

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**DISEÑO DE UNA RED DE SENSORES DE ESPECTRO PARA
LA SELECCIÓN DE CANALES DE OPERACIÓN ÓPTIMOS EN
LA RED WIFI DEL CAMPUS PUCP**

Tesis para optar el Título de Ingeniero de las Telecomunicaciones, que
presenta el bachiller:

JENRY NILTON LUIS VASQUEZ

ASESOR: César A. Santiváñez, Ph.D.

Lima, Diciembre del 2015

RESUMEN

El presente trabajo de tesis consiste en diseñar una red de sensores de espectro en el campus de la PUCP, usada para monitorear los canales de operación del WiFi a 2.4 y 5 GHz, considerando la menor cantidad de módulos de sensado sujeto a restricciones de performance y cobertura.

El primer capítulo presenta una breve revisión sobre las redes inalámbricas para luego enfocarse en una red Enterprise WiFi. Sobre esta, se describen los conceptos teóricos para entender el problema. Posteriormente, se describen los módulos de sensado, tipos de sensado y rango de cobertura. Finalmente, se explican los objetivos, tanto generales como específicos.

En el segundo capítulo se explica la teoría NP-Completeness y se definen las clases de problemas existentes de acuerdo a su complejidad. Luego, se indica la clase a la que pertenece nuestro problema y la dificultad, en cuanto a tiempo de ejecución, que involucra intentar resolver este tipo de problemas. Por último, se mencionan las alternativas para encontrar una solución.

El tercer capítulo comienza formulando el problema a optimizar, definiendo además la función objetivo y sus restricciones. También, se definen las instancias del problema a resolver y se da a conocer lo que se espera de esto. Finalmente, se describen las herramientas de programación que ayudaran a resolver el problema.

En el cuarto capítulo se comparan y analizan los resultados obtenidos luego de la ejecución del código de la heurística y la solución óptima, para los dos tamaños de instancias considerados. Además, como solución final, se indica la cantidad y ubicación de los módulos de sensado WSSI necesarios para cubrir los ambientes considerados.

Por último, en base a los resultados obtenidos se presentan las conclusiones y recomendaciones.

DEDICATORIA

A mis padres por su apoyo incondicional.



AGRADECIMIENTOS

A mi asesor Cesar Santiváñez por sus consejos y críticas.

A mi familia por su sacrificio en brindarme siempre lo mejor.

A mis tíos por sus consejos y motivación.

A mis amigos por motivarme siempre.



ÍNDICE

RESUMEN	II
ÍNDICE	VII
LISTA DE ILUSTRACIONES	IX
LISTA DE TABLAS	XI
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: SENSADO DEL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO	3
1.1 REDES INALÁMBRICAS	3
1.1.1 <i>Redes Inalámbricas de Área Personal (WPAN)</i>	4
1.1.2 <i>Redes Inalámbricas de Área Local (WLAN)</i>	5
1.1.3 <i>Enterprise WiFi Network / Campus-Area Network</i>	6
1.1.4 <i>Redes Inalámbricas de Área Metropolitana (WMAN)</i>	7
1.1.5 <i>Redes Inalámbricas de Área Extensa (WWAN)</i>	8
1.2 RETOS EN LAS REDES INALÁMBRICAS	8
1.2.1 <i>Asignación de canales, interferencia y ruido</i>	8
1.2.2 <i>Mobility Management/Handoff</i>	9
1.2.3 <i>Seguridad</i>	10
1.3 CAPACIDAD DE UNA RED ENTERPRISE WIFI	10
1.3.1 <i>Estándar IEEE 802.11</i>	11
1.3.1.1 <i>Basic Service Set (BSS)</i>	11
1.3.1.2 <i>Extended Service Set (ESS)</i>	12
1.3.2 <i>Asignación de espectro y propiedades físicas del estándar 802.11</i>	13
1.3.3 <i>Fuentes de interferencia en 802.11</i>	16
1.3.3.1 <i>Interferencia por APs vecinos</i>	17
1.3.3.2 <i>Interferencia por dispositivos externos</i>	18
1.3.4 <i>Channel Assignment en Redes Enterprise WiFi</i>	19
1.3.4.1 <i>WLC y la asignación de canales</i>	19
1.3.4.2 <i>Two-Tier Enterprise WiFi Architecture</i>	20
1.3.4.3 <i>Importancia del sensado</i>	20
1.4 REDES DE SENSADO DE ESPECTRO	21
1.4.1 <i>Tipos de sensado</i>	21
1.4.1.1 <i>Sensado por el propio AP</i>	22
1.4.1.2 <i>Sensado por hardware dedicado (módulo WSSI)</i>	22
1.4.2 <i>Rango de cobertura de un AP versus rango de sensado (energía)</i>	23
1.4.3 <i>Tipos de sensores</i>	25
1.4.4 <i>Función de utilidad y restricciones</i>	26
1.5 OBJETIVOS	27
1.5.1 <i>Objetivo general</i>	27
1.5.2 <i>Objetivos específicos</i>	27
CAPÍTULO 2: OPTIMIZACIÓN COMBINATORIA	28
2.1 TEORÍA NP-COMPLETENESS	28
2.1.1 <i>Problemas</i>	29
2.1.1.1 <i>Sub Problemas</i>	30
2.1.1.2 <i>Problemas de optimización</i>	30
2.1.1.3 <i>Problemas de decisión</i>	31
2.1.2 <i>Algoritmos</i>	32
2.1.2.1 <i>Problemas P</i>	33
2.1.2.2 <i>Problemas de clase NP</i>	34

2.1.2.3 Relación entre los Problemas P y NP	35
2.1.2.4 Problemas NP-Complete	36
2.2 MINIMUM SET COVER	36
2.2.1 <i>Maximal Problem Formulation</i>	37
2.2.1.1 Objective Function	37
2.2.1.2 Computational Complexity	38
2.2.1.3 MILP Formulation	41
2.2.2 <i>Heurística</i>	41
CAPÍTULO 3: DISEÑO DE LA RED DE SENSORES	43
3.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA A OPTIMIZAR	43
3.1.1 <i>Función objetivo y restricciones</i>	44
3.2 METODOLOGÍA DE DISEÑO	45
3.2.1 <i>Recolección y procesamiento de la información</i>	45
3.2.2 <i>Software considerado</i>	47
3.3 DESCRIPCIÓN DE LA INSTANCIA DEL PROBLEMA	47
3.3.1 <i>Áreas de trabajo</i>	48
3.3.1.1 Puntos a cubrir y lugares candidatos	49
3.3.1.2 Matriz de cobertura	50
3.4 SOLUCIÓN ÓPTIMA	53
3.5 HEURÍSTICA	54
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS	57
4.1 RESULTADOS PARA PISOS POR SEPARADO (INSTANCIAS PEQUEÑAS)	57
4.1.1 <i>Cálculo de la solución óptima para instancias pequeñas</i>	58
4.1.2 <i>Cálculo de la solución aproximada (heurística) para instancias pequeñas</i>	59
4.1.3 <i>Comparación de la solución óptima y aproximada para instancias pequeñas</i>	59
4.2 RESULTADOS PARA PABELLONES COMPLETOS	62
4.2.1 <i>Cálculo de la solución óptima para Pabellones completos</i>	62
4.2.2 <i>Cálculo de la solución aproximada (heurística) para instancias grandes</i>	64
4.2.3 <i>Comparación de la solución óptima y aproximada para instancias grandes</i>	66
4.3 LUGARES CANDIDATOS SELECCIONADOS	67
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	70
BIBLIOGRAFÍA	72

LISTA DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1-1: CLASIFICACIÓN DE LAS REDES INALÁMBRICAS (WPAN, WLAN, WMAN Y WWAN)	4
ILUSTRACIÓN 1-2: WIRELESS PERSONAL AREA NETWORK – WPAN	4
ILUSTRACIÓN 1-3: WIRELESS LOCAL AREA NETWORK - WLAN	5
ILUSTRACIÓN 1-4: ENTERPRISE WIFI NETWORK	6
ILUSTRACIÓN 1-5: WIRELESS METROPOLITAN AREA NETWORK – WMAN (SOLUCIÓN WIMAX)	7
ILUSTRACIÓN 1-6: WIRELESS WIDE AREA NETWORK – WWAN (TECNOLOGÍA GSM)	8
ILUSTRACIÓN 1-7: INDEPENDENT BSS & INFRASTRUCTURE BSS	12
ILUSTRACIÓN 1-8: EXTENDED SERVICE SET (ESS)	13
ILUSTRACIÓN 1-9: INTERFERENCIA PERCIBIDA POR HOSTS ASOCIADOS A DIFERENTE AP	17
ILUSTRACIÓN 1-10: IMPACTO DE UN ESPECTRO RUIDOSO	18
ILUSTRACIÓN 1-11: INTERFAZ DEL WIRELESS LAN CONTROLLER	19
ILUSTRACIÓN 1-12: ACCESS POINT SUPEDITADO A UN CONTROLADOR (WLC)	20
ILUSTRACIÓN 1-13: IZQUIERDA (CISCO AP SERIE 3600), DERECHA (MÓDULO WSSI)	21
ILUSTRACIÓN 1-14: OPCIONES DE DESPLIEGUE DE UN SISTEMA DE SENSADO	25
ILUSTRACIÓN 2-1: MINIMUM SET COVER PROBLEM	37
ILUSTRACIÓN 3-1: ARCHIVO .SVD OBTENIDO EN LAS MEDICIONES (AIRMAGNET)	46
ILUSTRACIÓN 3-2: ARCHIVO GENERADO POR SCRIPTS DE PERL FORMATO .CSV	46
ILUSTRACIÓN 3-3: PUNTOS MEDIDOS CUARTO PISO PABELLÓN Z	48
ILUSTRACIÓN 3-4: MATRIZ DE PATHLOSS PABELLÓN H 2.4 GHZ	51
ILUSTRACIÓN 3-5: PARTE DE LA MATRIZ DE COBERTURA PABELLÓN H, MATLAB	52
ILUSTRACIÓN 3-6: EJEMPLO DE PROBLEMA CPLEX	53
ILUSTRACIÓN 3-7: ESTRUCTURA GENERAL DE LA HEURÍSTICA	54
ILUSTRACIÓN 3-8: PSEUDOCÓDIGO BUILDUPSOLUTION (HEURÍSTICA)	55
ILUSTRACIÓN 3-9: PSEUDOCÓDIGO GREEDYSTEP (HEURÍSTICA)	55
ILUSTRACIÓN 3-10: PSEUDOCÓDIGO LOCALSEARCH (HEURÍSTICA)	56

ILUSTRACIÓN 4-1: PRIMERA PLANTA – PABELLÓN H.....69

ILUSTRACIÓN 4-2: UBICACIÓN DE MÓDULOS WSSI – PABELLÓN H.....69



LISTA DE TABLAS

TABLA 1-1: ESPECIFICACIONES DE LOS ESTÁNDARES 802.11	16
TABLA 2-1: COMPARACIÓN DE DIFERENTES FUNCIONES DE COMPLEJIDAD POLINÓMICA Y EXPONENCIAL.....	39
TABLA 2-2: EFECTO DE MEJORA DE PROCESAMIENTO EN DIFERENTES ALGORITMOS DE TIEMPO POLINÓMICA Y EXPONENCIAL.....	40
TABLA 3-1: CANTIDAD DE PUNTOS Y LUGARES CANDIDATOS EN EEGCC .	49
TABLA 3-2: CANTIDAD TOTAL DE PUNTOS POR PABELLÓN.....	50
TABLA 4-1: RESULTADOS DE LA SOLUCIÓN ÓPTIMA PARA INSTANCIAS PEQUEÑAS EEGCC	58
TABLA 4-2: RESULTADOS DE LA HEURÍSTICA PARA INSTANCIAS PEQUEÑAS EEGCC.....	59
TABLA 4-3: RESULTADOS Y TIEMPOS DE COMPUTACIÓN DE LA HEURÍSTICA Y SOLUCIÓN ÓPTIMA PARA MATRICES DE COBERTURA DE CADA PISO DE EEGCC.....	61
TABLA 4-4: LUGARES CANDIDATOS SELECCIONADOS PARA LA HEURÍSTICA Y LA SOLUCIÓN ÓPTIMA EN EL SÓTANO.....	62
TABLA 4-5: RESULTADOS Y TIEMPOS DE EJECUCIÓN DE LA SOLUCIÓN ÓPTIMA PARA LAS MATRICES DE COBERTURA DE CADA PABELLÓN	63
TABLA 4-6: RESULTADOS Y TIEMPOS DE COMPUTACIÓN DE LA SOLUCIÓN APROXIMADA (HEURÍSTICA) PARA MATRICES DE COBERTURA DE CADA PABELLÓN.....	65
TABLA 4-7: RESULTADOS Y TIEMPOS DE COMPUTACIÓN DE LA HEURÍSTICA Y SOLUCIÓN ÓPTIMA PARA MATRICES DE COBERTURA DE CADA PABELLÓN	66
TABLA 4-8: CANTIDAD DE MÓDULOS WSSI A UTILIZAR POR PABELLÓN	68

INTRODUCCIÓN

El incremento en la demanda del servicio de acceso a internet mediante WiFi de la PUCP, surge debido a la masificación de equipos móviles dentro del campus, tanto laptops como smartphones; a esto se suma las diferentes aplicaciones que año tras año requieren mayores velocidades de transmisión para un mejor desempeño. Actualmente, este servicio está siendo repotenciado para cubrir dicha demanda y brindar un servicio de calidad; es así que se vienen dando nuevas inversiones por parte de la Universidad, como son la adquisición de nuevos equipos de comunicación, redes y servicios informáticos.

En este contexto de una red WiFi Empresarial como es la red WiFiPUCP, un factor perjudicial para la capacidad de red es la interferencia, ya sea provocada por los propios Puntos de Acceso (APs) operando en el mismo canal (*co-channel interference*), o por dispositivos externos (teléfonos fijos inalámbricos, hornos microondas, dispositivos *bluetooth*, etc.) que operan en el mismo rango de frecuencia que los APs. Entonces, uno de los factores más importantes para la performance de esta red es la selección de los canales de operación. El punto de partida para un algoritmo de selección de canales de operación es determinar la calidad o estado del espectro electromagnético en los canales de interés. Esto se realiza escaneando (sensando) el espectro en ambas bandas de frecuencias (2.4 y 5 GHz).

El sensado puede ser realizado de dos maneras: (i) efectuado por los propios AP, desligándose temporalmente de su canal de operación para sensar, o (ii) usando *hardware* dedicado para el sensado. La primera opción resulta el menor costo de capital, pero traería una disminución en la tasa efectiva de transmisión (*throughput*) y ocasionaría retardos inaceptables para aplicaciones en tiempo real ya que un AP no puede transmitir y sensar al mismo tiempo.

El costo del *hardware* dedicado tiene un costo considerable al del AP, sin embargo, dado que el rango de sensado de estos módulos es mayor al rango de comunicaciones, la densidad de los módulos necesarios para escanear el espectro es menor a la de los APs. Entonces, teniendo información de la calidad del espectro electromagnético (mapa de atenuaciones) e información técnica de los equipos involucrados se podría calcular su distribución, de tal forma que se minimice la cantidad de módulos necesarios encargados del sensado.

Este tipo de problema, que involucra posibles grafos y coberturas dependientes, es un problema que se puede formular como un modelo de programación mixta lineal entera y que puede ser resuelto utilizando herramientas de optimización. Por otro lado, dependiendo la cantidad de información de entrada que contenga una determinada instancia de problema, estas herramientas pueden tardar un tiempo considerable en procesar y encontrar una solución. Para estos casos existen algunas alternativas, como por ejemplo una heurística, que pueda encontrar una solución cercana a la óptima en un tiempo razonable.

El objetivo del trabajo expuesto en la presente tesis es diseñar una red de sensado de espectro considerando la menor cantidad de módulos de sensado, encontrando la cantidad y ubicación de cada módulo. Esto se logrará utilizando herramientas de programación, comparando resultados y tiempos de ejecución.



CAPÍTULO 1

Sensado del espectro electromagnético

En este capítulo se presenta una breve revisión sobre las características y clasificación de las redes inalámbricas para luego enfocarse en una red Enterprise WiFi, sobre la cual se desarrollará el presente trabajo. Sobre esta última, describiremos los conceptos teóricos necesarios para un mejor entendimiento del problema de cobertura por módulos de sensado. Además, se verán algunas consideraciones sobre las redes de sensores de espectro como tipos de sensado, modos de sensado y rango de cobertura. Finalmente explicaremos los objetivos de la tesis, tanto general, como específicos.

1.1 Redes Inalámbricas

Las redes inalámbricas están compuestas por nodos que se comunican por medio de señales de ondas electromagnéticas. Cada una dedicada a un escenario diferente, y según su alcance se clasifican de la siguiente manera.

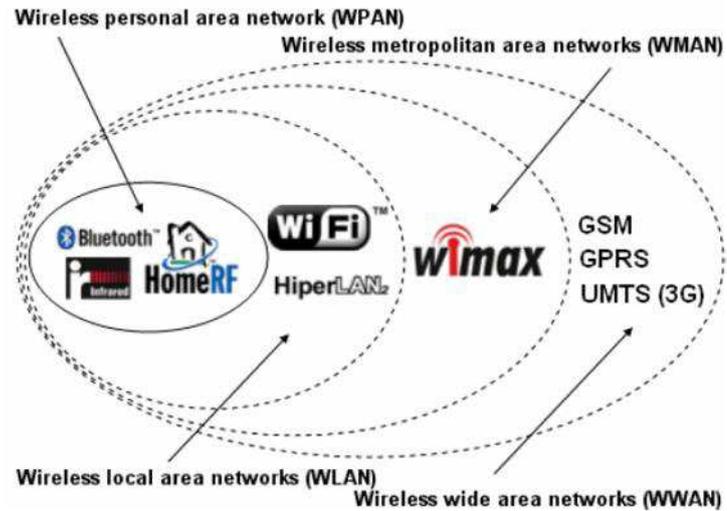


ILUSTRACIÓN 1-1: CLASIFICACIÓN DE LAS REDES INALÁMBRICAS (WPAN, WLAN, WMAN Y WWAN)

FUENTE: [1]

1.1.1 Redes Inalámbricas de Área Personal (WPAN)

Redes bajo el estándar 802.15 cuyos dispositivos involucrados pueden ser los computadores portátiles, celulares, sensores u otros dispositivos que necesitan comunicarse con un alcance de algunos metros (<10m). La tecnología más conocida en este tipo de redes es la del *bluetooth*, la cual trabaja a 2.4GHz, no solo se transfieren archivos sino también audio con una calidad aceptable.



ILUSTRACIÓN 1-2: WIRELESS PERSONAL AREA NETWORK – WPAN

FUENTE: [2]

1.1.2 Redes Inalámbricas de Área Local (WLAN)

Este tipo de redes se rige bajo el estándar 802.11, de la cual se derivan otros estándares más dependiendo de la velocidad, alcance y frecuencia. Este tipo de redes cuenta con alcances menores a 100m, a frecuencias de 2.4 y 5 GHz, convirtiéndose así en un sistema de comunicación muy común en lugares públicos tales como hogares, oficinas, cafés; logrando de esta manera la comunicación entre ordenadores, teléfonos móviles, tabletas a internet de forma inalámbrica [3]. Es la solución adecuada para ambientes cambiantes gracias a su flexibilidad y para lugares de difícil acceso o donde la solución cableada sea muy difícil de implementar. De esta manera, ofrece a las empresas la posibilidad de ampliar su mercado y posición competitiva ofreciendo servicios de datos [4].

