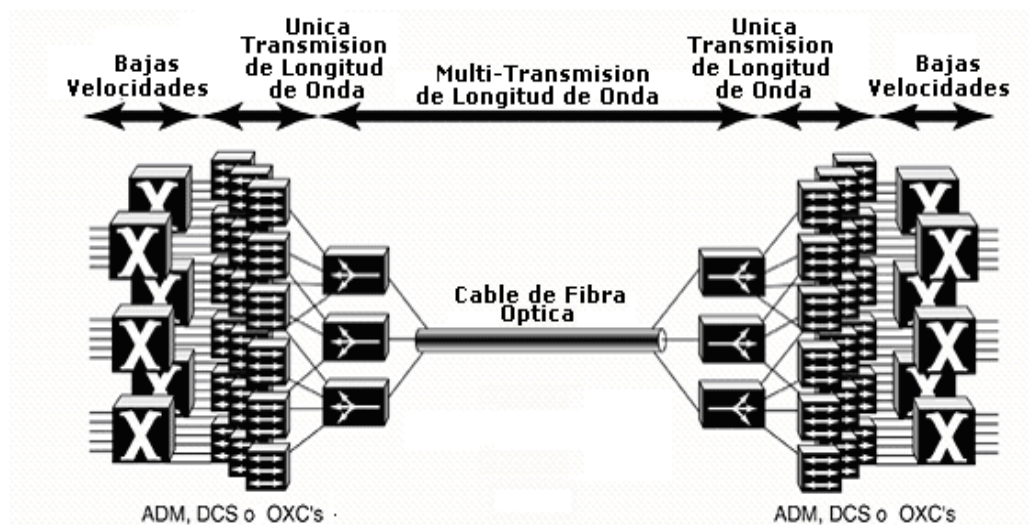
WDM ha tenido cierta estandarización inicial de frecuencias y de espaciamiento. En particular la ITU-T ha especificado las frecuencias en términos de compensación de la frecuencia de referencia que es de 193.1 THz ( ITU-T98c [Rec. G.692 - *Interfaces ópticas para sistemas multicanales con amplificadores ópticos* [6])). Las compensaciones del estándar son de 200 Ghz, 100 Ghz y 50 Ghz. Se debe aclarar que hay sistemas WDM que funcionan con el espaciamiento estrecho de rejilla de 25 Ghz e incluso puede existir un espaciamiento más estrecho ya que la especificación ITU-T98c no imposibilita de ninguna manera a estos sistemas.

Desafortunadamente, diversos vendedores de sistemas WDM no están interoperando actualmente aunque tengan un sistema estándar de frecuencias. Para entender esto se puede considerar un sistema WDM como el de la figura 3.2a. Este es un sistema WDM punto a punto en el

que, actualmente, se deben tener en cuenta tres aspectos importantes para el transporte de la información a largas distancias, estos son:

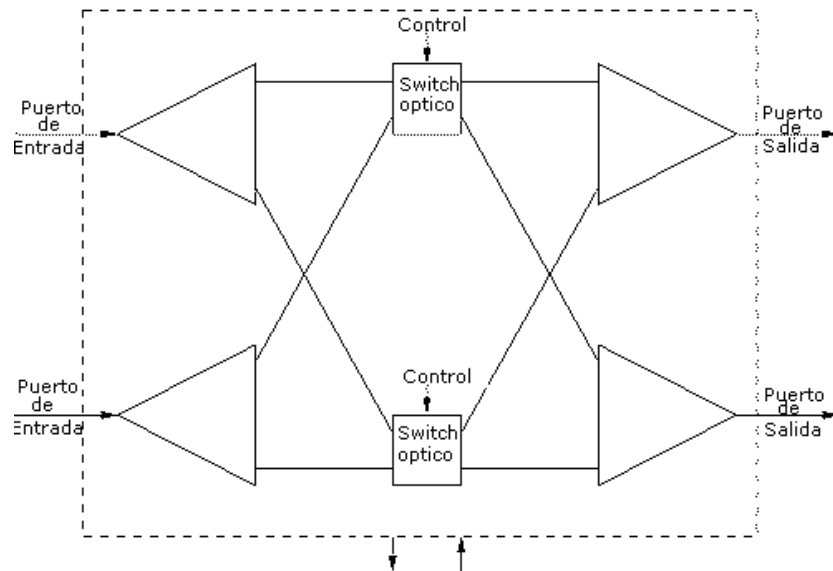
- 1- Largas distancias entre los regeneradores.
- 2- Espaciamiento más denso entre los canales.
- 3- Tasas de datos más altas llevadas por el canal.

Estas tendencias impulsan las capacidades de la fibra y de los sistemas para que los efectos lineales y no lineales deban ser compensados o para que de otra manera se pueda tomar preferiblemente la atenuación exacta de la señal que esta en consideración. Algunos de los vendedores utilizan para esto técnicas propietarias que conducen finalmente hacia la interoperabilidad.



OXC: Conector Cruzado Óptico o «Cros-conector» Óptico (Optical Cross-Connect), están emergiendo como la opción preferida para conmutar flujos en el orden de los giga, tera y petabits. Los enlaces entre estos switches ópticos consisten de fibras ópticas y conmutan grandes flujos de información como una «Unidad» basándose en cantidades (lambdas, IT) inherentes al mismo medio, más que examinando cabeceras (headers) de cada paquete individual.

**Figura 3.2a. Sistema WDM punto a punto.**



**Figura 3.2b Cross-connect de longitud de onda (OXC).**

En su "backbone" o "core", WDM implica un número pequeño de funciones de la capa física, por esta razón un sistema típico WDM realiza las siguientes funciones principales:

- Generación de la señal: La fuente, un láser de estado sólido, debe proporcionar la luz estable dentro de un ancho de banda estrecho específico que lleva los datos digitales y que son modulados como una señal análoga.
- Combinar las señales: Los sistemas modernos WDM emplean multiplexores para combinar las señales. Hay una cierta pérdida inherente asociada a la multiplexación y a la demultiplexación. Esta pérdida es dependiente del número de canales, pero se puede minimizar con los amplificadores ópticos, que impulsan todas las longitudes de onda sin la conversión eléctrica.



- Transmitir las señales: Los efectos de la interferencia y de la degradación o pérdida de la señal óptica deben ser tratados con la transmisión en la fibra óptica, estos efectos pueden ser reducidos al mínimo controlando el espaciamiento del canal, la tolerancia de la longitud de onda y los niveles de energía del láser. La señal puede necesitar ser amplificada ópticamente sobre un enlace de la transmisión.
- Separación de las señales recibidas: En el extremo de recepción, las señales multiplexadas deben ser separadas o demultiplexadas fuera; aunque esta tarea parecería ser simplemente lo opuesto a combinar las señales, es realmente más difícil de realizar.
- Recepción de las señales: La señal demultiplexada es recibida por un fotodetector.

Los dispositivos WDM son más fáciles de implementar puesto que, generalmente, todos sus componentes necesitan funcionar solamente a la velocidad de transmisión electrónica, por esta razón varios dispositivos WDM están disponibles en el mercado actual y cada vez más están emergiendo.

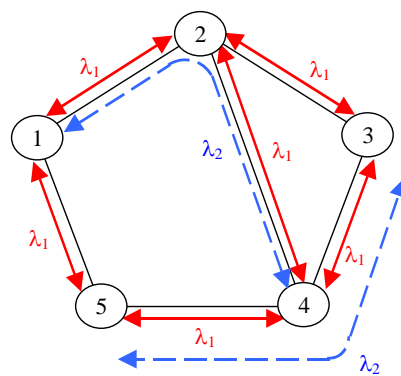
La investigación y el desarrollo en redes ópticas WDM ha madurado considerablemente durante los últimos años y parece haber adquirido repentinamente una buena recepción por parte del mercado. Un número de prototipos experimentales han estado y actualmente están siendo desarrollados, desplegados y probados principalmente por los proveedores de las telecomunicaciones, incluyendo una abundancia de compañías en lanzamiento.

Las actividades actuales de desarrollo, indican que esta clase de red WDM ha sido desplegada principalmente como una red "backbone" para las

regiones grandes, como por ejemplo, para cobertura a nivel nacional o global, sin embargo actualmente se están desarrollando y estandarizando para aplicaciones locales y metropolitanas. En este tipo de redes los usuarios finales se conectarán a la red a través de una longitud de onda por medio de un nodo de conmutación que realiza un enrutamiento sensible. Un usuario final en este contexto no requiere necesariamente ser un equipo terminal, sino la actividad agregada de una colección de terminales, incluyendo aquellos que posiblemente pueden ser alimentados a partir de otras subredes de área local, de tal manera que la actividad agregada del usuario final sobre cualquiera de estos transmisores esta cerca del máximo valor de la tasa de transmisión electrónica.

### 3.1.2. Funcionamiento de una red WDM:

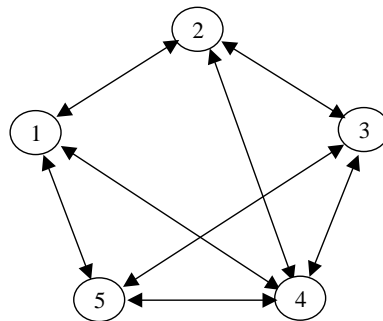
En la figura 3.3a, se muestra un ejemplo de una WRON con ocho caminos de luz y empleando solamente dos longitudes de onda:



**Figura 3.3a** Ejemplo de una WRON.

El mecanismo básico de comunicación en una red de enrutamiento de longitud de onda es un camino de luz llamado **"lightpath"** (de aquí en adelante se hará referencia a camino de luz con el término lightpath).

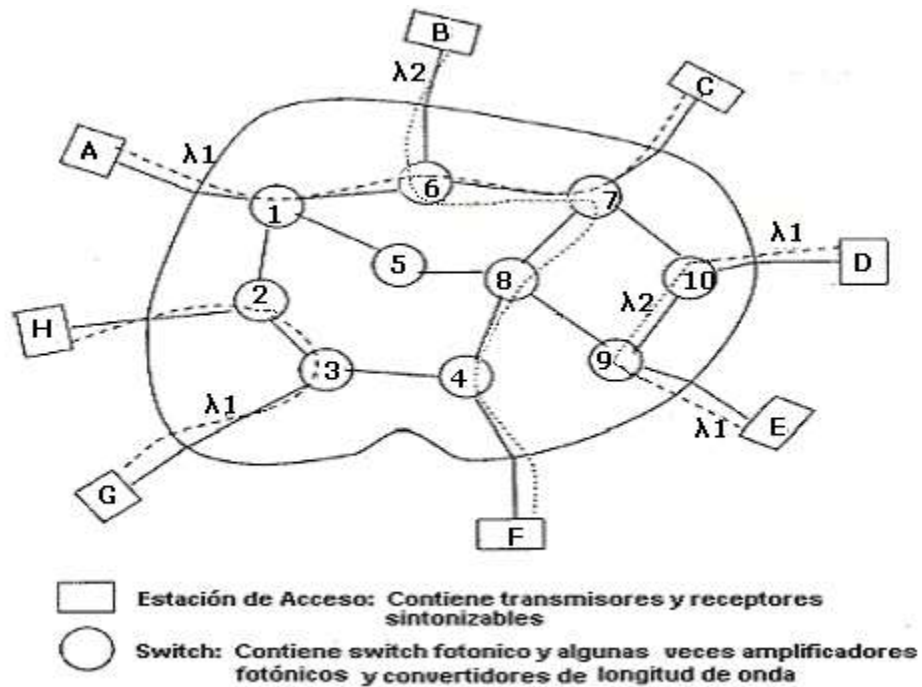
Un "lightpath" es un canal de comunicaciones todo-óptico entre dos nodos en la red y este puede atravesar (o abarcar) más de un enlace de fibra. Este establecimiento de caminos de luz o "lightpaths", permite encajar topologías lógicas (o virtuales) en la topología física. Esto se puede observar en la figura 3.3b donde existe un enlace lógico por cada camino de luz.



**Figura 3.3b Topología lógica de una WRON**

Los nodos intermedios en la trayectoria de la fibra encaminan al lightpath en el dominio óptico usando sus switches activos, los nodos de frontera del lightpath tienen acceso a este con los transmisores y los receptores que se sintonizan a la longitud de onda en la cual opera el lightpath. Por ejemplo, en la figura 3.4, los lightpaths están establecidos entre los nodos A y C en el canal de longitud de onda  $\lambda_1$ , entre B y F en el canal de longitud de onda  $\lambda_2$  y entre H y G en el canal de longitud de onda  $\lambda_1$ . El lightpath entre los nodos A y C se encamina mediante los switches activos

1, 6, y 7, en esta parte se puede observar la reutilización de la longitud de onda para  $\lambda_1$ .



**Figura 3.4 Red óptica WDM de área-extensa con enrutamiento de longitud de onda.**

En ausencia de cualquier dispositivo de conversión de longitud de onda, se requiere de un lightpath para lograr estar en el mismo canal de longitud de onda a través de su trayectoria en la red; este requisito se refiere a la propiedad de "continuidad de la longitud de onda" del lightpath, pero este requisito puede no ser necesario si se tienen convertidores de longitud de onda en la red. Esto se puede ver en la figura 3.4, donde el lightpath entre los nodos D y E atraviesa el enlace de fibra desde el nodo D hacia el switch 10 en la longitud de onda  $\lambda_1$ , obtiene conversión a la longitud de onda  $\lambda_2$  en el switch 10, atraviesa el

enlace de fibra entre el switch 10 y el switch 9 en la longitud de onda  $\lambda_2$ , obtiene conversión de nuevo a la longitud de onda  $\lambda_1$  en el switch 9 y por último atraviesa el enlace de fibra desde el switch 9 al nodo E en la longitud de onda  $\lambda_1$ .

Un requisito fundamental en una red óptica de enrutamiento por longitud de onda es que dos o más lightpaths que atraviesan el mismo enlace de fibra deben estar en diferentes canales de longitud de onda de modo que no interfieran el uno con el otro.

**Figura 3.4 Red óptica WDM de área-extensa con enrutamiento de longitud de onda.**

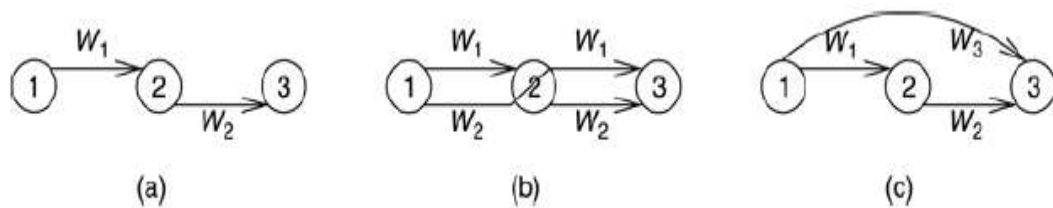
### **3.1.3. Problemas de una red WDM – Problema RWA:**

Como ya se explicó anteriormente los usuarios finales en una red de fibra basada en un "backbone" WDM pueden comunicarse uno a otro mediante canales todo-ópticos (WDM) que son los "lightpaths". Un "lightpath" puede atravesar enlaces múltiples de fibra, como en el caso de proporcionar una interconexión de conmutación de circuitos entre dos nodos los cuales pueden tener un flujo de tráfico denso entre ellos y pueden ser localizados "lejos" uno del otro en la topología física de la red de fibra, para esto, cada nodo intermedio en el lightpath proporciona esencialmente una facilidad de desviación todo-óptica que pueda servirle de apoyo.

