**F\_AA\_225**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**CARRERA DE ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**PLAN DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

**TIPO DE TRABAJO DE TITULACIÓN: PROYECTOS TÉCNICOS**

|  |  |
| --- | --- |
| **I.- INFORMACIÓN BÁSICA** | |
| **PROPUESTO POR:**  Evelyn Rossana Parra López | **ÁREA:**  COMUNICACIONES  **LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**  COMUNICACIONES INALÁMBRICAS |
| **AUSPICIADO POR:**  Ing. Pablo Aníbal Lupera Morillo, PhD. | **FECHA:**  06/02/2019 |
| **RELACIÓN:**  No aplica | |
| **II.- INFORMACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN** | |
| 1. **Título del Trabajo de Titulación**   ANÁLISIS MEDIANTE SIMULACIÓN DE LA PROPAGACIÓN DE SEÑALES UHF EN TÚNELES SUBTERRÁNEOS EN BASE AL MODELO DE TRAZADO DE RAYOS (CASO DE ESTUDIO METRO DE QUITO). | |
| 1. **Planteamiento del problema**   En la actualidad, la mayor parte de la población requiere acceder a la red móvil, las telecomunicaciones brindan innumerables soluciones para satisfacer este requerimiento en múltiples escenarios donde existe gran concentración y flujo de personas. El Metro de Quito es un proyecto que en su totalidad será subterráneo, formará parte del sistema de transporte público de la ciudad y concentrará un número considerable de personas. El tren metropolitano de acuerdo a sus especificaciones técnicas puede alcanzar hasta 100 km/h, en la página oficial se informa que viajará a una velocidad promedio de 40km/h, con una capacidad para 1500 pasajeros [1]. Considerando el escenario expuesto, para analizar el funcionamiento de un sistema de comunicación inalámbrico dentro de un túnel subterráneo se deben tomar en cuenta las características de radiación, la movilidad y la forma geométrica del túnel.  Actualmente no se ha definido el sistema de comunicación inalámbrico que se implementará en el interior del túnel, esto es evidenciado debido a que hasta la fecha de emisión de este documento no se ha informado al público en general la solución seleccionada por parte de los responsables del Proyecto Metro de Quito. Una solución aplicada en túneles es la instalación de cable radiante en ambos costados del túnel, lo cual provoca que los costos se eleven, ya que esta opción implica una cantidad aproximada de 44km de cable radiante, además de que requiere el uso de un gran número de amplificadores.  En cambio un Sistema de Antenas Distribuidas (DAS) comprende una solución menos costosa en comparación a la anterior e implica una implementación sin mayor complejidad. Por esto, surge la necesidad de contar con estudios técnicos que permitan determinar el desempeño de un sistema DAS en un túnel subterráneo, como lo es el Metro de Quito. Este tipo de estudios se requieren para contar con datos técnicos de la cobertura de un sistema DAS. La carencia de estos estudios, no permitirá que los operadores de redes inalámbricas de la banda UHF conozcan datos referenciales del desempeño de un sistema DAS en un escenario poco estudiado en nuestro país.  Cabe recalcar que el presente Trabajo de Titulación está enfocado en analizar la propagación de las señales tomando en cuenta la implementación de la solución DAS.  De acuerdo al trabajo de Hrovat, Kandus y Javornik en [2], la frecuencia de operación es un factor determinante en la elección del modelo de propagación, por ejemplo, en las frecuencias de las bandas superiores a UHF, la propagación en el túnel puede ser analizada como si fuese en el interior de una guía de onda, sin embargo, si la sección transversal del túnel supera en quince veces la longitud de onda, las pérdidas serán independientes de la forma y el área de la sección transversal, por lo tanto, pueden ser aproximadas a las pérdidas en el espacio libre. Puesto que, las frecuencias de operación en este trabajo corresponden a la banda de UHF y el diámetro del túnel alcanza un valor aproximado de ocho metros, la atenuación puede ser analizada como si fuese en el espacio libre.  Ya que el Metro de Quito es una realidad, surge la necesidad de analizar las características de propagación de los sistemas de comunicación inalámbrica en la banda UHF que se instalarán dentro del túnel.  Teniendo en consideración lo expuesto anteriormente, se ha seleccionado el Modelo de Trazado de Rayos, el cual está basado en los principios de la Óptica Geométrica. | |
| 1. **Justificación**   El presente trabajo de titulación se realiza para analizar las características de propagación y cobertura que se presentarían en la implementación de un sistema distribuido de antenas (DAS) en el interior del túnel para brindar los servicios de comunicación en la banda UHF a los usuarios que viajarán en los trenes del sistema Metro de Quito. Desde un punto de vista general, la simulación se realiza para efectuar un análisis de la recepción de señales de radio en el interior de un tren que viaja a una alta velocidad a lo largo de un túnel subterráneo, lo cual representa un estudio novedoso en nuestro entorno. Se prevé que los resultados generados sirvan como referencia para posteriores estudios y mediciones.  ***3.1 Justificación práctica***  El Metro de Quito es un proyecto que está previsto inaugurarse en diciembre del 2019, el sistema de comunicación que será implementado en el interior del túnel aún no está definido, y por ello, es importante realizar el mayor número de estudios e investigaciones que contribuyan en la selección de la tecnología que satisfaga los requerimientos de movilidad y conectividad.  Como parte de los resultados que se pretenden obtener de la simulación se encuentran: la cobertura del sistema de comunicación y el perfil de retardo de potencia (Power Delay Profile PDP) considerando las reflexiones en el interior del túnel y la estimación de las variaciones de potencia provocadas por la velocidad del tren. Estos resultado permiten definir las características de funcionamiento de una solución DAS.  El presente trabajo involucra expresiones matemáticas, mecanismos y algoritmos relacionados con el modelo de propagación Ray Tracing, la Óptica Geométrica y el efecto Doppler, constituirá un documento sujeto a análisis y discusión por parte de las y los estudiantes de la Carrera de Telecomunicaciones en futuros trabajos de investigación.  **Trabajos similares**  **Tema:** Estudio y Simulación del Canal Móvil para bandas de LTE con Distribuciones Rician y Rayleigh en el Modelo de Propagación Okumura-Hata en base a Matlab.  **Autor:** Fernández Orquera, Luis Alejandro.  **Director:** Ing. Carlos Alfonso Herrera Muñoz.  **Carrera:** Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones  **Año:** 2014  **Resumen:**  LTE es una tecnología que se presenta por la continua evolución de la telefonía celular, es el paso de la tecnología 3.5 G a cuarta generación celular, en la cual se ofrecen mayores beneficios y performance que todas las generaciones anteriores, dando un aspecto de ubicuidad y convergencia para las comunicaciones actuales y futuras. Los avances producidos por la evolución de las antenas con diversas técnicas han permitido la mejor modelación del canal inalámbrico, dando un uso del espectro radioeléctrico más eficiente que ha dado lugar al desarrollo de la tecnología celular a gran escala. En este Proyecto se indica los conceptos, descripción y funcionamiento de las redes con Long Term Evolution (LTE) y su posterior evolución a LTE Advanced, además la realización de un programa de simulación en MATLAB, en el cual se representa al canal inalámbrico en un modelo de propagación para las bandas de frecuencias utilizadas por LTE y su evolución en LTE Advanced (LTE-A). Dando un punto de vista sobre la tecnología que se está implementando en el país que es LTE, permitiendo conocer sus generalidades e infraestructura, para observar sus beneficios prácticos, tomando en cuenta el medio ambiente y los escenarios donde se propagan las señales [6].  **Diferencias:**  La simulación del proyecto de titulación citado se realiza considerando los escenarios: ciudades grandes, ciudades pequeñas con poca densidad poblacional y ambientes rurales, utilizando el modelo empírico Okumura – Hata. El proyecto de titulación que se propone, maneja un medio de propagación diferente como el interior de un túnel y emplea un modelo de propagación determinístico.  **Tema:** Diseño de un sistema de antenas distribuidas multi-operadora para mejorar la cobertura celular 3G en el edificio de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional.  **Autor:** Villota Coral, Jhonny Alexander.  **Director:** Ing. Pablo Aníbal Lupera Morillo, PhD.  **Carrera:** Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones  **Año:** 2016  **Resumen:**  En este proyecto se establecen las características de cobertura celular WCDMA presentes en el edificio FIEE/FIQA de la Escuela Politécnica Nacional y se diseña una solución para mejorar los niveles de señal utilizando un sistema de antenas distribuidas (DAS) con soporte multi-operadora. De acuerdo a los parámetros físicos y posición geográfica de las estaciones base aledañas al edificio se determinan teóricamente y se simulan los niveles de señal esperados dentro del edificio mediante la aplicación de varios modelos de propagación para ambientes exteriores e interiores en Matlab. Se determina la combinación de modelos exteriores/interiores más cercana a la realidad en base a una comparativa entre las simulaciones y mediciones de cobertura realizadas con teléfonos de ingeniería. Finalmente, se diseña un DAS multi-operadora y a través de la herramienta de predicción iBwave DESIGN se cuantifica la mejora que se obtendría al implementar el diseño [7].  **Diferencias :**  En el proyecto mencionado, el escenario de estudio es el edificio FIEE/FIQA donde el nivel de potencia de la señal se determina considerando modelos de propagación outdoor e indoor, los modelos utilizados para determinar las pérdidas de los rayos en el interior del edificio son: Motley-Keenan y COST 231-Multipared. La diferencia con el trabajo que se propone, radica en el modelo de propagación y el medio de propagación considerado.  **Tema:** Análisis y Simulación de la Propagación de Ondas Milimétricas en un Ambiente Indoor.  **Autor:** Vaca Proaño, Jorge Eduardo.  **Director:** MSc. Ricardo Xavier Llugsi Cañar.  **Carrera:** Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones  **Año:** 2017  **Resumen:**  Con el fin de explorar alternativas para sistemas de comunicaciones móviles, el presente trabajo lleva a cabo un análisis del comportamiento de los niveles de potencia en un ambiente indoor para una señal de radiofrecuencia en el rango de frecuencias extremadamente altas, lo que corresponde a ondas milimétricas. Se realiza el diseño de dos antenas microstrip para dos bandas de frecuencia libres dentro del espectro EHF, (37-40.5) GHz y (71-76) GHz, dichas antenas se diseñan matemáticamente y se simulan en CST Studio de donde se obtiene sus parámetros fundamentales. Se simula las antenas en dos ambientes de propagación diseñados en AutoCAD y modelados en WinProp WallMan para posteriormente ser simulados en WinProp ProMan. Se analiza los niveles de potencia obtenidos, comparando los modelos usados por el programa computacional y se presenta las conclusiones obtenidas [8].  **Diferencias:**  La principal diferencia entre el trabajo propuesto y el trabajo citado es la banda de frecuencia de las señales analizadas y el medio de propagación.  El proyecto de titulación mencionado analiza las señales en la banda EHF, y realiza un estudio sobre antenas microstrip. Los programas de simulación utilizados son: Ansoft HFSS 13, ADS 2011 y CST STUDIO SUITE, este último basado en modelos empíricos y matemáticos, incluye el modelo de trazado de rayos. | |
| 1. **Hipótesis**   ***4.1. Hipótesis***  No aplica*.*  ***4.2. Alcance***  El modelo de trazado de rayos [3] fue escogido porque ha sido vastamente utilizado para predecir la propagación de señales en ambientes indoor, donde la señal electromagnética es tratada como un rayo de luz, se aplicará este concepto en un túnel con secciones transversales rectangular y circular. El modelo incorpora los principios de la Óptica Geométrica para determinar el comportamiento del rayo ante múltiples reflexiones. En el cálculo de la potencia de recepción se supone que las paredes del túnel son un medio homogéneo reflectante, las pérdidas en el interior del túnel se basan fundamentalmente en la ecuación de Friis para determinar las pérdidas en el espacio libre, y finalmente para el análisis se tomará en cuenta la velocidad de movimiento del tren.  La simulación del modelo de propagación de trazado de rayos se realizará por completo en el software de simulación de Matlab. Mediante la implementación de scripts y funciones se aplicarán las expresiones matemáticas y los mecanismos expuestos en el modelo, especialmente aquellos que caracterizan el comportamiento de la fuente de rayos y la esfera de recepción, los cuales serán representados gráficamente, el escenario del túnel y el tren se visualizarán en tres dimensiones.  El alto número de rayos que serán generados en función de la frecuencia de teselación, dan lugar a una gran cantidad de información, la cual será tabulada y procesada para facilitar su análisis. Mediante una interfaz gráfica se podrán modificar los parámetros de entrada como: la frecuencia de teselación (número de rayos), la frecuencia de operación, las potencias de transmisión y recepción, el patrón de radiación de las antenas, número de antenas de recepción, velocidad del vagón del Metro de Quito, entre los principales parámetros a considerar, la interfaz también permitirá visualizar los resultados obtenidos: perfiles de retardo de potencia y gráficas de desvanecimiento de potencia en función del tiempo.  En [3] se presenta la ecuación (1) que permite calcular la potencia recibida en un túnel con sección transversal rectangular, pero de acuerdo con [4] y [5], el modelo es adaptable para túneles con diferentes formas de sección transversal.  Donde:  y corresponde a la potencia recibida y transmitida respectivamente, es la longitud de onda en el espacio libre, es la raíz cuadrada de la multiplicación de las ganancias de las antenas transmisora y receptora en la dirección de línea de vista (LOS).  es la raíz cuadrada de la multiplicación de la ganancia de la antena transmisora en la dirección del i-ésimo rayo emitido y la ganancia de la antena receptora en la dirección de su i-ésimo rayo recibido, es longitud de la trayectoria del rayo cuando existe línea de vista, es la longitud de la trayectoria del i-ésimo rayo. es el coeficiente de reflexión del i-ésimo rayo, el cual fue interceptado por la antena receptora y es el ángulo de incidencia del rayo.  Para la obtención de los resultados se tomará en cuenta una de las antenas del sistema DAS, se debe manifestar que en presente estudio no se analizarán las características de funcionamiento ante la interacción de la cobertura de varias antenas, lo cual podría ser analizado en un trabajo posterior.  Con la finalidad de comprobar los resultados obtenidos en el presente estudio, este trabajo culminará con el contraste entre el mapa de calor generado con la presente simulación y el mapa generado con el programa iBwave. Es necesario aclarar que el programa iBwave se utilizará en su versión de prueba, por lo cual se debe mencionar que los resultados de la simulación en este programa se obtendrán de acuerdo a las capacidades del software disponible. La realización del presente trabajo no generará un producto final demostrable. | |