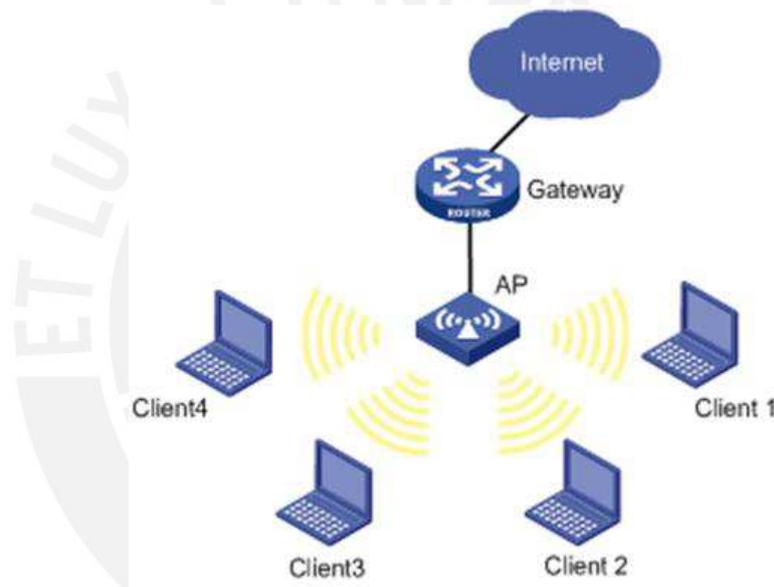


ILUSTRACIÓN 1-3: WIRELESS LOCAL AREA NETWORK - WLAN

FUENTE: [5]

1.1.3 Enterprise WiFi Network / Campus-Area Network

Esta denominación la hacemos al conjunto de WLANs que brinda servicio en lugares más amplios y con mayor cantidad de usuarios, como son hoteles, hospitales, edificios y campus universitarios. Este es el caso de la red WiFi del campus de la PUCP, la cual cuenta con cientos de puntos de acceso (Access Points) centralizados y conectados a una red de distribución cableada, y gestionados por un controlador (Wireless LAN Controller) quien le asigna parámetros importantes como potencia y canal de operación.

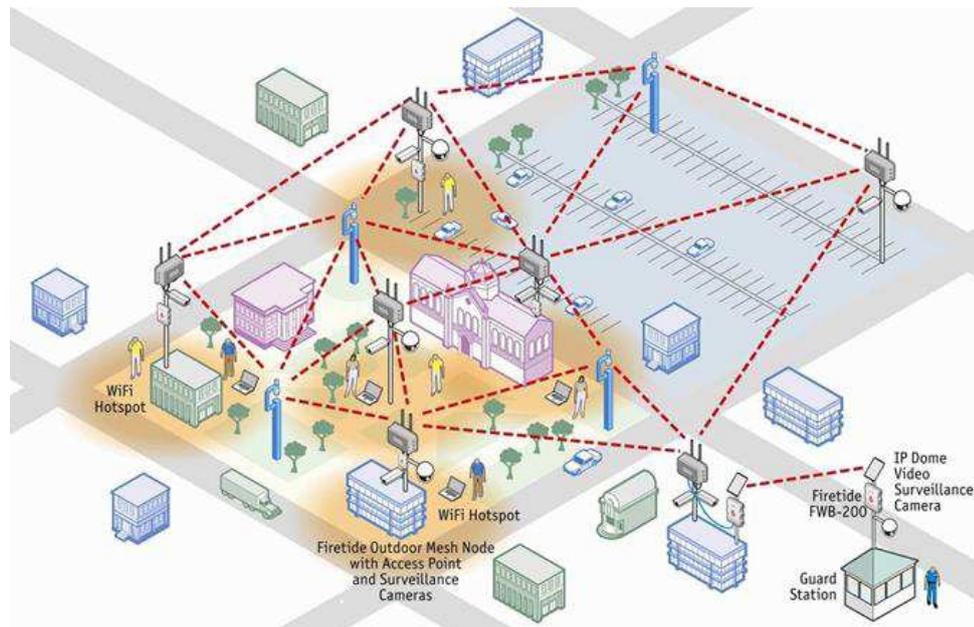


ILUSTRACIÓN 1-4: ENTERPRISE WIFI NETWORK

FUENTE: [6]

1.1.4 Redes Inalámbricas de Área Metropolitana (WMAN)

Redes bajo el estándar 802.16, utilizadas para interconectar ciudades y comercialmente conocida como WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) que certifica la interoperabilidad. Este sistema trabaja en el rango de 2 – 11 GHz y tiene un alcance de hasta de 50Km a una velocidad de transmisión de datos (*bitrate*) teórica de 70 Mbps. Este *bitrate* es adecuado para brindar servicios de banda ancha a zonas rurales, donde llegar por otros medios es difícil por el costo que demanda [7].

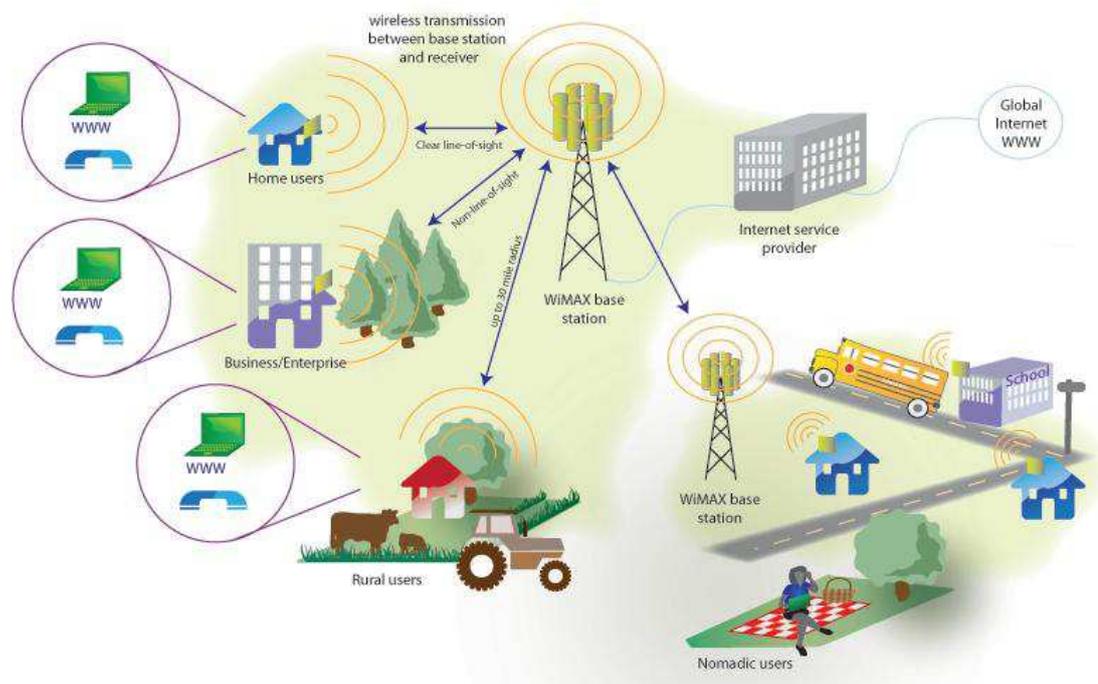
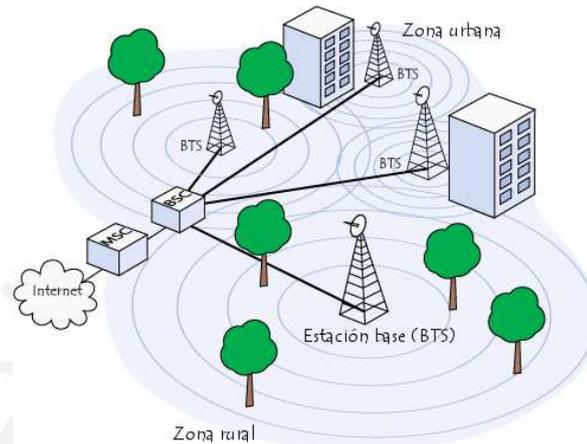


ILUSTRACIÓN 1-5: WIRELESS METROPOLITAN AREA NETWORK – WMAN (SOLUCIÓN WIMAX)

FUENTE: [8]

1.1.5 Redes Inalámbricas de Área Extensa (WWAN)

Definida bajo el estándar 802.20, este tipo de redes se basa en las redes de comunicaciones móviles y abarca muchas tecnologías (GSM, GPRS, EDGE, UMTS, HSPA, LTE), las cuales han surgido una tras otra mejorando la forma de transmisión contribuyendo así en mayores velocidades y mejores servicios para los dispositivos finales.



**ILUSTRACIÓN 1-6: WIRELESS WIDE AREA NETWORK – WWAN
(TECNOLOGÍA GSM)**

FUENTE: [9]

1.2 Retos en las Redes Inalámbricas

La creciente demanda de conectividad para dispositivos móviles (laptops, smartphones, tabletas, etc.) en una red inalámbrica plantea algunos desafíos que se deben considerar a fin de brindar un servicio de calidad.

1.2.1 Asignación de canales, interferencia y ruido

Como se vio en los puntos anteriores, en las redes inalámbricas se definen estándares para trabajar a frecuencias y con anchos de banda determinados, todo esto regido en base a la región geográfica a donde pertenezca y las leyes establecidas en dicha zona.

En cada banda de frecuencia, existen un número de canales los cuales dividen el espectro, y a la vez se comparte de tal forma que más dispositivos puedan usar dicho recurso. El uso de los mismos canales o canales superpuestos en una misma

área (interferencia co-canal) degrada la red. Por ejemplo, la interferencia co-canal en el estándar 802.11b ocasiona que los APs envíen tramas una y otra vez de nuevo para incrementar la probabilidad de realizar una transmisión exitosa. Si un dispositivo envía una copia de una trama, la data es transmitida a 11 Mbps (54 Mbps para 802.11g). Sin embargo, si la eficiencia cae a un 50% por un instante, por la interferencia, el dispositivo aún sigue transmitiendo a 11 Mbps, pero duplicando cada trama, haciendo el *throughput* efectivo 5.5 Mbps. Si, por otro lado, la interferencia es permanente, elevando el nivel de ruido y reduciendo el SNIR, esta puede obligar al dispositivo a transmitir a una velocidad menor de transmisión. Por ejemplo, una disminución del SNIR de 7 dB puede resultar en una reducción del *bit rate* de 11 Mbps a solo 2 Mbps. El impacto es aún mayor para nuevas tecnologías como 802.11n y 802.11ac que requieren altos niveles de SNIR para transmitir a altas velocidades (300 Mbps o más). Por lo tanto las redes 802.11 tendrán una significativa disminución de su performance debido a la interferencia co-canal [10], es por ello la importancia de una asignación de canales (*Channel assignment*) que minimice la interferencia en las áreas de mayor tráfico.

1.2.2 Mobility Management/Handoff

Al tener una red inalámbrica se piensa inmediatamente en movilidad, esta característica hace que un determinado servicio de comunicación sobresalga sobre los demás. Ya que la cobertura de un punto de acceso inalámbrico tiene un alcance determinado, muchas veces se necesita un conjunto de estos puntos de tal forma que se tenga una cobertura mayor. Para estos casos existe un dispositivo en una capa superior que realice la tarea de gestionar ese cambio de asociación a determinado punto.

Por ejemplo en el caso de una red celular, durante una conversación, la estación móvil se mueva de una celda a otra. Cuando esto suceda, la señal puede hacerse débil. Para resolver este problema, el MSC (Central de conmutación móvil) monitorea el nivel de la señal cada cierta cantidad de segundos. Si la intensidad de la señal disminuye, el MSC busca una nueva celda que puede acomodar mejor la comunicación. El MSC luego cambia el canal que lleva la llamada (da por terminado la señal del canal antiguo por uno nuevo) [11]. Entonces, el reto de una red móvil es efectuar este cambio de canal en el menor tiempo posible, a fin de evitar interrumpir

aplicaciones tiempo real como VoIP y videoconferencia que tienen poca tolerancia a la latencia y al *jitter*.

1.2.3 Seguridad

Al compartir el medio de comunicación (el aire) existe la posibilidad de que nuestra información sea captada por algún otro dispositivo con intenciones maliciosas. Para esto, existen tipos de cifrado que se encargan de proteger los datos. Siendo el cifrado WEP obsoleto, WPA todavía compatible y por último el cifrado WPA2 que es una versión mejorada de WPA. No solo se encargan de proteger nuestros datos, sino también impedir el acceso a la WLAN utilizando algoritmos de autenticación. Por ejemplo WPA trae consigo la modificación dinámica de claves, dificultando la obtención de la contraseña para el acceso a la WLAN.

Más allá de los riesgos de ser escuchado por otros en el vecindario de la WLAN, existen los ataques malintencionados. Uno de los ataques más comunes a tener en cuenta en un conjunto de WLANs (Enterprise WiFi Network), son los puntos de acceso no autorizados o Rogue AP, que se hacen pasar por AP pertenecientes a la red haciendo uso del mismo SSID. Usuarios pueden conectarse a este AP intruso y revelar sus certificados o claves de acceso, perjudicándolos en más de un sentido [12].

1.3 Capacidad de una Red Enterprise WiFi

Se puede asumir un tráfico uniforme para todos los usuarios, y una misma velocidad de transmisión R para todos los APs y estaciones móviles, entonces la capacidad provista por un AP a sus usuarios puede ser expresada como $N_c \cdot R/N_i$, donde N_c es el número de usuarios asociados al AP, y N_i es el número de usuarios dentro de su zona de interferencia (no necesariamente asociados al AP) sintonizados al mismo canal. Notar que si otro AP se encuentra dentro de esta zona de interferencia (sintonizado al mismo canal), todos los usuarios asociados a este segundo AP son considerados en N_i .

Es decir, si existieran equipos móviles asociados a otro AP (que se encuentre operando en el mismo canal), pero se encuentran en la zona de interferencia del AP inicial, estaría interfiriendo a este, ya que, al estar transmitiendo/recibiendo a la misma frecuencia comparten el mismo recurso (el aire).

Regidos bajo el protocolo CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*), los dispositivos antes de transmitir escanean el medio y si está libre transmiten, sino esperan un tiempo aleatorio para volver a intentarlo y así sucesivamente, no pueden transmitir al mismo tiempo puesto que ocurriría una colisión y el paquete tendría que ser reenviado.

Considerando las nuevas tecnologías (802.11n y 802.11ac) con mayores velocidades de transmisión, el área de interferencia es varias veces mayor al área de cobertura y en el caso de una mala planificación de la asignación de canales (o poca disponibilidad de canales como en el caso de la banda de 2.4 GHz) el valor de N_i puede ser bastante grande. En esos casos, el *throughput* obtenido por un usuario (R/N_i) puede resultar insuficiente.

1.3.1 Estándar IEEE 802.11

Cuando se habla del estándar IEEE 802.11 se suele referir a la marca Wi-Fi, propio de un grupo comercial llamado la Wi-Fi Alliance, que certifica la conformidad con 802.11. Su principal trabajo consiste en mediar el acceso para una comunicación compartida a través del aire [13]. En cuanto a su arquitectura se definen dos tipos de servicios, el *basic service set (BSS)* y el *extended service set (ESS)*.

1.3.1.1 Basic Service Set (BSS)

BSS son los bloques que constituyen una WLAN. Un *basic service set* consta de una estación inalámbrica estacionaria o móvil y una estación base central opcional, *Access Point (AP)* [11]. La Ilustración 1-7 muestra los dos modos del estándar.

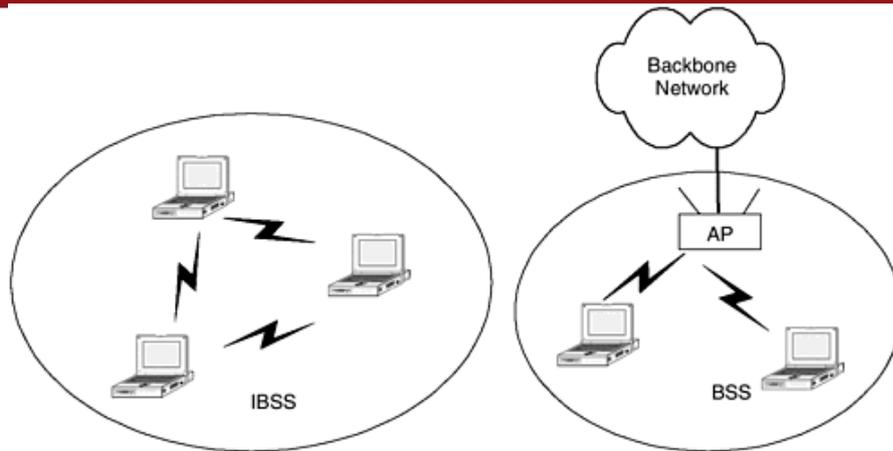


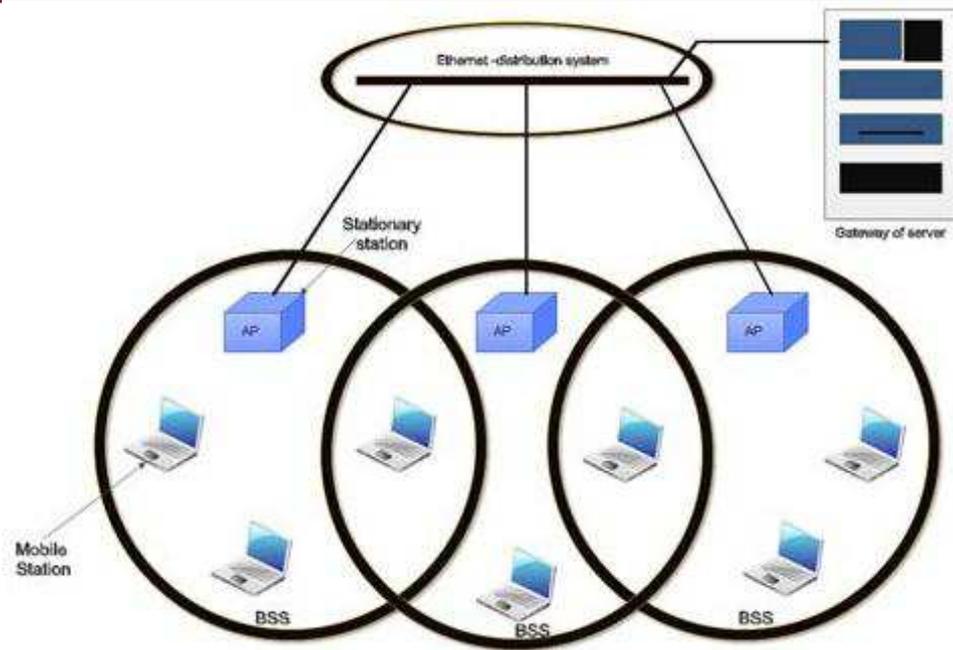
ILUSTRACIÓN 1-7: INDEPENDENT BSS & INFRASTRUCTURE BSS

FUENTE: [14]

Estaciones móviles en modo *independent* o *ad hoc* al no contar con un AP no puede comunicarse con otro BSS. A pesar de esto, se pueden descubrir unos con otros y mantener comunicación entre ellos mismos [11]. Por otro lado, el modo *infrastructure* al tener un dispositivo que centraliza la comunicación tiene ventajas en escalabilidad y alcance. El modo *infrastructure* es el más común actualmente.

1.3.1.2 Extended Service Set (ESS)

Un ESS es conformado por dos o más BSSs (más de un AP). Los APs son conectados a un sistema de distribución (*distribution system*), inalámbrica o cableada. La *extended service set* es conformada por dos tipos de estaciones: móviles y estacionarios. Las estaciones móviles refieren a las estaciones usuario dentro de un BSS. Las estaciones estacionarias son los APs que son parte la red cableada [11]. La Ilustración 1-8 nos presenta un ESS.


ILUSTRACIÓN 1-8: EXTENDED SERVICE SET (ESS)

FUENTE: [15]

La comunicación entre una estación dentro de cierto BSS con otra estación perteneciente a otro BSS ocurre mediante el AP. Haciendo la comparación con una red celular, la idea es casi la misma, cada dispositivo celular hace uso de una *base station* para comunicarse con otro celular perteneciente a otra celda [11].