Si se tiene una red de  $N$  nodos; equipando a cada nodo con  $N-1$  transceivers y si existen varias longitudes de onda disponibles en todos los enlaces de fibra, entonces cada par de nodos se podría conectar por un lightpath todo-óptico y no habría algún problema para solucionar o resolver la red. Sin embargo, se debe observar que el tamaño de la red debe ser escalable y los transceivers son muy costosos para que cada nodo pueda ser equipado solamente con algunos de ellos, además existen restricciones tecnológicas que estipulan que el número de canales WDM que pueden ser soportados en una fibra es limitado, de este modo, solamente un número limitado de lightpaths se puede colocar en la red. Bajo tal escenario, un problema desafiante se produce cuando un sistema de lightpaths necesita ser establecido en la red y existe una restricción en el número de longitudes de onda que se encuentran disponibles, entonces, se debe poder determinar el enrutamiento sobre cual de estos lightpaths deben ser instalados y también determinar las longitudes de onda que se deben asignar a estos lightpaths de tal manera que el número máximo de estos pueda ser establecido.

Mientras que las rutas de los caminos mas cortos pueden ser los más preferidos desde el punto de vista individual de cada lightpath, esta opción puede tener que ser sacrificada algunas veces, para permitir que más lightpaths sean utilizados, de esta forma se pueden permitir varias rutas alternativas para que otros lightpaths sean establecidos. Los lightpaths que no se pueden establecer debido a las restricciones en las rutas y las longitudes de onda serán bloqueados, de esta manera el problema de optimización de la red se centra en lograr minimizar esta probabilidad de bloqueo. Observe que, normalmente, un lightpath funciona encendido a la misma longitud de onda a través de todos los enlaces de la fibra que atraviesa, esto es para satisfacer el requisito de continuidad de la longitud de onda, de este modo, dos lightpaths que

compartan un enlace de fibra común no deben ser asignados a la misma longitud de onda, sin embargo, si un nodo "switching/routing" también se equipa de una facilidad de conversión de longitud onda (figura 3.5), entonces los requisitos de la continuidad de longitud de onda desaparecen y un lightpath puede cambiar entre diversas longitudes de onda en su ruta desde su origen a su destino. Este problema se refiere al problema de enrutamiento y asignación de longitud de onda (RWA).



**Figura 3.5 Una red de dos enlaces: (a) Dos longitudes de onda por fibra sin conversión de longitud de onda, (b) dos longitudes de onda por fibra con conversión de longitud de onda, (c) tres longitudes de onda por fibra con dos utilizables como máximo en cualquier tiempo dado y sin conversión de longitud de onda.**

Los diseñadores de las redes de onda luminosa de próxima generación deben estar enterados de las características y las limitaciones de la fibra óptica y de los dispositivos, para que los protocolos y algoritmos diseñados, aprovechen la máxima capacidad de WDM. A menudo un diseñador de la red puede acercarse a las arquitecturas y protocolos WDM desde un punto de vista excesivamente simplificado, ideal, o un punto de vista de red tradicional. Desafortunadamente, esto puede dirigir a un individuo a hacer una suposición irreal sobre las características de la fibra y sus componentes ópticos y por lo tanto puede dar lugar a un diseño irrealizable o impráctico [7].

### **3.1.4. Enrutamiento en redes WDM:**

Cuando un "lightpath" se establece entre dos puntos terminales en la red óptica a la cual los clientes están conectados, las propiedades de estos lightpaths se definen mediante los atributos especificados durante el establecimiento de la conexión, o mediante algunas solicitudes de modificación soportables.

La noción de grupos de trabajo se considera como una parte integral del establecimiento del lightpath. Un Grupo de Trabajo se define como un conjunto de dispositivos de clientes que restringen la conectividad con otros dispositivos fuera de este grupo.

Entre las acciones mas soportadas por los servicios lightpath para el proceso de enrutamiento, se pueden mencionar las siguientes:

➤ Creación del Lightpath: Esta acción permite la creación de una ruta entre dos terminales. A cada ruta se le asigna un identificador único dentro de la red óptica llamado lightpath ID.

Los mensajes de creación de lightpaths deben identificar la fuente y el destino de la ruta y si éstos no pueden ser asociados a una dirección única, se puede utilizar una componente opcional de direccionamiento llamada Identificación Lógica del Puerto (Logical Port ID).

➤ Eliminación del Lightpath: Esto sucede cuando los lightpaths no se pueden establecer debido a las restricciones en la cantidad de rutas y longitudes de onda disponibles.

➤ Modificación del Lightpath: Esta acción permite modificar algunos parámetros de la ruta, dependiendo de las políticas de la red y en ningún caso puede ser destructiva.

➤ Solicitud de estado del Lightpath: Esta acción permite acceder a ciertos valores del estado de la ruta, especificándola por su identificador.



### **3.1.4.1. Diferencias de Enrutamiento en Redes IP y Redes Ópticas:**

Aunque los protocolos de enrutamiento IP están siendo extendidos para las conexiones de enrutamiento en redes ópticas, hay diferencias importantes para enrutamiento en redes ópticas de conmutación de circuitos y enrutamiento en redes de conmutación de paquetes IP:

➤ El enrutamiento IP implica la funcionalidad del plano de control y de datos. La función del plano del control es doble ya que debe distribuir la información de la topología a través de la red (enrutamiento de estado de enlace) y calcular una tabla de búsqueda con la información de la topología. La búsqueda de los paquetes IP usando la tabla es una función del plano de datos en donde los paquetes son enviados salto a salto desde la fuente al destino.

En redes ópticas, como en otras redes de conmutación de circuitos, el plano de datos no está implicado en el enrutamiento de la conexión. En estas redes, las conexiones extremo a extremo se establecen basándose en la topología de la red y la información de los recursos; una vez que se establece una conexión, los datos son transferidos sobre esta sin la implicación adicional de algún generador de enrutamiento.

➤ En redes IP, los protocolos de enrutamiento están implicados íntimamente con las decisiones de transporte del plano de datos y por lo tanto su ausencia afecta negativamente los servicios ofrecidos a los usuarios finales.

Debido a la separación de los planos de control y de datos, las fallas de los protocolos de enrutamiento en redes ópticas no afectan a las conexiones existentes, pero esto no implica que el enrutamiento sea menos crítico en el caso óptico, sólo hace que su efecto en los servicios

ofrecidos sea secundario. Por ejemplo, se podría decir que la topología y las inexactitudes del estado del recurso afectarán el establecimiento de nuevas conexiones, pero no harán que una conexión existente sea terminada o bloqueada.

➤ Puesto que una conexión tiene que ser establecida y debe apropiarse de recursos, estos tienen que ser reservados antes de realizar alguna transferencia de datos ya que el enrutamiento en una red óptica requiere de un completo conocimiento de la disponibilidad de los diversos recursos en la red. Actualmente las versiones existentes de los protocolos de enrutamiento IP no manejan la información de la disponibilidad del recurso.

En el caso de las redes ópticas son necesarios otros aspectos para manejar detalladamente la información de la disponibilidad del recurso requerida para las conexiones de enrutamiento, además de esto, también se debe tener en cuenta que en estas redes, un establecimiento de la conexión podría ser bloqueado si los recursos no están disponibles, mientras que en redes IP, un cierto nivel de sobrecarga y de congestión temporal se puede tolerar.

➤ El enrutamiento IP es realizado salto a salto mientras que el enrutamiento en redes ópticas es direccionado desde la fuente. En otras palabras, con el enrutamiento IP cada nodo en la trayectoria desde la fuente al destino decide independientemente el salto siguiente para enviar un paquete, por lo tanto, es importante que todos los nodos en la red tengan una visión topológica consistente y que todos usen el mismo algoritmo de cálculo de la ruta. En redes ópticas, el nodo fuente es el responsable de calcular la trayectoria completa desde la fuente al destino, entonces, mientras la fuente tenga la información topológica correcta de la red, puede calcular la mejor trayectoria, de esta manera, no es

necesario que todos los nodos utilicen el mismo algoritmo de cálculo de ruta.

➤ Finalmente, otra diferencia importante en el enrutamiento se presenta debido a los requisitos de protección y restauración. En redes IP, el tráfico es enviado sobre la trayectoria más corta; si hay una falla en la red, el esquema de enrutamiento descubre que trayectorias alternas existen y cuáles son los paquetes que están encaminados alrededor de la falla, es decir, los fallos de la red se manejan de una manera reaccionaria. Por otra parte, una de las características básicas de las redes ópticas es la protección de las conexiones usando frecuentemente un cálculo previo que facilita la utilización de diversas trayectorias de reserva; esto asegura que el funcionamiento y las trayectorias no sean afectados concurrentemente por la misma falla.

### **3.1.5. Desarrollos actuales para enrutamiento y procesamiento de la información en redes WDM:**

Las recientes Investigaciones que se han realizado e implementado en redes WDM para lograr un buen funcionamiento y solucionar problemas de enrutamiento son específicamente relacionadas con el control y manejo de red, manejo de fallas, multicasting, IP sobre WDM y redes de conmutación de paquetes ópticos entre otros [7].

#### **3.1.5.1. El control y manejo de la red:**

En una red encaminada por longitud de onda WDM, un mecanismo de control es necesario para instalar y desmontar las conexiones todo-ópticas. Cuando llega una petición de conexión, este mecanismo debe poder seleccionar una ruta, asignar una longitud de onda para la conexión

y configurar los switches ópticos apropiados en la red. Este mecanismo debe también poder proporcionar actualizaciones para informar qué longitudes de onda se están utilizando actualmente en cada enlace de fibra de modo que los nodos puedan efectuar correctamente las decisiones de enrutamiento.

Los objetivos principales en este tema son reducir al mínimo:

- 1) La probabilidad de bloqueo en las peticiones de conexión.
- 2) Los retardos de configuración de la conexión.
- 3) El ancho de banda usado para los mensajes de control.

Otro objetivo es maximizar la escalabilidad (expandimiento de la capacidad de funcionamiento) de la red.

Existen dos esquemas de gestión de control de la red distribuida; el primer método se refiere al "método de estado de enlace" porque enruta conexiones en un modo de estado de enlace y el segundo se refiere al "método de enrutamiento distribuido" porque utiliza el algoritmo de enrutamiento distribuido de Bellman-Ford [7].

En el método de estado de enlace (el cual puede ser implementado usando el algoritmo de Primer Camino mas Corto Disponible (OSPF-First Path Shortest Open) [7], cada nodo mantiene la topología de la red completa, incluyendo la información sobre cuales longitudes de onda están en uso en cada enlace de fibra. Sobre la llegada de una petición de conexión, un nodo utiliza la información de la topología para seleccionar una ruta y una longitud de onda; una vez la ruta y la longitud de onda son seleccionadas, los nodos intentan reservar la longitud de onda seleccionada a lo largo de cada enlace de fibra en la ruta de envío de reservación de peticiones para cada nodo en el camino. Si un nodo intermedio puede reservar la longitud de onda en el enlace apropiado, envía un reconocimiento directamente de nuevo al nodo fuente. Si todas

las reservaciones son acertadas, entonces la fuente envía un mensaje SETUP a cada uno de los nodos y los switches apropiados se configuran entonces en cada nodo, estableciéndose de esta manera la conexión. Si una de las reservaciones no es acertada, entonces la llamada se bloquea y el nodo fuente envía un mensaje TAKEDOWN (desmontaje) en orden a cada nodo en la ruta, para poder liberar los recursos reservados.

Cuando una conexión se establece o se rompe, cada nodo involucrado en la conexión difunde un mensaje de "actualización de topología" que indica cualquier cambio en el estado de las longitudes de onda utilizadas en los enlaces salientes del nodo.

En el método de enrutamiento distribuido las trayectorias se seleccionan sin el conocimiento de la topología total de la red. Cada nodo mantiene una tabla de enrutamiento la cual es establecida empleando un algoritmo distribuido de Bellman-Ford; esta tabla especifica el salto siguiente y el costo asociado con el camino más corto a cada destino, en una longitud de onda dada; dicho costo puede reflejar conteos de salto o distancias actuales de los enlaces de fibra. En este método de enrutamiento distribuido, cuando se recibe una petición de conexión, un nodo elegirá la longitud de onda (la cual resulta en la distancia más corta al destino) y envía la petición de conexión al nodo siguiente en la trayectoria, de esta manera, la petición se encamina un salto a la vez en cada nodo a lo largo de la trayectoria, el cual selecciona independientemente el salto siguiente basado en la información de enrutamiento y reservando la apropiada longitud de onda en el enlace seleccionado.

Una vez la petición alcance el nodo destino, este envía un ACK de reconocimiento de nuevo al nodo fuente a lo largo de la trayectoria inversa. En la recepción del este ACK, cada nodo a lo largo de la

trayectoria inversa, configura su switch de enrutamiento por longitud de onda y así el nodo de la fuente comienza a transmitir datos.

Si un nodo a lo largo de la trayectoria no puede reservar la longitud de onda deseada en un enlace, enviará un Negativo ACK de reconocimiento de nuevo a la fuente a lo largo de la trayectoria inversa. Los nodos en la trayectoria inversa liberarán las longitudes de onda reservadas, de tal modo que ellos recibirán el Negativo ACK de reconocimiento (acknowledgment). El nodo de la fuente puede entonces intentar de nuevo la conexión en una diferente longitud de onda. Si el nodo de la fuente no puede establecer la conexión en cualquier longitud de onda, se bloquea la llamada.

Una vez establecida la conexión, cada nodo a lo largo de la ruta envía a cada uno de sus vecinos un mensaje de actualización que refleja el estado del enlace nuevamente ocupado y de la longitud de onda. Cada nodo que recibe un mensaje de actualización puede entonces poner al día su tabla de enrutamiento; estas actualizaciones se deben realizar también cuando una conexión se rompe.

➤ Cálculo de la ruta y selección de la trayectoria:

Como ya se dijo anteriormente, cuando cada petición de conexión se presenta en una red óptica, se calcula una ruta y se selecciona una trayectoria a través de la red, desde la fuente hasta el destino. La selección de la trayectoria en redes ópticas se puede poner en contraste con el procedimiento usado en redes IP. En redes IP, cada router toma independientemente una decisión de envío basándose en la dirección destino de cada paquete, esta independencia de decisión de enrutamiento en cada nodo de la red, puede dar lugar a un enrutamiento cíclico o en bucle, para evitar esto, se requiere que todos los "routers" de la red

tengan la información idéntica de la topología y usen el mismo algoritmo de cálculo de ruta.

Los bucles de enrutamiento no son asunto de las redes orientadas a conexión, donde las rutas se especifican explícitamente, de esta manera hay una gran debilidad de acoplamiento entre la selección de la trayectoria y otras funciones de enrutamiento con respecto a las redes (de paquetes) sin conexión, tales como el descubrimiento de topología y de recursos, lo cual permite considerar un rango más amplio de criterios de optimización de ruta, que en las redes orientadas a conexión.

Si se supone que la topología y la información del recurso que pertenece a una red óptica están disponibles por medio de un protocolo de enrutamiento distribuido o de un sistema de direccionamiento de la red, una gama de criterios puede entonces influenciar la selección de una trayectoria en la conexión desde la fuente al destino, estos criterios pueden ser [8]:

- Ancho de banda deseado de la conexión: Esto se puede especificar de dos maneras, como un valor exacto o como un rango  $[b_{min}, b_{max}]$ , donde  $b_{min}$  es el ancho de banda mínimo requerido y  $b_{max}$  es el máximo requerido. En el último caso, se espera que el ancho de banda máximo posible entre  $b_{min}$  y  $b_{max}$  sea asignado.
- Tiempo de retardo: Esto puede ser una restricción sobre el retardo absoluto a lo largo de la trayectoria de la fuente al destino o respecto a otra trayectoria o grupo de trayectorias ya que este retardo se aplicaría a los retardos de propagación y procesamiento. Se puede observar que con respecto a las redes de paquetes, el retardo en el encolamiento no desempeña un papel importante en las redes ópticas.
- Confiabilidad (Características de protección y restauración): Una seguridad mínima con respecto a la confiabilidad para la trayectoria puede

ser deseada, especificando límites de tiempo de restauración y de protección (ej. 50ms).

- Degradación: Esta restricción se aplica al cálculo de la trayectoria específicamente en redes ópticas, donde la atenuación a lo largo de las rutas es un problema, pero dicha atenuación puede ser requerida para reducir al mínimo la degradación o para mantenerla debajo de un cierto nivel preestablecido.

