

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL



**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE POSTGRADOS**

PROYECTO DE TITULACIÓN

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

**“MAGÍSTER EN LOGÍSTICA Y TRANSPORTE CON MENCIÓN
EN MODELOS DE OPTIMIZACIÓN”**

TEMA:

*“OPTIMIZACIÓN DE LA ASIGNACIÓN DEL NÚMERO DE
SOLUCIONES DE COBERTURA CELULAR INDOOR EN UN
CONJUNTO DE EDIFICIOS DE NEGOCIOS DE LAS CIUDADES
DE GUAYAQUIL Y MANTA MEDIANTE MODELIZACIÓN
MATEMÁTICA “*

AUTOR:

Ec. Juan Carlos Zerna Torres

Guayaquil - Ecuador

2018

DEDICATORIA

A mis padres, Juan Edmundo Zerna Almeida y Mercedes Eugenia Torres Freres, quienes siempre han sido mi guía y fortaleza.

A mi hermano, José Eduardo Zerna Torres, quien con su apoyo ha sido partícipe de este proyecto.

A la empresa privada, por la apertura al desarrollo de este trabajo, ojalá muchas otras empresas sigan el ejemplo y permitan la implementación de procesos matemáticos de optimización en la toma de decisiones.

A mis amigos, Kike, Su y Stalin, gracias por todos los detalles, amigos como ustedes son la razón para seguir luchando.

A mis amigos y compañeros de estudio del **Paralelo A**, con quienes hicimos frente a numerosas batallas.

A Dios.

Ec. Juan Carlos Zerna Torres

AGRADECIMIENTO

A mi padre, **Ec. Juan Edmundo Zerna Almeida**, por haber tomado la iniciativa de apoyarme en este nuevo proceso formativo, él tomó cartas en el asunto, cuando muchos me dieron la espalda.

A mi madre, **Mercedes Eugenia Torres Freres**, por haberme dado todas las fuerzas y fortaleza para salir adelante en las metas propuestas.

A mi hermano, **Ing. José Eduardo Zerna Torres**, por su apoyo ineludible durante estos dos años de formación.

A mis amigos en especial a **Enrique Rodríguez León, Su Mayorga y Stalin Apolo** por haber compartido los buenos y malos momentos durante esta ardua tarea.

Al **Magister Víctor Vega**, por su innegable ayuda durante sus enseñanzas y por los consejos brindados como tutor de tesis, como profesional y como amigo, durante la elaboración de esta tesis.

A **mis profesores** por haber impartido toda su sabiduría en las materias impartidas.

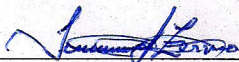
A las personas que estuvieron de manera directa e indirecta ayudando desde el inicio hasta el fin de esta etapa.

Y por supuesto a Dios, sin cuya guía no hubiera sido posible siquiera imaginar un proyecto de esta naturaleza.

Ec. Juan Carlos Zerna Torres

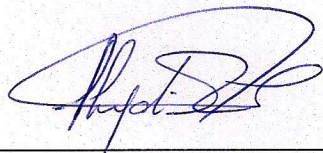
DECLARACIÓN EXPRESA

La responsabilidad por los hechos y doctrinas expuestas en este Proyecto de Graduación me corresponde exclusivamente; el patrimonio intelectual del mismo corresponde exclusivamente a la **Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, Departamento de Postgrados** de la Escuela Superior Politécnica del Litoral.

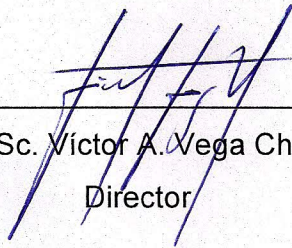


Ec. Juan Carlos Zerna Torres

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



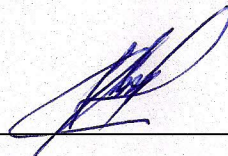
M.Sc. Heydi M. Roa López
Presidente



M.Sc. Víctor A. Vega Chica
Director

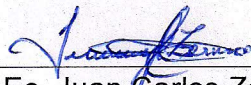


M.Sc. Brenda D. Cobeña Terán
Vocal



Kléber F. Barcia Villacreses, Ph.D.
Vocal

AUTOR DEL PROYECTO



Ec. Juan Carlos Zerna Torres

ÍNDICE GENERAL

PRESENTACIÓN.....	XIV
CAPÍTULO 1.....	1
ANTECEDENTES, PROBLEMA, OBJETIVOS Y METODOLOGÍA.....	1
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.1.1 <i>Comunicaciones y telefonía celular.....</i>	<i>1</i>
1.1.2 <i>Empresas de servicios de redes de comunicaciones fijas y móviles</i>	<i>4</i>
1.1.3 <i>Servicios que prestan las empresas de redes de comunicaciones en el mercado ecuatoriano</i>	<i>4</i>
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
1.3. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	8
1.1. OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	11
1.4.1 <i>Objetivo general.....</i>	<i>11</i>
1.4.2 <i>Objetivos específicos</i>	<i>11</i>
1.2. METODOLOGÍA.....	12
1.5.1 <i>El modelo SCOR.....</i>	<i>12</i>
1.3. ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	13
CAPÍTULO 2.....	15
MARCO TEÓRICO, ESTADO DEL ARTE Y ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL	15
2.1. MARCO TEÓRICO.....	15
2.1.1 <i>Las conexiones y su evolución</i>	<i>15</i>
2.1.2. <i>Cobertura celular en interiores.....</i>	<i>18</i>
2.1.3. <i>Materiales y equipos</i>	<i>18</i>
2.1.4. <i>Pérdida de intensidad de señal.....</i>	<i>23</i>
2.2. ESTADO DEL ARTE	24
2.2.1. <i>Algoritmos de cobertura, algoritmos de ruteo y aplicaciones.....</i>	<i>24</i>
2.2.2. <i>Modelos matemáticos aplicados a cobertura celular y redes.....</i>	<i>27</i>
2.3. ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL	30
2.3.1 <i>El proceso para generar una solución DAS</i>	<i>30</i>
2.3.2. <i>Estadísticas anuales de equipos instalados.....</i>	<i>37</i>
CAPÍTULO 3.....	46
DISEÑO DE LA SOLUCIÓN.....	46
3.1. CONSIDERACIONES DE POTENCIA Y PÉRDIDA DE POTENCIA	46
3.1.1 <i>La potencia de la señal</i>	<i>46</i>
3.1.1 <i>Pérdidas de potencia en el sistema.</i>	<i>48</i>
3.2. RECURSOS Y EDIFICIOS SELECCIONADOS PARA ESTE PROYECTO	49

3.2.1 Optimización de los recursos	49
3.2.2 Edificios que se consideran en este proyecto	50
3.3. ESTRATEGIA DE SOLUCIÓN	51
3.3.1. Algoritmo de cobertura ponderado.....	51
3.3.2. Algoritmo de ruteo de vehículos (VRP).....	52
3.4. DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN.....	56
3.4.1. Walk test de la empresa productora de artículos de acero	56
3.4.2. Simulación inicial de la cobertura celular para la empresa de productos de acero	58
3.4.3. Áreas de la empresa que necesitan cobertura.....	59
3.4.4. Resultados de la aplicación de los modelos matemáticos en la empresa de productos de acero	61
3.4.4. Empresa de productos de acero: Simulación de la cobertura con 4 antenas SISO.....	64
3.4.5. Mapas del Walk Test del Centro Comercial en Manta	65
3.4.6. Simulación inicial del Centro comercial por pisos	70
3.4.7. Áreas del centro comercial que necesitan cobertura	74
3.4.8. Resultados de la aplicación de los modelos matemáticos en el centro comercial.....	78
3.4.9. Centro comercial: Simulación de la cobertura con antenas SISO en la planta baja, piso 1 y subsuelo 1	83
3.4.10. Resumen de los resultados obtenidos	86
CAPÍTULO 4.....	88
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	88
4.1. CONCLUSIONES.....	88
4.2. RECOMENDACIONES.....	90
4.3. TRABAJO FUTURO	91
BIBLIOGRAFÍA	91
APÉNDICE	93
A.1. DIAGRAMAS DE WALK TEST DE LA EMPRESA DE PRODUCTOS DE ACERO	93
A.1.1. DL THPT 850.....	93
A.1.2. DL THPT 1900.....	94
A.1.3. SHORT CALL 1900 PSC.....	94
A.2. MODELO MATEMÁTICO DE COBERTURA APLICADO EN LA EMPRESA DE PRODUCTOS DE ACERO.....	95
A.3. MODELO MATEMÁTICO DE RUTAS APLICADO A LA EMPRESA DE PRODUCTOS DE ACERO.....	98
A.4. DIAGRAMAS DEL SEGUNDO WALK TEST PARA EMPRESA DE PRODUCTOS DE ACERO.....	102
A.4.1 DL HSPA THROUGHPUT	102

A.4.2. SHORT CALL FREE MODE EC NO.....	103
A.4.3. SHORT CALL FREE MODE PSC	104
A.4.4. SHORT CALL FREE MODE RADIO TECHNOLOGY.....	105
A.4.5. SHORT CALL RSCP	106
A.5. DIAGRAMAS DE WALK TEST DEL CENTRO COMERCIAL	107
A.5.1 DESCARGA LTE_PCI PISO 1	107
A.5.2. DESCARGA LTE_RSRP	108
A.5.3. LLAMADA CORTA_RSCP PLANTA BAJA.....	109
A.5.4. IDLE UMTS_TECHNOLOGY SUBSUELO	109
A.6. MODELO MATEMÁTICO DE COBERTURA APLICADO AL SUBSUELO 1 DEL CENTRO COMERCIAL.....	110
A.7. MODELO MATEMÁTICO DE COBERTURA APLICADO AL PISO 1 DEL CENTRO COMERCIAL.....	112
A.8. MODELO MATEMÁTICO DE COBERTURA APLICADO A LA PLANTA BAJA DEL CENTRO COMERCIAL	115
A.9. MODELO MATEMÁTICO DE RUTEO APLICADO AL SUBSUELO 1 Y SUBSUELO 2 DEL CENTRO COMERCIAL.....	118
A.10. MODELO MATEMÁTICO DE RUTEO APLICADO A LA PLANTA BAJA DEL CENTRO COMERCIAL.....	124

ÍNDICE DE CUADROS

FIGURA 1 NÚMERO DE USUARIOS DE TELÉFONO CELULAR ALREDEDOR DEL MUNDO	3
FIGURA 2. PLAN DE DISEÑO DE LA SOLUCIÓN (DAS)	7
FIGURA 3 CABLE COAXIAL SEWELL RG59	19
FIGURA 4 REPETIDORES MARCA WINCO INSTALADOS EN UNA BODEGA.	20
FIGURA 5 DIVISOR DE POTENCIA DE DOS VÍAS PARA 700 – 2700 MHZ.	21
FIGURA 6 ANTENA MIMETIZADA UBICADA EN ESPOL, CAMPUS PROSPERINA.	22
FIGURA 7 ANTENA OMNIDIRECCIONAL Y DE PANEL PARA INTERIORES.	22
FIGURA 8 ALGORITMO DE COBERTURA (SCP)	26
FIGURA 9 MODELO NETWORK OPTIMISATION PROBLEM (NOP).....	28
FIGURA 10 ESQUEMA DEL PROCESO DE GENERACIÓN DE SOLUCIÓN DE COBERTURA CELULAR EN INTERIORES.	31
FIGURA 11 RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN DE LA RED MÓVIL.....	32
FIGURA 12 GENERACIÓN DEL LOG DE LA INFORMACIÓN RECOPIADA.....	33
FIGURA 13 PLOT DE LA SITUACIÓN ACTUAL.	33
FIGURA 14 UBICACIÓN EN EL PLANO DE LAS ANTENAS Y OTROS EQUIPOS.	35
FIGURA 15 VENTANA DE VISUALIZACIÓN DEL SOFTWARE IBWAVE	35
FIGURA 16 ANTENAS INSTALADAS EN EL PERÍODO 2015 – 2018.....	37
FIGURA 17 INGRESOS ANUALES DEL PERÍODO 2015 - 2018.	38
FIGURA 18 COSTOS ANUALES DEL PERÍODO 2015 – 2018.	39
FIGURA 19 REPRESENTACIÓN DE LA RECEPCIÓN DE POTENCIA POR PARTE DE LA ANTENA DONADORA O DONANTE.....	48
FIGURA 20 SHORT CALL 850 RSCP - WALK TEST TECNOLOGÍA 2G.	56
FIGURA 21 SHORT CALL 1900 RSCP – WALK TEST TECNOLOGÍA 3G.	57
FIGURA 22 MAPA DE SIMULACIÓN DE LA COBERTURA PARA LA EMPRESA DE PRODUCTOS DE ACERO.	59
FIGURA 23 ÁREAS QUE NECESITAN COBERTURA EN LAS OFICINAS DE LA EMPRESA. ...	60
FIGURA 24 COMPARACIÓN DEL NÚMERO DE ANTENAS EN LAS SOLUCIONES DE COBERTURA CELULAR PARA LA EMPRESA DE PRODUCTOS DE ACERO.....	61
FIGURA 25 ESQUEMÁTICO DE LA SOLUCIÓN DE COBERTURA PARA LA EMPRESA DE PRODUCTOS DE ACERO – NUEVO DISEÑO.	62

FIGURA 26 COMPARACIÓN DE LOS METROS DE CABLE EN LAS SOLUCIONES DE COBERTURA CELULAR PARA LA EMPRESA DE PRODUCTOS DE ACERO.....	63
FIGURA 27 COMPARACIÓN DEL NÚMERO DE SPLITTERS EN LAS SOLUCIONES DE COBERTURA CELULAR PARA LA EMPRESA DE PRODUCTOS DE ACERO.....	63
FIGURA 28 MAPA DE SIMULACIÓN DE LA COBERTURA CON 4 ANTENAS TIPO SISO – NUEVO DISEÑO.....	64
FIGURA 29 WALK TEST DEL PISO 1 DEL CENTRO COMERCIAL, MUESTRAS POR TECNOLOGÍA.	66
FIGURA 30 WALK TEST DEL PISO 1 DEL CENTRO COMERCIAL, DESCARGA DUAL RXLEV	67
FIGURA 31 WALK TEST DEL PISO 1 DEL CENTRO COMERCIAL DESCARGA DUAL RSCP	68
FIGURA 32 WALK TEST DEL PISO 2 DEL CENTRO COMERCIAL POR TECNOLOGÍA.	68
FIGURA 33 WALK TEST DEL PISO 2 DEL CENTRO COMERCIAL RSCP.	69
FIGURA 34 WALK TEST DEL PISO 2 DL LTE RSRP.....	69
FIGURA 35 MAPA DE SIMULACIÓN DE LA COBERTURA CELULAR DEL PISO 2 DEL CENTRO COMERCIAL.	70
FIGURA 36 MAPA DE SIMULACIÓN DE LA COBERTURA CELULAR DEL PISO 1 DEL CENTRO COMERCIAL.	71
FIGURA 37 MAPA DE SIMULACIÓN DE LA COBERTURA CELULAR DE LA PLANTA BAJA DEL CENTRO COMERCIAL.	72
FIGURA 38 MAPA DE SIMULACIÓN DE LA COBERTURA CELULAR DEL SUBSUELO 1 DEL CENTRO COMERCIAL.	73
FIGURA 39 MAPA DE SIMULACIÓN DE LA COBERTURA CELULAR DEL SUBSUELO 2 DEL CENTRO COMERCIAL.	73
FIGURA 40 ÁREAS QUE NECESITAN COBERTURA EN EL SUBSUELO 1 DEL CENTRO COMERCIAL.	74
FIGURA 41 ÁREAS QUE NECESITAN COBERTURA EN LA PLANTA BAJA DEL CENTRO COMERCIAL.	75
FIGURA 42 ÁREAS QUE NECESITAN COBERTURA EN LA PISO 1 DEL CENTRO COMERCIAL.	76
FIGURA 43 COMPARACIÓN DEL NÚMERO DE ANTENAS EN LAS SOLUCIONES DE COBERTURA CELULAR EN EL CENTRO COMERCIAL.	78

FIGURA 44 ESQUEMÁTICO DE LA SOLUCIÓN DE COBERTURA DE LOS PISOS 1 Y 2 DEL CENTRO COMERCIAL – NUEVO DISEÑO.	79
FIGURA 45 ESQUEMÁTICO DE LA SOLUCIÓN DE COBERTURA DE LA PLANTA BAJA DEL CENTRO COMERCIAL – NUEVO DISEÑO.	80
FIGURA 46 ESQUEMÁTICO DE LA SOLUCIÓN DE COBERTURA PARA LOS SUBSUELOS 1 Y 2 DEL CENTRO COMERCIAL - NUEVO DISEÑO.	81
FIGURA 47 COMPARACIÓN DE LOS METROS DE CABLE EN LAS SOLUCIONES DE COBERTURA CELULAR PARA EL CENTRO COMERCIAL.	82
FIGURA 48 COMPARACIÓN DEL NÚMERO DE SPLITTERS EN LAS SOLUCIONES DE COBERTURA PARA EL CENTRO COMERCIAL.	83
FIGURA 49 MAPA DE SIMULACIÓN DE LA COBERTURA DEL PISO 1 CON ANTENAS TIPO SISO – NUEVO DISEÑO.	84
FIGURA 50 MAPA DE SIMULACIÓN DE LA COBERTURA DE LA PLANTA BAJA CON ANTENAS TIPO SISO – NUEVO DISEÑO.	85
FIGURA 51 MAPA DE SIMULACIÓN DE LA COBERTURA DEL SUBSUELO 1 CON ANTENAS TIPO SISO – NUEVO DISEÑO.	86
FIGURA 52 NIVEL DE POTENCIA EN DBM SEGÚN OPERADORA CELULAR.....	87

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 FORTALEZA DE LA SEÑAL.	47
TABLA 2 FORTALEZA DE LA SEÑAL.	47
TABLA 3 PÉRDIDAS POR DISTANCIA EN DBM EN LAS OFICINAS DE LA EMPRESA DE PRODUCTOS DE ACERO.	60
TABLA 4 PÉRDIDAS POR DISTANCIA EN DBM EN EL SUBSUELO 1 DEL CENTRO COMERCIAL.	76
TABLA 5 PÉRDIDAS POR DISTANCIA EN DBM EN LA PLANTA BAJA DEL CENTRO COMERCIAL.	77
TABLA 6 PÉRDIDAS POR DISTANCIA EN DBM EN EL PISO 1 DEL CENTRO COMERCIAL. .	77

ABREVIATURAS O SIGLAS

RSCP	Received Signal Code Power o Potencia del código de señal recibida.
RXLV	RX Level o Nivel de señal en tecnología 2G.
GSM	Global System for Mobile communications o Sistema global para Comunicaciones Móviles.
3G	Tecnología de tercera generación.
2G	Tecnología de segunda generación.
LTE	Long Term Evolution.
DAS	Distributed Antenna System o Sistema Distribuido de Antenas.
SCP	Set covering problem o Problema de cobertura de conjuntos.
VRP	Vehicle routing problem o Problema de ruteo de vehículos.
DAS	Distributed antenna system o Sistema distribuido de antenas.
SCOR	Supply Chain Operations Reference o Referencia de operaciones de cadena de suministros.

PRESENTACIÓN

En la teoría económica, las decisiones son elecciones con distintas líneas de acciones, mismas que se nos presentan día a día. Son esas decisiones las que determinan el éxito o fracaso de cualquier operación que queramos emprender, sea esto a nivel personal o empresarial. En una organización empresarial, la elección correcta entre diversas opciones presentes para poder así concretar un proyecto influye sustancialmente en el futuro de la empresa y por ende de sus empleados, por ende, la importancia de saber analizar cada escenario, para proceder a tomar las mejores decisiones.

En los últimos años, la investigación de operaciones ha ido ganando terreno, esto primo a nivel internacional, donde grandes empresas, sean estas logísticas o de transporte aéreo de pasajeros o empresas de productos de consumo masivo, entre otras, brindaron apertura a los estudios de operaciones e incluso unas llegaron a crear departamentos de investigación de operaciones.

Lamentablemente hay un hecho innegable y es que al referirnos a la toma de decisiones, también tenemos que considerar la naturaleza de las decisiones y su racionalidad, de allí que los gerentes de las empresas, acostumbrados a tomar decisiones en forma empírica, muy difícilmente cambian su forma de pensar y basan sus decisiones en los procesos que les han funcionado a lo largo de los años, muy a pesar de que existe una metodología científica que produce soluciones, sino óptimas, mucho mejores que las producidas empíricamente. Aún hay una falta de apertura hacia los procesos de optimización, por parte de las empresas ecuatorianas, de allí que es de aplaudir cuando las empresas privadas deciden iniciar un proceso de modelización para la optimización de sus procesos.

El presente trabajo se enfoca en el desarrollo de un modelo matemático para optimizar el proceso de asignación de soluciones de cobertura celular en interiores, dividido en tres etapas:

1. La aplicación de modelos matemáticos para el diseño de las soluciones de cobertura celular en interiores, en un conjunto de edificios de negocios de las ciudades de Guayaquil y Manta.
2. La simulación de la cobertura celular de los respectivos diseños, mediante el uso del software **iBwave**.
3. La comparación de las simulaciones, antes y después de aplicar los modelos matemáticos, con el objetivo de analizar el desempeño de la solución propuesta, dando como resultado, un proceso matemático de optimización para la identificación y asignación de soluciones de cobertura celular en interiores. Esto al final, le brindará a la empresa privada un valor agregado al servicio ofrecido a los clientes.

La optimización de los recursos, propios o ajenos le brindará a la empresa una ventaja competitiva, a la vez que se mantienen los estándares de calidad, que garanticen el servicio de cobertura celular brindado por las empresas de telefonía establecidas en el país.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES, PROBLEMA, OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

1.1 Antecedentes

1.1.1 Comunicaciones y telefonía celular

La necesidad de comunicarse con otros es una característica esencial de todos los seres vivos. La comunicación ha evolucionado a la par de la tecnología. Ella ha sido en muchos campos una gran aliada para los más grandes logros de la humanidad. En un principio, con la tecnología existente, el hombre pudo transmitir mensajes mediante la travesía de mensajeros, señales de humo, por medio de palomas mensajeras, luego tuvimos la aparición del telégrafo en 1838 y en 1876 el teléfono convencional. En la actualidad, junto a los computadores, ahora cada vez más potentes, contamos con una herramienta mucho más portátil e interactiva en la telefonía celular.

El concepto de comunicaciones, gracias a la tecnología, se ha ampliado hasta convertirse en telecomunicaciones. Mientras la comunicación es un término general que define el intercambio de información de un lugar a otro y de una persona a otra persona, la telecomunicación, se encarga de la transmisión de señales a través de distancias mucho más largas y a través de un medio, siendo este medio alámbrico o inalámbrico. Es aquí donde el celular se ha convertido en una herramienta primordial del día a día.

El uso de teléfonos celulares nos permiten estar comunicados las 24 horas del día y enterarnos de las noticias, casi al mismo tiempo en que estas transcurren (Donner, 2008; Duncombe & Boateng, 2009). En el mundo empresarial, cada vez más globalizado, es importante que las empresas puedan responder inmediatamente ante cualquier inquietud que sus clientes puedan tener, pues una atención eficaz y eficiente puede significar una negociación exitosa y la consecución de miles de dólares.

El celular, a nivel empresarial se ha convertido en una herramienta de negocios muy útil. Estar comunicados es primordial para que las empresas puedan comunicarse a tiempo con sus clientes y proveedores, los tiempos se pueden optimizar, pues ya no se necesita estar físicamente en la oficina para atender asuntos de carácter logístico u otro tipo de negocios. De usarse apropiadamente, el celular puede hacernos más productivo en cualquier lugar en que nos encontremos (Liang, Huang, Yeh, & Lin, 2007).

El número de usuarios de telefonía celular a nivel mundial sigue creciendo, año a año. Según datos del portal estadístico Statista, se estima que para el año 2018, el número de usuarios de teléfonos celulares llegará a ser de aproximadamente 4.93 billones de personas, mientras que para el año 2019, se estima que el número de usuarios será superior a 5 billones, según podemos observar en la **Figura 1**, es decir, habrá un poco más de 5 billones de personas que necesitan estar comunicados, realizando llamadas telefónicas o enviando mensajes de texto. Como podemos observar en la gráfica, el número de usuarios efectivamente sigue creciendo. Es de vital importancia para las operadoras de telefonía celular reconocer que al mismo tiempo que el número de usuarios crece, el servicio que se les preste debe ser de calidad, garantizando la transmisión de datos.

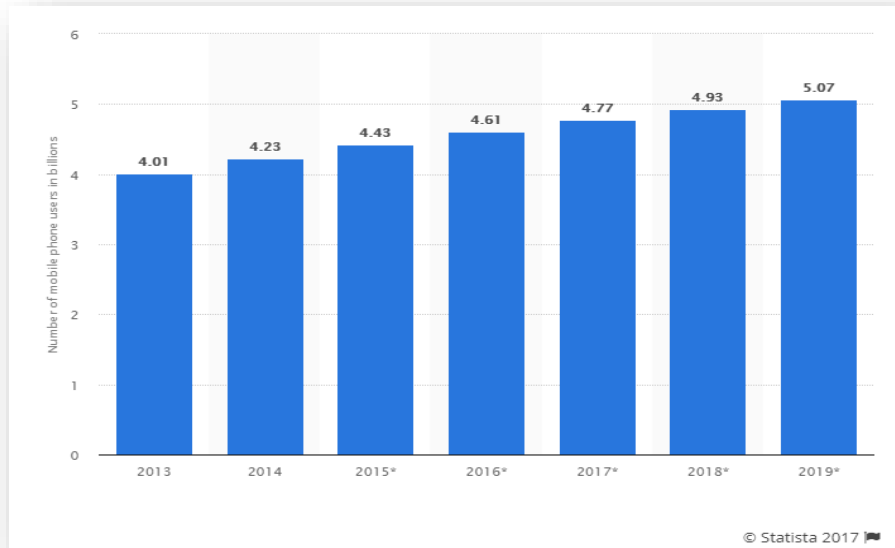


Figura 1 Número de usuarios de teléfono celular alrededor del mundo

Es justamente debido a esta tendencia, que las grandes empresas de comunicación celular deben preocuparse de brindar cada vez más un mejor servicio a todos sus usuarios, atendiendo eficientemente las quejas que los usuarios podrían tener, realizando estudios que indiquen los mejores lugares para instalar antenas que puedan brindar cobertura en varias áreas, asegurando así, que las llamadas telefónicas, los servicios de mensajería, entre otros servicios, no sufran percances. Sin embargo, las grandes operadoras de telefonía celular usualmente no se encargan directamente de la instalación de estos equipos, sino que contratan a otras empresas, privadas o públicas, si fuera el caso, que prestan servicios de redes de comunicación fija y móvil.

Por todo lo anteriormente expuesto podemos decir que las comunicaciones vía celular y los múltiples problemas que podrían presentarse en el proceso de la instalación de los sistemas de comunicación merecen toda nuestra atención, pues son de gran relevancia en la actualidad.

1.1.2 Empresas de servicios de redes de comunicaciones fijas y móviles

Las empresas de servicios de redes de comunicaciones fijas y móviles son aquellas empresas que desarrollan soluciones y contenido para las operadoras de Telecomunicaciones, como Claro, Telefónica, CNT y clientes empresariales.

Sus objetivos principales son:

- Facilitar la conectividad.
- Aumentar la productividad y;
- Fomentar el uso de las Tecnologías de Información y Comunicaciones.

1.1.3 Servicios que prestan las empresas de redes de comunicaciones en el mercado ecuatoriano

Las empresas de logística en redes de comunicaciones fijas y móviles en el Ecuador ofrecen en la actualidad una gama de servicios muy amplia, su giro de negocio es el aseguramiento de la transmisión eficaz de datos. Entre los servicios más importantes podemos citar:

- Diseño de redes.
- Optimización de red.
- Sistema telefónico privado basado en IP.
- Cobertura móvil en interiores, entre otras.

Cada uno de estos servicios a su vez se subdivide, como veremos a continuación:

1) Los servicios de Diseño de redes incluyen:

- Ingeniería de redes inalámbricas GSM/ GPRS/ EDGE/ WCDMA/ HSxPA/ Wifi/ Wimax/ CDMA2000/ EVDO.
- Planeación de cobertura y capacidad en interiores y exteriores.
- Proyección y planeación de capacidad para Tráfico de voz y datos.
- Sintonización de modelos de propagación.
- Planeación de frecuencias.
- Planeación de lista de vecinos.
- Survey y validación de sitios.
- Datafill y parámetros de Ingeniería.
- Medición de ruido e interferencia externa.
- Medición de radiación no ionizante.

2) El servicio de Optimización de red incluye:

- Optimización de redes móviles GSM/ GPRS/ EDGE/ WCDMA/ HSxPA/ Wifi/ Wimax/ CDMA2000/ EVDO.
- Sintonización inicial o integración de nuevos sitios.
- Drive test de verificación de cambios y actualizaciones en la red.
- Atención a quejas de clientes VIP por problemas de cobertura, tráfico o calidad.
- Optimización de áreas de localización y de enrutamiento.
- Optimización de servicios de voz y datos.
- Optimización de Plan de Frecuencias y lista de vecinos.
- Ajuste fino de parámetros de control de potencia, movilidad, codificadores de voz.
- Control de propagación y polución de RF.
- Benchmarking de servicios de voz y datos.

3) El servicio de sistema telefónico privado basado en IP incluye:

- Auditoría y evaluación de red de datos.
- Diseño y asesoría en el desarrollo del sistema IP PBX.
- Enfoque en la calidad de comunicación.
- Servicio personalizado y de rápida implementación.
- Desarrollo de documentación completa y pruebas de performance de la red.

4) Finalmente, el servicio de cobertura móvil en interiores incluye:

- Administración y gestión de la infraestructura.
- Diseño de Radiofrecuencia.
- Administración y compra de materiales.
- Instalación e integración.
- Optimización.
- Operación y mantenimiento.

Como podemos observar, este tipo de empresas ofrecen una serie de servicios y en su gran mayoría estos servicios tienen gran potencial para el desarrollo de modelos matemáticos de optimización.

1.2. Planteamiento del problema

El presente proyecto va a tratar justamente sobre el servicio de cobertura móvil en interiores, esto es, la identificación de los lugares donde se van a instalar las antenas de celular en interiores y el número óptimo de antenas a instalar en el piso.

En el proceso de instalación de antenas que brindan cobertura móvil en interiores, se desea utilizar la modelización matemática para resolver el problema de selección de los sitios apropiados para el diseño del DAS, Distributed antenna system, por sus siglas en inglés y posterior instalación de los equipos, ver **Figura 2**.

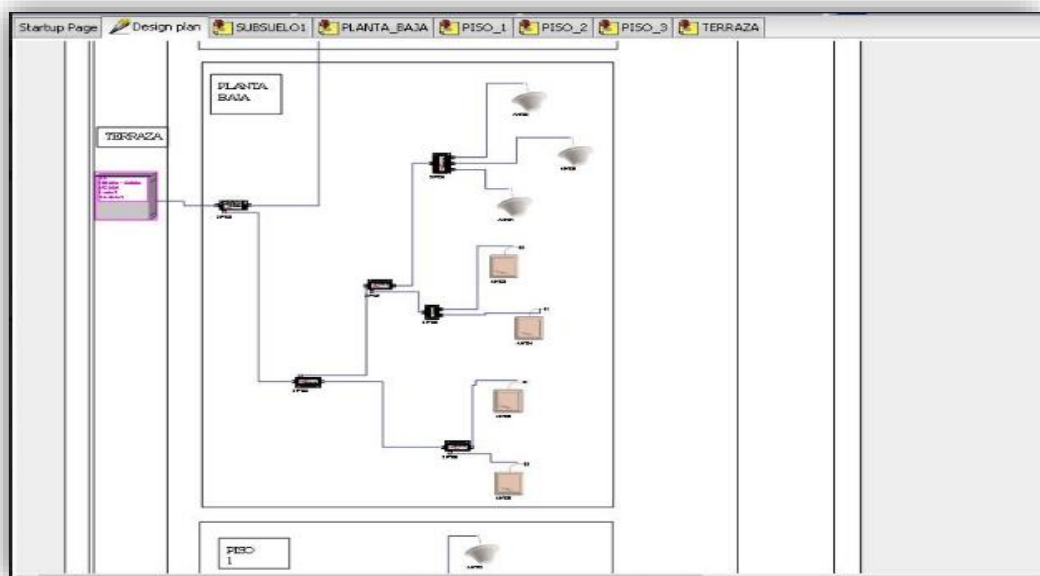


Figura 2. Plan de diseño de la solución (DAS)

El DAS consiste en un diagrama que indica la localización en el espacio de las antenas y de los equipos complementarios que conforman el sistema que va a permitir una mejor cobertura celular dentro del edificio. Es importante, antes de realizar el DAS, conocer el número de antenas que se van a instalar y su ubicación.

