

**DISEÑO DE REDES INALÁMBRICAS DE ÁREA LOCAL  
(IEEE 802.11b) CON BASE EN LA DEMANDA DE TRÁFICO**



**Universidad de los Andes**  
**BOGOTÁ D.C.**

**2007**

**DISEÑO DE REDES INALÁMBRICAS DE ÁREA LOCAL  
(IEEE 802.11b) CON BASE EN LA DEMANDA DE TRÁFICO**

**Por:**

**Ing. Carlos Eduardo Velásquez Villada**

**Asesor:**

**Ph.D. Roberto Bustamante Miller**

**Trabajo presentado como requisito para aspirar al grado de  
Magíster en Ingeniería Electrónica y de Computadores**



**Universidad de los Andes**

**BOGOTÁ D.C.**

**2007**

*A mis padres,  
Gonzalo y María*

*A mis hermanos  
César y Luis*

*Muchas gracias por su apoyo*

*Resumen* – En este trabajo se presenta el desarrollo de un software para el diseño de redes inalámbricas de área local bajo el estándar IEEE 802.11b, con base en la demanda de tráfico esperada y en el cubrimiento de la región de servicio. Se utiliza el método de optimización, llamado Búsqueda Tabú (Tabu Search) para resolver los diferentes problemas que se plantean en el diseño de una red. Se resuelve el problema de la determinación del número de puntos de acceso (AP) en la red, el problema de la ubicación de los APs (Facility Location Problem), el problema de la asignación de una potencia de transmisión para cada AP y el problema de asignación de canales o frecuencias de transmisión para los APs (aunque en este caso se reduce el problema a un canal por AP). Al final se obtienen los parámetros de diseño de una red inalámbrica que cumple con las expectativas dadas por un área a cubrir y por la demanda de tráfico esperada de los usuarios en la red.

*Palabras clave:* Tabu Search, WLAN, diseño de redes, demanda de tráfico, Problema de asignación de canales, FAP, CAP, FLP.

## TABLA DE CONTENIDO

<i>Resumen</i>	ii
<i>Palabras clave</i>	ii
<b>LISTA DE TABLAS</b>	v
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	vi
<b>I. INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>II. TABU SEARCH</b>	4
<b>III. PROBLEMA DE LA CONFIGURACIÓN INICIAL</b>	7
<b>IV. PROBLEMA DE ASIGNACIÓN DE CANALES</b>	9
<i>A. Modelo con Cálculo de la Interferencia</i>	11
<i>A.1. Asignaciones Admisibles</i>	13
<i>A.2. Función Objetivo</i>	14
<i>B. Modelo con Matriz de Compatibilidad</i>	16
<i>B.1. Representación de la solución</i>	16
<i>B.2. Función de costo</i>	16
<i>B.3. Vecindario</i>	17
<i>B.4. Lista Tabú</i>	17
<i>B.5. Criterio de Aspiración</i>	18
<i>B.6. Criterio de Terminación (o de parada)</i>	18
<i>B.7. Detalles de la Implementación</i>	18
<b>V. MODELO DE DISEÑO DE WLAN BASADO EN DEMANDA DE TRÁFICO</b>	21
<i>A. Criterio de Diseño de Red</i>	21
<i>A.1. Requerimiento de la Cobertura de la Señal de Radio</i>	21
<i>A.2. Requerimiento de la Capacidad de Tasa de Transmisión de Datos de Usuario</i>	22

<i>B. Representación en Nodos de Demanda para el diseño de redes WLAN</i>	22
<i>C. Modelo de Diseño de redes WLAN basado en Demanda</i>	23
<b>VI. TÉCNICA DE SOLUCIÓN</b>	28
<i>A. Fase de Construcción</i>	29
<i>A.1. Heurística de Cobertura de Área</i>	29
<i>A.2. Heurística de Grupos de Demanda</i>	29
<i>B. Fase de Asignación de Canales</i>	29
<i>C. Fase de Reducción de Violación de Restricciones</i>	30
<i>D. Fase de Intensificación</i>	30
<i>E. Fase Agregar AP</i>	31
<b>VII. RESULTADOS NUMÉRICOS</b>	32
<b>VIII. CONCLUSIONES</b>	43
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	45
<b>ANEXOS</b>	
<b>CÓDIGO FUENTE</b>	

## LISTA DE TABLAS

TABLA 1. Pseudoalgoritmo para procedimiento Tabu Search(x)	6
TABLA 2. Pseudoalgoritmo Tabu Search para el modelo con cálculo de la interferencia	15
TABLA 3. Pseudoalgoritmo Tabu Search para el modelo con cálculo de la interferencia	20
TABLA 4. Características de uso de la red	34
TABLA 5. Resumen de los parámetros usados en el diseño WLAN	35

## LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Árbol de decisión de Tabu Search	5
Fig. 2. Ejemplo del grafo para el CAP	10
Fig. 3. Actualización de la tabla de cambio de costo	19
Fig. 4. Marco de trabajo de la técnica de solución	28
Fig. 5 Área de Servicio SIS4	33
Fig. 6 Distribución de los nodos de demanda en SIS4	33
Fig. 7 Distribución de los nodos de demanda en HL1	33
Fig. 8 Configuración de la WLAN para el área de servicio SIS4	36
Fig. 9 Configuración de la WLAN para el área de servicio SIS4	37
Fig. 10 Configuración de la WLAN para el área de servicio SIS4, tratando de cubrir la máxima demanda en el área de servicio	38
Fig. 11. Configuración de la WLAN para el área de servicio HL1	40
Fig. 12. Configuración de la WLAN para el área de servicio HL1	41
Fig. 13. Configuración de la WLAN para el área de servicio HL1 con la máxima demanda	42



## I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha visto el gran desarrollo que han tenido las redes inalámbricas gracias a diversos factores tales como el desarrollo de transmisores y receptores más pequeños, eficientes y baratos, al mejoramiento de las tecnologías en este tipo de redes, las cuales permiten aumentar, cada vez más, la velocidad de transmisión de la información y proveer calidad de servicio para las aplicaciones que así lo requieren y al desarrollo de nuevas aplicaciones para estas redes, tendiendo hacia una convergencia de cada vez más servicios.

Con el despliegue de más redes inalámbricas, los ingenieros se enfrentan a varios problemas, entre estos está el diseño de la red, donde se desea conocer cuál es el número óptimo de Puntos de Acceso (AP) o transmisores en la red, su ubicación, potencia de transmisión y frecuencia asignada, de tal forma que cumplan con unas restricciones que buscan garantizar una mínima calidad de servicio, estas restricciones buscan que los transmisores cubran toda el área de diseño, que cada usuario quede dentro del área de cobertura de al menos un AP y sea asociado a un AP, y la restricción más importante en este enfoque, solicita que la demanda de tráfico proyectada para la red sea cubierta por el diseño resultante, es decir, se busca no sólo cubrir toda el área para la cual se diseña la red, sino también, que los usuarios dispongan del ancho de banda necesario para suplir su demanda de tráfico. Este trabajo se enfoca en el diseño de redes inalámbricas de área local basadas en el estándar IEEE 802.11b [14].

Aunque existen otros problemas relacionados con el diseño y despliegue de redes inalámbricas, como la elección de los proveedores o la interferencia de otras redes inalámbricas, estos no se tratarán en este trabajo.

Los métodos de optimización han sido ampliamente utilizados para resolver una gran variedad de problemas en diferentes campos de la tecnología. En comunicaciones, el uso de estas técnicas tiene una menor difusión comparada con la de otros campos como el reconocimiento de patrones, la automatización industrial, la robótica, el control o la seguridad. En este trabajo se utiliza la técnica metaheurística (una heurística es una técnica diseñada para resolver un problema en el que se ignora si se puede probar que la solución es óptima, pero que usualmente produce una buena solución o resuelve un problema más simple que contiene o intersecta la solución del problema más complejo) llamada Búsqueda Tabú (Tabu Search) [2]. Las heurísticas intentan ganar en desempeño computacional o simplicidad conceptual, al costo de precisión o exactitud.

La búsqueda tabú (TS) es un método de optimización matemática que guía a un procedimiento de búsqueda local para explorar el espacio de solución más allá de la optimalidad local. La característica distintiva de TS es el uso de estrategias basadas en memoria. Con este método se realiza una búsqueda en el espacio de solución del problema, esperando llegar al óptimo global. Como en este trabajo se tratan diferentes problemas para el diseño de la red inalámbrica (con base en el estándar IEEE 802.11b), el algoritmo debe ser adaptado a cada uno de estos problemas, pero se conserva la esencia del método TS.

El problema de asignación de frecuencias (FAP, también llamado CAP) es un problema muy conocido en la literatura [5], [6]. Se sabe que este es un problema NP-hard, es decir, es un problema que se puede resolver en un tiempo, polinomial al número de variables, no determinístico, por lo que tratar de resolver este problema por enumeración es una labor prácticamente imposible cuando aumenta el número de variables. Existen varios métodos para encontrar soluciones a este problema, TS es un método que ha sido usado, probado y comparado en este problema, dando muy buenos resultados. Como aquí se pretende diseñar una red inalámbrica de área local (WLAN) cada AP tendrá una frecuencia de transmisión, lo que reduce considerablemente el problema.

El problema de ubicación de instalaciones (FLP) es un problema muy conocido en diseños de construcciones o hasta en el diseño automático de circuitos integrados, sin embargo aquí se plantea este problema para encontrar la ubicación óptima de los APs, teniendo en cuenta unos nodos de demanda que representan a los usuarios.

Todos los problemas que se tratan en este proceso de diseño están entrelazados y el resultado de uno afecta directamente a los otros, creando un solo algoritmo TS de diseño de WLAN. El número de APs dimensiona el problema de su ubicación, lo que a su vez lleva al problema de asignación de potencias y con estos parámetros se obtiene el problema de asignación de frecuencias, si el algoritmo llega a una solución factible, termina el problema y se tiene la salida del diseño de la red.

En este trabajo se revisarán los diferentes problemas que se resolvieron y los enfoques que se utilizaron en la búsqueda de esta solución.

## II. TABU SEARCH [2] - [4]

Tabu search es un método de optimización matemática, que pertenece a la clase de técnicas de búsqueda local. TS mejora el desempeño de un método de búsqueda local, utilizando estructuras de memoria.

TS utiliza un procedimiento de búsqueda local o búsqueda de vecindario para moverse iterativamente de una solución  $x$  a una solución  $x'$  en la vecindad de  $x$ , hasta que se satisfaga un criterio de parada. Para explorar regiones del espacio de búsqueda que podrían quedar sin explorar por el procedimiento de búsqueda local y, al hacer esto, escapar de la optimalidad local, TS modifica la estructura del vecindario de cada solución a medida que la búsqueda progresa. Las soluciones admitidas al nuevo vecindario ( $N^*(x)$ ), son determinadas a través del uso de estructuras especiales de memoria. La búsqueda progresa iterativamente moviéndose de una solución  $x$  a una solución  $x'$  en  $N^*(x)$ .

El tipo más importante de memoria de corto plazo para determinar las soluciones en  $N^*(x)$ , es la lista tabú. En su forma más simple, una lista tabú contiene las soluciones que han sido visitadas en el pasado reciente (menos de  $TT$  movimientos, donde  $TT$  es el tamaño de la lista tabú (*TabuTenure*)). Las soluciones en la lista tabú son excluidas de  $N^*(x)$ . El objetivo principal de la memoria de corto plazo es evitar devoluciones de movimientos y ciclos. Otras estructuras de las listas tabú prohíben soluciones que tienen ciertos atributos (como ciertos arcos en problemas representados con grafos) o previenen ciertos movimientos. Los atributos seleccionados en las soluciones recientemente visitadas son marcadas como tabú-activas. Las soluciones que contienen elementos tabú-activos son prohibidas (tabú).

Las listas tabú que contienen atributos son mucho más efectivas en el tiempo de cómputo y el uso de la memoria, sin embargo, crean un nuevo problema. Al prohibir un atributo como tabú, por lo general más de una solución es declarada como tabú. Como algunas de estas

soluciones que deben ser evitadas pueden no haber sido visitadas y ser de excelente calidad, se introduce un criterio o criterios de aspiración, los cuales permiten sobrepasar el estado tabú de una solución y así incluirla en el vecindario permitido. Un criterio de aspiración comúnmente utilizado es el de permitir soluciones que son mejores que la mejor solución conocida hasta el momento.

La estructura de memoria *TabuEnd* guarda el tiempo (número de la iteración) en el que termina el estado tabú-activo de un atributo. La actualización después de un movimiento está dada por (1). Un atributo es tabú-activo si cumple con (2). La variable *Iter* es el número de la iteración actual.

$$TabuEnd(Atributo) = Iter + TabuTenure \quad (1)$$

$$Iter \leq TabuEnd(Atributo) \quad (2)$$

En la figura 1, se muestra el árbol de decisión utilizado en TS. El número de movimientos admisibles en el vecindario de la solución actual depende del tipo de movimiento, las reglas de activación tabú, el *TabuTenure* (retención en la lista tabú) y los criterios de aspiración.

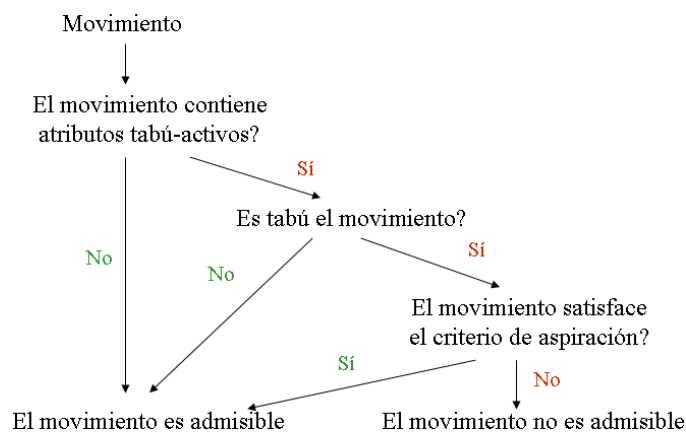


Fig. 1. Árbol de decisión de Tabu Search

El tamaño de la lista puede ser administrado de forma estática o dinámica. En la memoria estática, el valor del *TabuTenure* es fijo y permanece fijo durante toda la búsqueda. Todos los atributos permanecen tabú-activos durante el mismo número de iteraciones. En la memoria dinámica, el valor del *TabuTenure* no es constante durante la búsqueda. La duración del estado tabú-activo de los atributos, cambia durante la búsqueda.

El método TS también puede utilizar una estrategia de listas de candidatos, las cuales son usadas para reducir el número de soluciones examinadas en una iteración dada, estas listas aíslan regiones del vecindario que contienen movimientos con características deseables.