|  |
| --- |
| 1. **Objetivo General**   Simular la propagación de señales UHF de un enlace downlink en túneles subterráneos en base al Modelo de Trazado de Rayos (Caso de estudio Metro de Quito). |

|  |
| --- |
| 1. **Objetivos específicos**    1. Estudiar e implementar en una simulación las expresiones matemáticas, mecanismos y algoritmos embebidos en el modelo de propagación de trazado de rayos.    2. Crear una interfaz gráfica que facilite la ejecución de la simulación.    3. Obtener los perfiles de retardo de potencia al evaluar las componentes multitrayectoria de la señal, y también, las gráficas de desvanecimiento de potencia en función del tiempo tomando en cuenta diferentes velocidades.    4. Determinar el impacto sobre la frecuencia de la señal recibida en un enlace downlink tomando en cuenta las velocidades que el tren Metropolitano puede alcanzar.    5. Contrastar el mapa de calor obtenido con la simulación y el mapa de calor generado al utilizar el software IB Wave. |

|  |
| --- |
| 1. **Metodología:** 2. **Fase teórica**   Dentro del modelo de trazado de rayos, destacan dos mecanismos: la emisión geodésica de rayos y la esfera de recepción, de acuerdo con la literatura. Dicho modelo se puede utilizar en 2D y 3D. Para brindar mayor cercanía con la realidad, en el presente trabajo se considerarán las especificaciones que el modelo dicta para tres dimensiones.  En la fase teórica se realizará una investigación detallada para sentar los principios del modelo de propagación escogido, conceptos adicionales sobre la Óptica Geométrica, y el efecto Doppler, considerados como tópicos más representativos.  También, se recopilará la información más importante y relevante sobre métodos constructivos del túnel del Metro de Quito, especificaciones técnicas del tren y características de operación de los equipos de radio y antenas que serán considerados en la simulación. Se justificará la selección del modelo de trazado de rayos al relacionarlo con las características del medio de operación que se está evaluando.   1. **Fase de diseño, análisis o implementación metodológica**   En esta fase, ya se tienen bien definidas las expresiones matemáticas, mecanismos y algoritmos que se implementarán, por lo cual, se diseñarán las etapas de la simulación en secuencia con las etapas de transmisión, propagación y recepción.  La etapa de transmisión involucrará el diseño de la fuente de rayos en tres dimensiones en función de la frecuencia de teselación, y la superposición con el lóbulo de radiación de una determinada antena. A su vez, en la etapa de propagación, se representará la forma del túnel mediante funciones matemáticas en tres dimensiones donde se analizará la reflexión de los rayos. Como etapa final en el diseño, se definirán el número y locaciones de los receptores, ya que se implementará el mecanismo de esferas de recepción en función de los ángulos de separación de los rayos de la fuente.  El procedimiento que se seguirá para testear la simulación realizada, es contrarrestar los niveles de potencia de recepción representados mediante mapas de calor con aquellos generados por el programa iBwave, el cual está basado en el modelo IDP (Indoor Dominant Path) [9].   1. **Fase de simulación y/o implementación**   Esta fase comprenderá principalmente la implementación de los mecanismos ya diseñados usando el software de simulación MATLAB, se crearán los scripts y funciones necesarias cuyas líneas de código serán debidamente explicados. Los datos generados se tabularán para permitir un mejor procesamiento de la información, y así generar las gráficas de perfil de retardo de potencia y desvanecimiento de la señal en función del tiempo. Se elaborará un mapa de calor con los niveles de potencia de la señal considerando un túnel sin tráfico vehicular.   