

Desarrollo de una Metodología de Medición de Radiación no Ionizante para servicios de telecomunicaciones comerciales soportados en la reglamentación vigente sobre los límites de exposición de las personas a campos electromagnéticos

Daniel Mateo Muñoz Rueda

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Electrónico

Director

Efrén Darío Acevedo Cárdenas

Magister en Ingeniería Electrónica

Codirector

Julián Rodríguez Ferreira

Ph.D en astronomía y astrofísica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

Le dedico el resultado de este trabajo a mi familia, que sin su apoyo y dedicación no habría sido posible. En especial a mis padres por guiarme en mis procesos y generar en mí la motivación para continuar investigando y a mi hermano por sus desinteresadas aportaciones a mi vida personal y profesional.

Agradecimientos

Agradezco a mi familia y amigos por todo el apoyo recibido, por estar en los momentos altos y bajos de mi carrera, así como sus consejos y expresiones de ánimo.

Tabla de Contenido

Introducción	16
1. Objetivos	19
2. Metodología de medición de Radiación no Ionizante	20
2.1. Metodología Implementada	20
2.1.1. Fundamentos de la Metodología	20
2.1.2. Analizador de espectros R&S FSH20	23
2.1.3. Software Instrument View	24
2.1.4. Consideraciones y procedimientos en la campaña	26
2.1.5. Formalización del informe de medición	27
3. Comprobación de la metodología establecida	28
3.1. Comprobación de potencia transmitida contra intensidad de campo recibida.	28
3.1.1. Prueba controlada con una antena	28
3.1.2. Prueba controlada con tres antenas	30
3.2. Preparación para la campaña de medición	34
3.2.1. Materiales de emisión y recepción	34
3.2.1.1. Equipos de medición	34

3.2.1.2. Equipos de emisión	34
3.2.2. Materiales complementarios	35
3.2.3. Preparación del lugar de la campaña	35
3.2.4. Puntos de emisión	38
3.2.4.1. Laboratorio 114	38
3.2.4.2. Laboratorio 112	39
3.2.4.3. Aula 109	39
3.2.5. Puntos de medición	39
4. Medición en campo	40
4.1. Ubicación de antenas de emisión	40
4.2. Procedimiento de medición	42
4.3. análisis de datos	45
4.3.1. Medición en banda ancha	45
4.3.2. Medición en banda angosta	47
4.4. Mapa de radiación	48
5. Informe Técnico	50
5.1. Ubicación de la campaña de medición	50
5.2. Límites de exposición seleccionados	50
5.3. Medición en banda ancha	50
5.4. Delimitación de las zonas en el espacio de medición	52

6. Actualización de la norma	53
7. Recomendaciones	60
8. Trabajo futuro	61
9. Conclusiones	61
Referencias Bibliográficas	63
Apéndices	66
9.1. Implementos de medición	66
9.2. Medición en Banda ancha	68
9.3. Medición en banda angosta	72
9.4. procedimiento de medición	78
9.5. Formalización del informe de medición	83

Lista de Figuras

Figura 1.	Límites de exposición a campos electromagnéticos (Agencia Nacional del Espectro , ANE).	21
Figura 2.	Antenas R&S TSEMF B1 y R&S TSEMF B2.	22
Figura 3.	Analizador de espectros R&S FSH20.	24
Figura 4.	Software Instrument View.((Rohde & Schwarz InstrumentView Software Manual, 2023))	25
Figura 5.	Ejemplo de establecimiento de puntos de medición y fuentes emisoras.	26
Figura 6.	Antena de emisión a 470MHz, generador de señales R&S SMB100 y equipo receptor.	29
Figura 7.	Respuesta del receptor respecto al transmisor con una sola antena.	30
Figura 8.	Antenas de emisión con frecuencia y ganancia conocidas.	31
Figura 9.	Equipo receptor.	31
Figura 10.	Puntos de medición en campo.	32
Figura 11.	Respuesta del receptor respecto al transmisor.	33
Figura 12.	Generadores de señales.	35
Figura 13.	Lugar de medición de la campaña.	36
Figura 14.	Esquema del lugar de la campaña realizado en Autocad.	37
Figura 15.	Disposición del espacio de la campaña.	37

Figura 16.	Espacios para la disposición de equipos de emisión y medición.	38
Figura 17.	Puntos de medición en campo.	41
Figura 18.	Vista general del espacio de medición.	42
Figura 19.	Puntos de medición en campo.	44
Figura 20.	Ubicación referenciada de las fotos de los puntos de medición.	45
Figura 21.	Incoherencia entre medición en banda ancha y angosta	46
Figura 22.	Tabla de intensidad de campo eléctrico.	48
Figura 23.	Mapa de radiación dentro del espacio analizado.	49
Figura 24.	Plano representativo de puntos de emisión y medición.	53
Figura 25.	Cambios más significativos para la normativa.	54
Figura 26.	Cambios realizados en el Software Instrument View.	55
Figura 27.	Diagrama representativo medición con antena 5G.	56
Figura 28.	Antena 5G.	56
Figura 29.	Puntos de medición de antena 5G.	57
Figura 30.	Tabla con los resultados de las mediciones.	58
Figura 31.	Mapa realizado en QGIS.	59
Figura 32.	Analizador de espectros R&S FSH20.	66
Figura 33.	Antenas isotrópicas del analizador de espectros.	67
Figura 34.	Equipo completo para una campaña de medición.	68

Figura 35.	Límites de intensidad de campo eléctrico.	69
Figura 36.	Límite mínimo para el Quick Scan.	70
Figura 37.	Selección de modo y frecuencias de medición.	71
Figura 38.	Asignación de límites para el set en banda ancha.	72
Figura 39.	Ruta de acceso a la configuración para la medición de frecuencias.	73
Figura 40.	Selección de antena en la configuración de toma de datos.	74
Figura 41.	Picos de frecuencia seleccionados.	74
Figura 42.	Pestaña EMF Sets.	75
Figura 43.	Configuración del límite poblacional según la resolución 774 de 2018.	76
Figura 44.	Selección de límites poblacional y ocupacional.	77
Figura 45.	Transferencia del set al analizador de espectros.	77
Figura 46.	Vía de acceso al set en el analizador.	78
Figura 47.	Adquisición de datos en el analizador.	79
Figura 48.	Buscador de resultados de medición.	80
Figura 49.	Segunda página del reporte generado.	81
Figura 50.	Tercera página del reporte generado.	82
Figura 51.	Cuarta página del reporte generado.	83

Lista de Tablas

Tabla 1.	Ubicación de la campaña de medición.	50
Tabla 2.	Valores máximos para la campaña de medición.	50
Tabla 3.	Tabla de comparación entre frecuencias respecto al límite poblacional.	51
Tabla 4.	Tabla de comparación entre frecuencias respecto al límite ocupacional.	51
Tabla 5.	Tabla de comparación entre frecuencias respecto al Nivel de decisión.	52
Tabla 6.	Ubicación de los puntos de medición.	53

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Manual de medición de Radiación no ionizante	66
Apéndice B. Generación de Heatmap a través de código en MATLAB	84

Glosario

Límites máximos de exposición: Es el umbral pico como medida de seguridad ante la radiación no ionizante propuesto por la resolución 774 de 2018 .

Nivel de decisión: Es el 50% del valor límite de exposición permitido, e indica la necesidad de un estudio en banda angosta.

Zona poblacional: Espacio al que la población puede acceder libremente sin restricciones ni permisos.

Zona ocupacional: Lugar en el que se encuentra una concentración mayor de radiación no ionizante y es accesible únicamente por personal autorizado.

Intensidad de campo eléctrico: Fuerza que afecta a una partícula cargada por cada unidad de carga cuando se encuentra inmersa en un campo eléctrico, siendo esta medida expresada en voltios por metro (V/m) o en dBV/m si se utiliza una escala logarítmica.

Analizador de espectros PR200: Dispositivo electrónico capaz de medir la intensidad de campo electromagnético. La normativa vigente establece unas características mínimas para los equipos de medición para banda ancha y angosta. Se eligió este analizador de espectros pues cumple con todas las propiedades estipuladas dentro del reglamento.

Antena isotrópica: Antena omnidireccional para medición de campo electromagnético. En este proyecto se utilizan las antenas TSEMF-B1 y TSEMF-B2, las cuales miden en un rango de fre-

cuencias entre $30\text{MHz} - 3\text{GHz}$ y $700\text{MHz} - 6\text{GHz}$ respectivamente.

Resumen

Título: Desarrollo de una Metodología de Medición de Radiación no Ionizante para servicios de telecomunicaciones comerciales soportados en la reglamentación vigente sobre los límites de exposición de las personas a campos electromagnéticos *

Autor: Daniel Mateo Muñoz Rueda **

Palabras Clave: Radiación no ionizante, PR200, campo eléctrico, analizador de espectros.

Descripción: En el presente trabajo de grado se expone una metodología de medición de radiación no ionizante. Se estudia el analizador de espectros R&S PR200 como medio para realizar el registro de la intensidad de campo eléctrico y su comportamiento frente a la potencia transmitida. A partir de la normativa colombiana vigente se estableció un manual cuyo propósito es facilitar la realización de campañas de medición haciendo un énfasis en el dispositivo, llevando a cabo un análisis exhaustivo de sus configuraciones y concretando recomendaciones que permitan al operador registrar la intensidad de campo eléctrico de forma eficiente y segura. Adicional a lo anterior, se toman en cuenta estudios y normativas generadas en diferentes países para complementar lo estipulado en la resolución vigente, realizando aportaciones a la misma.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y telecomunicaciones. Director: Efrén Acevedo, Magister en Ingeniería Electrónica. Codirector: Julián Rodríguez Ferreira, Ph.D en astronomía y astrofísica.

Abstract

Title: Development of a methodology for Non-Ionizing Radiation measurement for commercial telecommunications services based on current regulations of the human electromagnetic field limits regulation. *

Author: Daniel Mateo Muñoz Rueda **

Keywords: Non-Ionizing Radiation, PR200, Electric Field, Spectrum Analyzer.

Description: In this degree work, a methodology for measuring non-ionizing radiation is presented. The R&S PR200 spectrum analyzer is studied as a means to measure the electric field intensity and its behavior in relation to the transmitted power. Based on the Colombian regulations in force, a manual is created with the aim of facilitating measurement campaigns, emphasizing the device, carrying out an exhaustive analysis of its configurations and specifying recommendations that allow the operator to register the electric field strength in an efficient and safe way. In addition to the above, studies and regulations generated in different countries are considered to complement what is established in the current resolution, making contributions to it.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y telecomunicaciones. Director: Efrén Acevedo, Magister en Ingeniería Electrónica. Codirector: Julián Rodríguez Ferreira, Ph.D en astronomía y astrofísica.

Introducción

La creciente expansión de los servicios de telecomunicaciones ha generado una mayor preocupación y atención sobre los posibles efectos de la radiación no ionizante en la salud humana y el entorno. En este contexto, se torna fundamental diseñar metodologías precisas y confiables para medir y evaluar dicha radiación, asegurando el cumplimiento de los estándares y límites establecidos por entidades regulatorias.

Nuestra investigación presenta en el desarrollo de una metodología para la medición de radiación no ionizante en servicios de telecomunicaciones comerciales, teniendo en cuenta los lineamientos de la Resolución 774 de 2018 de la Agencia Nacional del Espectro (ANE) (Agencia Nacional del Espectro , ANE). El propósito central se sustenta en la creación e implementación de una estrategia de medición, plasmada en un manual de usuario, que emplee el analizador de espectros R&S FSH20, con el fin de garantizar mediciones precisas y alineadas con las normativas vigentes.

La metodología de medición propuesta permite no solo el cumplimiento de las regulaciones establecidas por la ANE, sino que también busca ser aplicada de manera efectiva y adaptable en entornos reales de servicios de telecomunicaciones. Así mismo, se han tenido en cuenta organismos de diferentes países para extraer de sus normativas las recomendaciones complementarias a lo establecidos por la ley colombiana.

De igual manera, se presenta el procedimiento de comprobación y validación de la metodología propuesta, el cual consta de dos etapas. En la primera, se realizaron pruebas dentro de un ambiente controlado -el laboratorio de comunicaciones de Alta Tensión de la Universidad Industrial de Santander-. Estas pruebas tuvieron como objetivo verificar el correcto funcionamiento de los equipos, permitiendo así determinar la relación entre la intensidad de campo eléctrico recibido por el analizador y la potencia transmitida por las antenas, permitiendo desarrollar una predictibilidad en los resultados obtenidos. Así mismo, dentro del laboratorio se experimentó con los generadores de señales y antenas emisoras para incrementar la intensidad de campo eléctrico, sufriendo hasta un 30 % del límite de exposición a radiación no ionizante.

Teniendo en cuenta las pruebas de laboratorio, en la segunda etapa se seleccionó un espacio dentro de la Universidad Industrial de Santander para llevar a cabo una campaña de medición bajo ciertos parámetros controlados, partiendo de un análisis de sitio para el escenario a evaluar y de esta forma gestionar parámetros como la ubicación de los puntos de emisión y recepción, potencia de transmisión, entre otros.

Luego del análisis de sitio se procede a realizar la campaña de medición en la cual se organizaron antenas emisoras junto a generadores de señales en la disposición planeada, midiendo ordenadamente y recogiendo los resultados para analizarlos dentro de un informe técnico, que entre otros resultados se generó un mapa de radiación, exponiendo gráficamente la distribución de la

intensidad de campo eléctrico en el espacio.

Con la metodología propuesta, la Universidad Industrial de Santander pretende impulsar proyectos que involucren el campo de las telecomunicaciones comerciales y la evaluación de riesgos asociados con la radiación no ionizante como servicio.

La implementación de las herramientas metodológicas desarrolladas en este proyecto permite brindar servicios a la industria de las telecomunicaciones comerciales, ergo generará oportunidades de investigación y cooperación con los diferentes sectores públicos y privados, promoviendo la transferencia de conocimiento y la participación de los estudiantes y profesores en proyectos conjuntos con empresas del medio, fomentando la innovación y el desarrollo tecnológico.

Como resultado del trabajo de grado, se establece una metodología de medición que es comprobada a través de los distintos escenarios de medición y el análisis de los datos recopilados en campo. Esta tesis no se centra únicamente en el dispositivo mencionado, y hace parte de las herramientas que la universidad está desarrollando para beneficiar no solo a la comunidad científica sino a la industria y a la comunidad en general.

1. Objetivos

Objetivo general

Diseñar e implementar una metodología para la medición de radiación no ionizante en servicios de telecomunicaciones comerciales cumpliendo con los requisitos y límites establecidos en la Resolución 774 de 2018 de la Agencia Nacional del Espectro, mediante el uso del analizador de espectro R&S FSH20.

Objetivos específicos

Diseñar un manual de medición de radiación no ionizante para el analizador de espectro R&S FSH20 adaptado específicamente a los servicios de telecomunicaciones teniendo en cuenta la resolución 774 de 2018 de la Agencia Nacional del Espectro ANE.

Ejecutar una prueba piloto donde se evalúen los escenarios poblacional y ocupacional según la resolución vigente donde se pueda validar la metodología propuesta.

Formalizar un modelo de informe técnico basado en los datos tomados en campo, evaluando de esta manera los niveles de radiación no ionizante y comparándolos con los límites de exposición y nivel de decisión propuestos en la resolución 774 de 2018.