1.3.2 Asignación de espectro y propiedades físicas del estándar 802.11

Asignación de espectro

El estándar 802.11 cuenta con 2 bandas de frecuencia para trabajar, 2.4 y 5 GHz. Dentro de cada una de las bandas dicho estándar define canales de frecuencias en donde pueden trabajar los dispositivos inalámbricos (canal de operación). A 2.4 GHz existen canales con ancho de banda de 20MHz, y a 5 GHz existen canales de 20 y 40 MHz. A continuación se muestran la cantidad de canales en cada banda de frecuencia y la cantidad que no se superponen entre sí de acuerdo al estándar, esta información se da de acuerdo al país, en este caso se muestran los datos para Perú.

Banda de frecuencia y número de canales de operación de 20 MHz [16]:

A (A regulatory domain):

- 2.412 a 2.462 GHz; 11 canales superpuestos con separación de 5 MHz
- 5.180 a 5.320 GHz; 8 canales ortogonales
- 5.500 a 5.700 GHz (excluyendo 5.600 a 5.640 GHz), 8 canales ortogonales
- 5.745 a 5.825 GHz; 5 canales ortogonales

Máximo número de canales no superpuestos (Perú) [16]:

2.4 GHz

- 802.11b/g (20 MHz): 3
- 802.11n (20 MHz): 3

5 GHz

- 802.11a (20 MHz): 21
- 802.11n (20 MHz): 21
- 802.11n (40 MHz): 9

Propiedades Físicas

El estándar 802.11 define varias capas físicas que operan en bandas de frecuencia diferentes y provee variados rangos de *data rates*.

El estándar original 802.11 definió dos estándares de capas físicas basadas en radio a 2.4 GHz, uno usa el método *frequency-hopping spread spectrum* (FHSS) y el otro usa el método *direct sequence spread spectrum* (DSSS). Ambos proporcionaron *data rates* de hasta 2 Mbps. También, surgió el estándar 802.11 *Infrared* (luz infrarroja en el rango de 800 a 950nm) donde las secuencias de bits eran convertidas a señal óptica. Posteriormente, se dio el estándar 802.11b que provee hasta 11 Mbps en la misma banda de los 2.4 GHz. Luego, se desarrolló 802.11a, que entrega hasta 54 Mbps usando una variante de FDM llamada *orthogonal frequency división multiplexing* (OFDM), y trabaja en la banda no licenciada de 5 GHz. A pesar que esta banda es menos usada (menos

interferencia), al trabajar a una frecuencia mayor la atenuación aumenta, disminuyendo así su alcance. 802.11g, que también usa OFDM pero a 2.4 GHz, envía hasta 54 Mbps, y es compatible con la versión anterior 802.11b [11] [13].

802.11n es uno de los últimos estándares, con mucho mercado actualmente, el cual logra *data rates* de hasta 600 Mbps usando múltiples antenas y utilizando anchos de banda mayor [13]. Finalmente 802.11ac, que viene a ser una mejora de 802.11n con anchos de banda de 80 y 160 MHz, y modulación hasta de 256QAM, consiguiendo una velocidad teórica de hasta 4.9 Gbps.



TABLA 1-1: ESPECIFICACIONES DE LOS ESTÁNDARES 802.11

IEEE	Tecniqúe	Band	Rate (Mbps)
802.11	FSSH	2.4 GHz	1 and 2
	DSSS	2.4 GHz	1 and 2
	None	Infrared	1 and 2
802.11a	OFDM	5 GHz	6 to 54
802.11b	DSSS	2.4 GHz	5.5 and 11
802.11g	OFDM	2.4 GHz	6 and 54
802.11n	OFDM	2.4 y 5 GHz	600
802.11ac	OFDM	5 GHz	4900

FUENTE: [11] y [17]

Es muy común para los productos comerciales soportar más de un estándar de 802.11. Esto no solo asegura la compatibilidad con cualquier dispositivo que soporta alguna de estos estándares sino que también hace posible que para dos productos cualquiera escoger la opción de mayor ancho de banda para un ambiente particular.

A pesar que los estándares 802.11 definan máximos *bit rates* soportados, la mayoría soporta *bit rates* más bajos. Esto debido a que, a menor *bit rate*, más fácil la decodificación la señal transmitida en presencia de ruido. La cantidad de información redundante enviada significa una mayor resistencia a errores de bits a costa de reducción del *data rate* efectivo. El sistema escoge un *bit rate* óptimo en base al ambiente ruidoso. Inclusive en algunos enfoques, un transmisor ocasionalmente examinará un *bit rate* superior enviando uno o más paquetes a esa tasa para probar éxito [13].

1.3.3 Fuentes de interferencia en 802.11

La red WiFi desplegada en la PUCP trabaja tanto a 2.4 como a 5 GHz. Además, en ambas bandas de frecuencia existe la posibilidad de interferencia por parte de otro equipo inalámbrico radiando a la misma frecuencia que la del canal de operación del AP. Además, al tener un número de canales de operación limitados para WiFi, puede ocurrir que un AP interfiera con otro AP (Interferencia Co-canal). A

continuación se detallan los dos tipos de interferencia, interferencia interna (APs vecinos) e interferencia externa (otros dispositivos no pertenecientes a la red).

1.3.3.1 Interferencia por APs vecinos

Como se mostró anteriormente, los APs que operan en la banda de 2.4 GHz cuentan con 11 canales de operación, de los cuales los canales más usados son 1, 6 y 11 debido a que estos canales no se superponen entre sí, minimizando interferencia entre ellos. Por otro lado, la banda de 5 GHz cuenta con 21 canales de 20MHz y 9 canales de 40MHz, los cuales no se solapan entre sí [16].

Debido a que la red WiFi de la PUCP es densa, compuesta por cientos de AP, y que no solo se tiene una distribución horizontal, sino también de forma vertical (Edificaciones de varios pisos con ambientes descubiertos como los pasillos), se realiza un gran trabajo para el reuso de canales de operación. A pesar de esto existen señales de APs que interfieren con la señal de otro AP que se encuentra transmitiendo en el mismo canal, esto se da tanto a 2.4 como a 5 GHz. Siempre que exista interferencia, existirá una disminución en el *throughput* para los equipos interferidos.

Como se vio anteriormente, la interferencia co-canal degrada la comunicación transmitiendo información repetida. En un entorno ruidoso, el dispositivo tiene que asegurar la probabilidad de que su paquete llegue a su destino, por tal motivo envía varias copias del mismo, disminuyendo su tasa de transmisión efectiva.

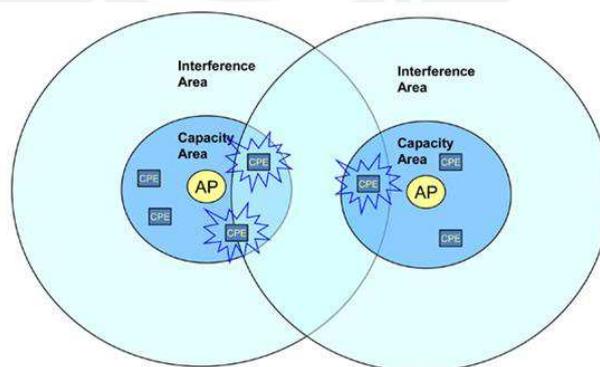


ILUSTRACIÓN 1-9: INTERFERENCIA PERCIBIDA POR HOSTS ASOCIADOS A DIFERENTE AP

FUENTE: [18]

Como se muestra en la imagen, el rango de interferencia es mayor al rango de cobertura. Si ambos APs se encuentran operando en el mismo canal, el rango de interferencia del segundo AP interferirán a los hosts asociados al primero AP, disminuyendo así la capacidad de la red.

1.3.3.2 Interferencia por dispositivos externos

Al ser las bandas de 2.4 y 5 GHz bandas no licenciadas, existen diferentes dispositivos inalámbricos que trabajan a la misma frecuencia que los canales de operación del WiFi. Esto conlleva a que pueda ocurrir que algunos de estos dispositivos se encuentren dentro de nuestra WLAN y puedan ocasionar interferencia, disminuyendo así el *throughput* de la red.

En la Ilustración 1-10 se puede observar el porcentaje promedio de reducción del *throughput* debido a otros dispositivos inalámbricos operando a la misma frecuencia del canal asignado al AP. Estos valores se muestran para dos distancias fijas del AP (25 ft = 7.62 m y 75 ft = 22.86 m).

Interference Type	Throughput Reduction	
	Near (25 ft)	Far (75 ft)
2.4 or 5 GHz Cordless Phones	100%	100%
Video Camera	100%	57%
Wi-Fi (busy neighbor)	90%	75%
Microwave Oven	63%	53%
Bluetooth Headset	20%	17%
DECT Phone	18%	10%

Source: FarPoint Group

ILUSTRACIÓN 1-10: IMPACTO DE UN ESPECTRO RUIDOSO

FUENTE: [19]

En consecuencia, este es el tipo de interferencia que no se puede controlar, por tal motivo sería factible escanear y conocer el estado del espectro para localizar dichos dispositivos inalámbricos que degradan la red, y si en caso no se pueda anular

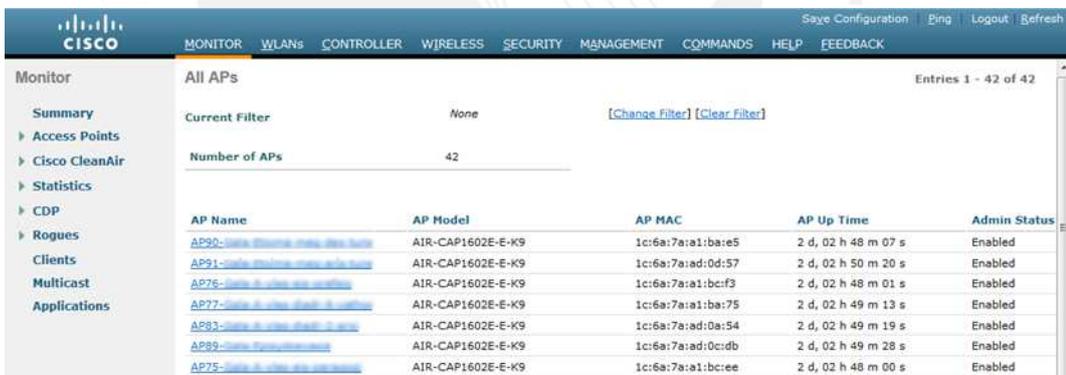
dicho punto de radiación, realizar un cambio de canal de operación del AP a uno que se encuentre libre o que tenga la mínima interferencia posible.

1.3.4 Channel Assignment en Redes Enterprise WiFi

Como se verá en los puntos siguientes, en una red Enterprise WiFi, los APs son conectados a la red mediante un equipo que centraliza el tráfico, *Wireless LAN Controller* (WLC). A continuación, es descrito brevemente así como también su arquitectura.

1.3.4.1 WLC y la asignación de canales

Esta herramienta de control centralizado (WLC) gestiona toda la estructura inalámbrica dentro de la una red Enterprise WiFi, de esta manera la administración configuración de los dispositivos conectados al controlador (APs) se vuelve una tarea sencilla [20]. A continuación se muestra una imagen de la interfaz web del WLC2504 (similar a los demás modelos de WLC) donde se aprecia la lista de APs conectados y sus diferentes parámetros.



AP Name	AP Model	AP MAC	AP Up Time	Admin Status
AP50- Cisco CAP1602E-E-K9	AIR-CAP1602E-E-K9	1c:6a:7a:a1:ba:e5	2 d, 02 h 48 m 07 s	Enabled
AP51- Cisco CAP1602E-E-K9	AIR-CAP1602E-E-K9	1c:6a:7a:ad:0d:57	2 d, 02 h 50 m 20 s	Enabled
AP76- Cisco CAP1602E-E-K9	AIR-CAP1602E-E-K9	1c:6a:7a:a1:bc:f3	2 d, 02 h 48 m 01 s	Enabled
AP77- Cisco CAP1602E-E-K9	AIR-CAP1602E-E-K9	1c:6a:7a:a1:ba:75	2 d, 02 h 49 m 13 s	Enabled
AP83- Cisco CAP1602E-E-K9	AIR-CAP1602E-E-K9	1c:6a:7a:ad:0a:54	2 d, 02 h 49 m 19 s	Enabled
AP89- Cisco CAP1602E-E-K9	AIR-CAP1602E-E-K9	1c:6a:7a:ad:0c:db	2 d, 02 h 49 m 28 s	Enabled
AP75- Cisco CAP1602E-E-K9	AIR-CAP1602E-E-K9	1c:6a:7a:a1:bc:ee	2 d, 02 h 48 m 00 s	Enabled

ILUSTRACIÓN 1-11: INTERFAZ DEL WIRELESS LAN CONTROLLER

FUENTE: [21]

Luego del encendido y registro del AP, este escanea el espectro por un corto tiempo para escoger el canal con menos ruido y usarlo para operar en dicha frecuencia. Esto no implica conseguir una asignación de canales de operación eficiente, ya que la manera de escogerlos tan solo se basa en el estado actual del espectro.

1.3.4.2 Two-Tier Enterprise WiFi Architecture

Este tipo de arquitectura libera al AP del trabajo de procesamiento ya que solo envía la información al controlador el cual se ocupa del procesamiento. Para establecer este sistema es necesario que los APs se encuentren en modo *lightweight*, que es un protocolo que permite la gestión centralizada de todos los equipos a la vez.

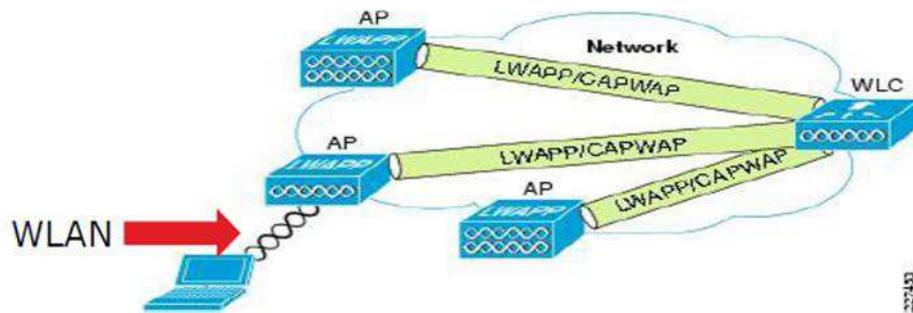


ILUSTRACIÓN 1-12: ACCESS POINT SUPEDITADO A UN CONTROLADOR (WLC)

FUENTE: [22]

El WLC es el encargado de asignar algunos parámetros para su funcionamiento como lo son la potencia de transmisión y el canal de operación del AP. Este tipo de arquitectura se tiene desplegado en la red WiFi de la PUCP.

1.3.4.3 Importancia del sensado

Al tener un campus como la PUCP y cientos de APs asociados a la red WiFi, estos son propensos a ser interferidos no solo por otros APs (en el mismo canal), sino también por los dispositivos externos mencionados en la sección 1.3.3.2 que pudieron no ser considerados al inicio de la asignación de canales. Como se mencionó anteriormente, este tipo de interferencia hace que el AP envíe más de una copia del mismo paquete que desea transmitir al mismo *bit rate*, de tal manera que aumente la probabilidad de ser decodificado, disminuyendo en consecuencia el *throughput* [10].

Por lo tanto, es importante determinar el estado del espectro electromagnético en todo momento. Esto permitiría conocer los canales más ruidosos, puntos de interferencia o caídas de señal, y de esta manera se podría realizar una reasignación de los canales. Además, conocer la calidad o estado del espectro

electromagnético es un paso importante para un futuro algoritmo de selección de canales de operación.

1.4 Redes de Sensado de Espectro

Una red de sensado de espectro está compuesta por dispositivos configurados para escanear el espectro (APs y dispositivo de sensado). Para el presente trabajo, como dispositivo de sensado se considerarán los módulos *Wireless Security and Spectrum Intelligence (WSSI)* de Cisco, ya que estos módulos son compatibles con los APs que cuenta la universidad (series Aironet 3600 y 3700). Por otro lado, estos APs por si solos también pueden realizar el sensado de espectro, ocupando parte de su tiempo en realizar esta tarea. Esto, a su vez, conllevaría a periodos de suspensión de servicio y puede ser prohibitivo para aplicaciones en tiempo real, como se discutirá en la sección 1.4.1.1.



ILUSTRACIÓN 1-13: IZQUIERDA (CISCO AP SERIE 3600), DERECHA (MÓDULO WSSI)

FUENTE: [23]

1.4.1 Tipos de sensado

Actualmente la PUCP cuenta con 550 APs de la serie Aironet 3700 y 100 APs de la serie Aironet 3600. Ambas series soportan el estándar 802.11n y los módulos de sensado WSSI. Adicionalmente, la universidad cuenta con 53 APs que soportan el estándar 802.11n (pero no los módulos WSSI) y 184 APs que solo soportan hasta 802.11g. Cabe señalar que todos los APs son marca Cisco.

Para el sensado de espectro existen dos alternativas, utilizar los propios APs y que realice ambas tareas (transmisión de datos y escaneo de espectro pero no al mismo tiempo), o utilizar los módulos WSSI, los cuales reutilizan el hardware del AP

y se monta en él para realizar dicha tarea (APs Cisco series Aironet 3600 y 3700). En los pabellones en donde se realizará este trabajo en su mayoría se tiene APs compatibles con los módulos WSSI. En caso se deba instalar un módulo en una ubicación donde el AP existente no lo soporte, se puede intercambiar dicho AP por uno que si lo soporte.

1.4.1.1 Sensado por el propio AP

Un *access point* es un elemento dentro de una *infrastructure* BSS, el cual junta dos entornos diferentes. La comunicación entre el AP y el host inalámbrico ocurre en un entorno inalámbrico, mientras que la comunicación entre el AP y la infraestructura ocurre en un medio cableado [11]. En el caso de la red WiFi de la PUCP, nos encontramos frente a un ESS (*Extended Service Set*), cientos de APs encargados de brindar el servicio de acceso a internet, cubriendo los lugares principales de la universidad.

Como vemos, un AP tiene como función principal la transmisión de datos y en caso se ocupe también del sensado, requerirá interrumpir temporalmente dicha transmisión. Un desligue temporal de su canal de operación para realizar el sensado de todos los demás canales traería como consecuencias una disminución del *throughput* y retardos en la comunicación, inaceptables para aplicaciones de voz y video en tiempo real [12]. Por lo tanto, para el diseño de la red, se priorizará el uso de los módulos al momento de dar la solución.

1.4.1.2 Sensado por hardware dedicado (módulo WSSI)

El módulo WSSI para los APs compatibles Cisco de la serie Aironet 3600 y 3700 introduce una nueva forma de diseñar y desplegar redes inalámbricas. La flexibilidad modular con la que cuentan estos dispositivos reduce costos al solo adherir estos módulos al AP para realizar funciones adicionales como análisis de espectro y detección y mitigación de amenazas de seguridad (APs multipropósito). De esta manera, evita tener que desplegar una red adicional, lo que se traduce en ahorro de capital, y al tener todo en una misma red, es más fácil la gestión y el cuidado de estos dispositivos [23].

Esta solución trabaja en todos los canales WiFi, en las bandas de 2,4 y 5 GHz. No es necesario algún tipo de configuración adicional, se instala, se enciende y estará constantemente escaneando todos los canales.