1. **Fase de validación / análisis de resultados/ pruebas de funcionamiento**   Los perfiles de retardo de potencia y las gráficas de desvanecimiento de potencia en función del tiempo se analizarán para determinar si tienen similitud con las curvas generadas en trabajos similares. Se utilizará el programa de software iBwave para generar los mapas de calor en el interior del túnel. Se contrastarán los mapas de calor obtenidos con iBwave y en la simulación del presente proyecto. Se realizará una breve comparación entre el modelo de trazado de rayos y el modelo que utiliza iBwave: IDP (Indoor Dominant Path). |

|  |
| --- |
| 1. **Plan de trabajo**   ***Actividades:***   * Se investigarán las características de construcción del túnel con el fin de determinar la permitividad eléctrica y conductividad de los materiales utilizados, para el respectivo cálculo de los coeficientes de reflexión. * Se reunirá información sobre las especificaciones técnicas del tren metropolitano. * Se realizará una breve descripción de las tecnologías candidatas a implementarse en el interior del túnel del Metro de Quito, y se justificará porque se estudia el sistema de antenas distribuidas DAS. * Se recopilará información sobre los equipos de radio y antenas de proyectos similares, para caracterizar la transmisión y recepción de la señal de radio. * Se justificará la selección del modelo de trazado de rayos resaltando sus ventajas y desventajas. * Se recopilarán todas las expresiones matemáticas que se utilizarán en la simulación tomando en cuenta que las pérdidas de propagación se calculan como si fuesen producidas en el espacio libre. * Se estudiarán los principios de la Óptica Geométrica respecto a la reflexión para determinar el comportamiento del rayo al reflejarse sobre las paredes del túnel. * Se diseñará la fuente de rayos en tres dimensiones según las especificaciones del modelo. * Se realizará la superposición de los valores del lóbulo de radiación de una determinada antena, con los rayos de la fuente, para determinar la ganancia de cada rayo. * Se representará al túnel como una función matemática en 3D. * Se definirán las posibles posiciones de los equipos móviles, para aplicar el mecanismo de esfera de recepción; únicamente se considera la transmisión en downlink. * Se determinará el punto de reflexión de cada rayo, así como, el número máximo de reflexiones que pueden presentarse en función del nivel de threshold de la señal. * Se diseñará una interfaz gráfica para facilitar la realización de la simulación. * Se obtendrán los perfiles de retardo de potencia y las gráficas de desvanecimiento de potencia en función del tiempo. * Se generará el mapa de calor considerando los valores de potencia en el interior del túnel cuando no existe tráfico. * Se contrastará el mapa de calor obtenido en la simulación con el mapa de calor generado con el programa de software iBwave. * Los recursos que serán utilizados son: software de simulación MATLAB (versión 2017a), software de planificación de radio iBwave, software de diseño Autodesk Auto CAD 2018, de la suite ofimática Microsoft Office Professional Plus 2013 se utilizará principalmente Microsoft Word, [Microsoft Excel](https://es.wikipedia.org/wiki/Microsoft_Excel) y [Microsoft PowerPoint](https://es.wikipedia.org/wiki/Microsoft_PowerPoint), el principal recurso material es un computador. |