En la tabla 1 se muestra un pseudoalgoritmo que muestra el funcionamiento del método Tabu Search

TABLA 1.  
Pseudoalgoritmo para procedimiento Tabu Search(x)

---

<p>Inicio</p> <p><math>x_{opt} = x;</math></p> <p><math>f_{opt} = f(x);</math></p> <p>mientras (criterio de parada no sea satisfecho)</p> <p style="padding-left: 20px;">inicio</p> <p style="padding-left: 40px;">evaluar <math>f(.)</math> para todos los <math>x \in N(x);</math></p> <p style="padding-left: 40px;">si <math>\{\exists x' / f(x') &gt; (&lt;) f_{opt}\}</math> entonces</p> <p style="padding-left: 60px;"><math>x_{opt} = x';</math></p> <p style="padding-left: 60px;"><math>f_{opt} = f(x');</math></p> <p style="padding-left: 40px;">si no</p> <p style="padding-left: 60px;">seleccionar la mejor solución <math>x'</math> en <math>N(x)</math></p> <p style="padding-left: 40px;">pero no en <math>TL(x);</math></p> <p style="padding-left: 20px;">fin</p> <p style="padding-left: 40px;">actualizar la lista tabú;</p> <p style="padding-left: 40px;"><math>x = x';</math></p> <p>fin</p>
--

---

### III. PROBLEMA DE LA CONFIGURACIÓN INICIAL

En este problema se resuelven el número inicial de APs, sus potencias y sus ubicaciones iniciales, para esto se utilizan dos heurísticas, la Heurística de Cobertura de Área (HCA) que estima el número de APs necesario para proveer la cobertura de la señal de radio en el área de servicio y la Heurística de Grupos de Demanda (HGD) que estima el número inicial de APs requerido para cubrir la demanda de tráfico en la red. [1]

El número inicial de APs es el máximo número obtenido entre las dos técnicas anteriores, si se necesitan más APs para cubrir el área de servicio que para suplir la demanda de tráfico, entonces se escoge el criterio de cubrimiento, si se necesitan más APs para cubrir el requerimiento de tráfico que para cubrir el área de servicio, se escoge el criterio de la demanda de tráfico. Con las técnicas anteriores se escogen las potencias y ubicaciones iniciales de los APs, la HCA estima el número de APs iniciales utilizando la máxima de las potencias disponibles y un modelo de propagación que puede ser el *one-slope model (ISM)*, dado por (3) o el *multi-wall model (MWM)*, dado por (4), ambas ecuaciones han sido tomadas de [7].

$$L = L_0 + 10n \cdot \log(d) \quad (3)$$

Donde  $L_0$  es la pérdida del canal a una distancia de 1 metro

$n$  es el índice de decaimiento de potencia

$d$  es la distancia entre el transmisor y el receptor en metros

$$L = L_{FS} + L_C + \sum_{i=1}^I k_{wi} L_{wi} + k_f \left[ \frac{k_f + 2}{k_f + 1} - b \right] L_f \quad (4)$$

Donde  $L_{FS}$  es la pérdida de espacio libre entre el transmisor y el receptor

$L_C$  es una constante de pérdidas

$k_{wi}$  es el número de paredes penetradas de tipo  $i$

$k_f$  es el número de pisos penetrados

$L_{wi}$  es la pérdida en la pared de tipo  $i$

$L_f$  es la pérdida entre pisos adyacentes

$b$  es un parámetro empírico

$I$  es el número de tipos de paredes

La HGD estima el número de APs necesario para suplir la demanda de tráfico y trata de ubicarlos en las zonas de mayor demanda en el área de servicio.

Después, se asigna la potencia de cada AP de forma aleatoria. Con base en la asignación inicial de ubicaciones y potencias de los APs, se genera un modelo de asignación de canales de frecuencia, con el fin de que el nivel de interferencia en la zona de servicio se encuentre por debajo de los niveles de interferencia máximos permitidos para garantizar una adecuada calidad de servicio. El problema de asignación de las frecuencias en los APs será tratado en el capítulo IV.



#### IV. PROBLEMA DE ASIGNACIÓN DE CANALES [9]

El número de frecuencias disponibles en los sistemas de comunicación inalámbricos es un recurso valioso que debe ser manejado de la forma más eficiente posible. El problema de asignación de canales, conocido como CAP o FAP (por frecuencias), es un problema NP-Duro (NP-Hard) o NP-Completo. NP significa Non-deterministic Polynomial time, el conjunto de problemas de decisión que pueden ser resueltos en un tiempo polinomial (tiempo de cómputo de un problema en el cual el tiempo,  $m(n) = O(n^k)$ , no es mayor que una función polinomial del tamaño del problema,  $n$ ) en una máquina de Turing no determinística. Un problema en el conjunto NP-Completo es un problema para el cual no existe un algoritmo que resuelva este problema en un tiempo polinomial, aunque su solución se puede probar en un tiempo polinomial. Esto se puede ver en [8] donde se transforma el CAP en un problema de coloración de grafos.

La literatura sobre el problema de asignación de frecuencias ha crecido rápidamente en los últimos años, esto se debe, principalmente a la rápida implementación de redes de telefonía inalámbrica (como redes GSM) y de proyectos de comunicación satelital, pero también el interés por otras aplicaciones como televisión digital, redes de datos móviles y problemas de comunicación militar ha inspirado nuevas investigaciones. Estas aplicaciones llevan a muchos modelos diferentes, y en cada modelo pueden llevar a diferentes tipos de configuraciones. Sin embargo, todos los modelos comparten dos características:

- 1) Un conjunto de antenas para comunicaciones inalámbricas, a las cuales les deben ser asignadas frecuencias, de tal forma que sea posible la transmisión de datos entre el emisor y el receptor. Las frecuencias deben ser seleccionadas de un conjunto dado que puede diferir entre antenas.
- 2) Las frecuencias asignadas a dos antenas pueden generar interferencia entre ellas, resultando en pérdida de calidad de la señal.

Se deben cumplir las siguientes dos condiciones para tener interferencia entre dos señales

- a) Las dos frecuencias deben estar cercanas en el espectro electromagnético
- b) Las antenas deben estar geográficamente cerca una de la otra, de tal forma que la señal de interferencia sea lo suficientemente potente para interferir con la señal original.

El CAP puede ser representado por un grafo, con pesos y no dirigido. Formalmente,  $CAP = \{V, E, D, P, F\}$ , con

$V$ , conjunto de vértices o nodos de un grafo no dirigido  $G$ . Cada vértice representa un transmisor del problema de asignación de canales.

$E$ , conjunto de aristas o arcos de un grafo no dirigido  $G$ . Las aristas representan a los transmisores que están restringidos; por ejemplo, pares de transmisores para los cuales uno puede interferir con los receptores del otro. Las aristas se escribirán como  $\{v, w\}$  con  $v < w$ .

$D$ , conjunto de valores. Hay una correspondencia  $E \rightarrow D$ , tal que  $\{v, w\}$  corresponde a  $d_{vw} \in N_0$ .  $d_{vw}$  es la máxima separación entre la frecuencia asignada al transmisor  $v$  y la asignada al transmisor  $w$  que puede causar la generación de interferencia. Si  $f(v)$  es la frecuencia asignada al transmisor  $v$ , entonces si  $|f(v) - f(w)| > d_{vw}$ , la interferencia que involucra a ambos transmisores, es aceptable.

$P$ , conjunto de valores. Hay una correspondencia  $E \rightarrow P$ , tal que  $\{v, w\}$  corresponde a  $p_{vw} \in N_0$ .  $p_{vw}$  es un costo que debe ser pagado si la separación entre las frecuencias asignadas a los transmisores  $v$  y  $w$  es menor o igual a  $d_{vw}$ .

$F$ , conjunto de frecuencias o canales consecutivos disponibles para cada vértice o transmisor en  $V$ .

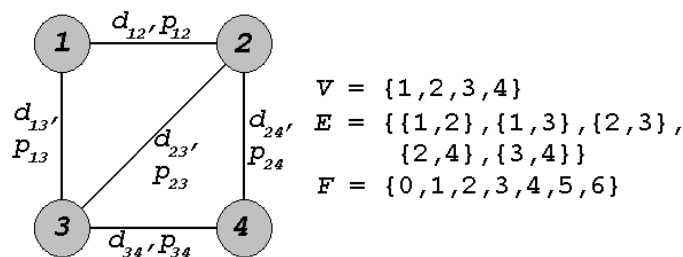


Fig. 2. Ejemplo del grafo para el CAP [6]

El objetivo del Problema de Asignación de Canales es encontrar una asignación que minimice la suma de  $p_{vw}$  en todas las duplas  $\{v, w\} \in E$ , para las cuales  $|f(v) - f(w)| \leq d_{vw}$ .

Un ejemplo de un grafo asociado con un problema es dado en la figura 2. [6]

Para este trabajo se analizaron dos métodos para resolver el problema de asignación de canales, ambos métodos utilizan el algoritmo Tabu Search. El primer método está basado en el algoritmo expuesto por Capone y Trubian en [5], en este modelo el área de servicio es dividida en regiones y las características de propagación están dadas por los niveles recibidos en cada región por las estaciones base (BS) consideradas.

La asignación de canales se realiza calculando el área de cobertura de cada transmisor y el nivel de señal recibido en cada región de la red desde cada transmisor, con esta información se calcula el nivel de señal a portadora en cada región de la red, teniendo en cuenta la interferencia de canales adyacentes asignados al mismo transmisor y del mismo canal asignado a otros transmisores.

#### A. Modelo con Cálculo de la Interferencia [5]

Un receptor, dentro del área de servicio, es capaz de detectar una señal si la potencia de las señales de interferencia debida a transmisiones en otras regiones es lo suficientemente pequeña. La habilidad del receptor para detectar una señal en presencia de ruido (interferencia) es llamada *efecto captura*. El modelo de captura con el que se trabaja aquí asume que un receptor puede detectar correctamente un paquete de información si la tasa entre su potencia recibida y la suma de las potencias recibidas de transmisiones de interferencia es mayor a la tasa de captura  $b$ , como se muestra en (5), de [5].

$$\frac{C}{I} = \frac{\Gamma_0}{\sum_{i=1}^n \Gamma_i} > b \quad (5)$$

En una asignación de canales fija, la relación  $C/I$  es mantenida sobre la tasa de captura con una estrategia de planeación de frecuencias que asigna canales a BS's y debe garantizar que se cumplan las siguientes restricciones:

- 1) Las restricciones de  $C/I$  deben ser garantizadas en todas las regiones.
- 2) El número de canales asignado a cada región garantiza el Grado de Servicio (GoS) o Calidad de Servicio (QoS) requerido.

El modelo propuesto describe el área de servicio como una malla de regiones caracterizadas por una densidad de tráfico, las estaciones base son ubicadas en el área y cada una sirve a un subconjunto de regiones.

Las características de propagación son asignadas mediante una matriz  $A$  de tamaño  $r \times n$  de niveles recibidos, donde  $r$  es el número de regiones en la malla y  $n$  es el número de estaciones base, (6).

$$\begin{aligned}
 A &\in \mathfrak{R}^{r \times n} \\
 A &= \{a_{ij}\} \\
 a_{ij} &> 0 \quad \forall i, j
 \end{aligned} \tag{6}$$

Donde  $a_{ij}$  es el nivel de señal que puede ser recibida en la región  $i$  si una señal es transmitida por la BS  $j$ .

El área de cobertura de cada BS es obtenida asociando cada región a la BS de la que recibe el nivel más alto, como se muestra en (7).

$$r_i \in R_k, \quad \text{ssi} \max_j a_{ij} = a_{ik} \tag{7}$$

Donde  $r_i$  es la  $i$ -ésima región de la malla y  $R_k$  es el área de cobertura de la BS  $k$ .

Un tráfico ofrecido  $\eta_i$  es asociado con cada región, la carga de tráfico de una BS puede ser calculada como la suma de tráficos ofrecidos por las regiones de su área de cobertura. El vector  $M$ , de tamaño  $n$  define el número de frecuencias requeridas por cada BS, (8).

$$\begin{aligned} M &\in \mathfrak{R}^n \\ M &= \{m_i\} \end{aligned} \tag{8}$$

#### A.1. Asignaciones Admisibles

Una asignación de frecuencias es representada por una matriz  $X$  de tamaño  $n \times f$ , donde  $f$  es el número de frecuencias disponibles en el sistema y donde las variables de decisión  $x_{ij}$  son definidas por (9).

$$\begin{aligned} X &\in \mathfrak{R}^{n \times f} \\ X &= \{x_{ij}\} \\ x_{ij} &= \begin{cases} 1, & \text{si la frecuencia } j \text{ es asignada a la base } i \\ 0, & \text{si la frecuencia } j \text{ no es asignada a la base } i \end{cases} \end{aligned} \tag{9}$$

Las restricciones de GoS son expresadas por (10).

$$\sum_{j=1}^f x_{ij} = m_i, \quad \forall i = 1, \dots, n \tag{10}$$

El sistema también puede requerir una separación mínima entre frecuencias asignadas a la misma BS  $k$ , por ejemplo si una frecuencia  $i$  es asignada a la BS  $k$ , todas las frecuencias en el rango  $[i - ck, i + ck]$  no pueden ser asignadas a  $k$ . Esta restricción es expresada por (11):

$$\sum_{i=1}^{ck} x_{k,(h+i)} \leq 1, \quad h = 0, \dots, f - ck \quad (11)$$

Donde  $ck$  es la separación mínima requerida.

La matriz  $X$  es una asignación de frecuencias valida si se cumplen ambas restricciones.

### A.2. Función Objetivo

Para una asignación de frecuencias factible es posible evaluar la tasa de interferencia a portadora en cada región: sea  $r_i$  una región genérica que pertenece al área de cobertura de la BS  $k$  y  $h$  una frecuencia asignada a la base  $k$  ( $x_{kh} = 1$ ), para todas las frecuencias no asignadas a la base  $k$  se asume que  $(I/C)_{ih} = \varepsilon$ , donde  $\varepsilon$  es un valor pequeño. Para tener en cuenta la interferencia de canales adyacentes, se define el filtro (NFD – Net Filter Discriminator), el cual es la constante de reducción para frecuencias adyacentes. La expresión para evaluar I/C está dada por (12).

$$\left(\frac{I}{C}\right)_{ih} = \sum_{j=1, j \neq k}^n \frac{1}{a_{ik}} \left( a_{ij} x_{jh} + \frac{a_{ij}}{NFD} x_{j,h+1} + \frac{a_{ij}}{NFD} x_{j,h-1} \right) \quad (12)$$

Sea  $b$  la tasa de captura y  $Q = \{q_i\}$  un vector de tamaño  $r$  llamado vector de cobertura que define el conjunto de regiones para las cuales su  $(C/I)$  está sobre la tasa de captura, (13).

$$q_i = \begin{cases} 1, & \text{si } \left(\frac{I}{C}\right)_{ih} \leq \frac{1}{b} \quad \forall h = 1, \dots, f \\ 0, & \text{si no} \end{cases} \quad (13)$$

El problema de asignación puede ser reformulado como el problema de maximizar la capacidad del sistema medido como el tráfico total servido, (14).

$$\max f(X) = \sum_{i=1}^r \eta_i q_i \quad (14)$$

Donde  $X$  varía entre todas las asignaciones de frecuencias factibles y  $\eta_i$  denota el tráfico ofrecido por la región  $i$ .

La tabla 2 muestra el pseudoalgoritmo de la implementación en Tabu Search para este método.

TABLA 2.

Pseudoalgoritmo Tabu Search para el modelo con cálculo de la interferencia

CAP\_TABUSEARCH(nBS, nF, M, A)

X = Crear_X(nBS,nF,M,A);	fin
Xopt = X;	si S = 0, entonces
FOopt = eval_X(X,A)	inicio
contador = 0;	SamN = SampleNeigh(X,A);
mientras contador < MAXITER hacer	para (Xi ∈ SamN) && NO (Xi ∈ RedN) &&
inicio	tabu(X,Xi) hacer
S = 0; FObest = 0;	inicio
RedN = ReduceNeigh(X,A);	FOtemp = eval_X(Xi,A);
para Xi ∈ RedN hacer	si (FOtemp > FObest) entonces
inicio	inicio
FOtemp = eval_X(Xi,A)	FObest = FOtemp; Xbest = Xi;
si FOtemp > FOopt entonces	fin
inicio	fin
FOopt = FOtemp; Xopt = Xi;	fin
FObest = FOtemp; Xbest = Xi; S = 1;	
fin	actualizar lista_tabu(X,Xbest);
si no, si FOtemp > FObest && tabu(X,Xi)	X = Xbest;
inicio	fin
FObest = FOtemp; Xbest = Xi;	devolver Xopt;
fin	fin

El segundo método está basado en el algoritmo expuesto por Montemanni, Moon y Smith en [6], en este modelo se utiliza una matriz de compatibilidad  $C$  de tamaño  $n \times n$ , donde  $n$  es el número de BSs o APs en la red, esta matriz contiene la mínima distancia en canales de frecuencia a la cual se pueden ubicar dos frecuencias en una misma área de servicio o entre áreas de servicio adyacentes. Si la asignación de canales satisface las separaciones entre canales dadas por esta matriz, se garantiza que se cumple con las restricciones de interferencia.