2. Metodología de medición de Radiación no Ionizante

En el presente capítulo se describe una metodología de medición de radiación no ionizante desarrollada con el uso del analizador de espectros R&S FSH20 siguiendo los lineamientos de la Resolución 774 de 2018 establecido por la Agencia Nacional del Espectro (ANE). El enfoque de la investigación realizada es formalizar un modelo de informe técnico que abarque tanto la descripción procedimiento como los resultados de pruebas de campo que corroboren la funcionalidad y validez del mismo.

2.1. Metodología Implementada

2.1.1. Fundamentos de la Metodología. Esta metodología es soportada por la Resolución 774 de 2018, "Por la cual se adoptan los límites de exposición de las personas a los campos electromagnéticos, se reglamentan las condiciones que deben reunir las estaciones radioeléctricas para cumplirlos y se dictan disposiciones relacionadas con el despliegue de antenas de radiocomunicaciones"(Agencia Nacional del Espectro , ANE). La resolución establece los límites de exposición a radiación no ionizante, que a su vez están basados en las consideraciones planteadas por la Comisión Internacional sobre Protección contra Radiación No Ionizante. ((INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION e.V, 2020)). Por lo anterior, se emplean gran parte los procedimientos contenidos en la norma, adaptándolos hacia el analizador de espectros R&S FSH20. Estos límites permiten, entre otras cosas, definir los parámetros básicos

para la medición de campo electromagnético, obteniendo así tanto el límite superior para la intensidad de campo eléctrico, mostrado en la Figura 1, como el nivel de decisión definido en el primer anexo del presente documento.

LÍMITES MÁXIMOS DE EXPOSICIÓN (VALORES R.M.S.)

Tipo de Exposición	Gama de Frecuencias	Intensidad de campo eléctrico E	Intensidad de campo magnético H	Densidad de potencia de onda plana
		(V/m)	(A/m)	equivalente S (W/m ²)
Ocupacional	9 – 100 kHz	170	80	-
	100 kHz – 1 MHz	610	1,6/f	-
	1 – 10 MHz	610/f	1,6/f	-
	10 – 400 MHz	61	0,16	10
	400 – 2.000 MHz	3 f ^{1/2}	0,008 f ^{1/2}	f/40
	2 – 300 GHz	137	0,36	50
Poblacional	9 – 100 kHz	83	21	-
	100 - 150 kHz	87	5	-
	0,15 – 1 MHz	87	0,73/f	-
	1 – 10 MHz	87/f ^{1/2}	0,73/f	-
	10 – 400 MHz	28	0,073	2
	400 – 2.000 MHz	1,375 f ^{1/2}	0,0037 f ^{1/2}	f/200
	2 – 300 GHz	61	0,16	10

Figura 1. Límites de exposición a campos electromagnéticos (Agencia Nacional del Espectro , ANE).

Por otra parte, la Resolución establece los parámetros para delimitar la zona en una campaña de medición, adoptando la ubicación de por lo menos veinte (20) puntos a evaluar, cinco de ellos en el acimut de la antena como mínimo y con una altura de uno punto cinco metros (1.5m) sobre el nivel del suelo (Agencia Nacional del Espectro , ANE). Si el punto de medición establecido se encuentra sobre un edificio, se procederá a realizar la medición a uno punto cinco metros (1.5m) de altura sobre el nivel del edificio (Ecoquimsa Laboratorio Ecológico y Químico, 2011).

La presente metodología se divide en dos fases propuestas por la normativa colombiana. En la primera fase, se realiza una medición en banda ancha en cada uno de los puntos de medición establecidos para observar si la intensidad de campo electromagnético supera el nivel de decisión.

En la segunda fase, si se determina que la intensidad de campo medida es mayor al nivel de decisión establecido por la norma, se analiza en banda angosta cada una de las frecuencias de mayor aportación, generando una segunda medición recorriendo nuevamente las ubicaciones de los puntos de la campaña en banda ancha. Como resultado de la segunda fase, el operador podrá tomar las consideraciones necesarias para evitar que dicho límite sea sobrepasado.

Para llevar a cabo el registro de la intensidad de campo, la metodología propuesta en la presente investigación plantea hacerlo a través de dos antenas isotrópicas mostradas en la Figura 2. La primera es la R&S TSEMF B1 con un rango entre 30MHz hasta 3GHz que permite realizar mediciones de servicios comunes como radio FM hasta redes telefonía celular 4G, mientras que la antena R&S TSEMF B2 tiene un rango de 700MHz - 6GHz midiendo, entre otros servicios, redes 2G hasta 5G cubriendo la mayor parte de las telecomunicaciones. (R&STS-EMF portable EMF measurement system (2023))



(a) Antena isotrópica R&S TSEMF B1.

(b) Antena isotrópica R&S TSEMF B2.

Figura 2. Antenas R&S TSEMF B1 y R&S TSEMF B2.

Todas las mediciones realizadas deben tener una duración dependiendo de la confluencia

poblacional del espacio a evaluar. Para lugares con baja densidad demográfica, el tiempo de medición mínimo requerido es de un minuto (1 min) por punto, mientras que las locaciones con mayor confluencia poblacional dicho tiempo se extiende a seis minutos (6 min). Como parte de la metodología propuesta, se realiza la recomendación de instalar y priorizar puntos de medición en los espacios más altamente poblados o de mayor factor de riesgo.

2.1.2. Analizador de espectros R&S FSH20. Teniendo en cuenta lo anterior, se eligió el analizador de espectros R&S FSH20 mostrado en la Figura 3, el cual tiene la capacidad de medición tanto en banda ancha como angosta. Se llevó a cabo una revisión de la documentación del dispositivo con el fin de establecer un manual capaz de guiar al usuario en la configuración del mismo. La documentación consultada proporcionó la información necesaria para llevar a cabo este análisis. Se optó por una configuración del equipo para la medición del campo eléctrico, lo cual facilita su estudio en el contexto de esta investigación.



Figura 3. Analizador de espectros R&S FSH20.

Este dispositivo cuenta igualmente con una certificación de calibración que garantiza la precisión del equipo para realizar mediciones de intensidad de campo eléctrico.

2.1.3. Software Instrument View. La plataforma Instrument View, es un software creado por Rhode & Schwarz que permite gestionar las capacidades de osciloscopios, analizadores de espectros y analizadores de redes, a través de programas ejecutables y configurables para realizar mediciones de señales específicas en un tiempo determinado. (Rohde & Schwarz InstrumentView Software Manual, 2023)

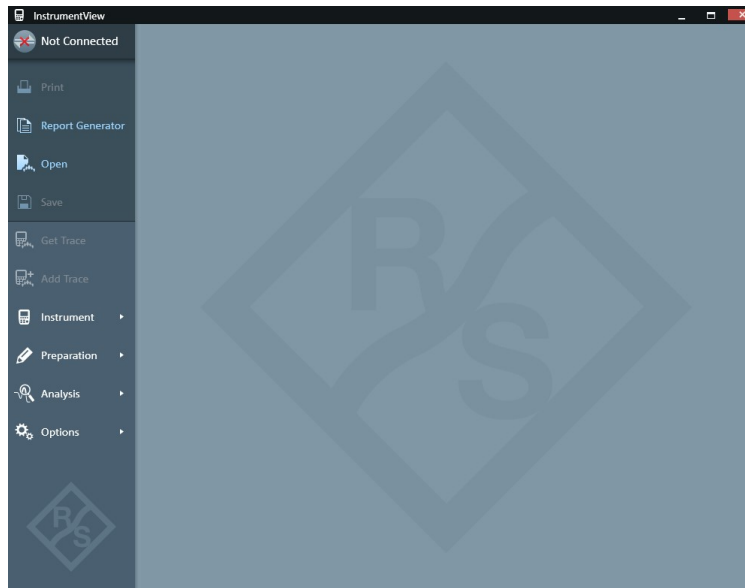


Figura 4. Software Instrument View.((Rohde & Schwarz InstrumentView Software Manual, 2023))

Esta herramienta apreciada en la Figura 4 funciona a través de sets, los cuales indican el tipo de medición que se está realizando, el equipo que lo hace, la antena utilizada para captar la señal, los límites sobre los cuales se va a trabajar, las frecuencias o rangos de frecuencias sobre los cuales se mide y el tiempo de exposición de la antena. Esto permite ejecutar mediciones controladas, de tal forma que se establece en su programación los parámetros necesarios para cumplir con la normativa vigente anteriormente mencionada.(Rohde & Schwarz InstrumentView Software Manual, 2023)

Así mismo, este software genera reportes de las mediciones efectuadas, mostrando gráficamente cada uno de los datos registrados. Estos reportes se pueden exportar a PDF y son de gran utilidad para representar resultados, sin embargo, no cuenta con una función para realizar informes

que abarquen múltiples puntos de medición, los cuales se tendrán que producir manualmente.

2.1.4. Consideraciones y procedimientos en la campaña. Para tener un correcto desarrollo de la campaña de medición se realizan ciertas consideraciones para el operador. Primeramente, para determinar de forma correcta y eficiente el espacio de medición, es recomendable llevar a cabo una inspección de sitio que permita escoger los puntos de mayor riesgo ((Comisión Nacional de Comunicaciones, 2004)), así como su disposición en un diagrama donde se observen todos los puntos de medición en torno a las antenas radiantes como se muestra en la Figura 5.

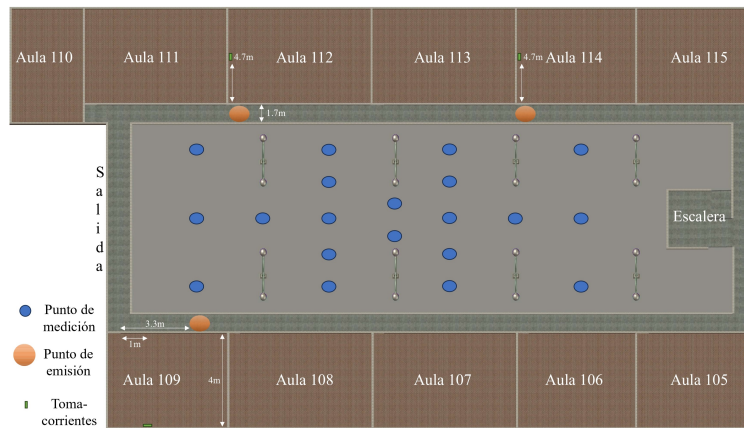


Figura 5. Ejemplo de establecimiento de puntos de medición y fuentes emisoras.

De igual forma, se toman consideraciones de seguridad que permitan al operario realizar el procedimiento en un entorno protegido. Este factor de riesgo puede darse por alto voltaje, campos magnéticos de corriente directa, peligro de caídas y similares. ((Instituto Federal de Telecomunicaciones México, 2020))

Con el fin de disminuir la cantidad de perturbaciones en las mediciones, es necesario que el operador del instrumento apague cualquier dispositivo celular o de radiocomunicaciones que pueda generar señales de interferencia con el equipo y de esta forma prevenir su posible saturación. ((Ministerio de Energía y Minas Guatemala, 2019))

2.1.5. Formalización del informe de medición. Para complementar el procedimiento de medición, es necesario generar un informe técnico que contenga los resultados obtenidos, incluyendo un diagrama con la ubicación de los puntos de medición y las antenas radiantes. Además de esto, se deben adjuntar al documento un mínimo 5 fotografías de los puntos de medición, incluyendo una fotografía con el punto de mayor exposición a campos electromagnéticos. Se recomienda hacer un croquis con el nivel de todos los puntos dentro del diagrama de ubicación para obtener una referencia visual esclarecedora (Unidad Reguladora de Servicios de Comunicaciones Uruguay, 2020).

Por otra parte, para dejar una constancia de la medición, es recomendable adjuntar una tabla con los valores medidos, las características de los instrumentos de medición y la fecha y hora en la cual se realizó la campaña.

Este informe es fundamental dentro de una campaña de medición pues estandariza la forma en la que se presentan los datos obtenidos. Además, realizando una investigación por distintas normativas de países latinoamericanos así como la opinión de ingenieros que trabajan realizando este tipo de mediciones, la formalización de un informe técnico permite adicionar todos los parámetros controlados dentro de la campaña, mostrando los resultados de forma sencilla al usuario final.

3. Comprobación de la metodología establecida

En este capítulo se realiza la comprobación del funcionamiento del analizador de espectros a través de pruebas con una y tres antenas. Se detalla el proceso de verificación a través de pruebas realizadas en laboratorio que evidencian la relación entre la potencia transmitida y la intensidad de campo recibida. Así mismo, se describe en profundidad el procedimiento empleado para preparar y llevar a cabo las mediciones en campo.

3.1. Comprobación de potencia transmitida contra intensidad de campo recibida.

para ejecutar una comprobación efectiva del analizador se realizó dos experimentos en el laboratorio: el primero de ellos fue una prueba con tres antenas emisoras, en las cuales se disminuyó la potencia transmitida por los generadores de señales asignados a cada una, registrando la intensidad de campo recibida por el analizador. En la segunda prueba se realizó exactamente lo mismo, sin embargo se empleó una única antena, reduciendo la potencia $1dB$ por medida tomada. Al finalizar estas pruebas se registraron los datos y se creó una curva de tendencia con los resultados.

3.1.1. Prueba controlada con una antena. Se realizó una prueba más detallada que permitiera reducir las fuentes radiantes, por ello, se utilizó una sola antena con ganancia de $11dBi$ y un generador de señales hasta $25dBm$, disminuyendo entre muestras $1dB$.

En este experimento de laboratorio, se ubicó la antena emisora a dos metros del equipo de medición buscando una relación más directa y libre de perturbaciones. Los equipos de medición y

recepción para esta prueba se puede observar en la Figura 6:



Figura 6. Antena de emisión a 470MHz, generador de señales R&S SMB100 y equipo receptor.

Al tener un escenario real, la señal captada por el analizador obtuvo ligeras perturbaciones del entorno, sin embargo, al analizar los datos podemos observar que la curva generada es una buena aproximación a una forma exponencial, concluyendo que es una respuesta esperable si medimos cualquier señal transmitida con el analizador de espectros.

De esta manera es posible establecer una predictibilidad en los resultados obtenidos según la potencia transmitida. Para esto es necesario realizar una regresión exponencial con una línea de tendencia que refleje el resultado de la siguiente forma:

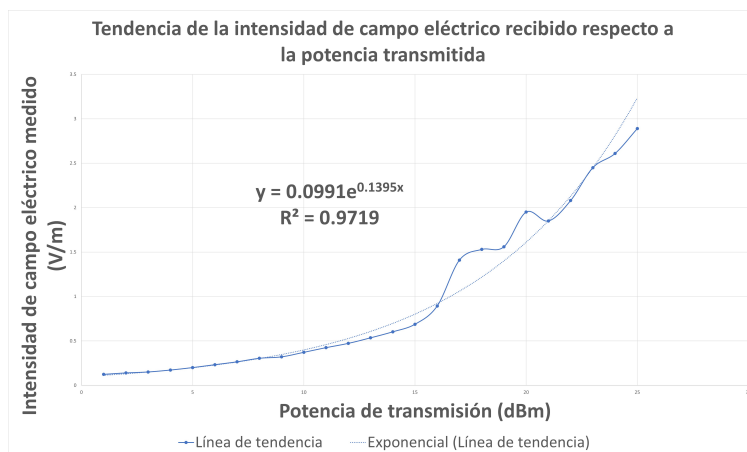


Figura 7. Respuesta del receptor respecto al transmisor con una sola antena.