1.4.2 Rango de cobertura de un AP versus rango de sensado (energía)

Los APs considerados en el presente trabajo (Cisco Aironet 3600 y 3700), tienen diferentes potencias de transmisión. Al ser gestionado bajo un controlador, este se encarga de asignar el parámetro de potencia a utilizar. Esto se puede dar de manera automática, el algoritmo de control de potencia de transmisión se encargara de reducir la potencia en casos donde considere haya interferencia, el algoritmo agujero de cobertura se encarga de incrementar la potencia automáticamente en caso se haya perdido cobertura por falla de algún AP [24]. Entre las opciones de potencia de transmisión para 2.4 y 5 GHz se tiene [16]:

- 23 dBm (200 mW)
- 20 dBm (100 mW)
- 17 dBm (50 mW)
- 14 dBm (25 mW)
- 11 dBm (12.5 mW)
- 8 dBm (6.25 mW)
- 5 dBm (3.13 mW)
- 2 dBm (1.56 mW)

Estos niveles de potencia se pueden dar tanto para 2.4 como para 5 GHz. En los trabajos de medición de señal que se realizaron para este trabajo se encontró que la mayoría de APs a 2.4 GHz trabajaban a su mínima potencia de transmisión, por otro lado, los mismo APs a 5 GHz utilizaban su potencia máxima de transmisión [25].

El rango de cobertura de un AP a cierta frecuencia depende no solo de la potencia de transmisión, sino también de los obstáculos y *pathloss* existentes a su área de operación. Esta cobertura hace referencia al alcance de los APs con los dispositivos clientes, de manera que sostengan una comunicación aceptable (decodificación de paquetes). Es así, que este rango está dado por la potencia recibida (RSSI) mínima aceptable para la comunicación, que puede ser considerada de -88 dBm con un ancho de banda de 20 MHz a 26 Mbps (802.11n) [16].

Por el contrario, para el sensado de fuentes de interferencia (detección de energía) se necesita un nivel de RSSI menor que para establecer una comunicación, por lo tanto el rango de sensado tiende a ser mucho mayor que el rango de comunicación.

Calculado un ruido térmico de -101 dBm (considerando B), donde k_B es la constante de Boltzmann, T es la temperatura ambiente = 300K y B el ancho de banda = 20 MHz) y considerando un nivel de interferencia con el mismo valor -101 dBm, el RSSI promedio de sensado es -98 dBm (mitad debido a la potencia del ruido térmico, y la otra mitad debido a la potencia de la fuente de interferencia). Entonces, para detectar un nivel de interferencia de -101 dBm (sensibilidad del sensor $S_{dBm} = -101$ dBm), se debe configurar el umbral para detección de interferencia en -98 dBm. Es decir, cada vez que el módulo registre una RSSI de este valor (-98 dBm), se considera que existe una fuente de interferencia en la frecuencia escaneada. Sin embargo, al ser el ruido térmico un proceso aleatorio con potencia promedio de -101 dBm, es posible que en algunos instantes la potencia de ruido llegue al doble del promedio (-98 dBm), ocasionando falsa alarma. Entonces, para minimizar la posibilidad de una falsa alarma, se configura el umbral para detección de interferencia en -96 dBm (el triple de la potencia promedio de ruido). Con esta configuración, es posible detectar una señal interferente de hasta el doble del nivel de ruido (o sea, $S_{dBm} = -98$ dBm).

Recordando que la potencia de una señal interferente a la entrada del sensor es igual a $P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - PL$, donde P_{tx} es la potencia de transmisión de la fuente de interferencia, G_{tx} su ganancia de transmisión en la dirección del sensor, G_{rx} la ganancia de recepción del sensor en la dirección de la fuente de interferencia, y PL el *pathloss* entre interferente y sensor, tenemos que para que la fuente de interferencia sea detectada por un sensor con sensibilidad S_{dBm} , tenemos que m y por lo tanto $PL \leq P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - S_{dBm} = MAPL$, donde $MAPL$ es el máximo valor de *pathloss* admisible entre módulo de sensado y punto a sensar, de tal manera que dicho punto se considere como “puntos cubierto” por el módulo de sensado.

Considerando la potencia de transmisión del equipo interferente P_{tx} dBm, la ganancia del transmisor G_{tx} (conservadora), la ganancia del módulo receptor $G_{rx} = 2.5$ dBi a 2.4 GHz ($G_{rx} = 2.5$ para 5 GHz) y la sensibilidad del sensor $S_{dBm} = -96$ dBm (para un umbral de detección de -96 dBm), el máximo valor de *pathloss* para detectar interferencia en un punto $P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - S_{dBm}$ sería de 123.5 dB a

2.4 GHz y de 126.5 dB a 5 GHz. Finalmente, la pérdida de camino existente desde la ubicación de un módulo WSSI hasta un determinado punto tendrá que ser menor que los valores máximos de *pathloss* calculados, para considerar que dicho punto es cubierto, y por ende puede ser sentido por el módulo WSSI.

1.4.3 Tipos de sensores

A continuación se muestran 3 modos para desplegar un sistema de sensado de espectro electromagnético, tomando en consideración la infraestructura actual de la red WiFi PUCP.

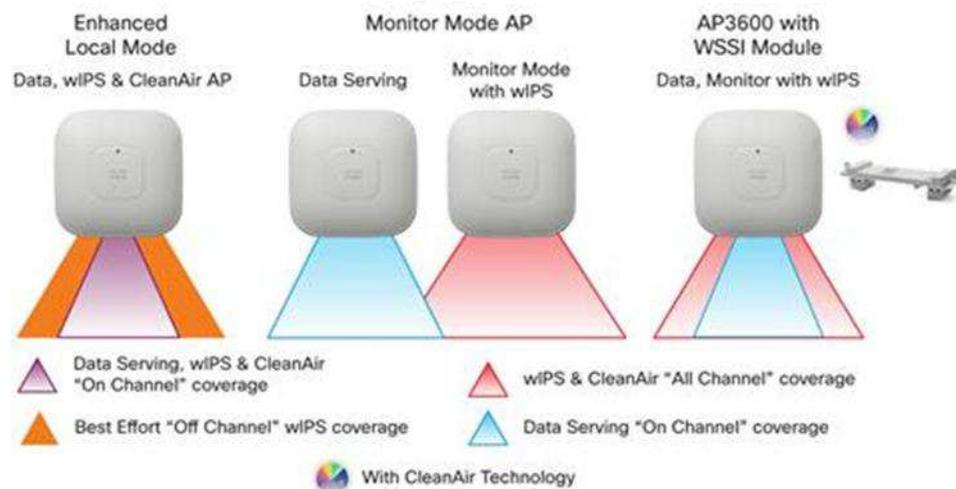


ILUSTRACIÓN 1-14: OPCIONES DE DESPLIEGUE DE UN SISTEMA DE SENSADO

FUENTE: [26]

1. **APs en Enhanced Local Mode (ELM):** Cada AP en operación realiza análisis de espectro *CleanAir* 24x7 en su canal de operación (APs de la serie G2), y escanea otros canales en sus tiempos libres (modo *best effort*) [26].
2. **Usando APs adicionales en Monitor Mode:** Además de los APs dedicados al servicio a clientes, se agregan APs en modo "Monitor". APs en modo Monitor se dedican a escanear en forma secuencial y continua todos los canales disponibles para facilitar el análisis de espectro *CleanAir* en todos los canales (APs de la serie G2), pero no brindan servicio a clientes [26].

3. **AP3600 with WSSI Module:** Se agregan módulos WSSI a algunos APs. Estos módulos realizan el escaneo continuo de todos los canales sin interferir con el trabajo de los APs en los que están instalados. Esto permite tener simultáneamente el análisis de espectro *CleanAir* y el servicio activo a clientes 7x24 (2.4 y 5 GHz) [26].

Como podemos ver, el modo AP3600 con el módulo WSSI nos brinda las tres funciones en todo momento (7x24) y en todos los canales (2.4 y 5 GHz). Además del análisis de espectro que realiza (función que se tomará en cuanto para este trabajo), se pueden implementar otras funciones adicionales con el mismo hardware.

1.4.4 Función de utilidad y restricciones

Debido a que nuestro problema requiere una solución que nos brinde cobertura para todos los puntos considerados (cobertura total), la función de utilidad para este problema se puede definir como la cantidad total de módulos WSSI necesarios para realizar dicha tarea.

Por otro lado, una red donde se despliegan dispositivos para realizar una tarea específica está sujeto tanto al costo de los mismos dispositivos, como a la operación y mantenimiento de estos. En tal sentido, si se quiere diseñar una red de módulos de sensado, esta tarea se debe de realizar con la menor cantidad de módulos posibles. Todo esto bajo la restricción de que cada punto sea cubierto por al menos un módulo de sensado WSSI.

Cabe mencionar también, que las soluciones encontradas no solo arrojarán puntos cubiertos por un solo módulo de sensado, sino también habrá casos en donde un punto es cubierto por más de uno. Es aquí donde notamos que al tener más de un módulo de sensado cubriendo un determinado punto, la probabilidad de detectar un equipo interferente en dicho punto aumenta. Esto puede ser útil para trabajos futuros de diferente función de utilidad, siempre y cuando exista un costo-beneficio favorable.

1.5 Objetivos

A continuación se describirán los objetivos de la presente tesis para dar a conocer el alcance que este tendrá.

1.5.1 Objetivo general

La presente tesis tiene como objetivo general diseñar una red de sensores de radio frecuencia, determinando el número y ubicación de módulos de sensado requerido para caracterizar el espectro electromagnético en el campus de la PUCP a fin de maximizar el reuso espacial del espectro y minimizar la interferencia debido a dispositivos externos (ruido).

1.5.2 Objetivos específicos

Para lograr el objetivo general de la tesis, se cuenta con los siguientes objetivos específicos:

- Diseñar una red de módulos de sensado que permita caracterizar el espectro electromagnético.
- Modelar la ubicación de los módulos de sensado como un problema de optimización combinatoria minimizando el costo total de sensores, sujetos a restricciones de performance y cobertura.
- Levantar información de la topología y mapa de atenuaciones de la red WiFiPUCP
- Implementar en software una heurística, para resolver en tiempo polinómico el problema de ubicación de sensores (NP-Complete).
- Determinar el número de sensores y su ubicación.

CAPÍTULO 2

Optimización combinatoria

En este capítulo se revisarán temas sobre clases de problemas y el tipo de complejidad que poseen. Además, se demostrará que el problema a resolver pertenece a la clase NP-Complete, un tipo de problema difícil de resolver. Y que para encontrar una solución a este problema en instancias muy grandes se utilizará un método alternativo que permite dar con una solución aceptable en tiempo razonable.

2.1 Teoría NP-Completeness

Algunas veces, cuando nos dedicamos a buscar un algoritmo que resuelva un determinado problema, dicha búsqueda resulta ser más o igual de trabajoso que buscar entre todas las soluciones posibles (todas las “combinaciones”). Por ende, sería mejor probar que dicho problema es *inherently intractable*, que ningún algoritmo podría resolverlo rápidamente. Desafortunadamente, probar que un

problema es *inherently intractable* puede ser tan difícil como encontrar un algoritmo eficiente que resuelva el problema [27].

A todo este problema, la teoría de *NP-Completeness* proporciona algunas técnicas sencillas para probar que un problema dado es “igualmente difícil” que un largo número de otros problemas que son extensamente conocidos como *intractable*. Entonces, a partir de estas técnicas se podría afirmar que un problema dado es *NP-Complete* y, por lo tanto, es equivalente a todos esos otros problemas difíciles [27].

Saber que un problema dado es *NP-Complete* brinda información valiosa sobre que enfoque es el más productivo, esto implica, darle baja prioridad a la búsqueda de una solución óptima. En cambio, es mejor concentrarse en otros aspectos. Por ejemplo: (i) buscar un algoritmo eficiente que resuelva varios casos especiales del problema general. (ii) buscar un algoritmo que, aunque no garantice ejecutarse rápidamente, es probable que lo haga la mayoría de veces. (iii) buscar un algoritmo rápido que simplemente encuentren diseños que satisfagan la mayoría de las especificaciones de los componentes [27].

Por lo tanto, la primera tarea es evaluar el problema de ubicación de módulos de sensado y ver qué tipo de problema se va a resolver. Con esta información, se tomará el mejor camino para encontrar una solución que satisfaga determinado problema.

2.1.1 Problemas

Un problema, de acuerdo a [27], es una pregunta en general a ser respondida que posee distintos parámetros, o variables libres, cuyos valores no son especificados. Se puede describir dando: (1) una descripción general de todos sus parámetros, y (2) una declaración de las propiedades requeridas de la respuesta, o solución, para satisfacerla.

Como ejemplo se considera el problema clásico en [27] “*Traveling salesman problem*”. Los parámetros de este problema consisten de un conjunto finito $C =$ de “ciudades” y, para cada par de ciudades c_i, c_j en C , la “distancia” d_{ij} entre ellas. Una solución es un orden $\langle c_{\pi(1)}, c_{\pi(2)}, \dots, c_{\pi(m)} \rangle$ de las ciudades dadas que minimizan:

(2-1)

Esta expresión le da el recorrido del “tour” que empieza en c_1 , visita cada ciudad en secuencia, y luego regresa directamente a c_1 desde la última ciudad [27].

Una instancia de un problema se obtiene especificando valores particulares a todos los parámetros de un problema, por ejemplo:

Una instancia del “*Traveling salesman problem*” mencionado antes es dado por $\{c_1, c_2, c_3, c_4\}$, $d(c_1, c_2) = 10$, $d(c_2, c_3) = 9$ y $d(c_3, c_4) = 3$. El ordenamiento $\langle c_1, c_2, c_4, c_3 \rangle$ es una solución para la instancia, el viaje tiene el recorrido mínimo posible de 27 [27].

Se deduce entonces, que desde un problema general se obtienen instancias, lo cual, dependiendo de los valores especificados se tendrá una complejidad en la búsqueda de una solución, lo que sugiere a su vez la posibilidad de que dichas instancias si puedan ser resueltas eficientemente.

2.1.1.1 Sub Problemas

Un problema suele ser más sencillo de analizar y resolver si este se divide en subproblemas. Los subproblemas son, al igual que los problemas, conjuntos de instancias pero se entiende que se obtienen justamente a partir de los problemas. Es decir, un sub-problema consiste en la solución de un problema para solo un subconjunto de las instancias. Por ejemplo, un sub-problema del “*Travelling Salesman Problem*” se obtiene cuando solo se consideran instancias donde las ciudades del conjunto C se encuentran en una línea recta. Para este sub-problema, existe una simple solución que puede ser ejecutada en tiempo polinómico.

2.1.1.2 Problemas de optimización

Son problemas en los que se busca encontrar un máximo o mínimo de una función, tomando en cuenta los valores permitidos para las variables asociadas. Un ejemplo de este tipo de problemas, es el problema que se intenta resolver en la presente

tesis, el cual tiene como objetivo encontrar el número mínimo de módulos de sensado sujetos a restricciones de performance y cobertura.

En el siguiente enunciando se verá que los problemas de optimización también se pueden llevar a problemas de decisión, para un fácil estudio relacionándolos con sus tiempos de computación.

2.1.1.3 Problemas de decisión

Estos tipos de problemas cuentan con dos únicas posibles soluciones, “sí” o “no”. Y es definido de la siguiente manera, un problema de decisión Π consiste simplemente de un conjunto D_{Π} de instancias y un subconjunto $Y_{\Pi} \subset D_{\Pi}$ de instancias “sí” [27].

Para representar este tipo de problemas se utiliza el siguiente formato estándar que consta de dos partes. La primera especifica una instancia genérica de los problemas en diferentes términos como conjuntos, grafos, funciones, números, etc., y la segunda declarando una pregunta “si-no” hecha en términos de la instancia genérica [27]. A continuación se usa el formato mencionado para especificar el *Traveling Salesman Problem* tomado de [27].

INSTANCIA: Un conjunto finito de “ciudades”, una “distancia” Z^+ para cada par de ciudades y un límite $B \in Z^+$ (donde denota los enteros positivos).

PREGUNTA: Existe un “viaje” de todas las ciudades en C que tiene un recorrido total no más que B , que es un orden $\langle c_{\pi(1)}, c_{\pi(2)}, \dots, c_{\pi(m)} \rangle$ de C tanto como:

(2-1)

Este ejemplo es claro para mostrar que un problema de decisión puede ser derivado de cualquier problema de optimización. Se puede asociar con ese problema el problema de decisión, que incluye un límite numérico B como un parámetro adicional, y que solicite si existe una estructura de los tipos de requerimientos, teniendo un costo no más que B . Del mismo modo, los problemas de decisión también pueden ser derivados de problemas de maximización, reemplazando “no más que” por “al menos” [27].

La teoría de *NP-Completeness* está diseñada para ser aplicada solo a esta clase de problemas de decisión debido a sus representaciones como “lenguaje”, definido a continuación:

Para cada conjunto finito Σ denotamos Σ^* al conjunto de todas las cadenas finitas formadas por elementos de Σ . Por ejemplo si $\Sigma = \{0,1\}$, Σ^* está compuesto por la cadena vacía (“empty”, o “ ϵ ”), las cadenas 0, 1, 00, 01, 10, 11, 000, 001 y todas las otras cadenas finitas de 0’s y 1’s. Si L es un subconjunto de Σ^* , nosotros decimos que L es un lenguaje sobre el alfabeto Σ . Por ejemplo, $\{01,001,111,1101010\}$ es un lenguaje sobre $\{0,1\}$; como lo es el conjunto de todas las representaciones binarias de enteros que son cuadrados perfectos, como también lo es el conjunto por si mismo [27].

La relación entre los problemas de decisión y lenguajes está dada por el esquema de codificación que se usa para especificar instancias. Este último es una manera de describir cada instancia de un problema Π por una cadena de símbolos sobre el alfabeto fijo Σ [27].

De acuerdo a [27], el problema Π y el esquema de codificación e para Π divide en 3 clases de cadenas:

- Aquellas que no son codificaciones de instancias de Π .
- Las que codifican instancias de Π para las que la respuesta es negativa.
- Las que codifican instancias I , es decir, instancias de Π para las que la respuesta es afirmativa.

Esta tercera clase de cadena es el lenguaje que asociamos con Π y e , de la siguiente manera [27].

$$\} \quad (2-3)$$

2.1.2 Algoritmos

Los algoritmos son procedimientos y reglas para resolver problemas. Abstractamente, [27] nos dice que se resuelve un problema Π si ese algoritmo puede ser aplicado a cualquier instancia I de Π y garantiza siempre producir una solución para esa instancia I .

En el presente trabajo, encontrar la solución de un problema hace referencia a encontrar un algoritmo eficiente que pueda resolverlo en un tiempo razonable. Cuando hablamos de encontrar el algoritmo más eficiente, supone encontrar el más rápido, ya que a menudo el factor tiempo es un factor predominante si un algoritmo es adecuado para ser usado en la práctica [27].

Los requerimientos de tiempo de un algoritmo son expresados en una sola variable, el tamaño de una instancia de problema, lo cual indica la cantidad de datos de entrada necesarios para representar dicha instancia. La longitud de entrada para una instancia I de un problema Π está definido como el número de símbolos que lo describen obtenido del esquema de codificación fijo asociado a Π [27].

Por ejemplo, en [27] se menciona que las instancias del *traveling salesman problem* podrían ser descritas usando el alfabeto $\{c, [,], /, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$, con el ejemplo previo de una instancia de problema siendo codificado por la cadena $c[11]c[13]c[3]c[27]//10/5/9//6/9//3$. Luego el tamaño de la entrada para nuestro ejemplo sería 32.

Por lo tanto, el factor tiempo para una instancia de problema está relacionado con la longitud de entrada del mismo. Ahora bien, más adelante, en la sección 2.2.1.2, se mostrará cuál es la relación dependiendo el tipo de problema de acuerdo a su complejidad.

2.1.2.1 Problemas P

Son problemas de decisión que pertenecen a la clase P, esta clase abarca todos los problemas que pueden ser resueltos en tiempo polinómico haciendo uso de una máquina de Turing determinista (DTM) [27]. Este último es un modelo de cómputo que se utiliza para simular un algoritmo, ya que todos los algoritmos conocidos se pueden implementar en máquinas de Turing determinista.