- Distancia: Se utiliza para limitar el retardo de propagación o el costo, para esto la longitud máxima de la ruta puede ser especificada y esta puede estar en términos de millas o kilómetros, o en términos del conteo de saltos.

- Diversidad: Esta puede ser requerida para que la conexión de la trayectoria sea diferente físicamente de las trayectorias de otras conexiones, o para evitar completamente ciertas áreas geográficas. Las restricciones de diversidad aseguran que el procesamiento y la protección en las trayectorias no sean afectados por la misma falla.

- Optimización de la red: El enrutamiento de la conexión debe ser tal que el uso de los recursos de la red (capacidad) sea optimizado o que los costos de esta sean reducidos.

### **3.1.5.2. Gestión de Fallas:**

En una red WDM (así como en otras redes), la falla de un elemento de la red (como en un enlace de fibra, cross-connect, etc.) puede causar fallas de varios canales ópticos, de tal modo que puede conducir a pérdidas de grandes datos y de ingresos. Los estudios se han conducido para examinar diversos métodos de protección en redes ópticas WDM contra fallas en los enlaces de fibra. Estudios anteriores fueron centrados en



topologías de anillo mientras que se han considerado recientemente redes basadas en malla.

Hay varios métodos para asegurar la supervivencia de la red de fibra. Las arquitecturas de red de supervivencia se basan en dedicar recursos de reserva por adelantado o en realizar una restauración dinámica. En la supervivencia de recursos dedicados (que incluye la conmutación de protección automática y los anillos "self-healing" (curarse a si mismo)), el servicio de red interrumpido (o desestabilizado) es restaurado utilizando los recursos dedicados de la red. En la restauración dinámica, la capacidad de reserva disponible dentro de la red se utiliza para restaurar los servicios afectados por una falla. Generalmente, los esquemas dinámicos de restauración son más eficientes en utilizar la capacidad, debido a la multiplexación de los requerimientos de la capacidad de reserva y proporcionan elasticidad contra diversas clases de fallas, mientras que los esquemas de restauración dedicados tienen un rápido tiempo de restauración y proporcionan grandes garantías en dicha capacidad de restauración.

Existen tres métodos para la protección contra fallas de enlaces de fibra en una red óptica, un método de supervivencia del recurso dedicado llamado protección 1+1 y dos métodos dinámicos llamados restauración de enlace y restauración de la trayectoria.

Cada uno de estos métodos tiene diferentes requerimientos de capacidades de longitud de onda y funcionamiento de bloqueo. Las investigaciones se han centrado en las fallas de único-enlace, que son la forma más común de fallas en redes ópticas.

-Protección 1+1: Para cada conexión que necesite ser protegida 1+1, un enlace dedicado desune la ruta de reserva y la longitud de onda es establecida por adelantado (en el momento de la configuración de la

conexión). Sobre una falla del enlace en la trayectoria primaria, los nodos extremos del comienzo de la conexión utilizan la ruta y la longitud de onda de reserva.

-Restauración del enlace: En la restauración del enlace, todas las conexiones que atraviesan el enlace fallado se reencaminan alrededor de dicho enlace. Los nodos extremo del enlace fallado descubren dinámicamente una ruta alrededor de este para cada longitud de onda que lo atraviese. Sobre una falla, los nodos extremo del enlace fallado pueden participar en un procedimiento distribuido y buscar las nuevas trayectorias para cada longitud de onda activa; cuando una ruta nueva se descubre alrededor del enlace fallado para un canal de longitud de onda, los nodos extremo configuran de nuevo sus "cross-connects" para reencaminar ese canal sobre la ruta nueva. Si no se descubren nuevas rutas para un canal de longitud de onda, se bloquea la conexión que utiliza esa longitud de onda.

-Restauración de la trayectoria: En la restauración de la trayectoria, cuando un enlace falla, el nodo fuente y el nodo destino de cada conexión que atraviesan el enlace fallado son informados sobre la falla (posiblemente vía mensajes desde los nodos adyacentes hasta la falla del enlace), y la fuente y los nodos destino de cada conexión descubren independientemente una ruta de reserva sobre una base extremo a extremo (una trayectoria de reserva tal que podría estar en un canal de longitud de onda diferente). Cuando una nueva ruta y un canal de longitud de onda son descubiertos para una conexión, los elementos de la red tales como "cross-connects" y switches de conexión de longitud de onda son reconfigurados apropiadamente para la nueva trayectoria. Si no se descubren nuevas rutas (y su longitud de onda asociada) para una conexión rota, se bloquea esa conexión.

### **3.1.5.3. Multicasting "Light Trees "**

El Multicasting es la capacidad que tiene una red de aceptar un solo mensaje de una aplicación y entregar copias del mensaje a los múltiples receptores de diversas localizaciones. Los lightpaths son examinados primeramente para las conexiones punto a punto, sin embargo, podemos ampliar el concepto de lightpath a conexiones punto a multipunto, por ejemplo un concepto multicast es al que se le llama un "light tree" o árbol de luz. Un light tree permite a un transmisor en un nodo tener muchos más vecinos lógicos, de tal modo que conduce a un diagrama de interconexión virtual más denso y baja distancia del salto).

Una colección de "lights trees" insertados en una red de backbone WDM óptico puede mejorar el funcionamiento del tráfico unicast, multicast y broadcast, sin embargo, la red correspondiente requerirá switches ópticos con capacidad multicast y más presupuesto de energía para combatir el efecto de pérdida de ésta debido al fraccionamiento de la señal.

Muchas aplicaciones multicast existen, pero sus implementaciones no son necesariamente eficientes porque las redes de hoy fueron diseñadas principalmente para soportar comunicaciones punto a punto. Tales aplicaciones incluyen video-conferencia, software de distribución de archivos (incluyendo las réplicas de archivos en sitios reflejados), juegos distribuidos, distribución de las noticias en Internet, listas de envío de e-mail, etc.

En el futuro, como las aplicaciones multicast llegarán a ser más populares y el ancho de banda intenso, emergerá una necesidad urgente de proporcionar soporte multicast en la red de comunicaciones subyacente. Una capacidad multicast WAN/WDM no debe soportar solamente el enrutamiento eficiente para el tráfico multicast, sino que puede también

acentuar el enrutamiento para el tráfico unicast permitiendo topologías virtuales de conexión más densas.

#### **3.1.5.4. IP sobre WDM**

La necesidad de un alto ancho de banda en el Internet de hoy basado en IP y la promesa de WDM de proporcionar esta alta capacidad, está alimentando a las investigaciones actuales en las redes IP sobre WDM.

En una red IP sobre WDM los nodos de red emplean los switches de enrutamiento por longitud de onda (WRSs- Wavelength Routing Switches) y routers IP. Los nodos son conectados por fibras para formar una topología en malla física arbitraria y cualquiera de los dos routers IP en la red pueden ser conectados juntos por un canal WDM todo-óptico que es el lightpath, luego se fija el sistema de lightpaths en forma de un modelo de interconexión virtual. Usando WRSs en los nodos intermedios y en la vía apropiada de enrutamiento y asignación de longitud de onda, un lightpath puede crear vecinos virtuales (o lógicos) fuera de los nodos que están geográficamente lejanos a un lado de la red, así, un sistema de lightpaths encaja una topología virtual (o lógica) en la red.

En la topología virtual, un lightpath lleva no solamente el tráfico directo entre los nodos que interconecta, también lleva tráfico desde los nodos de flujo de subida de la fuente (incluyendo la fuente) hasta los nodos de flujo de bajada de destino (incluyendo el destino). Los nodos que no están conectados directamente en la topología virtual pueden aun comunicarse el uno con el otro usando el acercamiento "multihop", es decir, usando la conmutación de paquetes electrónicos en los nodos intermedios en la topología virtual. Esta funcionalidad de conmutación de paquetes electrónicos puede ser proporcionada por los routers IP, switches ATM,

etc, llevando a una red IP sobre WDM o a una red ATM sobre WDM, respectivamente.

En una arquitectura de red WDM óptica, la falta de un componente de la red como una fibra puede conducir a la falta de todos los lightpaths que atraviesa esta, entonces, para una red IP sobre WDM existen dos métodos para proporcionar protección que son las siguientes:

- 1) Provisionamiento de la protección en la capa WDM (fijar un lightpath de reserva para cada lightpath primario).
- 2) Provisionamiento de la restauración en la capa IP (sobreprovisionar la red de tal modo que, después de un corte de fibra, la red debería aun poder llevar la misma cantidad de tráfico que llevaba antes de que la fibra se cortara).

#### **3.1.5.5. Redes Ópticas de Conmutación de Paquetes:**

Como las telecomunicaciones y las comunicaciones por computador continúan convergiendo, el tráfico de datos está excediendo gradualmente al tráfico telefónico, esto significa que muchas de las redes de conmutación de circuitos existentes necesitarán ser aumentadas para soportar datos de tráfico de conmutación de paquetes. Mientras WDM nos ha proporcionado una oportunidad de multiplicar la capacidad de la red, las tecnologías de conmutación ópticas actuales permiten que se entregue rápidamente el enorme ancho de banda de las redes WDM.

Entre todos los esquemas de conmutación, la conmutación de paquetes fotónicos parece ser un fuerte candidato debido a la alta velocidad, la transparencia y la configurabilidad de la tasa de datos que ofrece. La meta de este campo de investigación es explorar los asuntos críticos implicados en diseñar e implementar redes de conmutación de paquetes y

a través de una simulación computarizada y experimentos hardware, encontrar soluciones convenientes.

El campo de la conmutación de paquetes ópticos involucra inevitablemente rápidas fabricaciones de switches y otros dispositivos, para facilitar en tiempo real, funcionalidad de conmutación paquete por paquete. Para esto se están desarrollando soluciones en los temas relacionados con la capa de red, tales como arquitecturas, protocolos de red, control y gestión de la red, etc.

El hecho de que no hay memoria de acceso aleatorio (RAM) óptica disponible impone una diferencia importante entre el diseño de una red de paquete óptico y una de paquete electrónico. Las memorias de acceso aleatorio, los buffers (memorias intermedias o líneas de retardo) se utilizan para resolver conflictos o para ajustar la posición de los paquetes en tiempo real. La investigación sobre este tema necesita buscar maneras de construir una red de conmutación de paquetes que ofrezca flexibilidad significativa sin sacrificar la utilización de la red.

La resolución de la contención (cuando dos o más estaciones intentan transmitir al mismo tiempo sobre un canal compartido) tiene un gran impacto en el funcionamiento de la red en términos de la proporción de los paquetes perdidos, el promedio de paquetes retrasados, la distancia promedio del salto, y el rendimiento de la red. En una red óptica WDM de conmutación de paquetes se tienen tres dominios para explorar esquemas de resolución de conflictos: longitud de onda, espacio y tiempo. Se puede utilizar cualquier combinación de la conversión de la longitud de onda, de la desviación de la trayectoria (espacio) y de las líneas de retardo ópticas para resolver la contención (conflicto).

Cada esquema tiene sus propias ventajas y desventajas: la conversión de la longitud de onda es muy eficiente y capaz de resolver la contención sin introducir retardo extra al paquete, pero esto es costoso de implementar y no hay convertidores de longitud de onda "full-range" disponibles hoy.

La desviación de la trayectoria tiene el costo más bajo puesto que este cambia la carga (load) de la resolución de la contención de la red mientras que baja el rendimiento del procesamiento total de esta. Las líneas de retardo ópticas (tiempo de almacenamiento en memoria) tienen un costo medio, esto podría introducir un retardo nada despreciable del paquete, dependiendo de su longitud. La primera opción, conversión de la longitud de onda, alcanza el mismo retardo de propagación y número de saltos como en el caso óptimo y elimina las dificultades en la secuencia de los paquetes múltiples. Desde esta perspectiva, la conversión de longitud de onda es una solución muy atractiva comparada con la desviación de la trayectoria o el tiempo de almacenamiento en memoria. En el retardo limitado de almacenamiento, un paquete puede ser enrutado a través de una línea de retardo de una fibra local y recirculado nuevamente dentro de un puerto de entrada del mismo nodo. En ese punto, el contenido del encabezado será leído y el enrutamiento se intentará de nuevo.

Puesto que los paquetes no pueden ser alineados, la opción de la longitud de la línea de retardo puede ser arbitraria; sin embargo, habrá una compensación "tradeoff" entre la eficiencia de la solución de la contención versus la latencia (tiempo que toma el paquete en llegar a su destino) óptica mínima. Puede ser necesario incorporar un número limitado de líneas de retardo de almacenamiento en un nodo y en cada línea de retardo de almacenamiento se acomodan las longitudes de onda múltiples [7].

Con la desviación de la trayectoria, es importante evitar que un paquete "vague" en la red durante mucho tiempo. La red IP existente utiliza eficientemente el "tiempo de vida" (TTL- time to live - número máximo de saltos) presente en la cabecera de control del número máximo de saltos que un paquete IP atraviesa. Similarmente, en la red óptica se despliega un campo TTL en la cabecera del paquete óptico que es una consideración importante para la prevención del bucle y evitar excesivas desviaciones de la trayectoria. Por último, para saber si las redes ópticas de conmutación de paquetes deben ser síncronas o asíncronas podemos mencionar que en las redes de conmutación de paquetes, todos los paquetes que son de la misma longitud y todos los paquetes que entran y salen de un switch son alineados, que hace a la red síncrona, esto mejora la eficacia de la solución de la contención, pero requiere un costo adicional en términos de hardware (sincronizadores de paquete) y en restricciones (paquetes de igual longitud). Estos costos están ausentes en una red de conmutación de paquetes asíncrona, la cual puede permitir paquetes de longitudes arbitrarias; sin embargo, la eficacia de la solución de la contención de la red puede ser absolutamente baja.



## **4. APLICACIÓN DE LOS ALGORITMOS GENETICOS Y ANT SYSTEM EN LAS REDES WDM**

### **INTRODUCCIÓN**

En el futuro las redes ópticas de transporte se deben diseñar para acomodar no solamente un incremento en el volumen del tráfico de datos, el cuál varía dinámicamente, sino también para proporcionar la diferenciación del servicio.

Mientras la conmutación óptica de paquetes se ha identificado como una solución flexible para esta tendencia, la carencia de memoria de acceso aleatorio (RAM) óptica y la inmadurez de las técnicas de procesamiento ópticas podrían retrasar la introducción de estas redes fuera de los laboratorios de investigación. Por lo tanto, la evolución desde las redes ópticas estáticas actuales basadas en circuitos hacia las eficientes redes ópticas de conmutación de paquetes, tendrá lugar en las etapas donde diferentes paradigmas de conmutación ópticos como el enrutamiento de longitud de onda estático, semi-estático y dinámico, la conmutación óptica de ráfagas y conmutación óptica de paquetes, sean introducidos posteriormente.

Para hacer frente a este escenario de desarrollo y proporcionar la diferenciación del servicio en la capa óptica, las investigaciones recientes a nivel mundial y específicamente las realizadas por el grupo de Comunicaciones Ópticas de la Universidad de Valladolid España (<http://pesquera.tel.uva.es>) han propuesto recientemente la utilización de

las Redes Ópticas Polimórficas (PMON-"Polymorphic Optical Networks") las cuales tienen una gran importancia ya que soportan simultáneamente varios paradigmas de conmutación ópticos sobre una sola red física, de esta manera, proporcionan una diferenciación del servicio en la capa óptica empleando el paradigma más apropiado para cada servicio.

Puesto que cada paradigma sirve de la mejor manera posible a cierto tipo de tráfico, las PMON son una arquitectura integrada que combina varios paradigmas de conmutación en una sola red física, permitiendo, mientras sea posible, la reutilización del recurso entre todos los paradigmas soportados. De esta manera, no solamente hace que la red soporte óptimamente diversos tipos de tráfico y servicios, sino que también utilice sus recursos eficazmente por medio de la reservación de ruta y longitud de onda semi-estática o dinámica de estos para cada paradigma y así poder adaptarla para el tráfico y la demanda del servicio.