3.1.2. Prueba controlada con tres antenas. Se realizó un experimento en el laboratorio de forma controlada, contando con tres antenas emisoras conocidas que se muestran en las Figuras 8(a), 8(b) y 8(c) conectadas a tres generadores de señales con una potencia definida.



(a) Antena con frecuencia de emisión a 430MHz.
 (b) Antena con frecuencia de emisión entre 400MHz - 470MHz.



(c) Antena con frecuencia de emisión a 915MHz .

Figura 8. Antenas de emisión con frecuencia y ganancia conocidas.

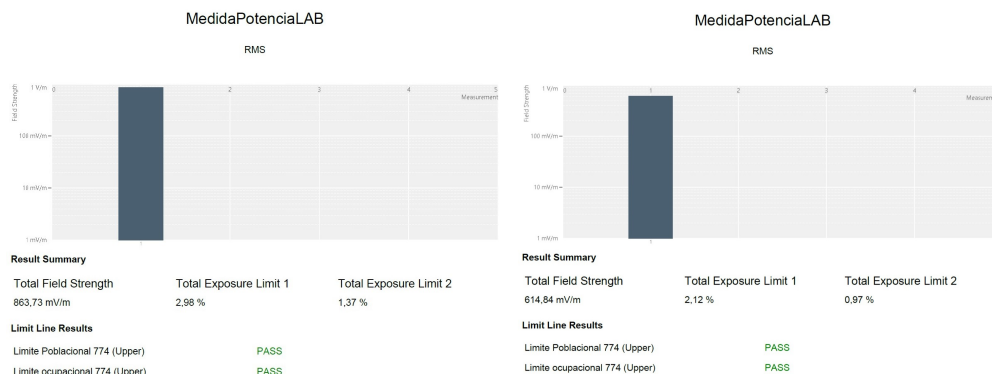
La ubicación de la antena receptora se puede observar en la Figura 9:



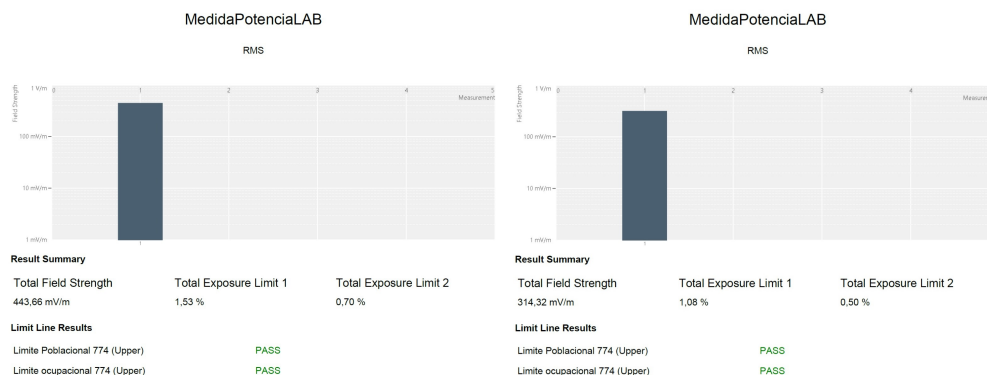
Figura 9. Equipo receptor.

Se determinó un punto de medición entre las antenas sin tener en cuenta zonas de fresnel, y se realizaron pruebas de medición disminuyendo la potencia de los generadores para observar el

comportamiento del receptor respecto a la potencia transmitida.



(a) Resultados antena a 470MHz - 22dBm y (b) Resultados antena a 470MHz - 19dBm y 10dBm para las otras antenas. 7dBm para las otras antenas.



(c) Resultados antena a 470MHz - 16dBm y (d) Resultados antena a 470MHz - 13dBm y 4dBm para las otras antenas. 1dBm para las otras antenas.

Figura 10. Puntos de medición en campo.

Para realizar un modelo predictivo de la sensibilidad del equipo receptor contra la potencia del sistema transmisor, se ajustó el generador de señales con una frecuencia de 470MHz a una potencia de 22dBm, mientras que los dos generadores Marconi se ajustaron a una potencia de 10dBm

para las otras dos antenas. Luego de realizar la medición, se redujo la potencia de todos los transmisores en 3dB al mismo tiempo y se llevó a cabo el procedimiento tres veces más como puede verse en la Figura 10.

En las Figuras 10(a), 10(b), 10(c) y 10(d) se muestra el resultado de la suma de las aportaciones de todas las señales transmitidas. Estos resultados muestran una tendencia de aproximadamente 200mV por cada 3dBm en todos los receptores.

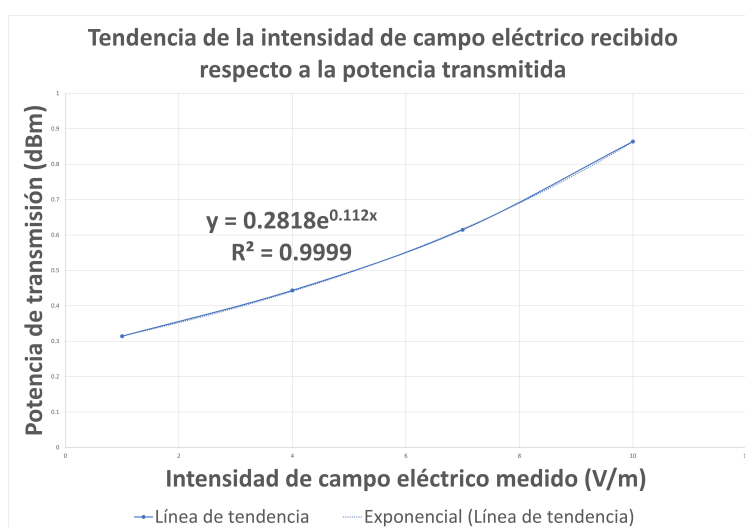


Figura 11. Respuesta del receptor respecto al transmisor.

En la Figura 11 se evidencian dos curvas, la primera de ellas en trazo continuo es el comportamiento de la intensidad del campo eléctrico respecto a la potencia transmitida, y la segunda una línea de tendencia con una forma exponencial. Se puede observar una evidente similitud entre ellas, por lo que se puede confirmar la conclusión propuesta en la sección anterior.

3.2. Preparación para la campaña de medición

Para la segunda parte de la comprobación se realizó el análisis del edificio Laboratorios Pesados de la Universidad Industrial de Santander con el fin de establecer una preparación previa para llevar a cabo una campaña de medición controlada, eligiendo los puntos de emisión, con una revisión de los materiales necesarios para su ejecución y calculando la zona de fresnel para cada antena.

3.2.1. Materiales de emisión y recepción.

3.2.1.1. Equipos de medición. Para realizar una campaña de medición se deberán utilizar los siguientes equipos:

Analizador de espectros R&SFSH20 del fabricante Rohde & Schwarz visto en la Figura 3.

Antena isotrópica TSEMF1 con rango de frecuencias entre $30MHz$ a $3GHz$, Figura 2(a).

3.2.1.2. Equipos de emisión.

Generador de señales R&S SMB100A que cuenta con un rango de frecuencias entre $9KHz$ - $6GHz$ y ganancia máxima de $30dBm$, presentado en la Figura 12(a) y dos Generadores de señales Marconi Instruments IFR Aeroflex 2023 con una capacidad entre $9KHz$ - $1.2GHz$ y ganancia máxima de $13dBm$ en la Figura 12(b) a continuación:



(a) Generador de señales R&S SMB100A. (b) Generador de señales Marconi Instruments IFR Aeroflex 2023.

Figura 12. Generadores de señales.

Antenas con frecuencia de emisión a 430MHz (Figura 8(a)), entre 400MHz - 470MHz y ganancia de 11dBi (Figura 8(b)) y 915MHz con ganancia de 9dBi (Figura 8(c)).

3.2.2. Materiales complementarios. Para este caso particular se necesitan dos extensiones de siete metros (7m) para los puntos de emisión en los laboratorios. Por otro lado, para el tomacorrientes ubicado en el espacio del grupo de investigación es necesaria una extensión de diez metros (10m).

3.2.3. Preparación del lugar de la campaña. La campaña se realizará dentro del edificio de la Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas de la Universidad Industrial de Santander, la ubicación de este edificio se puede ver a continuación en la Figura 13:

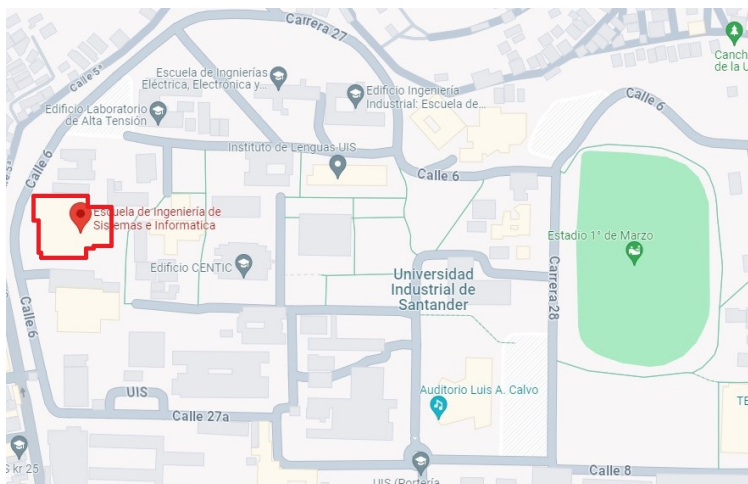


Figura 13. Lugar de medición de la campaña.

Se realizó un esquema del lugar de medición con la herramienta Autocad Architecture, para visualizar mejor el entorno de la campaña y asignar de esta forma los puntos de emisión y medición. Dicho esquema se puede observar en la Figura 14.

Las ubicaciones específicas mencionadas se encuentran en la Figura 15 a continuación, lo cual permite obtener una reproducibilidad en las pruebas y poder determinar con mayor fiabilidad el comportamiento del equipo de medición respecto a la potencia emitida.

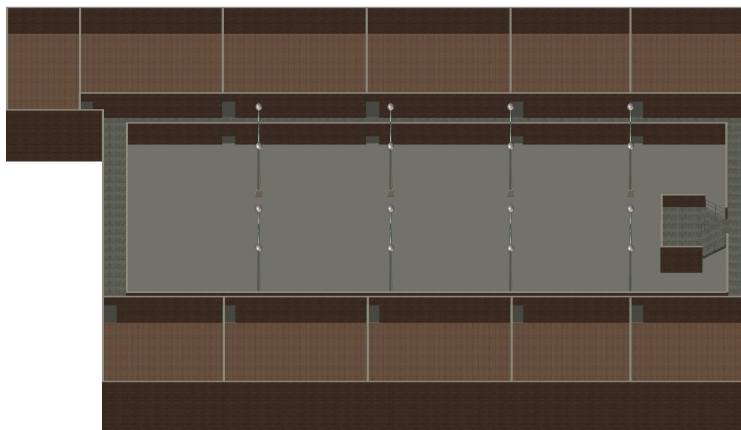


Figura 14. Esquema del lugar de la campaña realizado en Autocad.

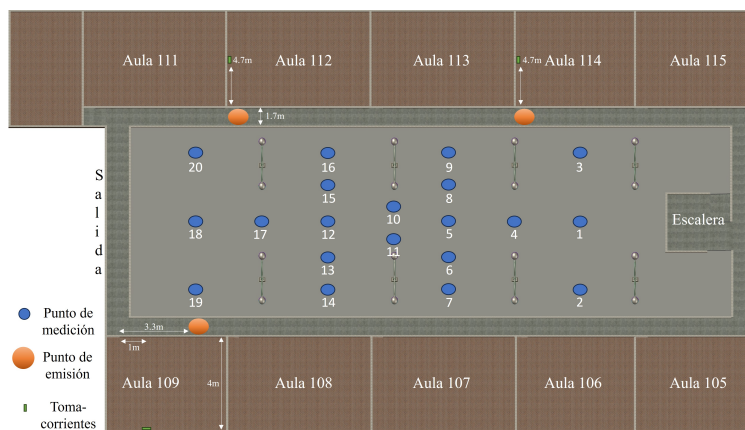


Figura 15. Disposición del espacio de la campaña.

De igual forma, se observa el orden en el cual las mediciones fueron tomadas, esto permite recrear con mayor facilidad el escenario planteado y, por tanto, simplificar el análisis de los datos obtenidos.

Se puede observar que la mayor parte de los puntos de medición se encuentran hacia la

sección media del recinto, esto es debido a que las tres antenas tendrán una orientación hacia esa ubicación por lo que se recomienda incluir más puntos en los lugares que presuponen una mayor intensidad de campo.

3.2.4. Puntos de emisión. Se plantearon tres lugares de emisión en la primera planta del edificio de laboratorios pesados en el campus de la Universidad Industrial de Santander.

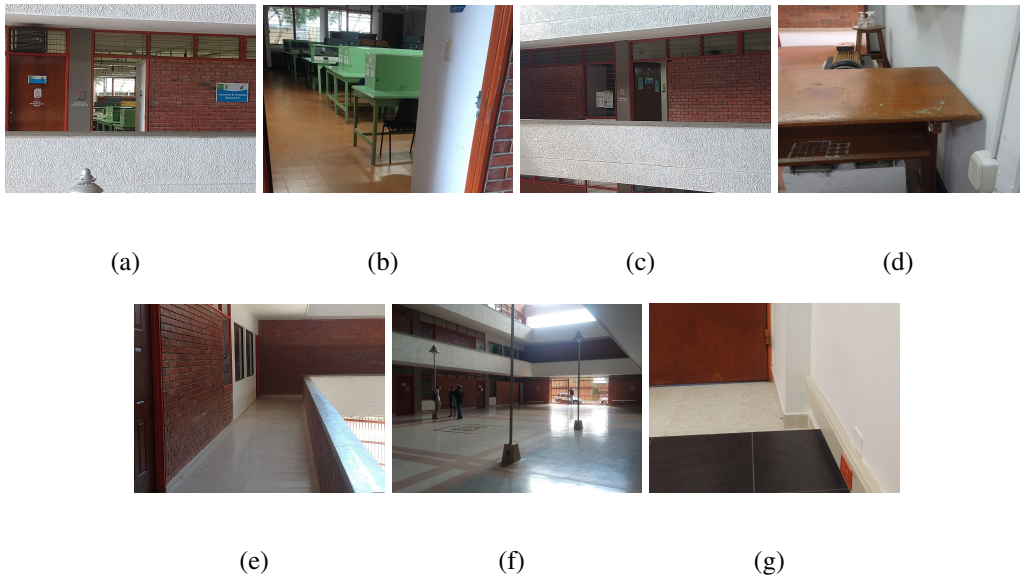


Figura 16. Espacios para la disposición de equipos de emisión y medición.

3.2.4.1. Laboratorio 114. El primero de ellos es el Laboratorio 114 mostrado en la Figura 16(a). En esta sala, el tomacorriente más cercano se encuentra ubicado en el primer banco de trabajo. Desde ese punto hasta el lugar de emisión hay un aproximado de cinco metros (5m) observado en la Figura 16(b), sin embargo, existe una conexión eléctrica a siete metros (7m) que permite conectar los equipos sin necesidad de prestar uno de los bancos.