El problema de la localización óptima es un problema clásico de la optimización matemática, en este tipo de problemas, mediante optimización combinatoria se espera seleccionar la localización ideal para instalar, sea una planta en el caso de centros de distribución o equipos que, en el caso de la telefonía celular, puedan brindar la esperada cobertura a regiones o áreas de interés.

En el presente proyecto estamos interesados en determinar, mediante modelización matemática, la localización el mínimo número de antenas a instalar en cada uno de los pisos de los edificios de negocios, en los que se haya reportado por los clientes alguna falencia o problema en cuanto a la intensidad de señal, que haya impedido realizar una llamada telefónica o enviar mensajes de texto, así como el tiempo de identificación de la asignación de antenas para la solución de cobertura celular en interiores.

1.3. Justificación del problema

El servicio de Instalación de soluciones de cobertura celular en interiores es un servicio que requiere mucha atención.

Este proceso requiere un esfuerzo conjunto. Empezando por un análisis o estudio de la situación actual, la selección de la solución a presentar al cliente, para luego en la etapa de instalación, seleccionar los equipos necesarios para el trabajo, así como la presentación de reportes que incluyen estadísticas de caídas de llamadas, fallas de acceso al servicio, tasas de transferencia de datos, entre otros.

La empresa estima que, en promedio, la demanda por este servicio ha crecido un 3% anualmente. Sin embargo, el año 2017, que fue un año atípico, en el cual muchas empresas se vieron afectadas por la política económica del gobierno de turno, apenas se pudo realizar nueve trabajos de este tipo, en comparación con los 21 trabajos realizados en el año 2016.

Otro factor importante de consideración, son los costos. Los costos de instalación y adquisición de los equipos y materiales varían en función de los equipos que se instalen y de la complejidad de estos.

El costo de instalación de un sistema con varias antenas puede bordear los \$1000, esta cantidad puede variar de acuerdo con el número de equipos y los materiales que sean necesarios para la instalación.

El costo de adquisición de los equipos y materiales, depende de la marca, de la procedencia, así como de la complejidad de los mismos, por ejemplo, el costo de una antena omnidireccional Signalbox 4G LTE 698-2700 Mhz 2.0 – 5.0 dBi procedente de USA puede ascender a \$36, el de una antena de panel Systimax Cell-Max 698–960 MHz, 1710–2700 MHz procedente de USA puede ascender a los \$45, el costo de un splitter S-2-CPUSE-L-NI - 698-2700 MHz marca Andrew también procedente de USA puede superar los \$92, el costo de una repetidora WINCO LX procedente de China puede superar fácilmente los \$400. Cada uno de estos equipos y materiales son importantes para garantizar una muy buena cobertura celular, pero dependiendo de la complejidad del trabajo se asigna uno u otro equipo.

Esta variabilidad de los precios requiere por tanto un control y manejo óptimo de las existencias, pues, en caso de manejar inventario, no podemos darnos el lujo de adquirir ni muy pocas ni demasiadas unidades. Se necesita un manejo óptimo de los recursos existentes.

Por otro lado, el tiempo requerido para poder diseñar una solución de cobertura de interiores es crucial. En la actualidad, el diseño de una solución de cobertura para edificios que requieran de 10 antenas de celular requiere en promedio más de un día de trabajo, esto puede variar, dependiendo de la complejidad del edificio en el que se va a trabajar, misma que también puede determinar los equipos a utilizarse.

Este tiempo es necesario, porque el ingeniero a cargo del diseño del DAS debe realizar una serie de combinaciones, para luego simular la cobertura de cada combinación y finalmente seleccionar la combinación que brinda una mejor cobertura.

Por este motivo, resulta importante que el manejo de los recursos de la empresa en forma de horas hombre, equipos, materiales y tiempo, sea óptimo.

Es de indicar, además, que el presente trabajo va a representar un gran aporte a la empresa en la cual se implementará este sistema y de la cual se va a extraer los datos necesarios para la realización del estudio, pues una vez que el modelo matemático se haya aplicado, el mismo le indicará a la empresa la localización y número de antenas que serán necesarias por piso y además podrá utilizar la solución generada para realizar el diseño del DAS. Este modelo le servirá a la empresa para futuros proyectos que sean semejantes.

1.1. Objetivos del proyecto

1.4.1 Objetivo general.

Diseñar un modelo matemático de fácil aplicación, que le permita a las empresas de logística en servicios de redes de comunicaciones fijas y móviles y a sus colaboradores, personas no familiarizadas con temas de optimización, solucionar los siguientes problemas:

- Determinar el número óptimo de antenas a ser colocadas dentro de los edificios de negocios.
- Desarrollar la simulación del diseño de instalación de las soluciones sugeridas por el modelo matemático mediante el software de simulación de diseño de la instalación, **iBwave**.
- Realizar el análisis de las simulaciones y determinar los equipos que se deberán instalar.

1.4.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos del presente proyecto de titulación son los siguientes:

- Definir una optimización de la asignación del número de antenas de celular para interiores, que garantice la cobertura de señal inalámbrica a los clientes presentes en el edificio, empresa, centro comercial, etc.
- Establecer un verdadero servicio de optimización de cobertura para ofrecer a las operadoras celulares, los clientes, un valor agregado.
- Mejorar los requerimientos de recursos propios o ajenos, en cuanto a recursos humanos y materiales y por supuesto, garantizar la cobertura celular requerida.

1.2. Metodología.

1.5.1 El modelo SCOR

La metodología a aplicarse en este proyecto consiste en la aplicación del modelo de referencia de operaciones de la cadena de abastecimiento.

El **SCOR** o **Supply Chain Operations Reference**, por sus siglas en inglés, es un modelo utilizado por las empresas y sirve para mejorar la cadena de abastecimiento, tanto interna como externamente.

El modelo fue desarrollado en el año 1996 por el SCC, Supply Chain Council, por sus siglas en inglés. El modelo define las prácticas comunes de administración de la cadena de abastecimiento y las compara con las mejores prácticas, de tal manera que las empresas manufactureras, los distribuidores y minoristas puedan evaluar la efectividad de las operaciones de su cadena de suministro, así como medir las operaciones específicas del proceso.

El modelo contempla cinco procesos principales de gestión, los cuales son: **la planificación, el aprovisionamiento, la manufactura o servicio, la entrega o distribución y el retorno o la devolución.**

En la etapa de **planificación** nos referiremos al análisis de la situación actual, lo que nos permitirá entender el problema existente. Este análisis también nos permitirá proponer modelos matemáticos que permitan alcanzar los objetivos planteados en este trabajo.

En la etapa de **aprovisionamiento**, requeriremos los datos provenientes del walk test. Este proceso será desarrollado en siguiente capítulo.

En la etapa de **servicio o manufactura** vamos a desarrollar los modelos matemáticos a evaluar.

En la etapa de **distribución**, daremos a conocer los resultados alcanzados con el trabajo conjunto del proceso de optimización y la simulación de la cobertura.

Para finalmente, en la etapa de **retorno o devolución**, llegar a las recomendaciones respectivas, producto de la implementación de los modelos al proceso de diseño del DAS.

1.3. Estructura de la Tesis.

Para la elaboración de este proyecto de investigación, el trabajo se divide en los siguientes capítulos:

Capítulo 2: Marte teórico, estado del arte y análisis de la situación actual.

El Capítulo 2 va a tratar de los diferentes modelos matemáticos de optimización que han sido usados para resolver el problema de asignación del número de antenas de celular en interiores, así como conceptos básicos de la terminología propia del sistema de distribución de antena en edificios, los diferentes equipos que normalmente se instalan y los factores que afectan la cobertura celular dentro de edificios.

Además, se estudiará en detalle el proceso actual de la asignación del número de antenas de celular para interiores, el proceso de simulación del DAS mediante el uso del software ***iBwave***, así como la elección de la mejor solución que brinde cobertura.

Capítulo 3 Diseño de la solución.

Este capítulo se refiere a la aplicación de los modelos matemáticos mencionados en el capítulo 2, mismos que servirán para determinar el número óptimo de antenas de celular para interiores.

Los resultados de los algoritmos se van a comparar, primero para seleccionar el modelo matemático que nos indique el número óptimo de antenas de celular a instalar y su localización, para luego, utilizar estos datos, como entrada en el software iBwave y proceder a simular el DAS para determinar la cobertura que la solución seleccionada brinda en cada edificio de negocios.

Capítulo 4 Conclusiones y recomendaciones.

Finalmente, en el Capítulo 4 se presentarán las conclusiones y recomendaciones, resultantes de la aplicación de los modelos matemáticos desarrollados en este proyecto.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO, ESTADO DEL ARTE Y ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1 Las conexiones y su evolución

A medida que surge una nueva tecnología, también surgen nuevos requerimientos. Algunos de estos requerimientos se presentan en forma de equipos sofisticados y materiales, mismos que actúan como complementos, permitiendo que la nueva tecnología sea aplicable en las redes de comunicación del país.

La necesidad de estar cada día más comunicado hace que las grandes empresas productoras de equipos celulares oferten cada año nuevas unidades, con nuevas bondades, mismas que requieren de la infraestructura existente, provista por las operadoras celulares y de no existir esta infraestructura, la misma debe ser diseñada para su funcionamiento en un corto plazo. Esta evolución requiere cada vez más equipos y materiales especializados, después de todo, la teoría económica de las necesidades sigue aún vigente al pasar los años (Schumpeter & Backhaus, 2003). Así, es muy importante repasar las diferentes etapas de la evolución de las redes y como la tecnología pone a nuestra disposición ciertos servicios que antes eran imposibles.

a) Las conexiones GSM y GPRS

La conexión **GSM**, cuyas siglas significan Global System for Mobile Communications, permite la transmisión tanto de datos, así como de voz. Aunque es considerada la tecnología móvil más utilizada, presenta problemas de interferencia y es justamente este tipo de problemas el que dio origen a la búsqueda de una mejora en la conexión, por lo que surge la conexión **GPRS**, una especie de conexión GSM mejorada.

Las siglas de **GPRS** significan General Packing Radio Service. Esta conexión permite el envío de mensajes SMS (Short Message Service) y multimedia MMS (Multimedia Messaging Service). Es una versión mejorada de la conexión GSM, pues sus velocidades de transferencia permiten enviar 30 SMS en un minuto, en comparación con los 10 SMS por minuto de la conexión GSM.

b) El servicio EDGE

EDGE significa Enhanced Data rates for GSM of evolution, también se le conoce como GPRS mejorado. Esta conexión permite el envío y recepción de archivos pesados, como por ejemplo los archivos adjuntos que usualmente se envían por el correo electrónico. Otra de sus bondades es la navegación a gran velocidad en páginas que por su contenido se podrían considerar complejas de abrir. Es mucho más veloz que la conexión GPRS.

c) ¿Qué significa G?

Esta letra se refiere a **Generación** y es ampliamente utilizada para referirnos a la siguiente generación de tecnologías inalámbricas. Cuando se comenzó a generalizar el uso de teléfonos celulares, esos equipos eran analógicos y su principal función, de acuerdo con la necesidad del usuario en ese entonces, era la de hacer llamadas, posteriormente se pudo recibir y enviar mensajes de texto y ahora vivimos la época de los smartphones, con su acceso a redes sociales, mensajería, internet, videollamadas, con ellos se ha propiciado la época de la generación conectada.

➤ **Tecnología 3G**

Oficialmente usada a partir del año 2003 en los países desarrollados, antes del 2003 existía únicamente la tecnología **2G** que permitía hacer llamadas, enviar y recibir mensajes de texto. La generación 3G ha establecido un estándar en cuanto a la tecnología inalámbrica y sus características que consideramos esenciales como la navegación por internet, el uso de correo electrónico o email, descarga de videos, envío de fotos, en fin, todas aquellas características propias de los smartphones actuales fueron en gran medida posibles, debido a esta generación. Facilita aún más la transferencia de archivos multimedia a una tasa de velocidad mucho mayor y se dice que la velocidad de transmisión duplica la velocidad de la tecnología EDGE.

➤ **Tecnología 4G**

Su mayor virtud es la mayor velocidad de transferencia y la calidad. Aparece en el año 2009 en los países desarrollados. Para ser considerado 4G, las velocidades de transferencia deben de ser de al menos 100 Megabytes por segundo y hasta 1 gigabyte por segundo. Sin embargo, la cobertura de esta tecnología se encuentra limitada a las grandes ciudades, como Quito, Guayaquil, mientras que en las zonas rurales es común que la tecnología usada aún sea 3G. Es una tecnología que aún necesita ser completamente implementada en el Ecuador, por cuanto se necesita que las tarjetas SIM sean compatibles. También existe una tecnología conocida como 4G LTE o simplemente LTE (Long Term Evolution).

➤ **Tecnología 5G**

El siguiente gran paso en la evolución de la tecnología, se espera que aparezca a partir del año 2020, esta tecnología permitirá la transferencia de información a una velocidad de 1 a 10 gigabytes por segundo, es decir 100 veces más veloz que la tecnología 4G.

La historia de la tecnología inalámbrica G no para, aún se sigue desarrollando y tanto los presentes como los futuros desarrollos son los que garantizan que la siguiente evolución de tecnología inalámbrica en celulares, está cada día más cerca, lo que implica que las futuras necesidades de cobertura celular también deberán desarrollarse a la par, incrementándose día a día.

2.1.2. Cobertura celular en interiores

El uso de celulares se ha propagado por todo el mundo, lo que en un principio se consideraba un lujo, resulta que ahora es primordial para nuestras actividades del día a día, para el desarrollo de las actividades económicas y el crecimiento de la economía, abarcando todos los sectores de la producción y el consumo (Fernández-Ardévol, 2011). Garantizar que el cliente final tenga cobertura celular en cualquier lugar del país requiere de una gran inversión y esfuerzo, tanto de la empresa proveedora del servicio como de las empresas privadas que trabajando en conjunto brindan servicios especializados de optimización en redes de comunicación.

El servicio de cobertura celular en interiores se brinda principalmente en centros comerciales, edificios de bodegas, aeropuertos, estadios, centros de convenciones, túneles e incluso las viviendas de ciertos clientes VIP.

La red de sistemas de cobertura de interiores, al igual que todo el sistema de redes de comunicación también se ve sujeto, año a año, a más requerimientos y exigencias de parte de los consumidores, debido en gran parte al avance de la tecnología y la creciente demanda anual de los usuarios.

2.1.3. Materiales y equipos

Existen muchos materiales que son importantes para poder instalar la solución sugerida, todos estos equipos cumplen un propósito, pero no todos son necesarios en cada solución, pues los problemas que se encuentran en el sitio a trabajar son los que determinan la necesidad de incluir ciertos equipos.

A continuación, revisaremos una breve descripción de los materiales y equipos más utilizados.

a) El cable coaxial

Posiblemente, junto a las antenas, se trata de uno de los materiales más importantes, ver **Figura 3**. El cable coaxial es un cable de cobre recubierto de metal y otros componentes especiales que están especialmente diseñados para bloquear la interferencia de señal.



Figura 3 Cable coaxial Sewell RG59

Este tipo de cable tiene múltiples usuarios, entre ellos tenemos a las empresas de televisión por cable que conectan sus instalaciones de antenas de satélite a los hogares e incluso a los negocios de sus clientes. Lo mismo sucede con las empresas de telefonía convencional y celular ya que conectan sus instalaciones para que los clientes finales puedan comunicarse.

El cable coaxial también es utilizado como medio de conectividad Ethernet a nivel empresarial.

b) Repetidores

En los sistemas de comunicación digital, un repetidor es un dispositivo que recibe una señal digital en un medio de transmisión electromagnético u óptico y regenera la señal a lo largo del siguiente tramo del medio, ver **Figura 4**.

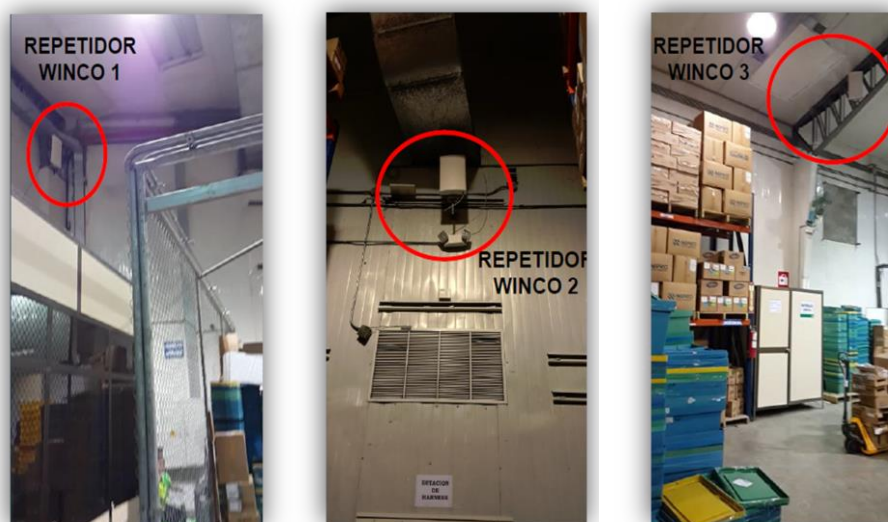


Figura 4 Repetidores marca WINCO instalados en una bodega.

En los medios electromagnéticos, los repetidores superan la atenuación causada por la divergencia del campo electromagnético en el espacio libre o la pérdida de cable. Una serie de repetidores hacen posible la extensión de una señal en una distancia determinada. Este tipo de equipos eliminan el ruido no deseado en una señal entrante, de tal manera que si la señal original, está débil o distorsionada, puede percibirse y restaurarse claramente.

c) Divisores de potencia (Splitters)

En telefonía, un splitter, divisor o también llamado "divisor simple de servicios telefónicos", ver **Figura 5**, es un dispositivo que divide una señal telefónica en dos o más señales, cada una con un rango de frecuencia seleccionado y también puede volver a unir señales de varias fuentes de señal en una sola señal.



Figura 5 Divisor de potencia de dos vías para 700 – 2700 MHz.

Al permitir que cada señal pueda tener un rango de frecuencia seleccionado, se puede asegurar que, si se observa que la señal es débil en cierto sector, se pueda aumentar el rango de frecuencia de la señal en el mismo y así mejorar la solución planteada.

d) Antenas

Las antenas de celular son dispositivos que convierten la energía eléctrica en ondas de radio y viceversa. Por lo general pueden tener diversos anchos de banda, tamaño, ganancia, etc., de acuerdo con su propósito. Algunas son claramente útiles para ambientes externos, donde su altura es un factor importante en cuanto a la ganancia. En este sentido, existe una regla que dice que, a mayor altura, mejor ganancia. Por su tamaño, algunas se encuentran a simple vista, mientras otras se encuentran mimetizadas, esto es para pasar desapercibidas y mezclarse con el entorno, ver **Figura 6**.

También existen antenas que se instalan para brindar cobertura móvil en interiores, sea en hogares, en bodegas, en empresas, en centros comerciales, etc., estas pueden ser omnidireccionales, de panel, etc., ver **Figura 7**.



Figura 6 Antena mimetizada ubicada en ESPOL, campus Prosperina.

Las antenas para interiores buscan intensificar la señal en espacios cerrados, brindando cobertura celular en áreas en las cuales, después de realizado el respectivo estudio, se ha identificado problemas de intensidad de señal. Las antenas son equipos indispensables que permiten la transmisión de datos y la comunicación, por ende, su instalación es primordial para que las empresas celulares puedan brindar su servicio a los clientes.



Figura 7 Antena Omnidireccional y de panel para interiores.

2.1.4. Pérdida de intensidad de señal

La pérdida de la intensidad de la señal de celular se produce por varios factores, afectando las llamadas que recibimos o queremos colocar, así como los mensajes de texto que queremos enviar y recibir. Entre los factores que pueden afectar la intensidad de la señal (Kumar & Kumar, 2014) podemos citar:

- **Los materiales de construcción de la edificación.** Muchas veces la señal que recibimos en la calle se deteriora al momento de entrar a edificios, lo cual puede suceder en cualquiera de los pisos de este, sea este el primero o uno de los pisos más obvios, el sótano de un centro comercial. En este caso puede ser que la señal encuentre un obstáculo en el concreto de la edificación, así como en el metal que es utilizado para la estructura que da soporte al edificio, el metal de las cañerías, la presencia de múltiples paredes es otro factor, así como otros materiales de construcción que también pueden bloquear la señal celular.
- **Falta de torres celulares en el sector.** Este es uno de los factores más evidentes, sin embargo; la escasez de torres celulares en los alrededores es mucho más común cuando se trata de áreas en las cuales encontramos pocos habitantes. En las ciudades, como Guayaquil, podría darse el caso de que las torres celulares no se encuentren perfectamente alineadas lo cual conlleva a la presencia de áreas que no reciben una apropiada cobertura celular.
- **El número de usuarios conectados a la red.** Cada torre celular está diseñada para poder ser capaz de manejar la demanda de un determinado número de conexiones a la vez y la mayoría de las veces, esta cobertura es más que suficiente para todo aquel que desee utilizar su celular. Sin embargo, si existe una inusual afluencia de público incrementa la demanda a la torre celular, afectando el servicio, esto es por un efecto denominado **cell breathing**. Se conoce como cell breathing (Kelif & Coupechoux, 2009) al cambio constante en el rango del área geográfica

cubierta por una torre celular, basado en el aumento del tráfico que se encuentra utilizando la torre. Cuando un área se encuentra bajo una fuerte demanda de muchos usuarios, el área de cobertura se reduce un poco, con lo cual aquellos sujetos que se encuentran más alejados de la torre serán los más afectados. Este fenómeno es típico de los sistemas inalámbricos 2G y 3G.

- **Pérdida de cobertura por los elementos propios del DAS.** En este caso nos referimos a los metros de cable utilizados, cada conector necesario en el sistema, cada equipo utilizado. La cobertura se va a degradando a lo largo del DAS. Es decir, mientras mayor es el número de elementos en el sistema, mientras más metros de cable sean utilizados, el nivel de señal se va degradando por cada elemento y metro de cable.

Hemos revisado algunos de los factores que pueden afectar la intensidad de la señal, incluso existen factores ambientales (Usman, Okereke, & Omizegba, 2015), que pueden también tener un efecto negativo, pero lo más sorprendente es que incluso cuando se llega a diseñar una solución o DAS, existe pérdida de intensidad de señal en el sistema. Siendo este un comportamiento normal del mismo resulta entonces de vital importancia minimizar el número de equipos que se desea instalar, lo que implica que, si existe menor necesidad de conectores, menor necesidad de metros de cable, una cantidad óptima de equipos instalados, entonces, menor será la degradación del nivel de la señal.

2.2. Estado del Arte

2.2.1. Algoritmos de cobertura, algoritmos de ruteo y aplicaciones

El caso de la cobertura de interiores ha sido estudiado en los últimos años por muchos expertos en el tema. Los modelos más especializados, requieren un extenso conocimiento del tema de cobertura celular, intensidad de señal y el uso de fórmulas de propagación, pérdida de potencia, la potencia del nodo fuente, entre otras, es muy común.

La cobertura celular en interiores se ha tratado en varios proyectos de Tesis y, además, existen muchos libros que surgen cada año, incluyendo temas de optimización de redes y nuevas tecnologías.

Estos modelos, en su gran mayoría, hacen uso de ciertas metaheurísticas, de allí que antes de analizar tres de estos trabajos de investigación en el área de cobertura celular en interiores, es importante referirnos al problema de cobertura, así como los algoritmos y metaheurísticas que permiten encontrar una solución a dicho problema. Obviamente hay muchos otros modelos que buscan brindar una solución al problema de cobertura, pero vamos a revisar tanto los algoritmos de cobertura como las metaheurísticas en términos generales.

a) Algoritmos de cobertura

El problema de Cobertura es sin duda uno de los temas más estudiados en la optimización de operaciones. Existe una diversidad de modelos que buscan resolver el problema de cobertura y cada uno es más interesante que el otro.

Uno de esos modelos matemáticos es el propuesto para tratar el problema de recubrimiento o Set Covering Problem (SCP). Su aplicación cubre varios aspectos, desde la localización óptima de teléfonos convencionales para brindar telefonía pública en las calles, la localización de semáforos para el control del tráfico, la localización óptima de estaciones de bomberos y policiales para brindar cobertura a comunidades, barrios, etc.

El algoritmo de cobertura de conjuntos es uno de los algoritmos de cobertura más conocidos y es uno de los más importantes en la literatura, es uno de los 21 problemas NP - completos de Richard M. Karp (Karp, 1972). El objetivo del algoritmo de cobertura de conjuntos, ver **Figura 8**, es la minimización del número de conjuntos que contenga al universo de estudio (Díaz, C, & Rodríguez, R, 2013).

$$\begin{array}{l} \text{Minimizar } \sum_{S \in \mathcal{S}} c(S) * x_S \\ \text{s.t.} \\ \sum_{S: e \in S} x_S \geq 1 \text{ para todo } e \in U \\ x_S \in \{0, 1\} \text{ para todo } S \in \mathcal{S} \end{array}$$

Figura 8 Algoritmo de Cobertura (SCP)

En los últimos años, el clásico modelo SCP, aún se encuentra bajo estudio y existen variantes del modelo que incluyen: el problema de cobertura ponderado o weighted set covering, el conjunto de cobertura ponderado de tamaño restringido o Size-constrained weighted set cover (Golab, Korn, Li, Saha, & Srivastava, 2015), además del algoritmo exacto para el conjunto de cobertura de costo homogéneo (Demirovic, Calvar, Inoue, & Musliu, 2016), entre otros.

b) Algoritmos de ruteo de vehículos VRP

El problema de ruteo de vehículos o VRP por sus siglas en inglés, es un problema clásico de optimización combinatoria y de programación entera. El objetivo de este tipo de modelos es el de poder brindar servicio a un número de clientes con una flota de vehículos. Este algoritmo fue propuesto en el trabajo "**The Truck dispatching problem**" por Dantzig y Ramser (Dantzig & Ramser, 1959). Hoy en día el problema de ruteo de vehículos es muy importante en los campos de la transportación, distribución y logística.

Existen en la actualidad muchas variaciones de este modelo, incluyendo el modelo capacitado o **CVRP** donde para poder brindar servicio a los clientes se utiliza una flota de vehículos que cuentan con una cierta capacidad. También tenemos el modelo con ventanas de tiempo o VRPTW que no es más que una generalización del modelo VRP donde en esta ocasión el servicio que se les brinda a los clientes empieza en un determinado intervalo de tiempo, mismo que se denomina ventana.

Así mismo existen una serie de métodos que se han utilizado para poder encontrar una solución que pueda minimizar el costo de la operación teniendo en cuenta las restricciones de cada caso. Entre esos métodos es común encontrar heurísticas y metaheurísticas, tal y como también sucede en el caso de los algoritmos de cobertura.

2.2.2. Modelos matemáticos aplicados a cobertura celular y redes

En el caso de cobertura celular existen estudios que abarcan, tanto lo referente a la instalación de antenas celulares dentro de edificios, como la instalación de antenas celulares externas y de gran tamaño para brindar cobertura a grandes zonas geográficas, el diseño óptimo del DAS, etc. Se trata de algoritmos complejos que se enfocan en el diseño del sistema distribuido de antenas y que buscan minimizar el cableado, el número de equipos utilizados, etc. A continuación, revisaremos tres de estos estudios, las implicaciones, supuestos si existieren y los resultados obtenidos.

a) Modelo matemático para el diseño óptimo del DAS en interiores

El *Dr Lei CHen* y el *Dr Di Yuan*, hicieron una investigación bajo el título de ***“Mathematical Modeling for optimal design of inbuilding distributed antenna systems”*** del 9 de diciembre del 2013 y publicado en la Revista Científica Computer Networks en el volumen 57 edición 17 (Chen & Yuan, 2013). En esta investigación, los autores se enfocaron en el proceso siguiente a la elección del número de antenas a instalar, es decir, el estudio parte del hecho de que ya se conoce en qué sitios se va a instalar una antena dentro del edificio, para luego identificar puntos potenciales o CS's (Candidate sites por sus siglas en inglés), en los cuales poder instalar equipos que se iban a conectar con las antenas. El objetivo del estudio era determinar una ruta óptima de conexión que minimice los metros de cable necesarios para que los equipos se conecten a las antenas. Esto se conoce como DAS (Distributed Antenna Systems).

Al aplicar su algoritmo, los autores concluyen que la minimización de la cantidad total de cable puede ser lograda siempre y cuando se aplique un threshold o límite de requerimiento de salidas de poder de las antenas. Sin embargo, los autores indican que este límite puede hacer que el problema no sea factible y por tanto carezca de solución, por lo cual recomiendan analizar cuidadosamente cada caso para poder llegar a una solución. A pesar de esto, los autores presentan dos algoritmos, uno llamado DAS-F o Flow formulation y otro llamado DAS-MT o Multi-tree formulation, mismo que al compararse con el modelo DAS-F, resultó ser mucho más eficiente y rápido en términos de tiempos de ejecución del algoritmo.

b) Optimización de microceldas en redes inalámbricas en interiores y exteriores sujetas a la restricción de calidad de servicio

Adeola Omorinoye y Quoc-Tuan Vien, de la Escuela de Tecnología, Middlesex University, trabajaron en conjunto en el tema “**On the Optimisation of Practical Wireless Indoor and Outdoor Microcells Subject to QoS Constraints**”. En este trabajo, los autores tratan el tema de la alta demanda de servicios por parte de los usuarios de telefonía celular, considerando los diferentes ambientes de las redes de comunicación, en especial los ambientes externos y también los internos. Los autores a lo largo de la investigación desarrollan un modelo que permita minimizar el número de células, así como la determinación de su localización óptima sujeta a las restricciones de calidad de servicio.

Los autores presentan un modelo llamado **NOP**, por sus siglas en inglés que significan Network Optimisation Problem o Problema de optimización de redes y que se denota de la siguiente forma, como vemos en la **Figura 9**:

$$\begin{aligned} & \min_{k \in [1, K_{\max}]} k, \\ & \mathcal{S}_k \subset \mathcal{S} \\ \text{s. t. } & P(x_{e_m}, y_{e_m}) \geq P_{\min}, \forall m = 1, 2, \dots, M, \end{aligned}$$

Figura 9 Modelo Network Optimisation Problem (NOP).

Este modelo es el punto de partida del estudio propuesto por los autores, mismo que luego permite el desarrollo de un modelo de búsqueda binaria, llamado Posicionamiento de células basado en búsqueda binaria o BSCP por sus siglas en inglés que significan Binary Search based Cell Positioning (Omorinoye & Vien, 2017).