### B. Modelo con Matriz de Compatibilidad [6]

Una forma de controlar el patrón de interferencia resultante de la violación residual de restricciones es agregar un peso o castigo a cada restricción. El objetivo se convierte entonces en minimizar la suma de los pesos asociados con las restricciones violadas. De esta forma, el número de restricciones violada puede ser mayor, pero tienden a ser menos críticas. Los pesos pueden estar definidos en dos (o más) niveles, dependiendo de si una restricción es rota por un canal o más.

La definición del algoritmo TS para el CAP está dada por los siguientes parámetros:

*B.1. Representación de la solución:* La representación de una asignación de frecuencias  $S$  es obtenida usando una lista  $\{f_S(0), f_S(1), \dots, f_S(|V|-1)\}$ , en la cual el  $v$ -ésimo elemento ( $f_S(v)$ ) contiene la frecuencia asignada al transmisor  $v$ .

*B.2. Función de costo:* La función de costo vincula una asignación con la suma de los pesos pagadas en ella, (15).

$$\text{Costo}(S) = \sum_{\substack{\{v, w\} \in E; \\ |f_S(v) - f_S(w)| \leq d_{vw}}} p_{vw} \quad (15)$$



*B.3. Vecindario:* Sea  $S_O$  la asignación actual. Un transmisor en violación es definido como un transmisor involucrado en al menos una restricción violada en  $S_O$ . Una nueva asignación  $S_N$  está en el vecindario de la solución actual ( $S_O$ ) si  $S_N$  se diferencia de  $S_O$  en la frecuencia asignada a exactamente un transmisor y el movimiento que produce  $S_N$  de  $S_O$  no es Tabú activo.

Sea  $V_{S_O}^V$  el conjunto de transmisores en violación en la asignación  $S_O$ ,  $S_N$  es un vecino de  $S_O$  si  $\exists v \in V_{S_O}^V \mid f_{S_O}(v) \neq f_{S_N}(v)$  y  $f_{S_O}(w) = f_{S_N}(w) \quad \forall w \in V, w \neq v$  y el movimiento  $(v, f_{S_N}(v))$  no es Tabú-activo.

*B.4. Lista Tabú:* En este algoritmo, la lista tabú contiene pares  $(v, f)$ , donde  $v$  es un transmisor y  $f$  es una frecuencia. Cada vez que se lleva a cabo un movimiento que involucra la asignación de la frecuencia  $f$  al transmisor  $v$ , el par  $(v, f)$  se inserta a la lista tabú, donde permanecerá por aproximadamente  $T$  iteraciones.

En este algoritmo el valor de  $T$  varía dinámicamente durante la ejecución del algoritmo. De [6] se sugiere que los mejores resultados se obtienen al reducir el tamaño de la lista tabú en la misma forma en que se reduce el parámetro de temperatura en un algoritmo de simulated annealing. Cada  $I_{ts}$  iteraciones, la longitud  $T$  de la lista tabú se reduce utilizando la asignación dada por (16)

$$T = \beta T \tag{16}$$

donde  $0 < \beta \leq 1$  es un parámetro definido por el usuario. Cuando se reduce  $T$ , los movimientos más antiguos, que excedan la nueva longitud de la lista, se vuelven factibles. El valor inicial de  $T$ ,  $T_{ini}$ , es definido por el usuario.

*B.5. Criterio de Aspiración:* No se utiliza criterio de aspiración en este algoritmo. El uso de un criterio de aspiración hace más lenta la implementación del algoritmo sin mejorar los resultados. En la referencia [6], Sección VIII-C presentan resultados que apoyan esta conclusión. Sin embargo, cabe recordar que esta característica del algoritmo es útil en los sistemas tratados en [6], para una WLAN el algoritmo debe cambiar un poco, como se verá más adelante.

*B.6. Criterio de Terminación (o de parada):* el algoritmo se detiene cuando el tamaño de la lista tabú  $T$ , se vuelve más pequeño que un valor límite  $T_{min}$ , definido por el usuario. Este criterio es poco común para un algoritmo TS, pero aquí su uso es indicado por la estrategia de modificar dinámicamente el parámetro.

*B.7. Detalles de la Implementación:* Se mantiene una tabla de dimensiones  $|V| \times |F|$ , llamada la tabla de cambio de costo, en la que la posición  $(v, f)$  contiene el costo de la solución obtenida al cambiar la frecuencia actualmente asignada al transmisor  $v$  a  $f$  (si  $f$  es la frecuencia actualmente asignada a  $v$ , entonces, el valor de la entrada  $(v, f)$  es el costo de la solución actual). Cada vez que se realiza un movimiento, los elementos de la tabla afectados por el movimiento se actualizan. Para cada transmisor  $v$ , se lleva una lista que contiene sus transmisores adyacentes (transmisores involucrados en al menos una restricción con  $v$ ). Esta lista se usa para acelerar el proceso de actualización de la tabla. Solo se modifican las posiciones de la tabla que corresponden a las frecuencias que interfieren con la anterior o la nueva frecuencia del transmisor.

Un ejemplo del uso de la tabla de cambio de costo es dado en la figura 3. Un intervalo de columnas de las filas correspondientes a cuatro transmisores  $u$ ,  $v$ ,  $w$ , y  $z$ , aparecen en la figura. En el grafo que representa el problema,  $u$  y  $v$  no están conectados,  $u$  y  $w$  están conectados por una arista con separación  $d_{uw} = 2$ ,  $u$  y  $z$  están conectados por una arista con separación  $d_{uz} = 0$ . La figura muestra los efectos que se derivan de la modificación de la frecuencia asignada al transmisor  $u$  de  $j$  (anterior) a  $i$  (nueva). En la figura, se han marcado

las entradas de la tabla que son modificadas debido a la reasignación de frecuencia. Las entradas que incrementan su valor (de  $p_{uw}$  y  $p_{uz}$  para  $w$  y  $z$ , respectivamente) han sido marcadas “ $b$ ”. las entradas cuyo valor decrece han sido marcadas “ $y$ ”. La entrada  $(w, k)$ , marcada “ $g$ ”, no es modificada. Como el transmisor  $v$  no está conectado con el transmisor  $u$ , su fila no se ve afectada por la reasignación de frecuencia.

		↓ <b><i>i</i></b>		<b><i>k</i></b>		↓ <b><i>j</i></b>	
→ <b><i>u</i></b>		nueva				vieja	
<b><i>v</i></b>							
<b><i>w</i></b>	<b><i>b</i></b>	<b><i>b</i></b>	<b><i>b</i></b>	<b><i>g</i></b>	<b><i>y</i></b>	<b><i>y</i></b>	<b><i>y</i></b>
<b><i>z</i></b>		<b><i>b</i></b>				<b><i>y</i></b>	

Fig. 3. Actualización de la tabla de cambio de costo [6]

También hay una segunda tabla de dimensiones  $|V| \times |F|$ , la cual contiene en cada posición  $(v, f)$  el número de la última iteración en la cual el movimiento respectivo (asignación de la frecuencia  $f$  al transmisor  $v$ ) fue llevado a cabo. Esta tabla es usada para chequear rápidamente si un movimiento candidato es tabú-activo: si el número de iteración almacenado en la posición es mayor que o igual al número de la iteración actual menos  $T$ , el movimiento es tabú-activo. También se lleva una lista, la cual indica, para cada transmisor, la frecuencia (diferente de la actualmente asignada) que, sin generar un movimiento tabú-activo, produciría el menor costo si le es asignada. Esta lista se usa en cada iteración para seleccionar rápidamente el mejor movimiento en el vecindario activo. Después de cada iteración, esta lista se actualiza eficientemente modificando sólo las entradas afectadas por el último movimiento. También se mantiene un arreglo unidimensional de longitud  $T_{ini}$ , el cual contiene la lista tabú convencional, es usado en cada iteración para identificar rápidamente los movimientos que dejan de ser tabú-activos.

La tabla 3 muestra el pseudoalgoritmo de la implementación en Tabu Search para este método.

TABLA 3.  
Pseudoalgoritmo Tabu Search para el modelo con cálculo de la interferencia

FAP\_TABUSEARCH(nBS, nF, C)

---

```

contador = 0;
T = Tini;
Nopt = num. de iteraciones entre optimizaciones;
S = Solución inicial del problema;
mientras (no se cumpla el criterio de parada) hacer
    si contador mod Nopt = Nopt - 1
        si (todas las restricciones fuertes satisfechas)
            BuscarVecindario(S);
            si (Costo(S) < Costo(Best))
                Best = S;
            fin si
        fin si
    si no
        S = mejor solución en el vecindario de S
        si (Costo(S) < Costo(Best))
            Best = S;
        fin si
    fin si
    actualizar lista tabu;
    actualizar la tabla de cambio de costos;
    contador = contador + 1;
    si (Its divide contador)
        T =  $\beta$  x T;
    fin si
fin mientras
Devolver el mejor;

```

---

## V. MODELO DE DISEÑO DE WLAN BASADO EN DEMANDA DE TRÁFICO [1]

La labor de diseño de redes WLAN basada en demanda es ubicar un número suficiente de puntos de acceso (APs) en un área de servicio. El nivel de potencia y el canal de frecuencia de un AP, junto con el modelo de propagación y el patrón de radiación de la antena, determinan la región (llamada Área Básica de Servicio (BSA)) sobre la cual el AP puede soportar la demanda de tráfico desde y hacia los usuarios inalámbricos. De acuerdo con el análisis de capacidad del protocolo CSMA/CA utilizado en las redes WLAN 802.11, la capacidad de un AP varía dependiendo del número de usuarios inalámbricos transfiriendo datos simultáneamente a través del AP. A medida que el número de usuarios inalámbricos que transfieren datos activamente a través de un AP se incrementa, la capacidad efectiva del AP decrece. Por lo tanto, el número de APs en un área de servicio debe ser una función del número de usuarios y las características de su demanda de tráfico. El problema de diseño de redes WLAN puede ser formulado como un problema de optimización que apunta a determinar el número de APs, identificar sus ubicaciones, asignarles niveles de potencia y canales de frecuencia tales que la red resultante satisfaga el criterio de diseño descrito a continuación.

### *A. Criterio de Diseño de Red*

*A.1. Requerimiento de la Cobertura de la Señal de Radio:* Un requisito fundamental para una red inalámbrica es que provea la cobertura de la señal de radio sobre el área de servicio objetivo. Los receptores de radio necesitan un mínimo nivel de la señal de radio para poder acceder a la red. Como una medida de la disponibilidad de la señal de radio y de la cobertura, el modelo de diseño considera el nivel de potencia de la señal recibida y la tasa de señal a interferencia (SIR). El nivel de potencia de la señal recibida por los nodos inalámbricos debe exceder el límite de sensibilidad específico del receptor. Adicionalmente, el nivel de potencia de la señal recibida desde el AP de servicio debe ser

suficientemente mayor que la señal recibida desde otros APs que operen en la misma frecuencia o en canales de frecuencia que se superpongan como lo especifica la SIR.

*A.2. Requerimiento de la Capacidad de Tasa de Transmisión de Datos de Usuario:* A medida que la población de usuarios crece y se difunden aplicaciones multimedia que requieren mayores tasas de transmisión de datos, la tasa de transmisión de datos que puede obtener el usuario (link rate) se vuelve un aspecto esencial en el diseño de redes WLAN. Estudios de trazas de red reportan que las tasas de transmisión de datos que espera el usuario no dependen solamente del número de usuarios inalámbricos que hay en el área de servicio, si no también de la actividad de los usuarios inalámbricos en la red. Adicionalmente, el volumen de tráfico en la red se correlaciona con el comportamiento del usuario, a su vez, el comportamiento del usuario se correlaciona con los tipos de ubicaciones donde los usuarios están y las actividades principales que los usuarios típicamente desarrollan en esas ubicaciones. Las secciones siguientes discuten la incorporación de la información acerca de las características del uso de redes WLAN y los patrones de tráfico en el modelo de diseño.

#### *B. Representación en Nodos de Demanda para el diseño de redes WLAN*

El concepto de nodos de demanda utilizado en problemas de ubicación de instalaciones describe el patrón de demanda geográfico para bienes y servicios. El concepto fue extendido para el diseño de redes inalámbricas de área local para representar la distribución del tráfico de red esperado en un área de servicio. En el diseño de redes WLAN un nodo de demanda representa un posible usuario inalámbrico en un área de servicio. Esta definición le permite al diseñador describir precisamente el número potencial de usuarios inalámbricos y sus ubicaciones, para ubicar los APs y asignarles usuarios apropiadamente. En redes WLAN, los usuarios se comunican a través de APs utilizando el protocolo CSMA/CA en el cual los usuarios compiten por el acceso al canal y comparten la capacidad del AP. Por lo tanto, se necesita la información sobre el número de usuarios para calcular una tasa de transmisión de datos promedio por usuario, mientras que se necesita la información sobre

las ubicaciones de los usuarios para asignarlos a un AP, con base en un nivel de potencia aceptable de la señal de radio.

Estudios de trazas de red caracterizan el uso de redes WLAN en diferentes ambientes tales como campus universitarios, edificios de oficinas corporativas, edificios académicos, y grandes auditorios. Existen similitudes en las características de uso entre diferentes ambientes de redes. La carga de tráfico en los APs depende del nivel de actividad de transferencia de datos además del número de usuarios inalámbricos situados dentro del área de cobertura de radio de los APs.

En el modelo de diseño de redes WLAN utilizado, un parámetro  $\alpha_t$ , nivel de actividad del usuario, es la correlación entre las características de uso de la red y las ubicaciones de los usuarios.  $\alpha_t$  es el porcentaje de usuarios inalámbricos en una sub-área de tipo  $t$  que transfieren datos simultáneamente a través de los APs. Se definen tres tipos de sub-áreas:  $t = \{1, 2, 3\}$ , donde 1 denota sub-áreas privadas, como oficinas, 2 denota sub-áreas públicas para actividades no programadas, tales como salas para estudiantes, y 3 denota sub-áreas públicas para actividades programadas, tales como salones de clase. Los usuarios activos participan en la competencia por el medio de transmisión para ganar el acceso a un canal de comunicación y compartir la capacidad del AP. Los usuarios restantes  $(1-\alpha_t)$  son usuarios inactivos que, aunque están situados en una sub-área de tipo  $t$ , no generan actividad de transferencia de datos sobre la red en un tiempo dado y por lo tanto no afectan la capacidad del AP. Un requerimiento de tasa de transmisión de datos de usuario en una sub-área de tipo  $t$  ( $R_t$ ) impone una tasa promedio de transmisión de datos (link rate) deseada que debería estar disponible para los usuarios activos.