Las dos arquitecturas polimórficas que se han estudiado y analizado actualmente son: La Red Polimórfica Óptica de Conmutación de Circuitos (OCSPN - "Optical Circuit Switched Polymorphic Network") y la Red Polimórfica Óptica Etiquetada de Conmutación de Ráfagas (LOBSPN - "Labeled Optical Burst Switched Polymorphic Network"). El funcionamiento óptimo de estas redes se apoya en la utilización de los eficientes algoritmos de enrutamiento y asignación de longitud de onda (RWA) basados en la optimización de colonias de hormigas Ant System y Algoritmos Genéticos.

Una OCSPN se basa completamente en paradigmas ópticos de conmutación de circuitos relativamente maduros con diferentes grados de dinamismo, esta característica simplifica la arquitectura de nodos de la red y facilita el recurso compartido entre todos los paradigmas soportados, que es el punto dominante para la eficiencia de esta red;

utiliza algoritmos de rápido enrutamiento y asignación de longitud de onda (RWA) que son algoritmos estáticos y dinámicos y con estos se logra demostrar que por imitar la naturaleza, específicamente, la manera en que se comportan las hormigas y el proceso de la evolución y la selección natural de las especies, pueden ser desarrollados efectivos y rápidos algoritmos RWA para la configuración de la capa óptica de una OCSPN. En este capítulo se analizará la arquitectura de la OCSPN y de esta manera justificar los paradigmas seleccionados para esta red polimórfica. Posteriormente se propone un algoritmo basado en colonias de hormigas para solucionar el problema estático centralizado de RWA y un algoritmo genético para solucionar el problema dinámico centralizado de RWA, demostrando en ambos casos su eficacia cuando son comparados con otros algoritmos existentes.

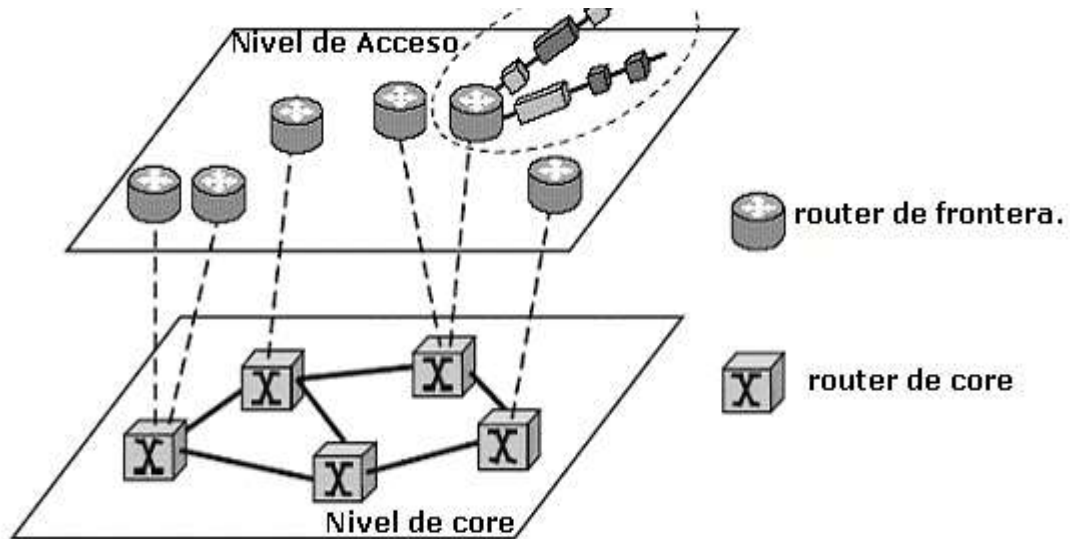
#### **4.1. REDES ÓPTICAS POLIMÓRFICAS DE CONMUTACIÓN DE CIRCUITOS (OCSPN)**

Una Red Óptica Polimórfica [9] se conforma de dos niveles, un nivel de acceso<sup>1</sup> (frontera) y un nivel de core<sup>2</sup> o backbone (figura 4.1).

---

<sup>1</sup> Nivel del acceso: Esta capa incluye los hubs y switches. Se centra en conectar nodos cliente, tales como estaciones de trabajo a la red y se asegura de que los paquetes sean entregados a los computadores de usuario extremo.

<sup>2</sup> Nivel de core: Este nivel es considerado el backbone de la red e incluye switches de alta capacidad y cables de alta velocidad como fibra. No enruta tráfico en la LAN y no hace ninguna manipulación de paquetes.



**Figura 4.1. Arquitectura de una Red Polimorfa Óptica**

En el nivel de acceso, la agregación y la clasificación del tráfico es realizada por los routers de frontera, es decir, para todo el tráfico entrante, la clase de servicio requerida se identifica para determinar cuáles de los paradigmas de conmutación soportados sirven lo mejor posible a un determinado servicio, este nivel es también la interfaz entre las diferentes fuentes de transmisión y el nivel de backbone todo-óptico.

El nivel de backbone consiste en varios routers de backbone conectados en una topología en malla y transportan datos transparentemente en el dominio óptico.

En la arquitectura de una OCSN se emplea la conmutación óptica de circuitos con diversos grados de dinamismo, específicamente, esta red combina las redes ópticas de enrutamiento por longitud de onda (WRONS- Wavelength Routed Optical Networks) semi-estáticas, WRONs dinámicas y las WRONs de conmutación de ráfagas (WR-OBS- Wavelength Routed Optical Burst Switched Networks). Todos estos paradigmas se basan en

el establecimiento de un lightpath y como ya se dijo anteriormente, este circuito todo-óptico puede atravesar más de un enlace de fibra y es encaminado en el dominio óptico por medio de los nodos intermedios según su puerto de entrada y longitud de onda.

#### **4.1.1. WRONs semi-estáticas**

En estas redes, un sistema limitado de lightpaths se establece entre los pares de routers de frontera, de tal modo que incorpora una topología virtual en la topología física. Cuando los datos que se requieren en este esquema llegan a la red, se envían automáticamente a los routers de frontera destino a través del sistema de lightpaths preestablecidos. Una desventaja de esta opción es que no todo el tráfico se puede transmitir directamente desde la fuente hasta los routers de frontera destino, ya que el tráfico que se encuentra entre los pares de routers de frontera destino que no están conectados directamente por un lightpath debe atravesar uno o más routers de frontera intermedios, donde se realiza la conversión al dominio electrónico.

Un beneficio de este paradigma<sup>3</sup> es que el sistema de lightpaths establecido (es decir, la topología virtual) puede ser reconfigurada, como por ejemplo, en caso de tener que adaptarse a los cambios de tráfico o para reaccionar a los fallos de la red.

En la OCSPN, el WRON semi-estático se elige como una solución eficiente para soportar ráfagas de tráfico como el tráfico de Internet, esto debido a su adaptabilidad a los cambios del patrón de tráfico por medio de la reconfiguración de la topología virtual. Para configurar los recursos de la red según este paradigma existen dos subproblemas cercanamente

---

<sup>3</sup> Paradigma: Constituido por los supuestos teóricos generales, las leyes y las técnicas para su aplicación que adoptan los miembros de una determinada comunidad científica.

relacionados que deben ser solucionados; primero se debe determinar cuales pares de routers de frontera se deben conectar por un enlace virtual, en segundo lugar, cada enlace virtual debe ser implementado en la topología física por medio del establecimiento de un lightpath unidireccional que conecta la fuente al router de frontera destino de ese enlace virtual, por lo tanto, el segundo subproblema es el bien conocido problema de enrutamiento estático y asignación de longitud de onda (RWA), donde se debe buscar una ruta y una longitud de onda para cada uno de los enlaces virtuales.

#### **4.1.2. WRONs dinámicas**

En estas redes los lightpaths entre cualquier par de routers de frontera son establecidos y liberados sobre la demanda del usuario en tiempo real. En este escenario, el tráfico siempre se transmite desde la fuente al destino sin la conversión electrónica en los nodos intermedios.

El paradigma empleado para los circuitos dedicados a la demanda de servicios que son requeridos en las OCSPN es el siguiente: Cuando se solicita una petición de servicio, esta llega a la red y un proceso para establecer dinámicamente un lightpath entre un par de routers de frontera se inicia, por lo tanto al usar este paradigma, el problema de enrutamiento dinámico y de asignación de longitud de onda (DRWA) debe ser resuelto, el cual consiste en determinar en tiempo real una ruta y una longitud de onda para el lightpath requerido, con el objetivo de reducir al mínimo la probabilidad de bloqueo de llamada.

#### **4.1.3. Redes Ópticas de Enrutamiento por Longitud de Onda de Conmutación de Ráfagas (WR-OBS) [10]**

En estas redes los paquetes son agregados electrónicamente en las ráfagas de los routers de frontera según su destino y clase de servicio; en el mismo punto del proceso de agregación, una petición se envía a la red de backbone para establecer un lightpath entre la fuente y el router de frontera destino. Una vez que se establece el lightpath, una confirmación (acuse de recibo) se envía al router de frontera fuente y entonces la ráfaga es transmitida.

El paradigma de WR-OBS se utiliza en una OCSPN para la provisión de los servicios que requieren retardos limitados, por ejemplo para vídeo en tiempo real y vídeo sobre demanda, esto debido a la capacidad de esta arquitectura para proporcionar tales garantías. Cuando se emplea este paradigma, el problema DRWA es uno de los casos que se solucionarán, puesto que el paradigma de WR-OBS se basa en la conmutación de circuitos rápida, entonces esto no solamente es importante para tener un algoritmo DRWA con una baja probabilidad de bloqueo sino también con un tiempo de cálculo bajo.

Para cada paradigma óptico una cierta cantidad de los recursos de la red (longitudes de onda, fibras, transmisores, receptores, etc) son estática o dinámicamente asignados. Cuando se utiliza la reserva estática de recursos, una cantidad fija de la red es reservada para cada paradigma, sin embargo, como las redes de próxima generación son caracterizadas por un comportamiento dinámico y patrones de tráfico variables, se visualiza la asignación del recurso dinámico como el mecanismo más eficaz porque permite una adaptación completa a los cambios de los patrones de tráfico.

De esta manera, el sistema de asignación de recursos a la topología virtual integrada en la red física no es estático sino que cambia dinámicamente en respuesta a los cambios de tráfico. Si cada "router" de

frontera se equipa con  $n$  transmisores y  $n$  receptores, un subconjunto de estos transceivers (transmisores-receptores) se emplea para fijar la topología virtual, los transceivers restantes se utilizan para establecer las conexiones dinámicas que siguen a las WRON dinámicas o a los paradigmas WR-OBS.

Si el patrón de tráfico sufre un cambio significativo, la topología virtual puede ser reconfigurada y por otra parte el sistema de recursos asignados para este puede también ser modificado, por ejemplo, si la demanda de lightpaths dedicados aumenta, el sistema de transceivers reservado para establecer la topología virtual puede ser disminuido dinámicamente de modo que más recursos puedan llegar a estar disponibles para las WRON dinámicas y los paradigmas WR-OBS; esta asignación dinámica es también aplicable a otros recursos de la red.

En el diseño de una OCSPN un número de casos se deben solucionar, como la forma de configurar, controlar y manejar la red, cómo diseñar el backbone y los routers de frontera y cómo compartir dinámicamente los recursos entre todos los paradigmas. En este capítulo se analizará el primer caso, presentando la investigación en curso sobre los algoritmos estáticos y dinámicos de RWA inspirados en la naturaleza para la configuración de la capa óptica de una OCSPN.

#### **4.2. ASIGNACIÓN DE LONGITUD DE ONDA Y ENRUTAMIENTO ESTÁTICO POR MEDIO DE LA OPTIMIZACIÓN DE COLONIA DE HORMIGAS**

Como se explicó en el capítulo II la Optimización de Colonia de Hormigas (ACO-Ant Colony Optimization) consiste en un número de agentes (como las hormigas) que cooperan para encontrar la solución óptima a un



problema, en la realidad las hormigas pueden solucionar algunos problemas de optimización de una manera colaborativa, tal como encontrar el camino más corto desde su nido hasta la fuente de alimento. Los algoritmos ACO utilizan un sistema de agentes que trabajan como hormigas artificiales, cada hormiga busca una solución en un gráfico y comunica sus resultados a otras hormigas depositando una cierta cantidad de feromona artificial (rastros) en los bordes del gráfico. Al contrario de las hormigas reales, las hormigas artificiales tienen memoria y emplean generalmente técnicas heurísticas para clasificar las soluciones obtenidas.

También se habló en los anteriores capítulos de la utilización de estos algoritmos ACO para la solución de varios problemas en las redes de conmutación de circuitos y el enrutamiento de paquetes, pero las últimas investigaciones se han centrado en utilizar esta técnica para solucionar el problema estático RWA en las redes ópticas, asumiendo que la conversión completa de la longitud de onda está disponible en cada nodo, de esta manera se propone un método basado en ACO para solucionar el problema estático RWA cuando no se usan convertidores de longitud de onda en la red, este método se llama *ACORWA-Ant Colony Optimization for Routing and Wavelength Assignment* (Optimización de Colonia de Hormigas para Enrutamiento y Asignación de Longitud de Onda).

El algoritmo ACORWA se puede utilizar para incluir una topología virtual en una OCSPN. Supóngase que una topología virtual formada por  $H$  lightpaths se debe insertar en una OCSPN, entonces ACORWA define  $H$  colonias de hormigas y cada una de ellas es asignada a uno de los  $H$  lightpaths requeridos, es decir, cada colonia estará a cargo de buscar una ruta y una longitud de onda para un lightpath y de esta manera, cada

hormiga seguirá el rastro depositado por los individuos de su propia colonia e ignorará las otras.

Al inicio del algoritmo, una hormiga de cada colonia es lanzada en el nodo fuente de su lightpath correspondiente, esta pasará a través de la red hasta alcanzar su nodo destino, donde muere, en ese momento, cierta cantidad de rastro se deposita en todos los enlaces que la hormiga ha atravesado. Se debe aclarar que la razón de esta técnica es encontrar el camino mas corto desde la fuente al destino, así que la cantidad de feromona es inversamente proporcional al número de saltos de la ruta.

Si una longitud de onda está disponible para esa ruta, el par de longitud de onda de dicha ruta se almacena en una lista y la longitud de onda se reserva en cada enlace de la ruta, entonces, se lanza de nuevo a otro individuo de la colonia en el nodo fuente, si se encuentra una ruta más corta y una longitud de onda está disponible, el par anterior de longitud de onda de la ruta es substituido por éste y la longitud de onda usada por la solución anterior es liberada. Debe notarse que las hormigas se mueven a través de la red de una manera probabilística, decidiendo qué nodo visitar después según la cantidad de rastro puesta en los enlaces salientes del nodo actual, de esta manera, las hormigas tienden a seguir las rutas más cortas de la trayectoria mientras que son reforzadas con una cantidad más alta de feromona, pero el movimiento aleatorio hace posible encontrar las rutas "no mas cortas" de la trayectoria, lo cual es alguna veces requerido para reducir al mínimo el número de longitudes de onda necesarias para establecer todos los lightpaths. Por otra parte, el rastro puesto en cualquier borde no persiste por siempre, sino que se evapora gradualmente, este mecanismo permite la convergencia del algoritmo.

El algoritmo acaba cuando una ruta y una longitud de onda se han encontrado para todos los lightpaths o cuando un número prefijado de iteraciones se alcanza.

En los actuales desarrollos realizados se ha ejecutado ACORWA en un número de redes realistas como NSFNet<sup>4</sup>, ARPANet<sup>5</sup>, UKNet<sup>6</sup>, las cuales incluyen una topología virtual completamente conectada en ellas, es decir, estableciendo un lightpath entre cada par fuente-destino.