La entrada a la DTM es una cadena x , y se dice que un programa DTM con alfabeto de entrada Σ acepta $x \in \Sigma^*$ si y solo si se detiene en el estado al ingresar la cadena x [27]. Entonces, el lenguaje L reconocido por el programa esta dado por:

(2-4)

Si la cadena $x \in (\Sigma^* - L_M)$, la ejecución del programa M con la entrada x se puede detener en el estado q_N , o puede continuar para siempre sin detenerse. En estos dos casos se dice que el programa M no acepta la cadena x [27].

Por lo tanto, un programa DTM " M " resuelve un problema de decisión Π sobre el esquema de codificación Θ si M se detiene para todas las cadenas de entrada sobre su alfabeto, y L_M].

La definición formal definida en [27] se muestra a continuación:

(2-5)

En resumen, el problema de decisión Π pertenece a P bajo un esquema de codificación Θ si $L[\Pi, \Theta] \in P$. Es decir, existe un programa DTM que resuelve Π en tiempo polinómico bajo un esquema de codificación Θ .

2.1.2.2 Problemas de clase NP

Un problema de decisión pertenece a la clase NP si existe una máquina de Turing no determinista (NDTM) que resuelva dicho problema en tiempo polinómico [27]. Esto implica que el proceso de verificación de una solución se puede realizar en tiempo polinómico, pero no implica tener una solución en tiempo polinómico.

La NDTM está compuesta por dos etapas (*guessing stage* y *checking stage*) [27]. Dada una cadena x , la primera etapa genera una cadena arbitraria y ambas ingresan al *checking stage*, donde se procesa de manera determinista. Luego de la computación, se puede detener en los estados q_Y , q_N o seguir ejecutándose por siempre sin detenerse.

Un programa NDTM " M " tendrá un número infinito de computaciones posibles para una cadena de entrada x , una por cada cadena adivinada en el *guessing stage*. Se dice que el programa NDTM " M " acepta x si por lo menos uno de estos es una computación afirmativa (q_Y) [27]. El lenguaje reconocido por M es:

(2-6)

La definición formal definida en [NP-Comp.] se muestra a continuación:

(2-7)

En resumen, el problema de decisión pertenece a bajo un esquema de codificación \in si NP . Es decir, existe un programa NDTM que resuelve Π en tiempo polinómico bajo un esquema de codificación \in .

2.1.2.3 Relación entre los Problemas P y NP

Después de formalizar las definiciones de ambas clases de problemas, se establece explícitamente que $P \subseteq NP$. Todo problema de decisión resuelto por un algoritmo determinístico de tiempo polinómico puede ser resuelto también por un algoritmo no determinístico de tiempo polinómico. El mejor resultado establecido de [27] se da en el siguiente teorema:

Teorema: Si $\Pi \in NP$, entonces existe un polinomio p de tal manera que Π puede ser resuelto por un algoritmo determinístico teniendo complejidad temporal de $O(p(n))$.

El teorema anterior brinda un acercamiento para entender la complejidad de los problemas de clase NP. Por un lado, los problemas P pueden ser resueltos utilizando algoritmos determinísticos para encontrar rápidamente una solución. En el caso de los problemas de clase NP que no pertenezcan a P, también podrían utilizar un algoritmo determinístico, pero aquí su complejidad temporal estaría regida por una función exponencial. Es decir, la rapidez para encontrar la solución dependerá del tamaño de instancia; para instancias pequeñas se resolverá en tiempo razonable, pero para instancias grandes el tiempo de computación no será nada razonable.

Por lo visto anteriormente, todo se inclina a pensar que $P \neq NP$. Por otro lado, no se tienen argumentos sólidos para demostrar la pregunta que aún no ha sido respondida $\text{¿}P = NP\text{?}$. Si esta última igualdad se lograra demostrar entonces se podría afirmar que, verificar soluciones afirmativas de problemas de decisión podría efectuarse tan rápido como obtener las respuestas ejecutando un algoritmo determinístico, y con esto un sin número instancias de problemas difíciles de resolver se podrían solucionar rápida y eficientemente (en tiempo polinómico) [27].

2.1.2.4 Problemas NP-Complete

Antes de la definición de los problemas de clase NP-Complete, se definirá una transformación polinómica de acuerdo a [27]. Una transformación polinómica o reducción polinómica de un lenguaje $L_1 \subseteq \Sigma_1^*$ a un lenguaje $L_2 \subseteq \Sigma_2^*$ es una función que satisface las siguientes condiciones:

1. Existe un programa DTM de tiempo polinómico que computa f .
2. Para todo $x \in \Sigma_1^*$, $x \in L_1$ si y solo si $f(x) \in L_2$.

Si existe dicha transformación polinómica de L_1 a L_2 , entonces se dice que " L_1 se transforma a L_2 " ($L_1 \leq_p L_2$). Esto implica que, siendo los problemas de decisión Π_1 y Π_2 , con esquemas de codificación asociados e_1 y e_2 , se cumple que $\Pi_1 \leq_p \Pi_2$, tal que $L_1 = L[\Pi_1, e_1]$ y $L_2 = L[\Pi_2, e_2]$.

La definición formal sería la siguiente: Un lenguaje L es definido a ser NP-Complete si $L \in NP$ y, para todos los otros lenguajes $L' \in NP$, $L' \leq_p L$ [27]. Informalmente, un problema de decisión Π es NP-Complete si $\Pi \in NP$ y, para todos los otros problemas de decisión $\Pi' \in NP$, $\Pi' \leq_p \Pi$. Finalmente, se podría decir que Π es "por lo menos tan difícil" como lo es Π' .

Esto nos revela que los problemas NP-Complete son los más difíciles en NP [27], que todo problema de decisión de la clase NP puede reducirse a un problema NP-Completo. Se deduce también, que si cualquier problema en NP-Complete es resuelto en tiempo polinómico, entonces todos los problemas en NP son resueltos en tiempo polinómico; y si cualquier problema en NP es *intractable* (no existe solución en tiempo polinómico) entonces todos los problemas en NP-Complete también lo son.

Entre los problemas NP-Complete conocidos se tiene el problema *Minimum Set Cover*, el cual busca encontrar la mínima cantidad de subconjuntos cuya unión contenga todos los elementos de un conjunto finito. Es en este tipo de problema en que nos enfocaremos para el presente trabajo.

2.2 Minimum Set Cover

En [28] se define el problema *Minimum Set Cover* de la siguiente manera: Una colección C de subconjuntos de un conjunto finito S . Un conjunto cobertura para S

es la colección $C' \subseteq C$ tal que cada elemento en S pertenezca por lo menos a un miembro de la colección C' . El problema es encontrar el conjunto cobertura de menor cardinalidad $|C'|$.

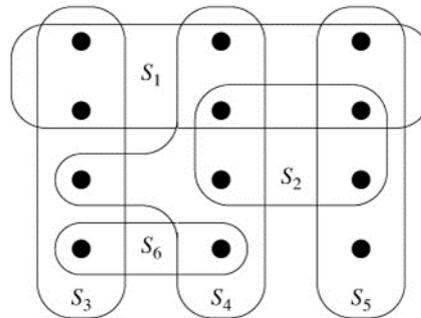


ILUSTRACIÓN 2-1: MINIMUM SET COVER PROBLEM

FUENTE: [29]

El problema que se intenta resolver en el presente trabajo es una variante de este tipo de problema. La colección C de subconjuntos viene a ser el conjunto de todas las áreas de cobertura de los APs disponibles, donde se puede instalar un módulo de sensado WSSI. Una solución para este problema es la colección $C' \subseteq C$ de manera que cada punto del conjunto S pertenezca por lo menos a un miembro de C' , es decir, cada punto sea cubierto (sensado) por lo menos por un módulo WSSI instalado en un AP de la colección C' . El problema es encontrar el mínimo valor de $|C'|$, o sea, la mínima cantidad de módulos de sensado.

Ya que este problema es conocido por ser uno de los 21 problemas de Richard Karp demostrados ser *NP-Complete*. Se tomara nuestro problema como uno de ellos, en este caso tenemos instancias de problemas definidos los cuales se mostrarán en el capítulo 3.

2.2.1 Maximal Problem Formulation

2.2.1.1 Objective Function

Es la función que se quiere optimizar (minimizar o maximizar). Habiendo hecho la comparación entre nuestro problema y el problema *Minimum Set Cover*, el problema buscará minimizar la cantidad de módulos de sensado que se instalarán en los lugares candidatos.

2.2.1.2 Computational Complexity

En base a la complejidad computacional, un algoritmo se puede distinguir entre un algoritmo de tiempo polinómico o algoritmo de tiempo exponencial. Esta distinción se hace dependiendo a la dificultad de un problema.

Un algoritmo de tiempo polinómico posee una función de complejidad polinómica, la cual se define de la siguiente manera: Algoritmo cuya función de complejidad temporal es $O_{(p(n))}$ para algunas funciones polinómicas p , donde n es usado para denotar la longitud de entrada. Cualquier algoritmo cuya función de complejidad temporal no puede ser delimitada así es llamado algoritmo de tiempo exponencial [27].

La diferencia entre estos dos tipos de algoritmos se apreciar mejor cuando se aplican a instancias más grandes, es decir, cuanto mayor sea la longitud de entrada; a continuación se ilustra lo mencionado.

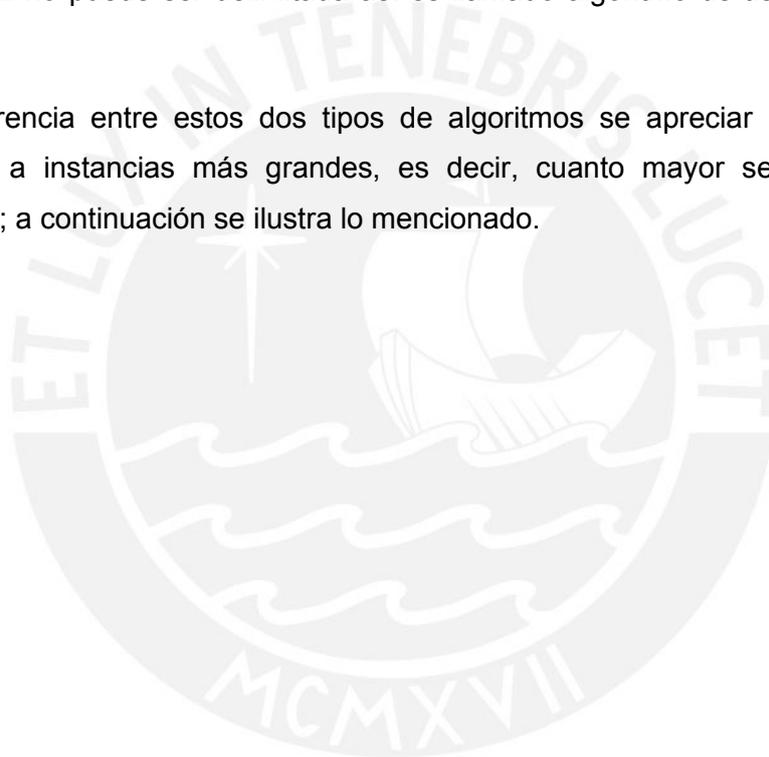


TABLA 2-1: COMPARACIÓN DE DIFERENTES FUNCIONES DE COMPLEJIDAD POLINÓMICA Y EXPONENCIAL

Función de Complejidad Temporal	Longitud de entrada "n"					
	10	20	30	40	50	60
	.00001 segundo	.00002 segundo	.00003 segundo	.00004 segundo	.00005 segundo	.00006 segundo
	.0001 segundo	.0004 segundo	.0009 segundo	.0016 segundo	.0025 segundo	.0036 segundo
	.001 segundo	.008 segundo	.027 segundo	.064 segundo	.125 segundo	.216 segundo
	.1 segundo	3.2 segundos	24.3 segundos	1.7 minutos	5.2 minutos	13.0 minutos
	.001 segundo	1.0 segundo	17.9 minutos	12,7 días	35.7 años	366 siglos
	.059 segundo	58 minutos	6.5 años	3855 siglos	siglos	siglos

FUENTE: [27]

En la Tabla 2-1 se puede observar que para un algoritmo con función de complejidad temporal polinómica, al aumentar la longitud de entrada, el tiempo de computación varía de milisegundos a segundos, o hasta minutos. Por otro lado, si se tuviera una función de complejidad temporal exponencial habría un aumento considerable al incrementar la longitud de entrada, de segundos a días, o inclusive a siglos.

TABLA 2-2: EFECTO DE MEJORA DE PROCESAMIENTO EN DIFERENTES ALGORITMOS DE TIEMPO POLINÓMICA Y EXPONENCIAL

Función de Complejidad Temporal	Con Computadores actuales	Con computadores 100 veces más rápidos	Con computadores 1000 veces más rápidos

FUENTE: [27]

En la Tabla 2-2 se muestra el caso inverso. Teniendo el tiempo delimitado (1 hora), que tan grande puede ser la longitud de entrada de la instancia. Para algoritmos con función de complejidad temporal polinómica al aumentar la capacidad de procesamiento del computador en 100 o 1000 veces, en una hora, la longitud de entrada de la instancia que puede ser procesada aumenta multiplicativamente. En cambio, para algoritmos con función de complejidad temporal exponencial, la longitud de entrada que puede ser procesada aumenta en 6 o 9 unidades (no aceptable).

Por lo tanto, dependiendo de la cantidad de datos de entrada necesarios para describir una instancia (longitud de entrada), se tendrá una dificultad asociada independientemente a qué clase de problema pertenezca. Para instancias pequeñas, los tiempos son relativamente razonables e inclusive se podría realizar una búsqueda exhaustiva entre todas las alternativas posibles para encontrar la solución óptima. Para instancias mayores, los tiempos no son nada sensatos; por este motivo si se quiere encontrar una solución aceptable para este tamaño de instancias, hará falta valerse de algunas alternativas para encontrar al menos una solución que se aproxime a la óptima.

2.2.1.3 MILP Formulation

El problema de *Minimum Set Cover* se puede modelar como un problema del tipo *Mixed Integer Linear Programming* (MILP), el cual cuenta con variables enteras y restricciones lineales. Se modela de la siguiente manera:

- Puntos a cubrir:
- Lugares candidatos:
- Función a minimizar (cantidad de módulos a instalar): donde la variable binaria X_j es 1 cuando se considera instalar un modulo en el lugar candidato j , y 0 cuando no.
- Condición (cobertura de al menos un AP): $\sum_j a_{ij}X_j \geq 1$, donde a_{ij} (matriz de cobertura con m filas y n columnas) tiene como elementos valores binarios, es 1 cuando el punto i es cubierto por el modulo considerado en el lugar candidato j .

Existen paquetes dedicados a resolver este tipo de problemas, como por ejemplo SIPLEX o GLPK. Para instancias pequeñas se puede encontrar la solución en un tiempo razonable, pero para instancias grandes el tiempo podría excederse demasiado. Por tal motivo, en la siguiente sección se propone una heurística que pretende encontrar una solución aproximada en tiempo razonable.

2.2.2 Heurística

Es una técnica alternativa que se aplica a problemas difíciles de resolver para poder encontrar soluciones cercanas a la óptima, teniendo como ventaja su ejecución en tiempo razonable (tiempo polinómico).

Como se verá más adelante, la heurística en la cual se basa el presente trabajo [10] es un algoritmo que puede ser implementado utilizando un lenguaje de programación con característica principal de manejo de matrices. Así mismo, el desarrollo de la función principal “Heuristic” cuenta con dos fases, la primera con un enfoque *Greedy*, encargada de encontrar una solución aceptable en tiempo razonable; y la segunda, encargada de mejorar la solución previa mediante una búsqueda local (*Local Search*), logrando así, una solución cercana a la óptima.

Este algoritmo nos permitirá tener una alternativa para encontrar la cantidad mínima necesaria de módulos WSSI para sensor una cantidad de puntos determinados. Así

mismo conocer los lugares candidatos seleccionados en donde se añadirá dicho módulo a un AP. Esta solución (aproximada) será comparada con la solución óptima, ambos utilizarán instancias pequeñas con el fin de poder observar los resultados y tiempos de ejecución de ambas soluciones. A partir de esto, se comprobará que tan confiable es utilizar esta heurística para instancias mayores.

Esta heurística se explicará a detalle más adelante en la sección 3.5.



CAPÍTULO 3

Diseño de la red de Sensores

Una vez identificado la clase de problema que enfrentamos, así como también haber descrito brevemente la utilidad de la heurística, ya se tienen las herramientas necesarias para resolver nuestro problema. En el presente capítulo se formulan y definen las instancias del problema, se calcula la solución óptima para instancias medianas utilizando un software de optimización y para instancias muy grandes se hace uso de la heurística para hallar soluciones aceptables en tiempos razonables.

3.1 Formulación del problema a optimizar

Consiste en la definición de todos los elementos que están involucrados en el problema y su solución, así como también, las relaciones que se tiene entre estos elementos.

3.1.1 Función objetivo y restricciones

La tarea principal de este trabajo es encontrar la cantidad y ubicación de módulos de sensado WSSI que necesitan ser instalados en los puntos candidatos (APs), de manera que la cobertura de escaneo de espectro sea total en todos los puntos de los ambientes considerados.

La solución más fácil para cubrir todos los puntos considerados sería instalar un sensor por cada AP, sin embargo esta solución sería costosa y probablemente innecesaria. Como vimos anteriormente, para sensar interferencia se necesita un nivel de potencia recibida RSSI menor que la necesaria para establecer una comunicación (decodificación de paquetes), eso quiere decir, que el rango de sensado de los módulos WSSI es mayor al rango de cobertura de los AP. Entonces, la cantidad de módulos WSSI necesarios para conseguir cobertura total de escaneo de espectro es menor a la cantidad de APs disponibles.

Por lo mencionado, la función objetivo a considerar para este problema es la cantidad de módulos de sensado, dado que es el elemento que requiere ser minimizado. Todo esto bajo la restricción de cobertura total, que cada punto se encuentre bajo el rango de sensado de al menos un módulo WSSI. Como se vio en la sección 2.2.1.3, nuestro problema se puede modelar de la siguiente manera:

- Puntos a cubrir:
- Lugares candidatos:
- Función objetivo: $\sum_j^n X_j$, donde la variable binaria X_j toma el valor de cuando se considera instalar un módulo WSSI en el lugar candidato j , y cuando no.
- Restricción (cobertura total): $\sum_j^n a_{ij} X_j \geq 1$, donde a_{ij} (matriz de cobertura con m filas y n columnas) tiene como elementos valores binarios, es 1 si y solo si el punto i es cubierto por el módulo considerado en el lugar candidato j . Es decir, de acuerdo a la sección 1.4.2, a_{ij} es 1 si y solo si el *pathloss* entre el punto i y la ubicación del lugar candidato j es menor a 121.5 dB para 2.4 GHz (124.5 dB para 5 GHz).

3.2 Metodología de diseño

A continuación se explica brevemente los procesos involucrados en obtener la información de entrada necesaria para encontrar una solución al problema. Además, también se describe el software utilizado para encontrar la solución óptima y la solución alternativa (Heurística).

3.2.1 Recolección y procesamiento de la información

Una parte importante de resolver el problema fue inicialmente la de obtener información del espectro en cada ambiente de los pabellones seleccionados para este trabajo (salones y corredores). Esta labor se realizó en colaboración con y como parte del trabajo de tesis de Acuña y Herrera [25].

Dentro de cada ambiente se seleccionaron puntos separados 1 a 1.5 metros de distancia unos de otros, en cada uno se midieron los niveles de señal (dBm) en todos los canales WiFi a 2.4 y 5 GHz.

Esta recolección de información fue realizada con el programa AirMagnet, que con la ayuda de una antena conectada a una laptop se logró escanear los canales en cuestión. Así mismo, para asegurarnos de tener una información confiable, se realizaron 4 pasadas al recorrido de sensado, de manera que si se pierde o es errónea dicha medición, existen otras más que pueden suplirla.