Para este punto de emisión se recomienda utilizar una extensión de siete metros (7m), para

conectar el generador de R&S SMB100A y la antena de mayor potencia de la Figura 8(b)

3.2.4.2. Laboratorio 112. El segundo lugar se encuentra frente al laboratorio 112 que se muestra en la Figura 16(c), lo que permite realizar una separación de las antenas. En este caso el primer banco de trabajo es más lejano por lo cual se opta por utilizar el tomacorrientes junto al tablero. La distancia entre el conector y el posible punto de emisión es de siete metros (7m). (Figura 16(d))

En este lugar de emisión es necesario contar con otra extensión de siete metros (7m), utilizando un generador de señales Marconi Instruments IFR Aeroflex 2023 y la antena de $9dBi$ vista en la Figura 8(c).

3.2.4.3. Aula 109. El último lugar de emisión mostrado en la Figura 16(e) se encuentra frente al grupo de investigación “HDSP” el cual cuenta con tomacorrientes disponibles.

Para este punto es necesario tener una extensión de por lo menos diez metros (10m). Se empleará el segundo generador de señales Marconi Instruments IFR Aeroflex 2023 y la antena a $430MHz$ vista en la Figura 8(a).

3.2.5. Puntos de medición. Para el lugar de medición se ha determinado la plaza inferior del edificio, la cual cuenta con un espacio abierto con luminarias. La distancia entre cada una de estas es de cinco metros (5m) respecto al largo del edificio y siete punto siete metros (7.7m) respecto al ancho del edificio. Como se observa en la Figura 16(f) es un espacio amplio y permite ubicar los puntos de medición requeridos, sin embargo, se debe tomar en cuenta las luminarias para prevenir interferencias o distorsiones en la señal recibida.

Así mismo, se considera la posibilidad de necesitar una conexión eléctrica para conectar

tanto el analizador de espectros como un equipo de cómputo, por lo que es necesario tomar en cuenta un conector ubicado en la sala de informática 1 del edificio, directamente delante del área de medición mostrado en la Figura 16(g). Para tener este punto a disposición es necesaria una extensión de tres metros (3m) de largo como mínimo.

4. Medición en campo

Se presentarán los resultados de la campaña de medición que proporciona una comprobación al manual establecido, definiendo tres señales de emisión controladas, analizando los datos obtenidos, realizando observaciones sobre los inconvenientes presentados durante el desarrollo de la actividad y finalmente concluyendo la eficacia de la metodología con base en los procedimientos realizados.

4.1. Ubicación de antenas de emisión

En la preparación previa a la campaña de medición, se produjo un mapa con los puntos de emisión, los cuales serían ubicados en tres espacios diferentes como se puede ver en la Figura 15.

Estos espacios fueron estratégicamente seleccionados por la posición de los tomacorrientes disponibles y la separación entre estos. Dentro de la campaña se reprodujeron estos mismos puntos recreando el escenario planteado como se puede ver en las Figuras 17(a), 17(b) y 17(c)



(a) Primera ubicación de emisión.

(b) Segunda ubicación de emisión.



(c) Tercera ubicación de emisión.

Figura 17. Puntos de medición en campo.

Como se detalló en el reporte previo a la campaña, en el primer punto de emisión, al frente del laboratorio 114, se utilizó un generador de señales Marconi Instruments IFR Aeroflex 2023 junto con la antena emitiendo a 430MHz . En la segunda ubicación se estableció el generador R&S SMB100A junto con la antena que emite a 470MHz , y por último, en el tercer lugar de emisión se estableció el segundo generador de señales de la marca Marconi junto con la antena a 915MHz .

En la Figura 18 a continuación, se puede apreciar una vista general del espacio de medición

en donde se puede observar de mejor forma la ubicación de las antenas de emisión que se encuentran marcadas por flechas. Así mismo se observa el equipo de medición en uno de los puntos determinados luego de realizar la adquisición de datos.

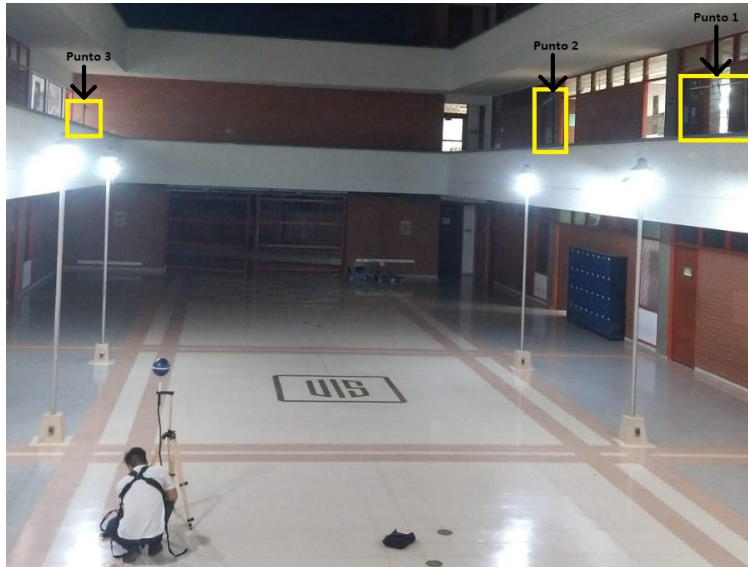


Figura 18. Vista general del espacio de medición.

En el momento de la campaña se tuvo inconvenientes al colocar las diferentes antenas emisoras debido a la disponibilidad de los laboratorios, por lo que se utilizó una extensión de treinta metros (30m) desde el laboratorio 112 alimentando los puntos uno y dos, y una adicional de quince metros (15m) para el tercero.

4.2. Procedimiento de medición

Para realizar la campaña, se procedió a tomar las medidas punto por punto comenzando desde los más cercanos a la escalera hasta los más lejanos. Así mismo, se tomaron fotografías que evidenciaran la posición en la que se encontraba la antena isotrópica junto con el analizador de

espectros registrando los datos.

Estas medidas se realizaron en dos días diferentes y en distintos horarios, por lo que pueden existir ligeras variaciones entre unas medidas y otras, sin embargo, la posición, orientación y distribución de las antenas de emisión se mantuvo, generando así el menor cambio posible en la adquisición de datos.

En el proceso de medición en cada punto se dejó un espacio de aproximadamente dos metros entre el operador y el equipo con el objetivo de evitar perturbaciones en el registro de los datos. De igual forma, la altura de la antena fue de 1.5 metros sobre el nivel del suelo como lo indica la normativa colombiana.



(a) Punto de medición M1 de la campaña.

(b) Punto de medición M2 de la campaña.



(c) Punto de medición M3 de la campaña.

(d) Punto de medición M4 de la campaña.



(e) Punto de medición M5 de la campaña.

Figura 19. Puntos de medición en campo.

Las Figuras 19(a), 19(b), 19(c), 19(d) y 19(e) son cinco de los veinte puntos establecidos, en los cuales se puede observar el cumplimiento del área determinada en el plano establecido en la preparación previa a la campaña, obteniendo mediciones sin mayores perturbaciones por la presencia de luminarias y distribuyendo de forma eficiente el espacio de medición. En la Figura 20 se puede observar con detalle cuáles ubicaciones son las mostradas en las anteriores imágenes.

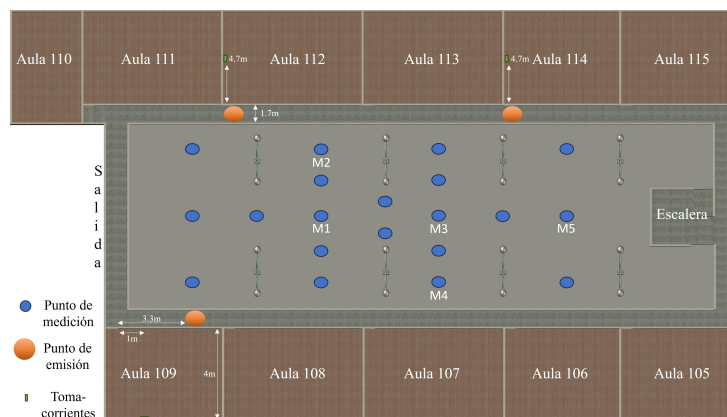


Figura 20. Ubicación referenciada de las fotos de los puntos de medición.

Dentro de esta campaña se realizaron las dos fases de medición, tanto en banda ancha como banda angosta. Al tener fuentes determinadas que emiten una intensidad de campo eléctrico mucho mayor a la de otras señales del entorno, en la fase de banda angosta se tomó en cuenta únicamente estas tres señales.

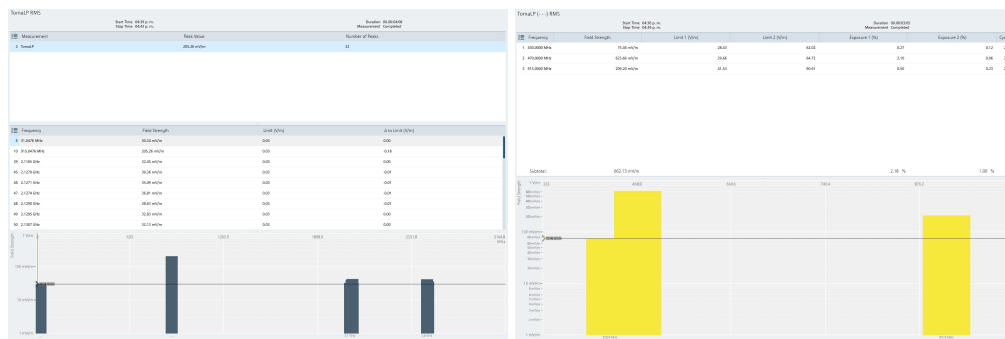
Como las antenas se ubicaron en dirección al centro del recinto, se colocaron múltiples puntos de medición en este lugar. En la siguiente sección se analizarán los datos obtenidos por la campaña. Así mismo, se planteará un mapa de radiación que muestre la distribución de la intensidad de campo eléctrico en el espacio determinado.

4.3. análisis de datos

4.3.1. Medición en banda ancha. Para la adquisición de datos en banda ancha, se utilizó la función Quick Scan del analizador, la cual tiene limitaciones al momento de registrar los

datos, pues al realizar el barrido de frecuencias, es necesario insertar dichas frecuencias con un span determinado, lo que limita al operario. En este caso, dicho span fue de 100MHz comenzando desde los 30MHz hasta los 3GHz generando un total de 30 muestras.

En ese barrido de frecuencias se pueden observar algunas inconsistencias, pues en diversas ocasiones el analizador no detecta la totalidad de los picos de frecuencia emitidos, establecidos para la campaña:



(a) Quick Scan del punto de medición 12. (b) Sub mediciones del punto de medición 12.

Figura 21. Incoherencia entre medición en banda ancha y angosta

En las Figuras 21(a) y 21(b) se puede observar que a pesar de tener las tres señales activas y con un nivel mayor a los 30mV requeridos para que el quick scan detecte los picos, este no detecta dos de ellos y en cambio, registra otros picos ubicados en frecuencias muy cercanas entre sí, afectando el trabajo del quick scan. La posible causa para este evento puede ser que el modo seleccionado para el equipo no pueda detectar correctamente todos los picos de frecuencia por el tipo de barrido que realiza, ya que no detecta todas las frecuencias al mismo tiempo, y en cambio

se recogen los datos de forma ordenada y en un plazo corto del tiempo que es determinada por ciclos.

La posible solución que puede tener dicho problema es aumentar dentro del programa Instrument View el número de ciclos que realiza por toma de medida, además de aumentar la cantidad de datos recogidos eligiendo un span menor y que abarque de igual forma todo el ancho de banda de la antena, así se tendrá un barrido más lento pero perdiendo menos información en el proceso. Igualmente, el límite inferior establecido para la aparición de los picos de frecuencias fue de $30mV/m$, que se podría disminuir a $10mV/m$ de tal forma que detecte señales mas débiles y se obtengan más datos.

4.3.2. Medición en banda angosta. Luego de realizar la recolección de datos en banda ancha se procedió a realizar una toma de medidas en banda angosta, en la cual se midió las tres frecuencias de emisión de las antenas. Para esta parte de la campaña se replicó el proceso exactamente en las locaciones de medida en banda ancha, lo cual permite desarrollar un modelo para predecir la intensidad de campo eléctrico en cada punto, sin embargo, para llevarlo a cabo es necesario un análisis de la potencia recibida respecto a la distancia a la que se encuentra la antena emisora de la antena receptora.

Los resultados de cada punto junto con su porcentaje de nivel de exposición se encuentran en la siguiente Figura 22. Como se puede apreciar en la tabla, la suma de las aportaciones generadas por estas tres frecuencias es baja respecto al límite de exposición poblacional a campos

electromagnéticos, esto es debido a que los generadores de señales utilizados para este proceso son de baja potencia, y las antenas emisoras utilizadas tienen una ganancia insuficiente para alcanzar el nivel de decisión, encontrándose a una distancia suficiente para atenuar ligeramente la señal.

Point Number	Field Strenght (mV/m)	Exposición poblacional (%)
1	175.65	0.61
2	262.36	0.92
3	91.8	0.32
4	220.42	0.77
5	315.7	1.1
6	306.31	1.07
7	182.7	0.64
8	248.48	0.87
9	203.08	0.71
10	448.18	1.57
11	444.88	1.56
12	662.13	2.32
13	437.65	1.53
14	381.86	1.33
15	600.97	2.1
16	359.46	1.26
17	890.05	3.12
18	591.89	2.07
19	753.35	2.64
20	370.63	1.3

Figura 22. Tabla de intensidad de campo eléctrico.

Aún así, se puede apreciar un patrón de radiación para cada uno de los puntos de medición, por lo que es posible registrar dichos valores dentro de una gráfica que represente la intensidad de campo en el espacio. Este tipo de gráficas son los “heatmaps” o mapas de calor, y son útiles para realizar un análisis visual del impacto de la radiación no ionizante sobre el espacio registrado.

4.4. Mapa de radiación

Lamentablemente, el analizador de espectros no cuenta con un generador de mapas de radiación para mediciones de radiación no ionizante. Sin embargo, existen técnicas que permiten

generarlo de forma exacta. En esta campaña, se recopilaron datos de la intensidad de campo junto con sus coordenadas, y si bien el GPS del dispositivo no cuenta con una capacidad para determinar con exactitud las coordenadas en un espacio reducido como el utilizado, se logró precisar la ubicación empleando las medidas recopiladas dentro de la preparación previa para determinar la ubicación de los puntos dentro del recinto. Dichos datos se procesaron a través de un código en Matlab ubicado en el Anexo B.

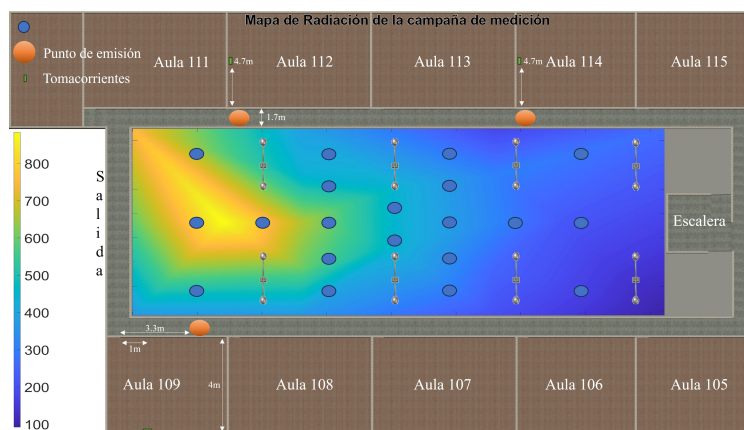


Figura 23. Mapa de radiación dentro del espacio analizado.