En la tabla 4.1 los resultados obtenidos por ACORWA se comparan con los obtenidos por la heurística propuesta por Baroni y Bayvel [11], Banerjee y Chen [12], y Bouillet y Stern [13] los cuales son algoritmos que se han utilizado para encontrar soluciones al problema RWA con resultados aceptables. En la tabla se demuestra el número de longitudes de onda requeridas por cada algoritmo para encontrar una solución, el número promedio de saltos por lightpath y los saltos más bajos para estos parámetros. ACORWA y la heurística de Baroni y Bayvel se realizan muy bien en términos de longitudes de onda y del número promedio de saltos, pues los valores obtenidos son óptimos o cerca del grado óptimo.

Estos experimentos iniciales de simulación demuestran que ACORWA es un método prometedor para solucionar el problema estático RWA.

---

<sup>4</sup> **NSFNet**: Red de La Fundación Científica Nacional, pertenece al gobierno de los Estados Unidos y es de gran tamaño, esta controlada por la NSF-Entidad Científica Nacional, la cuál suministró servicios de networking para favorecer la educación y la investigación en los EEUU desde 1986 hasta 1995, actualmente no esta en funcionamiento.

<sup>5</sup> La red de computadoras **ARPANET** (*Advanced Research Projects Agency Network*) fue creada por encargo del Departamento de Defensa de los Estados Unidos como medio de comunicación para los diferentes organismos estadounidenses. Realizaba conmutación de paquetes y el primer nodo se creó en la Universidad de California el cual fue la espina dorsal de Internet hasta 1990, tras finalizar la transición al protocolo TCP/IP en 1983.

<sup>6</sup> **UKNet**: Red Británica que fue una de las primeras en proporcionar servicios del Internet.

RED	RECURSOS	SALTO MAS BAJO	BARONI Y BAYVEL	BANERJEE Y CHEN	BOUILLET Y STERN	ACORWA
NSFNet	W	13	13	16	13	13
	H	2,143	2,143	2,747	2,527	2,143
ARPANet	W	33	33	36	33	33
	H	2,805	2,805	3,487	3,342	2,811
UKNet	W	19	22	25	19	21
	H	2,505	2,505	3,362	3,001	2,526

**Tabla 4.1** Número de longitudes de onda requeridas (W) y número promedio de saltos por lighpath (h) para establecer una topología virtual completamente conectada en redes reales. Se observa los resultados de ACORWA y de tres heurísticas reportadas previamente.

### **4.3. ENRUTAMIENTO DINÁMICO Y ASIGNACIÓN DE LONGITUD DE ONDA POR MEDIO DE ALGORITMOS GENÉTICOS:**

Como se explicó en el capítulo 1 los Algoritmos Genéticos (AG) son algoritmos de búsqueda basados en los mecanismos de selección y genética natural.

Un AG trabaja con individuos, cada uno representando una solución al problema que es abordado y para llegar a estimar la calidad de una solución, se define una función fitness, luego se crea una población inicial de individuos y después esta se desarrolla por medio de operadores genéticos tales como crossover y mutación, para formar una nueva población (la generación siguiente) que se espera sea más apta que la pasada. Debe ser aclarado que un AG es un método genérico que tiene que ser adaptado a un problema en particular que se procura solucionar.

Se ha propuesto un algoritmo genético, llamado GRWA- *Genetic Routing and Wavelength Assignment* (Enrutamiento Genético y Asignación de Longitud de Onda [9]), para solucionar el problema de enrutamiento dinámico y asignación de longitud de onda en las redes sin conversión de

longitud de onda, con el objetivo de reducir la probabilidad de bloqueo de llamada; por otra parte, el algoritmo GRWA también se ha diseñado con la intención de obtener un tiempo de cálculo bajo, por lo tanto, este algoritmo es útil no solamente para solucionar el problema DRWA cuando se utiliza el paradigma de WRON dinámico sino también cuando se emplea el paradigma de WR-OBS.

El algoritmo GRWA trabaja con una población de individuos donde cada uno es una posible ruta entre el par fuente-destino requerido (s-d) de la red; la codificación de una ruta es un arreglo de números enteros donde cada entero identifica un nodo atravesado por la ruta.

Cuando se solicita un lightpath se ejecuta el algoritmo; este primero crea una población inicial de P rutas generadas aleatoriamente (individuos); el tamaño de la población P es un parámetro de diseño del algoritmo GRWA que puede ser modificado para requisitos particulares; posteriormente la población es desarrollada a un número de iteraciones (generaciones) hasta que el criterio para y es resuelto, entonces, el mejor individuo encontrado es tomado como la solución para establecer ese lightpath.

Para desarrollar el proceso de evolución se inician las etapas de crossover, mutación y de selección:

- El operador crossover puede ser aplicado solamente a un par de rutas que tienen por lo menos un nodo en común, aparte de la fuente y los nodos destino. Inicialmente, los nodos comunes se buscan en las rutas padre, si cualquiera de ellas se elige aleatoriamente y las rutas padre son divididas en dos mitades por ese nodo, las rutas hijas se hacen por intercambio de las segundas mitades de sus padres.
- En la etapa de mutación, el operador de mutación es aplicado a algunos individuos de la población actual y a las rutas hijas generadas en la etapa de crossover. El proceso inicia cuando un nodo de la ruta se

selecciona aleatoriamente y una ruta nueva se genera desde el nodo seleccionado (nodo de mutación) hasta el nodo destino; se debe tener en cuenta que la ruta desde el nodo fuente al nodo de mutación permanece sin tocar.

- En la etapa de selección y evaluación los individuos más aptos son seleccionados de la población actual y de las rutas hijas generadas en la etapa crossover.

Cada vez que un individuo se crea, su función fitness tiene que ser evaluada, ya que en el algoritmo GRWA no solamente la función fitness determina la calidad de un individuo sino que también realiza la asignación de la longitud de onda.

El costo de un lightpath se define como el número de enlaces de fibra que se atraviesan, asumiendo que hay por lo menos una longitud de onda común en todos los enlaces de la trayectoria. Si varias longitudes de onda están disponibles, el índice más bajo entre ellas es asignado al lightpath; si no hay longitud de onda disponible, el costo del lightpath es infinito y obviamente no se asigna ninguna longitud de onda. Como las rutas disponibles más cortas son las preferidas siempre, pues estas tienen un costo más bajo, se puede definir el valor fitness como el inverso del costo.

Junto con el parámetro  $P$  (tamaño de la población), otro parámetro personalizable es  $G$ , que es el número máximo de generaciones que el algoritmo deja para desarrollarse, así que este acabará después de  $G$  generaciones o cuando se encuentra una "buena ruta".

Otro valor importante es el parámetro  $S$  el cuál denota el valor del costo satisfactorio de una ruta entre los nodos  $s$  y  $d$ , así que, una ruta con el valor de costo más bajo o igual a  $S$  se dice que es una "buena ruta". El

parámetro  $S$  se fija inicialmente a la distancia más corta (número mínimo de saltos) entre los nodos  $s$  y  $d$  y después de cada iteración, su valor es incrementado en uno, de esta manera, el algoritmo desarrollará las  $G$  generaciones solamente cuando sea necesario, es decir, sólo cuando una "buena ruta" no se ha encontrado antes. El descubrimiento temprano de las buenas rutas es la llave para que nuestro algoritmo alcance tiempos computacionales muy cortos.

Basándose en todos estos parámetros se han utilizado experimentos de simulación para contrapesar ventajas y desventajas de este método, estos resultados demuestran que en la mayoría de los casos GRWA elige la mejor solución, haciendo que la función de bloqueo sea apenas sensible, además el incremento de  $S$  después de cada iteración da lugar a una ganancia substancial en términos de tiempo de ejecución.

Se puede decir que la ventaja principal de un AG es que es un método genérico el cual se puede adaptar fácilmente a la naturaleza del problema que se está tratando, por este motivo, se ha tomado ventaja de esta característica desarrollando dos extensiones del algoritmo:

➤ Primero se ha ideado una extensión, llamada FAIR-GRWA que se encarga de proporcionar la transparencia entre conexiones; el objetivo de esta transparencia es que todas las peticiones del lightpath tengan aproximadamente la misma probabilidad de bloqueo (punto bajo) que será independiente de la localización de la fuente y de los nodos destino. La transparencia puede ser alcanzada ayudando a las "conexiones difíciles" a expensas de las "conexiones fáciles". Usando GRWA, esto puede ser realizado simplemente adaptando los parámetros de la

evolución G y P según la dificultad que exista, para luego poder establecer la conexión solicitada.

➤ Otro tema importante en cualquier red de comunicaciones es el de la supervivencia, que es la capacidad de tolerancia a fallas en la capa óptica y se puede alcanzar por medio de la protección, donde cada petición de conexión óptica es proporcionada con un par de lightpaths, un lightpath primario y uno de reserva.

Para las peticiones de conexión que exigen la protección en la capa óptica, se ha desarrollado el algoritmo FT-GRWA (GRWA de tolerancia a fallas), que demuestra ser altamente eficiente en los procesos de enrutamiento y asignación de longitud de onda de pares de lightpaths.

Se ha evaluado el funcionamiento de estos algoritmos por medio de la simulación, la red considerada es la NSFNet la cual consta de 8 longitudes de onda por fibra. En las simulaciones realizadas se utilizó un modelo dinámico de tráfico en el cual las peticiones del lightpath llegan a la red según un proceso independiente de Poisson con un rango de llegada de red de área extensa  $\lambda$ . La llamada que mantiene el tiempo es exponencialmente distribuida por medio del parámetro llamado  $T_{hold}$ , entonces la carga de la red será  $\lambda \cdot T_{hold}$  (Erlang).

Posteriormente los pares s-d (nodo fuente (s) y nodo destino (d)) se eligen aleatoriamente según una distribución uniforme y varias llamadas se pueden acomodar simultáneamente entre dicho par.

Utiliza la probabilidad de bloqueo media como un indicador de funcionamiento y un límite más alto calculado experimentalmente en tiempo de ejecución medio como un indicador de la velocidad del algoritmo; este límite más alto se calcula como el tiempo de simulación



dividido por el número de llamadas<sup>7</sup> simulado, entonces este límite más alto se refiere simplemente a un tiempo de ejecución medio.

Para hacer comparaciones, los resultados de la simulación en probabilidad de bloqueo media y en tiempo de ejecución medio también se han obtenido con el Algoritmo "Adaptive Unconstrained Routing Exhaustive" (AUR-E)(*Enrutamiento Espontáneo Adaptable Exhaustivo*), el cual es un eficiente algoritmo respecto al bloqueo de funcionamiento [14] [15].

La figura 4.2 muestra una comparación de la probabilidad de bloqueo media obtenida con GRWA (8,8) (GRWA con parámetros G y P, ambos fijos a 8), FAIR-GRWA y AUR-E para un amplio rango de carga de valores de tráfico de la red. Los tiempos de ejecución medios correspondientes se representan en la figura 4.3. Se puede ver que en la figura 4.2, el funcionamiento de bloqueo de GRWA (8,8), FAIR-GRWA y de AUR-E es comparable para todos los valores de carga de tráfico, aunque para los valores de carga pequeños AUR-E supera levemente a GRWA (8,8) y FAIR-GRWA. Por otra parte, la figura 4.3 muestra que el tiempo de ejecución medio de GRWA(8,8) y FAIR-GRWA (especialmente de FAIR-GRWA) está substancialmente debajo del de AUR-E. Se observa que, en cierto rango de los valores de carga de tráfico (0-50 Erlang), el tiempo de ejecución media de FAIR-GRWA es aproximadamente una orden de magnitud debajo de la de AUR-E.

---

<sup>7</sup> Las simulaciones fueron corridas en un computador con procesador AMD K6 200 MHz, 32 MB de RAM y sistema operativo Windows 98. Los algoritmos fueron implementados usando Visual C++ v. 6.0.

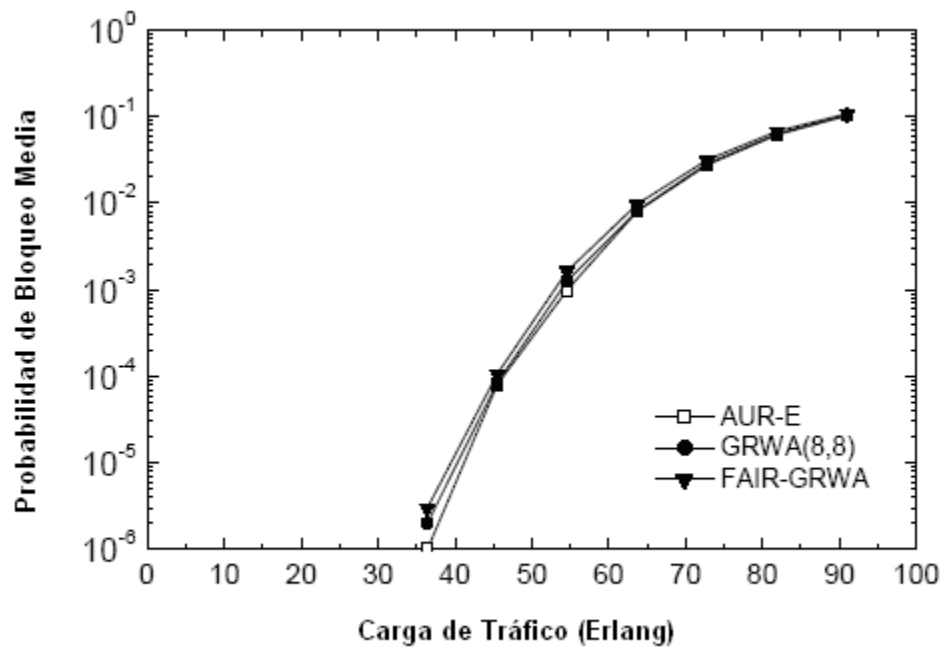
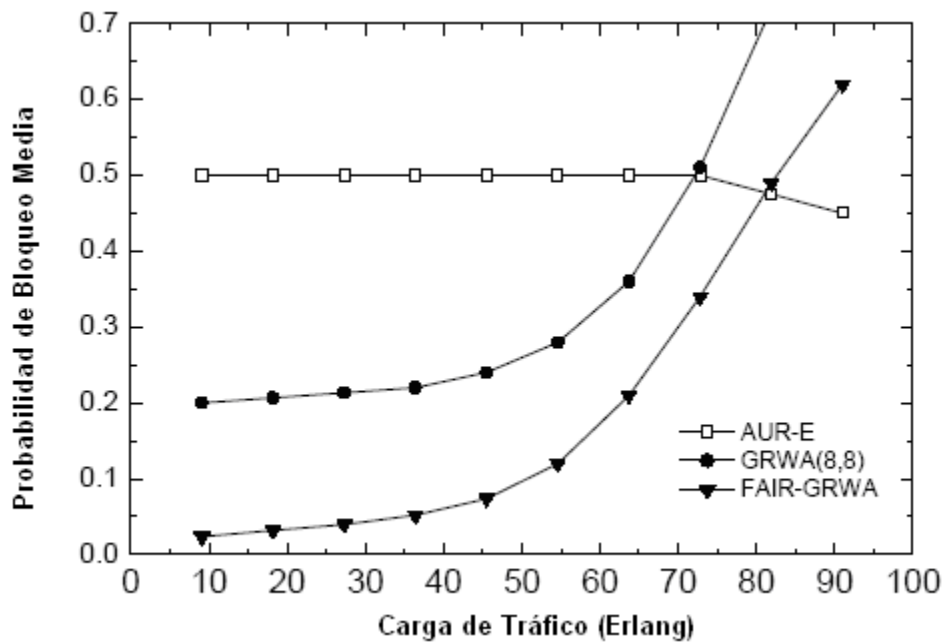


Figura 4.2. Probabilidad de bloqueo media obtenida con GRWA (8,8), FAIR-GRWA y AUR-E en la NSFNet con 8 longitudes de onda para varios valores de carga de tráfico [9].