Estas mediciones permitieron extraer datos importantes como canal de operación, SSID, nivel de señal, ruido y nombre del AP. Más detalles sobre el método de medición, calibración, formato de los resultados, intervalos de confianza, etc. Se pueden encontrar en [25].

```

PassiveSurvey1_Z101.svd
1 @AirMagnet Survey Data
2 #Type: passive
3 #App Version: 8.7 Build: 35800
4 #Created on: 12:06:29 06/10/2015
5 #Card Name*: Proxim Wireless 8494 802.11a/b/g/n USB Adapter 00:20:A6:F6:96:B2 OSVersion: 6.100002 1
6 #Antenna Angle: 0.000000, Antenna Type:
7 #Signature:
8 #dim_X, dim_Y, GPS Map
9 6,79.599998,54.483002, 0
10 #Time,Xpos,Ypos,Channel,SSID,AP,SignalDBM,Signal,NoiseDBM,Noise,MediaType,NodeName,Speed,ByteCount (throughput),
11 1433955989,16.868952,6.548831,64,'redpucp','D0:72:DC:CE:62:CF',-55,49,-92,2,'802.11ac','AP_Z_101-1','0','-1','-1',
12 1433955989,16.868952,6.548831,6,'redpucp','D0:72:DC:CE:62:C0',-60,43,-91,4,'802.11gn','AP_Z_101-1','0','-1','-1',
13 1433955989,16.868952,6.548831,11,'redpucp','34:A8:4E:6A:19:40',-69,30,-91,4,'802.11gn','aulpabz104','0','-1','-1',
14 1433955989,16.868952,6.548831,11,'redpucp','D0:72:DC:D2:E0:20',-81,17,-91,4,'802.11gn','AP_Z_200-1','0','-1','-1',
15 1433955989,16.868952,6.548831,6,'redpucp','20:3A:07:9F:0C:50',-82,16,-91,4,'802.11gn','aulpabz115','0','-1','-1',
16 1433955989,16.868952,6.548831,36,'redpucp','34:A8:4E:6A:19:4F',-85,17,-93,2,'802.11an','aulpabz104','0','-1','-1',
17 1433955989,16.868952,6.548831,1,'redpucp','64:12:25:15:05:C0',-88,9,-91,4,'802.11gn','AP_Z_201-1','0','-1','-1',
18 1433955989,16.868952,6.548831,161,'redpucp','20:3A:07:9F:0C:5F',-93,7,-94,1,'802.11an','aulpabz115','0','-1','-1',
19 1433955989,16.868952,6.548831,40,'redpucp','D0:72:DC:D2:E0:2F',-100,0,-93,1,'802.11ac','AP_Z_200-1','0','-1','-1',
20 1433955989,16.868952,6.548831,6,'redpucp','64:12:25:15:06:90',-100,0,-91,4,'802.11gn','AP_Z_202-1','0','-1','-1',
21 1433956037,16.868952,7.548832,64,'redpucp','D0:72:DC:CE:62:CF',-54,51,-91,3,'802.11ac','AP_Z_101-1','0','-1','-1',
22 1433956037,16.868952,7.548832,6,'redpucp','D0:72:DC:CE:62:C0',-63,38,-90,6,'802.11gn','AP_Z_101-1','0','-1','-1',
23 1433956037,16.868952,7.548832,11,'redpucp','34:A8:4E:6A:19:40',-71,30,-91,4,'802.11gn','aulpabz104','0','-1','-1',
24 1433956037,16.868952,7.548832,1,'redpucp','20:3A:07:9F:0C:50',-76,22,-91,4,'802.11gn','aulpabz115','0','-1','-1',
25 1433956037,16.868952,7.548832,11,'redpucp','D0:72:DC:D2:E0:20',-78,21,-91,4,'802.11gn','AP_Z_200-1','0','-1','-1',
    
```

ILUSTRACIÓN 3-1: ARCHIVO .SVD OBTENIDO EN LAS MEDICIONES (AIRMAGNET)

FUENTE: Elaboración propia

La Ilustración 3-1 presenta un ejemplo de la información provista por AirMagnet en un formato complejo de manejar, por esta razón estos archivos se procesaron con scripts escritos en el lenguaje Perl corriendo sobre cygwin.

	A	B	C	D	E	F	G
1	N°Pos	X	Y	'AP_Z_101'	'aulpabz104'	'aulpabz115'	'AP_Z_103-1'
2	Corredor1A_1	65.8	18.15	0	84.5	88.5	5
3	Corredor1A_2	64.7851	18.1511	0	84.25	88.5	5
4	Corredor1A_3	63.7702	18.1521	0	85.25	86.5	5
5	Corredor1A_4	62.7553	18.1532	0	83	83.5	0
6	Corredor1A_5	61.7404	18.1543	0	82.75	84.5	95
7	Corredor1A_6	60.7255	18.1553	0	81.75	84	95.5
8	Corredor1A_7	59.7106	18.1564	0	84.25	85.25	93.5
9	Corredor1A_8	58.6957	18.1574	0	84.5	86.5	94.25
10	Corredor1A_9	57.6809	18.1585	0	83.25	81	93
11	Corredor1A_10	56.666	18.1596	0	80.25	82.75	91.75
12	Corredor1A_11	55.6511	18.1606	0	81.75	81	92.5
13	Corredor1A_12	54.6362	18.1617	0	83.75	83	92.25
14	Corredor1A_13	53.6213	18.1628	0	84.5	78.25	87.75
15	Corredor1A_14	52.6064	18.1638	0	83.5	80.75	87.75
16	Corredor1A_15	51.5915	18.1649	0	81.25	79.25	87.25
17	Corredor1A_16	50.5766	18.166	0	80.25	79.75	86.5
18	Corredor1A_17	49.5617	18.167	0	77.5	77.75	83.25
19	Corredor1A_18	48.5468	18.1681	0	77	78	82
20	Corredor1A_19	47.5319	18.1691	0	77.25	78.25	82.5
21	Corredor1A_20	46.517	18.1702	0	74.75	82.25	79
22	Corredor1A_21	45.5021	18.1713	0	76.75	81.25	78.75

ILUSTRACIÓN 3-2: ARCHIVO GENERADO POR SCRIPTS DE PERL FORMATO .CSV

FUENTE: Elaboración propia

Cygwin es una aplicación en Windows que nos brinda (emula) un UNIX Shell en donde podemos manejar gran cantidad de directorios y archivos. Es así que se desarrollaron scripts con los que se logró gestionar la información inicial para conseguir los valores de *pathloss* en todos los puntos medidos, estos valores fueron almacenados de forma matricial compatible para ser leído por Excel tal como se muestra en la Ilustración 3-2.

3.2.2 Software considerado

Una vez conseguido las matrices de *pathloss*, por piso y por pabellón, se programan los algoritmos encargados de buscar la solución. Para esta tarea se hace uso de las herramientas MATLAB y CPLEX, encargadas de la ejecución de los códigos para la solución óptima y aproximada (heurística).

Para la solución óptima, en MATLAB se desarrolla un código el cual es leído por CPLEX, este código a su vez debe seguir una estructura predefinida por CPLEX de acuerdo al tipo de problema de optimización que se tenga. Este código es procesado por la función “cplexmilp”, la cual entrega un vector con la solución del problema. Cabe mencionar que para que pueda ejecutarse dicho código en MATLAB, es necesario también tener instalado CPLEX en la misma computadora, ya que este último se encarga de brindarle algunas librerías necesarias para poder procesar este tipo de problemas.

Por otro lado, para la solución aproximada solo se hace uso del MATLAB. Aquí implementamos la heurística, que viene a ser un algoritmo compuesto por 4 funciones, que de manera iterativa se encargan de entregar una solución que cumpla las condiciones descritas en el código.

3.3 Descripción de la instancia del problema

Conocido el problema de manera general, delimitaremos el alcance de este definiendo las instancias del problema. Especificaremos los valores de los parámetros considerados tales como lugares candidatos, puntos a cubrir y matriz de cobertura.

3.3.1 Áreas de trabajo

El principio, este trabajo es desarrollado como una de las propuestas de mejora de la red WiFi PUCP a ser evaluadas por DIRINFO para su posible implementación. Dicho esto, el trabajo es realizado basándonos en algunos pabellones de nuestra casa de estudios, se escogieron 5 de ellos por ser parte importante del campus. Siendo los seleccionados, los pabellones N, H, Z, Estudios Generales Ciencias y el Tinkuy.

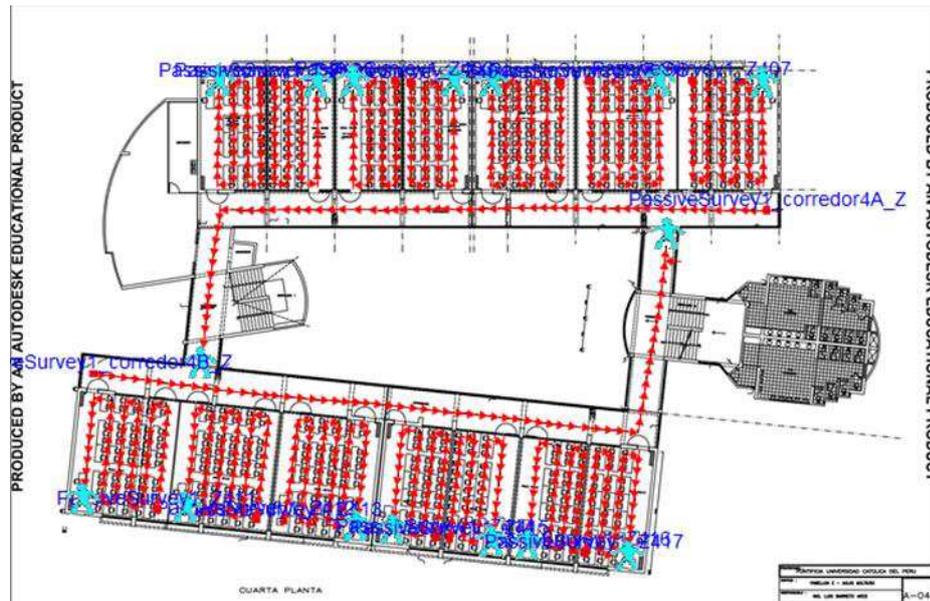


ILUSTRACIÓN 3-3: PUNTOS MEDIDOS CUARTO PISO PABELLÓN Z

FUENTE: Elaboración propia

Como se puede ver en la Ilustración 3-3, el área de trabajo abarca tanto el interior de los salones como los corredores, esto se da en cada piso del pabellón. Es así que nuestra instancia global sería considerar los 5 pabellones. Pero, ya que los pabellones se encuentran tan alejados unos de otros que no tienen interacción (un AP de un Pabellón no puede sensor – cubrir – un punto de otro pabellón), se puede considerar cada pabellón como una partición independiente sin afectar la optimalidad de la solución. Notar que esto es cierto pues, al no tener actualmente cobertura en ambientes *outdoors*, no existe interdependencia entre pabellones. A futuro, una vez que se iluminen los ambientes *outdoors* y la red WiFi de la PUCP sea una red conectada, ya no se podrán separar los Pabellones en sub-instancias.

Además de considerar los Pabellones como instancias separadas, también se estudió el caso en el que cada piso de un Pabellón es tratado como una sub-

instancia. Esto se realizó con dos motivos: (i) evaluar la pérdida de performance en la solución cuando sólo se toma en cuenta información en 2 dimensiones (2D) como hacen actualmente muchas herramientas de gestión de redes inalámbricas, y (ii) para evaluar como los tiempos de computación van aumentando con el tamaño de las instancias.

3.3.1.1 Puntos a cubrir y lugares candidatos

Los puntos a cubrir son los puntos que se midieron en cada piso de los 5 pabellones considerados para este trabajo. Como se mencionó anteriormente, cada punto está separado uno de otro entre 1 y 1.5 metros de distancia. Como se vio en la Ilustración 3-3, en los salones se realizó un barrido en ambos ejes, mientras que en los corredores las mediciones fueron en un solo eje por el espacio angosto que se tenía.

Los lugares candidatos son las posiciones de los APs, ya que cada módulo WSSI se instala en el mismo hardware del AP, reutilizándolo y sin interferir con su servicio de transmisión. En general, se tiene un AP por salón (ubicado al centro del salón), pero como se verificó en las mediciones, existen salones que no cuentan con un AP por cuestiones de tamaño o algún caso excepcional. También se tienen algunos APs que se encuentran en los corredores, estos últimos también son considerados como lugares candidatos para los módulos.

TABLA 3-1: CANTIDAD DE PUNTOS Y LUGARES CANDIDATOS EN EEGGCC

EEGGCC	Puntos	Lugares C.
Sótano	800	6
Piso 1	1000	11
Piso 2	1695	16
Piso 3	848	7

FUENTE: Elaboración propia

En la Tabla 3-1 se puede observar la cantidad de puntos a cubrir y lugares candidatos en cada piso del pabellón de EEGGCC. Este tamaño de instancias (cada piso por separado) será considerado, como a se mencionó, como instancias pequeñas por la cantidad de puntos.

TABLA 3-2: CANTIDAD TOTAL DE PUNTOS POR PABELLÓN

Pabellón	Puntos	Lugares C.
EEGGCC	4343	40
McGregor	2179	36
H	1886	34
Z	2882	41
Tinkuy	1478	8
TOTAL	12768	159

FUENTE: Elaboración propia

En la Tabla 3-2 se puede observar la cantidad de puntos a cubrir y lugares candidatos en cada pabellón. Este tamaño de instancias (pabellones totales) será considerado como instancias grandes. Observando que la instancia más grande a considerar es la del pabellón de EEGGCC con 4343 puntos y 40 APs, esta será tomada como ejemplo para los resultados en el capítulo 4.

3.3.1.2 Matriz de cobertura

Para resolver este tipo de problemas y representar determinados elementos asociados con otros, se trabaja haciendo uso de matrices. Luego de haber recolectado y procesado la data de las mediciones, se utilizan las potencias de recepción en cada punto considerado a cubrir y las potencias de transmisión de los APs para calcular los valores de *pathloss*. Es decir, se calcula la atenuación entre la posición de un AP y un punto a cubrir; una vez calculado estos valores, se ordena de la siguiente manera:

	A	D	E	F	G	H
1	Punto	'AP_H_101-1	'AP_H_102-1	'AP_H_103-1	'AP_H_104-1	'aulpabh104'
65	H100_1	68	76.5	0	0	2
66	H100_2	68.25	76.75	0	0	2
67	H100_3	66.5	76.25	0	0	2
68	H100_4	65.75	74.5	86	0	2
69	H100_5	64.25	75	83	0	2
70	H100_6	63.75	71.5	84.5	0	2
71	H100_7	65.25	77.25	85.5	0	2
72	H100_8	63.75	78.75	88	0	2
73	H100_9	63	80.3333	87	0	2
74	H100_10	68.25	80.5	0	0	2
75	H100_11	65	78.75	0	0	0
76	H100_12	66.5	82.5	0	0	2
77	H100_13	61.5	76.25	83.6667	0	0
78	H100_14	58.25	74.5	83	0	2
79	H100_15	58.75	69.75	83.6667	0	2

ILUSTRACIÓN 3-4: MATRIZ DE PATHLOSS PABELLÓN H 2.4 GHZ

FUENTE: Elaboración propia

A partir de la segunda columna, cada una almacena los valores de *pathloss* de todos los puntos con respecto a un determinado AP. Por ejemplo, la celda “D65” nos indica que existe 68 dB de pérdida de potencia desde el *Access Point* “AP_H_101-1” hasta el punto “H100_1”, la celda “D66” nos indica que existe 68.25 dB de pérdida de potencia desde el *Access Point* “AP_H_101-1” hasta el punto “H100_2”, y así sucesivamente. Además, se validó que los valores en el rango de 0 a 20 que aparecen en las celdas pertenecen a puntos donde no se sensó al AP correspondiente (artificio de los scripts al interpretar la falta de un valor de RSSI como un cero). Por ejemplo, en el mismo punto “H100_1” no fueron sensados los APs “AP_H103-1”, “AP_H104-1” y “aulpabh104”.

Debido al ruido térmico, la sensibilidad máxima de escaneo de espectro del AirMagnet fue cercana a -100 dBm. Esto limitó en algunos casos calcular el rango de sensado para los módulos WSSI a 2.4 GHz, ya que al momento en que se realizaron las mediciones en los pabellones, la mayoría de APs transmitían a su mínima potencia (2 dBm) a 2.4 GHz. Esto quiere decir, que si la potencia de transmisión de un AP fue de 2 dBm y la máxima sensibilidad del equipo de medición es -100 dBm, se podrá medir *pathloss* hasta un valor máximo de 102 dB. Como se vio en la sección 1.4.2, para que un punto se considere cubierto por un módulo, la pérdida entre ambos debe ser a lo más de 123.5 dB a 2.4 GHz (y 126 dB a 5 GHz). Es decir, al no poder calcular *pathloss* mayores a 102 dB, se ignoraran puntos con un *pathloss* mayor a 102 dB pero menor a 123.5 dB que aún podrían ser sensados por un módulo WSSI.

Para mitigar este problema y para fines de cobertura, se hace uso de la data a 5 GHz, ya que por lo general todos los APs transmiten a su máxima potencia 23 dBm en esta banda. Es así que, adelante se considera que si un punto es cubierto por un módulo determinado en la banda de 5 GHz, también lo será en la banda de 2.4 GHz, así no haya sido detectado por el AirMagnet. Esto se debe a que – generalmente – el *pathloss* a 5 GHz es mayor al *pathloss* a 2.4 GHz por 6 dB o más.

Para construir la matriz de cobertura también hacemos uso del MATLAB. Todos los valores de *pathloss* menores a 123.5 dB a 2.4 GHz (excepto los que están dentro del rango de 0 a 20 por lo mencionado anteriormente), indicaran que dicho punto si es cubierto por el AP correspondiente. De igual manera, a 5 GHz los valores de *pathloss* inferiores a 126.5 dB se considera cubierto por el módulo respectivo.

```
>> H2 (64:78,1:5)
ans =
    1    1    0    0    0
    1    1    0    0    0
    1    1    0    0    0
    1    1    1    0    0
    1    1    1    0    0
    1    1    1    0    0
    1    1    1    0    0
    1    1    1    0    0
    1    1    1    0    0
    1    1    0    0    0
    1    1    0    0    0
    1    1    0    0    0
    1    1    1    0    0
    1    1    1    0    0
    1    1    1    0    0
```

ILUSTRACIÓN 3-5: PARTE DE LA MATRIZ DE COBERTURA PABELLÓN H, MATLAB

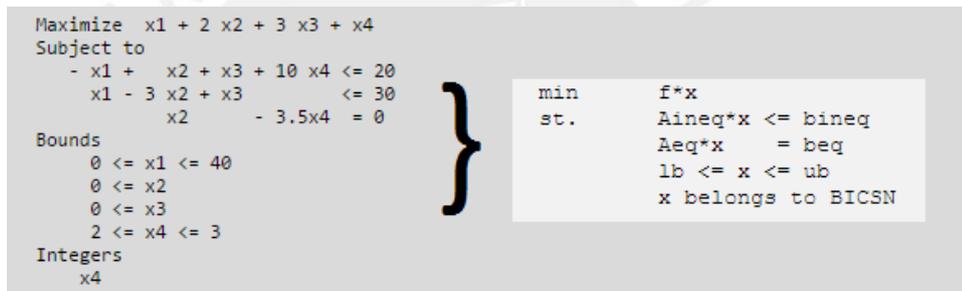
FUENTE: Elaboración propia.