De la Figura 23 se puede analizar que el punto de mayor radiación no se encuentra en el centro del recinto como se predijo en el documento de la preparación, por lo que es muy probable que la antena de mayor aportación se encuentre en una dirección ligeramente distinta. Así mismo, se puede observar una coherencia en los datos recopilados ya que no existen inconsistencias dentro de la gráfica ni datos que se alejen del resultado esperado, por lo que se puede concluir que el equipo registra correctamente los datos de intensidad de campo eléctrico y cumple exitosamente

con su función.

5. Informe Técnico

5.1. Ubicación de la campaña de medición

En la Figura 1 se presenta la ubicación geográfica del edificio.

Ubicación		Coordenadas Geográficas							Fecha de medición
Ciudad	Dirección	LAT N			LON W			ALT	
		D	M	S	D	M	S	msnm	
Bucaramanga	UIS	7	8	28.197	73	7	21.915	959	17/11/2023

Tabla 1

Ubicación de la campaña de medición.

5.2. Límites de exposición seleccionados

En la Tabla 2 a continuación, se establecen los límites de exposición poblacional y ocupacional para las frecuencias de las tres antenas seleccionadas, así como los niveles de decisión para la campaña.

Límites de campo eléctrico para las antenas seleccionadas			
Límite	Intensidad de Campo Eléctrico (V/m)		
	430MHz	470MHz	915MHz
Poblacional	28.51	29.8	41.59
Ocupacional	62.2	65.03	90.74
Nivel de decisión	14.25	14.9	20.79

Tabla 2

Valores máximos para la campaña de medición.

5.3. Medición en banda ancha

A continuación se mostrarán los resultados de la campaña de medición, utilizando los parámetros establecidos en las secciones anteriores.

Límites poblacionales Intensidad de Campo Eléctrico							
Punto de Medición	Valor promedio (mV/m)	Frecuencia 430MHz		Frecuencia 470MHz		Frecuencia 915MHz	
		Límite Poblacional (V/m)	Porcentaje respecto al límite (%)	Límite Poblacional (V/m)	Porcentaje respecto al límite (%)	Límite Poblacional (V/m)	Porcentaje respecto al límite (%)
1	175.65	28.51	0.61	29.8	0.58	41.59	0.42
2	262.36		0.92		0.88		0.63
3	91.8		0.32		0.3		0.22
4	220.42		0.77		0.73		0.52
5	315.7		1.1		1.05		0.75
6	306.31		1.07		1.02		0.73
7	182.7		0.64		0.61		0.43
8	248.48		0.87		0.83		0.59
9	203.08		0.71		0.68		0.48
10	448.18		1.57		1.5		1.07
11	444.88		1.56		1.49		1.06
12	662.13		2.32		2.22		1.59
13	437.65		1.53		1.46		1.05
14	381.86		1.33		1.28		0.91
15	600.97		2.1		2.01		1.44
16	359.46		1.26		1.2		0.86
17	890.05		3.12		2.98		2.14
18	591.89		2.07		1.98		1.42
19	753.35		2.64		2.52		1.81
20	370.63		1.3		1.24		0.89

Tabla 3
 Tabla de comparación entre frecuencias respecto al límite poblacional.

Límites ocupacionales Intensidad de Campo Eléctrico							
Punto de Medición	Valor promedio (mV/m)	Frecuencia 430MHz		Frecuencia 470MHz		Frecuencia 915MHz	
		Límite Poblacional (V/m)	Porcentaje respecto al límite (%)	Límite Poblacional (V/m)	Porcentaje respecto al límite (%)	Límite Poblacional (V/m)	Porcentaje respecto al límite (%)
1	175.65	62.2	0.28	65.03	0.27	90.74	0.19
2	262.36		0.42		0.403		0.28
3	91.8		0.14		0.14		0.1
4	220.42		0.35		0.33		0.24
5	315.7		0.5		0.48		0.34
6	306.31		0.49		0.47		0.33
7	182.7		0.29		0.28		0.2
8	248.48		0.39		0.38		0.27
9	203.08		0.32		0.31		0.22
10	448.18		0.72		0.68		0.49
11	444.88		0.71		0.68		0.49
12	662.13		1.06		1.01		0.72
13	437.65		0.7		0.67		0.48
14	381.86		0.61		0.58		0.42
15	600.97		0.96		0.92		0.66
16	359.46		0.57		0.55		0.39
17	890.05		1.43		1.36		0.98
18	591.89		0.95		0.91		0.65
19	753.35		1.21		1.15		0.83
20	370.63		0.59		0.56		0.4

Tabla 4
 Tabla de comparación entre frecuencias respecto al límite ocupacional.

En las Tablas 3 y 4 se presentan los resultados de la intensidad de campo eléctrico registrado

en cada punto de medición, comparándolos con los límites de zonas poblacional y ocupacional respectivamente respecto a las antenas direccionales de estudio, de igual forma en la Tabla 5 se presenta la comparación con el nivel de decisión. Los valores máximos aparecen resaltados de color naranja para cada una de las antenas y zonas de exposición.

Nivel de decisión Intensidad de Campo Eléctrico							
Punto de Medición	Valor promedio (mV/m)	Frecuencia 430MHz		Frecuencia 470MHz		Frecuencia 915MHz	
		Límite Poblacional (V/m)	Porcentaje respecto al límite (%)	Límite Poblacional (V/m)	Porcentaje respecto al límite (%)	Límite Poblacional (V/m)	Porcentaje respecto al límite (%)
1	175.65	14.25	1.22	14.9	1.16	20.79	0.84
2	262.36		1.84		1.76		1.26
3	91.8		0.64		0.6		0.44
4	220.42		1.54		1.46		1.04
5	315.7		2.2		2.1		1.5
6	306.31		2.14		2.04		1.46
7	182.7		1.28		1.22		0.86
8	248.48		1.74		1.66		1.18
9	203.08		1.42		1.36		0.96
10	448.18		3.14		3		2.14
11	444.88		3.16		2.98		2.12
12	662.13		4.64		4.44		3.18
13	437.65		3.06		2.92		2.1
14	381.86		2.66		2.56		1.81
15	600.97		4.2		4.02		2.88
16	359.46		2.52		2.4		1.72
17	890.05		6.24		5.96		4.28
18	591.89		4.14		3.96		2.84
19	753.35		5.28		5.04		3.62
20	370.63		2.6		2.48		1.78

Tabla 5
 Tabla de comparación entre frecuencias respecto al Nivel de decisión.

5.4. Delimitación de las zonas en el espacio de medición

En la Tabla 6 se puede observar las coordenadas geográficas así como la intensidad de campo eléctrico máxima y promedio de los puntos de medición respecto a la zona de medición. La ubicación de los sitios de medición y emisión se ubicaron dentro de un plano representativo mostrado en la Figura 24.

Mediciones en Banda Ancha									
Pto	Latitud N			Longitud W			E (mV/m)		Observación
	GG	MM	SS	GG	MM	SS	MAX	AVG	
1							196.78	175.65	Zona poblacional
2	7	8	23.652	73	7	21.072	273.5	262.36	Zona poblacional
3	7	8	28.830	73	7	22.932	103.42	91.8	Zona poblacional
4	7	8	27.816	73	7	22.698	249.96	220.42	Zona poblacional
5	7	8	27.870	73	7	22.614	335.08	315.7	Zona poblacional
6	7	8	27.978	73	7	22.554	342.66	306.31	Zona poblacional
7	7	8	28.056	73	7	22.662	213.55	182.7	Zona poblacional
8							271.85	248.48	Zona poblacional
9	7	8	26.970	73	7	22.350	219.04	203.08	Zona poblacional
10	7	8	27.570	73	7	22.446	457.35	448.18	Zona poblacional
11	7	8	27.684	73	7	22.662	492.88	444.88	Zona poblacional
12	7	8	27.756	73	7	22.788	672.25	662.13	Zona poblacional
13	7	8	27.840	73	7	22.800	495.33	437.65	Zona poblacional
14	7	8	27.834	73	7	22.578	407.72	381.86	Zona poblacional
15	7	8	27.714	73	7	22.782	630.91	600.97	Zona poblacional
16	7	8	28.044	73	7	22.806	399.55	359.46	Zona poblacional
17	7	8	27.690	73	7	22.656	936.69	890.05	Zona poblacional
18	7	8	27.858	73	7	22.908	618.54	591.89	Zona poblacional
19	7	8	27.636	73	7	22.542	800.93	753.35	Zona poblacional
20	7	8	27.942	73	7	23.568	455.13	370.63	Zona poblacional

Tabla 6
Ubicación de los puntos de medición.

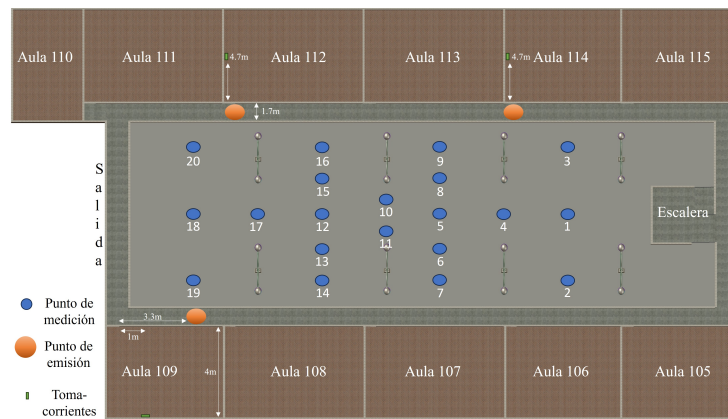


Figura 24. Plano representativo de puntos de emisión y medición.

6. Actualización de la norma

En el presente capítulo se revisa la actualización de la normativa colombiana realizada el 31 de octubre de 2023 a través de una medición a una antena 5G analizando la frecuencia de transmisión de 2.666GHz. Esta modificación de la norma cambia en parte los límites de exposición, elimina

el nivel de decisión y además de esto ahora es posible realizar únicamente un análisis en banda angosta que pasa a llamarse banda selectiva.

Tabla 1 - Límites máximos de exposición

Escenario de exposición	Rango de frecuencias	Intensidad de campo E incidente; E_{inc} ($V m^{-1}$)	Intensidad de campo H incidente; H_{inc} ($A m^{-1}$)	Densidad de Potencia Incidente; S_{inc} ($W m^{-2}$)
Ocupacional	0.1 – 30 MHz	$660/f_m^{0.7}$	$4.9/f_m$	NA
	>30 – 400 MHz	61	0.16	10
	>400 – 2000 MHz	$3f_m^{0.5}$	$0.008f_m^{0.5}$	$f_m/40$
	>2 – 300 GHz	NA	NA	50
Público en general	0.1 – 30 MHz	$300/f_m^{0.7}$	$2.2/f_m$	NA
	>30 – 400 MHz	27.7	0.073	2
	>400 – 2000 MHz	$1.375f_m^{0.5}$	$0.0037f_m^{0.5}$	$f_m/200$
	>2 – 300 GHz	NA	NA	10

(a)

Tabla 5 - Especificaciones del ICNIRP 2020 sobre magnitudes físicas para diferentes bandas y regiones para validar el cumplimiento de los límites

Frecuencia	Región de campo lejano	Región radiante de campo cercano	Región reactiva de campo cercano
100 KHz- 30 MHz	E_{inc} y H_{inc} (medir las dos magnitudes) no deben superar los límites respectivos de la Tabla 1.		
30 MHz – 2GHz	S_{inc} , E_{inc} o H_{inc} (medir cualquiera de las magnitudes) no deben superar los límites respectivos de la Tabla 1.	S_{inc} no debe superar el límite respectivo de la Tabla 1.	Tanto E_{inc} como H_{inc} (medir las dos magnitudes) no deben superar los límites respectivos de la Tabla 1.
		Tanto E_{inc} como H_{inc} (medir las dos magnitudes) no deben superar los límites respectivos de la Tabla 1.	
2 GHz – 300 GHz	S_{inc} no debe superar el límite respectivo de la Tabla 1. Se puede medir cualquiera de las magnitudes, E_{inc} o H_{inc} y calcular S_{inc} a partir de estas.	S_{inc} no debe superar el límite respectivo de la Tabla 1. Se debe medir las magnitudes E_{inc} y H_{inc} y calcular S_{inc} a partir de estas.	No aplican mediciones de E_{inc} , H_{inc} ni S_{inc} , en condiciones normales de instalación no debe haber personas en esta región.

(b)

Figura 25. Cambios más significativos para la normativa.

En las Figuras 25(a) y 25(b) se pueden observar los cambios que existen de los límites máximos de exposición y las especificaciones para la medición en diferentes bandas de frecuencias. Los más significativos entre estas variaciones son la eliminación de límite alguno a partir de 2GHz y la implementación de las especificaciones sobre las magnitudes para medir en la región reactiva de campo cercano, región radiante de campo cercano y campo lejano.

Este escenario de medición se realiza en campo lejano y a una frecuencia entre 2GHz y 300GHz, por lo cual no aplica ningún límite para intensidad en campo eléctrico ni magnético, sin embargo es necesario cumplir con la densidad de potencia incidente. Para esto la norma recomienda medir campo eléctrico o magnético, y a partir de estas calcular la densidad, sin embargo, el analizador de espectros facilita estos cálculos al incluir dentro de los resultados de medición

el cálculo de la densidad de potencia accediendo a través del software Instrument View como se muestra en la Figura 26(a).

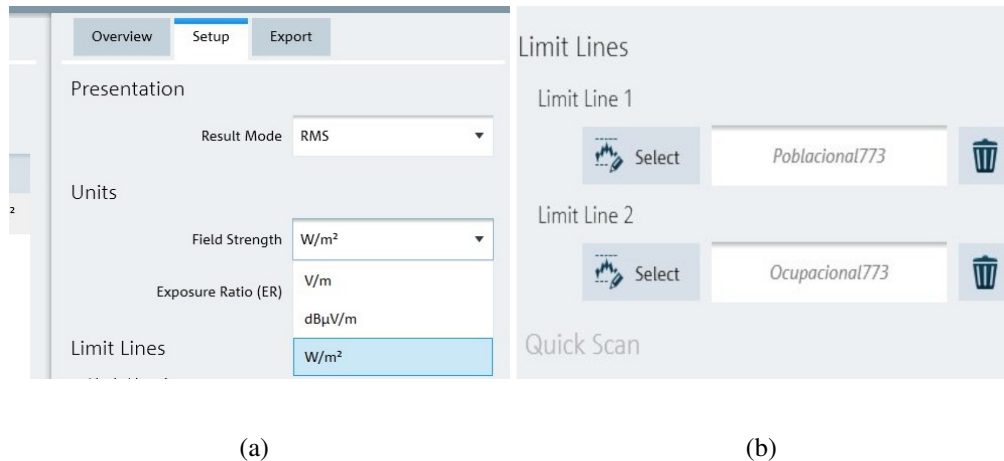


Figura 26. Cambios realizados en el Software Instrument View.

De igual forma, en la Figura 26(b) se evidencia que se están utilizando los límites establecidos para intensidad de campo eléctrico por la actualización de la norma el cual, como se dijo previamente, no aplica para este rango de frecuencias. De igual forma que en la campaña de medición, se realizó un mapa representativo de la zona a medir el cual se encuentra a en la Figura 27.