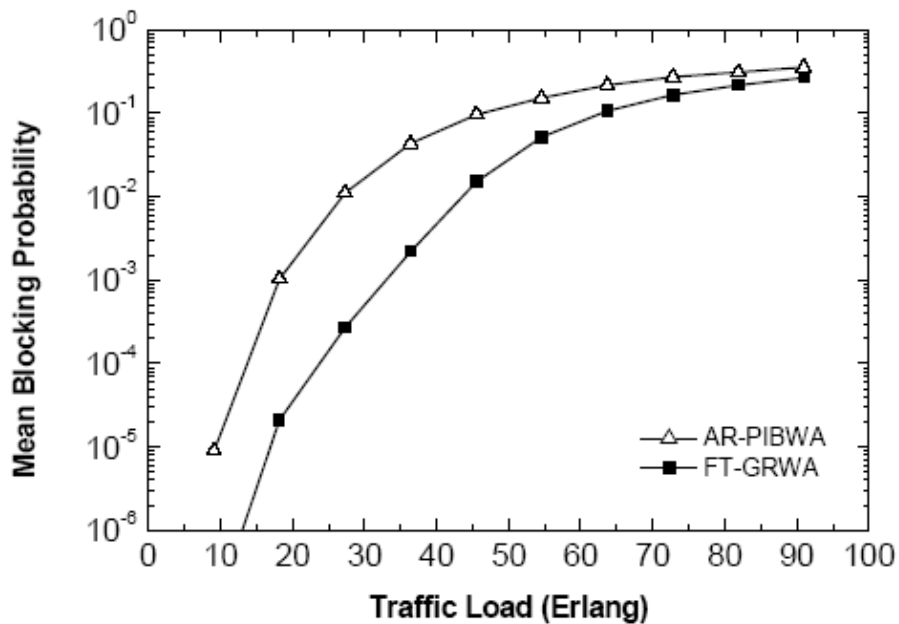


**Figura 4.3** Tiempo de ejecución medio de GRWA (8,8), FAIR-GRWA y AUR-E en la NSFNet con 8 longitudes de onda para varios valores de la carga de tráfico [9].

Ahora se evalúa el establecimiento de lightpaths protegidos. Se observa que en este caso una petición de conexión es satisfecha por el establecimiento de un par del lightpath primario backup (de reserva). En la figura 4.4, se compara el funcionamiento, en términos de la probabilidad de bloqueo medio, de FT-GRWA, con parámetros G y P, ambos fijos a 8 y el método de enrutamiento alternativo para encaminar los pares del lightpath primario de reserva propuesto [14]. Este método, así como FT-GRWA, hacen uso de la técnica de multiplexación de backup (de reserva), la idea importante detrás de la multiplexación de backup es que varios lightpaths de reserva pueden compartir un canal de longitud de onda si sus lightpaths primarios correspondientes están en un enlace-desunido. Entre los diversos métodos de asignación de longitud de onda propuestos [14], se utiliza el que alcance la probabilidad de bloqueo de

llamada más baja, la cual es llamada PIBWA; desde ahora se hace referencia a este algoritmo como AR-PIBWA.

Examinando la figura, se puede ver claramente que FT-GRWA supera los métodos de enrutamiento alternativo para todos los valores de carga de la red considerados.



**Figura 4.4 Probabilidad de bloqueo media obtenida por FT-GRWA y AR-PIBWA en la NSFNet con 8 longitudes de onda para varios valores de la carga de tráfico [REF y cambiar ingles).**

Después de observar todos estos resultados se puede concluir que la investigación en curso sobre redes polimórficas tiene como objetivo el determinar métodos para configurar, controlar y gestionar la red, desarrollar las estructuras pragmáticas para los routers de backbone y de frontera e idear métodos para compartir recursos dinámicamente entre todos los paradigmas.

En este capítulo se ha mostrado la ultima investigación sobre los algoritmos recientemente propuestos para solucionar los problemas de

enrutamiento estático, dinámico y el problema de asignación de longitud de onda; estos son problemas claves en una OCSPN, pero están también presentes en cualquier red óptica enrutada por longitud de onda, por lo tanto, los algoritmos presentados aquí son también útiles en esos escenarios, puesto que ambos se requieren y son métodos eficaces y rápidos donde se emplea la metaheurística, específicamente, la optimización de la colonia de hormigas y algoritmos genéticos.

## **5. DISEÑO E IMPLEMENTACION DE LA HERRAMIENTA SOFTWARE.**

Se aplicará la metodología de simulación de equipos de telecomunicaciones que es adecuada para el modelamiento de sistemas de este tipo, ya que permite manejar la complejidad del sistema a través de la definición de modelos basados en bloques funcionales fácilmente adaptables a entornos de simulación.

La aplicación de esta metodología requiere considerar los siguientes pasos:

(referenciar tesis de la metodología de simulación)

### **5.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA:**

Para poder observar o visualizar de alguna manera el desarrollo del algoritmo durante el proceso de búsqueda y elección de mejores soluciones de enrutamiento y debido a la imposibilidad física de aplicarlo en una red óptica real o a un simulador de redes ópticas, se desarrolló una herramienta SOFTWARE de simulación que permitirá, observar en forma gráfica los routers, las rutas y las longitudes de onda que se utilizan durante el proceso de búsqueda, mostrará las actualizaciones de las tablas de enrutamiento durante la ejecución en forma numérica, permitiendo visualizar el funcionamiento de un AS aplicado en una red

óptica y por último servirá como complemento a la línea de investigación que busca iniciar este trabajo de tesis.

## **5.2 FORMULACIÓN DEL MODELO:**

### **5.2.1 Restricciones y aproximaciones del modelo:**

- No está dentro de los requerimientos del presente modelo, tener en cuenta los tiempos de transmisión de mensajes entre diferentes dispositivos de la red, las perturbaciones que el medio de transmisión introduce a las tramas, métodos de corrección de errores, tiempo de procesamiento de mensajes dentro de los dispositivos, ni simulación simultánea de diferentes algoritmos.
- En este capítulo se describe la solución software al problema planteado y las diferentes decisiones de diseño y desarrollo tomadas en este proyecto que involucran: selección de la arquitectura, modelos descriptivos y tecnologías de programación empleadas.
- Para describir la solución desarrollada en este proyecto, se inicia detallando el funcionamiento de la herramienta de simulación, posteriormente se explican los modos de configuración y manejo de interfaces.

### **5.2.2 Generación del modelo:**

El modelo planteado en este proyecto es una solución que integra conocimiento tanto en la parte software, como en el dominio del tema de enrutamiento en redes ópticas.

### **5.3 COLECCIÓN DE DATOS:**

La solución SOFTWARE esta basada totalmente en los requerimientos y pasos que se explican detalladamente en el capitulo 4 acerca de la aplicación de un algoritmo AntSystem sobre una red óptica PMON.

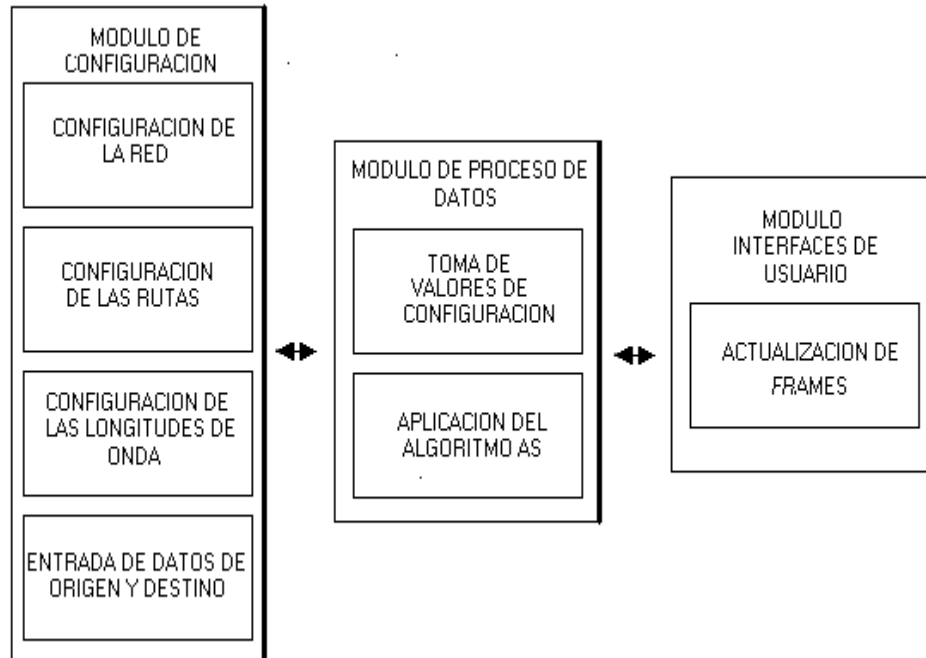
### **5.4 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO:**

El entorno de desarrollo Labwindows/CVI que pertenece a la National Instruments, fue el IDE en el cual se construyó la herramienta de simulación. Este producto en su versión de prueba 7.00, proporciona las herramientas necesarias para interactuar con el sistema ideado para la realización de la simulación objeto de éste.

Labwindows/CVI es un entorno de trabajo visual bajo lenguaje C, especialmente diseñado para generar soluciones de automatización y simulación, esto permite una fácil interacción con el usuario. El software desarrollado con esta herramienta proporciona una interface intuitiva y sencilla.

La figura 5.1 describe de forma general la arquitectura software, módulos y los procesos desarrollados dentro de la aplicación para dar solución al problema planteado.





**Figura 5.1. Arquitectura Software**

La descripción en detalle de cada uno de los módulos y procesos es la siguiente:

#### **5.4.1 Módulo de configuración:**

Este módulo está constituido por cuatro procesos que dependen de acciones determinadas por el usuario y que le permitirán establecer todas las características de un enlace de un nivel de core con routers ópticos de una red PMON; los pasos a seguir deben ser configurar la red, configurar las rutas entre routers, configurar las longitudes de onda por ruta y por último para poder observar el proceso, deberá escoger dos puntos uno de origen (router origen) y otro destino (router destino) dentro de la red

configurada previamente, sobre los cuales se llevara a cabo la simulación de búsqueda del mejor camino por parte del algoritmo AS.

Para entrar al modo de configuración se deberá presionar el botón que corresponde a esta el cual se encuentra dentro del menú principal (Figura 5.2).



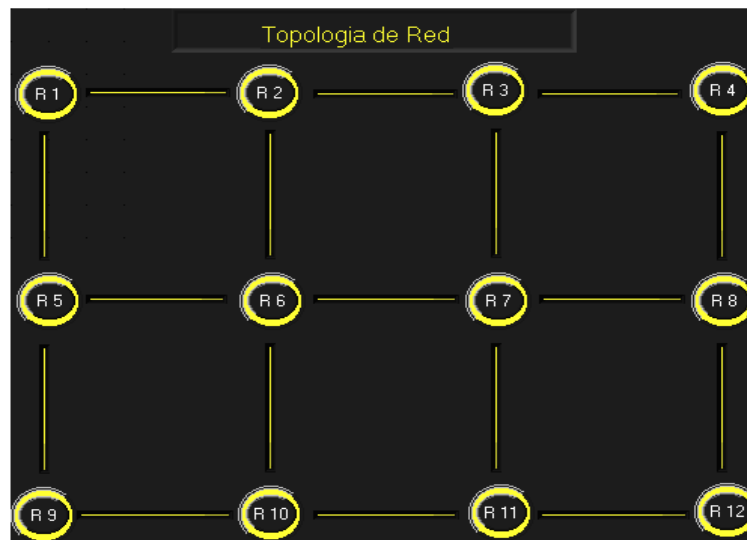
**Figura 5.2 Entrando al modo de Configuración General.**



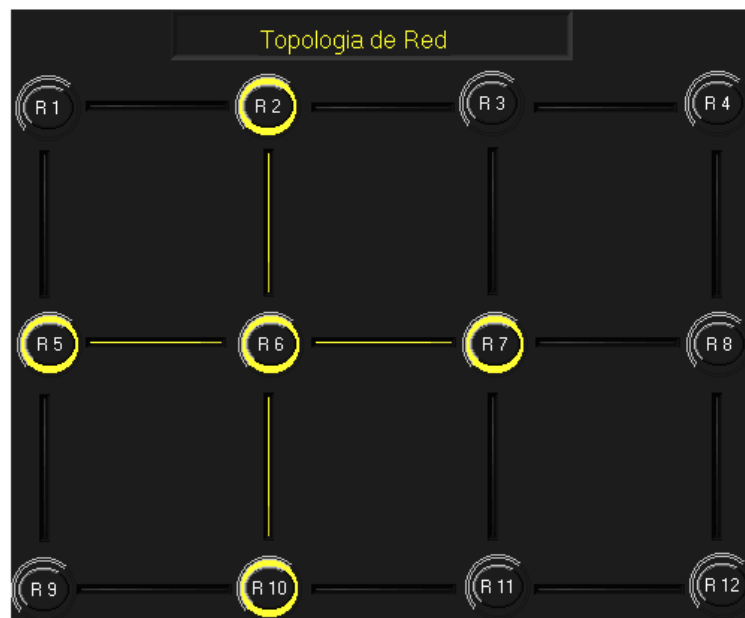
**Figura 5.3 Menú de Configuración.**

### 5.4.2 Configuración de la topología:

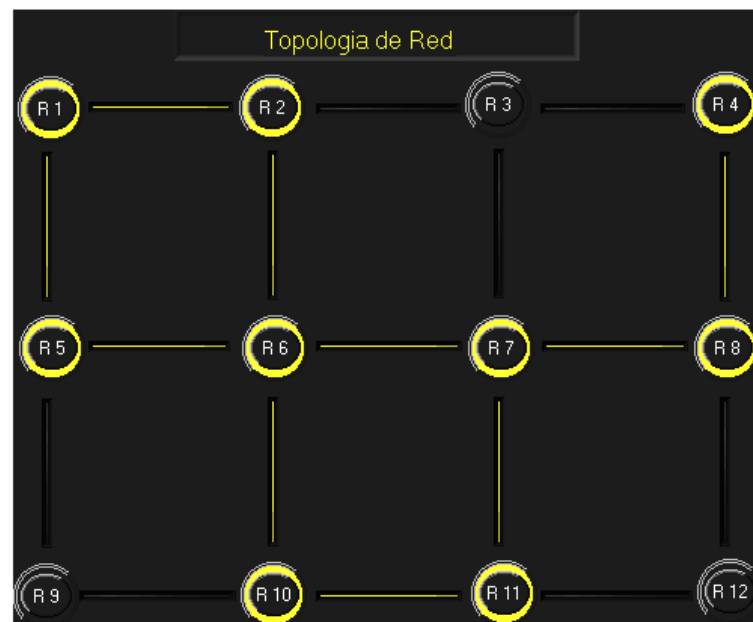
Por medio de este proceso se puede configurar la red emulando una red PMON clásica en su nivel de core, el sistema permite configurar una red desde dos hasta un número máximo de 12 routers, para esto el usuario deberá hacer click sobre el router y sobre el enlace que desee habilitar (el router y el enlace elegidos se iluminarán). En la figura 5.4, 5.5, 5.6 se puede observar algunas topologías posibles:



**Figura 5.4. Topología de Red 1.**



**Figura 5.5. Topología de Red 2.**



**Figura 5.6. Topología de red 3.**

### 5.4.2.1 Configuración de las rutas:

Para escoger entre que routers habrá conexión directa y entre cuales no, el usuario lo hará por medio de la tabla de configuración de rutas, en este punto y según el diseño elegido, se establecerán caminos o no dentro de la red (Figura 5.7).

**Tabla de Configuración de Rutas**

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12
R1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
R2	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
R3	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
R4	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
R5	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
R6	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0
R7	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0
R8	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1
R9	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
R10	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0
R11	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1
R12	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0

**V O L V E R**

**Figura 5.7** Interfaz para Configurar las rutas entre los Routers.

#### 5.4.2.2 Configuración de las longitudes de onda:

Para habilitar las longitudes de onda en cada ruta el usuario podrá elegir entre cuatro longitudes de onda que genera el sistema, pudiendo escoger entre cero como mínimo y cuatro como máximo; para facilitar esta configuración se ha diseñado la siguiente tabla (5.1) que permitirá escoger las longitudes de onda con mas facilidad, la relación esta basada en el sistema numérico binario.