Utilizando la data del mismo ambiente que el ejemplo anterior (Pabellón H), se tiene la matriz binaria de la Ilustración 3-5 llamada matriz de cobertura. Al igual que el ejemplo anterior, cada fila representa un punto a cubrir y cada columna representa a un lugar candidato o AP, así mismo, tiene valores de “1”s cuando el punto puede ser cubierto por un módulo WSSI instalado en el AP respectivo, y “0” cuando no. Esta matriz es tomada en cuenta como data de entrada para el cómputo tanto de la solución óptima como para la solución aproximada (Heurística).

3.4 Solución Óptima

Como se mencionó en la sección 3.2.2 para el cálculo de la solución óptima se hace uso de las herramientas de programación MATLAB y CPLEX, se ejecuta el código en MATLAB utilizando funciones y librerías de CPLEX. Como data de entrada se tienen matrices de cobertura, que representan la cobertura de los módulos de sensado WSSI. Con esto, obtenemos como resultado la cantidad de módulos necesarios y en qué lugares candidatos deben ser instalados.

Habiendo modelado el problema a optimizar en la sección 3.1.1, se procede a programar dicha formulación utilizando el MATLAB. Para esto, se crea una función principal (que llamamos “cplex”), dentro de ella se calculan algunos parámetros necesarios para poder describir el problema de optimización haciendo uso de la matriz de cobertura ingresada. Estos parámetros los podemos identificar en la Ilustración 3-6.



```

Maximize x1 + 2 x2 + 3 x3 + x4
Subject to
  - x1 + x2 + x3 + 10 x4 <= 20
    x1 - 3 x2 + x3 <= 30
          x2 - 3.5x4 = 0
Bounds
  0 <= x1 <= 40
  0 <= x2
  0 <= x3
  2 <= x4 <= 3
Integers
  x4
  
```

```

min f*x
st. Aineq*x <= bineq
     Aeq*x = beq
     lb <= x <= ub
     x belongs to BICSN
  
```

ILUSTRACIÓN 3-6: EJEMPLO DE PROBLEMA CPLEX

FUENTE: [30]

En la Ilustración 3-6 (lado izquierdo) se muestra un ejemplo del problema de optimización que tiene el mismo formato que nuestra formulación inicial. Entonces, se procede a calcular los parámetros requeridos (lado derecho), dentro de la función “cplex”:

- f: Coeficientes de la función a optimizar X
- Aineq: Matriz de coeficientes de las inecuaciones (restricciones)
- bineq: Matriz columna que representa los límites en las inecuaciones
- Aeq y beq: No se usa ya que este problema no tiene igualdades
- lb y ub: Límites para la variable X

Una vez calculado estos valores, se llama a la función “cplexmilp” (encargada de resolver modelos de programación lineal de entero mixto) y recibe como data de

entrada los parámetros calculados. Luego de la ejecución, la función principal “cplex” nos devuelve nuestra función objetivo $f * x$, así como el mismo vector x , el cual nos indica que lugares candidatos son los seleccionados a instalar un módulo WSSI para lograr cobertura total del piso o pabellón procesado.

Esta función realiza una búsqueda exhaustiva para encontrar la mejor solución. Por esta razón, el tiempo que demora en ejecutarse depende mucho del tamaño de instancia con el que se trabaje. Como se mencionó anteriormente, para el presente trabajo, se dividirán las instancias para poder analizar los tiempos de computación. En principio, este tipo de solución está destinado para instancias pequeñas, en las cuales se espera, tiempos de ejecución aceptables. Cabe la posibilidad que para nuestra instancia global, el código no pueda ejecutarse en un tiempo razonable.

3.5 Heurística

Antes de explicar cómo trabaja la heurística, es importante mencionar el contexto de nuestro problema asociado al presente algoritmo. Para la heurística se consideran *Test Points* (TPs), que para nuestro caso serían los puntos que necesitan ser sensados por los módulos WSSI; además, también se mencionan los *Candidate Sites* (CSs), que vienen a ser los lugares candidatos en donde se pueden instalar los módulos (ubicaciones de los APs), encargados de dar cobertura a los TPs.

```

PROCEDURE Heuristic(A)
  S = ∅;
  BuildUpSolution(A, S);
  LocalSearch(S);
  RETURN(S)
END Heuristic
  
```

ILUSTRACIÓN 3-7: ESTRUCTURA GENERAL DE LA HEURÍSTICA

FUENTE: [10]

Tal como se adelantó en la sección 2.2.2, la heurística en que se basa el presente trabajo [10] considera 2 fases principales, ambas representadas por las funciones mostradas en la Ilustración 3-7, *BuildUpSolution* y *LocalSearch*, las cuales son explicadas a continuación.

La fase *Greedy*, implementada por la función *BuildUpSolution*, inicializa con un conjunto solución vacío ($S = \emptyset$) e iterativamente agrega, a la solución, el lugar candidato que maximiza una función beneficio definida. Esta función ha sido considerada como el beneficio que conlleva agregar cierto lugar candidato a la solución actual, es decir, el módulo que logre cubrir mayor cantidad de TPs (que aún no han sido cubiertos) [10]. Esta primera fase culmina cuando todos los TPs son cubiertos por los CSs en el conjunto S . La Ilustración 3-8 muestra el pseudocódigo del desarrollo de la fase *Greedy*.

```

PROCEDURE BuildUpSolution(A, S)
  Best_CS = PickBestCS(A);
  S = S U Best_CS;
  Covered_TPs = Covered_TPs U I_Best_CS;
  WHILE Covered_TPs != ALL_TPs
    GreedyStep(A, Covered_TPs, S);
  END BuildUpSolution;

```

ILUSTRACIÓN 3-8: PSEUDOCÓDIGO BUILDUPSOLUTION (HEURÍSTICA)

FUENTE: [10]

La función *PickBestCS* escoge el primer CS a ser agregado a la solución. La idea es escoger el CS que tenga menor superposición de cobertura de TPs con el resto. La función *GreedyStep*, retorna el siguiente CS a ser agregado al conjunto solución S . La Ilustración 3-9 presenta el pseudocódigo de esta última función.

```

PROCEDURE GreedyStep(A, Covered_TPs, S)
  MaxFunction = 0;
  DO FOR j ∉ S
    IF Benefit_function_j > MaxFunction;
      CS_ToAdd = j;
      MaxFunction=Benefit_function_j;
    FI
  OD
  S = S U CS_ToAdd;
  Covered_TPs = Covered_TPs U I_CS_ToAdd
  END GreedyStep;

```

ILUSTRACIÓN 3-9: PSEUDOCÓDIGO GREEDYSTEP (HEURÍSTICA)

FUENTE: [10]

Por último, la fase *Local Search* toma como data de entrada la solución S provista por la fase *Greedy* y explora las vecindades de dicha solución en busca de una mejor solución. Este algoritmo inicia eliminando una y luego dos CSs pertenecientes a S , para luego aplicarle la función *BuildUpSolution* a la solución

perturbada. Este procedimiento continúa hasta ya no encontrar mejora, es decir, cuando ya no se pueda reducir la cantidad de CSs de tal manera que se mantenga la cobertura total de los TPs [10]. El pseudocódigo de la esta fase se muestra en la Ilustración 3-10.

```

PROCEDURE LocalSearch(A,S)
  MaxOF=ComputeOF(A, S);
  DO
  Enhanced=FALSE;
  DO FOR j ∈ S
    S = S \ {j};
    Covered_TPs = Covered_TPs \ {I-j};
    BuildUpSolution(A, Covered_TPs, S);
    NewOF=ComputeOF(A, S);
    IF NewOF > MaxOF
      MaxSOL=S;
      MaxOF=NewOF
      Enhanced=TRUE;
    FI
  DO FOREACH i IN S AND i>j
    S = S \ i,j;
    Covered_TPs=Covered_TPs \ {I_i, I_j};
    BuildUpSolution(A, Covered_TPs, S);
    NewOF=ComputeOF(A, S);
    IF NewOF > MaxOF
      MaxSOL=S;
      MaxOF=NewOF
      Enhanced=TRUE;
    FI
  OD
  IF Enhanced
    S=MaxSOL;
  FI
  WHILE Enhanced;
END LocalSearch;

```

ILUSTRACIÓN 3-10: PSEUDOCÓDIGO LOCALSEARCH (HEURÍSTICA)

FUENTE: [10]

Al igual que la solución óptima, este algoritmo y sus funciones dentro de ella, son implementados y ejecutados en MATLAB, utilizando las matrices de cobertura como data de entrada. El conjunto solución final viene dado por un vector que contiene los CSs (lugares candidatos) seleccionados en donde se debe instalar un módulo WSSI, de manera que logre cubrir todos los TPs considerados. Los resultados, tanto de la solución óptima como de la heurística, serán analizados en el capítulo 4.

CAPÍTULO 4

Análisis de Resultados

En el presente capítulo se analizarán los resultados de la ejecución de los códigos que calculan la solución óptima y la aproximada (Heurística), ingresando instancias pequeñas y grandes, realizando a su vez una comparación de tiempos de ejecución de cada instancia. Por último, de acuerdo a los resultados, se eligen los lugares candidatos donde se deben instalar los módulos de sensado para cumplir con la cobertura total requerida.

4.1 Resultados para pisos por separado (instancias pequeñas)

Como instancias pequeñas fueron considerados los pisos de cada pabellón, matrices de cobertura que solo contienen puntos y lugares candidatos correspondientes al mismo piso.

También, es preciso mencionar que cada vez que cualquier código se ejecuta para una misma instancia arroja valores diferentes, pero cercanos entre sí, de tiempos

de ejecución. Entonces, para el tiempo de ejecución en los cuadros de resultados se ha considerado el promedio de 3 ejecuciones, ya que lo primordial es tener una idea de la rapidez en que se encuentra una solución.

A continuación se muestran los resultados de la solución óptima y la heurística para instancias pequeñas, correspondientes a los pisos del pabellón de EEGCC. Los procedimientos y resultados son similares para los demás pabellones.

4.1.1 Cálculo de la solución óptima para instancias pequeñas

La Tabla 4-1 muestra los resultados de la solución óptima para cada piso de EEGCC en ambas bandas de frecuencias. Se indican la cantidad de puntos a cubrir, la cantidad de lugares candidatos (APs), la frecuencia trabajada, el resultado (cantidad de módulos WSSI para lograr cobertura total), densidad de módulos entre los lugares candidatos y tiempo de ejecución.

TABLA 4-1: RESULTADOS DE LA SOLUCIÓN ÓPTIMA PARA INSTANCIAS PEQUEÑAS EEGCC

Pabellón	Puntos	Lugares C.	Frec.	Resultado	Densidad	T(mseg)
Sótano	800	6	2.4	2	0.33	8.826
			5	2	0.33	3.984
Piso 1	1000	11	2.4	4	0.36	9.819
			5	4	0.36	2.979
Piso 2	1695	16	2.4	3	0.19	8.941
			5	3	0.19	6.57
Piso 3	848	7	2.4	2	0.29	3.334
			5	2	0.29	4.287

FUENTE: Elaboración propia

Observando los tiempos de ejecución podemos ver que los valores se encuentran en el orden de milisegundos, es decir, les toma un tiempo razonable el cálculo de la mejor solución. Resultado esperado tratándose de instancias pequeñas, ya que para instancias grandes (puntos totales en un pabellón) podría incrementarse exponencialmente según lo revisado en la teoría del capítulo 2 en la sección 2.2.1.2.

4.1.2 Cálculo de la solución aproximada (heurística) para instancias pequeñas

La Tabla 4-2 muestra los resultados de la solución aproximada (heurística) para cada piso de EEGCC en ambas bandas de frecuencia. Se indica la cantidad de puntos a cubrir, la cantidad de lugares candidatos (APs), la frecuencia trabajada, el resultado (cantidad de módulos WSSI para lograr cobertura total), densidad de módulos entre los lugares candidatos y tiempo de ejecución.

En cuanto a los tiempos de ejecución observamos que también se encuentran en el orden de los milisegundos, es decir, su ejecución se realiza en tiempo razonable. Esto nos indica que el código utilizando para la búsqueda de la solución aproximada ejecuta de manera rápida instancias pequeñas, esto también se espera para instancias con mayor cantidad de puntos.

TABLA 4-2: RESULTADOS DE LA HEURÍSTICA PARA INSTANCIAS PEQUEÑAS EEGCC

Pabellón	Puntos	Lugares C.	Frec.	Resultado	Densidad	T(mseg)
Sótano	800	6	2.4	2	0.33	3.644
			5	2	0.33	1.74
Piso 1	1000	11	2.4	4	0.36	3.148
			5	4	0.36	2.072
Piso 2	1695	16	2.4	3	0.19	4.312
			5	4	0.25	2.836
Piso 3	848	7	2.4	2	0.29	1.524
			5	2	0.29	2.025

FUENTE: Elaboración propia

4.1.3 Comparación de la solución óptima y aproximada para instancias pequeñas

La Tabla 4-3 presenta la comparación de la solución óptima y aproximada para instancias pequeñas (pisos del pabellón de EEGCC). Mostrando la cantidad de puntos a cubrir, la cantidad de lugares candidatos (APs), la frecuencia trabajada, el resultado (cantidad de módulos WSSI para lograr cobertura total) y el tiempo de ejecución.

Así mismo, podemos ver que los tiempos de ejecución de la heurística son menores que los de la solución óptima, lo esperado. A simple vista, esta diferencia no es mucha, pero cuando se compara proporcionalmente, podemos ver que los ratios de tiempos de ejecución van desde 1.4 a 3.1, es decir, el tiempo de ejecución de la solución óptima es hasta 3 veces el tiempo de ejecución del algoritmo de la heurística. Dicho esto se podría esperar que para instancias mayores, este ratio crezca mucho más. Por lo tanto, esto confirma la rapidez de la heurística a comparación del procesamiento para la solución óptima.

También, podemos observar que los resultados (cantidad de lugares candidatos seleccionados), tanto para la solución óptima como para la heurística, en general tienen valores iguales. Es decir, se consigue cobertura total con la misma cantidad de lugares candidatos, a excepción de los resultados para el piso 2 a 5 GHz, en donde la diferencia es de 1. Es aquí donde notamos la variación de la heurística con el resultado óptimo, podemos encontrar mucho más rápido una solución aceptable pero con una ligera diferencia de la solución ideal.

TABLA 4-3: RESULTADOS Y TIEMPOS DE COMPUTACIÓN DE LA HEURÍSTICA Y SOLUCIÓN ÓPTIMA PARA MATRICES DE COBERTURA DE CADA PISO DE EEGCC

Pabellón	Puntos	Lugares C.	Frec.	Resultado		Tiempo (mseg)	
				Heuris.	Optim.	Heuris.	Optim.
Sótano	800	6	2.4	2	2	3.644	8.826
			5	2	2	1.74	3.984
Piso 1	1000	11	2.4	4	4	3.148	9.819
			5	4	4	2.072	2.979
Piso 2	1695	16	2.4	3	3	4.312	8.941
			5	4	3	2.836	6.57
Piso 3	848	7	2.4	2	2	1.524	3.334
			5	2	2	2.025	4.287

FUENTE: Elaboración propia

Es necesario resaltar que, considerar la misma cantidad de lugares candidatos no implica que se consideren los mismos lugares, esto se puede apreciar en la Tabla 4-4. Aquí se muestran los 6 lugares candidatos (APs) en el sótano y tanto la heurística como la solución óptima logran cobertura total con distintos APs pero con la misma cantidad. La heurística escoge los APs de los salones 101 y 103, la solución óptima escoge los APs de los salones 103 y 104. El número '1' significa que dicho AP es seleccionado como solución, y '0' que no.

TABLA 4-4: LUGARES CANDIDATOS SELECCIONADOS PARA LA HEURÍSTICA Y LA SOLUCIÓN ÓPTIMA EN EL SÓTANO

Lugares Candidatos seleccionados en el "Sótano" (5 GHz)						
Heurística	'AP_E_101- 1'	'AP_E_102- 1'	'AP_E_103- 1'	'AP_E_104- 1'	'AP_E_105- 1'	'AP_E_106- 1'
	1	0	1	0	0	0
Solución óptima	'AP_E_101- 1'	'AP_E_102- 1'	'AP_E_103- 1'	'AP_E_104- 1'	'AP_E_105- 1'	'AP_E_106- 1'
	0	0	1	1	0	0

FUENTE: Elaboración propia

4.2 Resultados para Pabellones completos

Para instancias grandes tenemos como data de entrada matrices de cobertura de cada pabellón. A diferencia de las instancias donde se consideraron los pisos de cada pabellón por separado (2D), aquí se considera todo el pabellón junto (3D).

Para estos resultados se está agregando la fila *Both*, en la cual se muestran los resultados para ambas frecuencias, a que los módulos que cubrirán a 2.4 GHz serán los mismos que los que cubran a 5 GHz.

A continuación se muestran los resultados para la solución óptima y heurística. Los resultados mostrados corresponden a los 5 pabellones considerados para este trabajo. Es necesario mencionar que con respecto al pabellón del Tinkuy, no se encontró una solución para la banda de 5 GHz, ya que, de acuerdo a la data recolectada en [25], este pabellón todavía no está plenamente cubierto a dicha frecuencia. Sin embargo, se muestran resultados a 2.4 GHz.

4.2.1 Cálculo de la solución óptima para Pabellones completos

Por los resultados anteriores, donde se vieron tiempos de ejecución en milisegundos, se puede entonces evaluar con confianza una instancia mayor utilizando el mismo código para la solución óptima. Como resultado se espera un aumento no tan significativo en los tiempos de ejecución.

La Tabla 4-5 muestra los resultados de la ejecución de la solución óptima tomando como entrada la matriz de cobertura de cada pabellón para ambas bandas de frecuencia. Se muestra la cantidad de puntos a cubrir, la cantidad de lugares

candidatos (APs), la frecuencia trabajada, el resultado (cantidad de módulos WSSI para lograr cobertura total), densidad de módulos entre los lugares candidatos y tiempo de ejecución.

TABLA 4-5: RESULTADOS Y TIEMPOS DE EJECUCIÓN DE LA SOLUCIÓN ÓPTIMA PARA LAS MATRICES DE COBERTURA DE CADA PABELLÓN

Pabellón	Puntos	Lugares C.	Frec.	Resultados	Densidad	T(ms)
EEGGCC	4343	40	2.4	6	0.15	50
			5	6	0.15	41
			Both	6	0.15	56
McGregor	2179	36	2.4	6	0.17	42
			5	8	0.22	49
			Both	8	0.22	306
Pab. H	1886	34	2.4	5	0.15	17
			5	5	0.15	36
			Both	5	0.15	73
Pab. Z	2882	41	2.4	5	0.12	25
			5	6	0.15	55
			Both	6	0.15	232
Tinkuy	1478	8	2.4	3	0.38	6

FUENTE: Elaboración propia

De estos resultados podemos ver que los tiempos de ejecución para este tamaño de instancias aún es bajo, es decir, la solución óptima sigue evaluándose de manera rápida y logra encontrar la cobertura total en tiempo razonable (menor a un segundo).

A comparación de las instancias pequeñas (por piso de pabellón), aquí se obtienen densidades de módulos menores, es decir, menor cantidad de módulos para la cobertura total. Esto también se puede ver de otra forma, por ejemplo a 2.4 GHz considerando la solución óptima, sumamos las cantidades de lugares candidatos seleccionados por piso para el pabellón de EEGGCC (11 módulos) y lo comparamos con la cantidad de lugares candidatos seleccionados considerando el pabellón entero (6 módulos), observando así, un ahorro de 5 módulos (ahorro del 45.45%).

El resultado de esta comparación nos muestra la eficiencia de trabajar con instancias grandes, mayor cantidad de puntos a cubrir y lugares candidatos. Además, también se aprovecha el hecho de que un módulo en determinado piso

puede sensar un punto en otro piso diferente, teniendo así la cobertura de los módulos un barrido en 3 dimensiones.

Por otro lado, al mismo tiempo esta mejora tiene como limitante, el tiempo de ejecución para instancias mayores (mayor cantidad de información a procesar), ya que, realiza una búsqueda exhaustiva para hallar la mejor solución y puede tardar un tiempo considerable encontrarla.