### *C. Modelo de Diseño de redes WLAN basado en Demanda*

El problema de diseño de redes WLAN basado en demanda es formulado como un problema de optimización con restricciones, con requerimientos dados para un número

finito de variables con un conjunto dado de posibles valores (dominios) que pueden ser asignados a las variables. Una restricción limita qué duplas pueden formar una solución.

Sea  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_c\}$  que denota un conjunto de puntos de prueba de señal (STP), los cuales representan las ubicaciones para probar el nivel de potencia de la señal recibida y el nivel de la SIR. Cada STP  $s_h$  se refiere a una coordenada en un espacio tridimensional  $(x_h, y_h, z_h)$ , donde  $z_h$  es el piso en el cual  $s_h$  está ubicado.

Sea  $U = \{u_1^t, u_2^t, \dots, u_m^t\}$  que denota un conjunto de nodos de demanda, donde el índice  $t$  indica el tipo de sub-área donde el nodo de demanda  $i$  está ubicado. La posición del nodo de demanda  $i$  dentro del área de servicio está denotada por  $(x_i, y_i, z_i)$ , donde  $(x_i, y_i)$  son las coordenadas en el piso  $z_i$  en el que  $u_i^t$  está ubicado. El nivel de actividad de usuario ( $\alpha_t$ ) y el requerimiento de tasa promedio de transmisión de datos ( $R_t$ ) especifican las características de uso de la red para el nodo de demanda. El conjunto de nodos de demanda junto con la clasificación de la sub-área y los parámetros que especifican las características de uso de la red ( $\alpha_t$  y  $R_t$ ) son dados como entradas al proceso de diseño.

El modelo de diseño de redes WLAN basado en demanda de tráfico está definido por la tripleta (T, R, C), donde

$T = \{n, pot_j, f_j, d_{ij}^t, g_{hj}, (x_j, y_j, z_j)\}$  denota un conjunto de variables del problema de diseño

$O = \{O_n, O_p, O_f, O_d, O_g, O_{(x,y,z)}\}$  denota un conjunto de dominios finitos asociados con cada variable

$C = \{C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7\}$  denota un conjunto de restricciones

Sea  $A = \{ap_1, ap_2, \dots, ap_n\}$  denota un conjunto de APs utilizado en el área de servicio, donde  $n$  es el número total de APs requerido. Sea  $ac_j = \{p_j, f_j, (x_j, y_j, z_j)\}$  que denota un conjunto de parámetros asignado al  $ap_j$  para  $1 \leq j \leq n$ , donde  $pot_j$  denota el nivel de potencia asignado al  $ap_j$ ,  $f_j$  denota el canal de frecuencia asignado al  $ap_j$  y  $(x_j, y_j, z_j)$  denotan las coordenadas  $(x_j, y_j)$  en el piso  $z_j$  donde el  $ap_j$  está localizado;  $d_{ij}^t$  es una variable binaria de



asociación de usuario que equivale a 1 si el nodo de demanda  $i \in U$  se asocia con el  $ap_j \in A$ ; es 0 en otro caso;  $g_{hj}$  es una variable binaria de disponibilidad de la señal que equivale a 1 si el STP  $h \in S$  puede recibir una señal desde el  $ap_j \in A$ ; 0 en otro caso.

$O_n$  es un conjunto de números enteros, los cuales son candidatos para el número de APs usados en la red.  $O_p$  es un conjunto de niveles de potencia candidatos para ser asignados a la variable  $p_j = \{P_1, P_2, \dots, P_{\max}\}$ .  $O_f$  es el conjunto de canales de frecuencia candidatos para la variable  $f_j = \{F_1, F_2, \dots, F_k\}$ .  $O_d$  y  $O_g$  son  $\{0, 1\}$  el dominio de las variables binarias  $d_{ij}^t$  y  $g_{hj}$ , respectivamente.  $O_{(x,y,z)}$  es el dominio de la variable  $(x_j, y_j, z_j)$ , donde  $x_{\min} < x_j < x_{\max}$ ,  $y_{\min} < y_j < y_{\max}$  y  $z_j \in \text{PISO} = \{1^\circ, 2^\circ, \dots, n^\circ\}$ .

Los parámetros en el proceso de diseño están clasificados en parámetros estáticos y dinámicos. Los parámetros estáticos no cambian durante el proceso de diseño, porque sólo dependen de requerimientos estándar y de las características de la actividad del usuario en el área de servicio. Los parámetros estáticos especifican los requerimientos físicos de la señal, como el nivel de potencia de la señal recibida ( $P_{R\text{threshold}}$ ), los perfiles de los usuarios, como el nivel de actividad del usuario ( $\alpha_t$ ) y el requerimiento de tasa promedio de transmisión de datos de usuario ( $R_t$ ), la interferencia de canales adyacentes entre señales de canales que se superponen ( $\eta_{jk}$ ) y la capacidad de tasa de transmisión del AP ( $C_j$ ) que serán empleados en la red. Los parámetros dinámicos son recalculados cada vez que una variable cambia su valor durante el proceso de diseño. Las variables dinámicas incluyen el nivel de la señal recibida ( $P_{Rij}$ ) y la tasa transmisión de datos promedio obtenible ( $r_i^t$ ).

Las restricciones para el modelo de diseño de WLAN basado en demanda de tráfico, están dadas por el conjunto de ecuaciones (17).

Las restricciones C1 a C2 aseguran que los usuarios inalámbricos en el área de servicio puedan conectar a la WLAN. Satisfacer las restricciones C1 a C2 simultáneamente, da como resultado que cada nodo de demanda tenga un adecuado nivel de señal recibida, tal

que se pueda dar la transferencia de datos inalámbricos. La restricción C1 requiere que cada usuario inalámbrico se asocie con sólo un AP. La variable de decisión  $d_{ij}^t$  es igual a uno si el nivel recibido de la señal que recibe el usuario  $i$  del  $apj$  ( $P_{Rij}$  en dBm) cumple con el nivel de sensibilidad del receptor ( $P_{Rthreshold}$ ) como lo especifica la restricción C2, la variable  $d_{ij}^t$  es igual a cero en otro caso.

$$\begin{aligned}
C1: & \sum_{\forall j \in A} d_{ij}^t = 1 && , \forall i \in U \\
C2: & d_{ij}^t (P_{Rij} - P_{Rthreshold}) \geq 0 && , \forall i \in U, \forall j \in A \\
C3: & r_i^t > R_t && , \forall i \in U \\
C4: & \sum_{\forall j \in A} g_{hj} \geq 1 && , \forall h \in S \\
C5: & g_{hj} (P_{Rhj} - P_{Rthreshold}) \geq 0 && , \forall h \in S, \forall j \in A \\
C6: & d_{ij}^t \in \{0,1\} && , \forall i \in U, \forall j \in A \\
C7: & g_{hj} \in \{0,1\} && , \forall h \in S, \forall j \in A
\end{aligned} \tag{17}$$

La restricción C3 asegura que la tasa promedio de transmisión de datos disponible para el usuario inalámbrico  $i$ , el cual es un usuario tipo  $t$  ( $r_i^t$ ) es mayor que la tasa promedio de transmisión de datos de usuario especificada ( $R_t$ ). El modelo de capacidad del estándar 802.11 y el patrón de actividad de usuario correlacionado con el tipo de sub-áreas en las cuales se ubican los usuarios son incorporados en esta restricción para estimar la tasa promedio de transmisión que puede obtener el usuario inalámbrico activo.

Las restricciones C4 y C5 aseguran que la señal de radio esté disponible en la región de servicio. Para determinar la calidad de la señal en el área de servicio, el nivel recibido de la señal es probado en todos los puntos de prueba de señal (STP). La restricción C4 especifica que cada STP debe ser capaz de recibir una señal desde por lo menos un AP. La variable de decisión  $g_{hj}$  es igual a uno si el nivel recibido de la señal en el STP  $h$  transmitida desde el  $apj$  ( $P_{Rhj}$  en dBm) cumple con el límite de sensibilidad del receptor ( $P_{Rthreshold}$ ) como lo especifica la restricción C5, la variable  $g_{hj}$  es igual a cero en cualquier otro caso. Las restricciones C6 y C7 especifican que las variables  $d_{ij}^t$  y  $g_{hj}$  sólo pueden tomar valores binarios  $\{0, 1\}$ , respectivamente.

El problema de optimización utiliza una función objetivo para evaluar el progreso del algoritmo. Esta función objetivo está dada por el cubrimiento de la región de servicio, por el cubrimiento de la demanda de tráfico y por la asignación de canales para los APs.

La función objetivo es la suma del número de STPs que no han sido cubiertos, incrementada por un factor de penalización si el STP es un nodo de demanda, mas el número de nodos de demanda que faltan por ser asociados a un AP, mas el número de canales de frecuencia que faltan para cumplir con la separación dada por la matriz de compatibilidad.

La función objetivo del problema de optimización está dada por (18)

$$\begin{aligned} \min \quad & f(x) = CR + CDDA + CAP \\ \text{s.a.} \quad & f(x) \geq 0 \\ & C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7 \end{aligned} \tag{18}$$

Donde  $CR$  es el número de regiones sin cubrir más el número de nodos de demanda sin cobertura de la señal de radio;  $CDDA$ , es la demanda de tráfico de usuarios sin cubrir y  $CAP$ , es el peso de las restricciones sin cumplir, según la matriz de compatibilidad, en el problema de asignación de canales.

Si se logra una asignación factible, que haga cero la función objetivo, el algoritmo termina, si no, el algoritmo sigue iterando hasta otro criterio de parada. Un número máximo de iteraciones, definido por el usuario es otro criterio de parada. Si los valores de cobertura de área y demanda llegan a cero, pero después de varias iteraciones no se ha podido llegar a una asignación de canales factible, el algoritmo también termina.

## VI. TÉCNICA DE SOLUCIÓN [1]

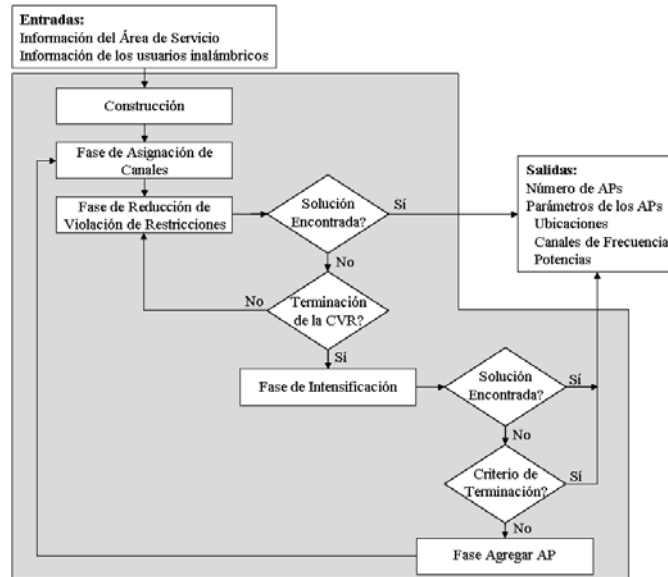


Fig. 4. Marco de trabajo de la técnica de solución [1]

La figura 4 muestra el marco de trabajo de la técnica de solución heurística. El núcleo de la técnica de solución tiene dos entradas. La primera entrada describe las propiedades físicas del área de servicio (tamaño del edificio, ubicación y composición de sus partes para el modelo *MWM*, etc.) y la información del tráfico de usuarios (densidad de ubicación de usuarios, nivel de actividad del usuario y tasas promedio de transmisión requeridas). La segunda entrada especifica los modelos (funciones) y parámetros para los cálculos fundamentales necesarios en la técnica de solución, incluyendo el modelo de propagación, el modelo de radiación de la antena, y el modelo de capacidad. Los parámetros incluyen la información necesaria para formular y calcular las restricciones en el problema de optimización (el límite del nivel recibido de la señal, el exponente de pérdidas de propagación, etc.). La salida especifica el número de APs requeridos y sus parámetros, incluyendo ubicación, nivel de potencia y asignación de frecuencia.

La técnica de solución consiste de cinco fases; la fase de construcción, la fase de asignación de canal (FAC), la fase de reducción de violación de restricciones (CVR), la fase de intensificación y la fase agregar AP. La Fig. 4 muestra la relación entre las fases. Las primeras dos fases (las fases de construcción y FAC) tratan de generar una buena configuración inicial que provea un número estimado de APs y sus parámetros iniciales.

La función objetivo para este problema es una suma del valor dado por las restricciones de cobertura y el valor obtenido al realizar la asignación de canales, Capítulo V.

#### *A. Fase de Construcción*

En esta fase se crea la primera parte de la solución inicial al problema, la cual no necesariamente es factible. La fase de construcción emplea dos heurísticas: la Heurística de Cobertura de Área (HCA) y la Heurística de Grupos de Demanda (HGD). Juntas, estas dos heurísticas determinan las ubicaciones iniciales y los niveles de potencia de los APs.

*A.1. Heurística de Cobertura de Área:* Esta técnica determina, con base en la ecuación de propagación dada por (3) y las dimensiones del área a cubrir, el mínimo número de APs necesarios para cubrir el área de servicio.

*A.2. Heurística de Grupos de Demanda:* Esta técnica utiliza la información sobre los usuarios (demanda de tráfico de los usuarios y porcentaje de usuarios activos) para determinar el mínimo número de APs necesarios para cubrir la demanda en el área de servicio. Esta técnica también compara estos resultados con los de la anterior heurística y así determina el número inicial de APs, luego utiliza la información de las ubicaciones de los usuarios para encontrar una posición y una potencia inicial para cada AP.

#### *B. Fase de Asignación de Canales*

La fase FAC utiliza Tabu Search para determinar las asignaciones de los canales de frecuencia de los APs con base en sus ubicaciones y niveles de potencia determinados en la

fase de construcción. En el capítulo IV, en el cual se trata el problema de asignación de canales, se explica esta fase.

En el algoritmo se utiliza el modelo de asignación de canales dado en el capítulo IV, sección B, que utiliza una matriz de compatibilidad. Se escogió este modelo porque las pruebas realizadas con los dos modelos dados en el capítulo IV para la asignación de canales, mostraron que el cálculo de la interferencia hace más lento el algoritmo y demanda un gran manejo de memoria en el computador, mientras que el modelo con matriz de compatibilidad asegura la reducción de la interferencia a través de la separación entre canales, lo que disminuye su tiempo de cómputo.

### *C. Fase de Reducción de Violación de Restricciones*

La fase CVR evalúa la configuración de la red con base en el conjunto de restricciones. Si alguna restricción de los requerimientos del diseño es violada, la fase CVR reduce las violaciones a las restricciones ajustando las ubicaciones y niveles de potencia de los APs, al igual que reasigna canales de frecuencia mediante Tabu Search.

Esta fase se ejecuta mediante el algoritmo Tabu Search. Partiendo de la solución dada como solución inicial, se crea un vecindario en el cual sólo cambia una coordenada de un AP o un nivel de potencia, una vez se encuentra una mejor solución, se recalcula la matriz de compatibilidad y se reasignan las frecuencias de los APs.

Las soluciones que aunque no sean factibles estén cerca de serlo, es decir, incumplan una restricción o tengan un bajo valor de la función objetivo son grabadas para usarlas más adelante, en caso de que no se encuentre una solución factible.

### *D. Fase de Intensificación*

Si la fase CVR no produce una configuración factible de la red (que satisfaga todas las restricciones de diseño), la fase de intensificación vuelve a tomar las buenas soluciones

candidatas grabadas durante la fase CVR y desempeña un proceso de reparación para cada solución visitada.