En las figuras 5.8 y 5.9 se puede observar las interfaces de configuración de las longitudes de onda.

<b>Numero Representativo</b>	<b>Numero binario</b>	<b>Longitudes de onda habilitadas</b>
<b>0</b>	<b>0000</b>	<b>Ninguna</b>
<b>1</b>	<b>0001</b>	<b>L1</b>
<b>2</b>	<b>0010</b>	<b>L2</b>
<b>3</b>	<b>0011</b>	<b>L2-L1</b>
<b>4</b>	<b>0100</b>	<b>L3</b>
<b>5</b>	<b>0101</b>	<b>L3-L1</b>
<b>6</b>	<b>0110</b>	<b>L3-L2</b>
<b>7</b>	<b>0111</b>	<b>L3-L2-L1</b>
<b>8</b>	<b>1000</b>	<b>L4</b>
<b>9</b>	<b>1001</b>	<b>L4-L1</b>
<b>10</b>	<b>1010</b>	<b>L4-L2</b>
<b>11</b>	<b>1011</b>	<b>L4-L2-L1</b>

<b>12</b>	<b>1100</b>	<b>L4-L3</b>
<b>13</b>	<b>1101</b>	<b>L4-L3-L1</b>
<b>14</b>	<b>1110</b>	<b>L4-L3-L2</b>
<b>15</b>	<b>1111</b>	<b>L4-L3-L2-L1</b>

**Tabla 5.1** Tabla de representación numérica de las longitudes de onda.

**Tabla de Configuración de Longitudes de Onda**

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12
R1	0	11	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0
R2	11	0	7	0	0	12	0	0	0	0	0	0
R3	0	7	0	13	0	0	5	0	0	0	0	0
R4	0	0	13	0	0	0	0	9	0	0	0	0
R5	12	0	0	0	0	6	0	0	10	0	0	0
R6	0	12	0	0	6	0	8	0	0	3	0	0
R7	0	0	5	0	0	8	0	11	0	0	1	0
R8	0	0	0	9	0	0	11	0	0	0	0	15
R9	0	0	0	0	10	0	0	0	0	9	0	0
R10	0	0	0	0	0	3	0	0	9	0	9	0
R11	0	0	0	0	0	0	1	0	0	9	0	14
R12	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	14	0

**V O L V E R**

**Figura 5.8** Interfaz para Configurar las Longitudes de Onda.



**Figura 5.9. Interfaz grafica de configuración de las Longitudes de Onda en cada ruta.**

#### **5.4.2.3 Entrada de datos de origen y destino:**

Una vez se ha configurado toda la información referente a la red, las rutas y las longitudes de onda, el usuario podrá simular como el algoritmo encuentra la ruta mas corta entre dos routers, para esto deberá escoger los dos puntos que hacen referencia a un router origen y a un router



destino, esto se hace simplemente entrando a las ventanas correspondientes donde se ingresarán los datos (Figuras 5.10 y 5.11).



A screenshot of a software interface showing two input fields. The top field is labeled 'origen' and contains the number '0'. The bottom field is labeled 'destino' and also contains the number '0'. The labels are in a yellow font on a dark background, and the input boxes are white with black borders.

**Figura 5.10. Escoger puntos de origen y destino.**



A screenshot of a software interface showing two input fields. The top field is labeled 'origen' and contains the number '3'. The bottom field is labeled 'destino' and contains the number '11'. The labels are in a yellow font on a dark background, and the input boxes are white with black borders.

**Figura 5.11. Elección de los puntos de origen y destino sobre los cuales se quiere aplicar la simulación.**

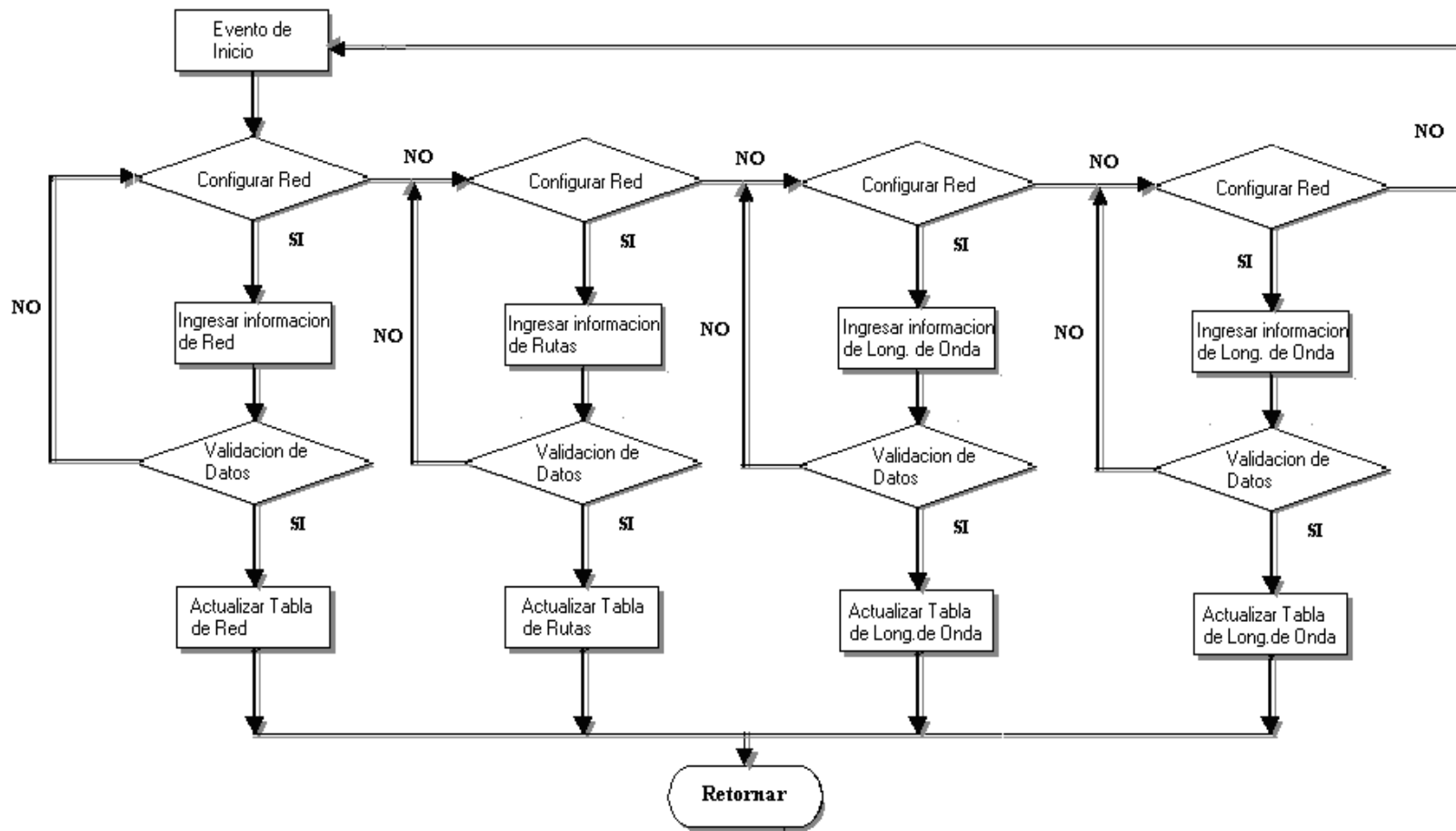


Figura 5.12.

A continuación se explica el diagrama de flujo correspondiente al módulo de configuración (Figura 5.12).

➤ **Evento de Inicio:**

Este evento se ejecuta cuando el usuario acciona el botón Configuración en la interfaz gráfica. Inmediatamente se desplegará la ventana donde se encuentran las cuatro opciones de configuración para topología de la red, rutas, longitudes de onda, puntos de origen/destino y una opción de volver al menú.

**Paso 1:**

En este punto el sistema está en espera de la petición de cualquiera de las cuatro opciones de configuración:

Si se cumple la condición 1: Verifica si desea o no configurar la red, si es así despliega la ventana para configuración de red, donde verificara sobre cuales elementos se hace click para iluminarlos y almacenar esta posición como habilitada, si no vuelve al menú de configuración por medio del botón volver.

Si se cumple la condición 2: Verifica si desea o no configurar las rutas entre routers, si es así despliega la tabla para configuración de rutas, donde verificará a validez de los datos, de ser validos el sistema los almacenará y si no los son, entonces no los recibirá y regresará al menú de configuración por medio del botón volver.

Si se cumple la condición 3: Verifica si desea o no configurar las longitudes de onda de cada ruta entre routers, si es así despliega la tabla para configuración de longitudes de onda, donde verificará la validez de los datos, este proceso de validación es igual al anterior.

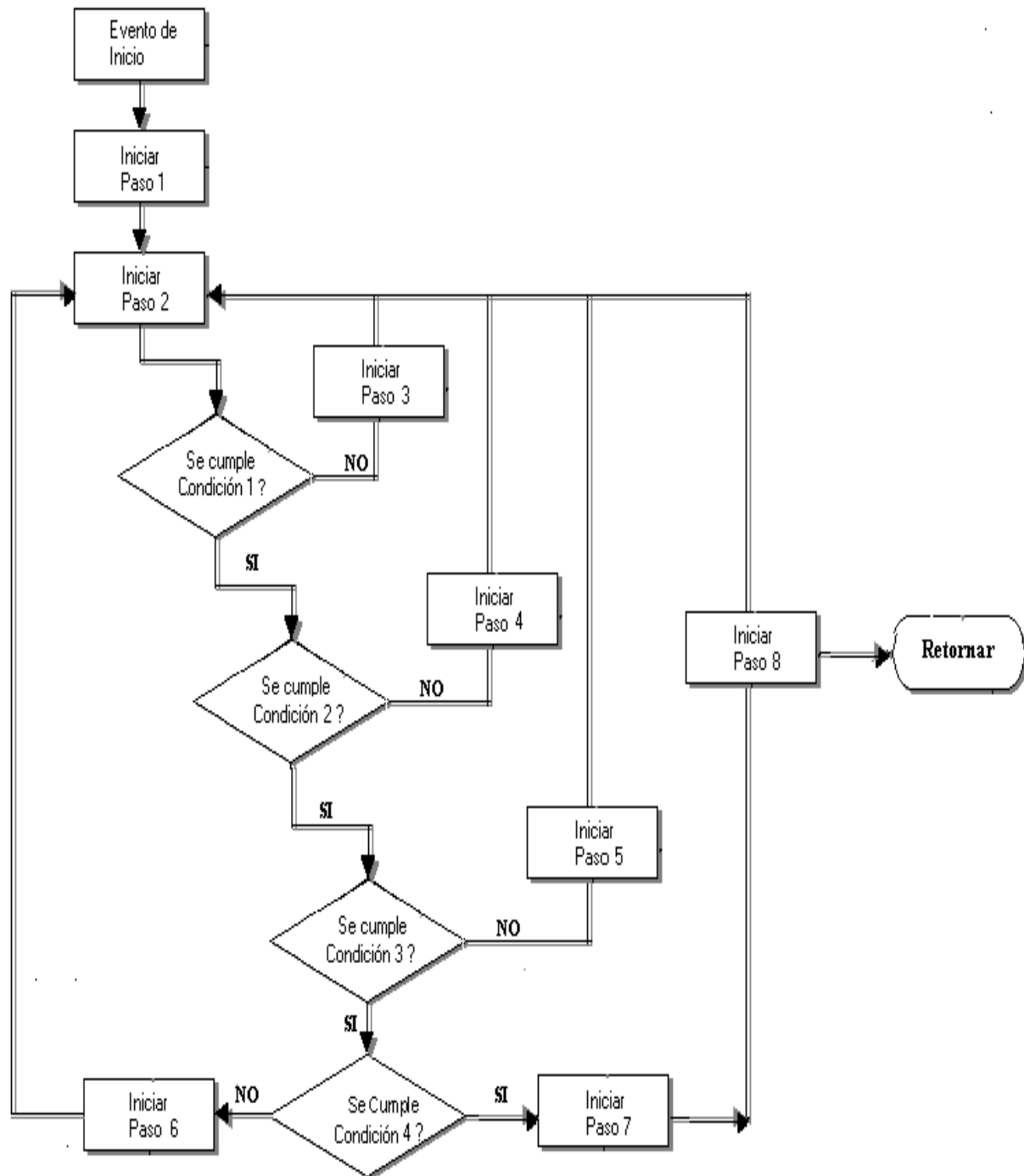
Si se cumple la condición 4: Toma los valores de origen y destino y verifica su validez. Si no son válidos vuelve al menú de configuración.

Paso 2:

Retornar al menú principal.

### **5.4.3 Modulo de procesamiento de datos:**

Una vez se hace la petición de simulación el sistema carga primero en las tablas toda la información de configuración predeterminada por el usuario, este buscara a través de la red varios posibles caminos entre origen y destino, verificando la existencia o no de rutas y longitudes de onda habilitadas en cada enlace, utilizando las tablas de configuración iniciales, almacenado temporalmente los mejores resultados para al final elegir, según los criterios de convergencia del algoritmo, el mejor camino entre el origen y el destino; el proceso es el siguiente (Figura 5.13):



**Figura 5.13. Diagrama de Flujo: Modulo de proceso de datos.**

➤ **Evento de Inicio:**

Este evento se ejecuta cuando en la interfaz gráfica de usuario se acciona sobre el botón iniciar simulación. Inmediatamente se desplegará la ventana donde encontrará la interfaz grafica de los routers, sus interconexiones y también las longitudes de onda diferenciadas por colores; también se desplegaran las tablas de resultados y la tabla temporal.

La tabla de resultados es donde queda almacenado el lightpath escogido para una ruta y la tabla temporal es donde se puede observar en forma numérica el recorrido que sigue el algoritmo durante el proceso de selección.

**Paso1:**

Primero el sistema tomará todos los datos de configuración iniciales introducidos por el usuario donde se especifica el origen y el destino.

**Paso 2:**

Verifica el paso a seguir y la ruta de búsqueda en la cual se encuentra, una vez definido esto el paso siguiente es entrar a valorar una por una las condiciones de la ruta para ese punto.

**Condición 1:**

Verifica si para el primer paso que es equivalente al primer router en la primera búsqueda esta configurado para esa ruta, si lo esta prosigue con la siguiente condición.

Paso 3:

Avisa que se debe empezar con la búsqueda siguiente debido a la inexistencia de la primera posición para la topología dispuesta por el usuario.

Condición 2:

Verifica si existe una ruta entre el router correspondiente al origen y el router correspondiente al primero de la primera ruta de búsqueda. Si hay ruta sigue a la siguiente condición.

Paso 4:

Informa que esta ruta no tiene enlace físico y avisa que debe empezar otra ruta de búsqueda.

Condición 3:

Verifica que longitudes de onda están habilitadas para esa conexión, de existir almacena cual (es) y continúa con la siguiente condición.

Paso 5:

Si no existe longitud de onda habilitada para ese enlace, avisa que el proceso debe repetirse para el segundo punto que correspondería al segundo router de esa ruta.

Condición 4:

Verifica si el router para el que ha encontrado ya ruta y longitud de onda es el router destino elegido por el usuario.

Paso 6:

Si no es el router destino el proceso debe repetirse para la siguiente ruta de búsqueda.

Paso 7:

En caso de encontrar el router destino es porque habrá encontrado en algún punto de esta búsqueda una ruta y una longitud de onda entre el origen y el destino y deberá almacenarla en la tabla temporal de recorridos.