El modelo BSCP necesita previamente datos obtenidos por una simulación de la cobertura celular, es decir, se necesita de una simulación inicial. Luego se utiliza dos veces, una vez en el interior de un edificio y luego en un ambiente externo tal como es un complejo de edificios. El modelo requiere el trabajo conjunto de la modelización matemática con la simulación de la cobertura, motivo por el cual, los autores analizan la cobertura celular en interiores y exteriores con diferentes tipos de antenas, entre ellas SISO, MISO y MIMO. La simulación es posible por medio del software EDX SignalPro. Los resultados con estos diferentes tipos de antenas demuestran que, al encontrar una posición óptima sugerida por los modelos matemáticos, la cobertura celular puede ser muy buena sin necesidad de instalar numerosas antenas en el sitio de trabajo.

c) Modelos de optimización de redes

Los modelos de ruteo de redes constituyen uno de los problemas más ampliamente estudiados, lo que ha permitido que existan variaciones con múltiples utilidades. Los problemas de ruteo de redes en su gran mayoría se refieren a vehículos y siendo así, pueden ser aplicado a empresas de todo tamaño, por ejemplo, en el trabajo **“El problema de ruteo de vehículos VRP y su aplicación en medianas empresas colombianas”** (Arboleda-Zúñiga, López, & Lozano, 2016), los autores analizan algunas variaciones del modelo de ruteo, desde el clásico VRP, considerando el modelo CVRP, el modelo DCVRP que es una variación que considera restricciones de capacidad del vehículo y la distancia máxima, el modelo VRPB que es el modelo VRP con devoluciones, el modelo VRPPD que es el modelo con recogida y entrega. Este análisis de los

autores incluye la aplicabilidad de los modelos a las medianas empresas colombianas.

También existen casos de aplicación del modelo de ruteo con respecto al despacho de vehículos de emergencia, tal y como podemos estudiar en la investigación “Diseño de un modelo matemático para el despacho de vehículos de emergencias médicas en Colombia” (Escobar, 2015), donde se analiza la aplicación del modelo de Ruteo de vehículos con multi depósitos y ventanas de tiempo o MDVRPTW, por sus siglas en inglés que significan Multi Depot Vehicle Routing Problem with Time Windows. La investigación logra resultados positivos en cuanto a considerar el número de infactibilidades que se pueden encontrar en varios escenarios analizados.

2.3. Análisis de la situación actual

2.3.1 El proceso para generar una solución DAS

Habíamos revisado que las empresas de logística en redes de comunicaciones fijas y móviles del Ecuador tienen una amplia gama de servicios, pero cuando se trata específicamente del servicio de cobertura móvil en interiores, el proceso de generación de la solución o DAS es muy similar al proceso de prestación de servicios de muchas empresas, aunque no se encuentren trabajando en el mismo nicho de mercado y no se trate del mismo producto o servicio.

En el **Figura 10** podemos observar las 10 etapas del proceso de generación e instalación de la solución de cobertura en interiores. Las siete primeras etapas son necesarias para generar la solución de cobertura o DAS que un cliente requiera, mientras que las tres últimas etapas se refieren a la instalación y evaluación de la solución propuesta.

Primera etapa: La operadora de telefonía celular genera un pedido o requerimiento, en el cual hace conocer a la empresa la problemática que se desea solucionar. Para llegar a esta instancia, la operadora de telefonía celular recibe información de parte de sus propios clientes, es decir, los usuarios de la

telefonía celular, indicando entre otras cosas: a) el tipo de problema, como puede ser fallas en la recepción o envíos de mensajes de texto o problemas al recibir o realizar llamadas telefónicas, b) el lugar donde se originó el problema, c) el número de veces que el problema se presentó. Cuando este problema es muy recurrente, es decir, varios clientes han presentado la misma queja, entonces la operadora de telefonía celular se pone en contacto con las empresas de logística en redes de comunicación fijas y móviles para realizar una evaluación de servicio.

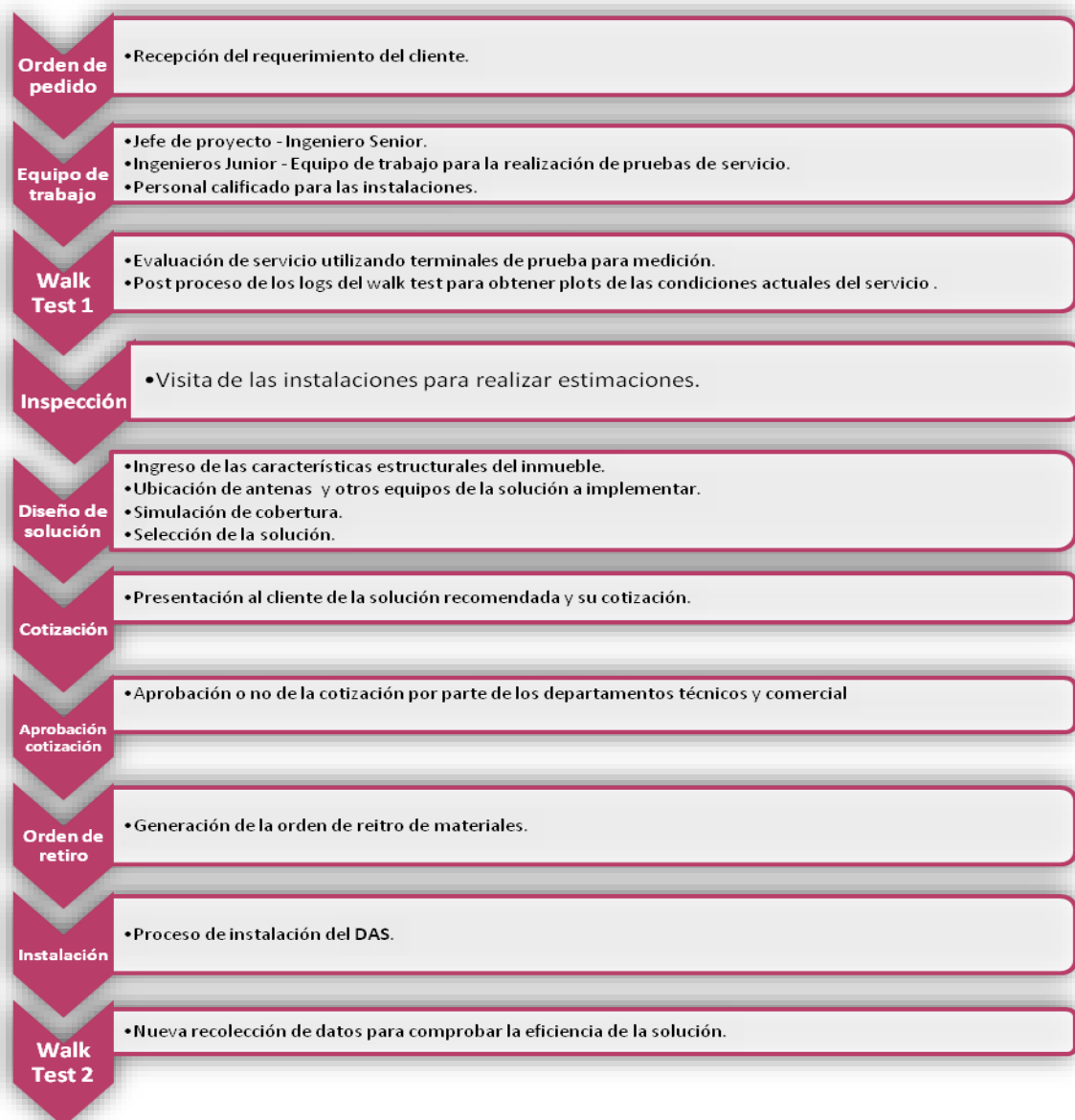


Figura 10 Esquema del proceso de generación de solución de cobertura celular en interiores.

Segunda etapa: La empresa que va a realizar el estudio, selecciona el grupo de trabajo que se va a encargar del proyecto. Este grupo de trabajo por lo general incluye, un PM o Project Manager quien es el líder del proyecto, Ingeniero Senior que procesa la información y se encarga del diseño de la solución y uno o dos ingenieros de rango junior, que hacen las pruebas de evaluación del servicio.

Tercera etapa: En esta etapa se realiza la visita al inmueble donde se va a instalar la solución, con el objetivo de recolectar datos referentes a las condiciones actuales del servicio de voz y datos. En esta etapa el o los ingenieros realizan lo que se conoce como **Walk test**, el cual consiste básicamente en que el ingeniero utiliza un equipo de medición con un software especializado que le permite recolectar la información de la red móvil en base a su posición en el sitio. De esta manera, la herramienta obtiene los datos del servidor, del nivel de señal y calidad, incluso de las tasas de transferencia de datos en la o las tecnologías evaluadas, o si hay algún inconveniente (caídas o problemas de generación de llamadas, lentitud en la navegación, etc.) en el punto exacto en el cual se encuentra el ingeniero. Esto permitirá posteriormente identificar las áreas críticas para posteriormente realizar el diseño de la solución a implementar, ver **Figura 11**.



Figura 11 *Recolección de la información de la red móvil.*

Una vez culminada la medición, la herramienta genera un log con toda la información recopilada. Este log debe ser post-procesado en un software

complementario al software de medición, así se generan plots que permiten visualizar las condiciones actuales del servicio en el plano del inmueble, **Figuras 12 y 13**, respectivamente.

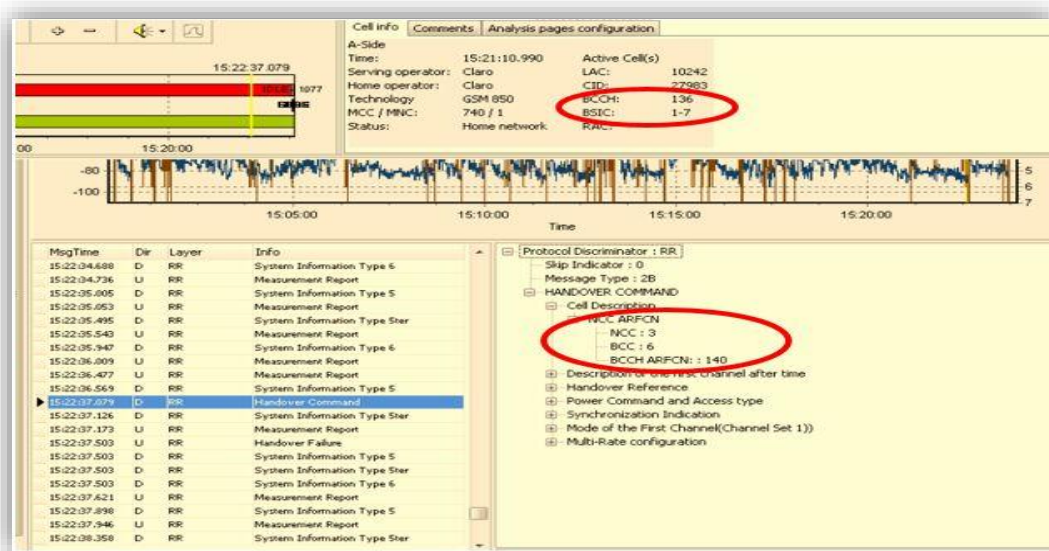


Figura 12 Generación del log de la información recopilada

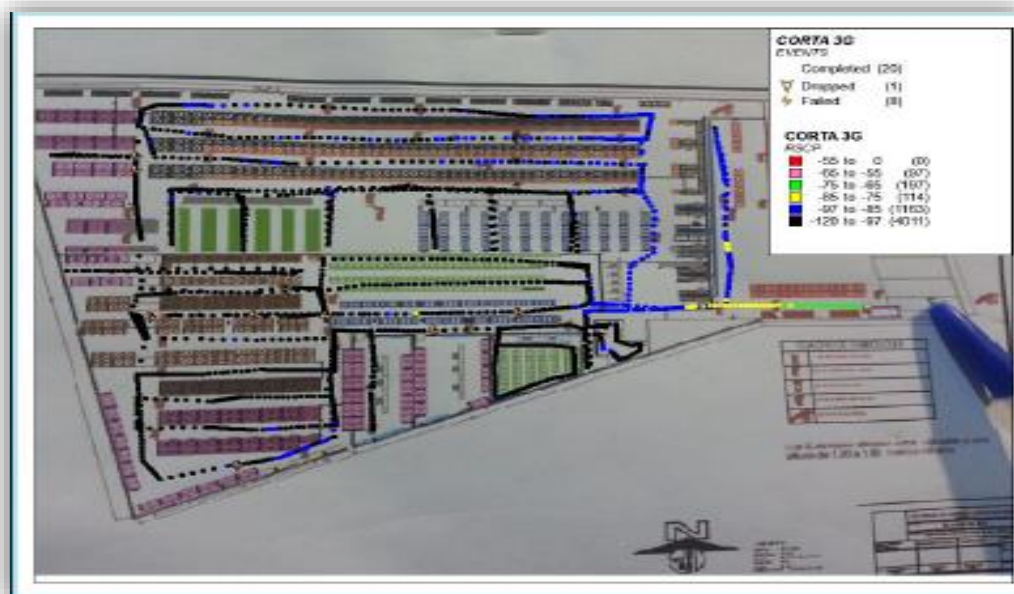


Figura 13 Plot de la situación actual.

Cuarta etapa: Se realiza una visita de inspección, en conjunto con el personal de instalación. Esta inspección permite realizar estimaciones de las posibles ubicaciones de las antenas, los materiales que serían necesarios, los lugares por donde podrían pasar los cables, etc.

Quinta etapa: Aquí comienza la etapa de diseño de la solución en la computadora. En base a los plots generados en la tercera etapa, lo cual permite visualizar los puntos críticos con problemas en el inmueble, y a la inspección realizada en la cuarta etapa, se identifican los puntos potenciales donde se instalarán las antenas del sistema, es decir se identifican las áreas donde se podrían instalar antenas. Con esta noción, se utiliza una herramienta de predicción de cobertura, la cual permite ingresar:

- El plano del inmueble: El software permite subir el plano en varios formatos, incluyendo AutoCad. Si no se dispone en este formato, se puede cargar la imagen del plano del inmueble, y debe delimitarse las paredes y especificarse el material estructural (separaciones de vidrio, cubículos, puertas, etc.)
- Ubicación de antenas: Se ubican en el plano todas las antenas previstas para el diseño, eligiendo el tipo de antena (omni direccional o tipo panel) de un gran número de marcas y modelos disponibles en la base de datos de la herramienta, ver **Figura 14**.
- Repetidor o RRU: Es el “cerebro” del DAS, el que brinda la potencia de señal a distribuir mediante las antenas. De igual manera, puede elegirse de una gran cantidad de marcas y modelos disponibles en la base de datos de la herramienta.
- Ubicación de splitters y conexión de cables: Se realizan todas las conexiones entre los elementos.

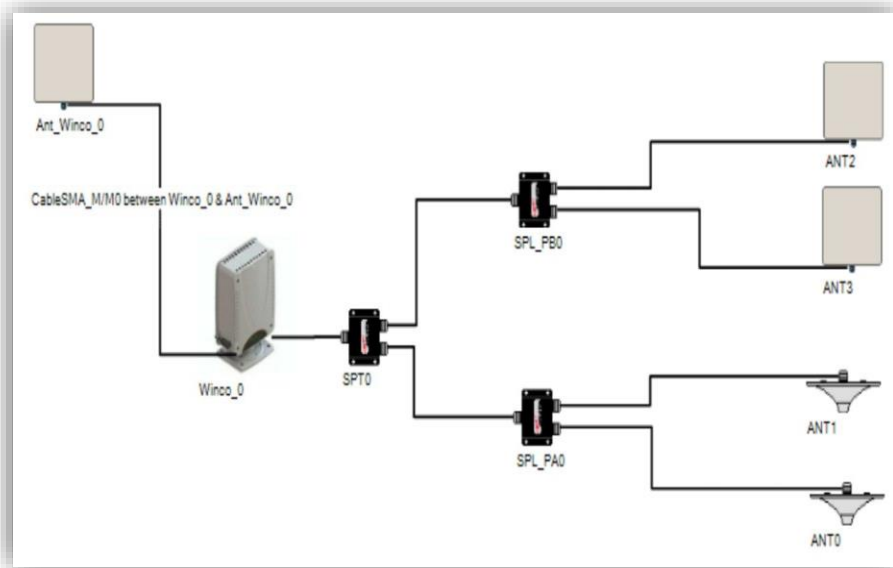


Figura 14 Ubicación en el plano de las antenas y otros equipos.

Con toda la información ingresada, la herramienta de predicción permite simular cómo se mostraría la cobertura en el inmueble con la ubicación de antenas en el plano y considerando la infraestructura de las paredes y su efecto en la propagación de señal, ver **Figura 15**.

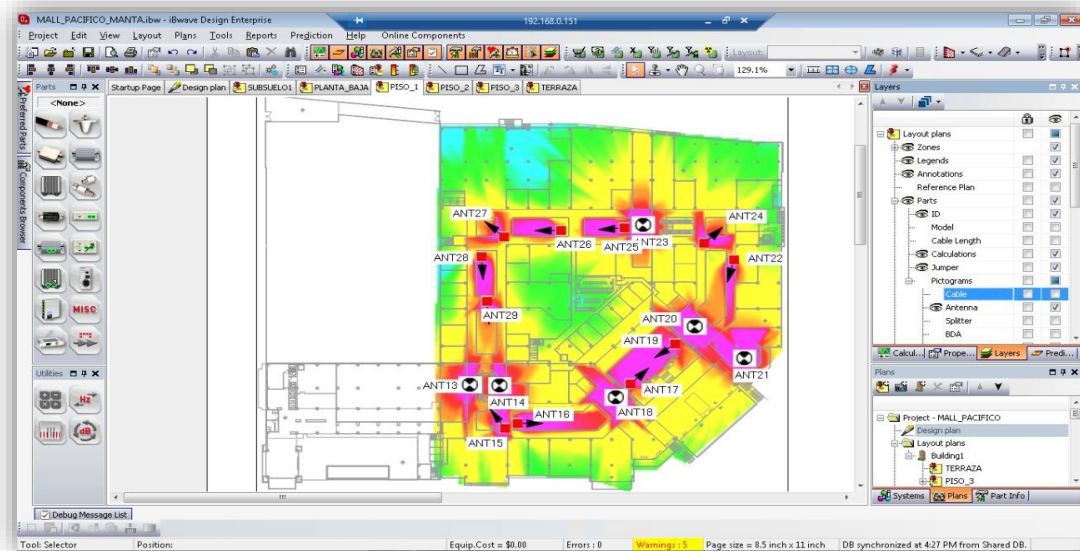


Figura 15 Ventana de visualización del software iBwave.

En caso de ser necesario, se hacen modificaciones al diseño a fin de obtener el mejor resultado que permita garantizar un óptimo servicio a los abonados.

Sexta etapa: Una vez que se encuentra la solución adecuada, se realiza un reporte de la solución propuesta, misma que se envía al departamento financiero para que realice la cotización de la oferta y esta se envía a la operadora celular, donde conjuntamente, los departamentos técnico y comercial aprueban la cotización.

Séptima etapa: Una vez que se produce un acuerdo entre el departamento técnico y el departamento comercial, entonces se aprueba la cotización presentada.

Octava etapa: La operadora celular genera la Orden de retiro de materiales, necesaria para que el personal de instalación pueda iniciar los trabajos.

Novena etapa: Este es el proceso de instalación de los equipos en las áreas sugeridas. El número de personas que realizan la instalación depende de la magnitud del trabajo, así como de la necesidad o urgencia del cliente.

Décima etapa: En esta última etapa se realiza un nuevo walk test para poder comprobar la eficiencia de la solución ya instalada.

2.3.2. Estadísticas anuales de equipos instalados

Antenas instaladas anualmente

Si analizamos los últimos datos podemos observar que en el año 2015 se instalaron cerca de 400 antenas tanto localmente como en la ciudad de México, el número de equipos instalados en el 2016 se redujo a 300, para luego incrementarse levemente en el año 2017 a 315 antenas, ver **Figura 16**.

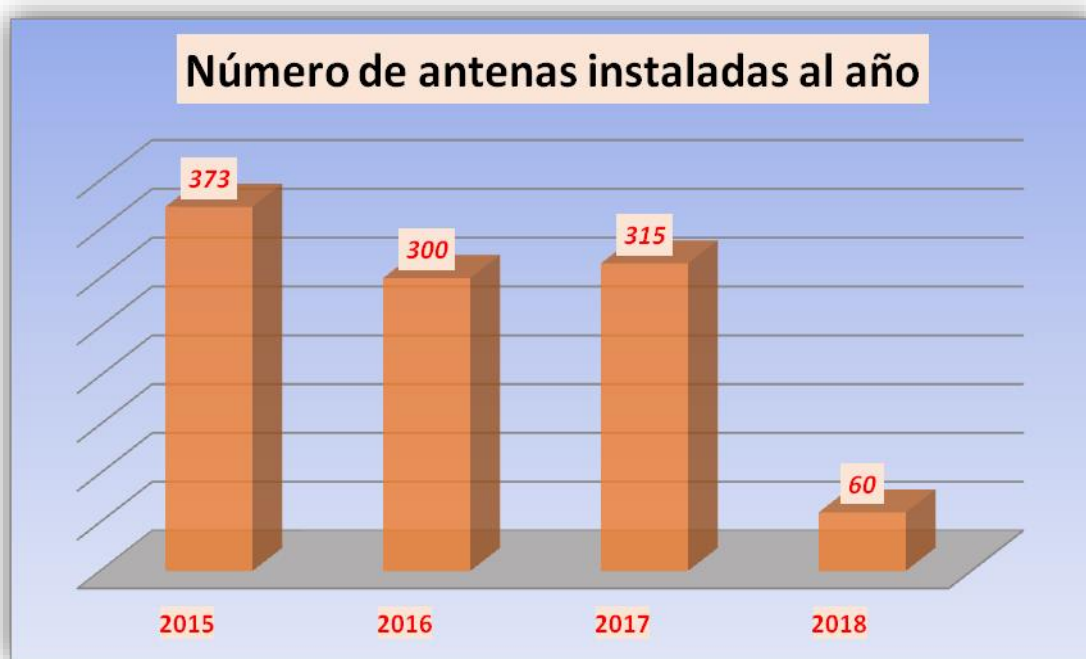


Figura 16 Antenas instaladas en el período 2015 – 2018.

El año 2017 fue un mal año para muchas empresas en general, un año atípico para las empresas de telecomunicaciones, sin embargo, gracias a proyectos en Colombia, el número de antenas instaladas se mantuvo en los niveles de años anteriores. Localmente, la demanda de otros proyectos disminuyó, las operadoras telefónicas no requerían mayores servicios en el país, puesto que decidieron disminuir el nivel de inversión en nuevos proyectos y movilizar esos recursos a otros países. El sector de las comunicaciones fue uno de los sectores más afectados por los cambios en las políticas de control de importaciones aplicados por el gobierno saliente.

El año 2018 se ve muy prometedor, pues hasta el momento se han instalado un total de 60 antenas en diferentes proyectos, esto en apenas 2 meses y siguen surgiendo más proyectos relacionados, debido a que las operadoras celulares están invirtiendo mucho más de lo que hicieron el año pasado.

Ingresos anuales

Los ingresos percibidos por brindar los servicios de optimización de cobertura móvil en interiores han variado a lo largo del período 2015 al 2018. Por lo general los ingresos anuales están en el rango de \$50000 a más de \$40000. Como podemos observar en la **Figura 17**, los ingresos han estado disminuyendo, desde cerca de \$50000 en el 2015 a un poco más \$40000 en el año 2017. Para ese año la empresa tuvo que realizar algunos ajustes para poder sobrevivir, entre esos ajustes lamentablemente se recurrió al recorte de personal.

La reducción de personal en ese año también implicaba menor capacidad para hacer frente a los pocos proyectos existentes, tanto locales como internacionales.



Figura 17 Ingresos anuales del período 2015 - 2018.

En la actualidad, en los primeros dos meses del presente año, se recaudaron más \$15000, superando ya en un 35% los ingresos generados en el 2017 en ese mismo período. El número de proyectos sigue subiendo y es por este motivo que se espera una mayor rentabilidad de este servicio en el presente año.

Costos anuales

Por otra parte, los costos anuales también reflejan el mal momento experimentado por el sector de las telecomunicaciones. En el año 2015, los costos eran menores en comparación al 2016, como podemos observar en la **Figura 18**. A partir del año 2016 los costos se incrementaron hasta superar los \$8500, luego en el año 2017 se incrementaron nuevamente a cerca de \$9000, este último incremento fue debido a que, para hacer frente a la falta de personal calificado, se debía recurrir a horas extras y contratación de terceros para sacar adelante los proyectos.



Figura 18 Costos anuales del período 2015 – 2018.

Además, se están realizando estudios fuera de la ciudad y la empresa aún no puede recuperar la fuerza laboral que tuvo en años anteriores. Se espera que la situación económica de la empresa siga mejorando para poder contar con mano de obra propia y debidamente calificada. La empresa está analizando la posibilidad de delegar el trabajo de instalación, pero hasta el momento no ha encontrado una opción rentable pues delegar el trabajo de instalación representaría una disminución del 65% de los ingresos percibidos.

Para que la empresa pueda efectivamente recuperarse, es importante entonces que maneje sus recursos en forma eficiente, de tal forma que en conjunto con estrategias bien diseñadas y sin olvidar brindar un servicio de calidad al cliente, se pueda alcanzar un desarrollo sostenido, que permita el crecimiento económico de la empresa y que a la vez permita contar con los medios necesarios que puedan servir en un futuro como colchón de seguridad, para hacer frente a situaciones económicas complicadas como las experimentadas en los últimos años.

CAPÍTULO 3

DISEÑO DE LA SOLUCIÓN

3.1. CONSIDERACIONES DE POTENCIA Y PÉRDIDA DE POTENCIA

3.1.1 La potencia de la señal

La potencia de la señal de una antena es muy importante en el diseño de una solución y el DAS, el sistema distribuido de antenas busca transmitir la potencia recibida a través de todas las conexiones hasta finalmente llegar a las antenas instaladas dentro de la estructura.

La potencia de la señal se mide en una unidad denominada dBm o simplemente dB, esta es una unidad en decibelios en relación con un milivatio, es decir, es una unidad de poder eléctrico y frecuentemente es utilizada en sistemas de radio, microondas y redes de comunicación.

Un milivatio de poder equivale a 0 dBm., pero como la señal celular opera con menos energía, a veces 0.000000001 milivatios o incluso menos, la intensidad de la señal se mide en números negativos. De allí que mientras más cerca a cero, la señal es más fuerte, es decir que - 70 dBm es más fuerte que - 90 dBm.

La escala de milivatios es logarítmica y por tanto cualquier cambio en dBm produce un cambio exponencial en milivatios. A manera de ejemplo, si comparamos - 70 dBm (0.0000001 milivatios) con - 80 dBm (0.0000001 milivatios), podemos indicar que - 70 dBm es 10 veces más fuerte que - 80 dBm y 100 veces más fuerte que - 90 dBm (0.00000001 milivatios).

Cualquier cambio, ganancia o pérdida se denota con la misma unidad. Si empezamos con una señal de celular de -90 dBm e instalamos una antena que produce una ganancia de $+12$ dBm de ganancia, entonces tendremos una señal de -78 dBm.

Existen diversas tablas que indican cuán fuerte puede clasificarse la señal celular en un sitio, como podemos observar en la **Tabla 1** y la **Tabla 2**, los rangos y la descripción de la fortaleza de la señal pueden variar, según la operadora celular. El presente proyecto utilizará como referencia la Tabla 1, pues es la que más se asemeja a las recomendaciones de las operadoras celulares del mercado ecuatoriano.

Potencia (dBm)	Fortaleza de la señal
> -60	Excelente (nos encontramos cerca a una torre)
$-60 \text{ a } -75$	Muy buena (la potencia más frecuente)
$-75 \text{ a } -90$	Buena (es un área con cobertura decente)
$-91 \text{ a } -100$	Aceptable (la cobertura es irregular y puede ser lenta)
$-101 \text{ a } -110$	Pobre (muy débil, se experimenta problemas de conectividad)
< -110	Sin señal (no se puede realizar o completar una llamada)

Tabla 1 Fortaleza de la señal.

Fuente: Powerful signal (www.powerfulsignal.com)

Potencia (dBm)	Fortaleza de la señal
Nivel > -80	Señal Alta
$-95 \leq \text{Nivel} < -85$	Señal Media
$-105 \leq \text{Nivel} < -95$	Señal Baja

Tabla 2 Fortaleza de la señal.

Fuente: Operadora celular

Las empresas de logística de optimización de servicios de telecomunicaciones tienen siempre en consideración la fortaleza de la señal requerida, esto se conoce como requerimiento de calidad o calidad del servicio. Esta calidad del servicio es establecida por la operadora celular, es ella la que determina los

rangos apropiados que la señal debe tener para asegurar una buena cobertura celular.

3.1.1 Pérdidas de potencia en el sistema.

La pérdida de potencia en el sistema es imposible de evitar. Todo sistema distribuido de antena cuenta con una potencia inicial que se va degradando a lo largo de todo el sistema. La potencia inicial se recibe por medio de la antena donadora, localizada estratégicamente en la parte superior o externa del edificio. La antena donadora recibe a su vez su potencia de una de las antenas que se encuentren alrededor del edificio que necesita mejorar su cobertura celular. Un ejemplo de este entorno lo podemos observar en la **Figura 19**.

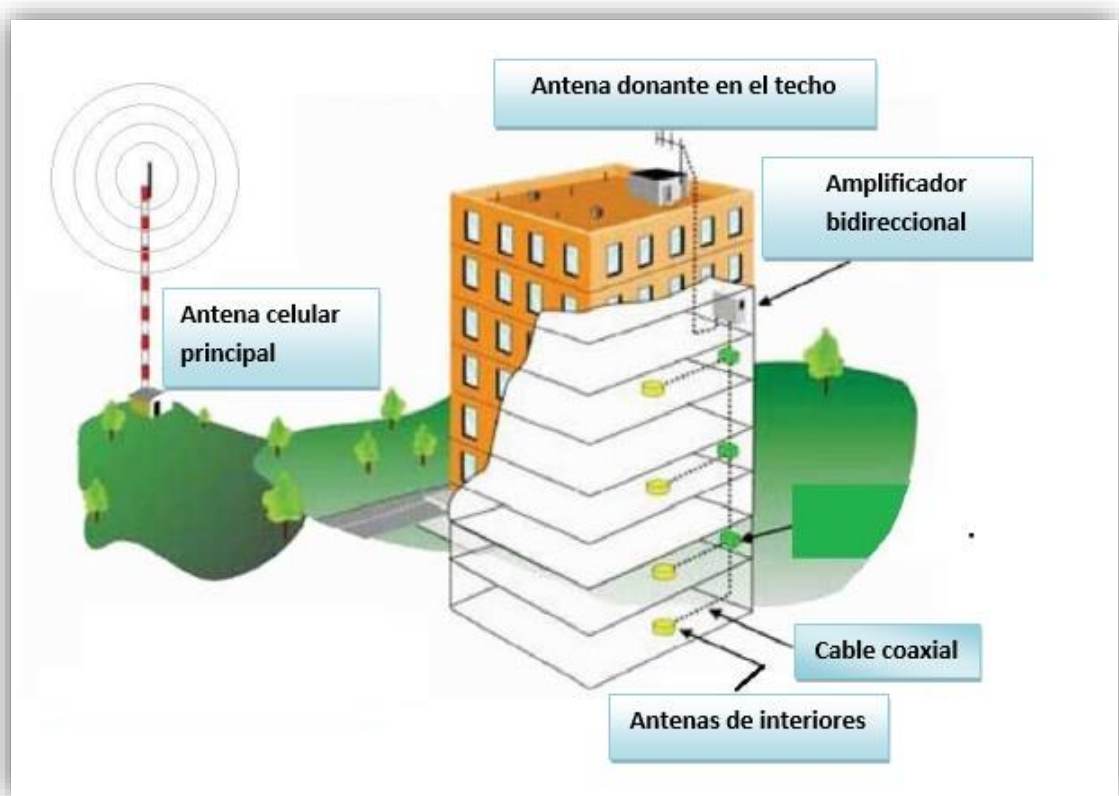


Figura 19 Representación de la recepción de potencia por parte de la antena donadora o donante.