Esta fase de intensificación tiene la misma lógica que la estrategia de listas de candidatos o de reducción del vecindario en el algoritmo Tabu Search, el objetivo es llegar a una solución factible partiendo de una buena solución y sin alejarse mucho de ella.

#### *E. Fase Agregar AP*

Después de la fase de intensificación, si aun no se ha hallado una configuración factible de la red, la fase agregar AP trata de resolver el problema instalando un AP adicional en el área de servicio.

## VII. RESULTADOS NUMÉRICOS

A continuación se muestran los resultados de esta técnica para diseños de WLAN de un solo piso, en escenarios tomados de la referencia [1].

El área de servicio pequeña es el cuarto piso del edificio de la Escuela de Ciencias de la Información (SIS4) de la Universidad de Pittsburg, de 33 x 21 metros cuadrados, es mostrado en la figura 5. SIS4 es el plano de un piso típico de un edificio académico que contiene áreas de uso de red público y privado. Las áreas públicas son utilizadas para actividades programadas y no programadas. Las actividades programadas ocurren en los salones de clase (cuartos 403 al 406 y 411) y laboratorios (409 y 410), mientras que las actividades no programadas ocurren en la sala para estudiantes (401). Las áreas privadas de SIS4 son oficinas de estudiantes graduados (402, 407 y 410).

El área de servicio grande es el primer piso del edificio Biblioteca Hillman de la Universidad de Pittsburg (HL1), de 66 x 75 metros cuadrados, es mostrado en la figura 7. HL1 también contiene áreas de uso público y privado, las áreas de uso público son las áreas de estudio, mientras que las áreas privadas son las oficinas del personal de la biblioteca.

Las distribuciones de los nodos de demanda fueron obtenidas de estudios de campo e información suministrada por los miembros del personal en cada ubicación [1]. Las figuras 6 y 7 muestran las distribuciones de los nodos de demanda que representan a los posibles usuarios inalámbricos en las áreas de servicio. El símbolo ● representa nodos de demanda localizados en áreas públicas para actividades programadas, el símbolo ▲ representa nodos de demanda localizados en áreas públicas para actividades no programadas y el símbolo ★ representa nodos de demanda localizados en áreas privadas. Los niveles de actividad de usuario que corresponden a cada tipo de sub-área están basados en estudios que muestran que los usuarios en sub-áreas privadas son los usuarios de la red más activos, seguidos por



los usuarios en las áreas públicas para actividades no programadas y luego los usuarios en áreas públicas para actividades programadas. Similarmente, las tasas promedio de transmisión son tomadas de las características de uso en la red [1]. La tabla 4 resume las características de uso de la red.

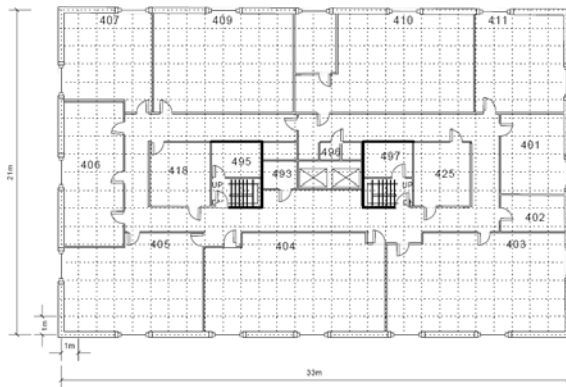


Fig. 5 Área de Servicio SIS4

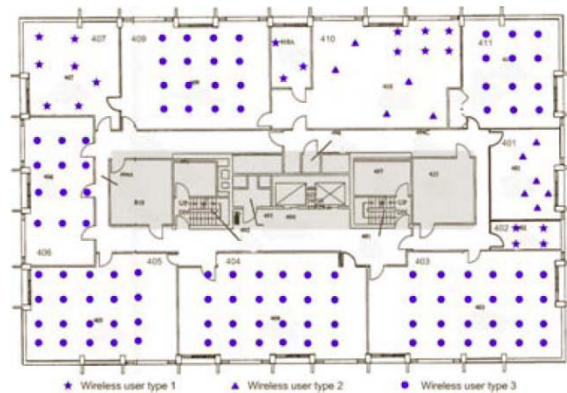


Fig. 6 Distribución de los nodos de demanda en SIS4

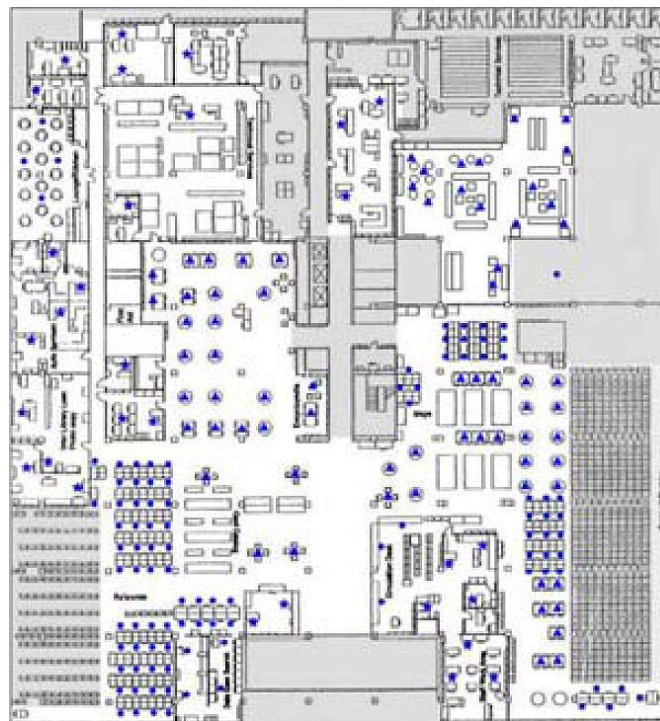


Fig. 7 Distribución de los nodos de demanda en HL1

TABLA 4.  
Características de uso de la red

Sub-áreas	Nivel de actividad	Tasa promedio de transmisión (kbps)
Tipo 1: Sub-áreas privadas	$\alpha_1 = 0.50$	$R_1 = 460$
Tipo 2: Sub-áreas públicas para actividades no programadas	$\alpha_2 = 0.40$	$R_2 = 260$
Tipo 3: Sub-áreas públicas para actividades programadas	$\alpha_3 = 0.35$	$R_3 = 80$

La tabla 5 resume los parámetros de entrada al problema de diseño de la red. En estos ejemplos las variables reflejan la especificación IEEE 802.11b. Se usan el modelo de propagación *ISM*, dado por (3), y antenas omnidireccionales con una ganancia  $G_{AZ}$  de 2.5 dB para estimar las características de propagación en el área de servicio. El diseño trata de obtener un 95% de disponibilidad de la cobertura en el área de servicio.

En estos ejemplos el área de servicio es dividida en cuadrículas de tamaño 1m x 1m. Los puntos en la malla representan posibles ubicaciones para los APs y especifican los Puntos de Prueba de la Señal (STP). Fig. 5.

Los resultados obtenidos al aplicar el modelo de diseño WLAN basado en demanda al área de servicio de red SIS4 son mostrados en las figuras 8 a 10. La parte a de la figura muestra la solución inicial, la parte b, la configuración resultante, la parte c, la variación del valor de la función objetivo, la parte d, la variación del tamaño de la lista Tabú y la parte e, muestra los parámetros de salida. Para el área de servicio SIS4, el algoritmo calcula dos (2) APs iniciales para cumplir con las restricciones de cobertura y demanda, sin embargo, en una corrida, no es capaz de cumplir las restricciones con este número inicial de APs y agrega otro. En la figura 10, se utiliza toda la demanda dada en el área de servicio, se asume que todos los usuarios están activos todo el tiempo, en este caso el algoritmo llega a cuatro APs porque en esta ocasión no pudo encontrar una respuesta satisfactoria con un menor número de APs.

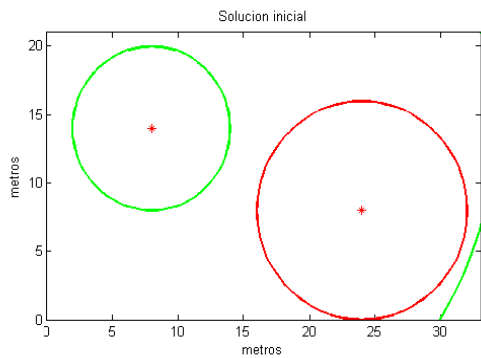
TABLA 5.

Resumen de los parámetros usados en el diseño WLAN

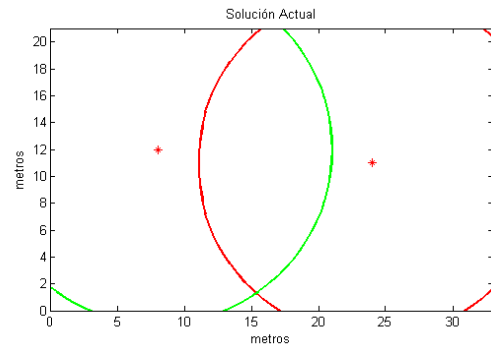
Parámetro	Definición	Valor
Dominios de las variables:		
$O_p$	Potencias candidatas	{0,7,13,15,17,20,24} en dBm
$O_f$	Frecuencias candidatas	{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11}
$O_d$	Dominio de $d_{ij}^t$	{0,1}
$O_g$	Dominio de $g_{hj}$	{0,1}
$O_{(x,y)}$	Dominio de $(x_j, y_j)$ en metros	$0 < x_j < 33, 0 < y_j < 21$ , SIS4 $0 < x_j < 66, 0 < y_j < 75$ , HL1
Parámetros Estáticos:		
$\alpha_t$	Nivel de actividad de usuario	Ver Tabla 4.
$R_t$	Req. de tasa promedio de transmisión para la sub-área $t$	
$P_{Rthreshold}$	Límite de sensibilidad del receptor	- 80 dBm
$C_j$	Capacidad de tasa de transmisión para el $ap_j$	11 Mbps
Parámetros de pérdidas de propagación		
$d_0$	Distancia de Referencia $d_0$	1 metro
$n$	Exponente de pérdidas	3.3
$\delta$	Desviación estándar que representa el desvanecimiento	3.5 dB
Parámetros de la antena		
$G_{AZ}$	Ganancia de la Antena	2.5 dB

**Nota:** Las frecuencias 2.412, 2.437, 2.462 GHz son denotadas con los canales 1, 6 y 11, estas son las frecuencias que normalmente se usan, sin embargo en este trabajo se muestra que con una adecuada planeación, es posible utilizar más canales en la red.

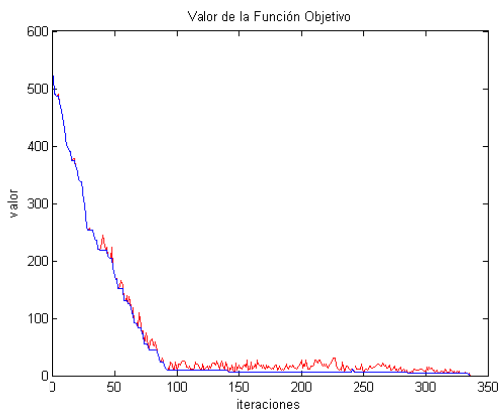
Las potencias de transmisión 0, 7, 13, 15, 17, 20 y 24 dBm son denotadas por los niveles de potencia 0, 1, 2, 3, 4, 5 y 6, respectivamente



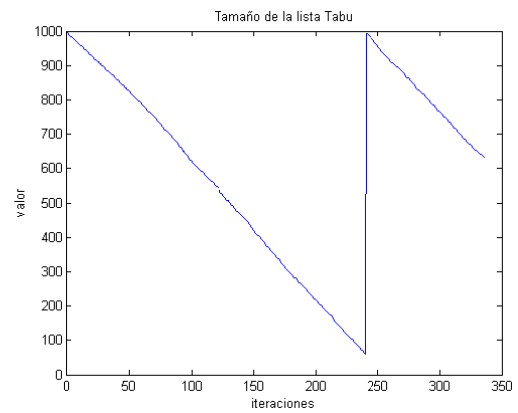
a. Solución inicial para SIS4



b. Solución final para SIS4



c. Variación del valor de la función objetivo

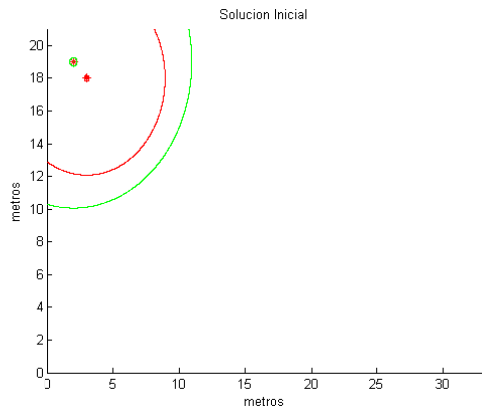


d. Variación del tamaño de la lista Tabu

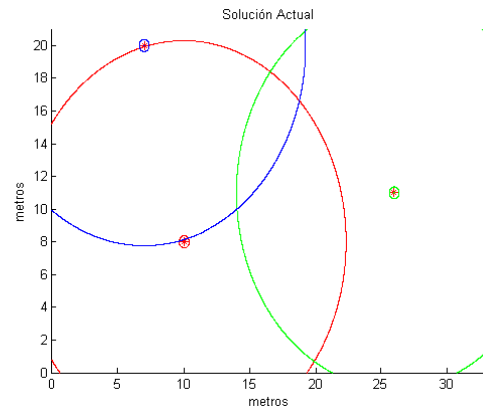
AP	Ubicación	Canal de Frecuencia	Nivel de Potencia	Color
1	(24.0, 11.0)	1	6	Rojo
2	(8.0, 12.0)	11	6	Verde
Tiempo de corrida del algoritmo			3.38 segundos	
Número de iteraciones			12	

e. Configuración de la red para SIS4

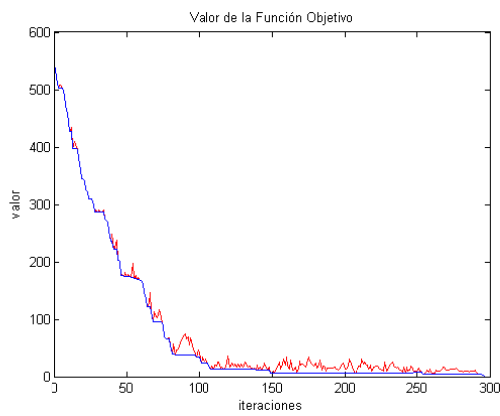
Fig. 8 Configuración de la WLAN para el área de servicio SIS4