Paso 8:

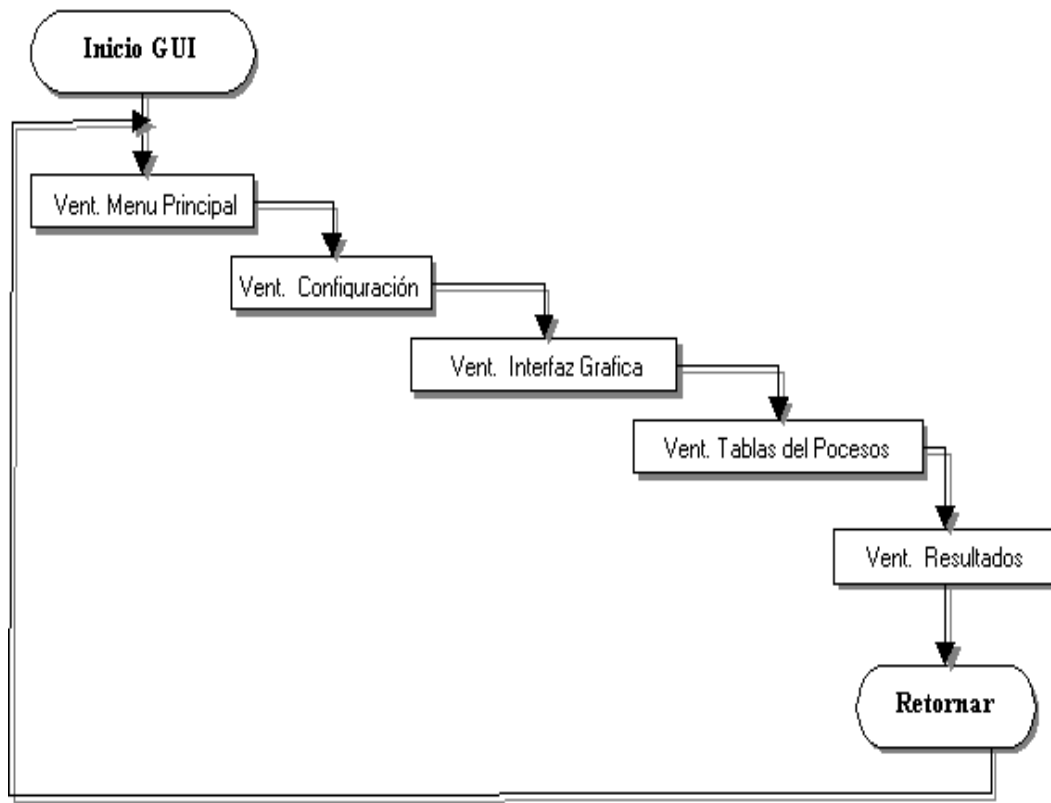
Verifica si se ha cumplido el número máximo de interacciones donde se evalúan todas las mejores soluciones, esto se hace para que el algoritmo converja y posteriormente debe verificar si no es un lightpaht almacenado como ideal por lo cual debería ser elegido y acabar la búsqueda, por ser esta la mejor solución de todas, una vez cumplido en número máximo de iteraciones deberá evaluar la mejor y almacenarla en la tabla de resultados donde es desplegada.

#### **5.4.4 Modulo de interfaces de usuario:**

Este modulo permite al usuario interactuar con el sistema permitiendo introducir todos los valores de configuración además de permitir visualizar en forma grafica y numérica el proceso de aplicación del algoritmo AS; su esquema se describe a continuación.

- Actualización de Frames: (fig 5.14)





**Figura 5.14. Diagrama de flujo del modulo Interfaces.**

➤ Inicio GUI:

Este proceso se activa cuando se ejecuta el software.

➤ Ventana de Menú Principal:

En esta ventana el usuario encuentra todas las opciones a las cuales puede acceder, desde la configuración hasta la visualización de la simulación.



**Figura 5.15. Menú Principal.**

➤ **Ventana de Configuración:**

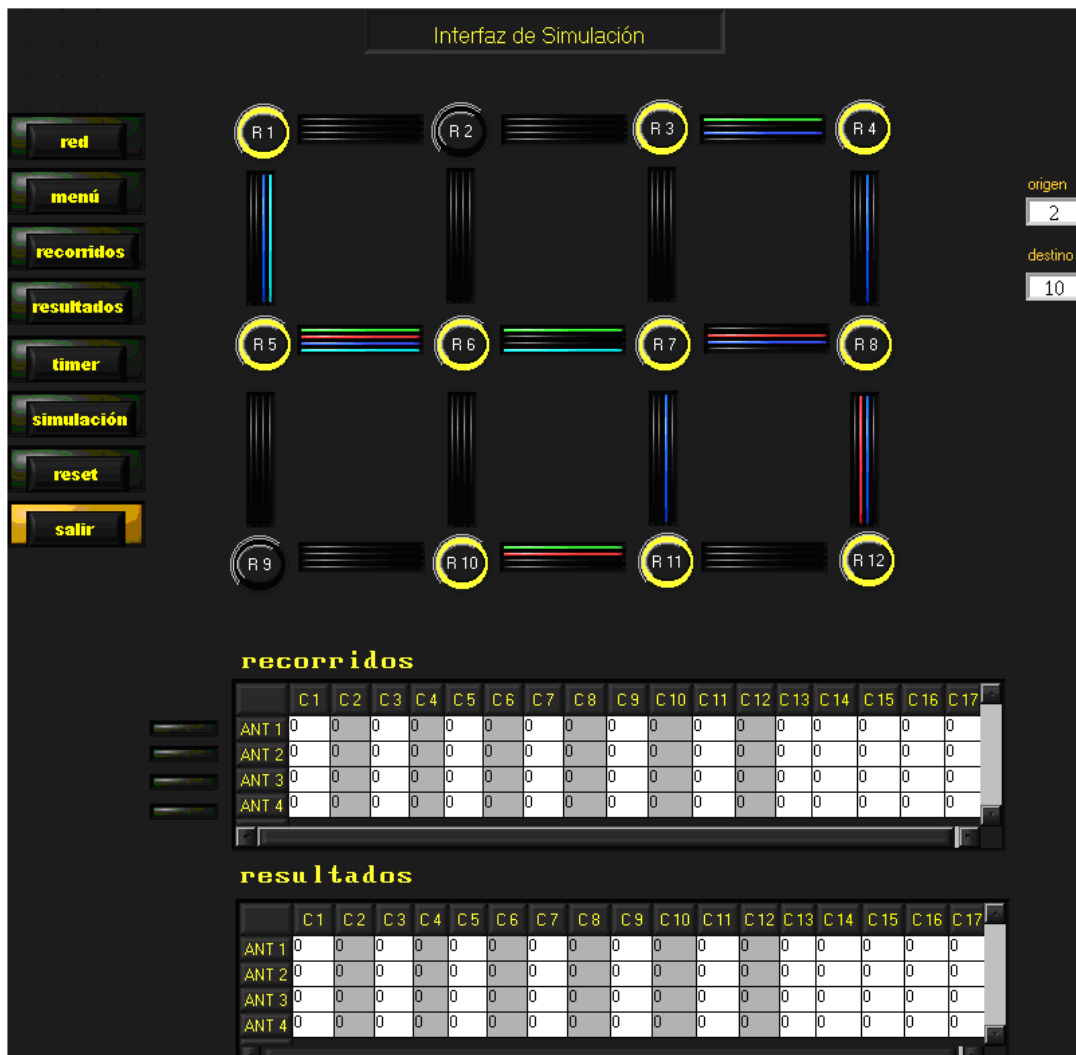
En esta ventana el usuario encuentra las opciones de configuración de topología de red, de rutas, de longitudes de onda y de puntos de origen y destino.



**Figura 5.16. Menú de Configuración.**

➤ Ventana de Interfaz Grafica:

La interfaz grafica es la parte mas importante de la aplicación ya que aquí es donde realmente se puede visualizar el proceso de búsqueda y elección de la solución al problema de enrutamiento; en la parte de arriba, la interfaz muestra el entorno grafico de la topología de red y en la parte inferior se pueden observar las dos tablas que hacen referencia al proceso en forma numérica.



**Figura 5.17 Interfaz de Simulación.**

➤ **Ventana de Tabla de Procesos :**

En esta ventana el usuario podrá visualizar en una tabla el recorrido de las diferentes búsquedas que se estén presentando; el cruce entre la columna y la fila de los routers muestra el estado de utilización estas.

**recorridos**

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17
ANT 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ANT 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ANT 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ANT 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Figura 5.18** Tabla que presenta todos los recorridos de la búsqueda.

➤ Ventana de Resultados:

En esta ventana el usuario podrá visualizar el resultado final al cual converge el algoritmo y se almacenará un grupo de ciertos resultados como buenas y posibles futuras opciones de solución; debido a la rapidez del proceso, el usuario podrá elegir el tiempo de ocurrencia para que la visualización pueda tener más claridad.

**resultados**

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17
ANT 1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ANT 2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ANT 3	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ANT 4	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Figura 5.19.** Tabla que presenta los mejores resultados de la búsqueda.

En cuanto a tiempos de respuesta, los resultados de la aplicación del algoritmo Ant System con respecto a otros algoritmos aplicados a una red de simulación óptica real son bastante satisfactorios y se explican en el capítulo 4. La herramienta de simulación realizada en este proyecto permite ver con total claridad como la aplicación del algoritmo AntSystem responde exitosamente encontrando el mejor camino entre origen y destino ante cualquier cambio de la topología de la red o ante ocupaciones de longitud de onda permitiendo así hacer el mejor uso posible de los recursos.

Falta ejemplo ilustrativo

## CONCLUSIONES

- La aplicación de los algoritmos basados en fenómenos naturales ha demostrado ser una excelente solución al problema de asignación de ruta y de longitud de onda en redes WDM comparada con el rendimiento de otros algoritmos.
- La red Polimórfica óptica de conmutación de circuitos (OCSPN) proporciona la diferenciación del servicio en la capa óptica soportando simultáneamente varios paradigmas de conmutación haciéndola optima para satisfacer las necesidades actuales del procesamiento de información.
- El estudio generado en este proyecto permitió realizar una herramienta de simulación agradable que facilitará visualizar el proceso de búsqueda y elección de la mejor solución por parte del algoritmo AntSystem.
- En la herramienta de simulación se utilizó la variante Ant Cycle del algoritmo Ant System porque contiene actualizaciones crecientes de la matriz de feromonas, que presentaron mejores resultados en la aplicación desarrollada.
- La aplicación de una metodología de simulación es importante porque permite definir de forma clara los objetivos y alcances de un proyecto de simulación, requisitos indispensables para el desarrollo de modelos adecuados que conduzcan a la obtención de resultados esperados.

- La simulación es una herramienta ideal para el estudio, análisis y comprensión del funcionamiento interno de sistemas de telecomunicaciones ante la imposibilidad de construirlos o adquirirlos.
- El desarrollo de este trabajo muestra la importancia de la interdisciplinariedad entre dos áreas importantes como la Biología y las Telecomunicaciones demostrando que la búsqueda de soluciones **basándose en otros campos** puede llevar a un feliz término.



## RECOMENDACIONES

Con este trabajo de tesis se inicia una línea de investigación en el campo de las redes ópticas, específicamente en algoritmos de enrutamiento en redes WDM basados en fenómenos naturales.

Para continuar con esta investigación se mencionarán las siguientes referencias bibliográficas que servirán como soporte a posteriores desarrollos:

- Grupo de Comunicaciones Ópticas de la Universidad de Valladolid. España. <http://pesquera.tel.uva.es>
- Optical Networks. A practical Perspective. Rajiv Ramaswami y Kumar N. Sivarajan. Editado por Morgan Kaufman Publishers Inc.
- Existen varios simuladores de redes opticas a nivel mundial pero son muy costosos así que es difícil adquirirlos.

Para los trabajos futuros se propone la implementación de otros algoritmos para enrutamiento en redes WDM basados en fenómenos naturales como complemento a la herramienta de simulación realizada.

Los Estudios han demostrado que la aplicación de estos algoritmos en los simuladores tiene excelentes tiempos de respuesta y en el momento en que se tenga una red óptica la implementación de estos será sin duda una buena opción.

## REFERENCIAS

[1] Informática Evolutiva: Algoritmos Genéticos. Juan Julián Merelo Guervós. (en línea).

URL: <http://geneura.ugr.es/~jmerelo/ie/ags.htm>

[2] Una Metaheurística Co-evolutiva para el Problema del Viajante de Comercio. Diana Holstein. Universidad de Estadual de Campinas (Brasil). (en línea).

URL: <http://www.densis.fee.unicamp.br/~moscato/papers/HolsteinThesis.pdf>

[ ] Algoritmos genéticos y computación evolutiva. Adam Marczyk. (en línea).

URL: <http://the-geek.org/docs/algen/>

[3] **Colonias Distribuidas de Hormigas en un Entorno Paralelo Asíncrono.**

D.Sc. Benjamín Barán; Lic. Marta Almirón. Centro Nacional de Computación.

Universidad Nacional de Asunción. Campus Universitario de San Lorenzo. Paraguay (en línea).

URL: <http://www.cnc.una.py/cms/invest/download.php?id=75034,46,1>

[4] **An Agent-Managed Ant-Based Network Control System.**

David Legge; Peter Baxendale. Centre for Telecommunication Networks, School of Engineering, University of Durham (en línea.).

URL: <http://www.dur.ac.uk/comms.systems/pdfs/agentant.pdf>

[5] **Diseño de topologías lógicas en redes WDM con encaminamiento por longitud de onda. Ignacio de Miguel Jiménez. Departamento Teoría de la Señal y Comunicaciones e Ingeniería Telemática de la Universidad de Valladolid. 1999. (En línea).**

URL: [http://www.coit.es/pub/ficheros/siemens\\_eb94bef6.doc](http://www.coit.es/pub/ficheros/siemens_eb94bef6.doc)

[6] OE REPORTS. What is WDM technology?. Technology and Trends for the International Optical Engineering Community. Stamatios V. Kartalopoulos. (En línea).

URL: <http://www.spie.org/web/oer/november/nov00/wdm.html>

- [7] BISWANATH MUKHERJEE, *Member, IEEE*. Octubre 2000. WDM Optical Communication Networks: Progress and Challenges. IEEE journal on selected areas in communications, vol. 18.
- [8] GREG BERNSTEIN, BALA RAJAGOPALAN, DEBANJAN SAHA. Optical Network Control. Addison Wesley. July 24, 2003.
- [9] DR. IGNACIO DE MIGUEL. Nature-inspired Routing and Wavelength Assignment Algorithms for Optical Circuit-Switched Polymorphic Networks. Universidad de Valladolid.
- [10] DIISER, M., AND P. BAYVEL. 2002. Analysis of a dynamically wavelength-routed optical burst switched network architecture. J. of Lightwave Technol.
- [11] BARONI, S., AND P. BAYVEL. 1997. Wavelength requirements in arbitrarily connected wavelength-routed optical networks. J. of Lightwave Technol. .
- [12] BANERJEE, S., AND C. CHEN. 1996. Design of wavelength-routed optical networks for circuit switched traffic. In Proceedings of IEEE GLOBECOM'96.
- [13] BOUILLET, E., AND T. STERN. 1999. Monte Carlo techniques for design of wavelength-routed all-optical networks. In Proceedings of IEEE GLOBECOM'99.
- [14] MOKHTAR A., AND M. AZIZOGLU. 1998. Adaptive wavelength routing in all-optical networks. IEEE/ACM Trans, on Networking.
- [15] HYYTIA, E., AND J. VIRTAMO. 2000. Dynamic routing and wavelength assignment using first policy iteration. In Proceedings of ISCC'O.
- [16] MOHAN, G. AND C. S. RAM MURTHY. 1999. Routing and wavelength assignment for establishing dependable connections in WDM networks. In Technical Digest IEEE International Symposium on Fault-Tolerant Computing.
  
- [ ] Metodología para la Simulación de Equipos de Telecomunicaciones. Carlos Leonardo Muñoz, Jose Ricardo Muñoz. Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones. 1995.

## **ANEXOS**

- Anexo A. Manual de usuario.
- Anexo B. Código fuente.