4.2.2 Cálculo de la solución aproximada (heurística) para instancias grandes

La Tabla 4-6 muestra los resultados de la heurística para cada pabellón y para ambas bandas, 2.4 y 5 GHz. Se muestra la cantidad de puntos a cubrir, la cantidad de lugares candidatos (APs), la frecuencia trabajada, el resultado (cantidad de módulos WSSI para lograr cobertura total), densidad de módulos entre los lugares candidatos y tiempo de ejecución.

Como apreciamos en la columna de tiempo de ejecución, los valores han aumentado en comparación a los valores de tiempo en los casos donde se tomó como entrada las matrices de cobertura de cada piso por separado. El promedio de tiempo de ejecución de la heurística en cada piso de EEGCC es de 2.66ms y para el pabellón entero considerando ambas frecuencias (*Both*) es de 255ms. A pesar de existir un aumento considerable, estos valores siguen siendo aceptables considerando el aumento del tamaño de instancia.

TABLA 4-6: RESULTADOS Y TIEMPOS DE COMPUTACIÓN DE LA SOLUCIÓN APROXIMADA (HEURÍSTICA) PARA MATRICES DE COBERTURA DE CADA PABELLÓN

Pabellón	Puntos	Lugares C.	Frec.	Resultados	Densidad	T(ms)
EEGGCC	4343	40	2.4	6	0.15	183
			5	6	0.15	155
			Both	6	0.15	255
McGregor	2179	36	2.4	7	0.19	37
			5	8	0.22	128
			Both	8	0.22	221
Pab. H	1886	34	2.4	5	0.15	37
			5	5	0.15	20
			Both	5	0.15	59
Pab. Z	2882	41	2.4	5	0.12	59
			5	6	0.15	73
			Both	6	0.15	123
Tinkuy	1478	8	2.4	3	0.38	10

FUENTE: Elaboración propia

Aquí también se obtienen bajas densidades de módulos a comparación de las instancias pequeñas. Una comparación simple que muestre que la solución mejora cuando se toma instancias grandes (pabellones enteros) se puede ver considerando lo siguiente. A 2.4 GHz, sumamos la cantidad de lugares candidatos seleccionados en cada piso de EEGGCC (11) y lo comparamos con la cantidad de lugares candidatos seleccionados por el mismo pabellón (6), encontrando un ahorro de 5 módulos de sensado. Como se mencionó anteriormente, este beneficio se da debido a que el rango de cobertura de los módulos se realiza en 3D, es así que inclusive existen casos en los que una solución para un pabellón entero puede no considerar lugares candidatos de un piso determinado como solución final.

Por otro lado, esta mejora está restringida en cuanto a calidad de solución, ya que la heurística nos muestra solo una solución aproximada, mas no la óptima; mientras más grande la instancia del problema, mayor la probabilidad de alejarnos de la solución óptima, se verá que tanto se aleja en la siguiente sección.

4.2.3 Comparación de la solución óptima y aproximada para instancias grandes

A continuación se realizará una comparación de la solución óptima y aproximada (Heurística) para instancias de pabellones enteros.

TABLA 4-7: RESULTADOS Y TIEMPOS DE COMPUTACIÓN DE LA HEURÍSTICA Y SOLUCIÓN ÓPTIMA PARA MATRICES DE COBERTURA DE CADA PABELLÓN

Sol. Optima vs. Heuristica				Resultados		Tiempo (ms)	
Pabellón	Puntos	Lugares C.	Frec.	Heuris	Optim	Heuris	Optim
EEGGCC	4343	40	2.4	6	6	183	50
			5	6	6	155	41
			Both	6	6	255	56
McGregor	2179	36	2.4	7	6	37	42
			5	8	8	128	49
			Both	8	8	221	306
Pab. H	1886	34	2.4	5	5	37	17
			5	5	5	20	36
			Both	5	5	59	73
Pab. Z	2882	41	2.4	5	5	59	25
			5	6	6	73	55
			Both	6	6	123	232
Tinkuy	1478	8	2.4	3	3	10	6

FUENTE: Elaboración propia

En la Tabla 4-7 se logra ver que, en general, los tiempos de ejecución para la heurística son un poco mayores que para la solución óptima. Sin embargo, si promediamos los resultados obtenidos en los 4 primeros pabellones de las frecuencias marcadas como *Both* (ambas frecuencias), y comparamos el promedio calculado para la solución óptima (167ms) y la heurística (164ms), observamos que el tiempo de ejecución para la solución óptima es ligeramente mayor que para la heurística. Al parecer, no se muestra una gran diferencia en cuanto a tiempo de ejecución, aunque lo esperado era que para la heurística los tiempos resultaran mucho menores que para la solución óptima. Esto se debe, a que la ejecución de código en MATLAB no es tan rápido como lo puede ser programar en C, una alternativa para implementaciones futuras.

En este tamaño de instancias aún se mantienen buenos resultados de parte de la heurística, ya que las cantidades de módulos son cercanas a los de la solución

óptima, a excepción del Pabellón McGregor a 2.4 GHz. Esto nos permite ver que efectivamente, al aumentar el tamaño de la instancia existe el riesgo de alejarnos de la solución óptima. Por otro lado, en cuanto a la solución óptima, al aumentar el tamaño de instancia, habrá un momento donde los tiempos de ejecución empiecen a dispararse, ya que este tipo de problema tiene una función de complejidad exponencial como se mostró en la Tabla 2-1.

Es importante mencionar que resolver este problema, la selección de ubicaciones con la menor cantidad posible de módulo WSSI para todos los pabellones mencionados, se pudo realizar de forma separada, pabellón por pabellón. Esto es posible, ya que los pabellones se encuentran separados de forma tal que la cobertura de un AP no cubre puntos de otro pabellón, es decir, el grafo que describe el problema se encuentra particionado (una partición por pabellón). Sin embargo, de haber pabellones cercanos, de manera que el AP de un pabellón cubra posiciones dentro del otro, o si existieran APs en los ambientes exteriores entre pabellones de modo que la red WiFiPUCP no estuviera particionada, en estos casos las interdependencias impedirían dividir la instancia, teniéndose que considerar una instancia mayor. Se tendría que ingresar una matriz de cobertura mucho más grande y el tiempo de ejecución sería un factor a considerar para dar solución a este problema. En esos casos, donde exista interdependencia entre pabellones, sería necesario la heurística para poder resolver y encontrar una solución aceptable en tiempo razonable.

4.3 Lugares candidatos seleccionados

Después de analizar y comparar los resultados de cada tamaño de instancia considerada, encontramos que en general, la ejecución de ambos modelos se realiza en tiempo razonable, ya sea para calcular la solución óptima como para la heurística. Por lo tanto, para el diseño de la red de sensores, se considera la solución óptima.

Ahora, como se requiere una solución que funcione para ambas frecuencias (2.4 y 5 GHz) se utilizará los resultados obtenidos en la fila *Both*. Estos resultados se consiguieron uniendo las matrices de cobertura de 2.4 y 5 GHz en una matriz global, que mantiene los mismos lugares candidatos (columnas) pero que cuenta con el doble de puntos a cubrir. De esta manera, se ejecutaron los códigos en busca de las soluciones (óptima y heurística), dichas soluciones cubren tanto a 2.4

GHz como a 5 GHz. A pesar que los puntos se duplicaron, y con ello el tamaño de instancia aumentó, el tiempo de ejecución todavía es razonable.

A continuación la Tabla 4-8 presenta la solución para nuestro diseño buscando, considerando ambas bandas de frecuencia según lo explicado. Cabe resaltar que para la presentación de esta solución no se consideró la solución a 2.4 GHz del Tinkuy ya que no cubre en ambas bandas de frecuencia.

TABLA 4-8: CANTIDAD DE MÓDULOS WSSI A UTILIZAR POR PABELLÓN

	Puntos a cubrir	Lugares cand. (AP)	Módulos WSSI	Densidad de Mód.	Tiempo (seg)
EEGCC	4343	40	6	0.15	56
McGregor	2179	36	8	0.22	306
Pab. H	1886	34	5	0.15	73
Pab. Z	2882	41	6	0.15	232
Total =>	11290	151	25		

FUENTE: Elaboración propia

Como podemos ver en la Tabla 4-8, la solución óptima devuelve como resultado la cantidad mínima de módulos WSSI necesarios para sensar todos los pabellones considerados, haciendo un total de 25 de 151 posiciones candidatas totales. Así mismo, estas posiciones seleccionadas son indicadas en los vectores que devuelven como resultado el código de la solución óptima.

La Ilustración 4-1 muestra un ejemplo de la distribución de los módulos WSSI en el pabellón H. Dicho pabellón consta de 2 edificaciones (de 4 pisos cada una), una en frente a otra, con diferentes cantidades de aulas en cada piso. Dicha ilustración muestra toda la primera planta del pabellón; aquí podemos apreciar que existen aulas que no cuentan con APs en su interior y además existen algunos APs instalados en los pasadizos. Los APs instalados dentro de un salón tienen el formato 'AP_H_1XX-1', mientras que los instalados en el pasadizo 'aulpabh1XX'.

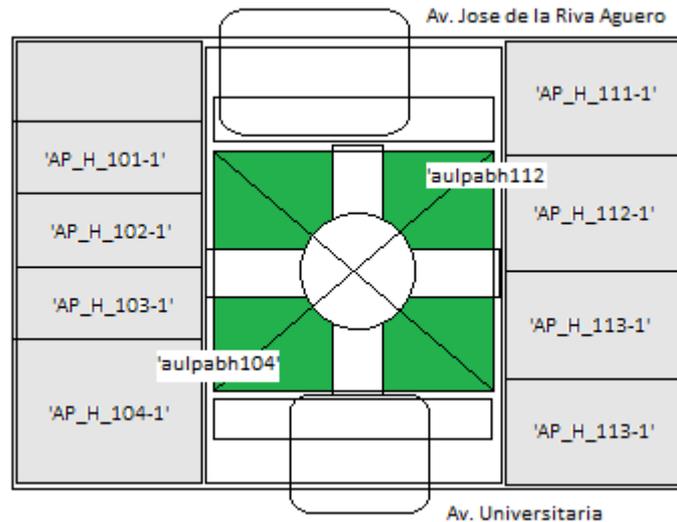


ILUSTRACIÓN 4-1: PRIMERA PLANTA – PABELLÓN H

FUENTE: Elaboración propia

Vista 3D - Instancia Pabellon H - Solucion Combinada (2.4 y 5 GHz)											
AP_H_404-1	AP_H_403-1	AP_H_402-1	AP_H_401-1				AP_H_412-1				
							aulpabh411		aulpabh412		
AP_H_304-1	AP_H_303-1	AP_H_302-1	AP_H_301-1				AP_H_311-1	AP_H_312-1		AP_H_313-1	
AP_H_206	AP_H_205	AP_H_204	AP_H_203	AP_H_202	AP_H_201		AP_H_211-1	AP_H_212-1	AP_H_213-1	AP_H_214-1	
AP_H_104-1	AP_H_103	AP_H_102	AP_H_101				AP_H_111-1	AP_H_112-1	AP_H_113-1	AP_H_114-1	
							aulpabh104	aulpabh112			

ILUSTRACIÓN 4-2: UBICACIÓN DE MÓDULOS WSSI – PABELLÓN H

FUENTE: Elaboración propia

En la Ilustración 4-2 podemos ver la disposición de los módulos de sensado WSSI en todo el pabellón (5 módulos resaltados de color rojo).

Tal como se mencionó en la sección 4.2.2, cuando se trabaja con instancias grandes y coberturas 3D, se tiene como ventaja que los módulos pueden cubrir puntos en pisos diferentes, reduciendo así la cantidad de equipos necesarios para nuestro objetivo.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Se logró cumplir con el objetivo de la tesis, dado que se calculó la cantidad total y ubicación de los módulos de sensado WSSI para lograr cobertura total en las bandas de 2.4 y 5 GHz, siendo así, un total de 25 módulos.
- Se modeló la ubicación de los módulos de sensado WSSI como un problema de optimización, específicamente un modelo de programación lineal de entero mixto. El cual minimiza la función objetivo, cantidad de módulos, y por ende se minimiza el costo total de sensores. Obteniendo así, la solución óptima en tiempo razonable (menos de un segundo).
- Se implementó una heurística utilizando el software MATLAB, el cual entregó soluciones en tiempo polinómico. Se verificó que la ejecución de las instancias que abarcan todo un pabellón, en promedio, tardan igual que cuando se ejecutan con la solución óptima.
- Se verificó lo eficiente que es trabajar en 3D (pabellones enteros) al obtener menor cantidad de módulos WSSI que cuando solo se considera un plano 2D (pisos con varios salones).

Recomendaciones

- Al momento de escanear el espectro para realizar las mediciones en la recolección de data, es recomendable tener los equipos transmitiendo a su máxima potencia con el fin de tener mayor información al momento de calcular el *pathloss*, de esta manera los rangos de cobertura de sensado serán más precisos.
- El levantamiento del mapa de atenuaciones puede mejorarse extrapolando valores de *pathloss* para poder tener una idea del espectro más completo, ya que la sensibilidad del dispositivo con que se realizó las mediciones es limitada.

- A futuro, en caso existan interdependencias entre pabellones, es decir, un AP de un pabellón puede ser sentido en otro pabellón, se debe trabajar con la instancia global agrupando las matrices de pabellones involucrados, e intentar resolver utilizando inicialmente la solución óptima, en caso no soporte este tamaño de instancia, se tiene la heurística para hacer dicho calculo y obtener un resultado en tiempo razonable.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] CCM
2015 Wireless Networks. Consulta: Noviembre de 2015.
<<http://ccm.net/contents/831-wireless-networks>>
- [2] BLOG DEL PLE
2013 Clasificación de redes - Red de área personal.
Consulta: Noviembre de 2015.
<<http://proyectople.blogspot.pe/2013/05/unidad-2-clasificacion-de-redes-red-de.html>>
- [3] TANENBAUM, Andrew S.
2011 Computers networks. Quinta edición.
- [4] UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES
2011 Consulta: Noviembre de 2015.
<<http://www.itu.int/net/ITU-R/index.asp?category=study-groups&mlink=rwp8a-was&lang=es>>
- [5] H3C
WLAN Configuration Guide, Configuring WLAN Client Isolation.
Consulta: Noviembre de 2015.
<http://www.h3c.com.hk/technical_support___documents/technical_documents/wlan/access_point/h3c_wa2200_series_wlan_access_points/configuration/operation_manual/h3c_wa_series_wlan_access_cg-6w100/02/201009/691527_1285_0.htm>
- [6] Mesh Without Wires
2010 Enterprise WiFi Network. Consulta: Noviembre de 2015.
<<https://kseniacoffman.wordpress.com/2010/10/28/see-firetide-at-it-roadmap-event-in-san-francisco-nov-3/>>
- [7] CHAVEZ M., David.
Curso: Ingeniería Inalámbrica. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.

- [8] AIRSPAN
Airspan Solution for the 700 MHz Band, WMAN – Wimax. Consulta: Noviembre de 2015.
<<http://www.airspan.com/solutions/by-industry/frequency/700-mhz/>>
- [9] CCM
2014 Estándar GSM (Sistema global de comunicaciones móviles).
Consulta: Noviembre de 2015.
<<http://es.ccm.net/contents/681-estandar-gsm-sistema-global-de-comunicaciones-moviles>>
- [10] Coverage Planning: Optimization Models and Algorithms
E. Amaldi, A. Capone, M. Cesana, F. Malucelli, F. Palazzo
- [11] FOROUZAN, Behrouz A.
2012 Computer networks: a top-down approach. Primera edición.
- [12] SANTIVANEZ, Cesar A.
2014 “Proyectos de tesis propuestos”
<<http://www.cesarsantivanez.com/tesis2014.html>>
- [13] PETERSON, Larry L.
2012 Computer networks: a systems approach. Quinta edición.
- [14] NETGEAR SUPPORT
2008 Selecting Between Infrastructure and Ad Hoc Wireless Modes.
<[http://kb.netgear.com/app/answers/detail/a_id/954/~selecting-between-infrastructure-and-ad-hoc-wireless-modes](http://kb.netgear.com/app/answers/detail/a_id/954/~/selecting-between-infrastructure-and-ad-hoc-wireless-modes)>
- [15] THAKUR, Dinesh
2014 IEEE 802.11: Wireless LAN.
<<http://ecomputernotes.com/computernetworkingnotes/communication-networks/wireless-lan>>
- [16] Datasheet Aironet 3600
Consulta: Noviembre de 2015.
<http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-3600-series/data_sheet_c78-686782.html>

- [17] 802.11ac: The Fifth Generation of Wi-Fi Technical White Paper
Consulta: Noviembre de 2015.
<http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-3600-series/white_paper_c11-713103.html#_Toc383047839>
- [18] GIL SHACHAM, Alvarion
2012 Wi-Fi DAS Scheme Boosts Capacity, Efficiency In Indoor Enterprise Networks. Consulta: Noviembre de 2015.
<<http://mobiledevdesign.com/learning-resources/wi-fi-das-scheme-boosts-capacity-efficiency-indoor-enterprise-networks>>
- [19] CISCO
2013 Understanding CleanAir Technology to Improve Wlan Spectrum Management – BRKEWN 2013, Cisco CleanAir
- [20] CISCO
Wireless LAN Controller. Consulta: Noviembre de 2015.
<<http://www.cisco.com/c/en/us/products/wireless/wireless-lan-controller/index.html#~benefits>>
- [21] FIREWALL
Introduction To Cisco Wireless Controllers (WLC) - Basic Concepts – WLC Models, Benefits & Their Friendly GUI Interface, Browsing through All APs currently registered. Consulta: Noviembre de 2015.
<<http://www.firewall.cx/cisco-technical-knowledgebase/cisco-wireless/1076-cisco-wireless-controllers-introduction-basic-concepts.html>>
- [22] CISCO
WLC. Logicalis – Configurando funcionalidades Cisco WLC 5760 / Overview WLAN.
- [23] CISCO
2013 Cisco Aironet AP Module for Wireless Security and Spectrum Intelligence (WSSI) Deployment Guide. Consulta: Noviembre de 2015.
<<http://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/wireless/aironet-3600-series/115612-Aironet-Access-Point-Module-for-WSSI-Guide-00.html>>

- [24] CISCO
Cisco RRM – Transmit Power Control and Dynamic Channel Assignment.
Consulta: Noviembre de 2015.
<<http://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/wireless/controller/5-1/configuration/guide/ccg51/c51rrm.html#wp1185120>>
- [25] ACUÑA, Emerson y HERRERA, Renato
2016 “Levantamiento del mapa de atenuaciones de señal electromagnética en las bandas de 2.4 GHz y 5 GHz para la red wireless PUCP”. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería.
- [26] CISCO
2016 “Cisco Aironet Access Point Module for Wireless Security and Spectrum Intelligence Data Sheet” Consulta: 10 de Julio de 2015.
<http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-3600-series/data_sheet_c78-720719.html>
- [27] GAREY, Michael R.
1979 Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness.
- [28] Minimum Set Cover [MSC]
2000 Viggo, Kann. Consulta: Noviembre de 2015.
<<https://www.nada.kth.se/~viggo/wwwcompendium/node146.html>>
- [29] Euroinformatica
The set-covering problem: An instance on the set-covering problem
Consulta: Enero 2016
<http://www.euroinformatica.ro/documentation/programming/!!!Algorithms_COR MEN!!!/DDU0238.html>
- [30] IBM KNOWLEDGE CENTER
ILOG CPLEX Optimization Studio 12.6.0. Consulta: Noviembre de 2015.
<http://www-01.ibm.com/support/knowledgecenter/SSSA5P_12.6.0/ilog.odms.cplex.help/CPLEX/MATLAB/topics/example_cplexmilpex.html?lang=es>