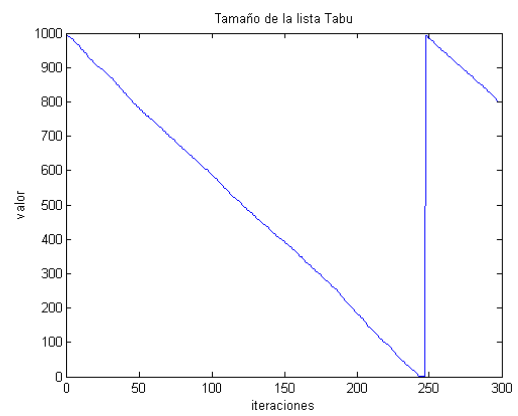
a. Solución inicial para SIS4



b. Solución final para SIS4



c. Variación del valor de la función objetivo

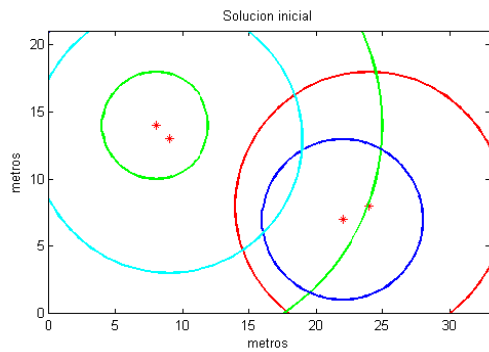


d. Variación del tamaño de la lista Tabú

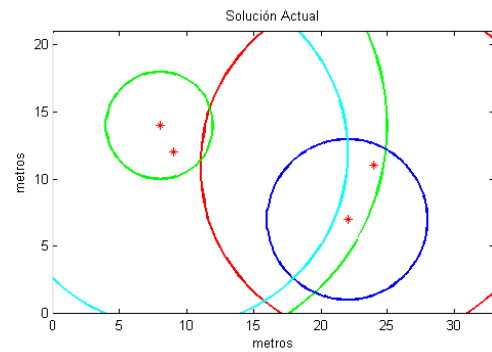
AP	Ubicación	Canal de Frecuencia	Nivel de Potencia	Color
1	(10.0, 8.0)	1	6	Rojo
2	(26.0, 11.0)	6	6	Verde
3	(7.0, 20.0)	11	6	Azul
Tiempo de corrida del algoritmo			72.92 segundos	
Número de iteraciones			297	

e. Configuración final de la red para SIS4

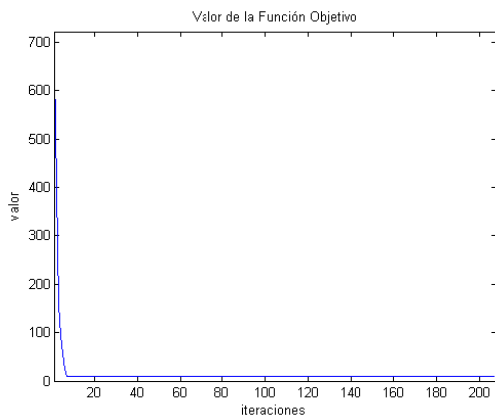
Fig. 9 Configuración de la WLAN para el área de servicio SIS4



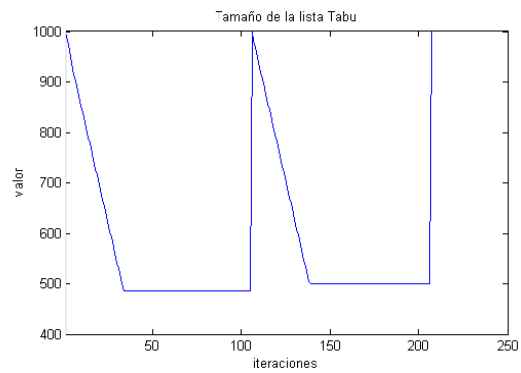
a. Solución inicial para SIS4



b. Solución final para SIS4



c. Variación del valor de la función objetivo



d. Variación del tamaño de la lista Tabú

AP	Ubicación	Canal de Frecuencia	Nivel de Potencia	Color
1	(24.0, 11.0)	1	6	Rojo
2	(8.0, 14.0)	6	1	Verde
3	(22.0, 7.0)	6	2	Azul
4	(9.0, 12.0)	11	6	Cyan
Tiempo de corrida del algoritmo			194.35 segundos	
Número de iteraciones			208	

e. Configuración de la red para SIS4

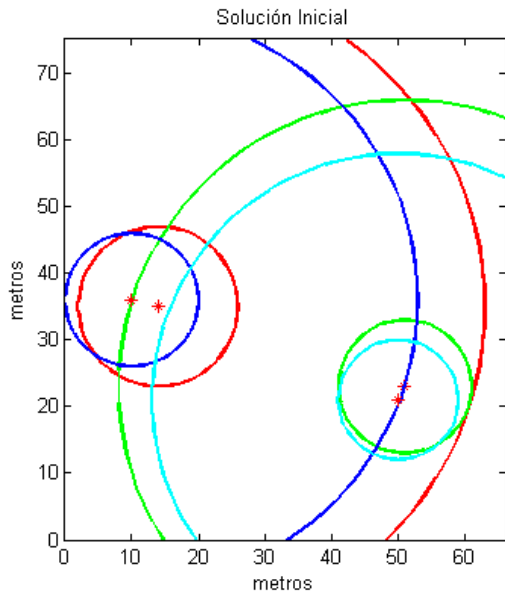
Fig. 10 Configuración de la WLAN para el área de servicio SIS4, tratando de cubrir la máxima demanda en el área de servicio

Los resultados obtenidos al aplicar el modelo de diseño WLAN basado en demanda al área de servicio de red HL1 son mostrados en las figuras 11 a 13. La parte a de la figura muestra la solución inicial, la parte b, la configuración resultante, la parte c, la variación del valor de la función objetivo, la parte d, la variación del tamaño de la lista Tabú y la parte e, muestra los parámetros de salida.

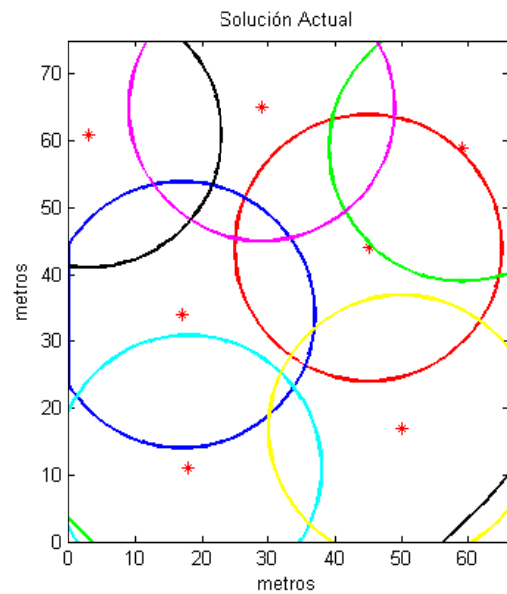
El número mínimo de APs para cubrir la demanda de tráfico en el sistema es cuatro, con este número empieza a trabajar el algoritmo en las dos corridas mostradas en las figuras 11 y 12.

En la figura 13, se utiliza toda la demanda dada en el área de servicio, se asume que todos los usuarios están activos todo el tiempo. Para cumplir con esta demanda, el algoritmo empieza con el número de APs necesario para cubrir la demanda de tráfico y trata de ubicarlos en las zonas de mayor demanda. En este caso el número mínimo de APs es siete por lo que rápidamente puede llegar a la solución final.

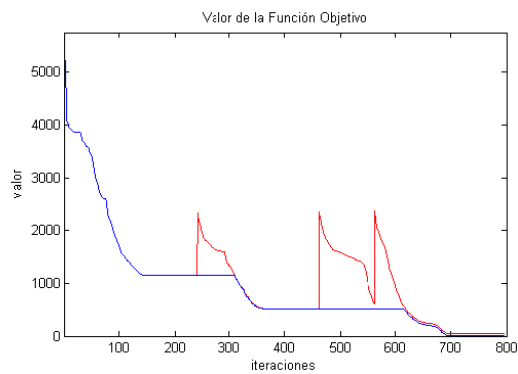
Para el caso de diseño de HL1, todas las corridas llegan a configuraciones similares, debido a que en la etapa de intensificación, el algoritmo trata de distribuir mejor los APs y asignarles la máxima potencia, para así lograr una mayor cobertura y tratar de cumplir con todas las restricciones.



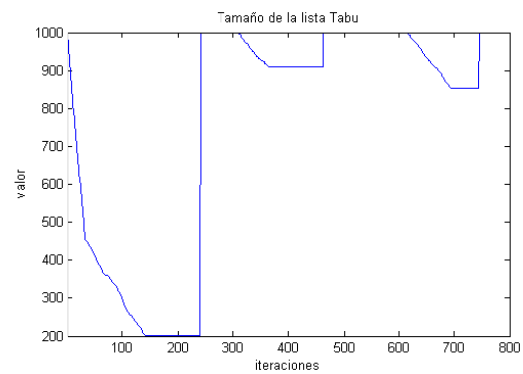
a. Solución inicial para HL1



b. Solución final para HL1



c. Variación del valor de la función objetivo



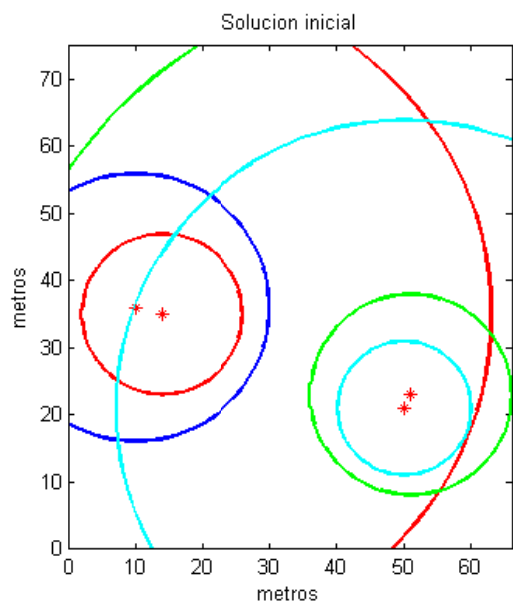
d. Variación del tamaño de la lista Tabu

AP	Ubicación	Frecuencia	Potencia	Color
1	(45.0, 44.0)	1	6	Rojo
2	(59.0, 59.0)	6	6	Verde
3	(17.0, 34.0)	6	6	Azul
4	(18.0, 11.0)	1	6	Cyan
5	(29.0, 65.0)	11	6	Magenta
6	(50.0, 17.0)	11	6	Amarillo
7	(3.0, 61.0)	1	6	Negro
Tiempo de corrida del algoritmo			867.5 segundos	
Número de iteraciones			800	

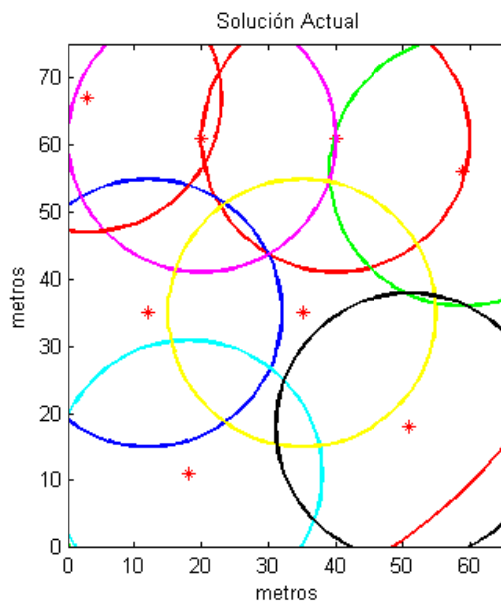
e. Configuración de la red para HL1

Fig. 11. Configuración de la WLAN para el área de servicio HL1

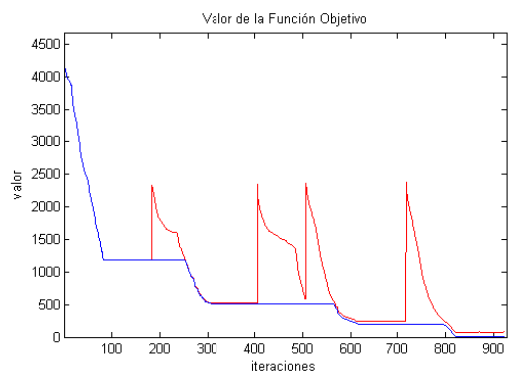




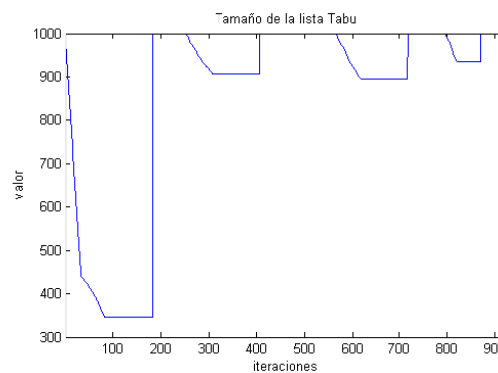
a. Solución inicial para HL1



b. Solución final para HL1



c. Variación del valor de la función objetivo

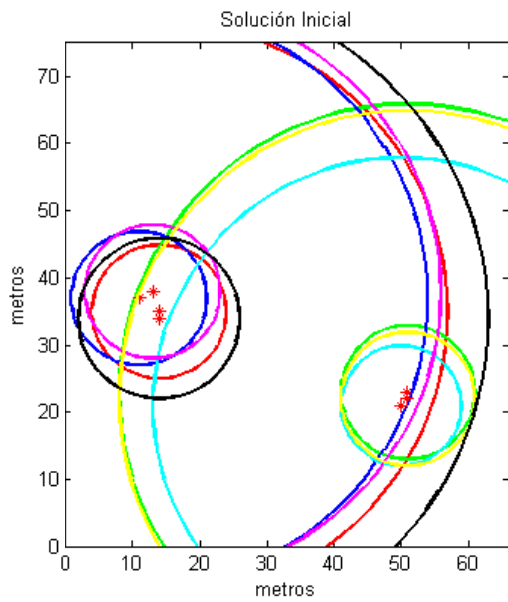


d. Variación del tamaño de la lista Tabú

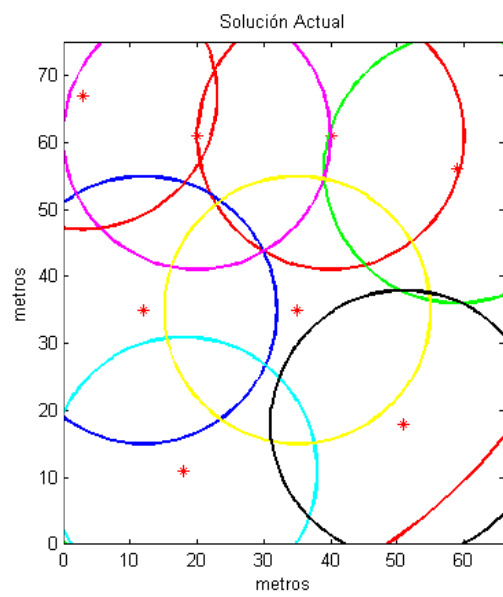
AP	Ubicación	Frecuencia	Potencia	Color
1	(40.0, 61.0)	1	6	Rojo
2	(59.0, 56.0)	6	6	Verde
3	(12.0, 35.0)	6	6	Azul
4	(18.0, 11.0)	1	6	Cyan
5	(20.0, 61.0)	11	6	Magenta
6	(35.0, 35.0)	11	6	Amarillo
7	(51.0, 18.0)	6	6	Negro
	(3.0, 67.0)	1	6	Rojo
Tiempo de corrida del algoritmo			1124.1 segundos	
Número de iteraciones			926	

e. Configuración de la red para SIS4

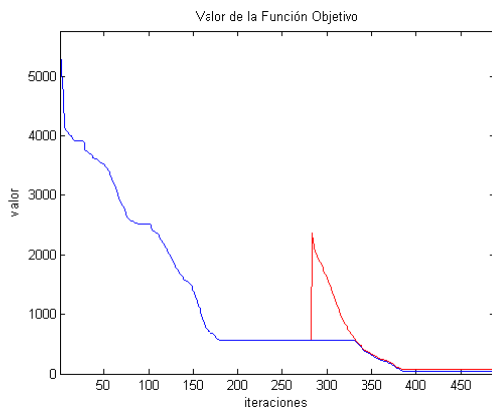
Fig. 12. Configuración de la WLAN para el área de servicio HL1



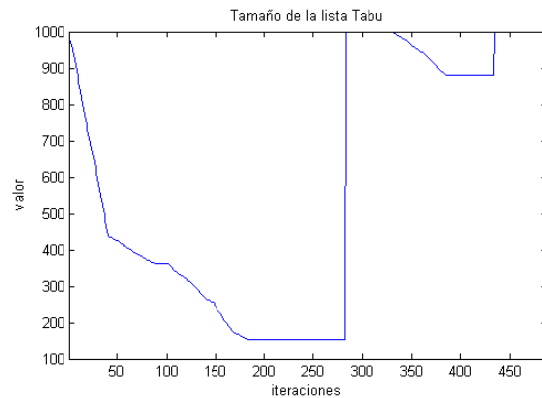
a. Solución inicial para HL1



b. Solución final para HL1



c. Variación del valor de la función objetivo



d. Variación del tamaño de la lista Tabu

AP	Ubicación	Frecuencia	Potencia	Color
1	(40.0, 61.0)	1	6	Rojo
2	(59.0, 56.0)	6	6	Verde
3	(12.0, 35.0)	6	6	Azul
4	(18.0, 11.0)	1	6	Cyan
5	(20.0, 61.0)	11	6	Magenta
6	(35.0, 35.0)	11	6	Amarillo
7	(51.0, 18.0)	6	6	Negro
8	(3.0, 67.0)	1	6	Rojo
Tiempo de corrida del algoritmo			788.05 segundos	
Número de iteraciones			488	

e. Configuración de la red para SIS4

Fig. 13. Configuración de la WLAN para el área de servicio HL1 con la máxima demanda

## VIII. CONCLUSIONES

El problema de diseño de redes inalámbricas de área local basadas en el estándar IEEE 802.11b se puede dividir en los subproblemas de caracterización del área a cubrir (dimensiones del área, modelo de propagación, materiales de los obstáculos presentes, número de usuarios y demanda de tráfico de estos usuarios), determinación del número inicial de puntos de acceso con su ubicación y potencia inicial, determinación de la asignación de canales para la configuración inicial y optimización de la solución, en caso de no llegar a una solución satisfactoria, agregar un punto de acceso adicional.