Como se puede apreciar, todos los puntos de medición se encuentran dentro de la universidad, esto es debido a que es necesario pedir varios permisos a la universidad para medir libremente alrededor de la antena. Se tomaron igualmente los veinte puntos de medición establecidos en la metodología, esta vez sin organizar las antenas hacia el azimut de la antena, pues tiene un recubrimiento que no permite reconocer su dirección de transmisión como se ve en la Figura 28.

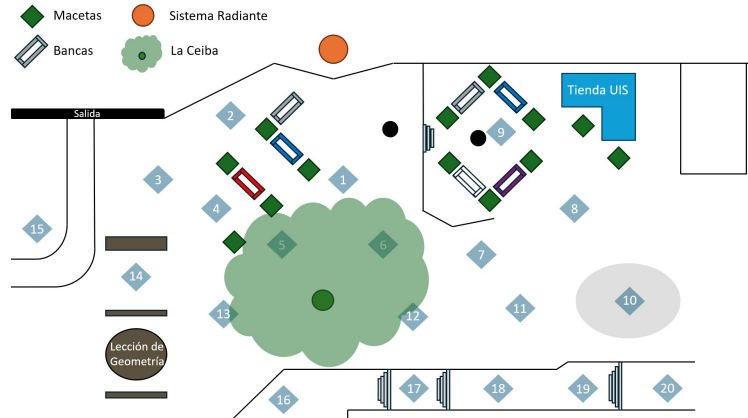


Figura 27. Diagrama representativo medición con antena 5G.

Para conocer la frecuencia de transmisión de la antena se dejó el analizador de espectros midiendo sin programa durante unos minutos, observando los picos más estables y de mayor intensidad de campo. Con estos datos se programó un set en el Instrument View que pudiera captar la totalidad de la señal.



Figura 28. Antena 5G.



(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

Figura 29. Puntos de medición de antena 5G.

Esta campaña de medición se realizó el Viernes 5 de abril de 2024, las Figuras 29(a), 29(b), 29(c), 29(d) y 29(e) hacen parte del registro fotográfico que se llevó a cabo durante esta etapa. Posteriormente, se analizaron los datos, extrayendo del Instrument View tanto la intensidad de campo eléctrico como la densidad de potencia para verificar el cumplimiento de la normativa.

Punto de medición	Intensidad de E (mV/m)	Densidad de potencia S ($\mu\text{W}/\text{m}^2$)	Porcentaje respecto al límite S (W/m^2)
1	96.93	24.94	0.004988%
2	128.07	43.54	0.008708%
3	117.26	36.5	0.007300%
4	86.3	19.77	0.003954%
5	95.41	24.16	0.004832%
6	97.8	25.39	0.005078%
7	70.68	13.26	0.002652%
8	98.43	25.72	0.005144%
9	99.21	26.13	0.005226%
10	64.53	11.05	0.002210%
11	67.06	11.94	0.002388%
12	93.28	23.1	0.004620%
13	79.29	16.69	0.003338%
14	98.93	25.98	0.005196%
15	74.74	14.83	0.002966%
16	63.87	10.83	0.002166%
17	157.48	65.83	0.013166%
18	234.13	145.5	0.029100%
19	250.5	166.57	0.033314%
20	96.04	24.49	0.004898%

Figura 30. Tabla con los resultados de las mediciones.

En la Figura 30 se puede observar los resultados de las mediciones realizadas. La antena cumple a cabalidad con la normativa, teniendo valores de intensidad de campo eléctrico y densidad de potencia bastante bajos, pues el límite para la densidad de potencia se encuentra en $50 \text{ W}/\text{m}^2$ y, por el contrario, en los cálculos se muestra en el orden de los $\mu\text{W}/\text{m}^2$. Esto puede deberse a la orientación de la antena, pues es posible que el azimut se encuentre en dirección opuesta a la universidad. Sin embargo podemos ver que existen ciertas zonas, sobretodo las más elevadas, en las cuales existe una intensidad de campo ligeramente mayor, lo que es posible a través de rebotes

de la señal entre los edificios aledaños.

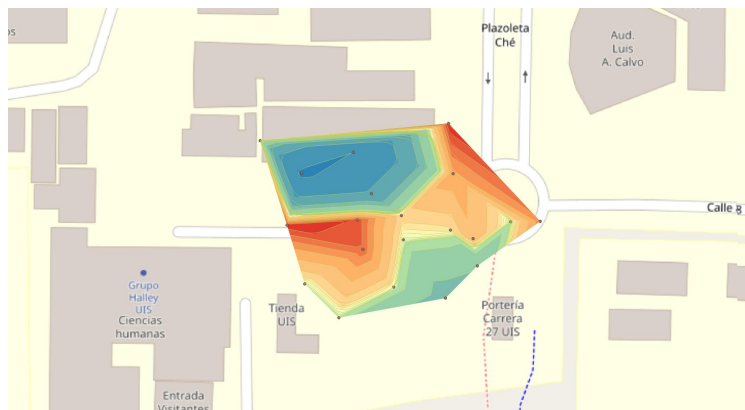


Figura 31. Mapa realizado en QGIS.

En la Figura 31 se puede observar un mapa de radiación realizado mediante el Software QGIS, en este se muestra claramente los puntos de mayor intensidad de campo eléctrico registrados en la medición. Para esta campaña se pudo utilizar este programa, pues el GPS estaba a cielo abierto, es decir, que podía registrar correcta y precisamente la ubicación del dispositivo, a diferencia del anterior, en donde se tenía un domo encima del espacio designado para la recolección de datos.

Con estas mediciones podemos observar claramente los cambios que tuvo la normativa colombiana, sin embargo, al ser muy recientes no se pudo incluir dentro de la metodología ni el manual, por tanto es necesario realizar un proyecto que lo actualice y permita estar acorde con la

normativa vigente.

7. Recomendaciones

- I Dentro de la campaña de medición, se observó que los datos en banda ancha no eran del todo precisos, esto debido al tipo de barrido que realiza el equipo, por esto, se recomienda ajustar el span en el software para abarcar mejor el rango de frecuencias establecido y de esta forma realizar más medidas.
- II El mapa de radiación presentado en el actual documento es un algoritmo relativamente básico que permite visualizar los puntos de mayor intensidad de campo eléctrico con las medidas del espacio de medición, por lo cual es importante desarrollar un sistema que permita visualizar mapas de radiación de forma sencilla y eficiente.
- III Para la norma, en una campaña de medición se deberán tener consideraciones de seguridad, observando los potenciales riesgos no relacionados con la práctica que se está realizando como alta tensión, riesgo de caídas o similares, y de esta forma tomando precauciones, priorizando la seguridad del operario y el equipo.
- IV Este manual se realizó enfocado hacia el analizador de espectros R&S FSH20, por eso, es necesario un estudio de mayor profundidad del comportamiento del dispositivo midiendo la intensidad de campo eléctrico respecto a la distancia entre el equipo receptor y las antenas. De el estudio mencionado es posible realizar un modelo predictivo que permita estimar los datos tomados frente a una fuente conocida.

8. Trabajo futuro

El presente trabajo de grado tuvo como base la resolución 774 de 2018, lo cual influyó en el diseño del proyecto y por tanto en algunos apartados del mismo. Sin embargo, en diciembre del año 2023 se realizaron cambios a la norma que transformaron los límites de exposición máximo, eliminó el nivel de decisión y permitió medir únicamente en banda angosta, ahora llamada banda selectiva, entre otros.

Esto facilita la medición con en analizador de espectros y permite omitir algunos apartados del presente documento, por lo cual se debe realizar una revisión exhaustiva de la normativa ahora vigente y aplicar los cambios al proyecto.

9. Conclusiones

A partir de los desarrollos presentados y los resultados obtenidos en el presente trabajo de grado, es posible enunciar la siguiente conclusión general:

Se desarrolló una metodología de medición de radiación no ionizante para el analizador de espectros R& S PR200. A partir de este, fue posible realizar una campaña de medición que permitiera visualizar la intensidad de campo eléctrico en un espacio determinado. Según lo anterior, se pudo valorar la eficacia y relevancia del manual para un entorno práctico controlado, comprobando la validez de los lineamientos estipulados en el documento.

De manera más puntual:

Al analizar los datos adquiridos en la campaña de medición en banda ancha, se puede observar que un span de 100MHz genera una toma de medidas poco precisas y en ocasiones puede llegar a perjudicar al nivel de desición para realizar la medición en banda angosta, esto debido a que el dispositivo realiza un barrido con frecuencias específicas con un ancho de banda relativamente bajo.

La preparación previa a la medición desempeña una función fundamental dentro de una campaña de medición, pues permite al operador tener una claridad visual y espacial sobre los lugares de medición y en este caso emisión. Esto reafirma la metodología al considerar necesario una planificación de materiales y procedimiento en campo que permite el buen desarrollo de la campaña.

Se implementó un mapa de radiación a partir de los datos recolectados en campo con un algoritmo en Matlab, en la cual, la ubicación de los puntos fue dada por las distancias tomadas dentro del recinto. Este algoritmo logró ser eficaz al momento de realizar un análisis gráfico de la intensidad de campo eléctrico, confirmando el correcto funcionamiento de los procedimientos descritos en el manual de medición.

Los datos en banda angosta son coherentes en cada punto, evidenciando la concentración de intensidad de campo en la dirección de las antenas, esto permite verificar el correcto procedimiento realizado y por tanto la metodología implementada, dando cumplimiento a cada sección planteada por el manual de medición.

La campaña de medición efectuada permite comprobar la metodología planteada, siendo capaz de registrar correctamente la intensidad de campo eléctrico del espacio de medición, comparando los datos con el nivel de decisión y los límites establecidos por la normativa colombiana.

Referencias Bibliográficas

- Agencia Nacional del Espectro (ANE) (2018). Resolución 774 de 2018. https://normograma.mintic.gov.co/mintic/docs/resolucion_ane_0774_2018.htm. Published: 2018-09-29.
- Comisión Nacional de Comunicaciones (2004). Resolución 3690/2004. https://www.enacom.gov.ar/multimedia/normativas/2004/Resolucion%203690_04%20CNC.pdf. Published: 2004-11-10.
- Ecoquimsa Laboratorio Ecológico y Químico (2011). Protocolo de medición para radiaciones no ionizantes en subestaciones y líneas de transmisión de energía eléctrica en Guatemala. <https://static1.squarespace.com/static/60ee5f1d1975912dcfd14233/t/60f9d2dda30b84102e7740a3/1626985182539/Protocolo+de+Medici%C3%B3n.pdf>. Published: 2011-01-01.
- Instituto Federal de Telecomunicaciones México (2020). Disposición técnica ift-007-2019. https://www.enacom.gov.ar/multimedia/normativas/2004/Resolucion%203690_04%20CNC.pdf. Published: 2020-02-25.
- INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION e.V (2020). Recomendaciones para limitar la exposición a campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos (hasta 300 ghz). <https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPemfgd1esp.pdf>. Published: 2020-03-15.

Ministerio de Energía y Minas Guatemala (2019). Protocolo de mediciones para radiaciones no ionizantes en estaciones de telefonía móvil celular. <https://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2019/11/PROTOCOLO-TELEFON%C3%8DA-CELULAR-M%C3%93VIL.pdf>. Published: 2019-11-01.

Rohde & Schwarz InstrumentView Software Manual (2023). https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/pdm/cl_manuals/user_manual/1321_1040_01/InstrumentView_Manual_en_20.pdf. Visited: 2023-11-15.

R&STS-EMF portable EMF measurement system (2023). https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/pdm/cl_brochures_and_datasheets/specifications/3608_9918_22/TS-EMF_datsw_en_3608-9918-22_v0300.pdf. Visited: 2023-12-12.

Unidad Reguladora de Servicios de Comunicaciones Uruguay (2020). Limitación de la exposición a campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos en frecuencias del espectro radioeléctrico. <https://www.gub.uy/unidad-reguladora-servicios-comunicaciones/sites/unidad-reguladora-servicios-comunicaciones/files/2020-02/0388%20-%20Proyecto%20Reglamento%20Rni.pdf>. Published: 2020-01-01.

Apéndices

Apéndice A. Manual de medición de Radiación no ionizante

9.1. Implementos de medición

Para realizar una campaña de medición se deberán utilizar los siguientes equipos:

Analizador de espectros R&S FSH20 del fabricante Rohde & Schwarz:



Figura 32. Analizador de espectros R&S FSH20.

Además, se requiere contar con antenas que sean compatibles con el equipo y capaces de operar en un espectro de frecuencias de telecomunicaciones comerciales. La primera de ellas presentada en la Figura 33(a) a continuación es la R&S TSEMF B1, la cual tiene un rango de frecuencias entre 30MHz a 3GHz , lo que permite medir correctamente desde las frecuencias de radio

FM. La segunda antena es la R&S TSEMF B2, que cuenta con un rango entre 700MHz y 6GHz teniendo una capacidad de medición en las bandas de telefonía móvil. Esta antena representada en la Figura 33(b) es la que se utilizará en las campañas de medición dentro del campus universitario.



(a) Antena isotrónica R&S TSEMF B1.

(b) Antena isotrónica R&S TSEMF B2.

Figura 33. Antenas isotrónicas del analizador de espectros.

Por otro lado, tenemos los implementos secundarios que permiten realizar esta medición de forma correcta. Estos son:

- I Trípode a 1.5m de altura para colocar la antena receptora.
- II Equipo de cómputo con el software Instrument View instalado para configurar y recolectar los resultados de medición.
- III GPS conectado al analizador de espectros para georeferenciar el punto de medición.

En la Figura 34 se presentan todos los elementos previamente mencionados para llevar a cabo una campaña de medición adecuada.



Figura 34. Equipo completo para una campaña de medición.

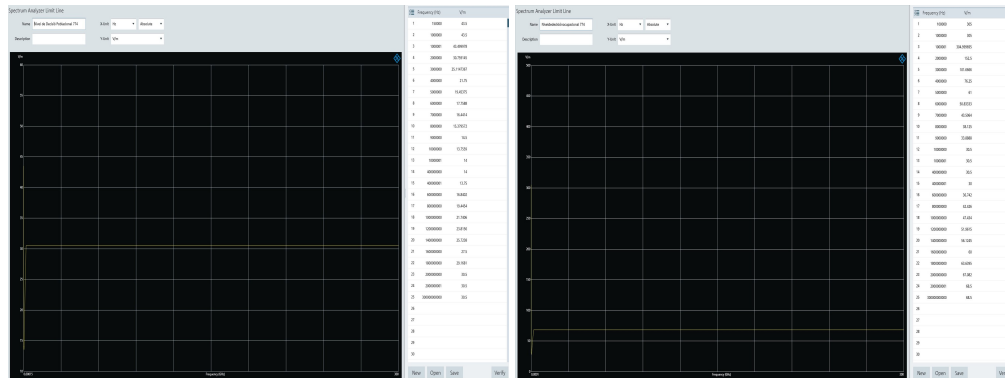
Por último, si el equipo de cómputo no cuenta con una batería capaz de soportar la duración de la campaña se realizan las recomendaciones de cargar el programa al analizador y realizar todas las mediciones guardando los resultados en la memoria del mismo. Adicionalmente, para efectuar una campaña de medición más fluida, se recomienda equipar las dos baterías del analizador con carga máxima y así tener una capacidad mayor para jornadas de alta duración.