El presente proyecto se enfoca en el diseño de las soluciones dentro de cada piso del edificio que se analiza, es decir, partimos del supuesto que ya se ha

establecido la instalación de la antena donadora y su conexión con una de las antenas externas.

Para el diseño de la solución de cobertura o DAS, es necesario una serie de componentes, tales como conectores, divisores, antenas, conectores, cable coaxial, etc.

A medida que se realizan conexiones a lo largo del sistema, se producen pérdidas. Cada equipo que se conecta implica una pérdida de potencia, cada conector que se debe utilizar para conectar los equipos de poder con el cable coaxial genera una pérdida de potencia, además existen pérdidas asociadas a los metros de cable utilizados. Estos datos serán mencionados más adelante cuando se desarrollen los modelos matemáticos.

3.2. RECURSOS Y EDIFICIOS SELECCIONADOS PARA ESTE PROYECTO

3.2.1 Optimización de los recursos

El principal objetivo de este proyecto es el diseño de una solución o DAS que permita brindar cobertura al área de trabajo, a la vez que se optimiza el uso de los recursos, en especial, el número de antenas a instalar y los metros de cable necesarios para la instalación.

Con el propósito de diseñar una solución que pueda brindar la cobertura celular debemos primero identificar los lugares donde se van a instalar las antenas, posteriormente se identificará la ruta óptima que pueda llevar la potencia desde la estación base a las antenas.

Este proyecto utilizará dos modelos matemáticos, el primer modelo matemático, Set covering problem (SCP) nos indicará el número de antenas que se van a instalar en el sitio, mientras que el segundo modelo matemático, busca la optimización de la red, para lo cual se utilizará como base el modelo VRP (Vehicle routing problem). Una variación de este modelo nos indicará los metros

de cable necesarios para conectar las antenas con la estación base. Para alcanzar este objetivo conjunto, utilizaremos las pérdidas de potencia, las distancias requeridas para conectar las antenas a la base, la potencia resultante en cada antena y los conectores necesarios. Finalmente, para determinar la eficiencia de la cobertura, la simulación en el software **iBwave** nos permitirá comparar la situación actual con el comportamiento de la solución propuesta por medio de los algoritmos previamente mencionados.

Los recursos le pertenecen a la operadora celular y por lo tanto no representan gastos de inventario para la empresa de logística de optimización de servicios de telecomunicaciones. El enfoque de este proyecto es básicamente la optimización de la cobertura celular.

3.2.2 Edificios que se consideran en este proyecto

Este proyecto de graduación considera dos edificios de negocios del país, localizados en las ciudades de Guayaquil y Manta. Para el caso de Guayaquil vamos a trabajar con las instalaciones de una empresa privada que manufactura productos de acero, dichas oficinas cuentan con un único piso, dividido en varias secciones, que incluyen salón de presentaciones, además de las varias oficinas, son estas secciones las que necesitan mejorar su cobertura celular.

En el caso de Manta, se trabajará con los datos correspondientes a un centro comercial de 5 pisos, los cuales vamos a denominar subsuelo 1, subsuelo 2, planta baja, piso 1 y piso 2. Se trata de una estructura localizada en un terreno de aproximadamente 30000 metros cuadrados, con capacidad para 200 locales comerciales, además cuenta con un comisariato e incluso tiene un hotel cinco estrellas con 165 habitaciones.

El centro comercial obviamente cuenta con varios negocios, sin embargo, la solución inicial presentada a la operadora celular no incluye la instalación de antenas dentro de los locales comerciales, sino que el estudio considera únicamente los pasillos del centro comercial, es por este motivo que los

conjuntos que se considerarán para los pisos del centro comercial, paso previo a la aplicación del algoritmo de cobertura, son distintos en cuanto a su composición de los conjuntos que se considerarán para la empresa de productos de acero, como se explicará más adelante.

3.3. ESTRATEGIA DE SOLUCIÓN

3.3.1. Algoritmo de cobertura ponderado

Para el presente proyecto, el algoritmo de cobertura nos va a permitir seleccionar de entre todas las locaciones potenciales de antenas celulares, aquellas que serán suficientes para brindar cobertura celular a todas las áreas de los edificios que vamos a analizar.

El algoritmo de cobertura consiste en encontrar un conjunto de soluciones capaces de brindar cobertura a un conjunto dado de necesidades, al menor costo posible (Wolsey, 1998).

El punto de partida para la aplicación de este algoritmo será la simulación de cobertura celular por medio del software iBwave, de donde vamos a obtener valores estimados, necesarios para poder utilizar el algoritmo de cobertura ponderado. En especial nos será de mucha utilidad la pérdida de potencia que se produce debido a la distancia propia del trayecto que conecta la estación base con las antenas. Esta pérdida representará la función objetivo, es decir, es el costo que queremos minimizar. Por su parte las restricciones, el conjunto de áreas que necesitan ser cubiertas, estarán conformadas por las áreas en las cuales, según la predicción inicial, se sugiere instalar los equipos.

Formulación matemática del algoritmo de cobertura ponderado

La notación utilizada para la formulación del problema de cobertura de conjuntos será la siguiente:

Conjuntos

i Sitios $i = 1, \dots, n$.

Variables de decisión

X_i Antenas que son instaladas en el sitio i . Variables binaria, cuyos valores serán

$$X_i = \begin{cases} 1 & \text{Si se instala una antena en el sitio } i \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

Función objetivo

Z Minimización del costo, mismo que está representado por las pérdidas de potencia en el sitio i , C_i , si se instala una antena en el sitio i , X_i . La función objetivo luce de la siguiente forma:

$$\text{Min } Z = \sum_i^n C_i X_i$$

Las restricciones son las expresiones matemáticas típicas del algoritmo de cobertura y no sufren modificación alguna, por tanto, el modelo completo luce de la siguiente forma:

$$\text{Min } Z = \sum_i^n C_i X_i$$

s.a.

$$\sum_i^n a_{ij} X_i \geq 1 \quad \forall i \in F$$
$$X_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in S.$$

3.3.2. Algoritmo de ruteo de vehículos (VRP)

Una vez que el algoritmo de cobertura nos ha permitido identificar las áreas en las cuales se deben instalar las antenas, a continuación, se procederá a considerar todas las posibles rutas que permitan la distribución de la potencia, desde la estación base hasta las antenas. Para este efecto utilizaremos el algoritmo de ruteo de vehículos, mismo que será modificado, de acuerdo con las condiciones del sistema distribuido de antenas.

El problema de ruteo de vehículos es una variante del problema del vendedor viajero o TSP por sus siglas en inglés, donde existen clientes i , con una demanda

asociada d y además existen vehículos con una capacidad C . El objetivo es encontrar la mínima cantidad de vehículos necesarios para poder satisfacer las demandas de todos los clientes (Olivera, 2004).

Para este proyecto el algoritmo VRP va a ser modificado, de tal forma que cada arco (i, j) no va a representar un cliente, sino una conexión entre equipos de poder y la demanda a ser satisfecha, en este caso será conocida como calidad del servicio.

Formulación matemática del algoritmo VRP modificado

La notación que será utilizada será la siguiente:

Conjuntos

i Nodos $i = /s, \dots, vn/$

$s(i)$ Nodo de inicio $/s/$

$V(i)$ Equipos de poder $/v1, \dots, vn/$

arcos (i, j) Todos los arcos $/s.v1, \dots, v. vn/$

Tabla

distancias (i, j) registra las distancias que existen entre todos los arcos (i, j) .

Parámetros

$L(v)$ Potencia en cada nodo

perdida (v) Pérdida en cada nodo

ganancia (v) Ganancia en cada nodo

INFERIOR Calidad mínima del servicio requerido (dBm)

PERD Pérdida por metro de cable

Variables de decisión

$x(i, j)$ Arcos que conectan todos los equipos de poder y antenas

$$x(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{si el nodo } i \text{ se conecta con el nodo } j \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

$V(i)$ representará a todos los nodos que se conectarán a lo largo de toda la red, esto incluye a los equipos de poder o splitters y las antenas.

arcos (i, j) representa a todos los arcos potenciales que pueden conectarse.

$L(v)$ va a representar la potencia que se recibe en cada antena. Como restricción, esta variable debe considerar la calidad del servicio, la misma se refiere a la potencia que deben tener las antenas para asegurar la apropiada cobertura de las áreas, esta potencia varía de acuerdo con las condiciones establecidas por el cliente, esto es la operadora celular, para este trabajo se considera que la potencia deberá ser superior o igual a -75 dBm.

El parámetro **perdida** (v) representará la pérdida que se origina producto del uso de conectores y que equivale a 3 dBm, pero se duplicará a 6 dBm, por cuanto en cada segmento se necesitan dos conectores para unir los equipos.

El parámetro **ganancia** (v) representará la ganancia que se produce en cada segmento, esta tendrá un valor de 5.1 dBm en las antenas y tendrá un valor de cero en el resto de los segmentos.

Luego, la pérdida que se produce a lo largo de los metros de cable utilizado será el resultado de multiplicar el parámetro **PERD** con las distancias existentes en cada **arco** (i, j) . Por cada 100 pies o 30.48 metros de cable se pierden 2,2 dBms, donde el valor del parámetro **PERD** es de $\frac{2.2 \text{ dBm}}{30.48 \text{ metros}}$.

Función objetivo

Z Minimización de los metros de cable, mismo que está representado por las distancias **distancia** (i,j) con cada uno de los nodos, si el nodo está activo, esto se da cuando la variable binaria $x(i, j) = 1$. La función objetivo luce de la siguiente forma:

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \text{distancias}_{ij} X_{ij}$$

Restricciones de distancia

Las restricciones de distancia consideran todas las posibles rutas que existen desde la estación base, entre los equipos de poder y las rutas hacia las antenas, a manera de ejemplo tenemos la siguiente restricción que se refiere a los nodos que salen de la estación base:

$$\sum_{v=1}^n x(i, v) = 1 \quad \forall i = s$$

Restricción de calidad de servicio

La restricción de calidad de servicio se refiere a la potencia requerida para poder brindar cobertura celular, esta restricción indica que la misma debe ser mayor que -75 dBm, $l(v) \geq -75$.

Restricción de la variable binaria

Finalmente tenemos la restricción de la variable binaria $X_i \in \{0, 1\} \forall i \in S$.

Al final, la combinación de los dos algoritmos, el algoritmo de cobertura y el de ruteo de vehículos modificado nos permitirá optimizar el uso de los recursos en cada solución de cobertura celular, lo que en primera instancia se traducirá en un óptimo uso de los recursos, esto es, menor número de antenas, menos metros de cable, menos equipos de poder, etc.

Luego de esto, será necesario validar la funcionalidad de la solución, esto será únicamente posible realizando una nueva simulación de la cobertura celular brindada por las antenas sugeridas por los modelos matemáticos.

La pérdida por absorción

La potencia que se obtiene en el modelo matemático será diferente a la que se obtiene si las antenas son instaladas y esto se debe a una variable llamada pérdida por absorción, que consiste en la potencia que se pierde producto de los materiales de construcción utilizados en el edificio que se encuentra bajo estudio.

Esta variable, la pérdida por absorción no puede ser incluida en el modelo matemático, pues existen infinitud de materiales, pero su comportamiento si puede ser simulado, de allí que existan diferencias entre la potencia de las antenas en el modelo matemático y la potencia de las antenas ya instaladas. Esto se puede ver claramente en el análisis de la simulación.

3.4. DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN

3.4.1. Walk test de la empresa productora de artículos de acero

El walk test consiste en un recorrido por las instalaciones, para poder medir la cobertura celular existente y las posibles falencias. Para este efecto se utilizan 2 tipos de software, el primero recibe la información a medida que se recorre por las instalaciones y luego esta información es leída en el software **Mapinfo**, donde los datos se traducen en un mapa.

La **Figura 20** se refiere al walk test de la tecnología 2G. Este walk test se denomina **Short call 850 RSCP**, donde RSCP se refiere al nivel de señal y 850 es la identificación de la tecnología 2G.

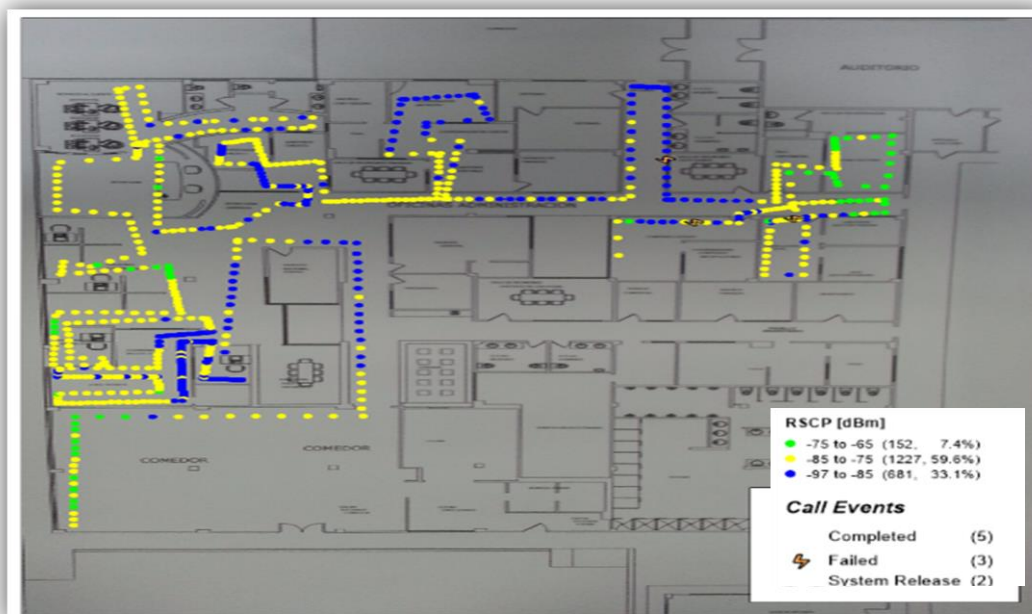


Figura 20 Short call 850 RSCP - Walk test tecnología 2G.

El gráfico incluye un reporte que nos indica que apenas un 7.4% del área de trabajo tiene un nivel de señal entre -75 y -65 dBm. Casi un 60% del área de estudio tiene un RSCP entre -85 y -75 dBm, mientras un 33.1% de toda la empresa tiene un RSCP con niveles entre -97 y -85 dBm. Si bien existen áreas que reflejan la necesidad de mejorar la cobertura para la tecnología 2G, esta necesidad no es tan crítica como lo es para la tecnología 3G. Así también se incluye un pequeño reporte de las llamadas completadas y las llamadas fallidas.



Figura 21 Short call RSCP – Walk test tecnología 3G.

Por otro lado, la **Figura 21**, nos muestra el Walk test denominado **Short call 1900 RSCP**. RSCP se refiere al nivel de señal y 1900 es una identificación que se refiere a la cobertura brindada por la tecnología 3G.

Este último gráfico incluye también un reporte, mismo que nos indica que apenas un 0.3% de las lecturas de nivel del área de trabajo se encuentran entre -75 y -65 dBm. Un 12.1% tiene un RSCP entre -85 y -75 dBm y se evidencia un problema de cobertura en especial si consideramos que un 82.1% de las lecturas del nivel de señal del área en estudio tiene niveles entre -97 y -85 dBm.

Es evidente por tanto que, en la situación actual, la empresa productora de artículos de acero tiene problemas de cobertura celular. Como siguiente paso se procederá a realizar una simulación inicial, misma que es necesaria para poder obtener las pérdidas por cable, que se obtendrían de instalarse una antena en cada área.

3.4.2. Simulación inicial de la cobertura celular para la empresa de productos de acero

En la **Figura 22**, podemos observar la simulación inicial de la solución de cobertura celular para la empresa. Esta solución propuesta cubre todas las áreas que se habían identificado como problemáticas, según los mapas del walk test, previamente analizados.

Las zonas en color rojo hacen referencia a las zonas en las cuales la potencia de la señal emitida por las antenas alcanza los -50 dBms. Las zonas en color verde también representan zonas donde la cobertura es muy buena, en estas zonas la señal de las antenas alcanza los -75 dBms, mientras que las zonas en color amarillo presentan una intensidad de señal de -65 dBms.

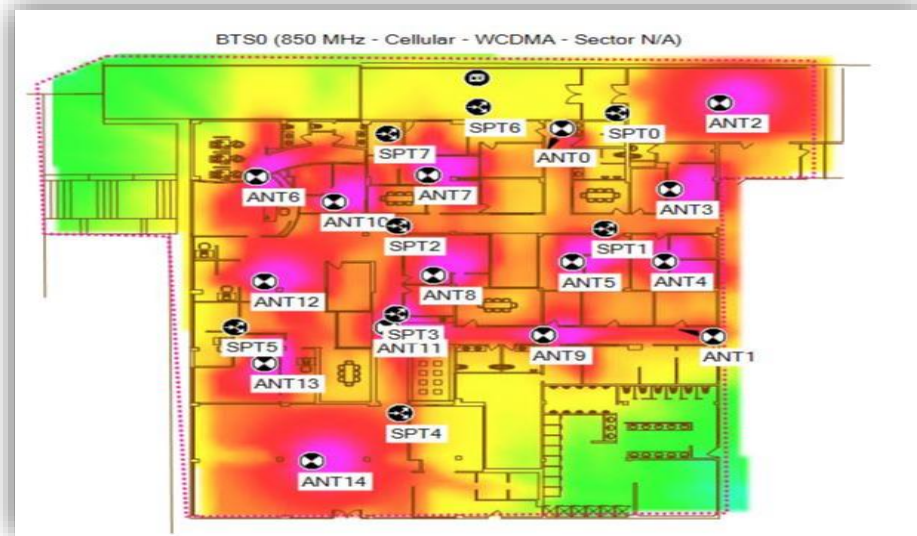


Figura 22 Mapa de simulación de la cobertura para la empresa de productos de acero.

En total se propone la instalación de 15 antenas, mismas que se denotan con las siglas **ANT** y en la **Figura 23** aparecen numeradas en la predicción, desde la Antena 0, **ANT0**, hasta la antena 14, **ANT14**. Esta solución requiere en total 274.84 metros de cable, además de las 15 antenas se necesitan 8 splitters o divisores.

3.4.3. Áreas de la empresa que necesitan cobertura

De acuerdo con la simulación inicial, donde se recomendó la instalación de 15 antenas, se plantea por tanto que existen 15 áreas que necesitan cobertura y son las áreas que se pueden observar en la **Figura 23**.

De esta simulación obtenemos datos que van a ser importantes para el primer modelo matemático, esto es el modelo de cobertura. En vez de trabajar con costos en términos monetarios, la función objetivo del modelo de cobertura se referirá a las pérdidas potenciales que acarrea la instalación de una antena en una de las áreas de la **Figura 23**.

Las distancias desde la estación base hasta las antenas y la correspondiente pérdida de potencia que se produce a lo largo del cable que conecta la estación base con las antenas, se visualizan en la **Tabla 3**.

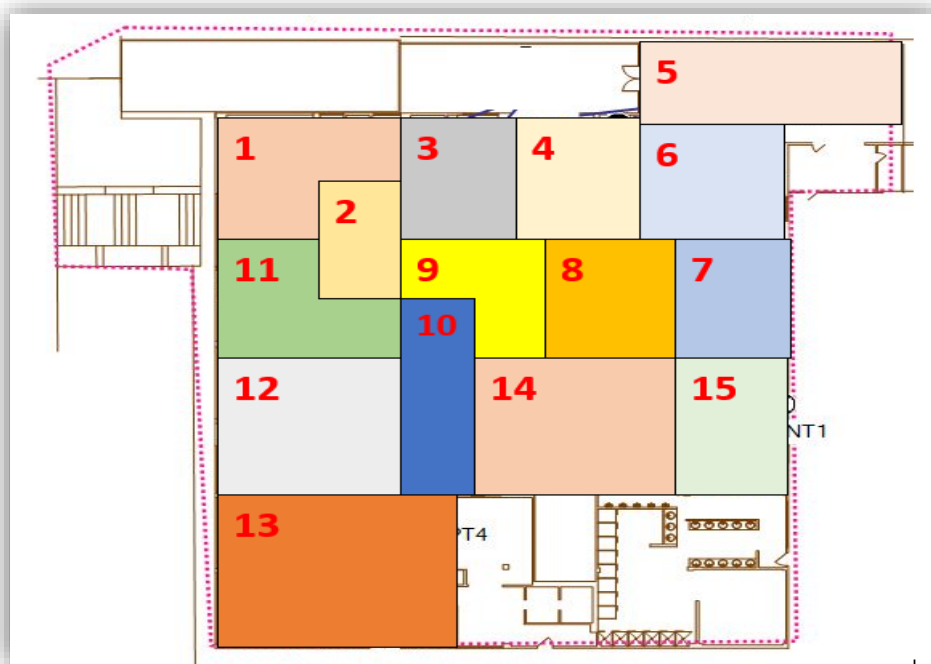


Figura 23 Áreas que necesitan cobertura en las oficinas de la empresa.

Antenas	Distancia en metros	Pérdida por cable dBm's
0	36.56	2.64
1	50.7	3.66
2	40.24	2.90
3	42.32	3.05
4	40.61	2.93
5	39.16	2.83
6	37.51	2.71
7	31.04	2.24
8	58.28	4.21
9	69.55	5.02
10	30.21	2.18
11	54.29	3.92
12	76.95	5.55
13	69.55	5.02
14	66.11	4.77

Tabla 3 Pérdidas por distancia en dBm en las oficinas de la empresa de productos de acero.

3.4.4. Resultados de la aplicación de los modelos matemáticos en la empresa de productos de acero

Después de aplicar los modelos matemáticos se obtuvieron resultados positivos. Por una parte, el algoritmo de cobertura nos recomienda instalar únicamente cuatro antenas, lo que equivale a una reducción del 73.3% en instalación de estos equipos, ver **Figura 24**.

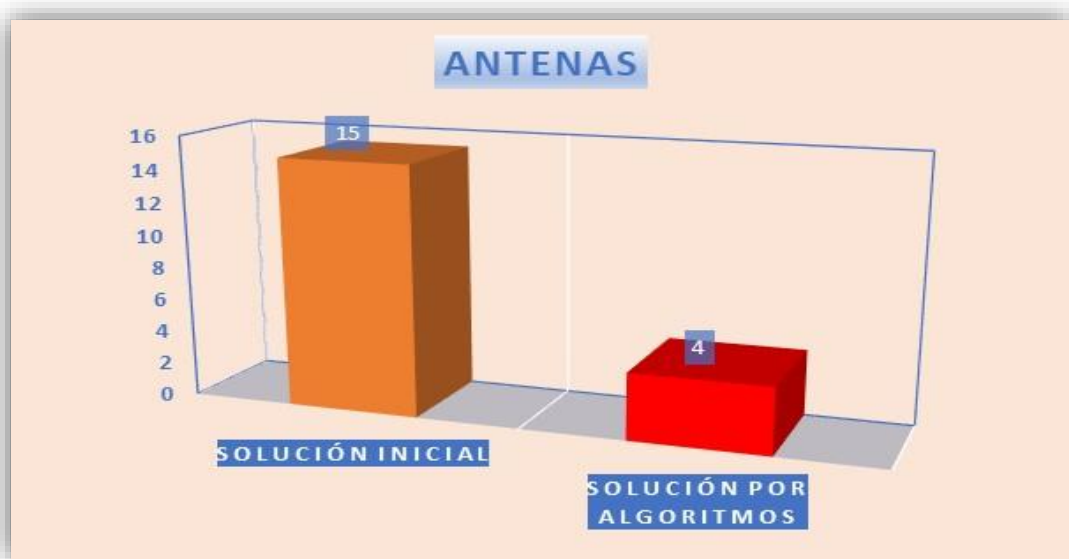


Figura 24 Comparación del número de antenas en las soluciones de cobertura celular para la empresa de productos de acero.

Luego, al aplicar el algoritmo de ruteo, logramos identificar las conexiones que serán necesarias para distribuir la potencia desde la estación base hasta las cuatro antenas. Las conexiones recomendadas por el modelo de ruteo salen de la estación base y se conectan a un único splitter o divisor, para luego dirigirse a las cuatro antenas que el modelo de cobertura recomendó, ver **Figura 25**.

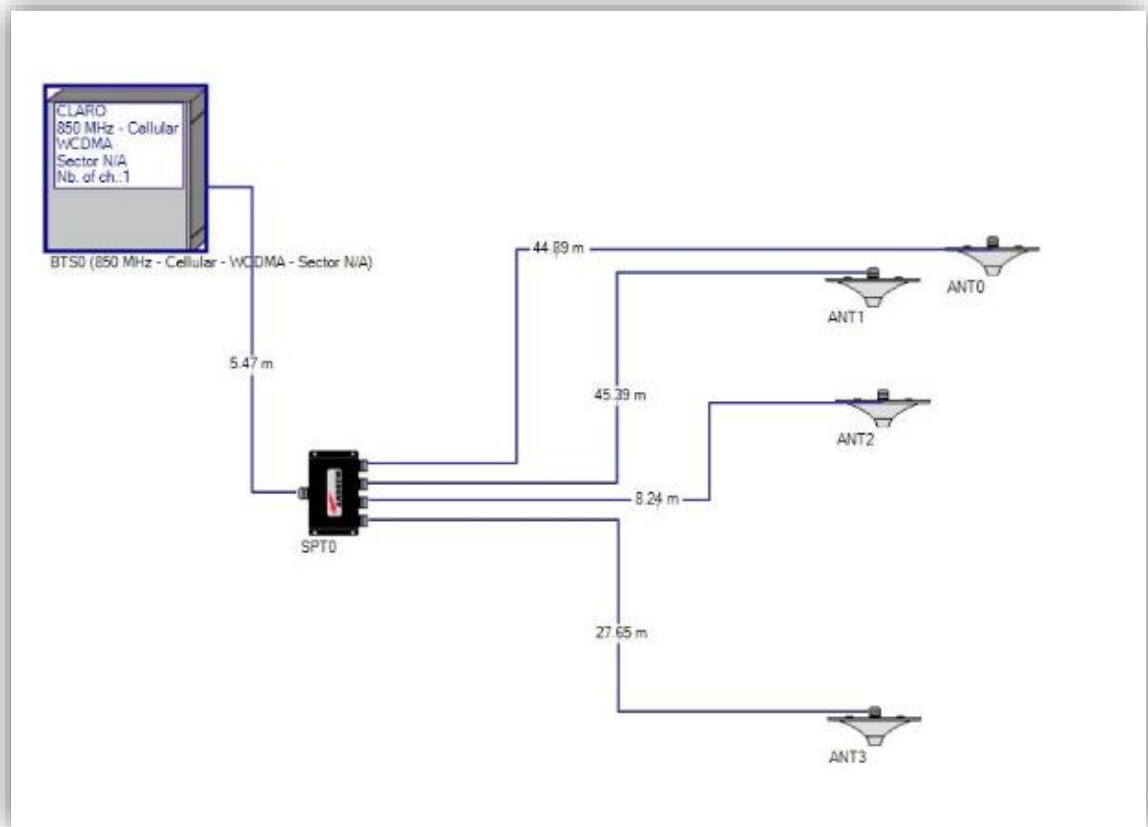


Figura 25 Esquemático de la solución de cobertura para la empresa de productos de acero – Nuevo diseño.

Esta solución logra minimizar los metros de cable requeridos, ahora se necesitan 131.64 metros de cable, cuando originalmente se requerían 274.83 metros, lo que equivale a una reducción de aproximadamente 52%, ver **Figura 26**.

Así también se ha podido reducir el número de equipos intermedios a instalar. Al utilizar los modelos matemáticos, ahora se requiere un único splitter o divisor. Comparado con los 8 divisores que se necesitaban en la simulación inicial, esta variación representa una reducción del 88%, ver **Figura 27**.

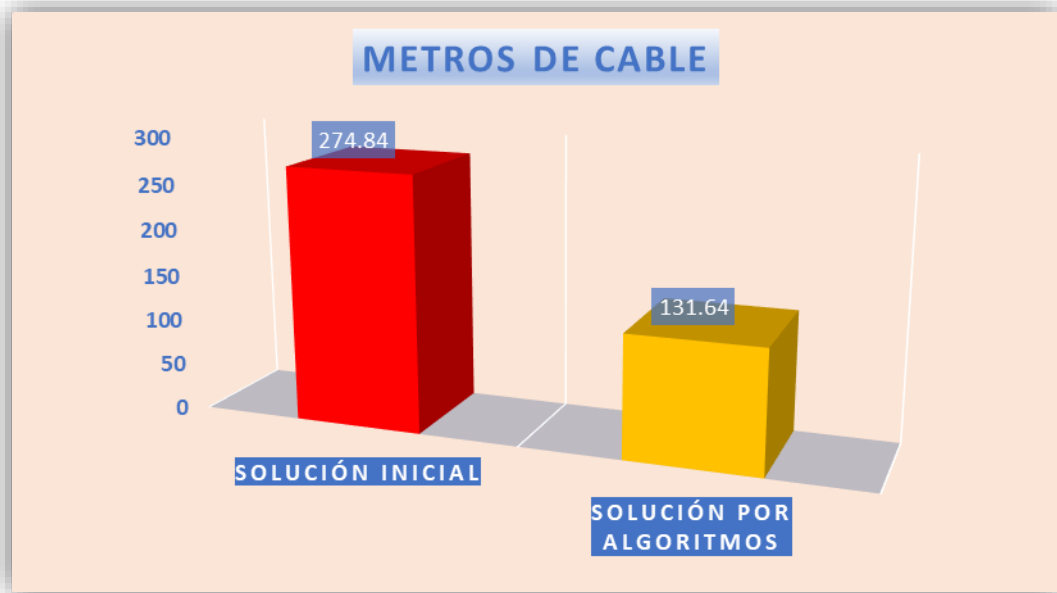


Figura 26 Comparación de los metros de cable en las soluciones de cobertura celular para la empresa de productos de acero.

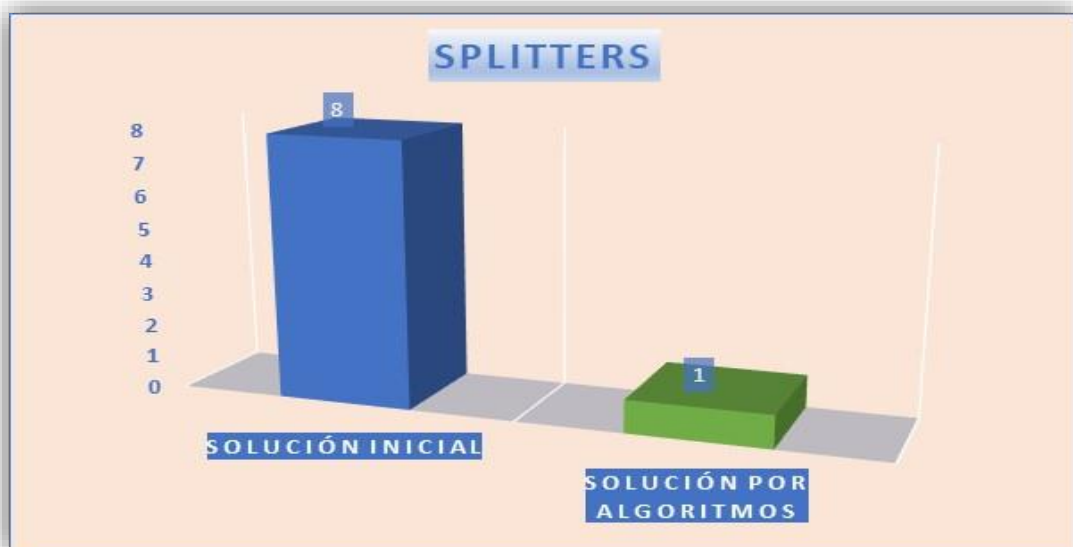


Figura 27 Comparación del número de splitters en las soluciones de cobertura celular para la empresa de productos de acero.

El siguiente paso consiste en analizar la eficiencia de la solución, mismo que veremos a continuación.

3.4.4. Empresa de productos de acero: Simulación de la cobertura con 4 antenas SISO

Con el propósito de revisar la cobertura celular, es necesario realizar una nueva simulación con el software. Considerando las cuatro antenas que el algoritmo SCP nos ha sugerido y la ruta que nos ha mostrado el algoritmo VRP modificado, la **Figura 28** nos muestra la nueva simulación de la cobertura para la empresa manufacturera de productos de acero.

Como podemos observar, la nueva simulación demuestra que las cuatro antenas brindan cobertura a todas las áreas previamente identificadas, tal y como era de esperarse al aplicar el algoritmo SCP. En las zonas más cercanas a las antenas la potencia alcanza una lectura de alrededor de -40 dBm, estas son las zonas de calor en color rosado y que corresponden al 3.7% de toda el área de trabajo.

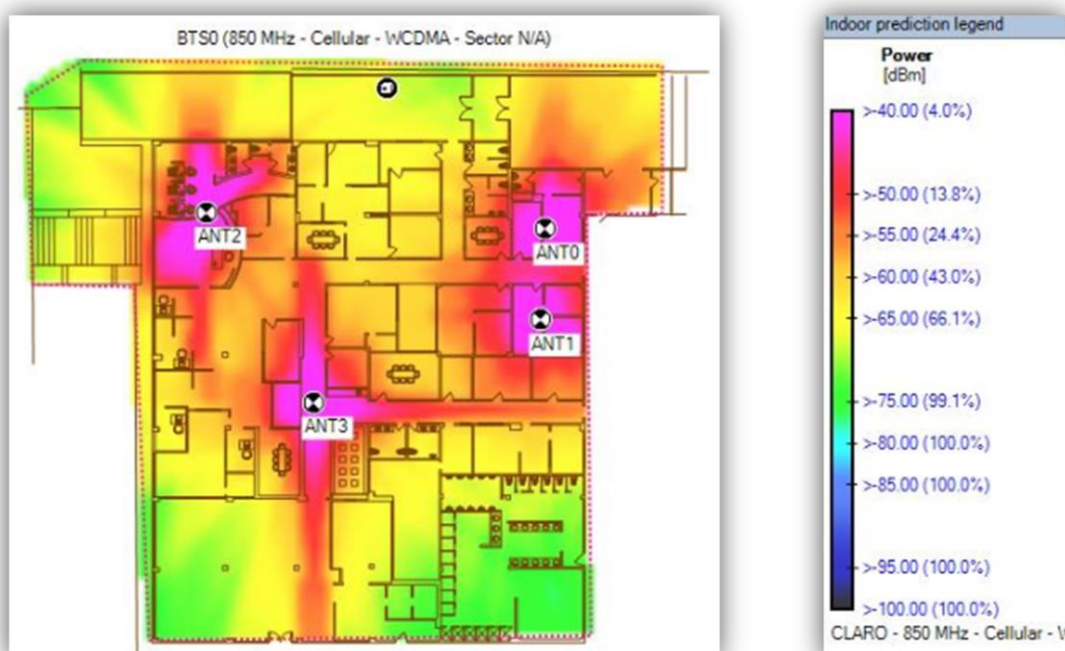


Figura 28 Mapa de simulación de la cobertura con 4 antenas tipo SISO – Nuevo diseño.

A medida que nos alejamos de las antenas, la potencia disminuye a aproximadamente -50 dBm, estas son las zonas de calor en color rojo. Según la escala, aproximadamente 12.9% de las muestras de las simulaciones de cobertura tiene una potencia superior a -50 dBm. Posteriormente la potencia disminuye hasta -65 dBm, estas son las zonas en color amarillo, aproximadamente 64% de las muestras tienen una potencia entre -65 dBm y -40 dBm, mientras que las zonas en color verde tienen una potencia de aproximadamente -75 dBm y en el acumulado casi el 100% de las muestras tienen una potencia superior a -75 dBm. En conjunto la cobertura celular de la solución propuesta por medio de los modelos matemáticos es muy buena. pues se respetan los estándares de calidad establecidos por la operadora celular y se brinda cobertura a todas las áreas de la empresa.

3.4.5. Mapas del Walk Test del Centro Comercial en Manta

Primer Piso

En cada uno de los pisos se realizó un muestreo por tipo de tecnología, esto es, tecnología **2G** y **LTE**. En la **Figura 29** podemos observar que en el primer piso del centro comercial se realizaron 136 muestras por tecnología 2G (**GSM 850**), 158 muestras para la tecnología 3G (**UMTS 1900**) y 71 muestras para la tecnología LTE (**UMTS 850**). El recorrido aparece en el mapa con colores amarillo, verde y rojo para cada tecnología.

Posteriormente, se realiza el análisis de la cobertura actual, esto es posible mediante el análisis de varios mapas, donde se observa las áreas que presentan problemas, entre los cuales podemos citar tiempos de descarga baja, llamadas caídas, llamadas fallidas, etc.



Figura 29 Walk test del piso 1 del centro comercial, muestras por tecnología.

Así, si observamos la **Figura 30**, de acuerdo con la escala de descarga dual **RXLEV**, las zonas que aparecen con colores negro y azul representan áreas en donde la cobertura celular para la tecnología 2G no es efectiva y por tanto se hace necesario la instalación de equipos que puedan garantizar el servicio.

Además, de acuerdo con la escala de descarga dual **RSCP** para la tecnología 3G, existen muchas más áreas del primer piso del centro comercial, donde la cobertura actual necesita de la instalación de antenas para mejorar el servicio. Esto es claramente visible en el recorrido que abarca desde el local de Pycca hasta las inmediaciones del local de Marathon Sports, recorrido visible en la **Figura 31**.



Figura 30 Walk test del Piso 1 del centro comercial, descarga dual RXLEV

Segundo piso

En cuanto al segundo piso, se tomaron muestras tanto para la tecnología **3G** como para la tecnología **LTE**, **UMTS 1900** y **UMTS 850** respectivamente. El recorrido aparece en la **Figura 32**.

Para el caso de la tecnología **3G**, la **Figura 33** nos muestra la situación actual refleja que existe cerca de un 29.22% de la muestra con niveles de intensidad de señal entre -97 a -85 dBm y un porcentaje mayor, casi un 53% de las muestras tienen niveles de intensidad de señal entre -130 a -97 dBm, es decir en conjunto casi un 83% del área del segundo piso tiene niveles de intensidad de señal muy bajos y por lo tanto se justifica la necesidad de instalar antenas para mejorar la cobertura celular del sector.



Figura 31 Walk test del Piso 1 del centro comercial descarga dual RSCP



Figura 32 Walk test del Piso 2 del centro comercial por tecnología.

La situación de la tecnología LTE se presenta en la **Figura 34**, donde nuevamente, los niveles más bajos de intensidad de señal se presentan de color azul y negro, en conjunto representan aproximadamente un 30% de la muestra, además de ello es posible observar que existen áreas problemáticas en común entre ambas tecnologías.



Figura 33 Walk test del Piso 2 del centro comercial RSCP.



Figura 34 Walk test del Piso 2 DL LTE RSRP.

Planta baja y subsuelos

En cuanto a la planta baja y los subsuelos, en ambos casos se tomaron muestras para las tecnologías **3G** y **LTE**, estos mapas pueden ser revisados en la sección de anexos.

3.4.6. Simulación inicial del Centro comercial por pisos

Con la información recabada al analizar el walk test de cada piso, se propuso una solución inicial, la misma que consta de un total de 41 antenas, mismas que se encuentran distribuidas entre cada uno de los pisos, tal y como se describe en las líneas subsiguientes.

El piso 2 no tiene mayores problemas de cobertura, por lo cual la solución inicial considera que, con una única antena omnidireccional en el piso, localizada en el patio de comidas, obviamente uno de los lugares más visitados de todo centro comercial. Esta única antena será suficiente para asegurar la cobertura celular de toda el área, tal y como lo observamos en la **Figura 35**.

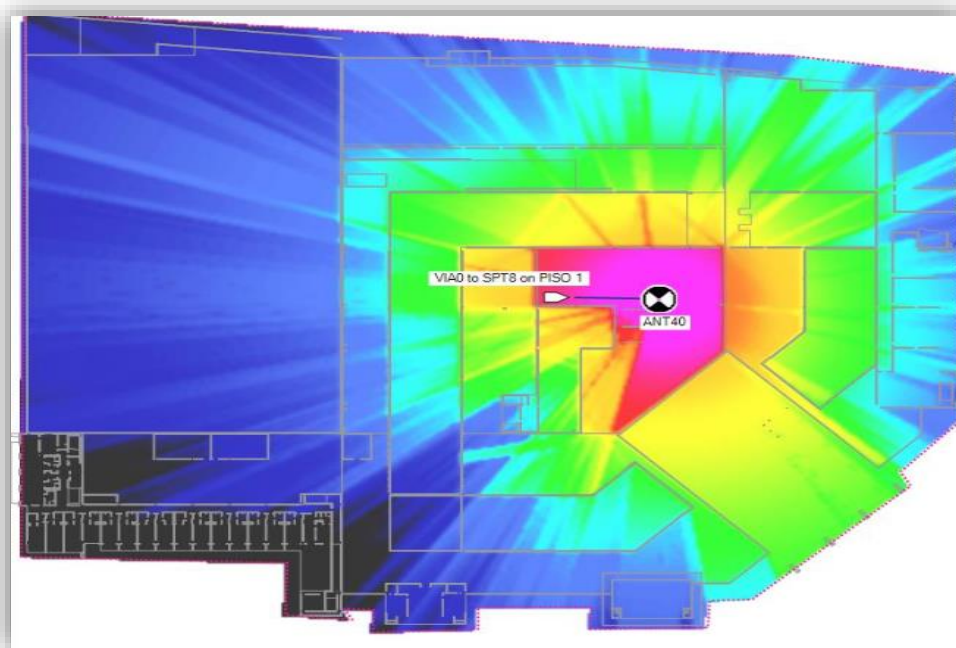


Figura 35 Mapa de simulación de la cobertura celular del Piso 2 del Centro comercial.

El piso 1 tenía grandes problemas de cobertura celular, por lo tanto, la solución inicial recomienda instalar 12 antenas, tal y como se observa en la **Figura 36**. El conjunto de antenas hace posible que se produzca una mejora notable en toda el área.

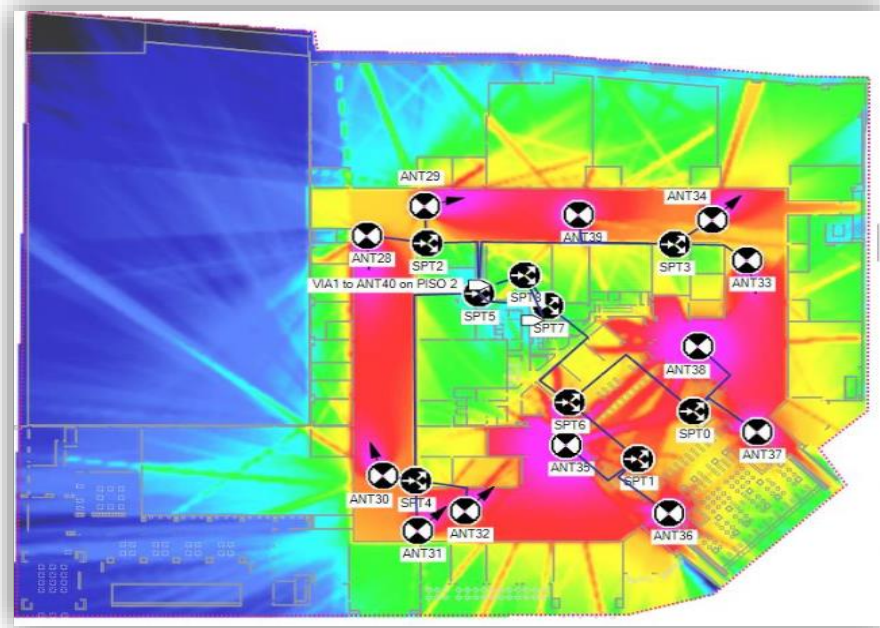


Figura 36 Mapa de simulación de la cobertura celular del Piso 1 del centro comercial.

La planta baja es la que mayores problemas presentaba, por tanto, la solución inicial, según observamos en la **Figura 37** plantea la instalación de 17 antenas.

Se desconocen las razones exactas por las cuales se han presentado estos problemas, pero podemos inferir que uno de los motivos podría ser la misma estructura del centro comercial, esto en cuanto a los materiales utilizados para su construcción, es posible que estos actúen como una barrera que impide que la señal o su potencia se pueda propagar sin mayor problema en toda el área.

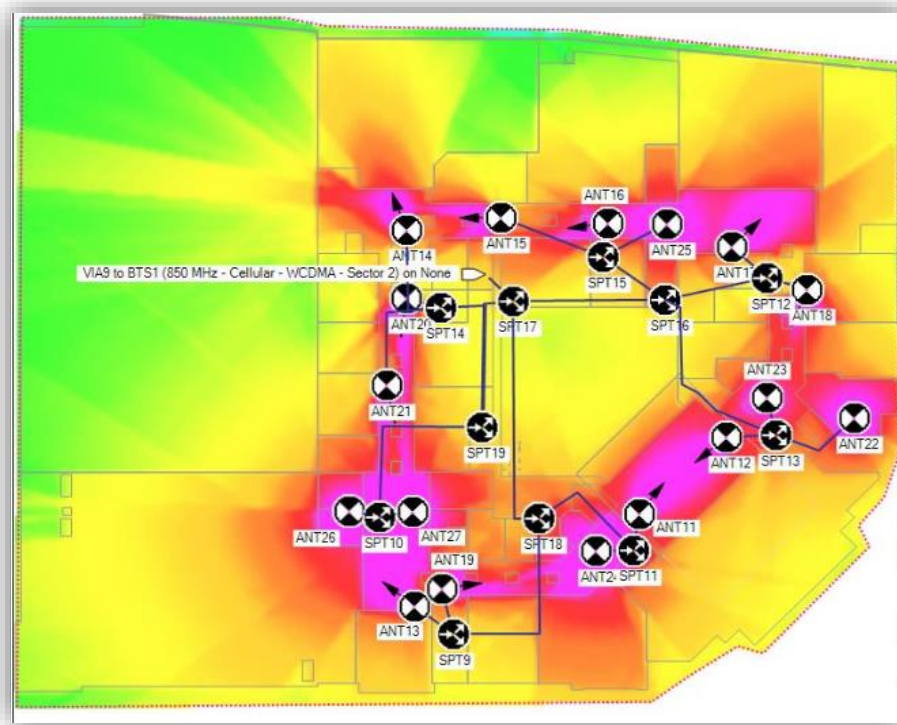


Figura 37 Mapa de simulación de la cobertura celular de la Planta Baja del centro comercial.

En el siguiente piso, esto es, el subsuelo 1, no se presentaban problemas de cobertura celular, mismos que según la solución inicial se plantea contrarrestar con la presencia de siete antenas, tal y como podemos observar en la **Figura 38**.

Finalmente, en cuanto al subsuelo 2, de acuerdo con la solución inicial, se instalaron cuatro antenas, como podemos observar en la **Figura 39**. Las condiciones de esta área, según el análisis del walk test, hacen que no sean necesarias más antenas.

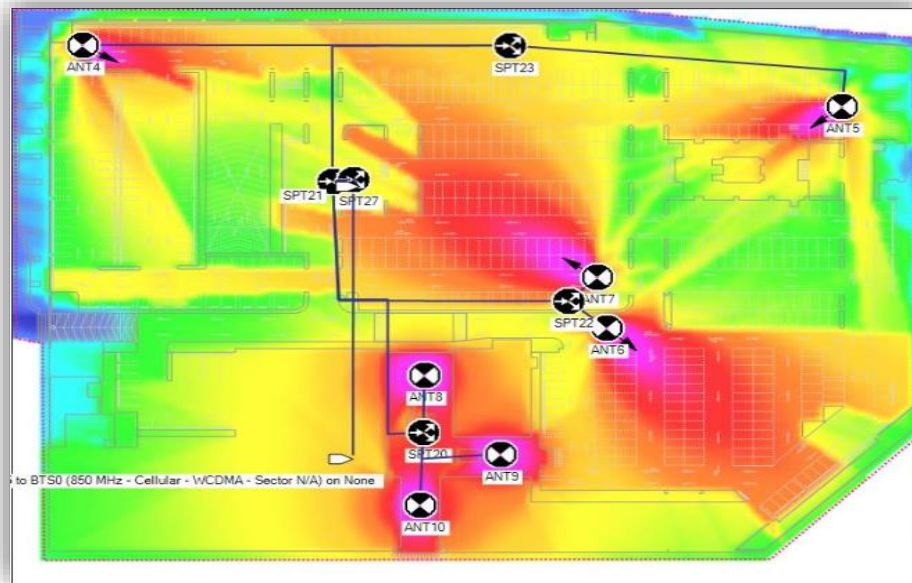


Figura 38 Mapa de simulación de la cobertura celular del Subsuelo 1 del centro comercial.

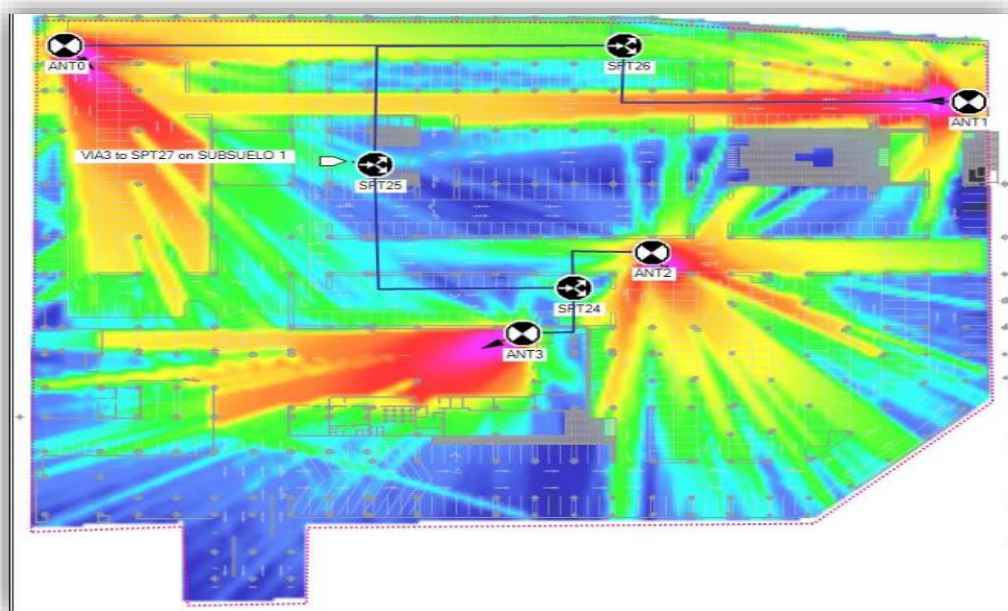


Figura 39 Mapa de simulación de la cobertura celular del Subsuelo 2 del centro comercial.

3.4.7. Áreas del centro comercial que necesitan cobertura

La simulación inicial recomienda instalar un total de 41 antenas, sin embargo, dado que en el piso 2 se requiere instalar una única antena y en el subsuelo 2 se recomienda instalar cuatro antenas, la identificación de las áreas por piso se centrará en el piso 1, la planta baja y el subsuelo 1, es decir, pisos en los cuales el número de antenas amerita el uso de los modelos matemáticos.

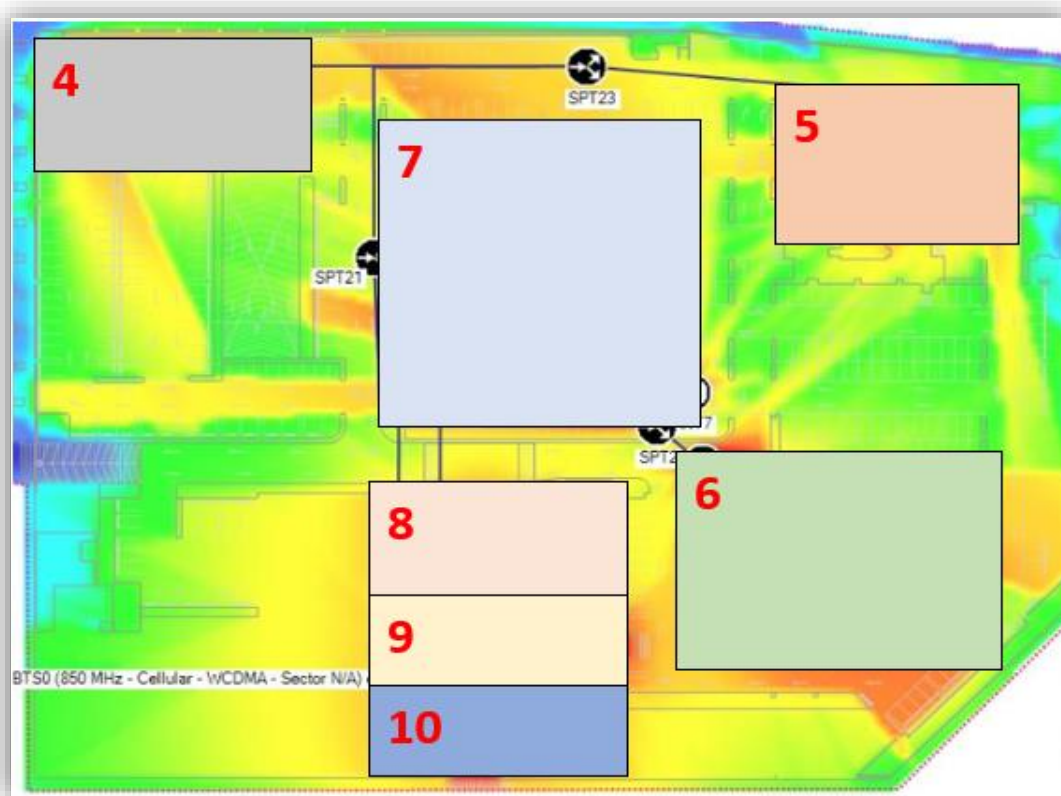


Figura 40 Áreas que necesitan cobertura en el Subsuelo 1 del centro comercial.

En la **Figura 40** en podemos observar los conjuntos que se forman en base a la simulación inicial, en donde se identificaron 7 áreas, únicamente tres de ellas se encuentran cercanas, por tanto, los otros cuatro sitios se consideran un conjunto como tal.

La **Figura 41** nos presenta las áreas que necesitan cobertura en la Planta Baja. La planta baja del centro comercial tenía serios problemas y por tanto el número de áreas identificadas es mayor.

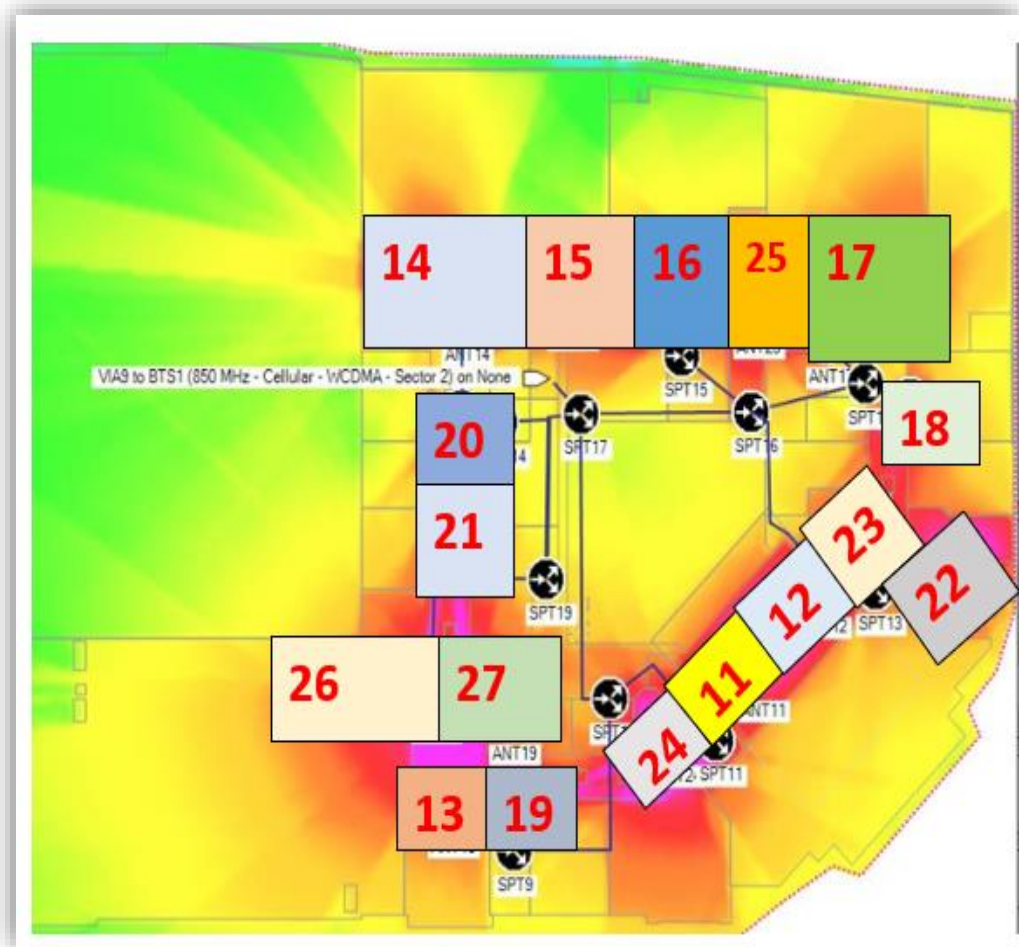


Figura 41 Áreas que necesitan cobertura en la Planta baja del centro comercial.

Finalmente, la **Figura 42** nos presenta las áreas que necesitan cobertura en el Piso 1. En este piso también se necesitaba un mayor número de equipos, de acuerdo con la simulación inicial.

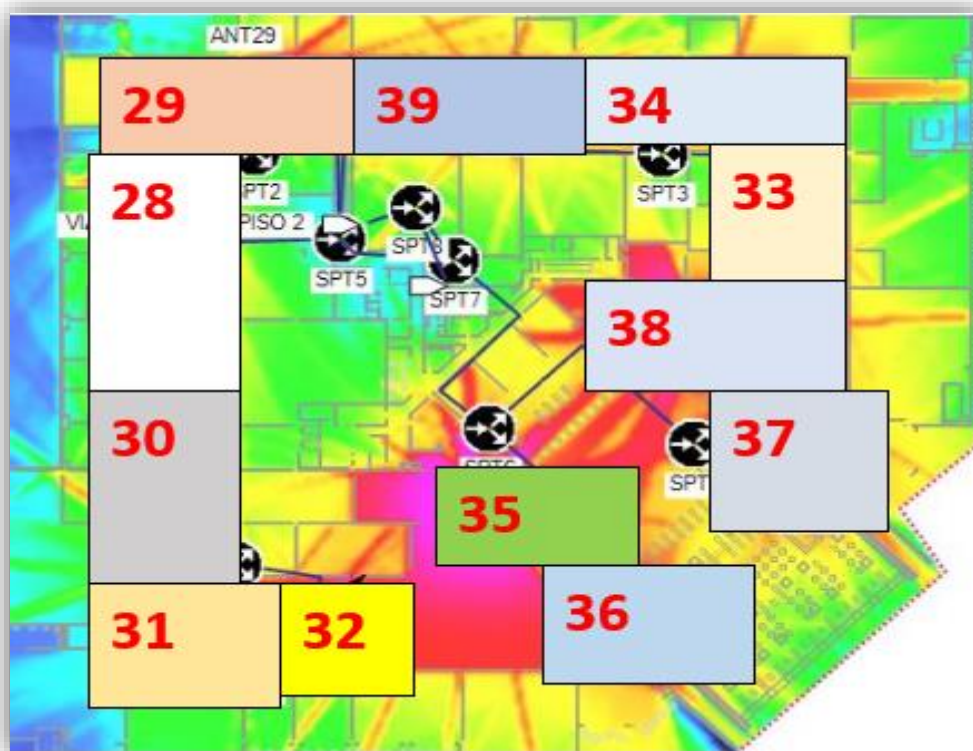


Figura 42 Áreas que necesitan cobertura en la Piso 1 del centro comercial.

Las distancias desde la estación base hasta las antenas y la correspondiente pérdida de potencia que se produce a lo largo del cable que conecta la estación con las antenas, se visualizan en la **Tabla 4, 5 y 6**.

Antenas	Distancia en metros	Pérdida por cable dBm's
4	192	13.86
5	184	13.28
6	134	9.67
7	132	9.53
8	141	10.18
9	148	10.68
10	144	10.39

Tabla 4 Pérdidas por distancia en dBm en el Subsuelo 1 del centro comercial.

Antenas	Distancia en metros	Pérdida por cable dBm's
11	100	7.22
12	99	7.15
13	121	8.73
14	107	7.72
15	83	5.99
16	65	4.69
17	75	5.41
18	73	5.27
19	121	8.73
20	88	6.35
21	110	7.94
22	109	7.87
23	96	6.93
24	101	7.29
25	74	5.34
26	92	6.64
27	93	6.71

Tabla 5 Pérdidas por distancia en dBm en la Planta baja del centro comercial.

Antenas	Distancia en metros	Pérdida por cable dBm's
28	97	7.00
29	92	6.64
30	137	9.89
31	145	10.47
32	150	10.83
33	142	10.25
34	133	9.60
35	129	9.31
36	127	9.17
37	147	10.61
38	152	10.97
39	155	11.19

Tabla 6 Pérdidas por distancia en dBm en el Piso 1 del centro comercial.

3.4.8. Resultados de la aplicación de los modelos matemáticos en el centro comercial

Después de aplicar los modelos matemáticos se pudo alcanzar la cobertura deseada en cada uno de los pisos. Por una parte, la aplicación del modelo matemático de cobertura nos recomienda instalar 23 antenas, lo que comparado con las 41 antenas que originalmente se propuso instalar, equivale a una reducción del 44% en instalación de estos equipos, ver **Figura 43**.



Figura 43 Comparación del número de antenas en las soluciones de cobertura celular en el centro comercial.

Luego, al aplicar el algoritmo de ruteo, logramos identificar las conexiones que serán necesarias para distribuir la potencia desde la estación base hasta las 23 antenas. Las conexiones recomendadas por el modelo de ruteo salen de la estación base y se conectan a varios splitters o divisores, para luego dirigirse a las antenas correspondientes que el modelo de cobertura recomendó para cada piso analizado, ver **Figura 44, 45 y 46**.