Se evaluaron dos modelos de trabajo para resolver el problema de asignación de canales, sin embargo, con base en los resultados obtenidos y en la literatura (referencias [6] y [9]), se decidió utilizar el modelo que utiliza la matriz de compatibilidad ya que su cálculo es mucho más rápido y utiliza menos recursos del computador. El problema de calcular las interferencias en cada punto del área de servicio y tener en cuenta las múltiples interferencias desde diferentes APs, es la gran cantidad de tiempo que lleva procesar esta información a medida que la red crece. Con la matriz de compatibilidad se garantiza una asignación libre de interferencias o por lo menos, con interferencia en un nivel aceptable.

La asignación de frecuencias en todos los casos se ubica en 1, 6 y 11 que son las frecuencias que tienen la separación adecuada en el estándar IEEE 802.11b, sin embargo el algoritmo prueba con otras frecuencias de las 11 disponibles, como la restricción de separación es de cinco canales, y con la matriz de compatibilidad se penaliza el número de canales de separación que esté incumpliendo la restricción si no se penaliza el uso de frecuencias se puede terminar utilizando más frecuencias de las necesarias, ocasionando mayor interferencia.

El algoritmo Tabu Search ha probado ser un buen algoritmo para el problema de asignación de canales y para el problema de diseño de WLAN, en general. El tiempo necesario para llegar a un óptimo ha sido bajo, comparándolo con tiempos de corrida para problemas de asignación de canales en redes celulares, aunque el problema de asignación de canales en este caso (WLAN) es una simplificación del anterior, también se resolvió el problema de la ubicación de APs y de sus potencias de transmisión dentro del mismo tiempo.

Se ha realizado el diseño de dos áreas de servicio para redes inalámbricas, una pequeña (SIS4, de 33 x 21 m.) y una grande (HL1, de 66 x 75 m.), basado en demanda, utilizando diferentes tipos de usuarios que presentan diferentes necesidades de tráfico. Este diseño se basó, no solo en la cobertura de la señal de radio sino también en la demanda de tasa de transmisión de datos de los usuarios; esta demanda es útil para determinar el número de APs a utilizar en la solución y principalmente para determinar las ubicaciones de estos. A medida que más redes inalámbricas son instaladas, el número de usuarios de este tipo de redes también crece, así como nuevas aplicaciones sobre estas redes, estos factores llevan a que en las redes se requerirá cada vez más capacidad de transmisión de datos por parte del proveedor de servicios para cumplir con la demanda esperada.

También, cabe resaltar que aunque no existe una restricción sobre el número de APs que se pueden usar en la solución, como se puede ver en los resultados mostrados en la figura 9, el método de diseño no utiliza un número excesivo de APs.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. Prommak, J. Kabara y D. Tipper. “Demand-based Network Planning for Large Scale Wireless Local Area Networks”. International Workshop on Broadband Wireless Services and Applications (BroadWISE), Oct 2004.
- [2] F. Glover, M. Laguna. “TABU SEARCH”. Editorial Springer. 1997.
- [3] F. Glover. “Tabu Search – Part I,” *INFORMS Journal on Computing*, vol. 1, no. 3, pp. 190-206. 1989.
- [4] F. Glover. “Tabu Search – Part II,” *INFORMS Journal on Computing*, vol. 2, no. 1, pp. 4-32. 1989.
- [5] A. Capone, M. Trubian. “Channel Assignment Problem in Cellular Systems: A New Model and a Tabu Search Algorithm”. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, Vol. 48, No. 4, pp. 1252-1260. 1999.
- [6] R. Montemanni, J. Moon y D. Smith. “An Improved Tabu Search Algorithm for the Fixed-Spectrum Frequency-Assignment Problem”. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, Vol. 52, No. 3, pp. 891-901. 2003.
- [7] J. Lähteenmäki. “Propagation Prediction Models”. Chapter 4, Section 7. *Indoor Propagation Models*. VTT Information Technology. Finland.
- [8] B. H. Metzger, “Spectrum management technique,” in 38th National ORSA Meeting, Detroit, MI, Fall 1970.
- [9] K.I. Aardal, S.P.M. van Hoesel, A.M.C.A. Koster, C. Mannino y A. Sassano. “Models and Solution Techniques for Frequency Assignment Problems”. *Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin. ZIB-Report 01–40*. 2001.
- [10] Cisco. “Channels and Maximum Power Settings for Cisco Aironet Lightweight Access Points, OL-11321-02”. Septiembre 2006.
- [11] Cisco, “Wireless Point-to-Point Quick Reference Sheet”. Febrero 2006.
- [12] S. Hurley, “Planning Effective Cellular Mobile Radio Networks”. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 51, no. 2, pp. 243-253. 2002.
- [13] Wikipedia, La enciclopedia libre. Wikimedia Foundation Inc. <http://es.wikipedia.org/>. 2006.
- [14] IEEE Std 802.11b-1999/Cor 1-2001.  
<http://standards.ieee.org/getieee802/portfolio.html>

**ANEXOS**  
**CÓDIGO FUENTE**

## ANEXO A

%Script para la Tesis

```
close all; clear all; clc
tiempo = cputime;
```

```
format compact
rand('state',sum(100*clock));
```

```
%SIS4
% #tipo1 = 20;
% #tipo2 = 11;
% #tipo3 = 108;
demandaSIS4 = load SIS4;
```

```
% % HL1
demandaHL1 =load HL1;
```

```
%Matrices con la información de los nodos de demanda por tipo
tipo1 = (demanda==1);
tipo2 = (demanda==2);
tipo3 = (demanda==3);
```

```
%Arreglo con el número de usuarios por tipo
ntipo = [sum(sum(tipo1)),sum(sum(tipo2)),sum(sum(tipo3))];
```

```
%Nivel de actividad del usuario, % de usuarios activos en un momento dado
alphanat = [0.5, 0.4, 0.35];
% alphanat = [1, 1, 1];
```

```
%Requerimiento de tasa promedio de transmisión de datos (kbps)
rt = [460, 260, 80];
```

```
% Potencias de Tx = {0, 7, 13, 15, 17, 20, 24} dBm
pots = [7,13,15,17,20,24];%dBm
```

```
% Frecuencias disponibles
% frec = [1,6,11];
frec = 11;
```

```
%T = Tamano inicial de la Lista Tabu
T = 500;
```

```
%L0 = las pérdidas del camino a una distancia de 1 metro
L0 = 28; %dB, Para HL1
% L0 = 33.3; %dB, para SIS4, de la ref [2]
```

```
%n = índice de caída de potencia
eta = 3.3; %de la ref. [1]
```

```
% Desvanecimiento(fading) = 3.5 dB
fade = 33.5; %dBm
```

```
% Ganancia de la Antena = 2.5 dB
Gaz = 32.5; %dBm
```

```
%Capacidad de un AP en IEEE 802.11b 11Mbps = 11000 kbps; 5900 kbps efectivos en TCP
AP_capacity = 5900;
```

```
[sini,xini,sfin,xfin] = DisenoWLAN(demanda,ntipo,alphanat,rt,Gaz,eta,L0,fade,pots,frec,T);
```

```
tttotal = cputime-tiempo %Tiempo total de corrida
```

## ANEXO B

%Funcion para el diseño de WLAN basado en demanda

function...

```
[sini,xini,sfin,xfin] = DisenoWLAN(demanda,ntipo,alphat,rt,Gaz,eta,L0,fade,pots,frec,T)
```

%Crea la solución inicial

```
[solucion,dmax] = HCA_HGD(demanda,Gaz,L0,eta,fade,ntipo,alphat,rt,pots);
```

%Crea la matriz de compatibilidad con base en la solución inicial

```
comp = c_matriz(solucion,Gaz,eta,L0,pots,frec)
```

%Asigna canales

```
x = sol_CAP(comp,frec);
```

%Solucion Inicial

```
sini = solucion;
```

```
xini = x;
```

%Evalua la solución actual

```
[fopt_AP,cubr] = eval_sol_AP(demanda,solucion,Gaz,eta,L0,pots);
```

```
fopt_CAP = eval_sol_CAP(comp,x);
```

```
fopt = fopt_AP+fopt_CAP
```

```
[ymax,xmax] = size(demanda);
```

```
s = solucion;
```

```
iter1 = 0;
```

```
iter2 = 1;
```

```
fobja = [fopt];
```

```
fobjb = [fopt];
```

```
TabuL = [2*T];
```

```
while fopt>0 && iter2<100
```

```
    [fopt_AP,fopt_CAP,s,x,funa,funo,tabula,iter] =  
        optimiza(demanda,Gaz,eta,L0,pots,frec,s,x,T,fopt_AP,fopt_CAP);  
    fopt = fopt_AP+fopt_CAP;
```

```
    if fopt>0
```

```
        [fopt_AP,fopt_CAP,s,x,funa2,funo2,tabula2] =  
            intensifica(demanda,Gaz,eta,L0,pots,frec,s,x,T,fopt_AP,fopt_CAP,dmax);  
        fopt = fopt_AP+fopt_CAP;  
        funa = [funa funa2];  
        funo = [funo funo2];  
        tabula = [tabula tabula2];  
        iter = iter+1;
```

```
    end
```

```
    if fopt>0 && fopt_AP>0
```

```
        [fopt,s,x] = agregaAP(demanda,Gaz,eta,L0,pots,frec,s,x);  
    end
```

```
    iter1 = iter1 + iter;  
    fobja = [fobja funa];  
    fobjb = [fobjb funo];  
    TabuL = [TabuL tabula];  
    iter2=iter2+1;
```

```
end
```

```
iter2=iter2-1;
```

```
figure
```

```
plot(fobja,'r')
```

```
hold on
```



```
plot(fobjb,'b')
axis([1 iter1 0 fobjb(1)]);
title('Valor de la Función Objetivo')
xlabel('iteraciones')
ylabel('valor')
```

```
figure
plot(TabuL)
title('Tamaño de la lista Tabu')
xlabel('iteraciones')
ylabel('valor')
```

```
sfin = s;
xfin = x;
dibujasol(demanda,Gaz,I0,eta,pots,s)
```

## ANEXO C

### %Solución Inicial

```
function [solucion,dmax] = HCA_HGD(demanda,Gaz,L0,eta,fade,ntipo,alphan,rt,pots)
%HEURISTICA DE COBERTURA DE ÁREA (HCA)
%
% La distancia máxima de transmisión para una antena es de:
dmax = floor(10^((80+24+Gaz-L0-32-33.5)/(10*eta)));

%dmax es el radio máximo de cobertura. El área máxima de cobertura es
amax = pi*dmax^2;
%El área de la región de servicio es
[ymax,xmax] = size(demanda);
area = xmax*ymax;

%numero de potencias disponibles
p = size(pots,2);

%El número inicial de APs para cumplir con la cobertura es
HCA_nap = ceil(area/amax)

%HEURÍSTICA DE GRUPOS DE DEMANDA (HGD)
%Calcula el número de APs necesario para cubrir la demanda de tráfico y agrega los APs
%faltantes al área de servicio, teniendo en cuenta las filas y columnas con mayor demanda de
%tráfico
%
%Capacidad de un AP en IEEE 802.11b 11Mbps = 11000 kbps; 5.9 Mbps efectivos en TCP
AP_capacity = 5900;

%Copia de la matriz de demanda, para trabajar sobre ella
demanda_nueva = demanda;

for i=1:3
    demanda_nueva(demanda==i) = alphan(i)*rt(i);
end

demanda_nueva(demanda==4) = 0;

coordx = sum(demanda_nueva);
coordy = sum(demanda_nueva');

%Demanda total
dtrafico = 0;

dtrafico = sum(sum(demanda_nueva));

%Si la demanda requiere más APs de los que se pusieron por cobertura...
HGD_nap = ceil(dtrafico/AP_capacity)

imax = 0;

if HGD_nap > HCA_nap
    %APs adicionales que se necesitan para cubrir la demanda de trafico
    imax = HGD_nap - HCA_nap;
end

fin = HCA_nap + imax;

%Filas y columnas con mayor requerimiento de tráfico
[HGD_y,y_index] = sort(coordy,'descend');
[HGD_x,x_index] = sort(coordx,'descend');

for i=1:fin
    solucion(i,:)=[x_index(i), ymax-y_index(i), 1+round((p-1)*rand())];
end
```

## ANEXO D

%Funcion que evalua la solucion de ubicaciones y potencias

```
function [f_AP,cubr] = eval_sol_AP(demanda,solucion,Gaz,eta,L0,pots)

f_AP = 0;
[ymax,xmax] = size(demanda);
tipo1 = (demanda==1);
tipo2 = (demanda==2);
tipo3 = (demanda==3);

dda = tipo1+tipo2+tipo3;
dda2 = sum(sum(dda));

[n,param] = size(solucion);

for k=1:n
    xr(k) = solucion(k,1);
    yr(k) = solucion(k,2);
    p(k) = solucion(k,3);
end

%95% de cobertura
xm=1:1:xmax;
ym=1:1:ymax;

[x,y] = meshgrid(xm,ym);
pottemp = zeros(size(x));

for g=1:n
    pottemp = zeros(size(x));
    pottemp = pottemp + ...
    + (pots(p(g)) + Gaz - (L0+10*eta*log10(sqrt((xr(g)-x).^2+(yr(g)-y).^2+eps)+34)) - 33.5;
    pot(:,:,g) = pottemp;
end

[a,b,c] = size(pot);

for i=1:c
    matriz_P(:,:,i) = pot(:,:,i);
end

m_P = matriz_P>-80;

cub = zeros(a,b);

for i=1:c
    cub = cub+m_P(:,:,i);
end

cubr=cub>0;

dda3 = and(dda,cubr);
dda4 = sum(sum(dda3));
falta = dda2-dda4;

cubr2 = sum(sum(cubr));

area = (xmax*ymax);
area2 = round(0.95*area);

f_AP = (area2-cubr2)+10*falta;

if f_AP<0
    f_AP=0;
end
```

## ANEXO E

%PROCEDIMIENTO DE OPTIMIZACION HEURISTICA MEDIANTE TS

```
function [fopt_AP,fopt_CAP,sopt,xopt,funa,funo,TabuL,iter] = ...
    optimiza(demanda,Gaz,eta,L0,pots,frec,s,x,T,fopt_AP,fopt_CAP)

iter = 1;
contador = 0;
T_AP = T;
T_CAP = T;
TL_AP = zeros(T,3);
TL_CAP = zeros(T,4);
sopt = s;
xopt = x;
xbest = x;
sbest = s;

fopt = fopt_AP+fopt_CAP;

if fopt>0
    while iter<1000 && contador<200 && fopt>0
        iter
        fbest_AP = inf;
        VAPP = VecindarioAP_P(s,demanda,pots); %Calcula la vecindad de s
        imax = size(VAPP,3);
        for i=1:imax
            sact = VAPP(:, :, i);
            [fact_AP,cubr] = eval_sol_AP(demanda,sact,Gaz,eta,L0,pots);
            if fact_AP<fopt_AP
                fopt_AP = fact_AP;
                sopt = sact;
                fbest_AP = fact_AP;
                sbest = sact;
                contador = 1; %contador para #iter sin mejorar
                T_AP = T_AP-1;
            elseif fact_AP<fbest_AP && tabu_AP(s,sact,TL_AP,iter)
                fbest_AP = fact_AP;
                sbest = sact;
            end
        end
        fbest_CAP = inf;

        comp = c_matriz(s,Gaz,eta,L0,pots,frec);

        VCAP = Vecindario_CAP(x,comp); %Calcula la vecindad de x
        jmax = size(VCAP,3);
        for j=1:jmax
            xact = VCAP(:, :, j);
            fact_CAP = eval_sol_CAP(comp,xact);
            if fact_CAP<=fopt_CAP
                fopt_CAP = fact_CAP;
                xopt = xact;
                fbest_CAP = fact_CAP;
                xbest = xact;
                T_CAP = T_CAP-1;
            elseif fact_CAP<fbest_CAP && tabu_CAP(x,xact,TL_CAP,iter) %1 si es mvto valido
                fbest_CAP = fact_CAP;
                xbest = xact;
            end
            if fact_CAP==0
                xopt=xact;
            end
        end
    end
    if T_AP<0
```

```

        T_AP = 1;
    end
    if T_CAP<0
        T_CAP = 1;
    end
    x = xbest;
    s = sbest;

    TL_AP = tabulist_AP(s,sbest,TL_AP,T_AP,iter); %Actualiza la Lista Tabu
    TL_CAP = tabulist_CAP(x,xbest,TL_CAP,T_CAP,iter); %Actualiza la Lista Tabu
    fopt = fopt_AP+fopt_CAP;
    funo(iter) = fopt;
    fbest = fbest_AP+fbest_CAP;
    funa(iter) = fbest;
    T = T_AP+T_CAP;
    if T<1
        T = 1;
        T_AP = 1;
        T_CAP = 1;
    end
    TabuL(iter) = T;
    contador = contador + 1;
    disp(fopt)
    iter=iter+1;
end
end
end

```

## ANEXO F

```
%PROCEDIMIENTO DE INTENSIFICACION HEURISTICA MEDIANTE TS
function [fopt_AP,fopt_CAP,sopt,xopt,funa,funo,TabuL] = ...
    intensifica(demanda,Gaz,eta,L0,pots,frec,s,x,T,fopt_AP,fopt_CAP,dmax)

[ymax,xmax] = size(demanda);

%numero de potencias disponibles
p = size(pots,2);

[si,sj]=size(s);

j = 1;
cont = 1;
for i=1:si
    if (2*i-1)*dmax>xmax
        j=j+1;
        cont = 1;
    end

    s(i,1) = (2*cont-1)*dmax;

    if (dmax*j)>ymax
        % j = round(ymax/dmax);
        j = 1;
    end

    s(i,2) = ymax-dmax*j;

    if s(i,1)<1
        s(i,1)=1;
    end
    if s(i,2)<1
        s(i,2)=1;
    end
    s(i,3) = p;

    cont = cont+1;
end

T_AP = T;
T_CAP = T;
TL_AP = zeros(T,3);
TL_CAP = zeros(T,4);

sopt = s;
xopt = x;
xbest = x;
sbest = s;

iter = 1;
fopt = fopt_AP+fopt_CAP;

fbest_AP = inf;

VAPP = VecindarioAP_P(s,demanda,pots); %Calcula la vecindad de s

imax = size(VAPP,3);
for i=1:imax
    sact = VAPP(:, :, i);
    [fact_AP,cubr] = eval_sol_AP(demanda,sact,Gaz,eta,L0,pots);
    if fact_AP<fopt_AP
        fopt_AP = fact_AP;
        sopt = sact;
        fbest_AP = fact_AP;
    end
end
```

```

        sbest = sact;
        T_AP = T_AP-1;
    elseif fact_AP < fbest_AP && tabu_AP(s,sact,TL_AP,iter) % 1 si es un movimiento valido
        fbest_AP = fact_AP;
        sbest = sact;
    %         T_AP = T_AP-1; %Disminuye el tamaño de la lista
    end
end

fbest_CAP = inf;

comp = c_matriz(s,Gaz,eta,L0,pots,frec);

VCAP = Vecindario_CAP(x,comp); %Calcula la vecindad de x
jmax = size(VCAP,3);
for j=1:jmax
    xact = VCAP(:,j);
    fact_CAP = eval_sol_CAP(comp,xact);
    if fact_CAP < fopt_CAP
        fopt_CAP = fact_CAP;
        xopt = xact;
        fbest_CAP = fact_CAP;
        xbest = xact;
        T_CAP = T_CAP-1;
    elseif fact_CAP < fbest_CAP && tabu_CAP(x,xact,TL_CAP,iter) %1 si es un movimiento valido
        fbest_CAP = fact_CAP;
        xbest = xact;
    %         T_CAP = T_CAP-1; %Disminuye el tamaño de la lista
    end
end

x = xbest;
s = sbest;

TL_AP = tabulist_AP(s,sbest,TL_AP,T_AP,iter); %Actualiza la Lista Tabu
TL_CAP = tabulist_CAP(x,xbest,TL_CAP,T_CAP,iter); %Actualiza la Lista Tabu
fopt = fopt_AP+fopt_CAP;
funo = fopt;
fbest = fbest_AP+fbest_CAP;
funa = fbest;

T = T_AP+T_CAP;
if T < 1
    T = 1;
    T_AP = 1;
    T_CAP = 1;
end

TabuL = T;
disp('intensificacion')
disp(fopt)
fopt_CAP,fopt_AP

```

## ANEXO G

%Agrega un AP

```
function [fopt,s,x] = agregaAP(demanda,Gaz,eta,L0,pots,frec,s,x);
```

```
[ymax,xmax] = size(demanda);
```

```
tipo1 = (demanda==1);
```

```
tipo2 = (demanda==2);
```

```
tipo3 = (demanda==3);
```

```
dda = tipo1+tipo2+tipo3;
```

```
dda2 = sum(sum(dda));
```

```
[f_AP,cubr] = eval_sol_AP(demanda,s,Gaz,eta,L0,pots);
```

```
dda3 = and(dda,cubr);
```

```
dda4 = sum(sum(dda3));
```

```
falta = dda2-dda4;
```

```
if falta~=0
```

```
    [imax,jmax] = size(dda3);
```

```
    coorx = 1+round((xmax-1)*rand());
```

```
    coory = 1+round((ymax-1)*rand());
```

```
    cond=1;
```

```
    for i=1:imax
```

```
        for j=1:jmax
```

```
            if dda(i,j)==1 && dda3(i,j)==0 && cond==1
```

```
                coorx=j;
```

```
                coory=ymax-i;
```

```
                cond=0;
```

```
            end
```

```
        end
```

```
    end
```

```
else
```

```
    [imax,jmax] = size(cubr);
```

```
    coorx = 1+round((xmax-1)*rand());
```

```
    coory = 1+round((ymax-1)*rand());
```

```
    cond=1;
```

```
    for i=1:imax
```

```
        for j=1:jmax
```

```
            if cubr(i,j)==0 && cond==1
```

```
                coorx=j;
```

```
                coory=ymax-i;
```

```
                cond=0;
```

```
            end
```

```
        end
```

```
    end
```

```
end
```

```
if coorx<1
```

```
    coorx=1;
```

```
end
```

```
if coory<1
```

```
    coory=1;
```

```
end
```

```
nuevo = size(s,1)+1;
```

```
s(nuevo,:)=[coorx, coory, 1+round(5*rand())];
```

```
comp = c_matriz(s,Gaz,eta,L0,pots,frec);
```

```
x = sol_CAP(comp,frec);
```

```
fopt_AP = eval_sol_AP(demanda,s,Gaz,eta,L0,pots);
```

```
fopt_CAP = eval_sol_CAP(comp,x);
```

```
fopt = fopt_AP + fopt_CAP;
```



## ANEXO H

%Funcion que verifica que el movimiento para llegar a la  
%vecindad sact sea un movimiento permitido, si es asi  
%devuelve 1

```
function rest_AP = tabu_AP(s,sact,TL_AP,iter)
%
%s = solucion anterior
%sact = solucion actual
%TL = Lista Tabu, matriz de tamaño variable long*3 con elementos n,param
%     donde n es la estacion base que se explora y param es el parametro
%     que va cambiando (x,y o pot)
temp = abs(s-sact);
dist = sum(sum(temp));

rest_AP = 0;
vartabu = 1;

[n,param] = size(temp);

if dist==1
    for i=1:n
        for j=1:param
            if temp(i,j)==1
                TLtemp = [i,j,iter];
                j=param+1;
                i=n+1;
                break
            end
        end
    end

    for i=1:n
        if TL_AP(i,')==TLtemp
            vartabu = 0;
        else
            vartabu = 1*vartabu;
        end
    end

    if vartabu
        rest_AP = 1;
    end
end
```

%Funcion que actualiza la Lista Tabu despues de un movimiento

```
function TL_AP = tabulist_AP(s,sbest,TLact,T_AP,iter)
%
%s = Solucion actual, n*(x,y,pot)
%sbest = mejor vecino encontrado y utilizado, n*(x,y,pot)
%n = numero de estaciones base
%param = numero de parametros
%TLact = Lista Tabu actual
%T_AP = Tamano maximo de la Lista Tabu
```

```
temp = abs(s-sbest);
```

```
[n,param] = size(temp);
dist = sum(sum(temp));
```

```
if dist==1
    for i=1:n
        for j=1:frec
            if temp(i,j)==1
                TLtemp = [i, j, iter];
                i=n+1;
                j=frec+1;
                break
            end
        end
    end
end
```

```
TL_AP = [TLtemp; TLact];
```

```
fmax = size(TL_AP,1);
var = ones(fmax);
```

```
for i=1:fmax
    if TL_AP(i,3)+T_AP >= iter
        var(i)=0;
    end
end
```

```
TL_AP = TL_AP(var,:);
```

```
else
    TL_AP = TLact;
end
```

## ANEXO I

%Funcion que verifica que el movimiento para llegar a la  
%vecindad xact sea un movimiento permitido, si es asi  
%devuelve 1

```
function rest_CAP = tabu_CAP(x,xact,TL_CAP,iter)
```

```
%
```

```
temp = abs(x-xact);  
sumfil = sum(xact,2);  
suma = sum(sum(xact));  
dist = sum(sum(temp));
```

```
rest_CAP = 0;  
vartabu = 1;
```

```
[n,frec] = size(temp);
```

```
if dist==2  
    for i=1:n  
        for j=1:frec  
            if temp(i,j)==1  
                il=i;  
                jl=j;  
                j=j+1;  
                for k=j:frec  
                    if temp(i,k)==1  
                        TLtemp = [il,jl,k,iter];  
                        j=frec+1;  
                        i=n+1;  
                        break  
                    end  
                end  
            end  
        end  
    end  
end  
  
for i=1:n  
    if TL_CAP(i,')==TLtemp  
        vartabu = 0;  
    else  
        vartabu = 1*vartabu;  
    end  
end  
  
if vartabu  
    if suma==n  
        rest_CAP = 1;  
    else  
        rest_CAP = 0;  
    end  
end  
end
```

%Funcion que actualiza la Lista Tabu despues de un movimiento  
function TL\_CAP = tabulist\_CAP(x,xbest,TLact,T\_CAP,iter)

```
temp = abs(x-xbest);
```

```
[n,frec] = size(temp);  
dist = sum(sum(temp));
```

```
if dist==2  
    for i=1:n  
        for j=1:frec  
            if temp(i,j)==1
```

```

        j1=j;
        j=j+1;
        for k=j:frec
            if temp(i,k)==1
                TLtemp = [i, j1, k, iter];
                i=n+1;
                j=frec+1;
            end
        end
    end
end
end
end

TL_CAP = [TLtemp; TLact];

fmax = size(TL_CAP,1);
var = ones(fmax);

for i=1:fmax
    if TL_CAP(i,4)+T_CAP >= iter
        var(i)=0;
    end
end

TL_CAP = TL_CAP(var,:);

else
    TL_CAP = TLact;
end

```

## ANEXO J

%Funcion que calcula la vecindad de la solucion para  
%ubicaciones y potencias

```
function VAPP = VecindarioAP_P(solucion,demanda,pots);

[n,p] = size(solucion); %n BS, p parametros
[ymax,xmax] = size(demanda);
potmax = size(pots,2);

LIMI_X = 1;
LIMM_X = xmax;
LIMI_Y = 1;
LIMM_Y = ymax;
LIMI_P = 1;
LIMM_P = potmax;

cont = 1;

for i=1:n
    for j=1:p
        soluciontemp = solucion;
        cambio = solucion(i,j);
        if (j==1 && cambio < LIMM_X) | (j==2 && cambio < LIMM_Y) | (j==3 && cambio < LIMM_P)
            soluciontemp(i,j) = cambio+1;
            VAPP(:,cont) = soluciontemp;
            cont = cont+1;
        end
        if cambio>1%
            %%(j==1 && cambio > LIMI_X) | (j==2 && cambio > LIMI_Y) | (j==3 && cambio > LIMI_P)
            soluciontemp(i,j) = cambio-1;
            VAPP(:,cont) = soluciontemp;
            cont = cont+1;
        end
    end
end
end
```

```

%Funcion que calcula la vecindad para la solucion del CAP
function VCAP = Vecindario_CAP(x,comp)

[n,frec] = size(x);

VCAP = zeros(n,frec,1);
cont = 1;

for i=1:n
    for j=1:frec
        xtemp = x;
        if xtemp(i,j)==1
            xtemp(i,j) = 0;
            for k=1:frec
                xtemp2 = xtemp;
                if xtemp2(i,k)==0 && k~=j
                    xtemp2(i,k) = 1;
                    VCAP(:, :, cont) = xtemp2;
                    cont = cont+1;
                end
            end
        end
    end
end

if VCAP==zeros(size(VCAP))
    clear VCAP;
    VCAP(:, :, 1) = x;
end

```