9.2. Medición en Banda ancha

En esta sección se utilizará el analizador de espectros y el software Instrument View para realizar una medición en banda ancha que capture todos los picos existentes en el rango de frecuencias de la antena, pudiendo comparar la suma de todos los picos respecto al nivel de decisión.

Para esta primera fase se deberá configurar un archivo que contenga los niveles de decisión

poblacional y ocupacional, y otro que contenga un límite mínimo para la medición de los picos de frecuencia en banda ancha. Se configuran los niveles de decisión desde la opción "Limit lines", colocando los valores al 50% del límite establecido según la normativa vigente (Agencia Nacional del Espectro (ANE)) como se muestra en las Figuras 35(a) y 35(b) a continuación:



(a) Nivel de decisión poblacional según la resolución 774 de 2018. (b) Nivel de decisión ocupacional según la resolución 774 de 2018.

Figura 35. Límites de intensidad de campo eléctrico.

Se crea así mismo un archivo con un límite inferior de $10mV/m$, esto con el fin de capturar todos los picos posibles que sean superiores a este valor de intensidad de campo. Como este límite abarca todo el rango de frecuencias de la antena, simplemente se colocan en la frecuencia inicial y final como se muestra en la Figura 36:

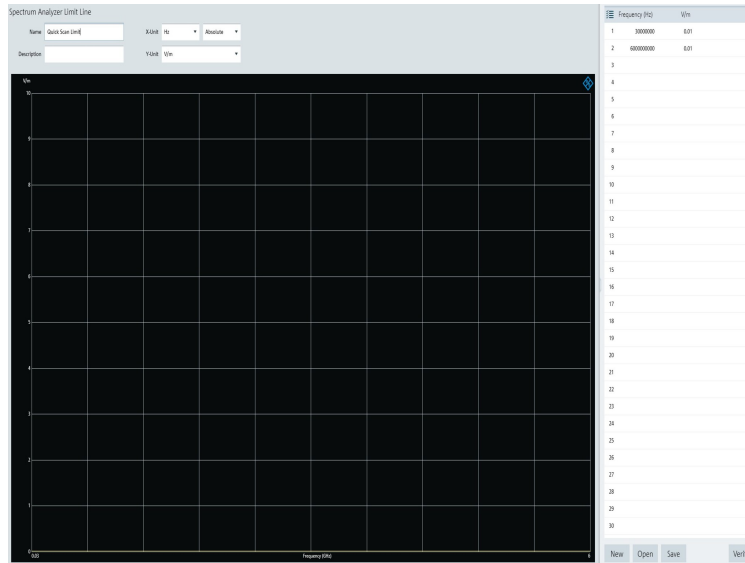
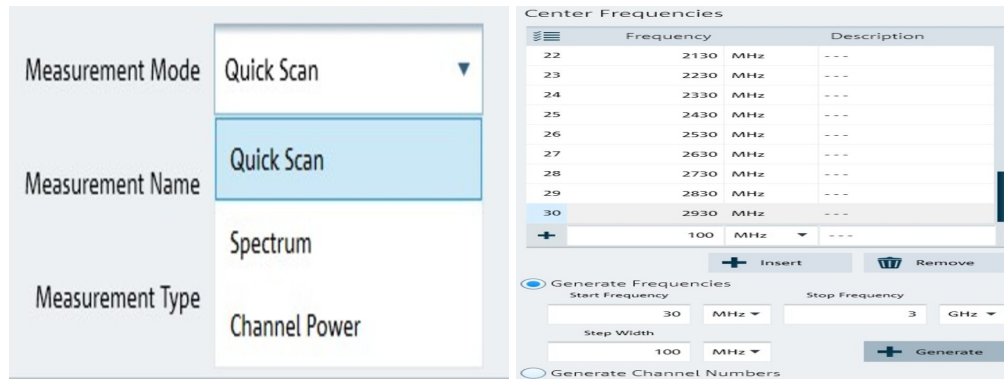


Figura 36. Límite mínimo para el Quick Scan.

Posterior a establecer estos límites se realiza la configuración de la medida en el apartado "EMF Config"(Figura 37(a)) de la pestaña "Preparation". Para realizar una medición en banda ancha se genera el rango de frecuencias desde la opción Generate Frequencies colocando el rango de frecuencias soportado por la antena isotrópica con un span de 100MHz (Figura 37(b)).



(a) Modo de medición Quick Scan.

(b) Rango de frecuencias para medición en banda ancha.

Figura 37. Selección de modo y frecuencias de medición.

Una vez seleccionado el rango de frecuencias se procede a introducir la antena isotrópica en la pestaña "Equipment", como se muestra en la Figura 40(b).

Una vez configurado el tipo de medida, se formula un set haciendo click en la opción "EMF Set" que aparece justo debajo de "EMF Config". En la parte superior de esta sección se encuentra la configuración que establecimos previamente (si esta no aparece puede buscarla seleccionando el símbolo de la carpeta en el extremo superior derecho), la cual se bajará hasta la zona inferior con el botón "Down" o haciendo doble click en la configuración.

Para este set no es necesario modificar tiempo, pues se realiza de forma automática. Sin embargo, es preciso adjuntar los límites que en este caso son los niveles de decisión y el límite inferior del quick scan como se muestra en la Figura 38:

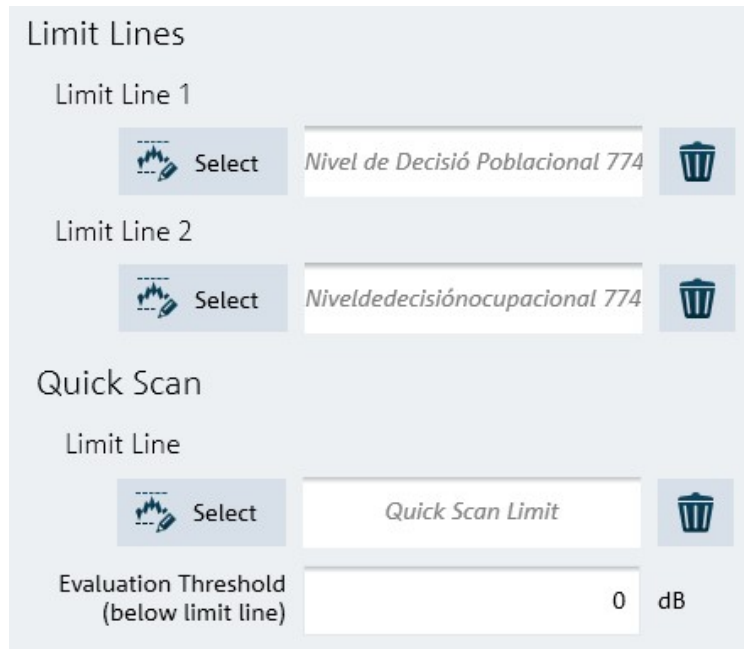


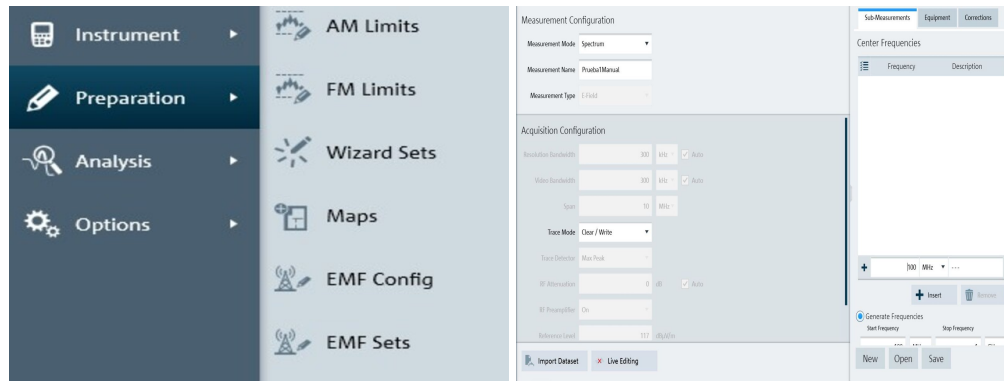
Figura 38. Asignación de límites para el set en banda ancha.

Una vez configurado, se procede a insertar el programa dentro del analizador de espectros y realizar las mediciones correspondientes descritas en próximas secciones.

9.3. Medición en banda angosta

Una vez realizada la medida en banda ancha, si el resultado supera el nivel de decisión se procede a realizar el análisis de banda angosta. Esta medición parte desde las frecuencias que emitan mayor potencia, es decir, los picos que arrojen las mayores aportaciones al nivel de decisión.

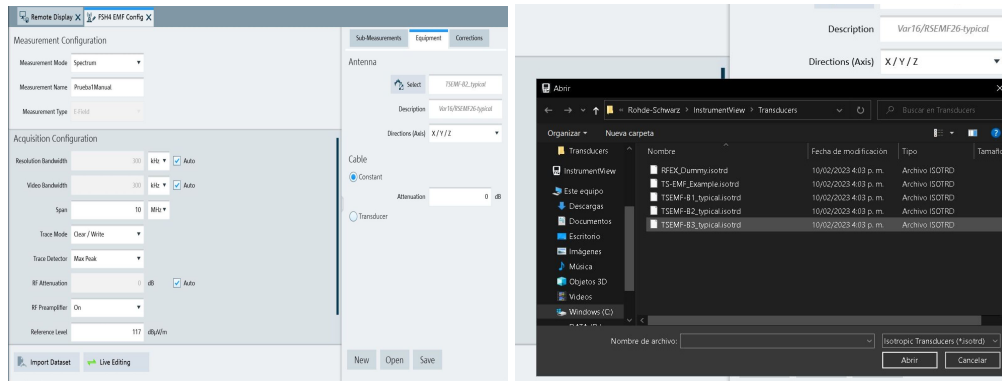
Luego de observar los picos de frecuencia, se configura una toma de medidas en el software Instrument View incluyendo todos los picos encontrados. Dentro de la pestaña "Preparation" del programa se elige la opción "EMF Config" (Vease la Figura 39(a)) eligiendo FSH en la selección de instrumento. En esta pestaña se podrá observar lo siguiente (Figura 39(b)):



(a) Pestaña Preparation del software Instru- (b) Configuración para medición de frecuen-
ment View. cias.

Figura 39. Ruta de acceso a la configuración para la medición de frecuencias.

Se procede a la pestaña "Equipment" para seleccionar la antena que se utilizará (Figura 40(a)), al pulsar "select" se nos abrirá una carpeta con todas las opciones de antena. Para seleccionar una antena isotrópica se debe cambiar el formato de archivo de transductores primarios a transductores isotrópicos. Lo anterior se muestra en la Figura 40(b).



(a) Configuración para medición de frecuencias con "Live Editing" activado. (b) Selección de la antena isotrópica.

Figura 40. Selección de antena en la configuración de toma de datos.

Luego de seleccionar la antena se procede a insertar las frecuencias indicadas por los marcadores en la configuración previa, en este caso serán las siguientes:

Sub-Measurements		Equipment		Corrections	
Center Frequencies					
	Frequency		Description		
1	843	MHz	---		
2	1,74	GHz	---		
3	1,877	GHz	---		
4	2,416	GHz	---		
5	3,585	GHz	---		
6	5,284	GHz	---		
<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> + 5,294 GHz ▼ --- </div>					
<div style="display: flex; justify-content: center; gap: 20px;"> + Insert 🗑️ Remove </div>					

Figura 41. Picos de frecuencia seleccionados.

Con las frecuencias establecidas y la antena determinada se guarda la configuración y se abre la pestaña "EMF Sets" que se encuentra justo debajo de "EMF Config" como se puede ver en la Figura 39(a). En la parte superior de esta sección se encuentra la configuración que establecimos previamente (si esta no aparece puede buscarla seleccionando el símbolo de la carpeta en el extremo superior derecho), la cual se bajará hasta la zona inferior con el botón "Down." haciendo doble click en la configuración.

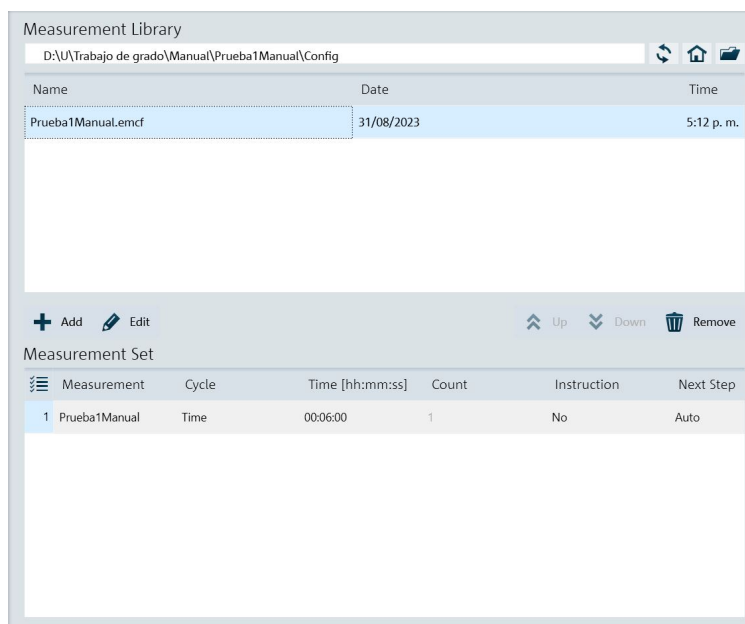


Figura 42. Pestaña EMF Sets.

Una vez abajo, podremos modificar el tiempo de medición por cada frecuencia. Además, se podrán establecer los límites que se desean medir en la opción Limits.

Los límites que se encuentran en el software son de la normativa internacional, sin embargo, se utilizarán las normativas colombianas, por lo que es necesario establecer estos límites. La herramienta Instrument View tiene una opción para esto pulsando la opción "Limit lines" dentro del

ítem preparation. Aquí se puede establecer a mano los límites de exposición según la normativa vigente Agencia Nacional del Espectro (ANE) como se podrá ver en la siguiente Figura 43:

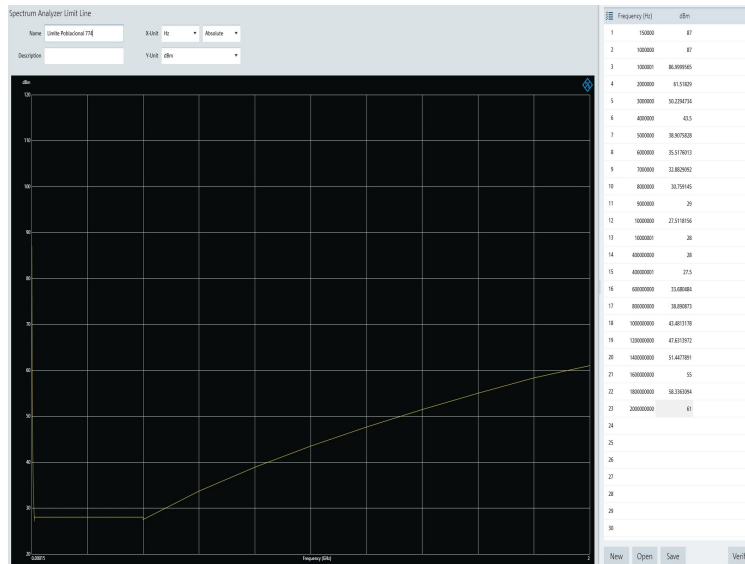
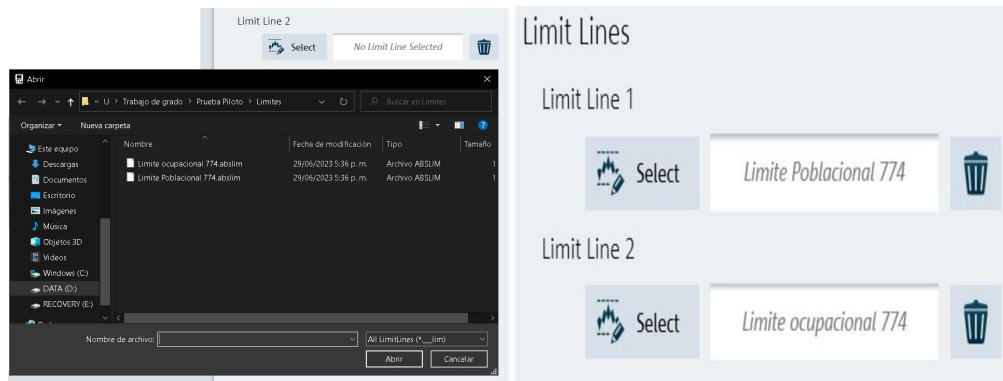


Figura 43. Configuración del límite poblacional según la resolución 774 de 2018.

Luego de establecer y guardar estos límites, se puede acceder a ellos dentro del set seleccionándolos en los espacios determinados como “Limit lines” como se puede ver en la Figura 44(a). Una vez colocados en dichos espacios aparecerán como se muestra en la Figura 44(b)



(a) Selección de límites establecidos.

(b) Límites utilizados en la medición.

Figura 44. Selección de límites poblacional y ocupacional.

Al guardar el set, este se quedará en la memoria del equipo de cómputo, por lo que se deberá realizar un traslado del archivo a través de la opción "File Transfer" desde las opciones del instrumento en Instrument View como se verá en la Figura 45.

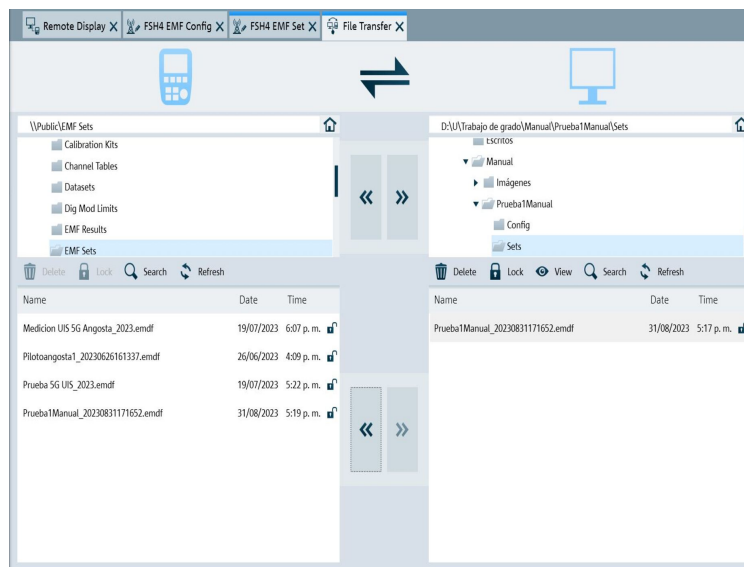
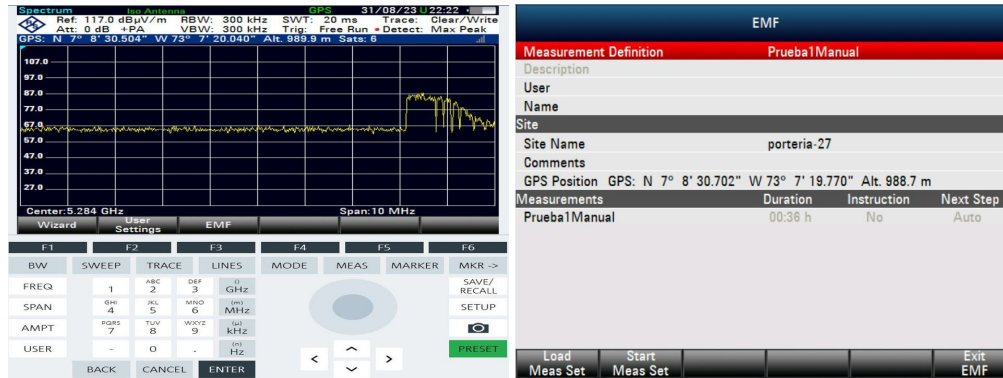


Figura 45. Transferencia del set al analizador de espectros.

Una vez completado este paso el analizador ya tendrá el set en su memoria, para activarlo se tiene que acceder al menú de usuario (Figura 46(a)) y seleccionar EMF, el cual desplegará un menú en pantalla completa. Pulsando "Load Meas Set" se accederá a todos los sets que se tengan en memoria, y se inicia la medición una vez se accione la opción "Start Meas Set" (Figura 46(b)).



(a) Menú de usuario.

(b) Activar el set de medición seleccionado.

Figura 46. Vía de acceso al set en el analizador.

9.4. procedimiento de medición

Para realizar una campaña de medición es necesario tener en cuenta los parámetros esenciales que dictamina la normativa colombiana sobre un buen escenario de comprobación. En primer lugar, se deben obtener por lo menos veinte (20) puntos de medición alrededor de la antena emisora colocando mínimo cinco (5) de ellos en la dirección del acimut del sistema radiante para verificar todo el área de irradiación de la antena. Se debe verificar así mismo que la antena receptora esté a una altura de uno punto cinco metros (1.5m) de altura sobre el nivel del suelo y tener una distancia mínima de dos metros (2m) de espacio libre alrededor Agencia Nacional del Espectro (ANE). Si el punto de medición establecido se encuentra sobre un edificio, se procederá a realizar la medición

a uno punto cinco metros (1.5m) de altura sobre el nivel del edificio.

Por cada punto es necesario tomar una foto del lugar exacto en donde se encuentre el equipo de medición como se muestra en la Figura 47 y posteriormente cargar la medición en banda ancha descrita anteriormente. Una vez termine la primera medición en cada punto, si se determina que la suma de las señales recibidas es superior al nivel de desición se procede a insertar las frecuencias que evidencien las mayores aportaciones en la configuración del software. Una vez se tenga el set, se transfiere al analizador y se carga en este realizando una segunda medición por cada punto.



Figura 47. Adquisición de datos en el analizador.

Para finalizar, en cada una de las mediciones se guarda el informe generado por el set y se migran a una carpeta dentro del equipo de cómputo para ser procesados. Los informes de cada

punto de medición se pueden visualizar abriendo el archivo del resultado pulsando en la opción "Open" del menú principal de Instrument View (Figura 48)

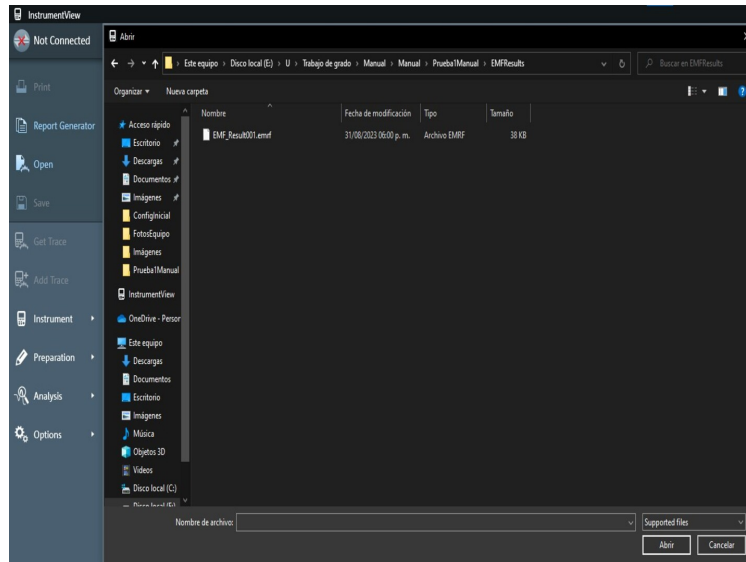


Figura 48. Buscador de resultados de medición.

Este resultado se puede exportar a PDF como se podrá ver a continuación y se divide en dos partes. La primera es una suma del aporte en ganancia de todas las frecuencias seleccionadas como se evidencia en la Figura 49 teniendo como resultado una medición en banda ancha.

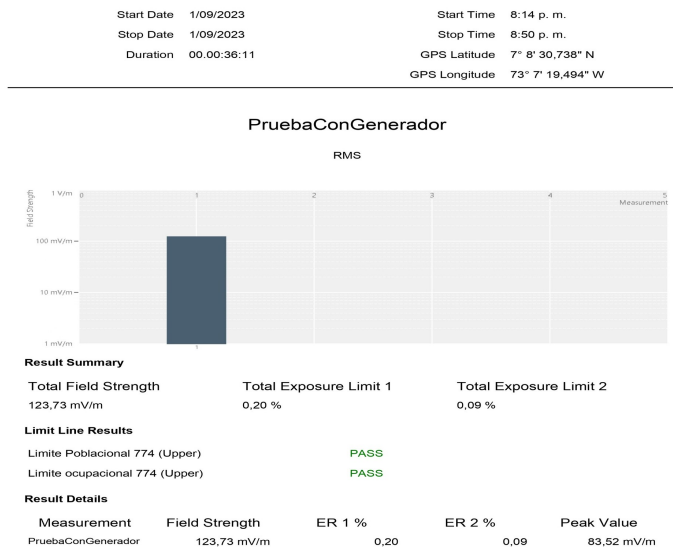


Figura 49. Segunda página del reporte generado.

El resto del informe indicará el aporte individual para cada frecuencia, es decir, un aporte en banda angosta lo que permite obtener un informe más detallado y así mismo realizar las dos fases que indica la reglamentación colombiana. Agencia Nacional del Espectro (ANE)

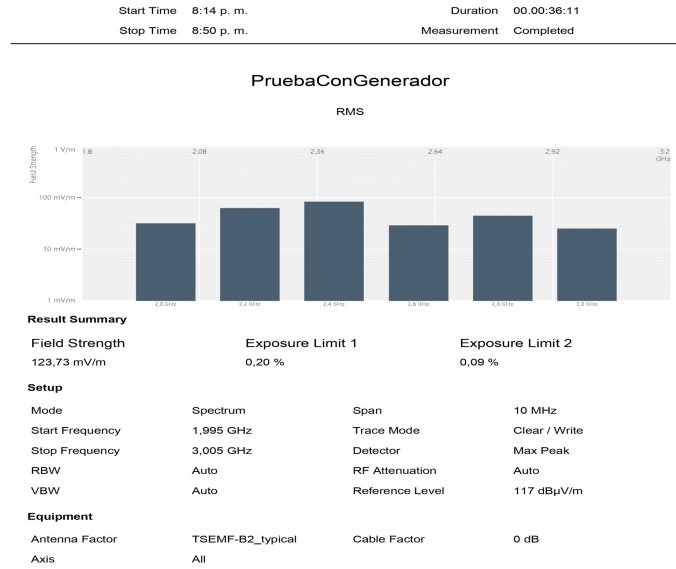


Figura 50. Tercera página del reporte generado.

El informe entrega datos detallados acerca de la ganancia de cada señal, así como su porcentaje de aportación comparando los datos con los límites establecidos (Figura 51), se muestra gráficamente todas las señales generadas y la configuración que se utilizó dentro de la medición.

Antenna Anisotropy		0 dB		Instrument Uncertainty		0 dB	
Result Details							
Frequency	Field Strength	Limit 1 (V/m)	Limit 2 (V/m)	ER 1 %	ER 2 %	Cycles	
2,0000 GHz	31,36 mV/m	61,00	134,16	0,05	0,02	1315	
2,2000 GHz	62,32 mV/m	61,00	137,00	0,10	0,05	1328	
2,4000 GHz	83,52 mV/m	61,00	137,00	0,14	0,06	1314	
2,6000 GHz	28,68 mV/m	61,00	137,00	0,05	0,02	1313	
2,8000 GHz	44,90 mV/m	61,00	137,00	0,07	0,03	1311	
3,0000 GHz	25,07 mV/m	61,00	137,00	0,04	0,02	1319	

Figura 51. Cuarta página del reporte generado.

9.5. Formalización del informe de medición

Para complementar el procedimiento de medición, es necesario generar un informe técnico que contenga el resultado del mismo, incluyendo un diagrama con la ubicación de los puntos de medición y las antenas radiantes. Además de esto, se deben adjuntar al documento mínimo 5 fotografías de los puntos de medición, además de otra fotografía con el punto de mayor exposición a campos electromagnéticos. Se recomienda hacer un croquis con el nivel de todos los puntos dentro del diagrama de ubicación para obtener una referencia visual esclarecedora (Unidad Reguladora de Servicios de Comunicaciones Uruguay, 2020).

Por otra parte, para dejar una constancia de la medición, es recomendable adjuntar una tabla con los valores medidos, las características de los instrumentos de medición y la fecha y hora en la cual se realizó la campaña.

Apéndice B. Generación de Heatmap a través de código en MATLAB

```
1 % Supongamos que 'x' y 'y' son las coordenadas de los puntos y 'z' es el
   valor en esos puntos
2 y = [7.35, 3.5, 11.2, 7.35, 7.35, 5.4, 3.5, 9.275, 11.2, 8.40, 5.95, 7.35,
   5.4, 3.5, 9.275, 11.2, 7.35, 7.35, 3.5, 11.2]; % Posición en X
3 x = [20.45, 20.45, 20.45, 17.3, 15.2, 15.2, 15.2, 15.2, 15.2, 12.05,
   12.05, 9.25, 9.25, 9.25, 9.25, 9.25, 6.8, 4, 4, 4 ]; % Posición en Y
4 z = [175.65, 262.36, 91.8, 220.42, 315.7, 306.31, 182.7, 248.48, 203.08,
   448.18, 444.88, 662.13, 437.65, 381.86, 600.97, 359.46, 890.05, 591.89,
   753.35, 370.63]; % Intensidad de campo medida
5
6 % Matriz de malla a partir de los datos
7 [X, Y] = meshgrid(linspace(min(x), max(x), 100), linspace(min(y), max(y),
   100));
8
9 %Interpolar datos
10 Z = griddata(x, y, z, X, Y);
11
12 % Suavizar datos interpolados
13 Z_smooth = interp2(Z,3);
14
15 % Función mapa de calor
16 imagesc(X(1,:), Y(:,1), Z_smooth);
17
18 % Color Bar
```

```
19 colorbar ;  
20  
21 % Título  
22 title('Mapa de Radiación de la campaña de medición','FontSize', 24);
```

Código 9.1. Código utilizado para generar el Heatmap

En el Código 23 se evidencia la implementación del Heatmap. Este código se implementó en el software Matlab, el cual permite registrar todos los datos para interpolarlos, hacer un suavizado para luego representarlos gráficamente en un mapa dividido por colores.

Sin embargo, este mapa no contiene la información sobre las ubicaciones exactas de los puntos, por lo que se utilizó la herramienta de edición de imágenes GIMP para incluir el mapa de radiación sobre la disposición realizada en la preparación previa, de esta forma podremos ver con exactitud los puntos sobre los cuales la intensidad de campo eléctrico, y por tanto cantidad de radiación no ionizante, es mayor.