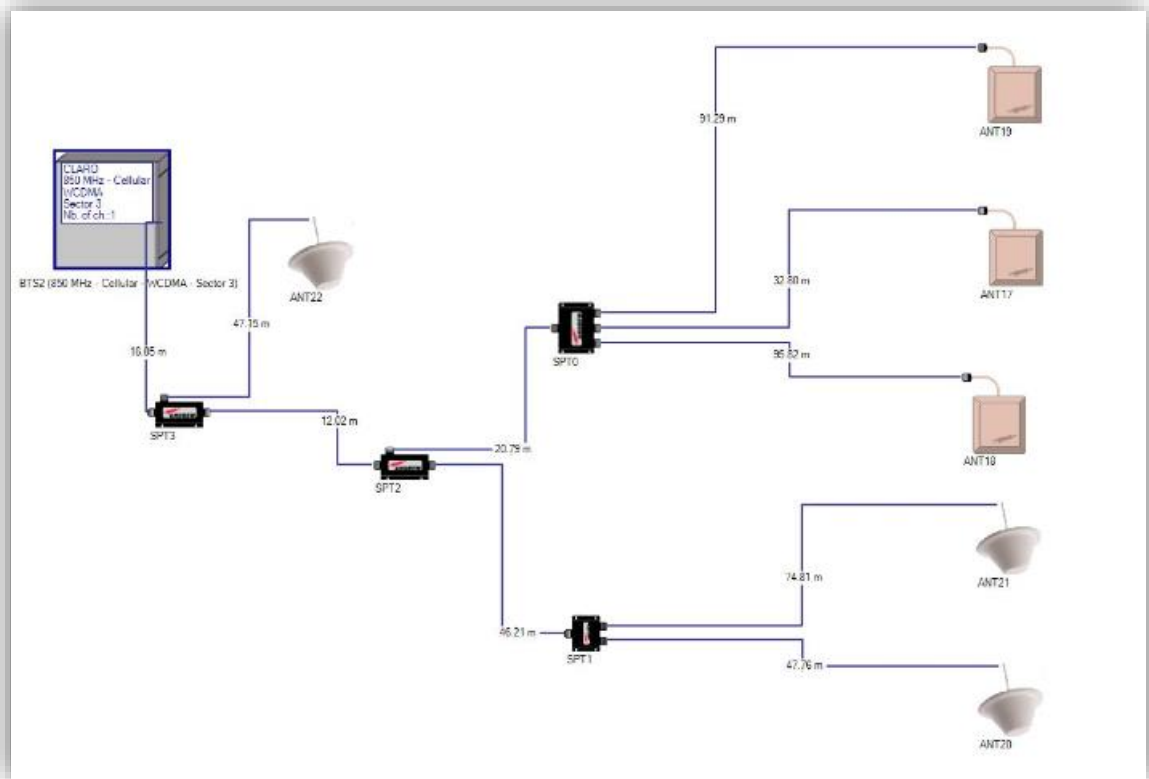


Figura 44 Esquemático de la solución de cobertura de los Pisos 1 y 2 del centro comercial – Nuevo diseño.

En la **Figura 44** podemos observar que, en total, entre el piso 1 y 2, se recomienda instalar 6 antenas, 5 que corresponden al piso 1 y la restante que pertenece al piso 2.

La solución inicial de los dos pisos contaba con trece antenas, 12 de ellas correspondían al piso 1. Por otro lado, este nuevo diseño utiliza 4 splitters o divisores y 484.7 metros de cable. En la solución inicial se necesitaban 9 splitters y 657 metros de cable. Por tanto, En cuanto a los splitters se ha producido una reducción de aproximadamente 56%, mientras que en el requerimiento de los metros de cable la reducción corresponde al 26%.

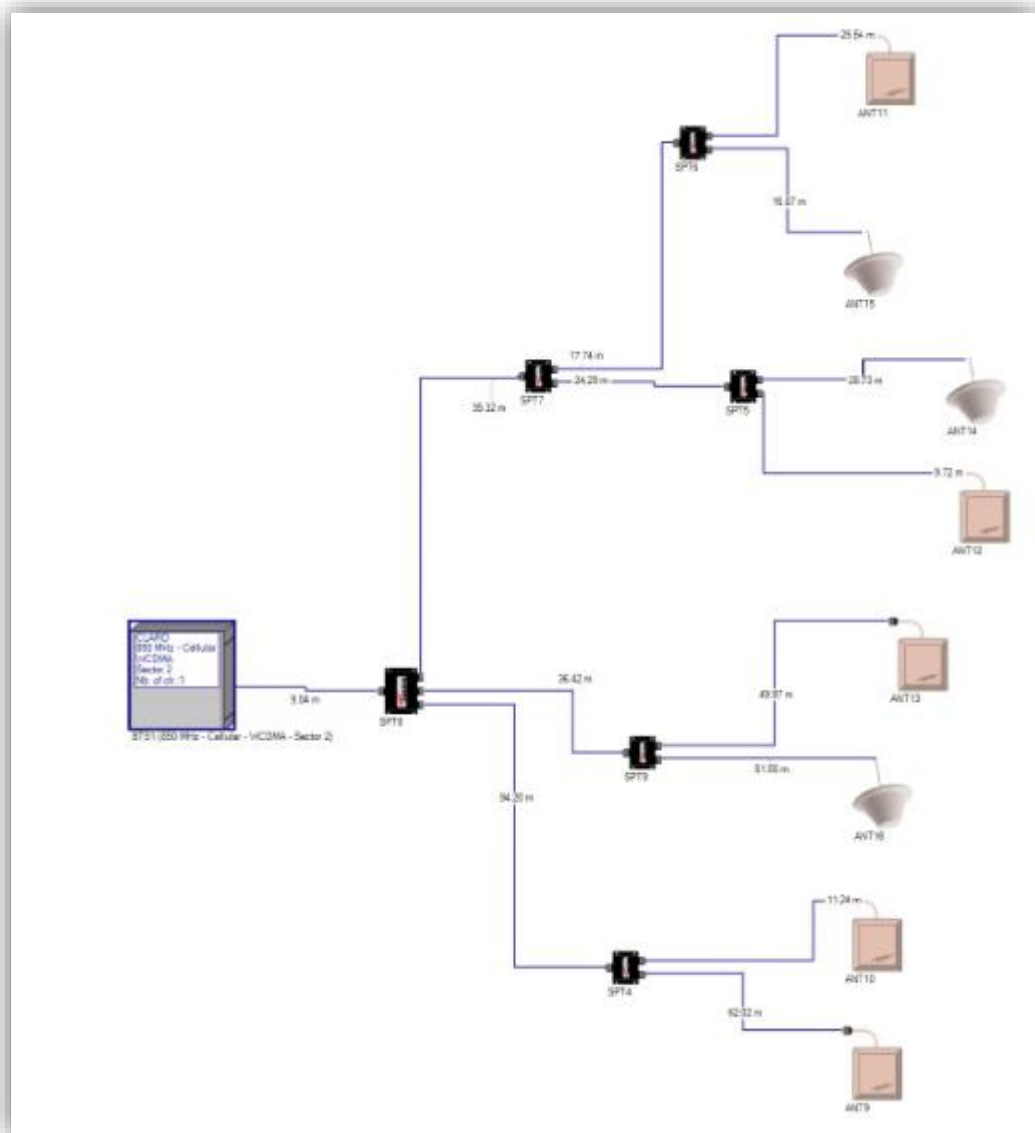


Figura 45 Esquemático de la solución de cobertura de la Planta baja del centro comercial – Nuevo diseño.

La **Figura 45** nos muestra el sistema distribuido de antenas de la Planta baja. Según el nuevo diseño, se recomienda instalar 8 antenas para lo cual se requerirán 472.65 metros de cable y 6 splitters. La solución inicial necesitaba 17 antenas, lo que requería 621 metros de cable y 11 splitters. Por tanto, al utilizar el nuevo diseño se producirá una reducción en los metros de cable equivalente al 24% mientras que esta reducción será del 45% en lo referente a splitters.

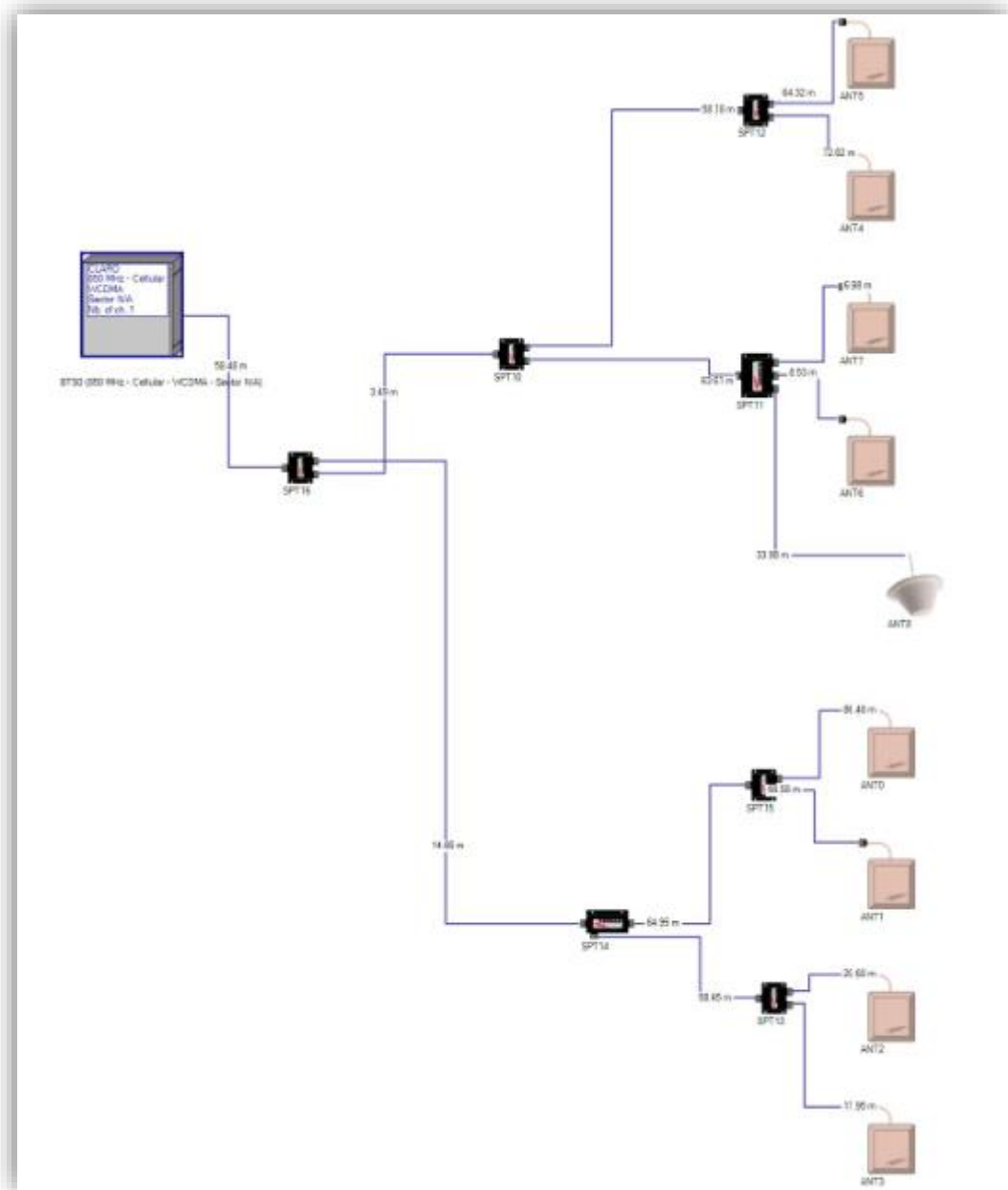


Figura 46 Esquemático de la solución de cobertura para los subsuelos 1 y 2 del centro comercial - Nuevo diseño.

Finalmente, la **Figura 46** nos muestra el nuevo diseño para los subsuelos 1 y 2. La nueva solución requiere en conjunto 9 antenas, lo que requerirá 699.26 metros de cable y 7 splitters. La solución inicial requería 9 antenas, lo que necesitaba 772.88 metros de cable y 8 splitters, por tanto, el nuevo diseño significa una reducción del 10% en cuanto a los metros de cable y una reducción del 13% en cuanto al uso de splitters.

Ahora si consideramos el total de metros de cable y el total de splitters que se requieren instalar tenemos que la aplicación del modelo matemático de ruteo nos produce una reducción de metros de cable equivalente al 19.23% mientras que en cuanto a los splitters, esta reducción equivale al 39.28%, según podemos observar en la **Figura 47** y **48**, respectivamente.

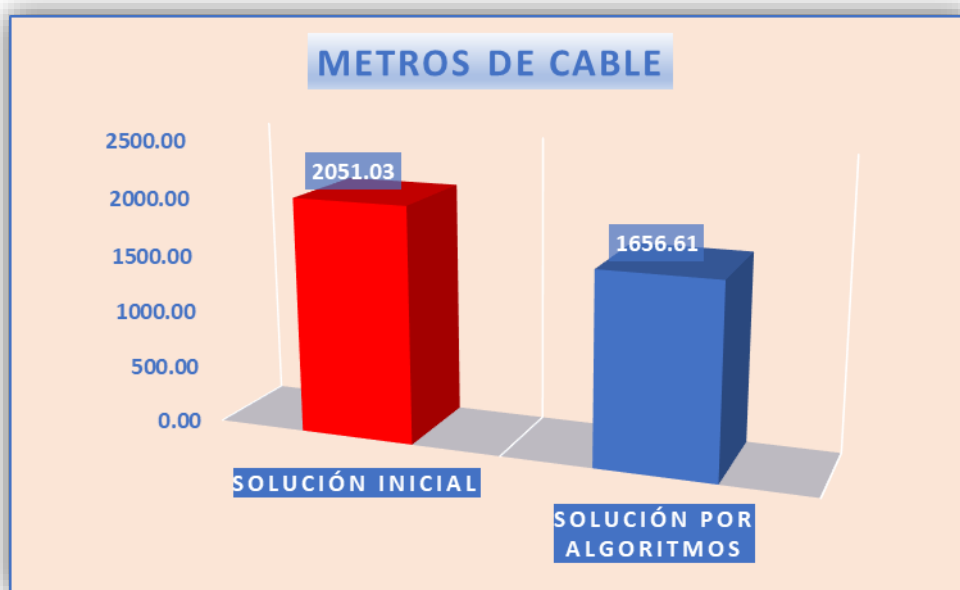


Figura 47 Comparación de los metros de cable en las soluciones de cobertura celular para el centro comercial.

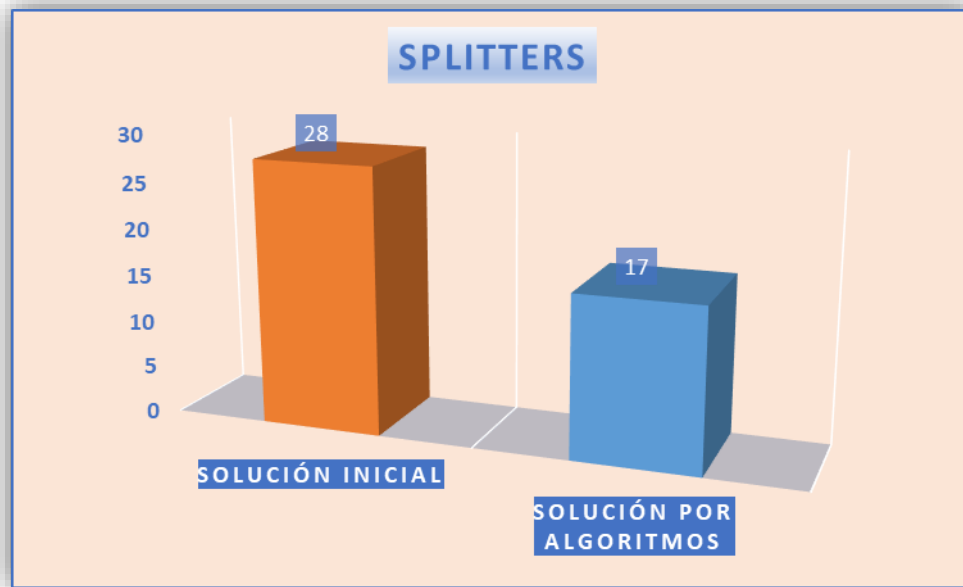


Figura 48 Comparación del número de splitters en las soluciones de cobertura para el centro comercial.

3.4.9. Centro comercial: Simulación de la cobertura con antenas SISO en la planta baja, piso 1 y subsuelo 1

Nuevamente, con el propósito de revisar la cobertura celular del nuevo diseño de cobertura celular para el centro comercial, se hace necesario realizar una nueva simulación con el software. Considerando las 23 antenas que el algoritmo SCP nos ha sugerido y las rutas que nos ha mostrado el algoritmo VRP modificado para los pisos 1, 2, planta baja, subsuelo 1 y 2, las **Figura 49, 50 y 51**, nos muestran las simulaciones de cobertura celular para todos los pisos del centro comercial. Las muestras incluyen áreas fuera del centro comercial.

Como podemos observar, la **Figura 49** nos presenta la nueva simulación de la cobertura celular para el Piso 1. En este piso, la nueva solución recomienda instalar 5 antenas y como se esperaba, al aplicar los modelos matemáticos, podemos observar que en las zonas más cercanas a las antenas la potencia alcanza una lectura de alrededor de -40 dBm, estas son las zonas de calor en color rosado.

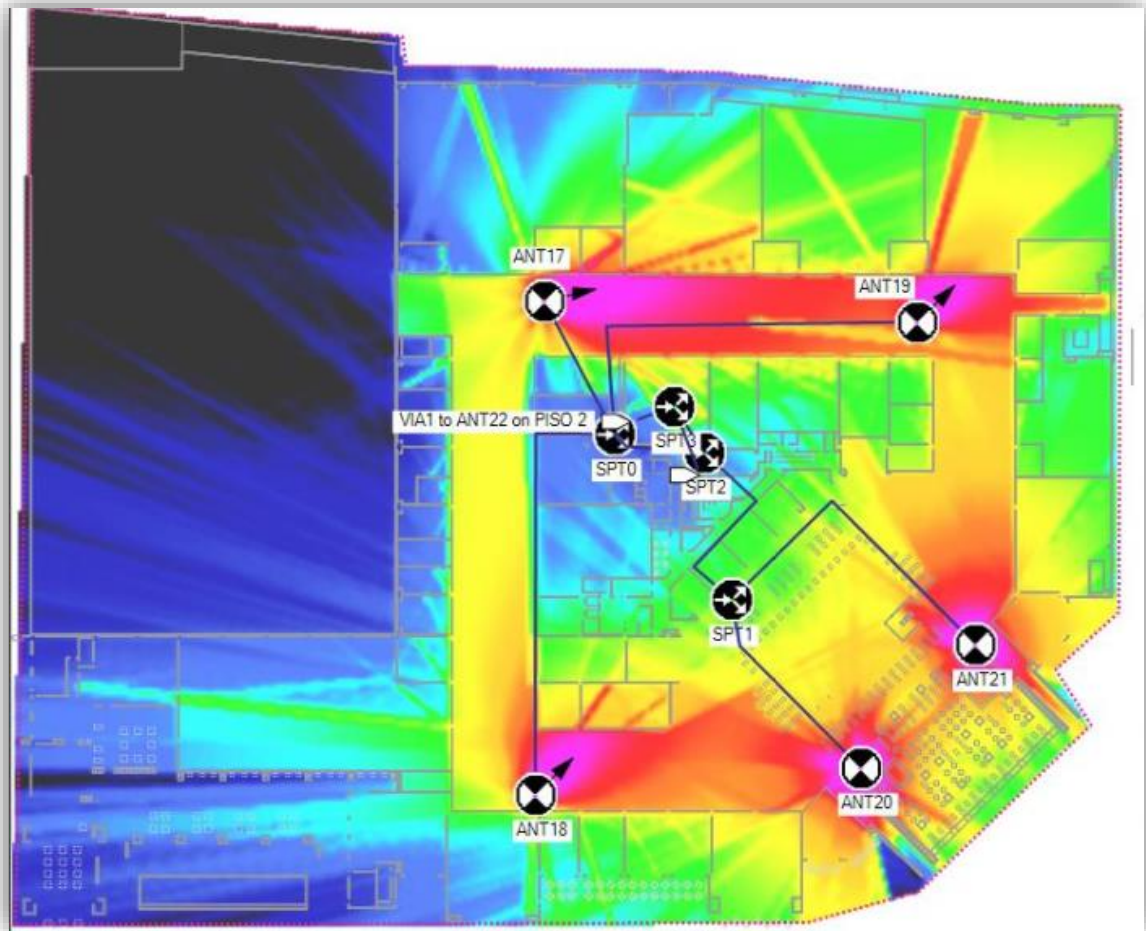


Figura 49 Mapa de simulación de la cobertura del Piso 1 con antenas tipo SISO – Nuevo diseño.

A medida que nos alejamos de las antenas, la potencia disminuye a aproximadamente -50 dBm, estas son las zonas de calor en color rojo.

Posteriormente la potencia disminuye hasta -65 dBm, estas son las zonas en color amarillo, mientras que las zonas en color verde tienen una potencia de aproximadamente -75 dBm. En conjunto la cobertura celular de la solución propuesta por medio de los modelos matemáticos es muy buena para el piso 1 donde nuevamente se respetan los estándares de calidad establecidos por la operadora celular, el piso 2 se mantiene intacto en cuanto a la cobertura celular de la simulación inicial, lo que se había mostrado en la **Figura 35**.

La **Figura 50** nos muestra la simulación de la cobertura celular para la Planta baja del centro comercial, nuevamente, según la escala de estándares de calidad de cobertura establecidos por la operadora celular.

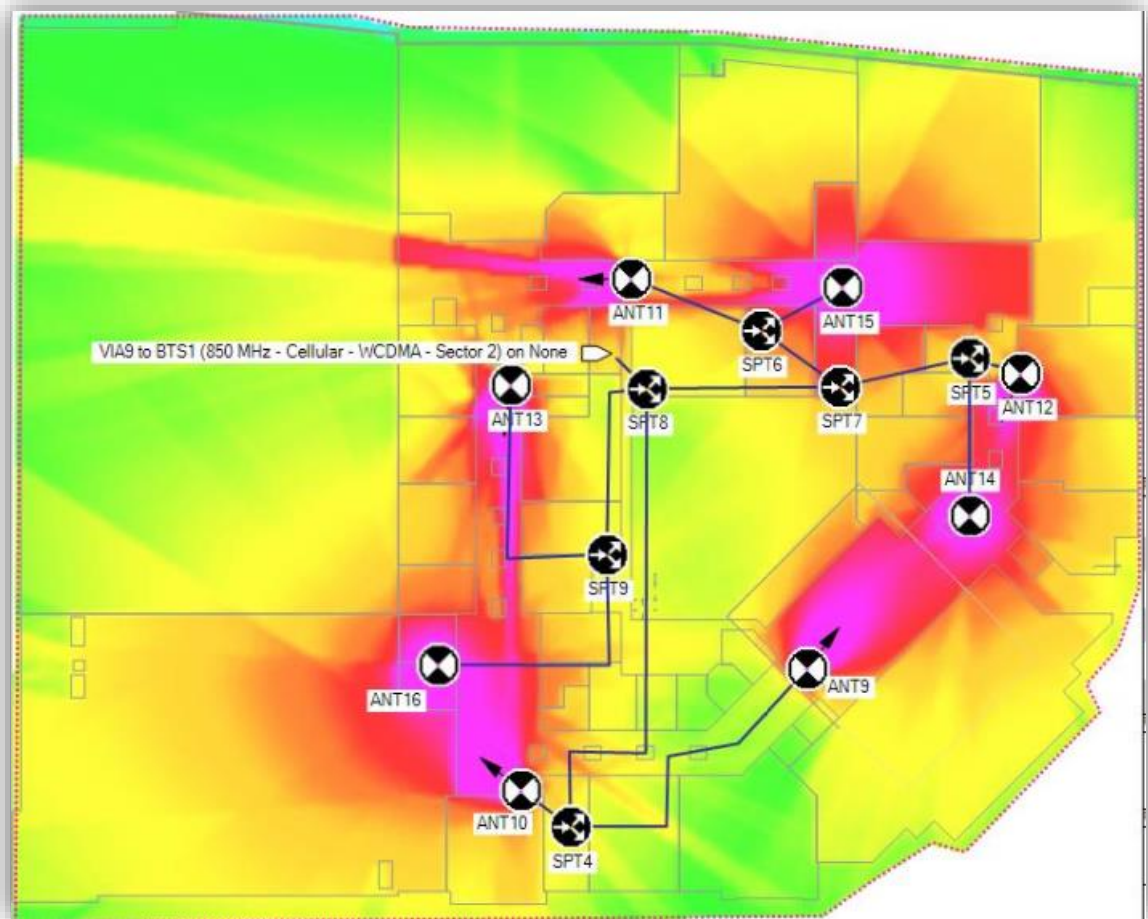


Figura 50 Mapa de simulación de la cobertura de la Planta baja con antenas tipo SISO – Nuevo diseño.

Luego, en la **Figura 51**, misma que nos muestra la cobertura celular del subsuelo 1. Nuevamente podemos observar que la solución alcanzada nos permite brindar una cobertura celular acorde con los estándares de calidad establecidos por el cliente. Según la simulación, 27.4% de las muestras tienen una potencia superior a -75 dBm, pero, aunque este porcentaje parezca bajo, en realidad esto se debe a que, al cargar el plano en el software de simulación, este también ha incluido

áreas que se encuentran fuera del centro comercial. En realidad, casi el 100% del porcentaje muestral de la simulación, esto es el 27.4% previamente mencionado, se encuentra dentro del centro comercial

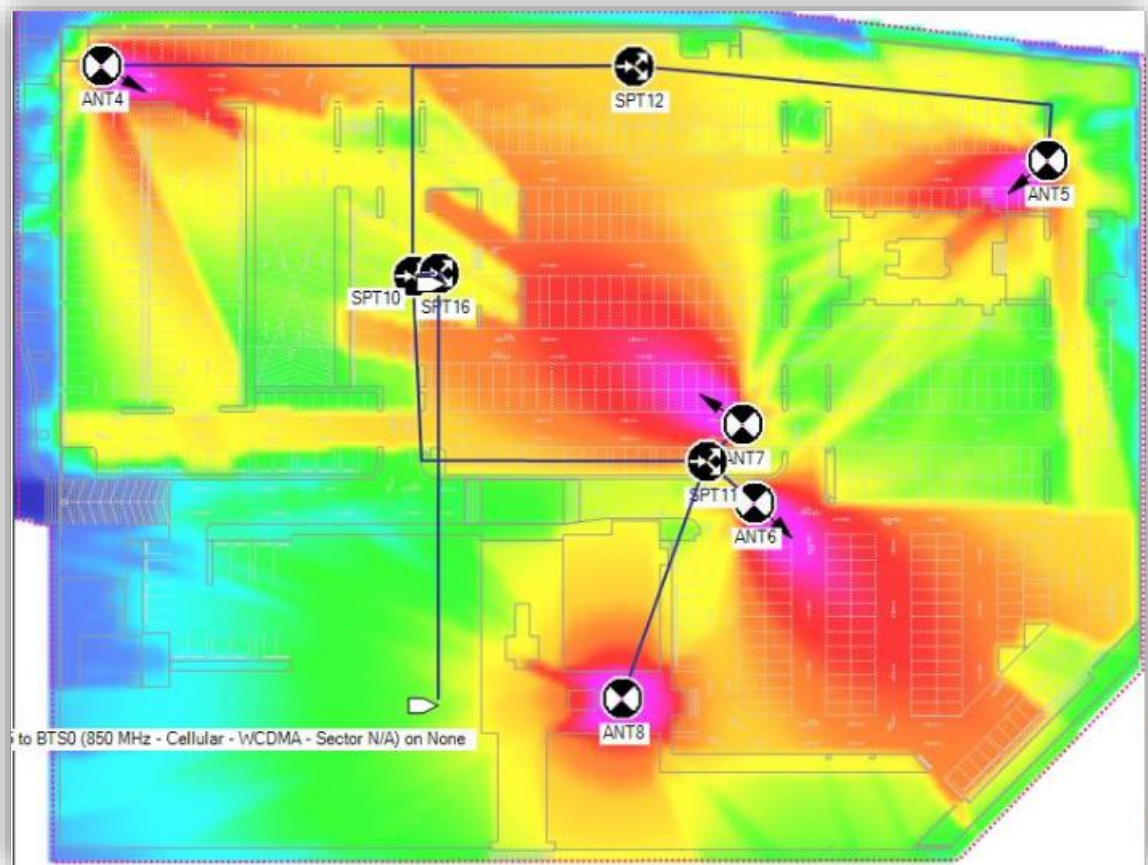


Figura 51 Mapa de simulación de la cobertura del Subsuelo 1 con antenas tipo SISO – Nuevo diseño.

3.4.10. Resumen de los resultados obtenidos

Considerando el uso de los valores estimados por la simulación, en conjunto con los modelos matemáticos podemos entonces indicar que efectivamente logramos reducir el número de equipos a instalar en los dos escenarios. Por otra parte, los metros de cable necesarios también se reducen, lo que implica menor pérdida de potencia por cable.

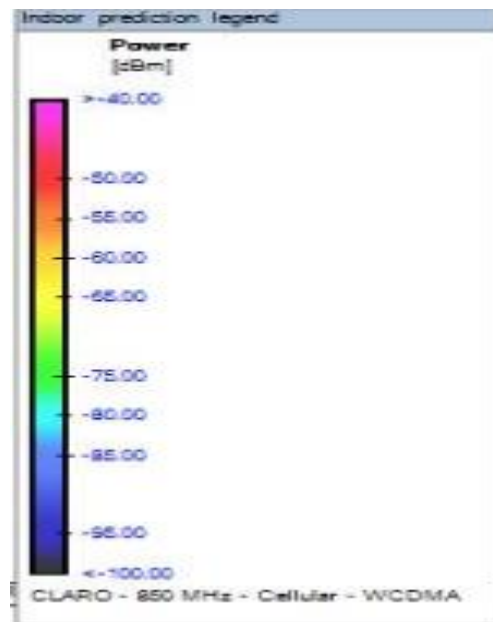


Figura 52 Nivel de potencia en dBm según operadora celular.

Los resultados que se han obtenido por medio de la simulación, tanto en el caso de la empresa de productos de acero, localizada en Guayaquil, como en el centro comercial localizado en Manta nos demuestran que el número mínimo de equipos a instalar en conjunto con la ruta de conexiones sugeridas por los modelos matemáticos nos proporcionan una solución que no sacrifica la potencia, sino que permite una excelente cobertura celular, conforme a la escala de potencia establecida por la operadora celular, según podemos observar en la **Figura 52**.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

Los problemas de selección de sitios para la instalación de antenas celulares de interiores, tanto para la empresa de productos como para el centro comercial se pudieron formular de forma eficiente.

Una vez identificada la localización de las antenas y el número a instalar, se volvió a analizar el área de estudio, para poder considerar todas las posibles locaciones de equipos de poder, creando así una red donde la aplicación de un modelo matemático para el diseño del sistema distribuido de antenas nos permitió designar las rutas de conexión entre la estación base, los equipos de poder y las antenas.

Los modelos matemáticos se pudieron desarrollar en GAMS para así poder identificar las áreas donde se debía instalar antenas celulares de interiores para minimizar la pérdida por conexión y para generar las rutas de conexión que permita la distribución de la potencia a lo largo de toda la red.

La simulación es un proceso muy importante antes y después de aplicar los modelos matemáticos en el presente trabajo, pues partimos de una simulación inicial, misma que nos indica las áreas que necesitan cobertura para poder aplicar los modelos matemáticos respectivos y posteriormente, al identificar las rutas de conexiones que el segundo modelo matemático provee, permite tener

una idea de la efectividad de la solución presentada al poder realizar una nueva simulación.

Ciertamente los resultados obtenidos avalan que la utilización de los modelos matemáticos y las herramientas de simulación constituyen herramientas muy útiles que permiten resolver problemas de cobertura celular.

En el caso de la empresa de productos de acero, la aplicación de los modelos matemáticos permitió mejorar el servicio de cobertura celular dentro de las oficinas. Según la simulación, 99.1% de las muestras tienen una potencia superior a -75 dBm. Adicionalmente, la optimización permitió reducir los metros de cable, el número de antenas y equipos necesarios a instalar dentro de la empresa. La necesidad de cable coaxial de media pulgada se redujo en un 52%, el número de equipos intermedios o splitters se redujo a un 88%, mientras que el número de antenas a instalar se redujo a más del 70%.

En el caso del centro comercial los beneficios del proceso de optimización se pueden resumir de la siguiente manera: la necesidad de cable coaxial de media pulgada se redujo en un 19.23%, el número de equipos intermedios o splitters se redujo a un 39.28%, mientras que el número de antenas a instalar se redujo a más del 44%. La simulación de la cobertura de la solución propuesta para el centro comercial nos indica que en el piso 2, 27.4% de las muestras tienen una potencia superior a -75 dBm, en el piso 1, 43.8% de las muestras tienen una potencia superior a -75 dBm, en la planta baja esto sucede con 97.8% de las muestras, mientras que en el subsuelo 1, 80.4% de las muestras superan los -75 dBm y en el subsuelo 2, 45.8% de las muestras tienen una potencia superior a -75 dBm, este porcentaje, en todos los pisos, corresponde al interior del centro comercial, el porcentaje restante de las muestras se refiere a lo que sucede fuera del centro comercial, por lo que los niveles de potencia alcanzados dentro del centro comercial garantizan excelentes niveles de cobertura celular indoor.

Sin embargo, es necesario indicar que aún existe cierta resistencia a la aplicación de modelos matemáticos, lo cual podría deberse en parte a la creencia de que las matemáticas y todas las ciencias relacionadas no son completamente aplicables a la vida real.

Esta idea se ve alimentada día a día por muchas personas en todo el mundo y las dificultades propias de la formulación de los problemas y su inmediata implementación hacen que esta idea se mantenga en el tiempo.

Se espera que este trabajo, en conjunto con muchos otros, puedan cambiar esta manera de pensar, de tal forma que muchas empresas abran sus puertas a la implementación de la modelización matemática.

4.2. RECOMENDACIONES

En base a los resultados obtenidos, se recomienda que la empresa de logística en redes de comunicaciones fijas y móviles modifique el proceso de diseño de las soluciones de cobertura celular que la empresa brinda. Los modelos matemáticos de cobertura y ruteo de conexiones permiten reducir el número de equipos utilizados y los metros de cable, es decir, se produce una optimización de los recursos, al mismo tiempo que se garantiza la cobertura celular de las áreas de trabajo. Este nuevo método permite que la empresa se puede enfocar en mejorar la solución al centrar su atención en el efecto que otro tipo de antenas pueda tener en la solución alcanzada.

El trabajo conjunto de los modelos matemáticos y las herramientas de simulación permitirán ofrecer un servicio mucho más confiable, sin necesidad de diseñar una solución que este sobrecargada de equipos. Esto a la larga va a beneficiar a los clientes finales que somos los usuarios de las operadoras celulares del Ecuador.

4.3. TRABAJO FUTURO

Se recomienda que para futuros trabajos se realice un análisis comparativo del modelo clásico de cobertura versus metaheurísticas, para así poder determinar las ventajas y desventajas de su aplicación al diseño de las soluciones de cobertura en interiores. Muchos de estos estudios utilizan algoritmos genéticos, acompañados de tecnologías de recolección de datos que por su costo podrían dificultar la implementación de estos estudios, pero existen alternativas que primero deben ser analizadas para determinar su aplicación al mercado ecuatoriano.

Por otro lado, también merece un mayor estudio las diferentes alternativas enfocadas completamente en el diseño del DAS. Nuevamente, por lo general se trata de estudios que en el Ecuador no se realizan y en este caso en particular existen pocos estudios desarrollados en el extranjero

BIBLIOGRAFÍA

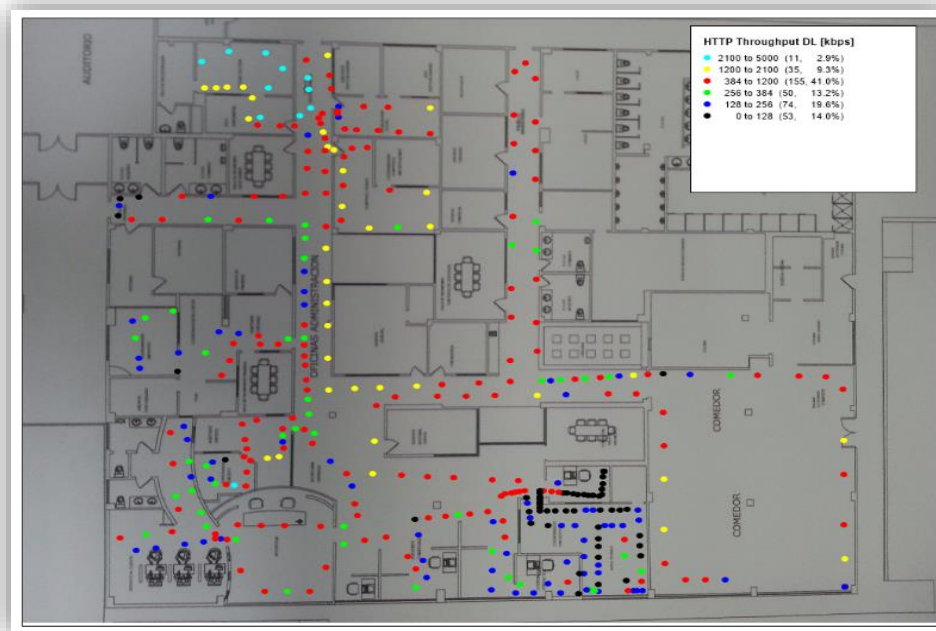
- Arboleda-Zúñiga, J., López, A. X., & Lozano, Y. L. (2016). El problema de ruteo de vehículos [VRP] y su aplicación en medianas empresas colombianas. *Ingenium*, 10(27), 29–36.
- Chen, L., & Yuan, D. (2013). Mathematical modeling for optimal design of in-building distributed antenna systems. *Elsevier Journal on Computer Networks*, 57(17), 3428–3445. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2013.07.027>
- Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The Truck Dispatching Problem. *Management Science*, 6(1), 80–91. <https://doi.org/10.1287/mnsc.6.1.80>
- Demirovic, E., Calvar, T. Le, Inoue, K., & Musliu, N. (2016). An Exact Algorithm for Unicost Set Covering, 1–20.
- Díaz, C Rodríguez, R. (2013). *RESOLUCIÓN DEL SET COVERING PROBLEM*. PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO. Retrieved from http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-3000/UCE3480_01.pdf
- Donner, J. (2008). Research Approaches to Mobile Use in the Developing World: A Review of the Literature. *The Information Society*, 24(3), 140–159. <https://doi.org/10.1080/01972240802019970>
- Duncombe, R., & Boateng, R. (2009). Mobile Phones and Financial Services in Developing Countries: a review of concepts, methods, issues, evidence and future research directions. *Third World Quarterly*, 30(7), 1237–1258. <https://doi.org/10.1080/01436590903134882>
- Escobar, J. W. B. (2015). Diseño de un modelo matemático para el despacho de vehículos de emergencias médicas en Colombia, (December 2014).
- Fernández-Ardévol, M. (2011). Las comunicaciones móviles y el desarrollo socioeconómico: Una perspectiva latinoamericana | Crónica ONU. *Crónica ONU*, XLVIII(3). Retrieved from <https://unchronicle.un.org/es/article/las-comunicaciones-moviles-y-el-desarrollo-socioecon-mico-una-perspectiva-latinoamericana>
- Golab, L., Korn, F., Li, F., Saha, B., & Srivastava, D. (2015). Size-Constrained Weighted Set Cover. *Proceedings - International Conference on Data Engineering, 2015–May*, 879–890. <https://doi.org/10.1109/ICDE.2015.7113341>
- Karp, R. M. (1972). Reducibility among combinatorial problems. *50 Years of Integer Programming 1958-2008: From the Early Years to the State-of-the-Art*. https://doi.org/10.1007/978-3-540-68279-0_8
- Kelif, J.-M., & Coupechoux, M. (2009). Cell breathing, sectorization and densification in cellular networks. *2009 7th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks*, 1–7.

- <https://doi.org/10.1109/WIOPT.2009.5291600>
- Kumar, D., & Kumar, V. (2014). Effect of Environmental Parameters on GSM and GPS. *Indian Journal of Science and Technology*, 7(August), 1183–1188.
- Liang, T., Huang, C., Yeh, Y., & Lin, B. (2007). Adoption of mobile technology in business: a fit-viability model. *Industrial Management & Data Systems*, 107(8), 1154–1169. <https://doi.org/10.1108/02635570710822796>
- Olivera, A. (2004). *Heurísticas para Problemas de Ruteo de Vehículos*. Retrieved from <https://www.fing.edu.uy/inco/pedeciba/bibliote/reptec/TR0408.pdf>
- Omorinoye, A. A., & Vien, Q.-T. (2017). On the Optimisation of Practical Wireless Indoor and Outdoor Microcells Subject to QoS Constraints. *Applied Sciences*, 7, 15. <https://doi.org/10.3390/app7090948>
- Schumpeter, J., & Backhaus, U. (2003). The Theory of Economic Development. In *Joseph Alois Schumpeter* (pp. 61–116). Boston: Kluwer Academic Publishers. https://doi.org/10.1007/0-306-48082-4_3
- Usman, A. U., Okereke, O. U., & Omizegba, E. E. (2015). Instantaneous GSM Signal Strength Variation with Weather and Environmental Factors American Journal of Engineering Research (AJER), (3), 104–115.
- Wolsey, L. a. (1998). *Integer Programming*. (R. Graham, Ronald; Karmarkar, Jan; Tarian, Ed.). Wiley Interscience.

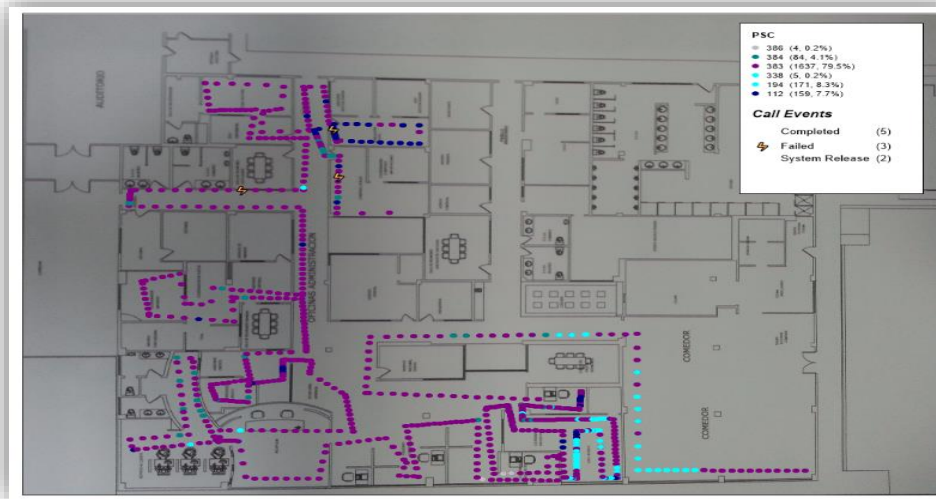
APÉNDICE

A.1. DIAGRAMAS DE WALK TEST DE LA EMPRESA DE PRODUCTOS DE ACERO

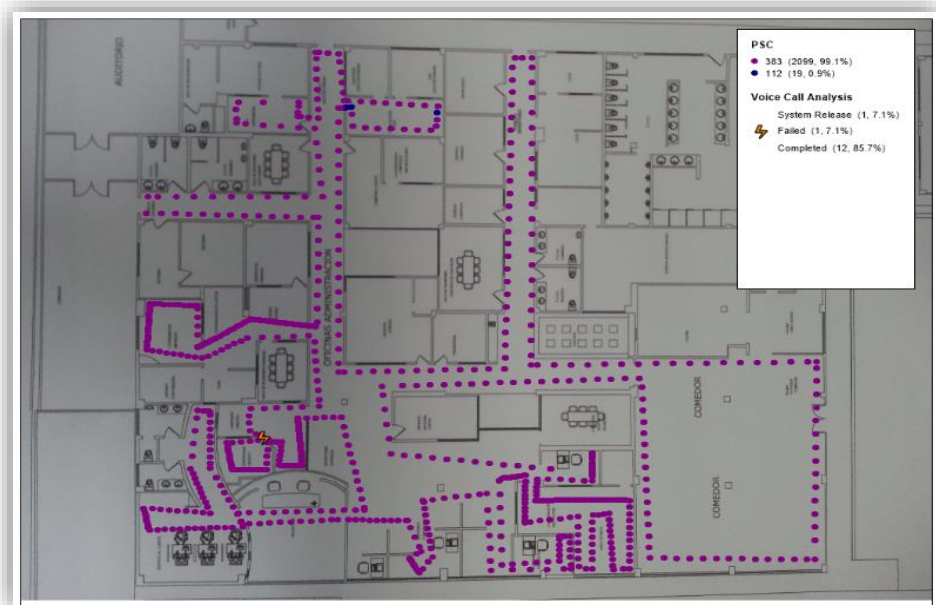
A.1.1. DL THPT 850



A.1.2. DL THPT 1900



A.1.3. SHORT CALL 1900 PSC



A.2. MODELO MATEMÁTICO DE COBERTURA APLICADO EN LA EMPRESA DE PRODUCTOS DE ACERO

\$ONTEXT

Algoritmo de cobertura para la empresa manufacturera de productos de acero de la ciudad de Guayaquil, Ecuador, considerando pérdidas potenciales por distancias, según la simulación en iBwave.

SOLUCION OBTENIDA

Instalar las siguientes antenas

Xi ANTENA

X1 ANTENA 6

X6 ANTENA 3

X7 ANTENA 4

X10 ANTENA 11

\$OFFTEXT

SET

i AREAS /1*15/;

PARAMETER

C(i) Pérdida por distancia al instalar una antena en el sitio i

/

1 2.53

2 3.54

3 2.81

4 2.96

5 2.89

6 2.67

7 2.53

8 2.24

9 3.97

10 3.61

11	2.02
12	3.75
13	5.27
14	4.84
15	4.69/;

VARIABLES

X(i) Sitios de la bodega

Z Variable a minimizar

BINARY VARIABLE X

EQUATIONS

Costo La función de costo a minimizar

Subconjunto1 Restricción del subconjunto 1

Subconjunto2 Restricción del subconjunto 2

Subconjunto3 Restricción del subconjunto 3

Subconjunto4 Restricción del subconjunto 4

Subconjunto5 Restricción del subconjunto 5

Subconjunto6 Restricción del subconjunto 6

Subconjunto7 Restricción del subconjunto 7

Subconjunto8 Restricción del subconjunto 8

Subconjunto9 Restricción del subconjunto 9

Subconjunto10 Restricción del subconjunto 10

Subconjunto11 Restricción del subconjunto 11

Subconjunto12 Restricción del subconjunto 12

Subconjunto13 Restricción del subconjunto 13

Subconjunto14 Restricción del subconjunto 14

Subconjunto15 Restricción del subconjunto 15

;

Costo.. $Z = E = \text{SUM}[i, C(i) * X(i)];$

Subconjunto1.. $X('1') + X('2') + X('3') + X('11') = G = 1;$

Subconjunto2.. $X('2') + X('1') + X('3') + X('9') + X('11') = G = 1;$

Subconjunto3.. $X('3') + X('1') + X('2') + X('4') + X('9') = G = 1;$

Subconjunto4.. $X('4') + X('3') + X('6') + X('8') = G = 1;$

Subconjunto5.. $X('5') + X('6') = G = 1;$

Subconjunto6.. $X('6') + X('4') + X('5') + X('7') = G = 1;$

Subconjunto7.. $X('7') + X('6') + X('8') + X('15') = G = 1;$

Subconjunto8.. $X('8') + X('4') + X('9') + X('7') + X('14') = G = 1;$

Subconjunto9.. $X('9') + X('2') + X('3') + X('8') + X('10') + X('14') = G = 1;$

Subconjunto10.. $X('10') + X('9') + X('12') + X('13') + X('14') + X('11') = G = 1;$

Subconjunto11.. $X('11') + X('1') + X('2') + X('12') + X('10') = G = 1;$

Subconjunto12.. $X('12') + X('11') + X('10') + X('13') = G = 1;$

Subconjunto13.. $X('13') + X('12') + X('10') = G = 1;$

Subconjunto14.. $X('14') + X('9') + X('8') + X('15') + X('10') = G = 1;$

Subconjunto15.. $X('15') + X('7') + X('14') = G = 1;$

MODEL SET1 /ALL/;

SOLVE SET1 USING MIP MINIMIZING Z;

DISPLAY Z,I, X.I;

A.3. MODELO MATEMÁTICO DE RUTAS APLICADO A LA EMPRESA DE PRODUCTOS DE ACERO

\$TITLE FLUJO DE REDES EMPRESA DE PRODUCTOS DE ACERO JULIO 2018

\$ONTEXT

=====
=====

El presente algoritmo identifica las rutas que aseguran el requerimiento de menos metros de cable para poder distribuir la potencia desde la estación base, conectando los respectivos equipos de poder, hasta llegar a las antenas previamente identificadas por el algoritmo de cobertura a la vez que se cumple con los requerimientos de calidad de servicio.

=====
=====

\$OFFTEXT

SET i Todos los nodos /s,v1*v3,a1*a4/;
SET s(i) Nodo de estación base /s/;
SET v(i) Nodos de equipos de poder y antenas /v1*v3,a1*a4/;
SET a(i) Nodos de antenas /a1*a4/;

ALIAS (i,j)
ALIAS (v,vn)

SET

arcos (i,j) Todos los arcos posibles

/

s.v1

s.v2

s.v3

v1.a1

v1.a2

v2.a1

v2.a2

v2.a3

v2.a4

v3.a3

v3.a4

/;

SCALAR

P Potencia de inicio en el nodo base /-51/

Q Calidad de servicio /-75/

C Factor de pérdida de potencia por cable /0.0721784/

;

SCALAR

N Número de antenas a instalar;

N = card(a);

TABLE

length(i,j) Tabla de distancia desde el nodo inicial hasta los equipos de poder

\$ondelim

\$include metrosrooftec.csv

\$offdelim

DISPLAY length;

PARAMETER perdida(v) Pérdida de cada nodo por equipo de poder

/

v1 3

v2 3

v3 3

a1 3

a2 3

a3 3

a4 3/;

PARAMETER ganancia(v) Ganancia que se produce por la instalación de la antena

/

v1 0

v2 0

v3 0

a1 5.1

a2 5.1

a3 5.1

a4 5.1/;

VARIABLES

z Función objetivo

f(v) Variable de flujo

x(i,j) Variable binaria si la ruta pasa del nodo i al nodo j

NEGATIVE VARIABLE f

BINARY VARIABLE x;

f.lo(v)=Q;

EQUATIONS

CABLE Metros de cable a utilizar en el DAS

R1 Restricción de arcos que salen del sector o estación base

R2 Restricción de arcos que llegan a todas las antenas

R3 Restricción de flujo de poder hasta el primer equipo de poder

R4 Restricción de flujo desde el primer equipo de poder hasta las antenas

;

CABLE.. $Z = E = \text{SUM}[(i,j)\$arcos(i,j), \text{length}(i,j)*x(i,j)];$

R1(S).. $\text{SUM}[j\$arcos(s,j), x(s,j)] = E = 1;$

R2(a).. $\text{SUM}[i\$arcos(i,a), x(i,a)] = E = 1;$

R3(v)\$(arcos('s',v)).. $f(v) + P - \text{perdida}(v) - C * \text{length}('s',v)*x('s',v) + \text{ganancia}(v)$
 $= L = (1-x('s',v))*100;$

R4(v,vn)\$(arcos(v,vn)).. $f(v) - \text{perdida}(vn) - C * \text{length}(v,vn)*x(v,vn) + \text{ganancia}(vn)$
 $- f(vn) = L = (1-x(v,vn))*100;$

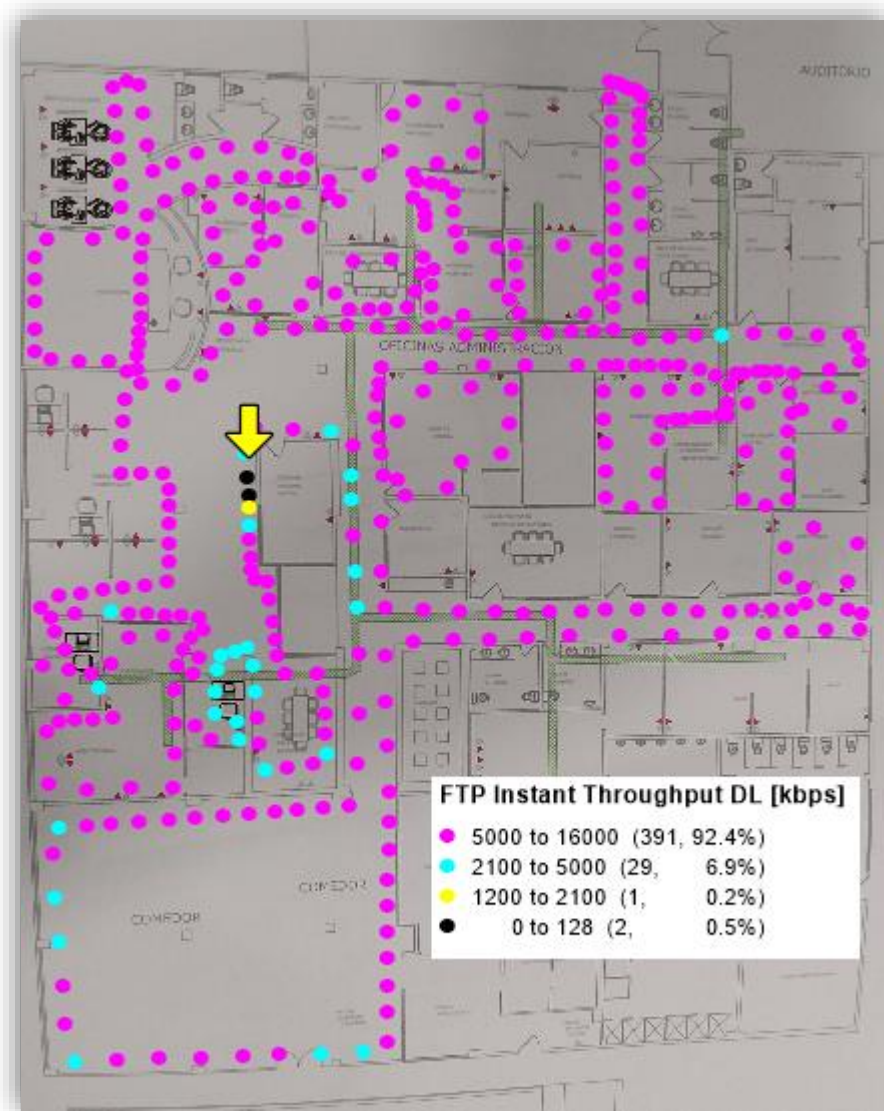
MODEL EMPRESA /ALL/;

SOLVE EMPRESA USING MIP MINIMIZING Z;

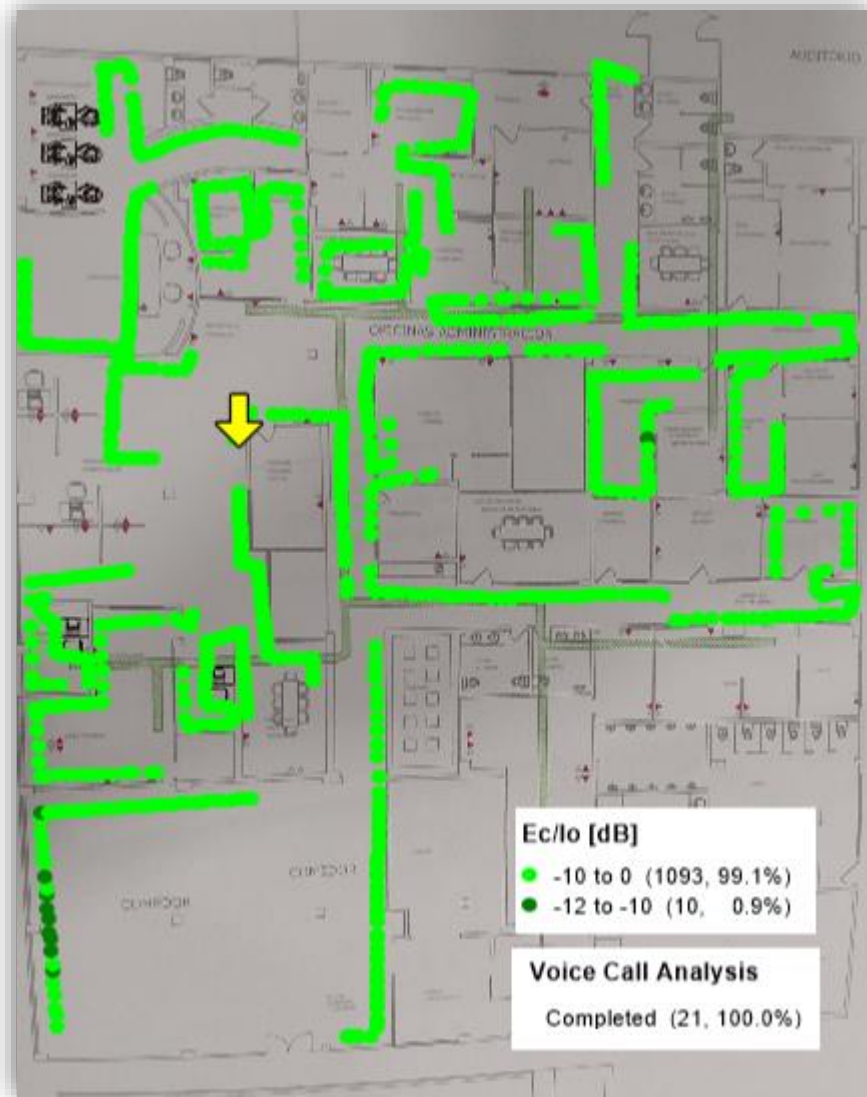
DISPLAY z.l, x.l;

A.4. DIAGRAMAS DEL SEGUNDO WALK TEST PARA EMPRESA DE PRODUCTOS DE ACERO

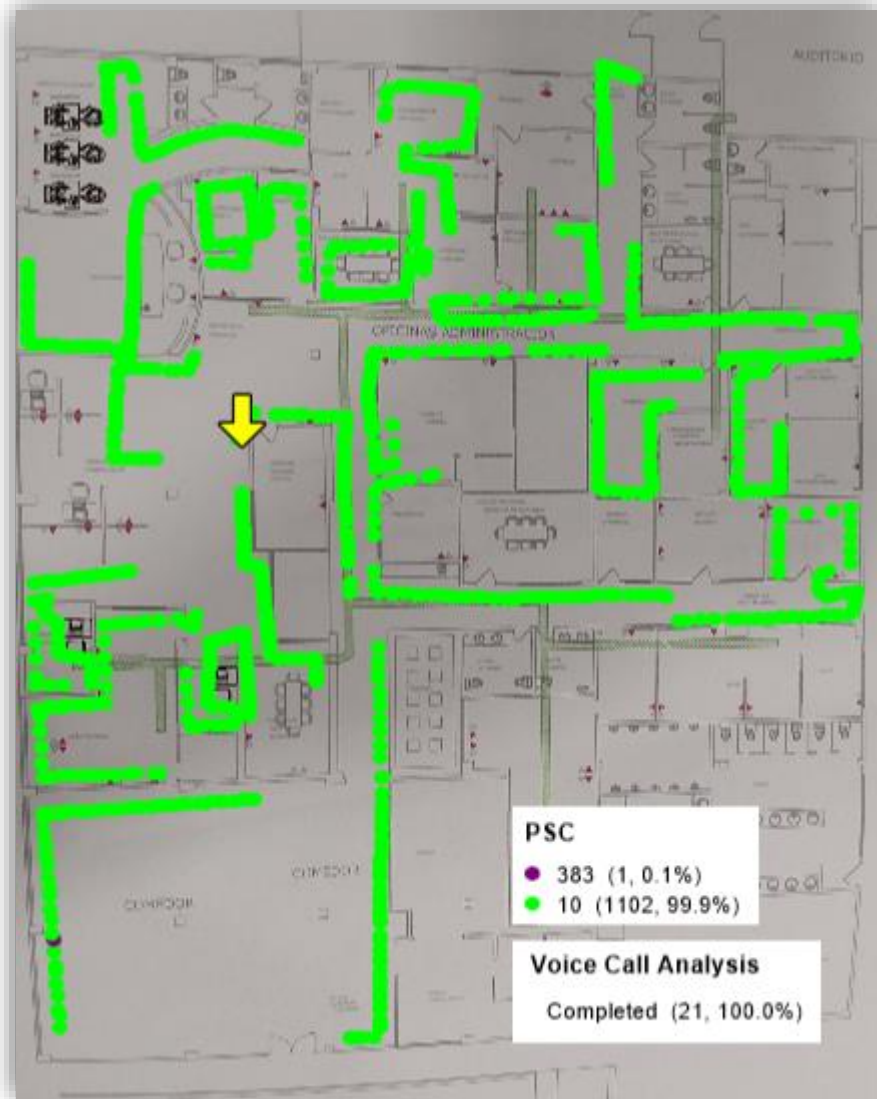
A.4.1 DL HSPA THROUGHPUT



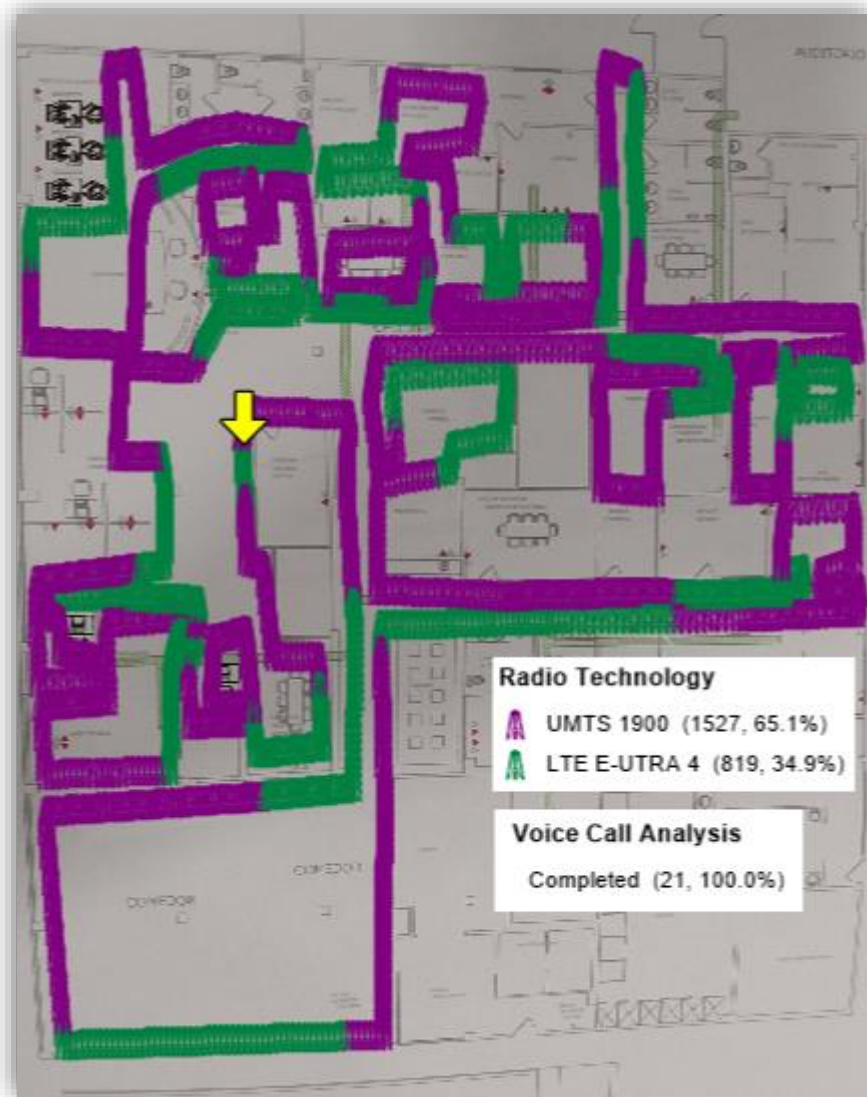
A.4.2. SHORT CALL FREE MODE EC NO



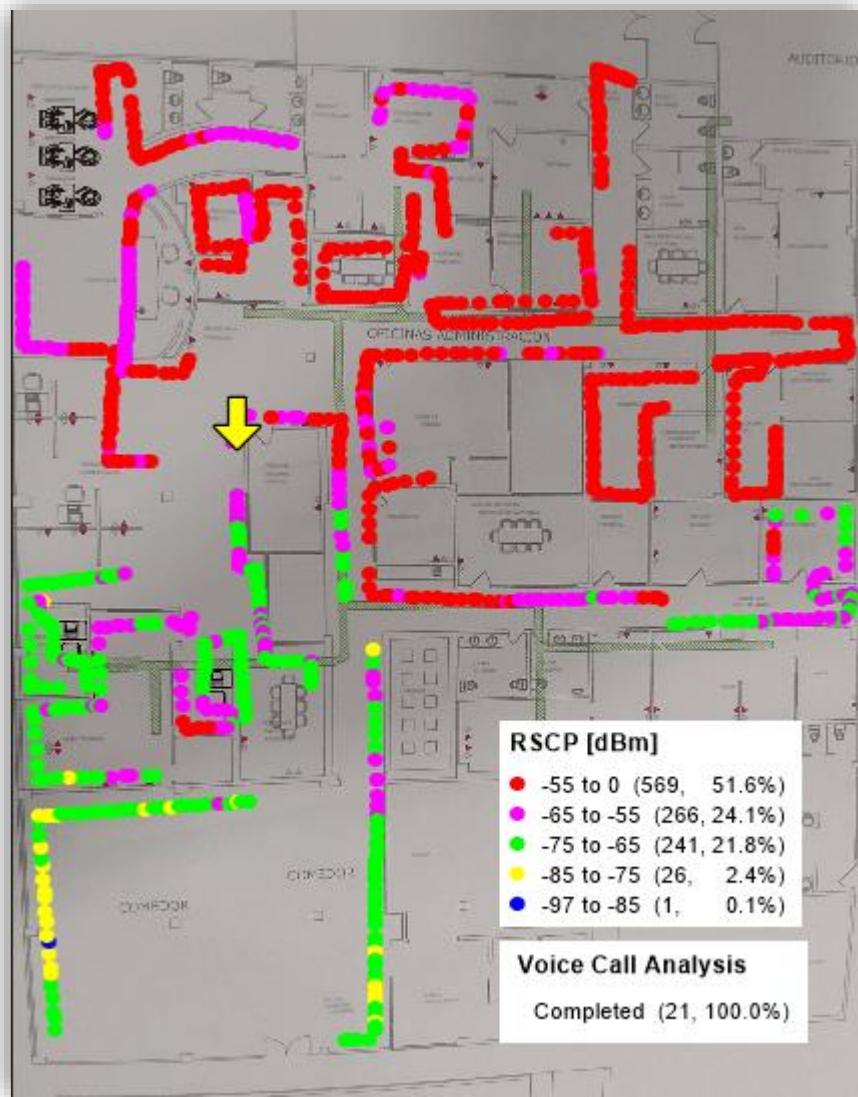
A.4.3. SHORT CALL FREE MODE PSC



A.4.4. SHORT CALL FREE MODE RADIO TECHNOLOGY



A.4.5. SHORT CALL RSCP



A.5. DIAGRAMAS DE WALK TEST DEL CENTRO COMERCIAL

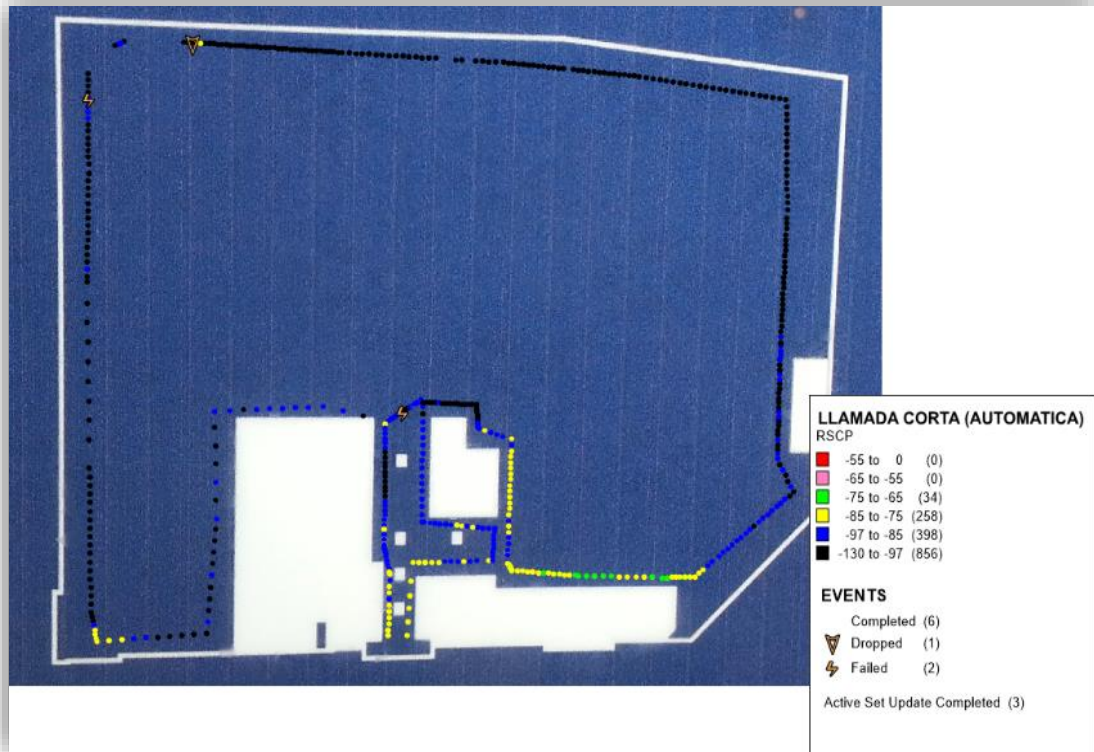
A.5.1 DESCARGA LTE_PCI PISO 1



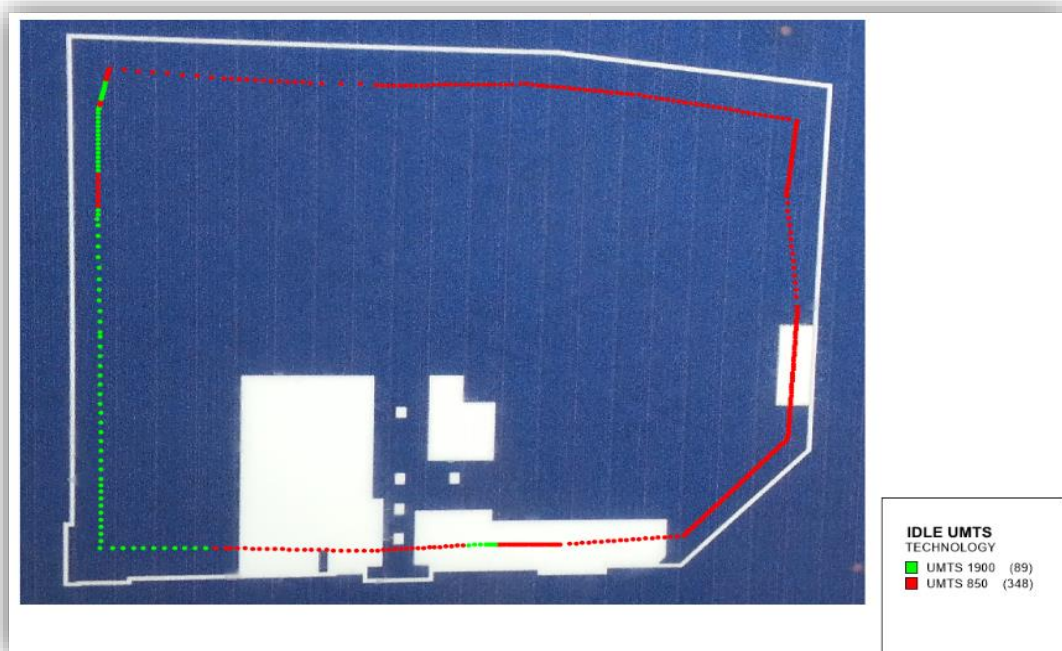
A.5.2. DESCARGA LTE_RSRP



A.5.3. LLAMADA CORTA_RSCP PLANTA BAJA



A.5.4. IDLE UMTS_TECHNOLOGY SUBSUELO



A.6. MODELO MATEMÁTICO DE COBERTURA APLICADO AL SUBSUELO 1 DEL CENTRO COMERCIAL

\$ONTEXT

Algoritmo de cobertura para el SUBSUELO 1 del Centro Comercial de la ciudad de Manta, Ecuador, considerando pérdidas potenciales por distancias, según la simulación en iBwave.

SOLUCIÓN:

Seleccionar las antenas

X_i *ANTENA*

X4 ANT4

x5 ANT5

x6 ANT6

x7 ANT7

x9 ANT9

\$OFFTEXT

SETS

i Sitios /4*10/;

PARAMETER

C(i) Costo de instalación de una antena omnidireccional en el sitio i

/

4 13.86

5 13.28

6 9.67

7 9.53

8 10.18

9 10.68

10 10.39

/;

VARIABLES

X(i) Sitios de la bodega
Z Variable a minimizar

BINARY VARIABLE X

EQUATIONS

Costo La función de costo a minimizar
Subconjunto1 Restricción del subconjunto 1
Subconjunto2 Restricción del subconjunto 2
Subconjunto3 Restricción del subconjunto 3
Subconjunto4 Restricción del subconjunto 4
Subconjunto5 Restricción del subconjunto 5
Subconjunto6 Restricción del subconjunto 6
;

Costo.. $Z = E = \text{SUM}[i, C(i) * X(i)];$
Subconjunto1.. $X('4') = E = 1;$
Subconjunto2.. $X('5') = E = 1;$
Subconjunto3.. $X('6') = E = 1;$
Subconjunto4.. $X('7') = E = 1;$
Subconjunto5.. $X('8') + X('9') = G = 1;$
Subconjunto6.. $X('9') + X('10') = G = 1;$

MODEL SET2 /ALL/;

SOLVE SET2 USING MIP MINIMIZING Z;

DISPLAY Z.I, X.I;

A.7. MODELO MATEMÁTICO DE COBERTURA APLICADO AL PISO 1 DEL CENTRO COMERCIAL

\$ONTEXT

Algoritmo de cobertura para el PISO 1 del Centro Comercial de la ciudad de Manta, Ecuador, considerando pérdidas potenciales por distancias, según la simulación en iBwave.

SOLUCIÓN:

Seleccionar las antenas

<i>Xi</i>	<i>Antena</i>
X29	ANTENA 29
X31	ANTENA 31
X34	ANTENA 34
X36	ANTENA 36
X37	ANTENA 37

\$OFFTEXT

SETS

i Sitios /28*39/;

PARAMETER

C(i) Costo de instalación de una antena omnidireccional en el sitio i

/

28	7.00
29	6.64
30	9.89
31	10.47

32 10.83
33 10.25
34 9.60
35 9.31
36 9.17
37 10.61
38 10.97
39 11.19
/;

VARIABLES

X(i) Sitios de la bodega
Z Variable a minimizar

BINARY VARIABLE X

EQUATIONS

Costo La función de costo a minimizar
Subconjunto1 Restricción del subconjunto 1
Subconjunto2 Restricción del subconjunto 2
Subconjunto3 Restricción del subconjunto 3
Subconjunto4 Restricción del subconjunto 4
Subconjunto5 Restricción del subconjunto 5
Subconjunto6 Restricción del subconjunto 6
Subconjunto7 Restricción del subconjunto 7
Subconjunto8 Restricción del subconjunto 8
Subconjunto9 Restricción del subconjunto 9
Subconjunto10 Restricción del subconjunto 10
;

Costo.. $Z = E = \text{SUM}[i, C(i) * X(i)];$
Subconjunto1.. $X('28') + X('29') + X('30') = G = 1;$
Subconjunto2.. $X('29') + X('28') + X('39') = G = 1;$
Subconjunto3.. $X('30') + X('28') + X('31') = G = 1;$
Subconjunto4.. $X('31') + X('32') = G = 1;$
Subconjunto5.. $X('33') + X('34') + X('38') = G = 1;$
Subconjunto6.. $X('34') + X('33') + X('39') = G = 1;$
Subconjunto7.. $X('35') + X('36') = G = 1;$
Subconjunto8.. $X('37') + X('38') = G = 1;$
Subconjunto9.. $X('38') + X('33') + X('37') = G = 1;$
Subconjunto10.. $X('39') + X('29') + X('34') = G = 1;$

MODEL SET3 /ALL/;

SOLVE SET3 USING MIP MINIMIZING Z;

DISPLAY Z.I, X.I;

A.8. MODELO MATEMÁTICO DE COBERTURA APLICADO A LA PLANTA BAJA DEL CENTRO COMERCIAL

\$ONTEXT

Algoritmo de cobertura para la PLANTA BAJA del Centro Comercial de la ciudad de Manta, Ecuador, considerando pérdidas potenciales por distancias, según la simulación en iBwave.

SOLUCIÓN:

Seleccionar las antenas

Xi	Antena
X11	ANTENA 11
X13	ANTENA 13
X15	ANTENA 15
X18	ANTENA 18
X20	ANTENA 20
X23	ANTENA 23
X25	ANTENA 25
X26	ANTENA 26

\$OFFTEXT

SETS

i Sitios /11*27/;

PARAMETER

C(i) Costo de instalación de una antena omnidireccional en el sitio i

/

11	7.22
12	7.15
13	8.73
14	7.72

15	5.99
16	4.69
17	5.41
18	5.27
19	8.73
20	6.35
21	7.94
22	7.87
23	6.93
24	7.29
25	5.34
26	6.64
27	6.71
/;	

VARIABLES

X(i)	Sitios de la bodega
Z	Variable a minimizar

BINARY VARIABLE X

EQUATIONS

Costo	La función de costo a minimizar
Subconjunto1	Restricción del subconjunto 1
Subconjunto2	Restricción del subconjunto 2
Subconjunto3	Restricción del subconjunto 3
Subconjunto4	Restricción del subconjunto 4
Subconjunto5	Restricción del subconjunto 5
Subconjunto6	Restricción del subconjunto 6
Subconjunto7	Restricción del subconjunto 7
Subconjunto8	Restricción del subconjunto 8

Subconjunto9 Restricción del subconjunto 9
Subconjunto10 Restricción del subconjunto 10
Subconjunto11 Restricción del subconjunto 11
Subconjunto12 Restricción del subconjunto 12
Subconjunto13 Restricción del subconjunto 13
Subconjunto14 Restricción del subconjunto 14

;

Costo.. $Z = E = \text{SUM}[i, C(i) * X(i)];$
Subconjunto1.. $X('11') + X('12') + X('24') = G = 1;$
Subconjunto2.. $X('12') + X('11') + X('23') = G = 1;$
Subconjunto3.. $X('13') + X('19') = G = 1;$
Subconjunto4.. $X('14') + X('15') = G = 1;$
Subconjunto5.. $X('15') + X('14') + X('16') = G = 1;$
Subconjunto6.. $X('16') + X('15') + X('25') = G = 1;$
Subconjunto7.. $X('17') + X('25') = G = 1;$
Subconjunto8.. $X('18') = E = 1;$
Subconjunto9.. $X('20') + X('21') = G = 1;$
Subconjunto10.. $X('22') + X('23') = G = 1;$
Subconjunto11.. $X('23') + X('22') + X('12') = G = 1;$
Subconjunto12.. $X('24') + X('11') = G = 1;$
Subconjunto13.. $X('25') + X('16') + X('17') = G = 1;$
Subconjunto14.. $X('26') + X('27') = G = 1;$

MODEL SET4 /ALL/;

SOLVE SET4 USING MIP MINIMIZING Z;

DISPLAY Z.I, X.I;

A.9. MODELO MATEMÁTICO DE RUTEO APLICADO AL SUBSUELO 1 Y SUBSUELO 2 DEL CENTRO COMERCIAL

\$TITLE FLUJO DE POTENCIA DE REDES CENTRO COMERCIAL
SUBSUELOS 1 Y 2 AGOSTO 2018

\$ONTEXT

=====
=====

El presente algoritmo identifica las rutas que aseguran el requerimiento de menos metros de cable para poder distribuir la potencia desde la estación base, conectando los respectivos equipos de poder, hasta llegar a las antenas previamente identificadas por el algoritmo de cobertura a la vez que se cumple con los requerimientos de calidad de servicio.

=====
=====

\$OFFTEXT

SET i Todos los nodos /s,v1*v12,a0*a8/;
SET s(i) Nodo de estación base /s/;
SET v(i) Nodos de equipos de poder y antenas /v1*v12,a0*a8/;
SET w(i) Nodos de equipos de poder /v1*v12/;
SET a(i) Nodos de antenas /a0*a8/;

ALIAS (i,j)
ALIAS (v,vn)
ALIAS (w,m)

SET

arcos (i,j) Todos los arcos posibles

/

s.v1

s.v2

s.v3

s.v4

s.v5

s.v6

v1.v9

v1.a2

v1.a3

v2.v10

v2.v12

v2.a0

v2.a1

v3.v7

v3.v9

v3.a4

v3.a5

v4.v7

v4.v8

v5.v8

v5.v10

v6.v7

v6.a6

v6.a7

v6.a8

v7.v9

v7.v10

v8.v11

v8.v12

v9.a4

v9.a5

v10.a6

v10.a7

v10.a8

v11.a0

v11.a1

v12.a2

v12.a3

/;

SCALAR

P Potencia de inicio en el nodo base /-51/

Q Calidad de servicio /-75/

C Factor de pérdida de potencia por cable /0.0721784/

;

SCALAR

N Número de antenas a instalar;

$N = \text{card}(a)$;

TABLE

length(i,j) Tabla de distancia desde el nodo inicial hasta los equipos de poder

\$ondelim

\$include metrosccsubuelounoydos.csv

\$offdelim

DISPLAY length;

PARAMETER perdida(v) Pérdida de cada nodo por equipo de poder

/

v1 3

v2 3

v3 3

v4 3

v5 3

v6 3

v7 3

v8 3

v9 3

v10 3

v11 3

v12 3

a0 3

a1 3

a2 3

a3 3

a4 3

a5 3

a6 3

a7 3

a8 3

/;

PARAMETER ganancia(v) Ganancia que se produce por la instalación de la antena

/

v1 0

v2 0

v3 0

v4 0
v5 0
v6 0
v7 0
v8 0
v9 0
v10 0
v11 0
v12 0
a0 5.1
a1 5.1
a2 5.1
a3 5.1
a4 5.1
a5 5.1
a6 5.1
a7 5.1
a8 5.1
/;

VARIABLES

z Función objetivo

f(v) Variable de flujo

x(i,j) Variable binaria si la ruta pasa del nodo i al nodo j

NEGATIVE VARIABLE f

BINARY VARIABLE x;

f.lo(v)=Q;

EQUATIONS

CABLE Metros de cable a utilizar en el DAS

- R1 Restricción del número de arcos que salen del sector o estación base
 - R2 Restricción del número de arcos que llegan al splitter v9
 - R3 Restricción del número de arcos que llegan al splitter v10
 - R4 Restricción del número de arcos que llegan al splitter v11
 - R5 Restricción del número de arcos que llegan al splitter v12
 - R6 Restricción del número de arcos que llegan al splitter v7
 - R7 Restricción del número de arcos que llegan al splitter v8
 - R8 Restricción de número de arcos que llegan a las antenas
 - R9 Restricción de flujo de poder desde el sector o estación base al primer splitter
 - R10 Restricción del flujo de poder desde los splitters hasta las antenas
- ;

$$\text{CABLE..} \quad Z = E = \text{SUM}[(i,j)\$arcos(i,j), \text{length}(i,j) * x(i,j)];$$

$$\text{R1..} \quad \text{SUM}[(s,w)\$arcos(s,w), x(s,w)] = E = 1;$$

$$\text{R2('v9')..} \quad \text{SUM}[w\$arcos(w, 'v9'), x(w, 'v9')] = E = 1;$$

$$\text{R3('v10')..} \quad \text{SUM}[w\$arcos(w, 'v10'), x(w, 'v10')] = E = 1;$$

$$\text{R4('v11')..} \quad \text{SUM}[w\$arcos(w, 'v11'), x(w, 'v11')] = E = 1;$$

$$\text{R5('v12')..} \quad \text{SUM}[w\$arcos(w, 'v12'), x(w, 'v12')] = E = 1;$$

$$\text{R6('v7')..} \quad \text{SUM}[w\$arcos(w, 'v7'), x(w, 'v7')] = E = 1;$$

$$\text{R7('v8')..} \quad \text{SUM}[w\$arcos(w, 'v8'), x(w, 'v8')] = E = 1;$$

$$\text{R8(a)..} \quad \text{SUM}[w\$arcos(w, a), x(w, a)] = E = 1;$$

$$\text{R9(v)\$(arcos('s',v))..} \quad f(v) + P - \text{perdida}(v) - C * \text{length}('s',v) * x('s',v) + \text{ganancia}(v) \\ = L = (1 - x('s',v)) * 100;$$

$$\text{R10(v,vn)\$(arcos(v,vn))..} \quad f(v) - \text{perdida}(vn) - C * \text{length}(v,vn) * x(v,vn) + \text{ganancia}(vn) \\ - f(vn) = L = (1 - x(v,vn)) * 100;$$

MODEL CCSUBSUELOUNOYDOS /ALL/;

SOLVE CCSUBSUELOUNOYDOS USING MIP MINIMIZING Z;

DISPLAY z.l, x.l;

A.10. MODELO MATEMÁTICO DE RUTEO APLICADO A LA PLANTA BAJA DEL CENTRO COMERCIAL

\$TITLE FLUJO DE POTENCIA DE REDES CENTRO COMERCIAL PLANTA BAJA AGOSTO 2018

\$ONTEXT

=====
=====

El presente algoritmo identifica las rutas que aseguran el requerimiento de menos metros de cable para poder distribuir la potencia desde la estación base, conectando los respectivos equipos de poder, hasta llegar a las antenas previamente identificadas por el algoritmo de cobertura a la vez que se cumple con los requerimientos de calidad de servicio.

=====
=====

\$OFFTEXT

SET i Todos los nodos /s,v1*v12,a9*a16/;

SET s(i) Nodo de estación base /s/;

SET v(i) Nodos de equipos de poder y antenas /v1*v12,a9*a16/;

SET w(i) Nodos de equipos de poder /v1*v12/;

SET a(i) Nodos de antenas /a9*a16/;

ALIAS (i,j)

ALIAS (v,vn)

ALIAS (w,m)

SET

arcos (i,j) Todos los arcos posibles

/

s.v1

s.v2

s.v3

s.v4

s.v5

s.v6

s.v7

v1.v8

v1.v11

v1.a11

v1.a15

v2.v8

v2.v9

v2.v10

v3.v9

v3.v10

v4.v9

v4.v10

v4.v12

v4.a13

v4.a16

v5.v8

v5.a14

v5.a12

v6.v10

v6.a10

v6.a9

v7.a12

v7.a16

v7.a10

v7.a9

v8.v11

v8.v12

v9.a13

v9.a16

v10.a10

v10.a9

v11.a11

v11.a15

v12.a14

v12.a12

/;

SCALAR

P Potencia de inicio en el nodo base /-51/

Q Calidad de servicio /-75/

C Factor de pérdida de potencia por cable /0.0721784/

;

SCALAR

N Número de antenas a instalar;

$N = \text{card}(a)$;

TABLE

length(i,j) Tabla de distancia desde el nodo inicial hasta los equipos de poder
\$ondelim

\$include metrosccplantabaja.csv

\$offdelim

DISPLAY length;

PARAMETER perdida(v) Pérdida de cada nodo por equipo de poder

/

v1 3

v2 3

v3 3

v4 3

v5 3

v6 3

v7 3

v8 3

v9 3

v10 3

v11 3

v12 3

a9 3

a10 3

a11 3

a12 3

a13 3

a14 3

a15 3

a16 3

/;

PARAMETER ganancia(v) Ganancia que se produce por la instalación de la antena

/

v1 0

v2 0

v3 0

v4 0

v5 0

v6 0

v7 0

v8 0

v9 0

v10 0

v11 0

v12 0

a9 5.1

a10 5.1

a11 5.1

a12 5.1

a13 5.1

a14 5.1

a15 5.1

a16 5.1

/;

VARIABLES

z Función objetivo

f(v) Variable de flujo

x(i,j) Variable binaria si la ruta pasa del nodo i al nodo j

NEGATIVE VARIABLE f

BINARY VARIABLE x ;

$f.lo(v)=Q;$

EQUATIONS

CABLE Metros de cable a utilizar en el DAS

R1 Restricción del número de arcos que salen del sector o estación base

R2 Restricción de número de arcos que llegan al splitter v8

R3 Restricción de número de arcos que llegan al splitter v9

R4 Restricción de número de arcos que llegan al splitter v10

R5 Restricción de número de arcos que llegan al splitter v11

R6 Restricción de número de arcos que llegan al splitter v12

R7 Restricción de número de arcos que llegan a las antenas

R8 Restricción de flujo de poder desde el sector o estación base al primer splitter

R9 Restricción del flujo de poder desde los splitters hasta las antenas

;

CABLE.. $Z = E = \text{SUM}[(i,j)\$arcos(i,j), \text{length}(i,j) * x(i,j)];$

R1.. $\text{SUM}[(s,w)\$arcos(s,w), x(s,w)] = E = 1;$

R2('v8').. $\text{SUM}[w\$arcos(w,'v8'), x(w,'v8')] = E = 1;$

R3('v9').. $\text{SUM}[w\$arcos(w,'v9'), x(w,'v9')] = E = 1;$

R4('v10').. $\text{SUM}[w\$arcos(w,'v10'), x(w,'v10')] = E = 1;$

R5('v11').. $\text{SUM}[w\$arcos(w,'v11'), x(w,'v11')] = E = 1;$

R6('v12').. $\text{SUM}[w\$arcos(w,'v12'), x(w,'v12')] = E = 1;$

R7(a).. $\text{SUM}[w\$arcos(w,a), x(w,a)] = E = 1;$

R8(v)\$ (arcos('s',v)).. $f(v) + P - \text{perdida}(v) - C * \text{length}('s',v) * x('s',v) + \text{ganancia}(v) = L = (1 - x('s',v)) * 100;$

R9(v,vn)\$arcos(v,vn).. $f(v) - \text{perdida}(vn) - C * \text{length}(v,vn) * x(v,vn) + \text{ganancia}(vn) - f(vn) = L = (1 - x(v,vn)) * 100;$

MODEL CCPLANTABAJA /ALL/;

SOLVE CCPLANTABAJA USING MIP MINIMIZING Z;

DISPLAY z.l, x.l;

A.11. MODELO MATEMÁTICO DE RUTEO APLICADO AL PISO 1 Y PISO 2 DEL CENTRO COMERCIAL

\$TITLE FLUJO DE POTENCIA DE REDES CENTRO COMERCIAL PISOS 1 Y 2 AGOSTO 2018

\$ONTEXT

=====
=====
El presente algoritmo identifica las rutas que aseguran el requerimiento de menos metros de cable para poder distribuir la potencia desde la estación base, conectando los respectivos equipos de poder, hasta llegar a las antenas previamente identificadas por el algoritmo de cobertura a la vez que se cumple con los requerimientos de calidad de servicio.
=====
=====

\$OFFTEXT

SET i Todos los nodos /s,v1*v8,a17*a22/;
SET s(i) Nodo de estación base /s/;
SET v(i) Nodos de equipos de poder y antenas /v1*v8,a17*a22/;
SET w(i) Nodos de equipos de poder /v1*v8/;

SET a(i) Nodos de antenas /a17*a22/;

ALIAS (i,j)

ALIAS (v,vn)

ALIAS (w,m)

SET

arcos (i,j) Todos los arcos posibles

/

s.v1

s.v2

s.v3

s.v4

s.v5

v1.v8

v1.a22

v1.a18

v1.a19

v1.a17

v2.v7

v2.a22

v3.v6

v3.a22

v4.v6

v4.a22

v5.v7

v5.a22

v5.a21

v5.a20

v6.v7

v6.v8

v7.a17

v7.a18

v7.a19

v7.a20

v7.a21

v8.a17

v8.a18

v8.a19

v8.a20

v8.a21

/;

SCALAR

P Potencia de inicio en el nodo base /-51/

Q Calidad de servicio /-75/

C Factor de pérdida de potencia por cable /0.0721784/

;

SCALAR

N Número de antenas a instalar;

$N = \text{card}(a)$;

TABLE

length(i,j) Tabla de distancia desde el nodo inicial hasta los equipos de poder

\$ondelim

\$include metrosccpisounopisodos.csv

\$offdelim

DISPLAY length;

PARAMETER perdida(v) Pérdida de cada nodo por equipo de poder

/

v1 3

v2 3

v3 3

v4 3

v5 3

v6 3

v7 3

v8 3

a17 3

a18 3

a19 3

a20 3

a21 3

a22 3

/;

PARAMETER ganancia(v) Ganancia que se produce por la instalación de la antena

/

v1 0

v2 0

v3 0

v4 0

v5 0

v6 0

v7 0

v8 0

a17 5.1

a18 5.1

a19 5.1

a20 5.1

a21 5.1

a22 5.1

/;

VARIABLES

z Función objetivo

f(v) Variable de flujo

x(i,j) Variable binaria si la ruta pasa del nodo i al nodo j

NEGATIVE VARIABLE f

BINARY VARIABLE x;

f.lo(v)=Q;

EQUATIONS

CABLE Metros de cable a utilizar en el DAS

R1 Restricción del número de arcos que salen del sector o estación base

R2 Restricción de número de arcos que llegan al splitter v6

R3 Restricción de número de arcos que llegan al splitter v7

R4 Restricción de número de arcos que llegan al splitter v8

R5 Restricción de número de arcos que llegan a las antenas

R6 Restricción de flujo de poder desde el sector o estación base al primer splitter

R7 Restricción del flujo de poder desde los splitters hasta las antenas

;

CABLE.. $Z = E = \text{SUM}[(i,j)\$arcos(i,j), \text{length}(i,j) * x(i,j)];$
R1.. $\text{SUM}[(s,w)\$arcos(s,w), x(s,w)] = E = 1;$
R2('v6').. $\text{SUM}[w\$arcos(w,'v6'), x(w,'v6')] = E = 1;$
R3('v7').. $\text{SUM}[w\$arcos(w,'v7'), x(w,'v7')] = E = 1;$
R4('v8').. $\text{SUM}[w\$arcos(w,'v8'), x(w,'v8')] = E = 1;$
R5(a).. $\text{SUM}[w\$arcos(w,a), x(w,a)] = E = 1;$
R6(v)\$arcos('s',v).. $f(v) + P - \text{perdida}(v) - C * \text{length}('s',v) * x('s',v) + \text{ganancia}(v)$
 $= L = (1 - x('s',v)) * 100;$
R7(v,vn)\$arcos(v,vn).. $f(v) - \text{perdida}(v) - C * \text{length}(v,vn) * x(v,vn) + \text{ganancia}(v)$
 $- f(vn) = L = (1 - x(v,vn)) * 100;$

MODEL CCPIOUNOPISODOS /ALL/;

SOLVE CCPIOUNOPISODOS USING MIP MINIMIZING Z;

DISPLAY z.l, x.l;