|  |
| --- |
| 1. **Bibliografía** 2. Metro de Quito – EPM, METRO, [Online]. Available: <http://www.metrodequito.gob.ec/>. 3. A. Hrovat, G. Kandus, T. Javornik, “A Survey of Radio Propagation Modeling for Tunnels”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 2, 2014. 4. M. Kermani, M.Kamarei, “A Ray-Tracing Method for Predicting Delay Spread in Tunnel Environments”, in *IEEE International Conference on Personal Wireless Communications,* 2000. 5. Y. Zhang, “Novel Model for Propagation Loss Prediction in Tunnels”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 52, no. 5, 2003. 6. Y. Yamaguchi, T. Abe, T. Sekiguchi, J. Chiba, “Attenuation Constants of UHF Radio Waves in Arched Tunnels”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. MTT-33, no. 8, 1985. 7. L. Fernández, “Estudio y Simulación del Canal Móvil para bandas de LTE con Distribuciones Rician y Rayleigh en el Modelo de Propagación Okumura-Hata en base a Matlab”, *Escuela Politécnica Nacional*, 2014. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/7322>. 8. J. Villota, “Diseño de un sistema de antenas distribuidas multi-operadora para mejorar la cobertura celular 3G en el edificio de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional”, *Escuela Politécnica Nacional*, 2016. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/16086>. 9. J. Proaño, “Análisis y Simulación de la Propagación de Ondas Milimétricas en un Ambiente Indoor”, *Escuela Politécnica Nacional*, 2017. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17422>. 10. G. Wölfle, R. Wahl, P. Wertz, P. Wildbolz, F. Landstorfer, “Dominant Path Prediction Model for Indoor Scenarios”, GeMiC, 2005. |

|  |
| --- |
| 1. **Cronograma** |

Firma Firma

Evelyn Rossana Parra López Ing. Pablo Aníbal Lupera Morillo PhD.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Nombre completo del Profesor |  | Nombre completo del Profesor |
| PROPONENTE |  | DIRECTOR |
| Email: evelyn.parra@epn.edu.ec  Telf.: +593 987 162 163 |  | Email: pablo.lupera@epn.edu.ec  Telf.: |

**CRONOGRAMA**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Actividades** | **Año** | 2019 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **Total de horas** | 440 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **Horas** | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Investigación de las características de construcción del túnel para determinar la permitividad eléctrica y conductividad de los materiales utilizados. | |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Recopilación de información sobre las especificaciones técnicas del tren metropolitano. | |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Breve descripción sobre las tecnologías candidatas a implementarse en el interior del túnel del Metro de Quito, y justificación del estudio del sistema de antenas distribuidas DAS. | |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Recopilación de información sobre los equipos de radio y antenas, utilizados en proyectos semejantes. | |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Justificación de la selección del modelo de trazado de rayos resaltando sus ventajas y desventajas. | |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Recopilación de todas las expresiones matemáticas que se utilizarán en la simulación. | |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Estudio de los principios de la Óptica Geométrica respecto a la reflexión. | |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Diseño de la fuente de rayos en tres dimensiones. | |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Realización de la superposición de los valores del lóbulo de radiación de una determinada antena, con los rayos de la fuente. | |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Representación del túnel como una función matemática en 3D. | |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Determinación del número de equipos móviles así como sus posiciones. | |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Implementación de un algoritmo para determinar el punto de reflexión del rayo. | |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Diseño de una interfaz gráfica para facilitar la realización de la simulación. | |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Generación de los perfiles de retardo de potencia y las gráficas de desvanecimiento de potencia en función del tiempo. | |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Generación del mapa de calor considerando los valores de potencia en el interior del túnel cuando no existe tráfico. | |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Contraste del mapa de calor obtenido en la simulación con el mapa de calor generado con el programa de software iBwave. | |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Redacción del Proyecto de Titulación. | |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |