



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**CONSIDERACIONES PARA REALIZAR UN ANALISIS DE  
COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNETICA EN UNA  
PLATAFORMA SATELITAL**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO ELECTRICO ELECTRONICO**

**PRESENTA:**

**HERNANDEZ FLORES GERARDO ABRAHAM**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**DR. CARLOS ROMO FUENTES**



**CIUDAD UNIVERSITARIA, MEXICO D. F. 2015**



---

## Agradecimientos.

La primera persona a la que quiero agradecer es la mas importante, ella ha soportado todas mis locuras a lo largo de mi vida (más desde que ingresé a la preparatoria), me dado su apoyo casi incondicional en las buenas y en las malas, es la persona que más admiro por su esfuerzo, perseverancia, compromiso, paciencia y sobre todo, su amor. Sus consejos y regaños me han guiado e inspirado a ser una mejor persona. Gracias por ser mi guía, mi amiga y sobre todo, *mi mamá*, siempre estaré agradecido por darme la oportunidad de concluir la licenciatura.

A mi familia; mis abuelos por abrirme las puertas de su casa y dejarme vivir en ella.

A mis hermanas por su apoyo y regaños que me sirvieron para acabar la carrera, a mi hermano "postizo", *Ramón*, que fue una influencia para que yo me interesara en la ingeniería. A mis tí@s los cuales siempre me han apoyado y hecho reír, les tengo una gran admiración.

A mis amigos de la Universidad que viven por mis rumbos, que fueron cómplices de todos esos momentos de "sana" diversión, siempre que los recordamos no pueden faltar las carcajadas.

A todos mis amig@s que conformaron *Shaq's*, la mayoría de ellos ingresamos en el mismo grupo en el primer semestre de la carrera, conocí y aprendí muchas cosas de ellos y disputamos muchos momentos.

A mi asesor de tesis, el Dr. Carlos Romo Fuentes, por su paciencia, sus enseñanzas, su apoyo, sus consejos y su tiempo los cuales me han ayudado mucho en mi formación como ingeniero.

Al equipo que forma el Centro de Alta Tecnología (CIA) por sus platicas y consejos, es un gran equipo de trabajo.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) con código *IT101514, Satélite para detección de contaminantes atmosféricos Quetzal MIT-UNAM/FASE 2.*

Al proyecto CONACYT (*Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología*) con código 205012, *Laboratorio de Compatibilidad Electromagnética.*

Al proyecto CONACYT con código 232660, *Laboratorio Nacional de Ingeniería Espacial y Automotriz.*

Al proyecto CONACYT con código 247663, *Desarrollo de la plataforma satelital Quetzal para monitoreo de la columna de gases contaminantes y la observación del territorio nacional.*

A la Facultad de Ingeniería (junto con todos los profesores que me dieron clases) y también a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por haberme dado la oportunidad de estudiar y formarme como ingeniero.

---

*soy otro cuando soy, los actos míos  
son más míos si son también de todos,  
para que pueda ser he de ser otro,  
salir de mí, buscarme entre los otros,  
los otros que no son si yo no existo,  
los otros que me dan plena existencia,  
no soy, no hay yo,  
siempre somos nosotros...*

***Fragmento del Poema Piedra de Sol.***

***Octavio Paz.***

---

|  | <b>PAG</b>  |
|--|-------------|
| <b>INDICE.</b>   | <b>III</b>  |
| <b>Introducción.</b>   | <b>VIII</b> |
| <b>Capítulo 1.</b>   |             |
| Caso Previo, Servicio Social. Antecedentes y primeras Impresiones sobre la Compatibilidad Electromagnética | <b>1</b>    |
| 1.1 Entorno EMC.   | <b>2</b>    |
| 1.2 Características de la prueba de EM-RE para $\bar{E}$ .   | <b>3</b>    |
| 1.3 Análisis de la Prueba.   | <b>4</b>    |
| <b>Capítulo 2.</b>   |             |
| Compatibilidad Electromagnética. Entorno y Ambiente Electromagnético.                                      | <b>5</b>    |
| 2.1 Entorno EMC.   | <b>6</b>    |
| 2.2 Acoplamiento de una fuente EMI.  | <b>7</b>    |
| 2.3 Patrón que sigue una fuente EMI.   | <b>8</b>    |
| 2.4 Emisiones y Susceptibilidad.   | <b>9</b>    |
| 2.5 EMC como parte del diseño.   | <b>9</b>    |
| 2.5.1 Enfoque de Crisis.   | <b>9</b>    |
| 2.5.2 Enfoque Sistemático.   | <b>9</b>    |
| 2.5.3 Enfoque intra-sistema.   | <b>10</b>   |
| 2.5.4 Enfoque inter-sistema.   | <b>10</b>   |
| 2.6 Alcances   | <b>11</b>   |
| 2.6.1 Emisiones Radiadas.  | <b>11</b>   |
| <b>Capítulo 3.</b>   |             |
| Plataformas Satelitales. Consideraciones para el análisis de EMC.  | <b>14</b>   |
| 3.1 Subsistemas de control de orientación y posicionamiento.   | <b>16</b>   |
| 3.2 Subsistema de telemetría, rastreo y mando.   | <b>17</b>   |
| 3.3 Subsistema de Comando y manejo de datos.   | <b>18</b>   |
| 3.4 Subsistema de Potencia o Alimentación.   | <b>18</b>   |
| 3.5 Subsistema Térmico.  | <b>19</b>   |
| 3.6 Subsistema de Estructuras y Mecanismos.  | <b>19</b>   |
| 3.7 Subsistema de Guía y Navegación.   | <b>20</b>   |
| 3.8 Carga útil.  | <b>20</b>   |
| 3.9 Ambiente en una plataforma satelital.  | <b>22</b>   |
| <b>Capítulo 4.</b>   |             |
| Herramientas para calcular la intensidad de los campo EM.  | <b>23</b>   |
| 4.1 Elementos fundamentales de campos electromagnéticos.   | <b>24</b>   |
| 4.2 Calculo de la intensidad de los campos EM.   | <b>27</b>   |
| 4.2.1 Campo eléctrico $\bar{E}$ .  | <b>27</b>   |
| 4.2.2 Campo magnético $\bar{H}$ .  | <b>28</b>   |

---

---

|  | <b>PAG</b> |
|--|------------|
| <b>Capítulo 5.</b>   |            |
| Análisis teóricos con los datos obtenidos.   | <b>30</b>  |
| 5.1 Obtención de campos EM radiados.   | <b>31</b>  |
| 5.2 Campos EM vs la posición $r$ .   | <b>31</b>  |
| 5.2.1 Raspberry Pi.  | <b>32</b>  |
| 5.2.1.1 Elemento fundamental de $\vec{E}$ .  | <b>35</b>  |
| 5.2.1.2 Elemento fundamental de $\vec{H}$ .  | <b>37</b>  |
| 5.2.2 Arduino UNO.   | <b>39</b>  |
| 5.2.2.1 Elemento fundamental de $\vec{E}$ .  | <b>41</b>  |
| 5.2.2.2 Elemento fundamental de $\vec{H}$ .  | <b>44</b>  |
| 5.3 Resultados.  | <b>47</b>  |
| <b>Capítulo 6.</b>   |            |
| Compatibilidad Electromagnética. Estándares, Setup para realizar las pruebas.                | <b>48</b>  |
| 6.1 Estándares.  | <b>49</b>  |
| 6.2 Definiciones según los estándares.   | <b>50</b>  |
| 6.2.1 Equipo de radio frecuencia.  | <b>50</b>  |
| 6.2.2 Pruebas de Pre Conformidad.  | <b>52</b>  |
| 6.2.3 Pruebas de Conformidad.  | <b>52</b>  |
| 6.3 Equipo de medición.  | <b>52</b>  |
| 6.3.1 Receptor de EMI.   | <b>52</b>  |
| 6.3.2 Antenas y puntas de prueba.  | <b>53</b>  |
| 6.4 Lugares para realizar las pruebas.   | <b>54</b>  |
| 6.4.1 Cámara Anecoica.   | <b>55</b>  |
| 6.4.2 Celdas TEM.  | <b>56</b>  |
| 6.5 Setup 'real' para realizar las pruebas.  | <b>59</b>  |
| <b>Capítulo 7.</b>   |            |
| Técnicas de Medición para EMC.   | <b>60</b>  |
| 7.1 Zona Cercana.  | <b>61</b>  |
| 7.2 Zona Lejana.   | <b>63</b>  |
| 7.3 Criterio para obtener el carácter electromagnético de un sistema.                        | <b>65</b>  |
| <b>Capítulo 8.</b>   |            |
| Pruebas de EMC con equipo de Medición.   | <b>67</b>  |
| 8.1 Consideraciones para la prueba de EMC-RE con equipo de medición.                         | <b>69</b>  |
| 8.2 Equipo de Aaronia AG   | <b>70</b>  |
| 8.3 Equipo de Rohde & Schwarz  | <b>74</b>  |
| 8.4 Analisis y pruebas de campo eléctrico $\vec{E}$  | <b>77</b>  |
| 8.4.1 Características de la prueba   | <b>77</b>  |
| 8.4.2 Resultados   | <b>78</b>  |
| 8.5 Comparación de los resultados de la prueba con los cálculos realizados en el capítulo 5. | <b>80</b>  |

---

---

|  |            |
|--|------------|
| <b>Conclusiones.</b>   | <b>PAG</b> |
|  | <b>82</b>  |
| <b>Anexos.</b>   |            |
| A. Resultados de la prueba de EMC-RE del sistema Pixqui.                                     | <b>87</b>  |
| B. Programa para calcular y graficar la intensidad de campos EM.                             | <b>91</b>  |
| C. Mapa de parámetros de diseño.   | <b>97</b>  |
| D. Graficas de las otras formas de medición con las técnicas de medición<br>en zona cercana. | <b>99</b>  |
| <b>Bibliografía.</b>   | <b>108</b> |
| <b>Acrónimos.</b>  | <b>110</b> |

| <b>INDICE DE FIGURAS Y TABLAS.</b>   | <b>PAG</b> |
|--|------------|
| <b>Tabla 1.1.</b> Parámetros de diseño de Pixqui.  | <b>2</b>   |
| <b>Tabla 1.2.</b> Límites de emisión radiada del estándar EN 55022.  | <b>3</b>   |
| <b>Figura 1.3.</b> Límites de emisión radiada para campo eléctrico.  | <b>3</b>   |
| <b>Figura 2.1.</b> Fuentes comunes de EMI.   | <b>7</b>   |
| <b>Figura 2.2.</b> Formas en que se acopla la energía EM.  | <b>8</b>   |
| <b>Figura 2.3.</b> Diagrama del patrón que generalmente tiene el problema de EMC.  | <b>8</b>   |
| <b>Figura 2.4.</b> Enfoques, Intra e Inter Sistema.  | <b>10</b>  |
| <b>Figura 2.5.</b> Mapa general de cómo se divide EMC.   | <b>11</b>  |
| <b>Figura 2.6.</b> Diagrama de diseño con EMC-RE.  | <b>12</b>  |
| <b>Figura 3.1.</b> Requisitos que debe tener una misión espacial.  | <b>15</b>  |
| <b>Figura 3.2.</b> Subsistemas de una plataforma satelital.  | <b>16</b>  |
| <b>Figura 3.3.</b> Subsistemas con los posibles elementos que pueden generar interferencia electromagnética.   | <b>21</b>  |
| <b>Figura 4.1.</b> Dipolo lineal corto y dipolo cerrado.   | <b>24</b>  |
| <b>Tabla 4.2.</b> Ecuaciones de los elementos fundamentales de E y H.  | <b>25</b>  |
| <b>Figura 4.3.</b> Diagrama de zonas, dependiendo de donde se encuentre la fuente EM, por debajo o por delante de la relación de zona $\frac{\lambda}{2\pi}$ , podremos definir en qué zona se localiza. | <b>26</b>  |
| <b>Figura 4.4.</b> Consideraciones para calcular la intensidad de los campos EM.   | <b>27</b>  |
| <b>Figura 4.5.</b> La altura 'h' de los dos ejemplos es la que se utiliza para el cálculo de $\vec{E}$ .   | <b>27</b>  |
| <b>Figura 4.6.</b> Utilizamos su área 'a' para calcular la intensidad de campo $\vec{H}$ .   | <b>28</b>  |
| <b>Figura 4.7.</b> Ejemplo para considerar las dimensiones en el cálculo de $\vec{E}$ y $\vec{H}$ .  | <b>29</b>  |
| <b>Tabla 5.1.</b> Datos de los elementos a analizar.   | <b>31</b>  |
| <b>Figura 5.2.</b> Relación de Zona para la tarjeta Rasberry Pi.   | <b>32</b>  |
| <b>Figura 5.2.1.</b> Elemento fundamental de $\vec{E}$ , Campo eléctrico en theta.   | <b>35</b>  |
| <b>Figura 5.2.2.</b> Elemento fundamental de $\vec{E}$ , Campo magnético en phi.   | <b>36</b>  |
| <b>Figura 5.2.3.</b> Elemento fundamental de $\vec{H}$ , Campo magnético en theta.   | <b>37</b>  |
| <b>Figura 5.2.4.</b> Elemento fundamental de $\vec{H}$ , Campo eléctrico en phi.   | <b>38</b>  |
| <b>Figura 5.3.</b> Relación de Zona para la tarjeta Arduino UNO.   | <b>39</b>  |
| <b>Figura 5.3.1.</b> Elemento fundamental de $\vec{E}$ , Campo eléctrico en r.   | <b>41</b>  |
| <b>Figura 5.3.2.</b> Elemento fundamental de $\vec{E}$ , Campo eléctrico en theta.   | <b>42</b>  |
| <b>Figura 5.3.3.</b> Elemento fundamental de $\vec{E}$ , Campo magnético en phi.   | <b>43</b>  |
| <b>Figura 5.3.4.</b> Elemento fundamental de $\vec{H}$ , Campo magnético en r.   | <b>44</b>  |
| <b>Figura 5.3.5.</b> Elemento fundamental de $\vec{H}$ , Campo magnético en theta.   | <b>45</b>  |
| <b>Figura 5.3.6.</b> Elemento fundamental de $\vec{H}$ , Campo eléctrico en phi.   | <b>46</b>  |
| <b>Tabla 6.1</b> Comparación de los estándares y para que aplicación es usada.   | <b>51</b>  |
| <b>Figura 6.2.</b> Equipos de medición.  | <b>53</b>  |
| <b>Figura 6.3.</b> Puntas de prueba (izquierda) y antenas (derecha).   | <b>53</b>  |
| <b>Figura 6.4.</b> Esquema general de un OATS.   | <b>54</b>  |
| <b>Figura 6.5.</b> OATS del CENAM ubicado en Querétaro, México.  | <b>54</b>  |



|   | <b>PAG</b> |
|---|------------|
| <b>Figura 6.6.</b> Camara Anecoica.   | <b>55</b>  |
| <b>Figura 6.7.</b> Interior de la cámara semi anecoica, Centro de Alta Tecnología UNAM, Campus Juriquilla Querétaro.                      | <b>55</b>  |
| <b>Figura 6.8.</b> Exterior de la cámara semi anecoica, CAT UNAM, Campus Juriquilla Qro.  | <b>56</b>  |
| <b>Figura 6.9.</b> Celda TEM.   | <b>56</b>  |
| <b>Tabla 6.10.</b> Comparación del estándar militar con los estándares comerciales.   | <b>57</b>  |
| <b>Figura 6.11.</b> Comparación de los límites de emisión para campo $\bar{E}$ .  | <b>57</b>  |
| <b>Figura 6.12.</b> Descripción de las pruebas de Emisiones y Susceptibilidad del estándar MIL-STD461F.                                   | <b>58</b>  |
| <b>Figura 6.13.</b> Tabla de pruebas según la aplicación, MIL-STD461F.  | <b>59</b>  |
|   |            |
| <b>Tabla 7.1.</b> Ecuaciones de los elementos fundamentales de campo $\bar{E}$ y $\bar{H}$ .  | <b>61</b>  |
| <b>Figura 7.2.</b> Formas para medir la intensidad de campo.  | <b>62</b>  |
| <b>Figura 7.3.</b> Formas de definir el campo magnético.  | <b>62</b>  |
| <b>Figura 7.4.</b> División de secciones en una PCB.  | <b>63</b>  |
| <b>Figura 7.5.</b> Polarización de una antena, a) Horizontal y b) vertical.   | <b>64</b>  |
| <b>Figura 7.6.</b> Prueba en los dos tipos de polarización, horizontal (arriba) y vertical (abajo).                                       | <b>64</b>  |
| <b>Figura 7.7.</b> Impedancia de la onda, depende de la distancia y de la relación de zona.   | <b>65</b>  |
|   |            |
| <b>Figura 8.1.</b> Diagrama para realizar pruebas de EMC.   | <b>68</b>  |
| <b>Figura 8.2.</b> Divisiones propuestas para la medición.  | <b>69</b>  |
| <b>Figura 8.3.</b> Forma 1 (arriba), forma 2 (centro) $\bar{H}$ y forma 3 (abajo) para medir la máxima intensidad de campo $\bar{H}$ .    | <b>70</b>  |
| <b>Figura 8.4.</b> Resultado de la prueba de emisión de campo $\bar{H}$ , sección I, forma 1. Tarjeta Arduino UNO.                        | <b>71</b>  |
| <b>Figura 8.5.</b> Resultado de la prueba de emisión de campo $\bar{H}$ , sección I, forma 2. Tarjeta Arduino UNO.                        | <b>72</b>  |
| <b>Figura 8.6.</b> Resultado de la prueba de emisión de campo $\bar{H}$ , sección I, forma 3. Tarjeta Arduino UNO.                        | <b>73</b>  |
| <b>Figura 8.7.</b> Resultado de la prueba de emisión de campo $\bar{H}$ , equipo Rohde & Schwarz. Sección I, forma 1. Tarjeta Arduino UNO | <b>74</b>  |
| <b>Figura 8.8.</b> Resultado de la prueba de emisión de campo $\bar{H}$ , equipo Rohde & Schwarz. Sección I, forma 2.                     | <b>75</b>  |
| <b>Figura 8.9.</b> Resultado de la prueba de emisión de campo $\bar{H}$ , equipo Rohde & Schwarz. Sección I, forma 3.                     | <b>76</b>  |
| <b>Figura 8.10.</b> Resultados de la prueba de EMC-RE 102 basado en el estándar MIL-STD461F.  | <b>78</b>  |
| <b>Figura 8.11.</b> Límites de emisiones radiadas del estándar MIL-STD461F.   | <b>79</b>  |
| <b>Figura 8.12.</b> Resultado de la prueba de EMC-RE al sistema de adquisición de datos.  | <b>80</b>  |
| <b>Figura 8.13.</b> Comparación de resultados a cada una de las tarjetas utilizadas en el sistema de adquisición de datos.                | <b>81</b>  |
| <b>Figura.</b> Forma donde se localiza la mayor intensidad de campo EM.   | <b>83</b>  |

---

## Introducción.

Los sistemas eléctricos y/o electrónicos se han introducido en la vida humana como una forma para facilitarla, desde el punto de vista del consumidor, se pueden realizar con ellos diversas tareas como prender un foco, utilizar el despertador para llegar a tiempo a algún destino, ver la televisión o escuchar la radio, comunicarnos con otras personas (ya sea escrito, con voz, video e incluso ambos), viajar a cualquier parte del planeta, por mencionar algunos importantes. En la actualidad hay muchos sistemas y aplicaciones a tal grado que se ha creado una dependencia a la tecnología, no es posible imaginar la carencia de ella y resulta frustrante pensar que se haría sin todos esos complementos tecnológicos llegarán a fallar o en un caso muy extremo, a ya no existir.

Durante el desarrollo de la tecnología empiezan a manifestarse diversos problemas; se observa en la casa, en la cocina cuando se enciende la licuadora aparecen unas líneas horizontales en la pantalla del televisor y justo cuando se apaga la licuadora, estas líneas desaparecen. Cuando se utiliza la computadora y se recibe una llamada al teléfono celular, si se tienen los altavoces conectados se escuchan una serie de pitidos molestos los cuales son una indicación de que se recibirá alguna llamada o mensaje.

Los dos ejemplos anteriores son una prueba de que existe un problema del tipo electromagnético que de alguna forma se introduce en los dispositivos eléctricos y/o electrónicos causando que presenten alteraciones durante su funcionamiento.

Estos argumentos son una motivación para que el ingeniero, esa persona encargada de crear, desarrollar, diseñar, innovar y reparar los sistemas, tenga como uno de sus objetivos, hacer los sistemas con la mayor calidad que le sea posible para evitar los problemas descritos anteriormente.

Entre estos objetivos se encuentra el tema que se pretende explicar en este trabajo: la *Compatibilidad Electromagnética*, una materia de vital importancia en el área de la ingeniería eléctrica y electrónica. Muchos de los ingenieros que se dedican al área del diseño, cuando surge un problema de Compatibilidad Electromagnética sin saberlo y han agotado todos los recursos intentando resolverlo, comienzan a considerar el tema, perdiendo tiempo y dinero.

Una de las principales ventajas de saber diseñar un sistema con criterios de Compatibilidad Electromagnética son los beneficios que pueden traer a una empresa; si se siguen o se consideran las reglas y recomendaciones conllevan a realizar pruebas, si estas pruebas son aprobadas en un laboratorio certificado en el tema, se obtiene un certificado en el cual indica que se puede vender el producto en cualquier país que acepte ese certificado por lo que las ventas pueden aumentar, también genera un prestigio sobre las otras empresas que hagan el mismo producto pero que no cuentan con ese certificado, decir que el producto que se diseña cumple con los estándares de Compatibilidad Electromagnética da a las empresas que lo compren confianza y seguridad de que no va a fallar si se somete a algún ambiente electromagnético.

---

Entre los objetivos que se pretenden cumplir en este trabajo serán:

1. Análisis del comportamiento electromagnético de los sistemas eléctricos y/o electrónicos que tiene una plataforma satelital.
2. Determinación de la intensidad de campos electromagnéticos a través de los parámetros de diseño de los sistemas eléctricos y/o electrónicos contenidos en una plataforma satelital como, voltaje de operación, intensidad de corriente, frecuencia de operación, dimensiones del sistema (ancho, largo y altura), entre otros.
3. Se propondrán técnicas de medición para las pruebas de Compatibilidad Electromagnética para emisiones radiadas, basado en mediciones en zona cercana, mismas que se aplicarán en un sistema que formará parte de una plataforma satelital.
4. Generación de recomendaciones y consideraciones a partir de los resultados para reducir las fuentes de interferencia electromagnética.

Se utilizó un programa de cómputo para calcular teóricamente la intensidad de los campos electromagnéticos, se realizarán pruebas y mediciones para obtener la intensidad de los campos electromagnéticos experimentalmente, compararlos y juzgar si podemos utilizar las intensidades teóricas para poder hacer un análisis que se acerque a una prueba de Compatibilidad Electromagnética.

La situación que tenemos en México sobre el tema es de escasa difusión e investigación debido a que no se le da la importancia que debería tener. No se cuenta con la infraestructura adecuada para poder realizar un análisis de Compatibilidad Electromagnética además si se toma en cuenta que México es un país en donde hay empresas que fabrican productos eléctricos y/o electrónicos, corren el riesgo de que no funcionen adecuadamente, también deben cumplir los estándares y normas de conformidad por lo que puede resultar costoso para estas empresas no pasar exitosamente estas regulaciones [15].

Instituciones educativas como la UNAM han levantado la mano externando su preocupación acerca del tema, desarrollando parte de la infraestructura que se necesita para hacer análisis de EMC, a tal grado que las empresas que necesiten orientación se han acercado a la máxima casa de estudios, principalmente a la Facultad de Ingeniería, para que sean asesorados en este tipo de problemas. Uno de los principales elementos para realizar un análisis de compatibilidad electromagnética es un laboratorio que contenga las características idóneas para efectuar las pruebas pero un factor a considerar para construir un laboratorio de este tipo es su costo, por lo que las empresas pueden ver esto como un motivo para no invertir, pero a largo plazo los beneficios son mayores, haciéndolo una buena inversión.

Este trabajo pretende realizar un análisis de Compatibilidad Electromagnética con los mínimos recursos a través de cálculos para la predicción de la máxima intensidad de los campos electromagnéticos y poder considerar si el sistema puede cumplir las pruebas de certificación. Todo esto para que pueda ser una opción menos costosa y aplicar el análisis en cualquier sistema.

Este trabajo puede ser una referencia para usarse en los cursos y/o diplomados de Compatibilidad Electromagnética que se impartan en la Facultad de Ingeniería de la UNAM.



# CAPITULO 1.

## Caso previo, Servicio Social.

Antecedentes y primeras impresiones  
sobre la Compatibilidad  
Electromagnética.

---

El primer contacto con el tema de EMC en el periodo de mi *servicio social*, programa en el cual tenía como objetivos establecer los conocimientos, tanto previos como iniciales, para elaborar una propuesta de protocolo de prueba de *Compatibilidad Electromagnética de Emisiones Radiadas de Campo Eléctrico* al sistema de pruebas para equipo espacial llamado “Pixqui”, elaborado por el *Instituto de Ciencias Nucleares* de la UNAM. El *Centro de Alta Tecnología (CAT)*, de la *Facultad de Ingeniería* de la UNAM fue el encargado de la logística y realización de la prueba y la *Facultad de Ciencias* apoyó las pruebas con la utilización de su cámara semi anecoica e instrumentación.

Pixqui es una plataforma suborbital mexicana de usos múltiples la cual contiene una computadora central que permite probar y monitorear equipo y componentes de experimentos a realizarse en el espacio a bajos costos. También está diseñada para proteger su contenido cuando vuelva a la superficie terrestre [42].

Se elaboró la propuesta de protocolo de pruebas el 27 de Junio de 2013; que incluye el tipo de prueba que se propuso, el método y la instrumentación necesaria para realizarla además de la logística de traslado del equipo, basado en el estándar MIL-STD 461F. Las pruebas se llevaron a cabo en la cámara semi anecoica ubicada en el edificio Tlahuizcalpan, segundo piso, en la Facultad de Ciencias de la UNAM, Ciudad Universitaria el día 30 de Julio de 2013.

### 1.1. Entorno EMC.

Se necesitan ciertos puntos para poder realizar el análisis de EMC a un sistema:

1. Verificar si se consideró algún enfoque de compatibilidad electromagnética en el diseño. Si la respuesta es afirmativa, cuestionar qué consideraciones tomaron en cuenta para reducir el ruido e interferencias electromagnéticas.
2. Elaborar un documento con los parámetros de diseño del sistema para poder calcular teóricamente las intensidades de los campos electromagnéticos, considerando en que zona se encuentra el sistema.

Para el primer punto, no se estableció ningún enfoque de compatibilidad electromagnética en el diseño de Pixqui, por lo que se realizó el estudio y las pruebas con el diseño final del sistema.

En el segundo punto se consiguieron los parámetros de diseño que se muestran en la tabla 1.1 con los cuales se puede predeterminar las intensidades de los campo electromagnéticos.

| Equipo CA AEM-BF1, “Pixqui”.               |                       |
|--|-----------------------|
| <b>Voltaje.</b>                            | $V = 12[V]$           |
| <b>Corriente.</b>                          | $I = 0.5[A]$          |
| <b>Potencia</b>                            | $P = 6 [W]$           |
| <b>Dimensiones (largo X ancho X alto).</b> | 35 cm X 35 cm X 50 cm |

Tabla 1.1. Parámetros de diseño de Pixqui.

Este caso se puede analizar partiendo de la realización de la prueba la cual da como resultado una gráfica que muestra la intensidad de campo eléctrico  $\vec{E}$  en un intervalo de frecuencia, determinado por el estándar utilizado.

## 1.2. Características de la prueba de Compatibilidad Electromagnética para campo eléctrico $\bar{E}$ .

Esta prueba fue realizada bajo el estándar EN 55022 que se utiliza para equipos de tecnologías de la información [19]; Pixqui no se considera en el estándar debido a que su aplicación se encuentra en el área espacial por lo que el estándar a utilizar es el MIL-STD 461F [18], pero como no se contaba con los requerimientos necesarios para realizar la prueba con esa norma, se optó por realizar la prueba con el entorno (antenas, equipo y lugar) que se tenía a la mano.

Se tomó en cuenta las gráficas que contienen los límites de emisión de cada uno de los estándares los cuales tienen algunas diferencias como la frecuencia final, la distancia del *equipo bajo prueba*, las antenas o el lugar en donde se realizan. En la parte de los límites de emisión, los estándares nos lo indican:

Se consideró que el equipo bajo prueba es de *clase B* [1]:

| EN 55022, Clase B. |                                  |
|--------------------|----------------------------------|
| Frecuencia [MHz]   | Límite de emisión [dB $\mu$ V/m] |
| 30 - 230           | 30                               |
| 230 - 1000         | 37                               |

Tabla 1.2. Límites de emisión radiada del estándar EN 55022 [19].

Las diferencias que tienen los dos estándares son:

- La distancia en que se realizan las pruebas;  $1 [m]$  para el estándar MIL-STD 461F y  $3 [m]$  para el estándar EN55022
- Los límites de emisión que se pueden observar en la figura 1.3.

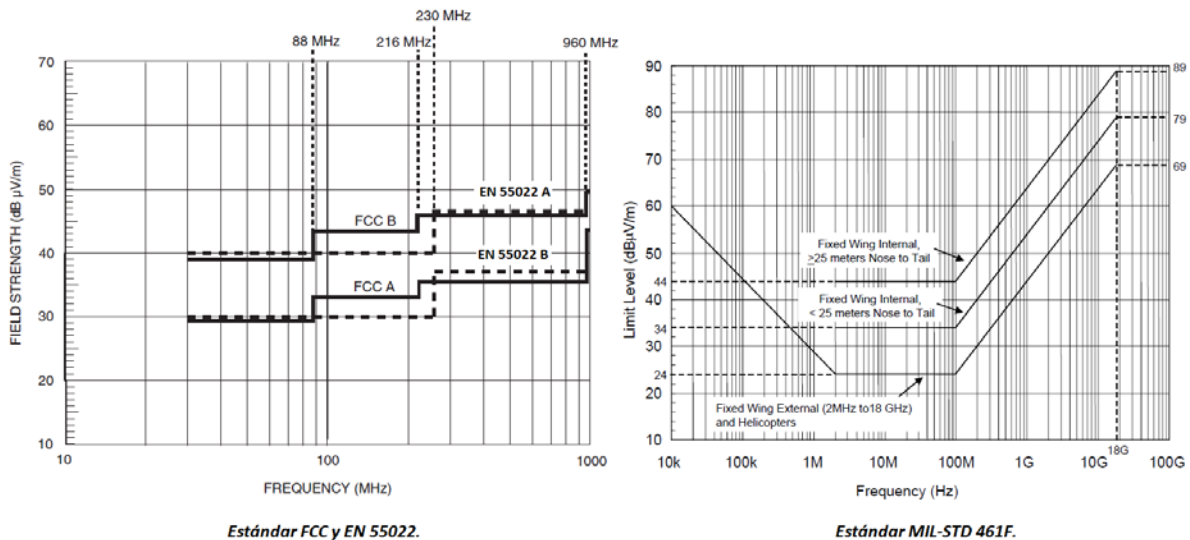


Figura 1.3. Límites de emisión para campo eléctrico [1] [19].

---

La instrumentación que realiza la prueba genera una gráfica que muestra las emisiones de la intensidad de campo eléctrico  $\bar{E}$  con el intervalo de frecuencias que determina el estándar. El criterio para interpretar la gráfica es, si las emisiones sobrepasan los límites establecidos, *no pasa la prueba*. Después se observa a que frecuencia se localizan las emisiones que superan los límites para hacer recomendaciones que reduzcan estas emisiones no deseadas y pueda pasar la prueba.

### **1.3. Análisis de la Prueba.**

La figura de los resultados y las recomendaciones se encuentran en la *parte A* de los *anexos* de este trabajo, se puede identificar las frecuencias que superan los límites los cuales se muestran en la parte inferior de la gráfica además de otros datos. Se propusieron algunas recomendaciones para identificar las fuentes de interferencia electromagnética y reducirlas que para este caso, son necesarias ya que no paso la prueba.

Como ejercicio podemos averiguar a qué frecuencia se genera la fuente de EMI; de datos tenemos la corriente y las dimensiones del EUT además de establecer que estamos en zona lejana para poder utilizar las ecuaciones para esta zona.

Esta prueba fue un primer acercamiento al tema de la Compatibilidad Electromagnética y se conocieron los siguientes conceptos y experiencias:

1. Se obtienen los primeros conocimientos sobre la compatibilidad electromagnética y los temas que la complementan, se observa que no son temas que se desconocen y estos se imparten en la Facultad de Ingeniería.
2. Se introducen los conocimientos sobre las pruebas de compatibilidad electromagnética, los tipos que existen, como se clasifican y los organismos que las crean.
3. Se formó parte del grupo de trabajo que realizó el análisis de compatibilidad electromagnética para la plataforma de vuelo sub orbital diseñada en el Instituto de Ciencias Nucleares de la UNAM.
4. Se realizó la propuesta de protocolo para efectuar las pruebas de Compatibilidad Electromagnética para emisiones radiadas de campo eléctrico basado en el estándar MIL-STD 461F.

En la primera sección de este trabajo, se va a explicar el entorno que tiene la Compatibilidad Electromagnética, sus definiciones y el ambiente al que puede estar sometido un sistema eléctrico y/o electrónico. Se mencionarán algunos enfoques que se pueden utilizar para realizar un análisis de Compatibilidad Electromagnética.



# CAPITULO 2.

## Compatibilidad Electromagnética.

Entorno y Ambiente Electromagnético.

---

El problema de la *compatibilidad electromagnética* surge (implícitamente) del descubrimiento y desarrollo de la *Teoría electromagnética*, el estudio de los campos eléctricos y los campos magnéticos. Diversos factores hacen que se ponga interés en esta área como; los componentes pasivos (resistor, capacitor e inductor), la creación del transistor y hasta la invención del primer circuito integrado. Estos factores hacen que el tema de la compatibilidad electromagnética empiece a tomar más relevancia, pero las siguientes causas son un punto de partida para desarrollar el tema:

- Debido a la creación del circuito integrado (CI), diversas tecnologías se han implementado para la reducción e integración de transistores en un área muy pequeña, ocasionando una interacción entre millones de estos.
- A través de los CI's, podemos crear sistemas y dispositivos que, implementados con los demás componentes (pasivos y activos), se localizan cerca unos de otros también en un espacio reducido.
- La implementación de circuitos temporizadores como control de tiempo de los sistemas, que generan frecuencias (de operación) la cuales son cada vez más altas.

En la actualidad, es común el uso de los sistemas eléctricos y/o electrónicos en casi todos los aspectos de la “vida moderna” y está influenciada por el consumo de estos.

Todas estas causas siguen incrementando el interés por desarrollar el tema, por lo que las instituciones dedicadas a la normalización en materia eléctrica y electrónica de todo el mundo definen la *compatibilidad electromagnética*.

La **Compatibilidad Electromagnética** (EMC, por sus siglas en inglés) es la capacidad que tiene un sistema eléctrico y/o electrónico a funcionar correctamente en un entorno electromagnético específico y no generar perturbaciones ElectroMagnéticas (EM) que puedan afectar el funcionamiento de otros sistemas próximos a él y también así mismo [1] – [11].

### 2.1. Entorno EMC.

Son los aspectos y características que se necesitan para hacer un análisis de EMC, se mencionarán conceptos como *perturbaciones electromagnéticas*, *ambiente EM*, *fuentes de interferencia EM*, *formas en la que puede acoplarse*, *patrón que sigue un problema de EMC*, entre otros si son necesarios.

Se define como **perturbaciones electromagnéticas** a cualquier señal que afecte el funcionamiento de un sistema, como el *ruido electromagnético* (cualquier señal EM presente es un sistema además de la señal esperada) y la *interferencia* del tipo electromagnético (perturbación de un sistema causada por una fuente externa al mismo).

Las perturbaciones EM se agrupan y se conocen como fuentes de *Interferencia ElectroMagnética* (*ElectroMagnetic Interference*, EMI por sus siglas en inglés), generalmente se engloban en tres tipos [1]:

1. **Artificiales:** Con la creación de sistemas eléctricos y/o electrónicos más complejos para realizar y facilitar diversas tareas.
2. **Naturales:** A través de los fenómenos físicos que existen en el planeta y en los astros que tenemos próximos a nosotros (planetas, estrellas y galaxias próximas a la tierra).
3. **Intrínsecas:** Son fluctuaciones aleatorias de los sistemas físicos como los tipos de ruido que existen (térmico, electrónico, ráfaga, de disparo, entre otros).

El siguiente esquema muestra los sistemas que pueden ser una fuente EMI los cuales son ya de uso cotidiano [3]:

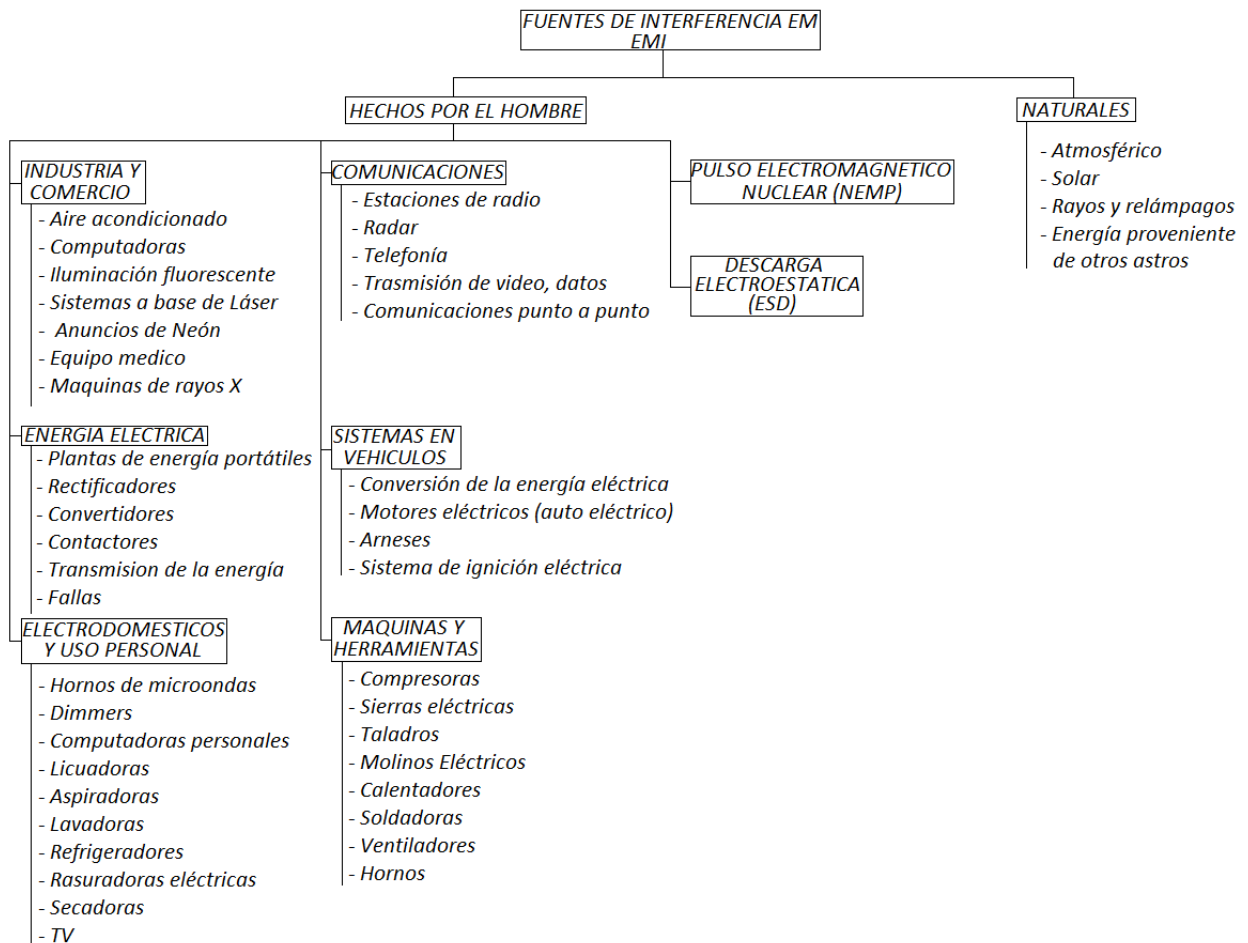


Figura 2.1. Fuentes comunes de EMI. (Morgan D. 2007).

## 2.2. Acoplamiento de una fuente EMI.

Un aspecto importante que se debe mencionar es *la forma de cómo se acopla las fuentes de EMI en nuestros sistemas*. Existen varias formas pero las que van a hacer prioridad en este trabajo son las siguientes.

Partimos de la mención de lo que se conoce como *ambiente electromagnético*, el cual es la forma en que puede viajar o acoplar la energía electromagnética. Esta energía EM puede propagarse de dos formas: **conducida y/o radiada** [1], como se observa en la figura 2.2. Todo sistema va a estar en un ambiente EM específico por lo que se debe saber los tipos de acoplamiento que existen.

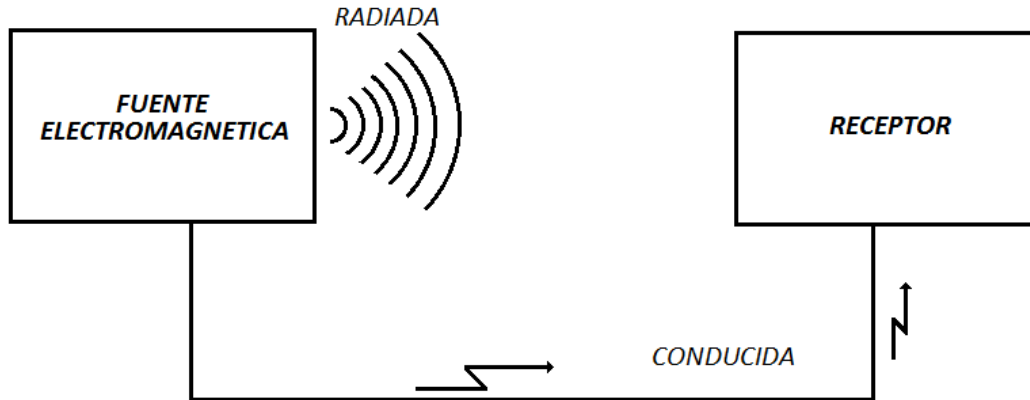


Figura 2.2. Formas en que se acopla la energía EM

El acoplamiento del tipo **conductor**, el cual su principal medio son los materiales *conductores* que tiene en el sistema, pueden ser cables, pistas en una tarjeta de circuito impreso (*Printed Circuit Board, PCB*, por sus siglas en inglés), las terminales de los sistemas, dispositivos eléctricos y/o electrónicos y circuitos integrados.

Si la energía se propaga en forma radiada, hay dos tipos de acoplamiento; el acoplamiento del tipo **eléctrico** en el cual existen campos eléctricos que se enlazan a los sistemas y el acoplamiento del tipo **magnético** que es la interacción de los campos magnéticos con el sistema.

Estos dos tipos de acoplamiento se pueden estudiar de manera separada; ya sea primero el estudio de los campos eléctricos y después de los campos magnéticos o viceversa, o también en conjunto, lo que se conoce como *onda electromagnética* pero se deben hacer algunas consideraciones para elegir alguna de las dos formas.

### 2.3. Patrón que sigue un problema de EMC.

Una parte muy importante de EMC es el diagrama que engloba todo el concepto que, aunque es muy simple, si nos dice mucho acerca de lo que es EMC:



Figura 2.3. Diagrama del patrón que generalmente tiene el problema de EMC.

---

¿Qué nos dice este diagrama? primero, indica la forma de qué y cómo se genera y difunde la energía EM y segundo, implícitamente también dice como atacar un problema de EMC; (1) se debe reducir la energía EM de la fuente, (2) reducir el canal de acoplamiento y por último, (3) proteger de alguna forma al receptor para que sea inmune a perturbaciones EM de la fuente.

#### **2.4. Emisiones y Susceptibilidad.**

En el tema de EMC se tratan dos características que tienen los sistemas; **emisiones** que es la creación de campos EM y su transmisión (en las dos formas posibles) debido a el funcionamiento de estos, y **susceptibilidad**, que significa cuánta cantidad de energía EM puede permitir o soportar nuestro sistema sin degradación en su funcionamiento y así establecer un margen de operación.

Una vez que se plantean estas características, se pueden establecer un grupo de sistemas, los *sistemas que emiten energía EM intencionalmente* y los *sistemas que no deben emitir energía EM*. En ambos grupos de sistemas se debe de tomar en cuenta si contienen elementos o dispositivos que va a emitir energía EM para alguna aplicación (comunicaciones principalmente).

#### **2.5. EMC como parte del diseño.**

En la actualidad se han definido aspectos para incluir a la compatibilidad electromagnética como parte del diseño de sistemas eléctricos y/o electrónicos; Henry W. Ott define dos enfoques que explican que puede suceder si incluimos o no las consideraciones de EMC en nuestro diseño [1].

##### **2.5.1. Enfoque de Crisis.**

Este enfoque ignora la existencia del tema y análisis de EMC hasta que el diseño del sistema esté terminado sin predeterminedar los problemas que se presenten en la pruebas, las soluciones se implementan a el producto terminado lo que implica altos costos y pérdida de tiempo y además, como las soluciones no están incluidas en el diseño, existen problemas de espacio, entre otros.

##### **2.5.2. Enfoque sistemático.**

Caso contrario al enfoque anterior, se considera los posibles problemas de EMC que puede tener nuestro sistema desde el principio de nuestro diseño, realizando pruebas en el diseño a nivel de prototipo hasta reducir los problemas de EMC y establecer un nivel de inmunidad a los campos EM antes de que el producto salga al mercado, también se reducen los costos y no existen problemas de espacio, por mencionar algunos.

De esta manera, este enfoque se realiza no solamente en el diseño eléctrico y/o electrónico del producto, también es necesario la ayuda de las otras áreas que estén involucradas en el diseño completo de este.

Tim Williams [2] y David Morgan [3] describen y explican otro tipo de enfoques, desde otro punto de vista pero igual de importantes. De acuerdo a la aplicación y la complejidad que tenga el sistema que se diseñe, vamos a poder escoger que tipo de enfoque es el más adecuado.

### 2.5.3. Enfoque Intra-Sistema.

Este enfoque se caracteriza en las interacciones EM que ocurren en sistemas que cuenta con varias etapas o que necesitan de otros sistemas para realizar la tarea definida. Debido a que estos sistemas se localizan próximos unos de otros, los problemas de EMC pueden originarse ocasionando fallas o mal funcionamiento de estos.

Lo primero que se debe realizar es analizar cada uno de los subsistemas que tenga e identificar los problemas de EMC, una vez logrado esto, se establece que subsistemas pueden trabajar en conjunto sin sufrir alteración en su funcionamiento y proponer las soluciones y/o recomendaciones para los subsistemas que puedan ser una fuente de EMI.

El prefijo *Intra* (dentro de) indica perfectamente el tipo de enfoque que es, como resumen, nuestra prioridad en el análisis de EMC serán los subsistemas que tenga el equipo o sistema, teniendo como objetivo que todos estos puedan trabajar o funcionar adecuadamente cerca unos de otros.

Este tipo de enfoque es usado en industrias como la militar, aeroespacial, espacial y automotriz debido a la complejidad de los sistemas que usan.

### 2.5.4 Enfoque Inter-Sistema.

En este tipo de enfoque no se consideran los subsistemas o etapas que conforman al sistema. Se asume que nuestro sistema va a operar en un ambiente EM específico (con límites definidos) y tendrá interacción con otros sistemas, es decir, el objetivo es tomar en cuenta por anticipado que el sistema trabajará en ambientes EM producidos por diversos factores (fuentes de EMI), por lo que se deben considerar en el diseño para que sea inmune a estas condiciones.

Estos enfoques deben cumplir con la definición de EMC; funcionar adecuadamente en un ambiente EM específico y no ser una fuente de EMI para otros como para sí mismo.

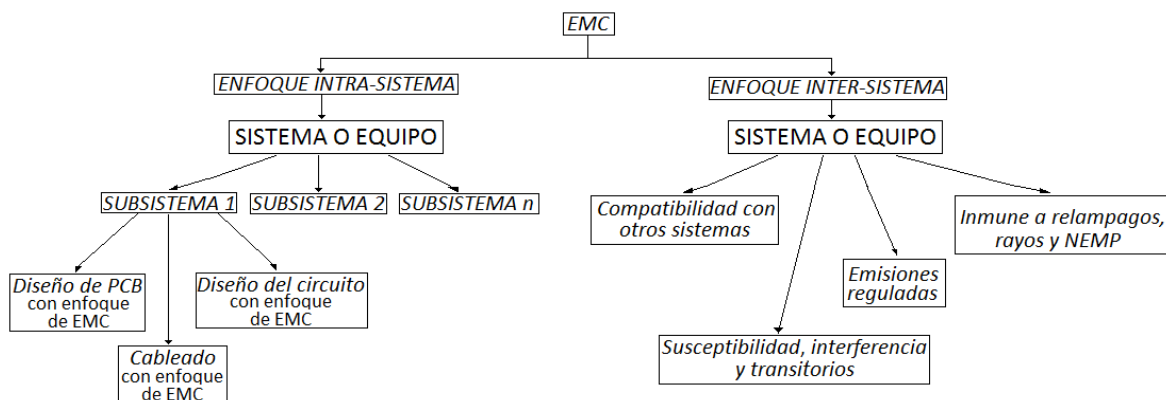
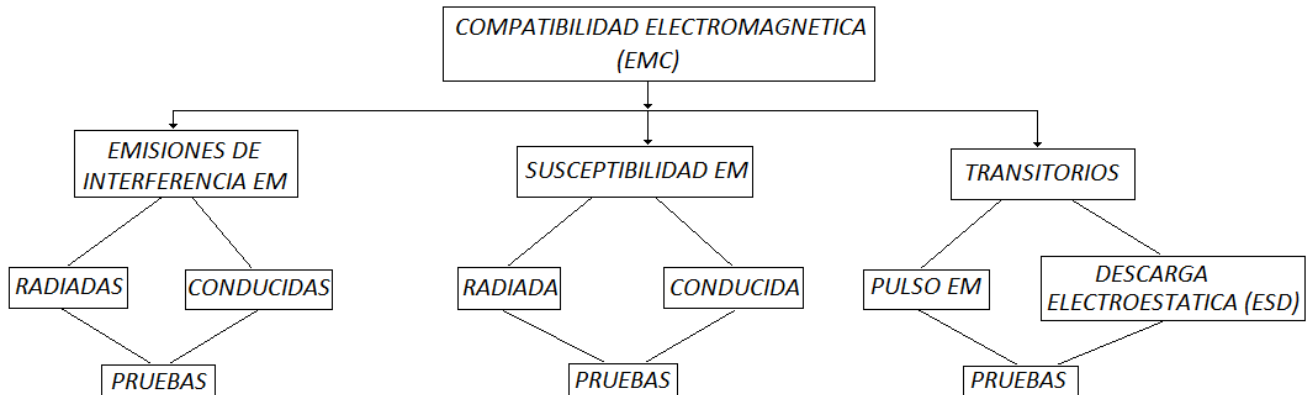


Figura 2.4. Enfoques, Intra e Inter Sistema. (Morgan D. 2007).

En la figura 2.4 muestra los dos enfoques descritos, cabe señalar que se deben considerar los criterios de EMC en el desarrollo del sistema (enfoque sistemático que propone Henry W. Ott) durante la aplicación de los enfoques anteriores para identificar las fuentes de EMI con mayor facilidad.

Ya con todas las características que tiene el tema de EMC, se muestra a continuación un mapa general donde se expone como se dividen los campos que abarca este tema:



**Figura 2.5. Mapa general de cómo se divide los campos de EMC.**

Se incluye también la parte de *transitorios* los cuales son fenómenos que ocurren en un instante corto de tiempo pero que pueden dañar a los sistemas debido a las grandes cantidades de intensidad de campos EM que producen.

## 2.6 Alcances.

Este trabajo se enfocará en la parte de **Emisiones Radiadas (Radiated Emissions, RE por sus siglas en inglés)**, empezando por un análisis teórico para que posteriormente se hagan pruebas de este tipo, comparar los resultados y poder proponer algunas consideraciones.

### 2.6.1 Emisiones Radiadas.

Se trata de analizar, calcular y medir la intensidad de los campos eléctricos y magnéticos radiados, generados en los sistemas bajo ciertas consideraciones.

Para hacer al análisis de un sistema lo primero que se debe conocer son sus parámetros de diseño, los cuales proporcionan la información necesaria para poder calcular los campos EM que se forman en el sistema.

Uno de los elementos que ayudarán a cumplir el segundo objetivo de este trabajo es crear una tabla de parámetros, los cuales nos brindan la información para poder realizar el análisis teórico que servirá para saber la cantidad de campo eléctrico y magnético que está radiando el sistema.

Conociendo ahora el entorno de EMC, se propondrá un diagrama donde nos indique los pasos a seguir para realizar un análisis de *EMC en Emisiones Radiadas*, el cual es una de las metas a lograr en este trabajo.

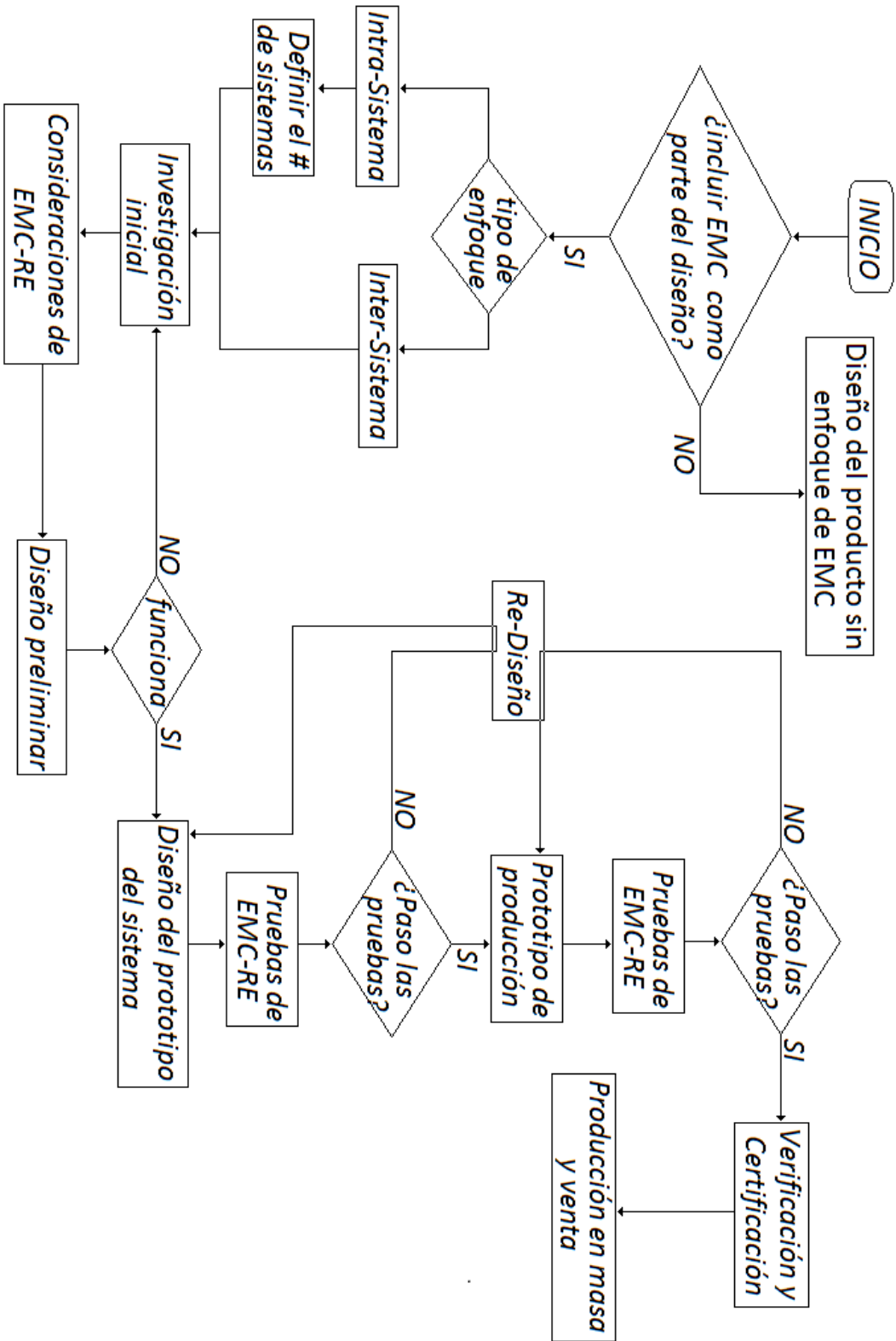


Figura 2.6. Diagrama de diseño con EMC-RE.



---

La primera parte de la figura 2.6 explica que se debe considerar a EMC como parte del diseño del sistema y escoger uno de los dos enfoques, inter-sistema o intra-sistema; en el primer enfoque se aplica al sistema en general, sin tomar en cuenta los subsistemas que contenga, mientras que el enfoque intra-sistema el diagrama se aplicará a cada uno de los subsistema o etapas que contenga el sistema.

La segunda sección es el ciclo de desarrollo que cualquier producto debe seguir con la diferencia de que se agregan pruebas de EMC-RE en cada parte de este para dar un seguimiento de las consideraciones que se propusieron, verificar si las fuentes de EMI se minimizaron o si en alguna parte del diseño se presentaron nuevas formas de EMI.

Una vez establecidas las condiciones y el entorno de EMC en la que puede trabajar un sistema, se aplicará a una plataforma satelital, en el siguiente capítulo se abordarán los principales subsistemas que la conforman, mencionando sus elementos y su posible tendencia a ser una fuente de EMI. También se menciona el ambiente EM al que puede estar sometida la plataforma y un diagrama que reúne todas las fuentes de EMI que se pueden presentar en esta.

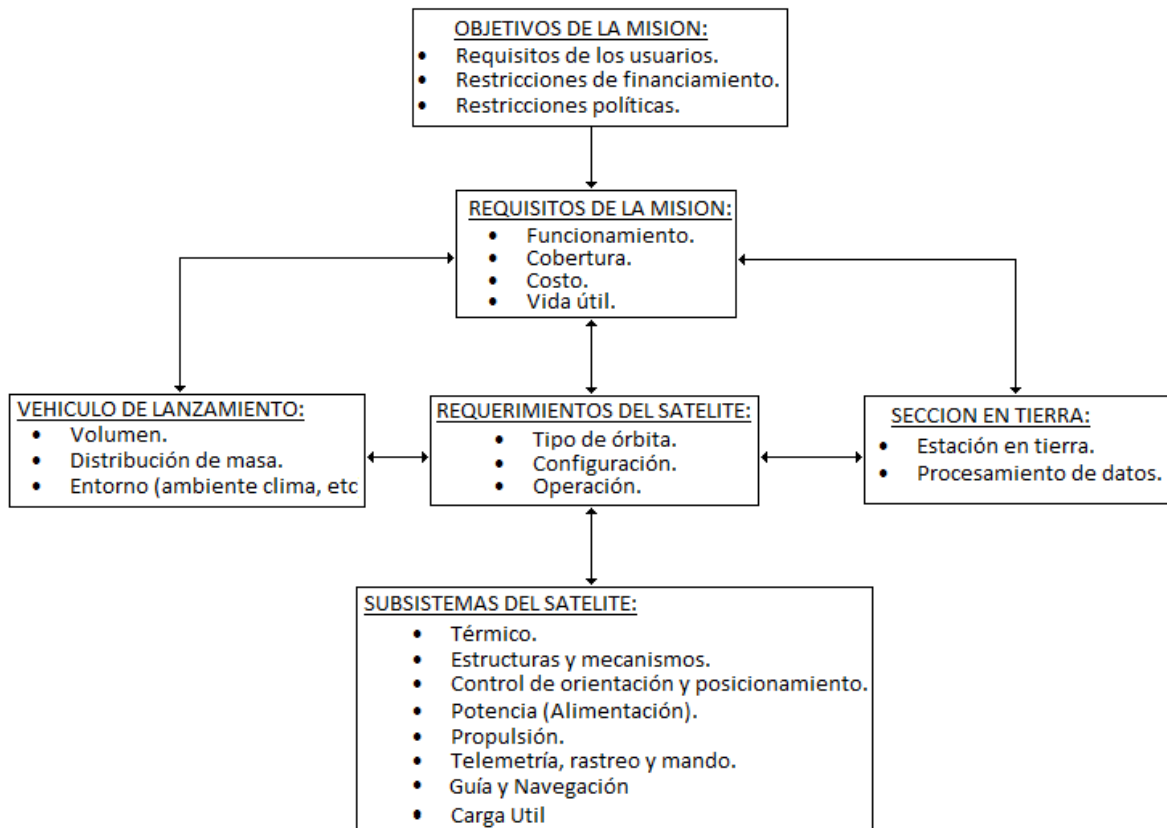
## CAPITULO 3.

# Plataformas Satelitales.

Consideraciones para el análisis de EMC.

Una **plataforma satelital** (o satélite como comúnmente es conocido) es un vehículo creado para volar y que, dependiendo de su objetivo y su diseño, puede orbitar en un cuerpo celeste. Se usan para diversos propósitos como colocar la instrumentación y equipo para medir alguna variable en la atmósfera o el espacio, obtener imágenes y/o video de alguna parte de la tierra, transmitir señales (comunicaciones) o para que los humanos puedan vivir en el espacio como es el caso de la estación internacional espacial.

Esta forma parte de un **programa espacial** que consiste en una serie de objetivos y requisitos que deben realizarse y cumplirse [27]. La figura 3.1 nos muestra las partes que tienen la mayoría de los programas espaciales:



**Figura 3.1. Requisitos que debe tener un programa espacial (Fortescue P, Swinerd G & Stark J, 2011).**

A su vez, la plataforma satelital contiene una serie de bloques que se conocen como **subsistemas**, los cuales funcionan en conjunto para realizar las tareas de la misión.

Los subsistemas que se mencionan a continuación se encuentran comúnmente en la mayoría de los satélites, se hará una descripción de estos para saber sus características y funcionamiento [29].

---

Desde un punto de vista de Compatibilidad Electromagnética, los elementos que funcionen con voltajes y corrientes, son básicamente fuentes de interferencia electromagnética, es decir, van a generar campos electromagnéticos que pueden afectar el funcionamiento de la plataforma satelital, por lo que se mencionarán los dispositivos e instrumentación que comúnmente se usan en las plataformas satelitales para determinar si pueden ser una fuente de EMI.

Los subsistemas son los siguientes y se agrupan en la figura 3.2:

- **Control de orientación y posicionamiento.**
- **Telemetría, rastreo y mando.**
- **Comando y manejo de datos.**
- **Potencia (Alimentación)**
- **Térmico**
- **Estructuras y mecanismos.**
- **Guía y navegación.**
- **Carga útil.**

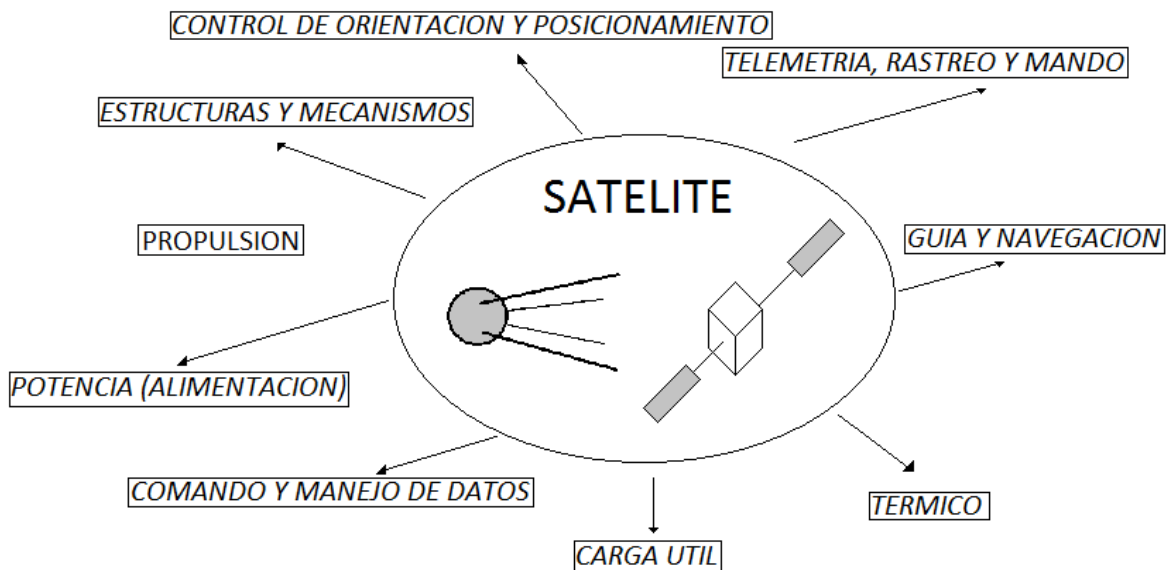


Figura 3.2. Subsistemas de una plataforma satelital.

### 3.1. Subsistemas de control de orientación y posicionamiento.

Este subsistema se encarga de orientar correctamente el satélite en las direcciones que se requieran, apuntar las antenas hacia la tierra para que haya una mejor transmisión-recepción de las señales, estabilizarlo debido a las perturbaciones que existen en el espacio exterior. Esto se logra a través de sensores que detectan la posición deseada y los actuadores muevan el satélite o los equipos que se necesiten cambiar de posición.

---

También es necesario un algoritmo de control para conseguir que la posición se acerque lo más posible al comportamiento predefinido.

Los sensores pueden ser de varios tipos:

- Ópticos: Detectan una dirección relativa de un planeta o una estrella por ejemplo el sol, la tierra, una o varias estrellas.
- Mecánicos: Miden la velocidad angular del satélite respecto a una referencia.
- Magnéticos: A través de magnetómetros que utilizan el campo magnético de la tierra.

Los actuadores pueden ser propulsores, ruedas de reacción, varillas magnéticas, giroscopios de control de momentos, por mencionar algunos [29].

Desde el punto de vista de la Compatibilidad Electromagnética, los elementos que pueden producir EMI son, (1) los sensores debido a que necesitan de alimentación (voltaje y corriente) por lo que se pueden considerar como una fuente de interferencia electromagnética en caso de ser necesario.

Se puede definir un grupo de dispositivos que tienen la tarea de mover, ajustar y estabilizar a la plataforma satelital, (2) las *ruedas de reacción* y los *giroscopios de control de momentos* llamados “mecánicos” y son básicamente motores controlados por algún algoritmo, con embobinados por lo cual pueden ser fuentes de interferencia electromagnética.

Y por último se encuentran los dispositivos magnéticos (3), los cuales utilizan precisamente los campos magnéticos (de la tierra u otros astros) para orientar a la plataforma satelital en la dirección deseada.

### **3.2. Subsistema de telemetría, rastreo y mando.**

Proporciona la interfaz de comunicación del satélite con la estación en tierra, entre sus principales funciones están: (1) detectar y recibir las señales de la estación en tierra para luego procesarlas, (2) todos los datos de información y mediciones son procesados y transmitidos por este hacia la estación en tierra, (3) recibir, procesar y transmitir las señales que determinan los estados del satélite como su posición, orientar de las antenas, entre otros [29].

Los dispositivos que conforman al subsistema son los siguientes [28]:

1. *Transpondedor*: Dispositivo que recibe y/o transmite los datos.
2. *Filtros y amplificadores*: Acondicionan la señal proveniente del transpondedor en el caso de que necesiten de una potencia mayor (amplificadores) o reducir ruido y otras fuentes de EMI (filtros).
3. *Diplexor*: Cumple dos funciones; acopla dos señales en un solo cable o viceversa, divide dos señales provenientes de un solo cable o guía de onda. Su función permite compartir el receptor y el transmisor la misma antena.
4. *Red de RF*: Son básicamente interruptores que permiten escoger como usar a las antenas, para recibir o enviar las señales, además de seleccionar el transmisor o el receptor.
5. *Antenas*: Envían y reciben las señales de la estación en tierra.

---

Todos los dispositivos, a excepción de la(s) antena(s), se concentran en una PCB por lo que el análisis de EMC sería a esta. El análisis de EMC dependerá del diseño de cada uno de los elementos enlistados para determinar cuál de estos puede generar fuentes de EMI.

### **3.3. Subsistema de Comando y manejo de datos.**

Tiene la función de recibir, validar, decodificar y distribuir los comandos de otros subsistemas además de almacenar y procesar los datos de la misión para que puedan ser transmitidos a la estación en tierra o para ser usados por la computadora a bordo, también maneja los datos de estado del satélite.

Para hacer un correcto diseño de este, los demás subsistemas deben de estar bien definidos puesto que con el subsistema de comando y manejo de datos, como su nombre nos indica, es una parte esencial del nuestro satélite ya que configura, controla, programa y está en “contacto” con todos los subsistemas.

Estas tareas son realizadas por una computadora a bordo, cuyo componente principal puede ser un *microcontrolador*, un *dispositivo lógico programable* (PLD, por sus siglas en inglés) o un *controlador lógico programable* (PLC, por sus siglas en inglés), además de la ‘electrónica’ que necesite, agrupados en una PCB [29]. El cableado para conectar, enviar y/o recibir todos los datos de los demás subsistemas puede generar interferencia EM. Los principales elementos a analizar son la PCB con su cableado, los dispositivos que generan una frecuencia de operación para los microcontroladores o los PLD’s.

### **3.4. Subsistema de Potencia o Alimentación.**

Es uno de los principales subsistemas y entre sus funciones están las de: (1) genera y suministra toda la energía eléctrica a los demás subsistemas, (2) distribuye y controla la energía eléctrica de acuerdo a las necesidades de los subsistemas y (3) capta y almacena está para su posterior uso.

Para poder captar la energía es necesario el uso de celdas solares que son dispositivos que convierten la energía proveniente de sol en energía eléctrica mediante en efecto fotoeléctrico; para almacenar la energía de las celdas solares se necesitan baterías que cumplen la función, son dispositivos que contienen celdas electroquímicas, convierten la energía química en energía eléctrica [29].

Las posibles fuentes de EMI en este subsistema pueden ser las celdas solares, las baterías y la forma en que se necesite proveer la energía, siendo esta última la causa más propensa a ser fuente de EMI; (1) distribuye la energía eléctrica a los demás subsistemas a través del cableado por lo que puede generar EMI, (2) en caso de que se necesite corriente alterna (AC, por sus siglas en inglés) o corriente directa (DC, por sus siglas en inglés) para algún elemento del satélite, se utilizan convertidores de AC o DC que, dependiendo de su diseño, también pueden generar EMI.

---

Todos los dispositivos que forma parte del control y regulación del subsistema se agrupan en una PCB por lo que su análisis de EMC es importante para localizar las posibles fuentes de EMI.

### **3.5. Subsistema Térmico.**

Esta encargado de mantener la temperatura por debajo de los límites permitidos de todo el satélite y los sistemas durante toda la misión; todos los equipos y componentes tienen un intervalo de temperatura de operación en el cual se garantiza su correcto funcionamiento, si está por debajo o por arriba de este intervalo, el subsistema debe regresarlos a su temperatura de operación.

Las técnicas que se encargan de cumplir con las funciones del subsistema son de dos tipos: **pasivos** que utilizan dispositivos como mantas, capas o acabados superficiales que permiten mantener a los sistemas del satélite a su temperatura de operación.

También existen los del tipo **activos**, que son básicamente un control de temperatura que con la ayuda de calefactores o enfriadores, mantienen a los sistemas en su temperatura de operación; si la temperatura está por debajo de la temperatura de operación, se activan los calefactores y viceversa, si la temperatura está por arriba de la temperatura de operación, se activarán los enfriadores, hasta regresar a la temperatura de operación. Debido a que el satélite se encuentra en el espacio exterior, el entorno no es el mismo que en la tierra, está expuesto a radiación solar u otros astros que puede acoplarse al satélite [29].

Las principales fuentes de EMI en este subsistema pueden ser las técnicas del tipo activo, en el cual el dispositivo puesto a prueba y análisis es el controlador de temperatura, el cual se puede hacer con componentes electrónicos colocados y agrupados en una PCB. Para las técnicas del tipo pasivo, los materiales utilizados también deben tener las propiedades idóneas para reflejar y absorber las fuentes de EMI por lo que dependerá de los materiales se escojan.

### **3.6. Subsistema de Estructuras y Mecanismos.**

Son todos los componentes mecánicos y estructuras que ayudarán a sostener y unir todos los demás subsistemas en el orden correcto. En su diseño deben involucrarse todas las áreas para asegurarnos de cubrir todas las especificaciones, diseños, pruebas y necesidades de la misión. Es el subsistema más grande y en donde se colocan todos los demás subsistemas por lo que se debe tener en cuenta el tipo de material que se va hacer y sus propiedades, construcción, tamaño y el entorno.

Comúnmente se puede dividir en una estructura primaria es la que sostiene los subsistemas importantes mientras que una estructura secundaria sostiene los cables que conectan los subsistemas, propulsores, puertas y componentes de menor peso [29].

Las características importantes a tomar en cuenta, desde el punto de vista de EMC son; la estructura debe proteger a los subsistemas de las posibles interferencias radiadas que se encuentren en el espacio (blindaje del satélite), ya que la energía EM se puede acoplar a estos y alterar su funcionamiento.

---

Los subsistemas que necesiten una referencia a tierra (GND) se conectan a una parte de la estructura, el diseño de GND de los subsistemas está relacionado con la creación de EMI, un mal diseño implica la generación de campos EM que pueden afectar a los subsistemas contenidos en la estructura primaria.

### **3.7. Subsistema de Guía y Navegación.**

Se refiere a los elementos que permiten obtener información de cómo está el satélite respecto a su órbita, posición y velocidad, permiten hacer los ajustes necesarios para mantenerla bajo las condiciones predeterminadas. Los satélites deben al menos cubrir los siguientes aspectos en cuestión guía y navegación: (1) mantener el satélite en la órbita elegida, (2) mantenerlo a la altura determinada y (3) mantenerlo en una posición fija hacia la tierra [29].

Hay dos tipos de navegación: desde la estación en tierra a través de indicaciones y comandos que son transmitidos hacia la plataforma satelital, o navegación autónoma realizada por una computadora a bordo, sensores y actuadores que determinan la órbita, posición y velocidad.

Los elementos a considerar como posibles fuentes de EMI son; para realizar navegación autónoma se necesita de una computadora a bordo junto con los dispositivos electrónicos necesarios agrupados en una PCB, por lo que se debe realizar un análisis de EMC para localizar las fuentes de EMI en la PCB. Para realizar navegación desde la estación en tierra se necesita del subsistema de telemetría, rastreo y mando para recibir los comandos que permiten realizar las maniobras necesarias.

### **3.8. Carga útil.**

Es la parte más importante que, dependiendo de la misión espacial, es el encargado de cumplir los objetivos de esta. Puede ser desde un equipo de medición, cámaras, telescopios, un sistema más sofisticado para medir o detectar, y hasta llevar humanos.

Todos los subsistemas son diseñados para que la carga útil pueda satisfacer todos los requisitos de la misión y también para llegar hasta su vida útil.

En la carga útil, su análisis de EMC va a depender de los dispositivos e instrumentación que utilice además de la electrónica utilizada para su funcionamiento.



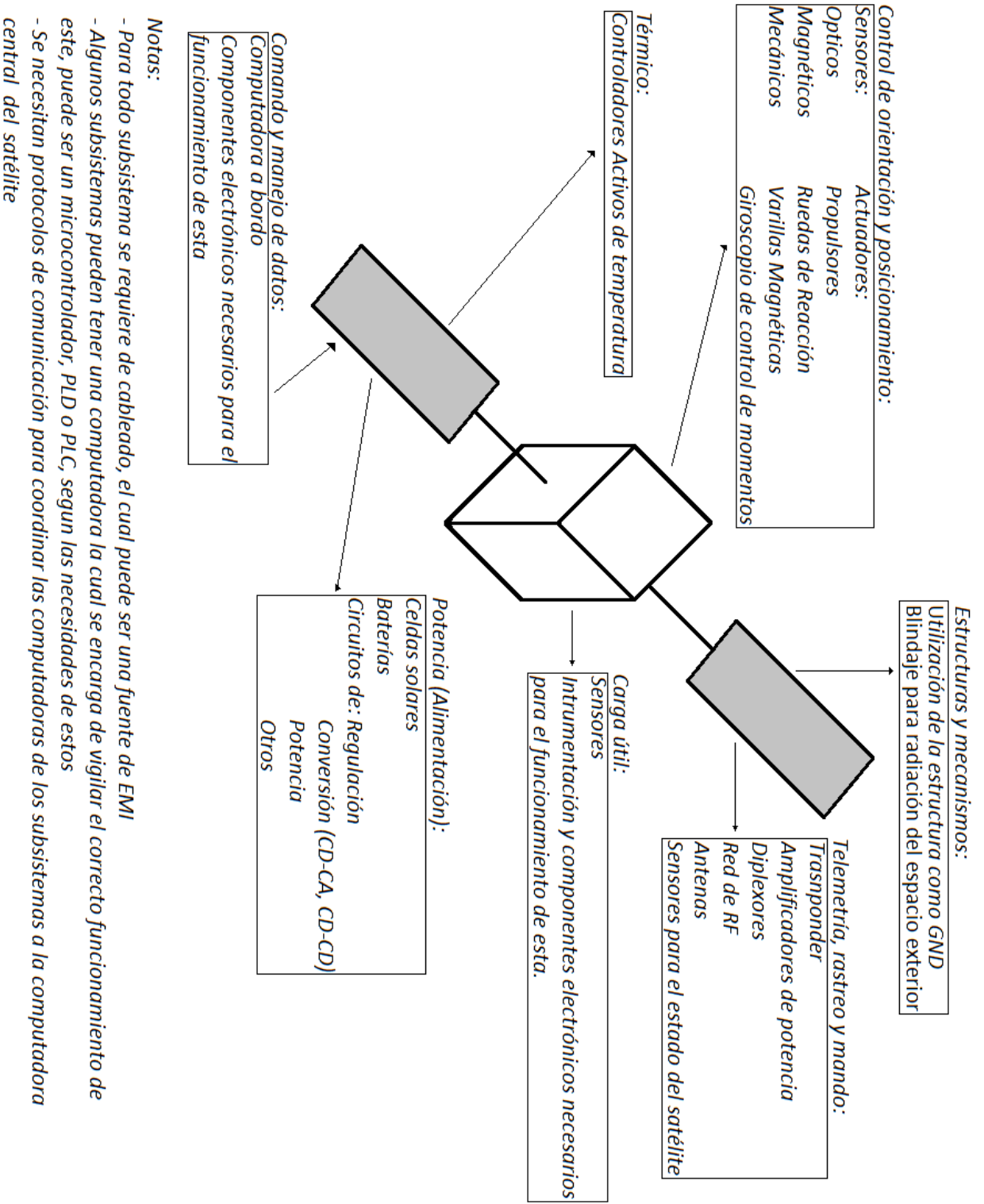


Figura 3.3. Subsistemas con los posibles elementos que pueden generar interferencia electromagnética.

---

La figura 3.3 resume e indica los subsistemas y sus elementos básicos que la conforman, la mayoría de ellos utilizan voltajes y corrientes para poder funcionar por lo que se originaran campos EM, también se debe considerar como una posible fuente de EMI el cableado que necesite para poder conectar todos los subsistemas y en ellos se puede acoplar ruido EM, además de que puede comportarse como un antena.

Se utilizan dispositivos lógicos programables, microcontroladores y controladores lógicos programables como computadoras a bordo en los subsistemas, estos utilizan circuitos temporizadores para funcionar a una frecuencia específica por lo que también pueden generar EMI.

Para establecer una comunicación con todos los subsistemas, se requieren de protocolos de comunicación, los cuales necesitan (la mayoría) cables para enviar los datos e información que requieran, como lo dicho anteriormente, puede ser una fuente de EMI.

### **3.9. Ambiente en una plataforma satelital.**

Debido a que la plataforma satelital se encontrará la mayor parte de su ciclo de vida en el espacio exterior, se debe tomar en cuenta el entorno en el cual va a funcionar. Principalmente se tienen fenómenos de radiación del planeta, del sol y radiación que producen otros astros cercanos a nuestro planeta. Hay que tomar en cuenta que la plataforma satelital tiene que estar diseñada para resistir y funcionar correctamente bajo todos estos fenómenos naturales.

Dependiendo de la órbita que se establezca para posicionar la plataforma satelital, se tiene que considerar el *clima espacial* en el diseño para que opere sin ningún problema. Los problemas de EMC debido al clima espacial dependerán de la estructura superficial del satélite; si está fabricada con materiales que pueden reflejar y absorber la radiación EM de las diversas fuentes naturales del espacio exterior (blindaje de la plataforma satelital).

Las órbitas se clasifican y básicamente hay tres [32]:

1. **LEO**, órbita baja terrestre (*Low Earth Orbit*, por sus siglas en inglés) que están a una altitud de *180 km a 2000 km*.
2. **MEO**, órbita media terrestre (*Medium Earth Orbit*, por sus siglas en inglés) que esta de *2000 km a 35 780 km* de altitud.
3. **HEO** (*High Earth Orbit*) o **GEO**, órbita geoestacionaria (*Geostationary Orbit*, por sus siglas en inglés) cuya altitud se encuentra a más de *35 780 km*.

Como la mayoría de los elementos que constituyen una plataforma satelital son eléctricos y/o electrónicos, dicho de otra forma, utilizan voltajes y corrientes para funcionar, generan campos EM los cuales se pueden calcular. Vamos a necesitar de algunos conceptos, herramientas y consideraciones para hacer los cálculos necesarios para obtener la intensidad de los campos EM bajo una cierta geometría, lo cuales se abordarán en el capítulo que sigue.

## CAPITULO 4.

Herramientas para calcular la intensidad de los campos EM.

Los parámetros que se necesitan para el análisis son: **voltajes, corrientes, impedancias, frecuencias de operación, potencia, dimensiones**. También es útil los tipos de cable que se usan, el voltaje y la corriente que transportan, el tipo de conexión a tierra que usa el sistema e incluso el protocolo de comunicación (si usa) que utiliza.

Una vez recolectado todos los parámetros del sistema, se puede calcular la intensidad de los campos EM, esto se logra haciendo una consideración importante, **que el sistema se comporta como una antena** que radia energía EM.

Básicamente hay dos tipos de antenas: la *antena lineal* (dipolo eléctrico) y la *antena cerrada o de lazo* (Loop antenna) [22]. Estos son los *elementos fundamentales* de campo eléctrico y campo magnético respectivamente.

Se pondrá énfasis en las ecuaciones de las componentes de campo EM para posteriormente analizarlas de acuerdo a la distancia en que se encuentre el sistema al punto donde se hace la medición y establecer los criterios adecuados.

#### 4.1. Elementos fundamentales de campos electromagnéticos.

Se define como elementos fundamentales a los campos EM radiados que se calculan de los dos tipos básicos antenas: la antena dipolo corto y la antena circular. La figura 4.1 muestra además de las antenas, las componentes que se originan para campo eléctrico (dipolo corto) y campo magnético (antena circular).

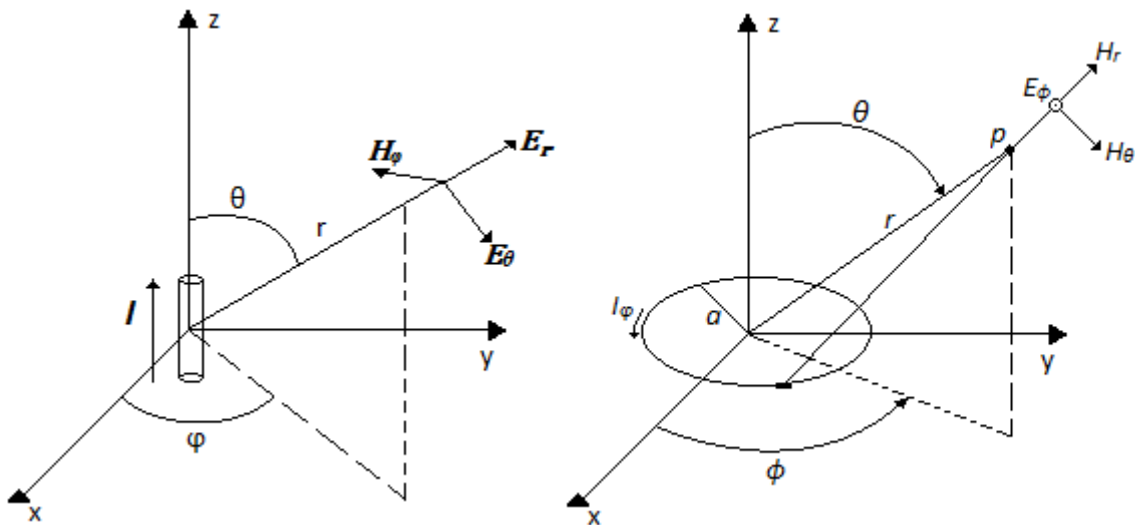


Figura 4.1. Dipolo lineal corto (izquierda) y dipolo cerrado (derecha) (Balanis C. 2006).

Para la antena de dipolo corto, el campo eléctrico es el que predomina más que el campo magnético, de ahí el concepto de elemento fundamental de campo eléctrico ( $\vec{E}$ ). Y en caso análogo, la antena circular, el campo magnético es el que predomina y por eso se llama elemento fundamental de campo magnético ( $\vec{H}$ ).

Para obtener sus ecuaciones se utilizan las **ecuaciones de Maxwell** para encontrar la intensidad de los campos  $\vec{E}$  y  $\vec{H}$  además del concepto de potenciales retardados como una facilidad para calcular los campos EM [25].

El procedimiento para calcularlos se encuentran en muchos libros de teoría de antenas, a continuación en la siguiente tabla se muestran las ecuaciones de cada uno de los elementos fundamentales [22]:

|   | <b>1. ELEMENTO FUNDAMENTAL <math>\bar{E}</math></b>  | <b>2. ELEMENTO FUNDAMENTAL <math>\bar{H}</math></b>   |
|---|--|---|
| <b>1. ECUACIONES COMPLETAS</b>  | $E_r = \frac{I l \eta}{2\pi} \left[ \frac{1}{r^2} + \frac{1}{jkr^3} \right] \cos \theta e^{-jkr}$ $E_\theta = \frac{I l \eta k}{4\pi} \left[ \frac{j}{r} + \frac{1}{kr^2} + \frac{1}{jk^2 r^3} \right] \sin \theta e^{-jkr}$ $E_\varphi = 0$ $H_r = H_\theta = 0$ $H_\varphi = \frac{I l k}{4\pi} \left[ \frac{j}{r} + \frac{1}{kr^2} \right] \sin \theta e^{-jkr}$ <p>Donde <math>l</math> es la longitud del dipolo.</p> | $H_r = \frac{I A k^3}{4\pi} \left[ \frac{2j}{k^2 r^2} + \frac{2}{k^3 r^3} \right] \cos \theta e^{-jkr}$ $H_\theta = \frac{I A k^3}{4\pi} \left[ -\frac{1}{kr} - \frac{j}{k^2 r^2} + \frac{1}{k^3 r^3} \right] \sin \theta e^{-jkr}$ $H_\varphi = 0$ $E_r = E_\theta = 0$ $E_\varphi = \frac{\eta I A k^3}{4\pi} \left[ \frac{1}{kr} + \frac{1}{jk^2 r^2} \right] \sin \theta e^{-jkr}$ <p>Donde <math>A = \pi a^2</math> es el área de la antena.</p> |
| <b>2. ZONA CERCANA</b>  | $E_r = \frac{I l \eta}{2\pi} \left[ \frac{1}{jkr^3} \right] \cos \theta e^{-jkr}$ $E_\theta = \frac{I l \eta}{4\pi} \left[ \frac{1}{jkr^3} \right] \sin \theta e^{-jkr}$ $H_\varphi = \frac{I l}{4\pi} \left[ \frac{1}{r^2} \right] \sin \theta e^{-jkr}$  | $H_r = \frac{I A}{2\pi} \left[ \frac{1}{r^3} \right] \cos \theta e^{-jkr}$ $H_\theta = \frac{I A}{4\pi} \left[ \frac{1}{r^3} \right] \sin \theta e^{-jkr}$ $E_\varphi = \frac{\eta I A k}{4\pi} \left[ \frac{1}{jr^2} \right] \sin \theta e^{-jkr}$   |
| <b>3. ZONA LEJANA</b>   | $E_r = \frac{I l \eta}{2\pi} \left[ \frac{1}{r^2} \right] \cos \theta e^{-jkr} \Rightarrow E_r \approx 0$ $E_\theta = \frac{I l \eta k}{4\pi} \left[ \frac{j}{r} \right] \sin \theta e^{-jkr}$ $H_\varphi = \frac{I l k}{4\pi} \left[ \frac{j}{r} \right] \sin \theta e^{-jkr}$ $Z_w = \frac{E_\theta}{H_\varphi} = \eta, \text{ onda TEM}$  | $H_r = \frac{I A k}{2\pi} \left[ \frac{j}{r^2} \right] \cos \theta e^{-jkr} \Rightarrow H_r \approx 0$ $H_\theta = -\frac{I A k^2}{4\pi} \left[ \frac{1}{r} \right] \sin \theta e^{-jkr}$ $E_\varphi = \frac{\eta I A k^2}{4\pi} \left[ \frac{1}{r} \right] \sin \theta e^{-jkr}$ $Z_w = -\frac{E_\varphi}{H_\theta} = \eta, \text{ onda TEM}$  |
| $\omega = 2\pi f, k = \frac{2\pi}{\lambda}, \lambda = \frac{c}{f}, c = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}, \eta = 120\pi$ |  |   |

**Tabla 4.2. Ecuaciones de los elementos fundamentales de E y H (Balanis C. 2006).**

En las ecuaciones aparecen parámetros como el número de onda y la impedancia de la onda EM ( $k$  y  $\eta$  respectivamente) que a su vez, implícitamente se encuentran la frecuencia angular  $\omega$ , la longitud de onda  $\lambda$  y la constante de la velocidad de la luz en el vacío  $c$ , se mencionan y se muestran porque serán útiles a la hora de realizar los cálculos de las intensidades de los campos EM.

Una consideración importante en la teoría de antenas es analizar las zonas en las que trabaja nuestro sistema, con esto se puede elegir que ecuaciones son las adecuadas para calcular las intensidades de campo EM.

Una vez calculadas las intensidades de los campos EM de los elementos fundamentales de  $\vec{E}$  y  $\vec{H}$  se establece una región la cual va a estar relacionada con los parámetros de los subsistemas que se están analizando puesto que ellos va a determinar lo que se conoce como **zona lejana** o **zona cercana**.

La relación que define la zona es  $\frac{\lambda}{2\pi}$ , que comparándola con una distancia  $r$  (distancia donde se localiza la medición a partir de la fuente de perturbación EM), se puede establecer la zona y los procedimientos indicados para resolver los problemas que se presenten [1]:

- Para valores menores a  $\frac{\lambda}{2\pi}$ , se definirá como **zona cercana**; en esta zona los campos EM son inducidos y estos se pueden analizar por separado puesto que su relación NO es constante. El análisis indicado para este tipo de zona es la **teoría de circuitos**; se considera a todos los campos eléctricos que su acoplamiento es **capacitivo**, o sea, que se pueden “ver” como capacitores, y a los campos magnéticos que su acoplamiento es **inductivo**, es decir, que los vamos a representar como inductores.
- Para valores mayores a  $\frac{\lambda}{2\pi}$ , se definirá como **zona lejana**; consideramos que los campos EM se transmiten en forma de radiación así que se pueden analizar juntos puesto que su relación SI es constante. La forma recomendada de analizar esta zona es a través de la **teoría electromagnética**; como en los casos de los elementos fundamentales de  $\vec{E}$  y  $\vec{H}$ , se utilizan las ecuaciones de Maxwell para calcular la intensidad de los campos EM radiados.

La relación entre el campo eléctrico  $\vec{E}$  y el campo magnético  $\vec{H}$  se conoce como **impedancia de la onda** ( $\eta$  o  $Z_w$ ) y su valor en el espacio libre o el vacío es de 377 [ $\Omega$ ]:

$$\frac{\vec{E}}{\vec{H}} = Z_w = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = 120\pi = 377[\Omega]_{vacio}$$

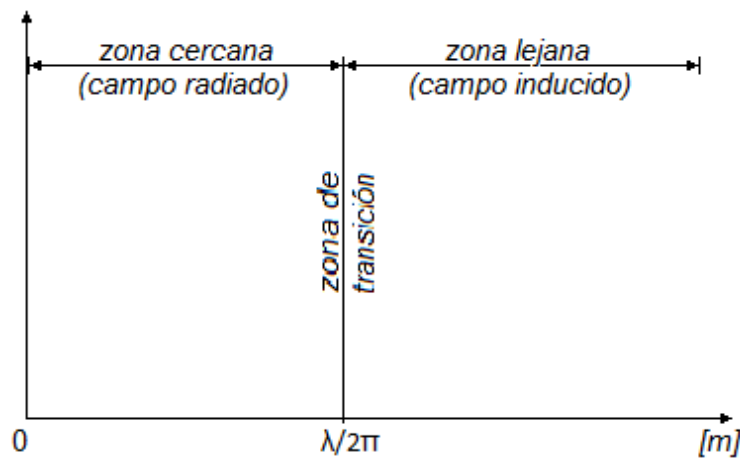


Figura 4.3. Diagrama de zonas, dependiendo de donde se encuentre la fuente EM, por debajo o por delante de la relación de zona  $\frac{\lambda}{2\pi}$ , podremos definir en qué zona se localiza (Ott H. 2009).

---

En la figura 4.3 se observa que a través de la relación de zona, vamos a definir de acuerdo a la distancia en que se haga el análisis, en que zona se localiza y las ecuaciones que se usan para calcular la intensidad de campos EM.

## 4.2. Calculo de la intensidad de los campos EM.

### 4.2.1. Campo eléctrico $\bar{E}$ .

Para realizar los cálculos de este campo eléctrico se utilizan las ecuaciones de elemento fundamental de  $\bar{E}$ . Regresando al tema, como punto de partida se tiene un filamento de una longitud muy pequeña, consideración que sirve para calcular las ecuaciones de los campos EM, pero, ¿Cómo hacer esta consideración para un sistema que no tiene esa característica? Se tiene que encontrar una forma de relacionar esta parte con la de nuestro sistema:

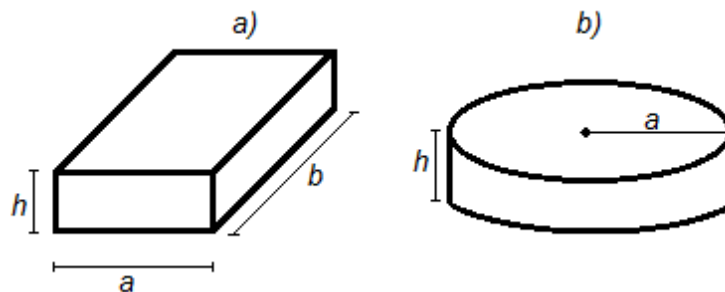


Figura 4.4. Consideraciones para calcular la intensidad de los campos EM.

El sistema tiene dimensiones, si el sistema tiene la forma como alguna de la figura 4.4, tiene lados y una altura, se va a suponer que, en el cálculo de la intensidad de campo eléctrico  $\bar{E}$  es de la forma que tiene la antena dipolo eléctrico y la longitud "l" es la altura "h" como lo muestra la figura 4.5:

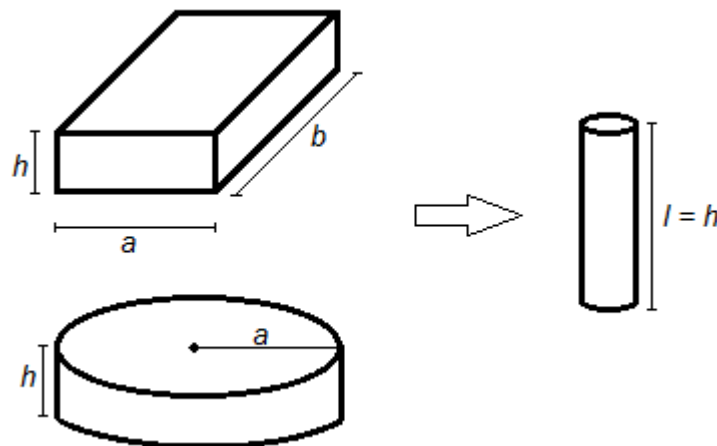


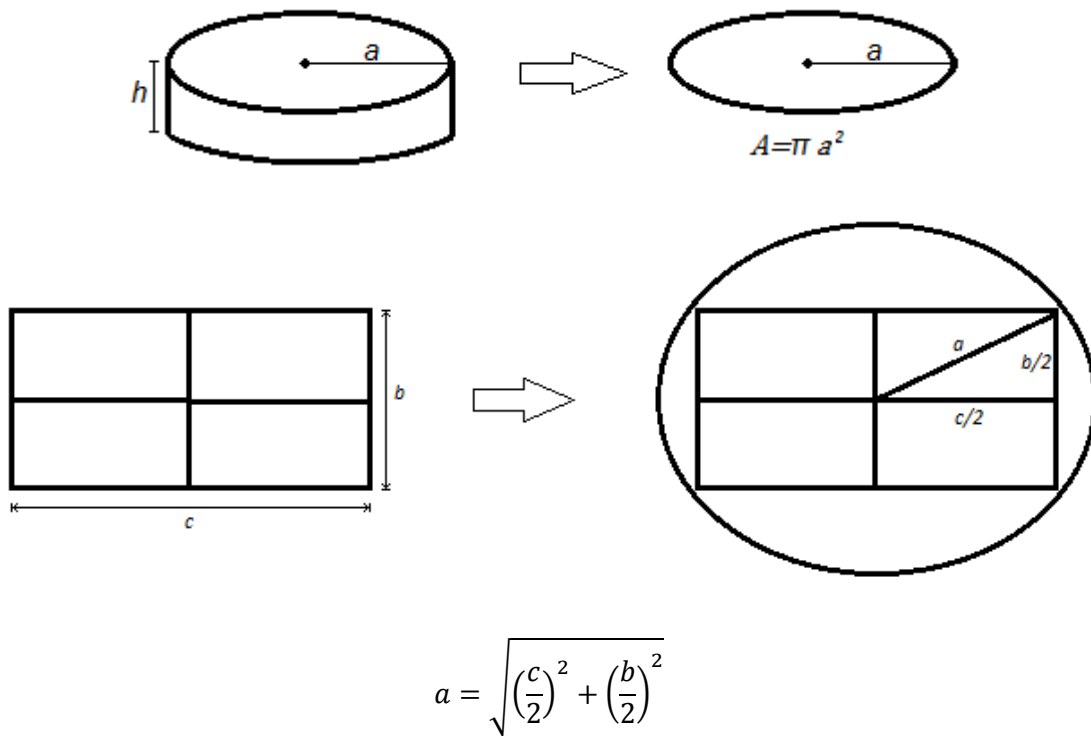
Figura 4.5. La altura 'h' de los dos ejemplos es la que se utiliza para el cálculo de  $\bar{E}$ .

Esta suposición permite calcular la intensidad de los campos eléctricos que se difunden. Una consideración muy importante es *utilizar la altura "h" máxima del sistema* debido a que se debe calcular precisamente la máxima intensidad de campo  $\vec{E}$ .

#### 4.2.2. Campo magnético $\vec{H}$ .

En el caso anterior que se utilizan las ecuaciones de elemento fundamental de  $\vec{E}$  ( $E\vec{F}\vec{E}$ , abreviado) para encontrar los campos eléctricos, se utilizan las ecuaciones de elemento fundamental de  $\vec{H}$  ( $E\vec{F}\vec{H}$ , abreviado) para calcular la intensidad de campo magnético.

El punto de partida es nuevamente una suposición similar a la anterior pero con la diferencia de que *se utiliza el área* de los sistemas para encontrar los campos magnéticos:



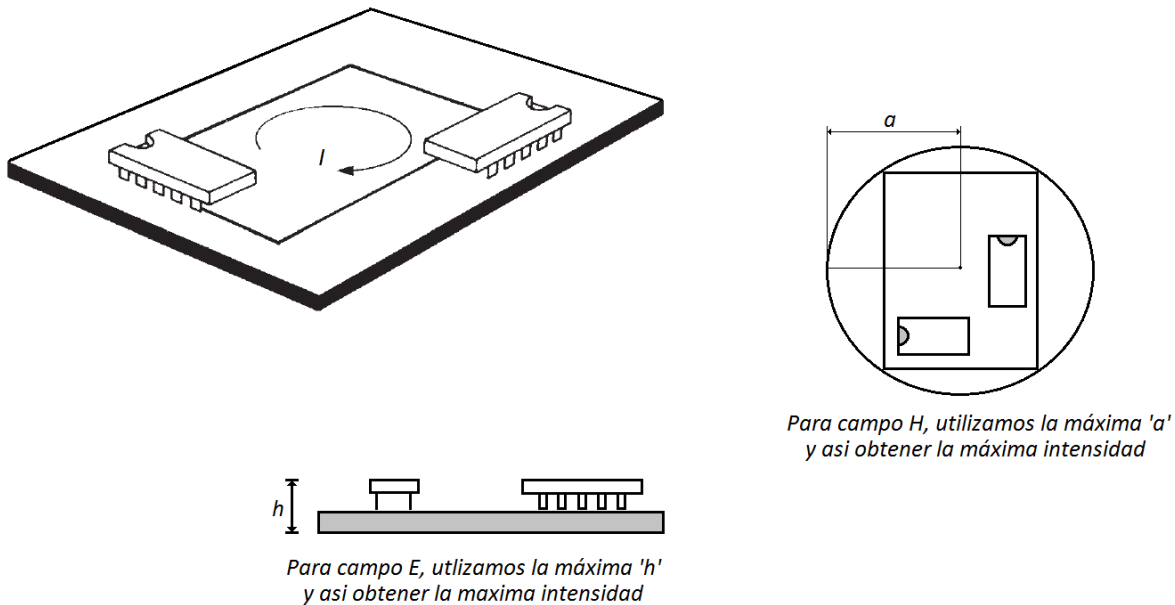
**Figura 4.6. Utilizamos su área 'a' para calcular la intensidad de campo  $\vec{H}$ .**

En este caso no consideramos la variable  $h$  del sistema así como tampoco se utiliza el área de este en la obtención de los campos eléctricos debido a que en las ecuaciones se observa que solo se necesitan esos datos (la altura "h" para el cálculo del campo eléctrico y el área "A" para el cálculo de los campos magnéticos), es por eso que se utilizan las consideraciones.

La figura 4.6 también muestra que se hará una consideración para sistema que tenga forma rectangular cuya área será calculada por la ecuación que viene en la figura.

De igual forma que para el cálculo de la intensidad de campo  $\vec{E}$ , para el cálculo de la intensidad de campo  $\vec{H}$  se utiliza el área máxima porque se quiere obtener sus valores máximos.





**Figura 4.7. Ejemplo para considerar las dimensiones en el cálculo de  $EF\bar{E}$  y  $EF\bar{H}$  (Ott H. 2009).**

En la figura 4.7 se muestra un ejemplo de una PCB en forma rectangular y las consideraciones para utilizar la *altura h* y el *área a*.

Hasta ahora se tienen las ecuaciones de los campos EM, falta recabar los parámetros que van a ayudar a obtener la intensidad de estos.

Los datos que se necesitan son: la frecuencia de operación del sistema a analizar, la corriente y el voltaje de operación y sus dimensiones.

Anteriormente se hizo un formato para poder recabar esta información, como una manera más fácil de tener a la mano estos parámetros. El formato que se presenta en los anexos (ubicado al final de este trabajo) se utilizará para contener los valores de un *prototipo de un sistema de adquisición de datos para una plataforma satelital*, la cual se le realizará un análisis de EMC-RE.

Con esta información, ahora se puede proponer un protocolo de análisis de EMC para emisiones radiadas. Cabe mencionar que el protocolo se puede dividir en una parte teórica, que incluye la realización de los cálculos necesarios para establecer una estimación de cuanta energía EM radiada emite con la ayuda de los conceptos, consideraciones y herramientas mencionados en este capítulo. La otra parte del protocolo será experimental; se realizarán pruebas de EMC-RE basado en el estándar MIL-STD 461 con la instrumentación y el lugar que indica.

Los resultados de los cálculos se muestran en el siguiente capítulo.

## CAPITULO 5.

Análisis teórico al sistema de  
adquisición de datos.

Para este trabajo se utilizará un programa de cómputo para calcular y también graficar las intensidades de los campos EM en función de la *posición* ( $r$ ) del sistema de adquisición de datos.

Ahora que se tiene los contenidos y las herramientas para realizar y encontrar la intensidad de los campos EM, se procede a desarrollar la propuesta del protocolo teórico para cumplir una parte de los objetivos:

### 5.1. Obtención de campos EM radiados.

Lo primero que se debe realizar para obtener los campos EM, como se ha mencionado anteriormente, es conseguir los parámetros del sistema a analizar, incluidas las dimensiones de este. Una vez obtenidos los parámetros, vamos a usar el programa de cómputo para obtener los valores de los campos EM y sus gráficas.

### 5.2. Campos EM vs la posición $r$ .

Es importante ver cómo es la variación de los campos EM en función de la posición de la medición de estos, aunque se puede hacer una suposición si se observa y analiza las ecuaciones de los elementos fundamentales  $\vec{E}$  y  $\vec{H}$ .

Se observa de las ecuaciones y se puede deducir que son inversamente proporcionales a la posición del punto  $p$ , localizado a una distancia  $r$  como lo muestra la figura 4.1, por lo que se puede decir su magnitud va a decaer conforme  $r$  sea más grande. Pero es mejor verlo gráficamente.

Con las ecuaciones de los elementos fundamentales se calculan las intensidades de los campos EM, para diferenciar la zona en que se encuentre nuestro sistema y utilizar las ecuaciones indicadas se utilizará la relación de zona.

Para este caso de estudio el sistema a analizar se ha desarrollado con tarjetas de desarrollo; *Raspberry Pi* [38], un *Arduino UNO* [37] y los *módulos XBEE* [39] principalmente, sistemas a considerar como fuentes de EMI por lo que se deben obtener sus parámetros de diseño, que se muestran en las tablas siguientes.

| Rasberry Pi.                               |                          |
|--|--------------------------|
| <b>Voltaje.</b>                            | $V = 5[V]$               |
| <b>Corriente.</b>                          | $I = 1[A]$               |
| <b>Frecuencia.</b>                         | $f = 700 [MHz]$          |
| <b>Dimensiones (largo X ancho X alto).</b> | 8.5 cm X 5.6 cm X 1.5 cm |

| Arduino UNO                                |                          |
|--|--------------------------|
| <b>Voltaje.</b>                            | $V = 5[V]$               |
| <b>Corriente.</b>                          | $I = 50[mA]$             |
| <b>Frecuencia.</b>                         | $f = 16 [MHz]$           |
| <b>Dimensiones (largo X ancho X alto).</b> | 6.9 cm X 5.4 cm X 1.3 cm |

Tabla 5.1. Datos de los elementos a analizar.

Se establece un punto  $r = 1[m]$  como referencia, con los datos del subsistema se va calcular la relación de zona:

### 5.2.1. Raspberry Pi:

$$f = 700[MHz], \quad I = 1 [A], \quad l = 1.5 [cm],$$

$$a = \sqrt{\left(\frac{8.5[cm]}{2}\right)^2 + \left(\frac{5.6[cm]}{2}\right)^2} = 5.09[cm]$$

Aplicando en criterio de  $\frac{\lambda}{2\pi}$ :

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 \left[\frac{m}{s}\right]}{700 \times 10^6 \left[\frac{1}{s}\right]} = 0.428 [m] \Rightarrow \frac{\lambda}{2\pi} = \frac{0.428[m]}{2\pi} = 0.068 [m] \approx 7[cm]$$

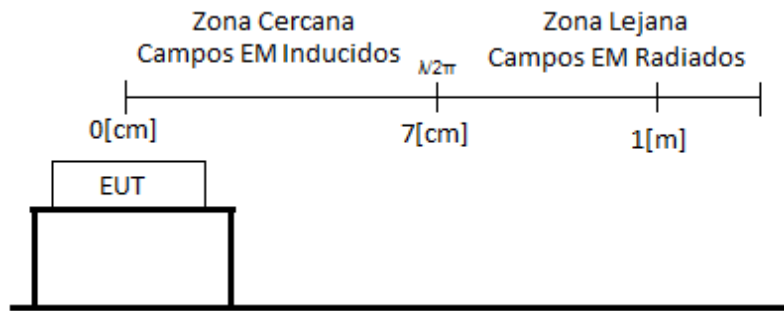


Figura 5.2. Relación de Zona para la tarjeta Raspberry Pi.

Calculando la relación de zona se define en donde se encuentra la zona de transición que para el caso de la tarjeta Raspberry Pi es en  $7[cm]$  como se observa en la figura 5.2 lo que indica que a partir de este valor en adelante se considera que las mediciones se hacen en zona lejana y las ecuaciones que se deben utilizar para obtener la intensidad de los campos EM serán las de la tabla 4.2 anteriormente mostrada (específicamente 1.3 y 2.3), mientras que para los valores menores a  $7[cm]$  se considera zona cercana y las ecuaciones serán las de la tabla 1.2 y 2.2.

Como se propuso un punto  $r = 1[m]$  se puede afirmar que se encuentra en *zona lejana* por lo que las ecuaciones que se deben usar para calcular la intensidad de campo eléctrico son las siguientes:

Elemento fundamental de  $\vec{E}$  para la frecuencia  $700 MHz$  y considerando los ángulos para obtener la máxima intensidad de cada uno de los campos:

$$E_r = \frac{I l \eta}{2\pi} \left[ \frac{1}{r^2} \right] \cos \theta e^{-jkr} \Rightarrow E_r \approx 0$$

$$E_\theta = \frac{I l \eta k}{4\pi} \left[ \frac{j}{r} \right] \sin \theta e^{-jkr} = \frac{I l \eta k}{4\pi r} \sin \theta e^{-jkr}$$

$$H_\phi = \frac{I l k}{4\pi} \left[ \frac{j}{r} \right] \sin \theta e^{-jkr} = \frac{I l k}{4\pi r} \sin \theta e^{-jkr}$$

Elemento fundamental de  $\bar{H}$  para la frecuencia inicial y  $A = \pi a^2$ :

$$H_r = \frac{I A k}{2\pi} \left[ \frac{j}{r^2} \right] \cos \theta e^{-jkr} \Rightarrow H_r \approx 0$$

$$H_\theta = -\frac{I A k^2}{4\pi} \left[ \frac{1}{r} \right] \sin \theta e^{-jkr} = \frac{I a^2 k^2}{4r} \sin \theta e^{-jkr}$$

$$E_\varphi = \frac{\eta I A k^2}{4\pi} \left[ \frac{1}{r} \right] \sin \theta e^{-jkr} = \frac{\eta I a^2 k^2}{4r} \sin \theta e^{-jkr}$$

Consideraciones:

- $-j$ , implica un desfase de la onda pero como se está tomando la magnitud (módulo), este término se vuelve 1.
- $\theta$ , es el ángulo de posición con el cual se establece la máxima intensidad de campo EM;  $0^\circ$  y  $90^\circ$ ,  $\cos 0^\circ = 1$  y  $\sin 90^\circ = 1$ .
- $e^{-jkr}$ , es la dirección de propagación de la onda.
- De acuerdo a la relación de zona, nos encontramos en zona lejana, por lo que utilizamos las ecuaciones 1.3 y 2.3 de la tabla 4.2.

Calculando  $k$ :

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{0.428 [m]} = 14.66 [rad/m]$$

Para  $r = 1[m]$ :

Elemento fundamental de  $\bar{E}$ .

$$E_\theta = \frac{I l \eta k}{4\pi r} \sin \theta = \frac{(1 [A])(1.5 [cm])(120\pi[\Omega])(14.66 \left[ \frac{rad}{m} \right])}{4\pi(1[m])} \sin 90^\circ = 6.5975 [V/m]$$

$$H_\varphi = \frac{I l k}{4\pi r} \sin \theta = \frac{(1 [A])(1.5 [cm])(14.66 \left[ \frac{rad}{m} \right])}{4\pi(1[m])} \sin 90^\circ = 0.0175 [A/m]$$

Elemento fundamental de  $\bar{H}$ :

$$H_\theta = \frac{I a^2 k^2}{4r} \sin \theta = \frac{(1 [A])(5.09 [cm])^2(14.66 \left[ \frac{rad}{m} \right])^2}{4(1[m])} \sin 90^\circ = 0.1392 [A/m]$$

$$E_\varphi = \frac{\eta I a^2 k^2}{4r} \sin \theta = \frac{(120\pi[\Omega])(1 [A])(5.09 [cm])^2(14.66 \left[ \frac{rad}{m} \right])^2}{4(1[m])} \sin 90^\circ = 52.4844 [V/m]$$

Los resultados de las gráficas se encuentran en las unidades  $dB\mu V/m$  porque lo establece el estándar; con la siguiente ecuación se hizo la conversión del valor en unidades  $V/m$  para campo  $\vec{E}$  a las mencionadas.

$$X [dB\mu V/m] = 20 \log_{10} \frac{x [V/m]}{1 [\mu V]}$$

También para campo magnético  $\vec{H}$  se tiene su ecuación, es igual a la de campo  $\vec{E}$  pero como en el estándar las unidades se encuentran en  $dBpT$ ; obtenemos el valor de campo  $\vec{H}$  en  $dB\mu A/m$  y con otra ecuación la transformamos a las unidades requeridas.

$$Y [dB\mu A/m] = 20 \log_{10} \frac{y[A/m]}{1[\mu A]}, \quad dBpT = Y [dB\mu A/m] + 2$$

Utilizando las ecuaciones anteriores, convertimos los valores de intensidad de  $\vec{E}$  y  $\vec{H}$ :

Elemento fundamental de  $\vec{E}$ :

$$E_{\theta} [dB\mu V/m] = 20 \log_{10} \frac{6.5975 \left[ \frac{V}{m} \right]}{1 [\mu V]} = 136.3876 [dB\mu V/m]$$

$$H_{\phi} [dB\mu A/m] = 20 \log_{10} \frac{0.0175 \left[ \frac{A}{m} \right]}{1[\mu A]} = 84.8608 [dB\mu A/m],$$

$$dBpT = 84.8608 [dB\mu A/m] + 2 = 86.8608 [dBpT]$$

Elemento fundamental de  $\vec{H}$ :

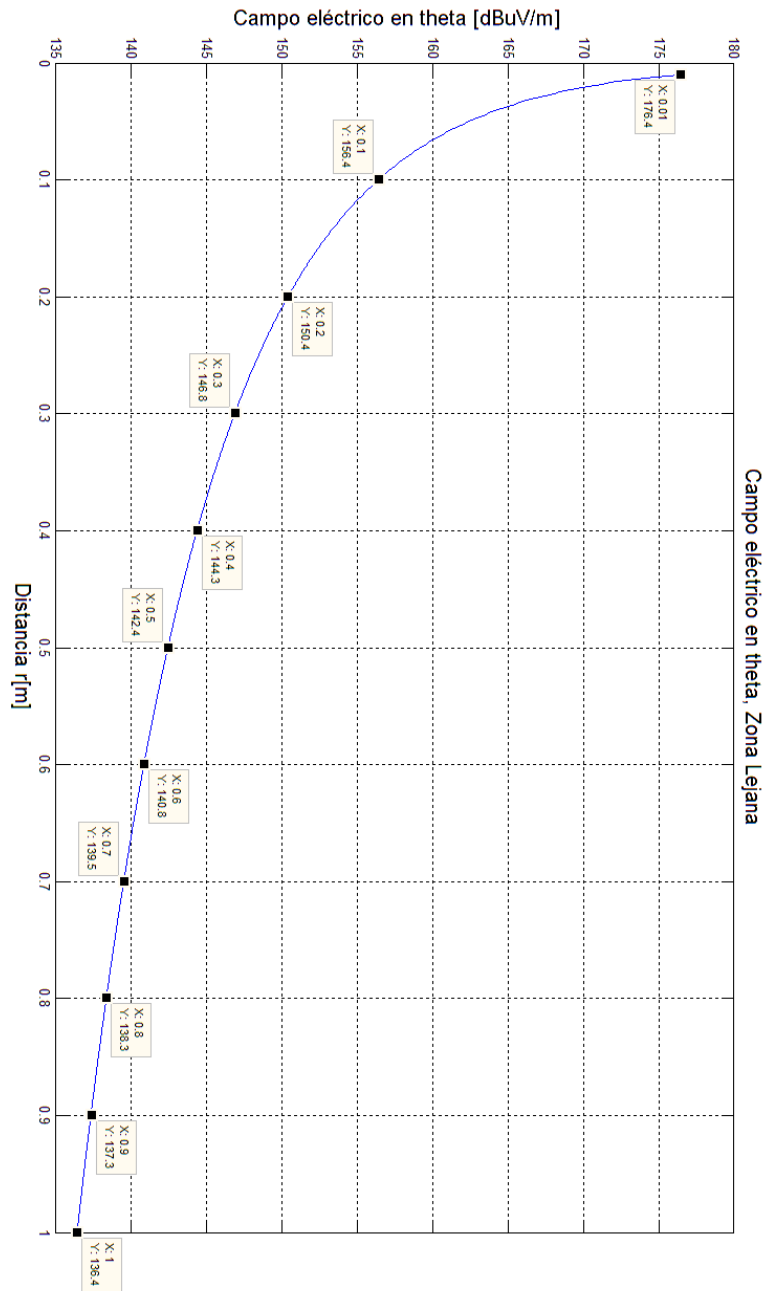
$$H_{\theta} \left[ \frac{dB\mu A}{m} \right] = 20 \log_{10} \frac{0.1392 \left[ \frac{A}{m} \right]}{1[\mu A]} = 102.8738 [dB\mu A/m],$$

$$dBpT = 102.8738 [dB\mu A/m] + 2 = 104.8738 [dBpT]$$

$$E_{\phi} [dB\mu V/m] = 20 \log_{10} \frac{52.4844 \left[ \frac{V}{m} \right]}{1 [\mu V]} = 154.4006 [dB\mu V/m]$$

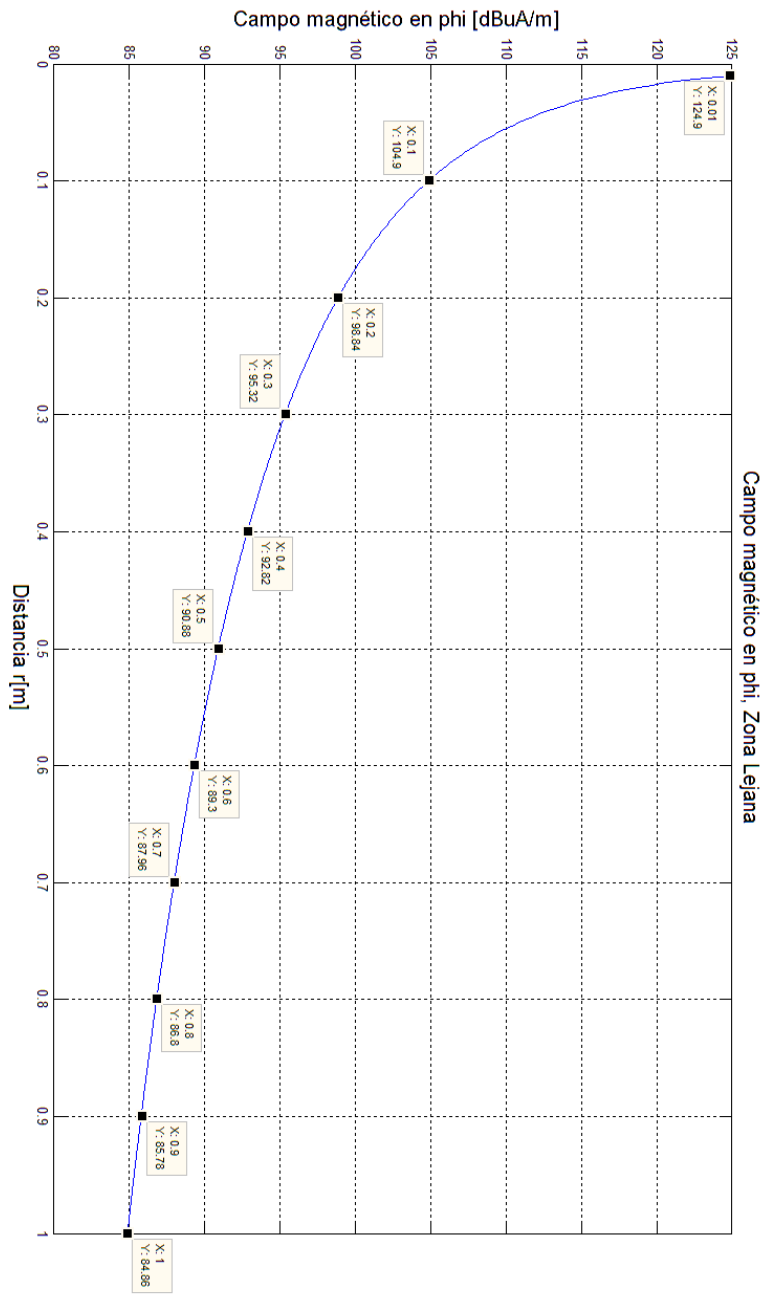
Las gráficas se muestran en las siguientes figuras e incluye una tabla que contiene las intensidades para cada  $10 \text{ cm}$ :

### 5.2.1.1. Elemento fundamental de $\vec{E}$ :



| r [m]                    | 0.1   | 0.2   | 0.3   | 0.4   | 0.5   | 0.6   | 0.7   | 0.8   | 0.9   | 1     |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $E_{\theta}$<br>[dBuV/m] | 156.4 | 150.4 | 146.8 | 144.3 | 142.4 | 140.8 | 139.5 | 138.3 | 137.3 | 136.4 |

Figura 5.2.1. Elemento fundamental de  $\vec{E}$ , Campo eléctrico en theta.

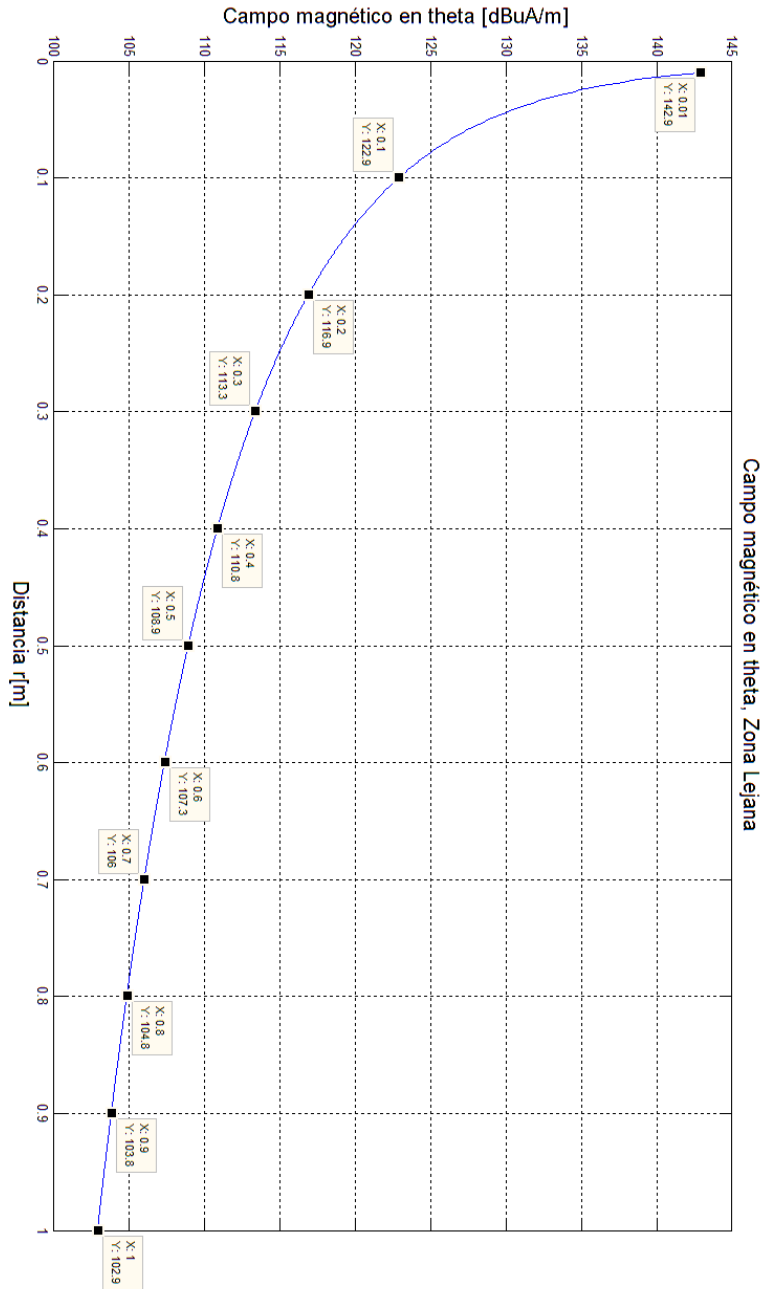


| r [m]               | 0.1   | 0.2   | 0.3   | 0.4   | 0.5   | 0.6  | 0.7   | 0.8  | 0.9   | 1     |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|-------|-------|
| $H_{\phi}$ [dBuA/m] | 104.9 | 98.84 | 95.32 | 92.82 | 90.88 | 89.3 | 87.96 | 86.8 | 85.78 | 84.86 |

Figura 5.2.2. Elemento fundamental de  $\bar{E}$ , Campo magnético en phi.

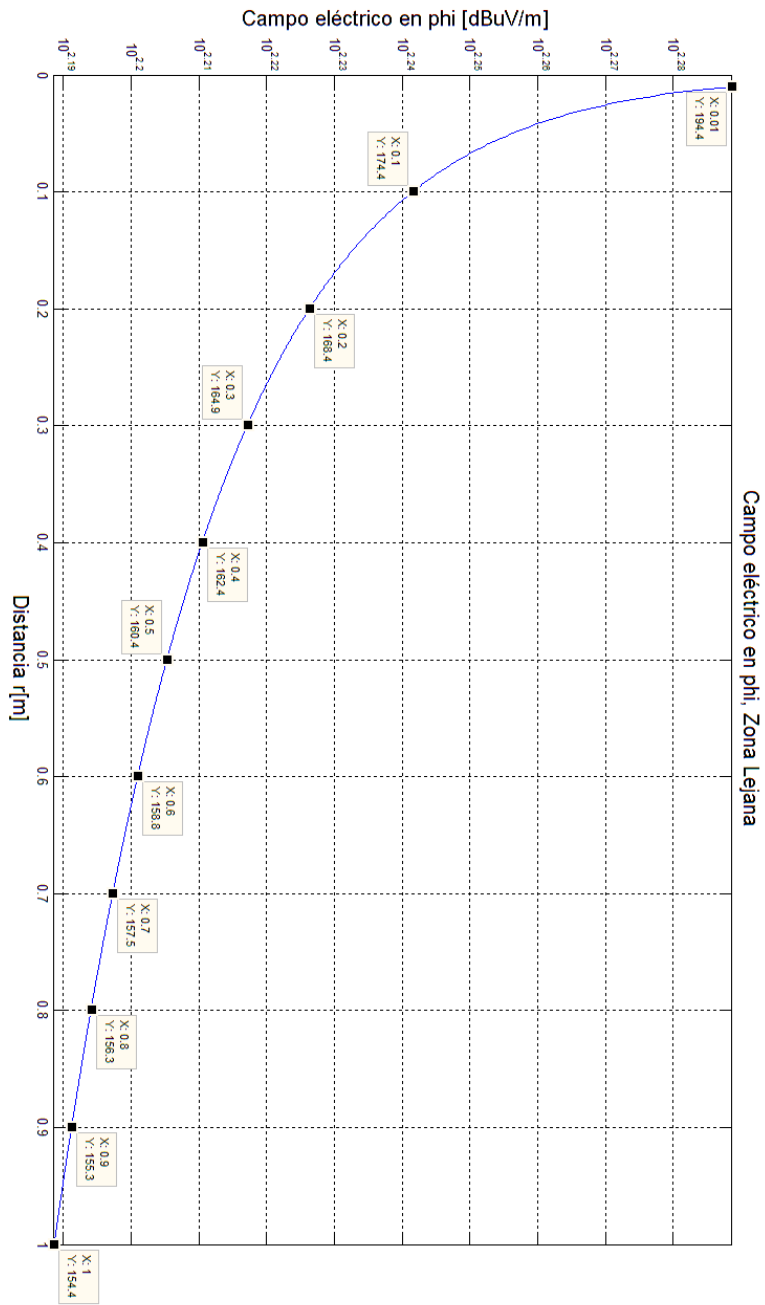


### 5.2.1.2. Elemento fundamental de $\bar{H}$ .



| r [m]                 | 0.1   | 0.2   | 0.3   | 0.4   | 0.5   | 0.6   | 0.7 | 0.8   | 0.9   | 1     |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|
| $H_{\theta}$ [dBuA/m] | 122.9 | 116.9 | 113.3 | 110.8 | 108.9 | 107.3 | 106 | 104.8 | 103.8 | 102.9 |

Figura 5.2.3. Elemento fundamental de  $\bar{H}$ , Campo magnético en theta.



| r [m]             | 0.1   | 0.2   | 0.3   | 0.4   | 0.5   | 0.6   | 0.7   | 0.8   | 0.9   | 1     |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $E_\phi$ [dBuV/m] | 174.4 | 168.4 | 164.9 | 162.4 | 160.4 | 158.8 | 157.5 | 156.3 | 155.3 | 154.4 |

Figura 5.2.4. Elemento fundamental de  $\vec{H}$ , Campo eléctrico en phi.

### 5.2.2. Arduino UNO:

Se realiza el mismo procedimiento que se utilizó pero ahora con los datos de la tarjeta de desarrollo Arduino UNO:

$$f = 16[\text{MHz}], \quad I = 50 [\text{mA}], \quad l = 1.3 [\text{cm}],$$

$$a = \sqrt{\left(\frac{6.9[\text{cm}]}{2}\right)^2 + \left(\frac{5.4[\text{cm}]}{2}\right)^2} = 4.38[\text{cm}] \approx 4.4[\text{cm}]$$

Aplicando en criterio de  $\frac{\lambda}{2\pi}$ :

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]}{16 \times 10^6 \left[\frac{1}{\text{s}}\right]} = 18.75 [\text{m}] \Rightarrow \frac{\lambda}{2\pi} = \frac{18.75[\text{m}]}{2\pi} = 2.9842 [\text{m}] \approx 3[\text{m}]$$

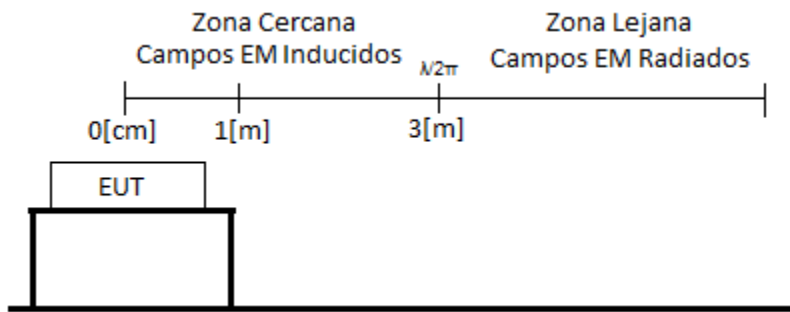


Figura 5.3. Relación de Zona para la tarjeta Arduino UNO.

Calculando la relación de zona se define en donde se encuentra la zona de transición, que para la tarjeta Arduino UNO Pi es en 3 [m] como se observa en la figura 5.3 lo que indica que a partir de este valor se considera que las mediciones se hacen en zona cercana y las ecuaciones que se deben utilizar para obtener la intensidad de los campos EM serán las de la tabla (1.2 y 2.2).

Calculando  $k$ :

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{18.75 [\text{m}]} = 0.3351 [\text{rad/m}]$$

Para  $r = 0.05[\text{m}]$ :

Elemento fundamental de  $\vec{E}$ .

$$E_r = \frac{I l \eta}{2\pi k r^3} \cos \theta = \frac{(0.05[\text{A}])(0.013[\text{m}])(377[\Omega])}{2\pi \left(0.3351\left[\frac{\text{rad}}{\text{m}}\right]\right) (1[\text{m}]^3)} \cos 0^\circ = 0.1164 [\text{V/m}]$$

$$E_r [\text{dB}\mu\text{V/m}] = 20 \log_{10} \frac{0.1164 \left[\frac{\text{V}}{\text{m}}\right]}{1 [\mu\text{V}]} = 101.3179 [\text{dB}\mu\text{V/m}]$$

$$E_{\theta} = \frac{I l \eta}{4\pi k r^3} \sin \theta = \frac{(0.05[A])(0.013[m])(377[\Omega])}{2\pi \left(0.3351 \left[\frac{\text{rad}}{\text{m}}\right]\right) (1[m]^3)} \sin 90^{\circ} = 0.0582[V/m]$$

$$E_{\theta} [dB\mu V/m] = 20 \log_{10} \frac{0.0582 \left[\frac{V}{m}\right]}{1 [\mu V]} = 95.2973[dB\mu V/m]$$

$$H_{\phi} = \frac{I l}{4\pi r^2} \sin \theta = \frac{(0.05[A])(0.013[m])}{4\pi (1[m]^2)} = 5.1725 \times 10^{-5} [A/m]$$

$$H_{\phi} [dB\mu A/m] = 20 \log_{10} \frac{5.1725 \times 10^{-5} \left[\frac{A}{m}\right]}{1 [\mu A]} = 34.2741[dB\mu A/m],$$

$$dBpT = 34.2741[dB\mu A/m] + 2 = 36.2741 [dBpT]$$

Elemento fundamental de  $\vec{H}$ :

$$H_r = \frac{I a^2}{2r^3} \cos \theta = \frac{(0.05[A])(0.044[m])^2}{2(1[m]^3)} \cos 0^{\circ} = 4.84 \times 10^{-5} [A/m]$$

$$\bar{H}_r \left[\frac{dB\mu A}{m}\right] = 20 \log_{10} \frac{4.84 \times 10^{-5} \left[\frac{A}{m}\right]}{1 [\mu A]} = 33.6969 [dB\mu A/m],$$

$$dBpT = 33.6969 [dB\mu A/m] + 2 = 35.6969[dBpT]$$

$$H_{\theta} = \frac{I a^2}{4r^3} \sin \theta = \frac{(0.05[A])(0.044[m])^2}{4(1[m]^3)} \sin 90^{\circ} = 2.42 \times 10^{-5} [A/m]$$

$$\bar{H}_{\theta} \left[\frac{dB\mu A}{m}\right] = 20 \log_{10} \frac{2.42 \times 10^{-5} \left[\frac{A}{m}\right]}{1 [\mu A]} = 27.6763 [dB\mu A/m],$$

$$dBpT = 27.6763 [dB\mu A/m] + 2 = 29.6763[dBpT]$$

$$E_{\phi} = \frac{\eta I a^2 k}{4r^2} \sin \theta = \frac{(377[\Omega])(0.05[A]) \left(0.3351 \left[\frac{\text{rad}}{\text{m}}\right]\right) (0.044[m])^2}{4(1[m]^2)} \sin 90^{\circ} = 0.0031[V/m]$$

$$E_{\phi} [dB\mu V/m] = 20 \log_{10} \frac{0.0031 \left[\frac{V}{m}\right]}{1 [\mu V]} = 69.7067[dB\mu V/m]$$

Las gráficas se muestran en las siguientes figuras e incluye una tabla que contiene las intensidades para cada 10 cm:

### 5.2.2.1. Elemento fundamental de $\bar{E}$ :

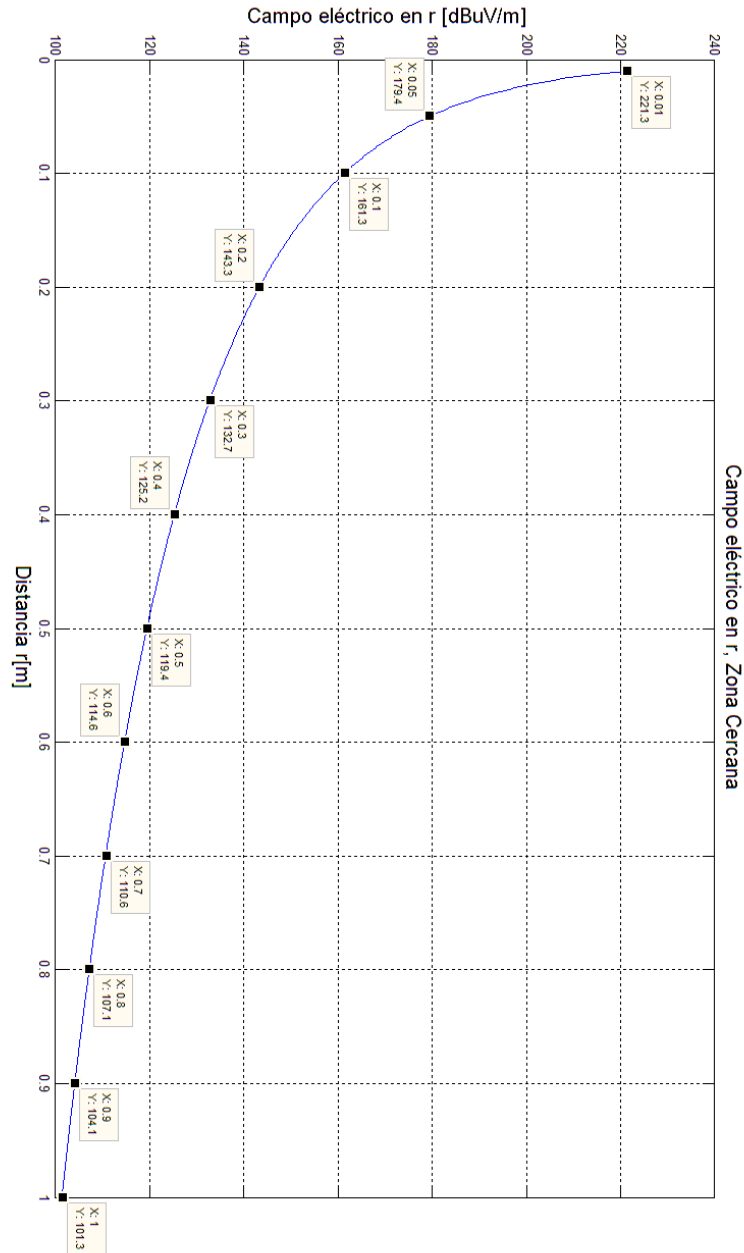
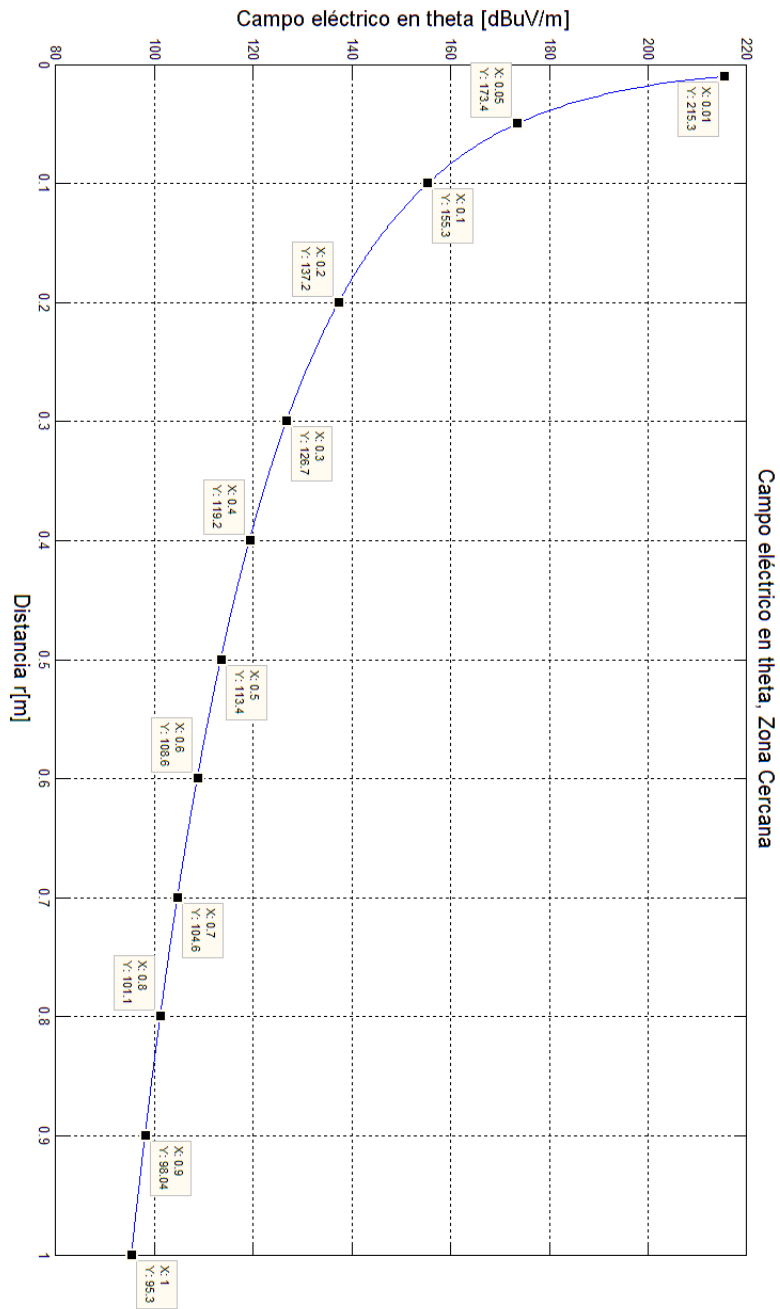
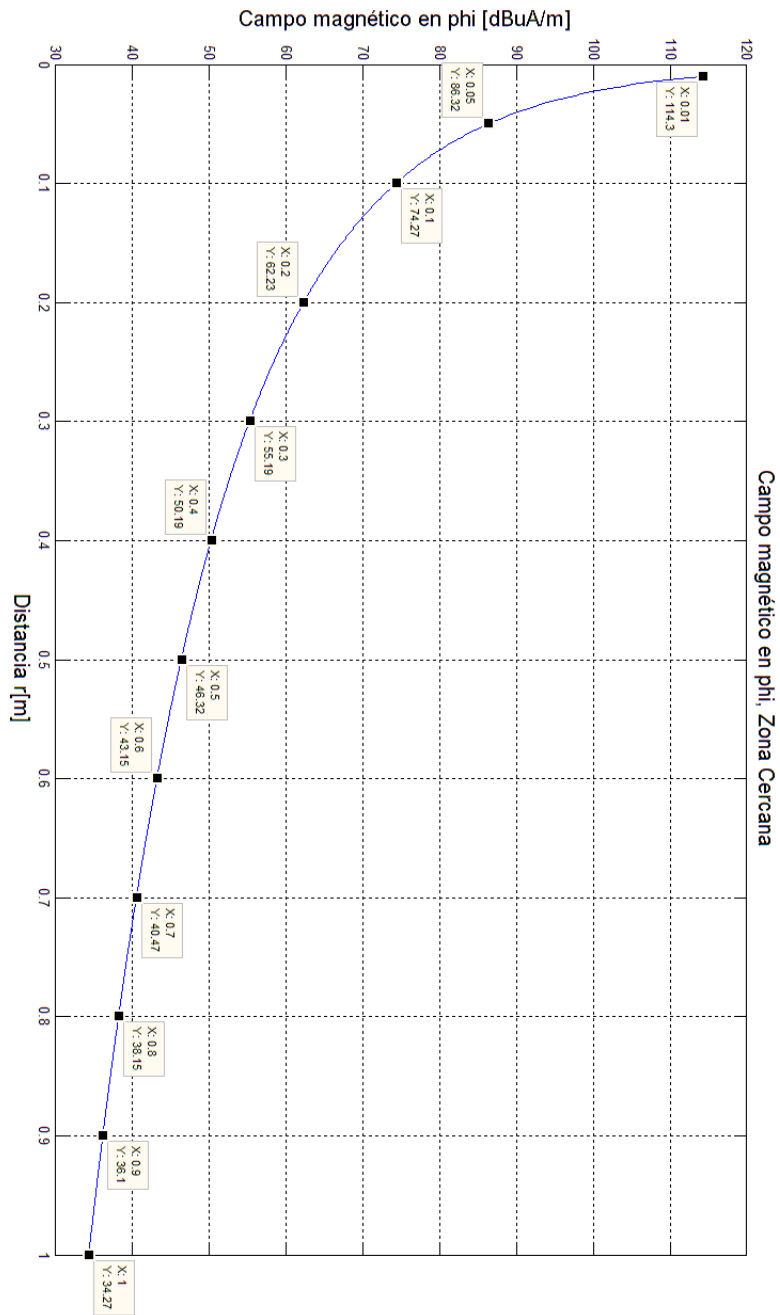


Figura 5.3.1. Elemento fundamental de  $\bar{E}$ , Campo eléctrico en r.



| r [m]                    | 0.1   | 0.2   | 0.3   | 0.4   | 0.5   | 0.6   | 0.7   | 0.8   | 0.9   | 1    |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| $E_{\theta}$<br>[dBuV/m] | 155.3 | 137.2 | 126.7 | 119.2 | 113.4 | 108.6 | 104.6 | 101.1 | 98.04 | 95.3 |

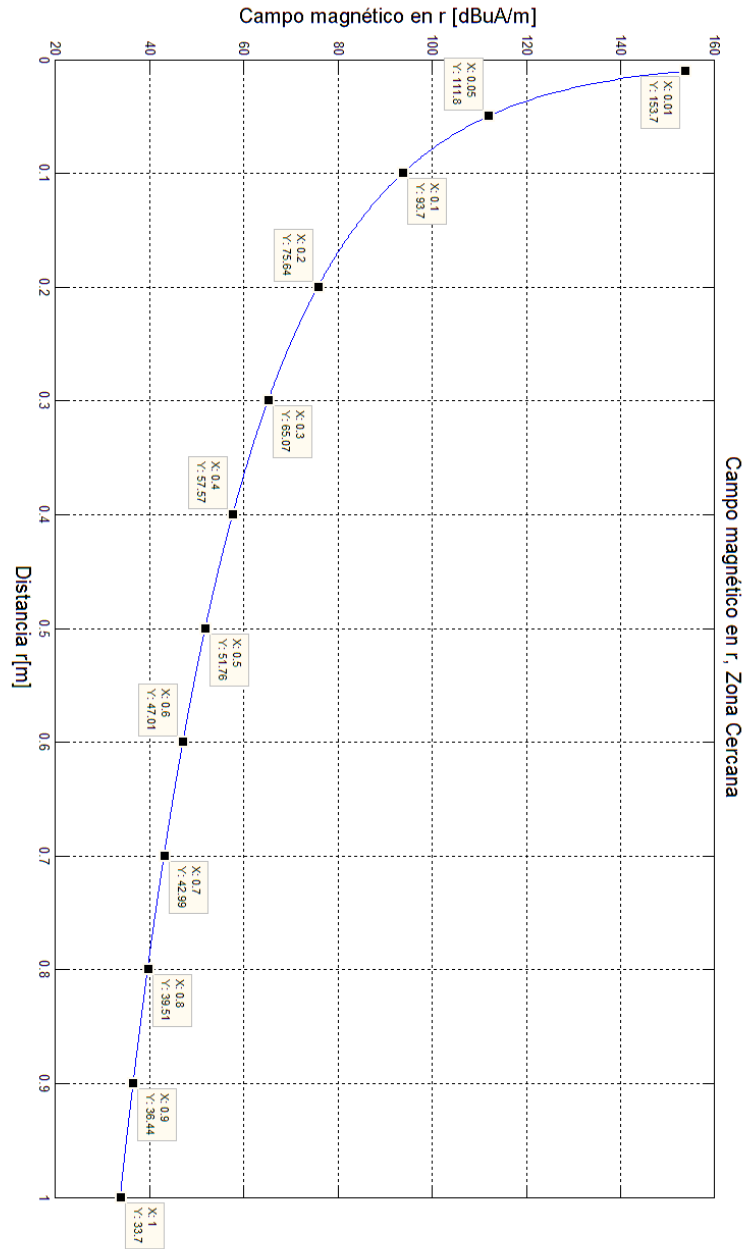
Figura 5.3.2. Elemento fundamental de  $\vec{E}$ , Campo eléctrico en theta.



| r [m]               | 0.1   | 0.2   | 0.3   | 0.4   | 0.5   | 0.6   | 0.7   | 0.8   | 0.9  | 1     |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| $H_{\phi}$ [dBuA/m] | 74.27 | 62.23 | 55.19 | 50.19 | 46.32 | 43.15 | 40.47 | 38.15 | 36.1 | 34.27 |

Figura 5.3.3. Elemento fundamental de  $\vec{E}$ , Campo magnético en phi.

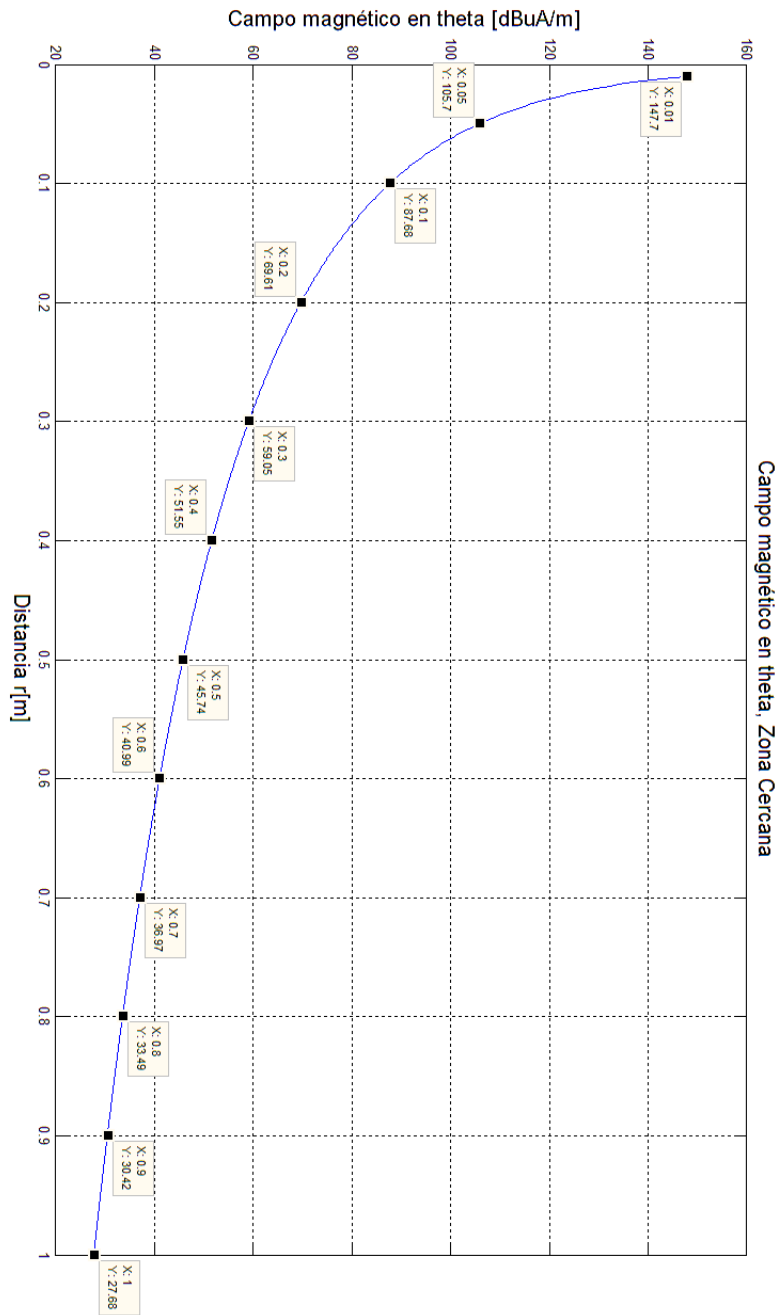
### 5.2.2.2. Elemento fundamental de $\vec{H}$ .



| r [m]          | 0.1  | 0.2   | 0.3   | 0.4   | 0.5   | 0.6   | 0.7   | 0.8   | 0.9   | 1    |
|----------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| $H_r$ [dBuA/m] | 93.7 | 75.64 | 65.07 | 57.27 | 51.76 | 47.01 | 42.99 | 39.51 | 36.44 | 33.7 |

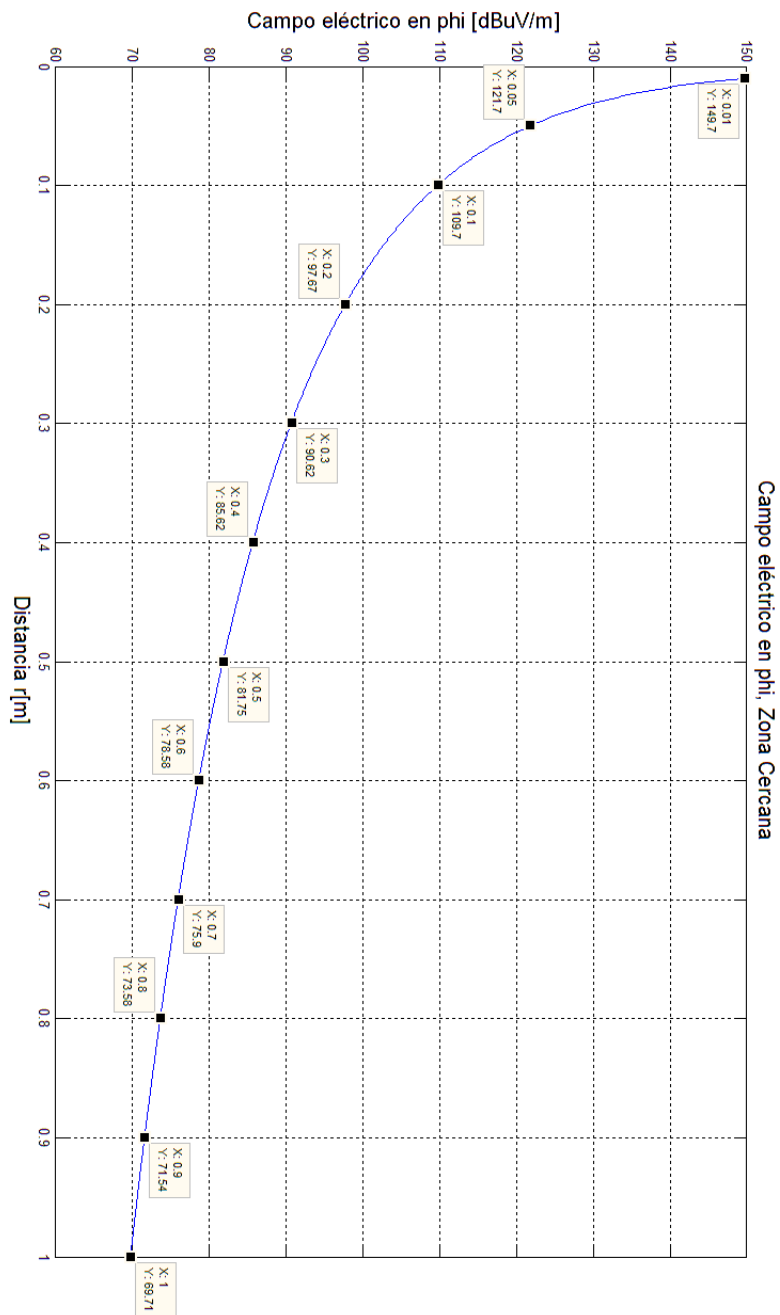
Figura 5.3.4. Elemento fundamental de  $\vec{H}$ , Campo magnético en r.





| r [m]                 | 0.1   | 0.2   | 0.3   | 0.4   | 0.5   | 0.6   | 0.7   | 0.8   | 0.9   | 1     |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $H_{\theta}$ [dBuA/m] | 87.68 | 69.61 | 59.05 | 51.55 | 45.74 | 40.99 | 36.97 | 33.49 | 31.42 | 27.68 |

Figura 5.3.5. Elemento fundamental de  $\vec{H}$ , Campo magnético en theta.



| r [m]             | 0.1   | 0.2   | 0.3   | 0.4   | 0.5   | 0.6   | 0.7  | 0.8   | 0.9   | 1     |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| $E_\phi$ [dBuV/m] | 109.7 | 97.67 | 90.62 | 85.62 | 81.75 | 78.58 | 75.9 | 73.58 | 71.54 | 69.71 |

Figura 5.3.6. Elemento fundamental de  $\vec{H}$ , Campo eléctrico en phi.

---

### 5.3. Resultados.

En el programa que calcula la intensidad de los campos EM también crea una gráfica de cada una de las componentes para cada elemento fundamental, estas gráficas *afirman el comportamiento previsto al inicio de esta sección*. Con las gráficas se puede establecer cuál es la intensidad de los campos EM a la cualquier distancia que indique alguna norma que estemos utilizando, además de tener un análisis anticipado de cuánta intensidad puede radiar el sistema.

Con todo esto se establece un pre-análisis sin la necesidad de tener equipo de medición lo cual puede tener grandes beneficios el en desarrollo del sistema que se esté diseñando.

Se debe tener también la consideración de que para zona cercana hay dos componentes de campo EM por lo que se debe calcular la magnitud resultante (debido a que son vectores) pero hay que tener en cuenta que debe ser en el ángulo donde se encuentre la mayor intensidad [21]:

$$|\bar{E}|_{ZC} = \sqrt{|E_r|^2 + |E_\theta|^2} = \frac{\sqrt{5} I l \eta}{4\pi kr^3} \text{ para EFE}$$
$$|\bar{H}|_{ZC} = \sqrt{|H_r|^2 + |H_\theta|^2} = \frac{\sqrt{5} I A \eta}{4 kr^3} \text{ para EFH}$$

Así se obtiene el módulo que representa la máxima intensidad de los campos EM.

La intención de este trabajo es proponer resultados teóricos bajo ciertas consideraciones, pero estos resultados deben tener una validez, por lo que se realizarán una serie de pruebas las cuales nos pueden decir si estos resultados teóricos son confiables. En los capítulos 7 y 8 se habla de las pruebas y técnicas propuestas para realizarlas.

Los resultados que se mostraron anteriormente pretenden dar una idea de cuanta intensidad de campos EM puede radiar el sistema además de que en las pruebas de EMC se hace un análisis en un intervalo de frecuencia. En estas gráficas la frecuencia se mantiene fija mientras que la distancia es el parámetro variable.

En la pruebas de EMC tenemos en caso contrario al análisis que se realizó en este capítulo, la frecuencia es el parámetro que es variable y la distancia en el parámetro que permanece fijo.

En el capítulo que sigue se abordará el tema de las pruebas de EMC para emisiones radiadas, mencionando los organismos principales que se encargan de crear los estándares, las definiciones que utilizan, tipos de prueba y sus clasificaciones. También se mencionará de manera general el entorno y ambiente que deben tener las pruebas además del equipo e instrumentación con el que se realizan las mediciones.

# CAPITULO 6.

## Compatibilidad Electromagnética.

Estándares, setup para realizar las pruebas.

---

## 6.1. Estándares.

Desde que se conoce el fenómeno de EMI varias organizaciones internacionales, debido al problema de EMC, han creado los estándares que son una serie de reglas y pasos que indican como realizar las pruebas, el equipo que debemos utilizar, el entorno recomendado y los límites EMI que servirán para regular, comparar y verificar que cumplan satisfactoriamente con el estándar. Entre los más conocidos y el que se va a utilizar se encuentran los siguientes [1]-[3]:

En el año de 1906 surge la **Comisión Electrotécnica Internacional** (*International Electrotechnical Commission, IEC*, por sus siglas en inglés) un organismo internacional no gubernamental que se encarga de crear y publicar estándares para la mayoría de los productos eléctricos y/o electrónicos. Con los diversos factores que influyeron para que pusieran atención a las fuentes de EMI, la IEC crea una división encargada para regular el problema, en 1934 se crea el **Comité Internacional Especial sobre Interferencias Radioeléctricas** (*Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques, CISPR*, por su siglas en francés) donde se crearon los estándares CISPR. Cabe mencionar que la IEC es un organismo en el cual tiene presencia en la mayoría del mundo, esta vinculación es a través de *comités nacionales* en los cuales los países afiliados (incluido México) participan, por lo que realizar las pruebas y cumplirlas con sus estándares, el producto puede ser comercializado en cualquier país que sea miembro.

Otro organismo es el **Comité Europeo de Estandarización** (*Comité Européen de Normalisation, CEN*, por sus siglas en francés) que, en conjunto con el **Comité Europeo de Estandarización Electrotécnica** (*Comité Européen de Normalisation Électrotechnique, CENELEC*, por sus siglas en francés) crearon las Normas Europeas (EN, por sus siglas en inglés). Este estándar se utiliza en Europa y algunos países afiliados a ella y es importante conocerlo.

La **Comisión Federal de Comunicaciones** (*Federal Communications Commission, FCC*, por sus siglas en inglés) es otro organismo estadounidense del cual proviene el estándar FCC.

La **Organización Internacional de Estandarización** (*International Organization for Standardization, ISO*, por sus siglas en inglés) es el organismo internacional encargado de crear cualquier norma y/o estándar y contiene una sección dedicada a los estándares para EMC [41].

La **Sociedad de Ingenieros Automotrices** (*Society of Automotive Engineers, SAE* por sus siglas en inglés) es otro organismo internacional encargado de crear normas y estándares SAE para aplicación automotriz y aeroespacial [40].

Los **Estándares Militares** (*Military Standards, MIL-STD*, por sus siglas en inglés) son otro tipo de estándares, creados por el *Departamento de Defensa de los Estados Unidos (U.S. Defense Department)* los cuales son utilizados para equipo de aplicación militar, naval y aeroespacial.

Se va a utilizar este estándar para realizar las pruebas ya que como el equipo que va evaluar será para aplicación aeroespacial.

---

## 6.2. Definiciones según los estándares.

Los estándares de cada uno de los organismos encargados de crearlos, tienen similitudes y diferencias, entre las más importantes se mencionan las definiciones de *equipo de radio frecuencia*, *equipo digital*, *sus clases (tipo A y tipo B)*, *los requerimientos necesarios* para que un equipo pueda ser comercializado, entre otros.

Una definición importante es el concepto de *Equipo Bajo Prueba (Equipment Under Test, EUT* por sus siglas en inglés) que es el sistema al que se efectuaran el análisis y las pruebas por lo que cuando se vaya a mencionar el sistema en las pruebas se le mencionará de esta forma.

### 6.2.1. Equipo de radio frecuencia.

Se define como cualquier equipo que es capaz, durante su funcionamiento, de emitir energía de radio frecuencia (RF) a través de radiación, conducción o de cualquier otra forma. Este tipo de frecuencia puede ser emitida de dos formas: *emitida intencionalmente y no intencionalmente*. Utilizamos el término de energía de RF que por definición es *cualquier energía del tipo electromagnético en el intervalo de 9 KHz a 3 GHz* (definición establecida por la FCC).

También se tiene la definición de **equipo digital** la cual es *un radiador no-intencional (dispositivo o sistema) que genera y usa señales de temporización o pulsos a una velocidad arriba de 9000 ciclos por segundo; incluidos los equipos de telefonía que usen técnicas digitales o cualquier dispositivos o sistema que genere y use energía de RF para la ejecución de funciones de procesamiento de datos, como cálculos, operaciones, transformaciones, grabado, presentación, clasificación almacenamiento, recuperación o transferencia [1]*.

Esta definición incluye a la mayoría de los sistemas que actualmente se usan, casi todos utilizan algún dispositivo temporizador como control de tiempo a una frecuencia mayor a la fijada por la definición por parte de la FCC.

De aquí se derivan dos clases de dispositivos o sistemas, los de clase A y los de clase B.

- Se conoce como sistema o equipo de **clase A**, a cualquier dispositivo o sistema que es comercializado para su uso en ambientes como la industrial, de negocios y de comercios.
- Se conoce como sistema o equipo de **clase B**, a cualquier dispositivo o sistema que es comercializado para su uso en cualquier ambiente, incluidos los de clase A.

Una diferencia entre las dos clases es que los de clase B pueden funcionar junto con otros sistemas como los transmisores, ya sea de televisión o radio ya que sus límites de emisión son más restrictivos que los de clase A.

En los estándares de Europa definen los *requerimientos esenciales* para que un producto pueda ser comercializado en la unión europea [21]; (1) *que nuestro equipo o sistema debe ser diseñado para asegurar que cualquier perturbación del tipo electromagnético que genere permita que los equipos de telecomunicaciones y otros sistemas funcionen adecuadamente*, y (2) *que nuestro sistema debe ser diseñado con un nivel de inmunidad a perturbaciones electromagnéticas externas*.

Todas estas definiciones complementan lo escrito anteriormente sobre el tema de EMC, indicando y clasificando diversos tipos según sus características. Una clasificación más es por la aplicación en la que el sistema es usado.

Se puede generalizar esta clasificación en grupos, en los cuales cada organismo tiene su estándar, tomando como referencia principal los tipos de equipo que definen la Unión Europea [1], anexando otros grupos:

1. Equipos de tecnología de la información.
2. Equipo Industrial, Médico y Científico.
3. Receptores de Radio y Televisión.
4. Equipo para uso doméstico y herramientas eléctricas.
5. Luminaria.
6. Telecomunicaciones.
7. Automotriz.
8. Aeronáutico y aeroespacial.
9. Militar.

Como ejemplo se observa la tabla 6.1 muestra los estándares para aplicaciones específicas en EUA además de su homólogo Europeo [13].

| FCC | CISPR | EN's          | DESCRIPCION (EQUIPO O SISTEMA)                |
|-----|-------|---------------|---|
| 18  | 11    | EN55011       | Industrial, Médico y Científico               |
| -   | 12    | --            | Automotriz                                    |
| 15  | 13    | EN55013       | Receptores de Radiodifusión                   |
|     | 14    | EN55014       | Aplicaciones Domesticas/Herramientas          |
|     | 15    | EN55015       | Luminaria                                     |
| 15  | 22    | EN55022       | Tecnologías de la Información                 |
|     | --    | EN61000-6-3,4 | Emisiones Generales*                          |
|     | 16    | --            | Equipo de Medición/Métodos                    |
|     |       | EN55025       | Equipo y componentes de aplicación automotriz |

**Tabla 6.1 Comparación de los estándares y para que aplicación es usada.**

\* Para productos que no entran en las definiciones de los equipos o grupos y por lo tanto no aplican en los estándares existentes.

En México existen los organismos que se encargan de crear y regular las normas, son el *Centro Nacional de Metrología (CENAM)* y la *Dirección General de Normalización (DGN)* ambas dependientes de la *Secretaría de Economía (SE)* de las cuales se creó la norma NOM-121-SCT1-2009 la cual está basada en la norma internacional CISPR.

Todos los estándares ayudan y contienen información desde los métodos de medición y el equipo recomendado hasta las configuraciones para realizar las pruebas.

Con la guía de estas normas se puede explicar y crear nuestro *setup*, todas las configuraciones y los elementos que la conforman, indicando sus características y funcionamiento.

---

También se puede elaborar una lista de todos los elementos que se necesitan para hacer una prueba de *EMC-RE* a un sistema:

1. Equipo de Medición.
2. Antenas.
3. Lugar donde se realicen las pruebas.
4. Escoger el estándar de acuerdo a la aplicación que sea nuestro sistema.

El equipo de medición puede ser desde un analizador de espectros hasta un receptor de EMI, dependerá de las necesidades y del tipo de prueba que se pretenda hacer. Dependiendo del tipo de prueba se pueden clasificar en dos tipos, de *pre conformidad* y de *conformidad* [13].

#### **6.2.2. Pruebas de Pre Conformidad.**

Se realizan durante el desarrollo del producto, antes de hacer las pruebas de conformidad para localizar los problemas de EMI y proponer una solución. Los requerimientos de la prueba nos son tan rigurosos y se pueden realizar en un lugar considerando los posibles efectos de interferencia EM y con el mínimo de equipo.

Este tipo de pruebas proporcionan una buena aproximación del comportamiento de los campos EM del sistema, el costo que pueden tener las pruebas son menores en comparación con las pruebas de conformidad puesto que se necesita como instrumentación como mínimo un analizador de espectros y las antenas necesarias para realizar la prueba. El lugar puede ser algún laboratorio donde se pueda efectuar con la mayor comodidad posible.

#### **6.2.3. Pruebas de Conformidad.**

En caso contrario, las condiciones para realizar las pruebas de conformidad son más rigurosas; se necesita de un equipo más sofisticado para realizar las pruebas (un *receptor de EMI*), las antenas que se necesiten y el lugar que indique el estándar utilizado, ya sea en un Lugar de Pruebas al Aire Libre o en una Cámara Anecoica. Todo esto con el objetivo de cumplir y pasar la prueba bajo un estándar específico lo que implica un costo más alto que la pruebas de pre conformidad.

### **6.3. Equipo de medición.**

#### **6.3.1 Receptor de EMI.**

Un receptor de EMI es como un analizador de espectros pero con mayor precisión y sensibilidad pero con las diferencias de que; (1) contienen los límites de acuerdo a las pruebas comerciales (FCC, EN, CISPR, etc.) y algunos con los límites militares (MIL-STD461), (2) pueden guardar e imprimir los resultados, como la gráfica de la prueba y una tabla con los valores de intensidad más altos (los más recientes sin necesidad de conectar una PC). Entre otras propiedades se incluyen, la posibilidad de control vía remota a través de la PC, valores de calibración para algunas antenas, cables, atenuadores o pre amplificadores. Estas características dependerán del fabricante del equipo.

La figura 6.2 muestra algunos equipos de medición que contienen una aplicación que sirve para realizar mediciones de fuentes de EMI.



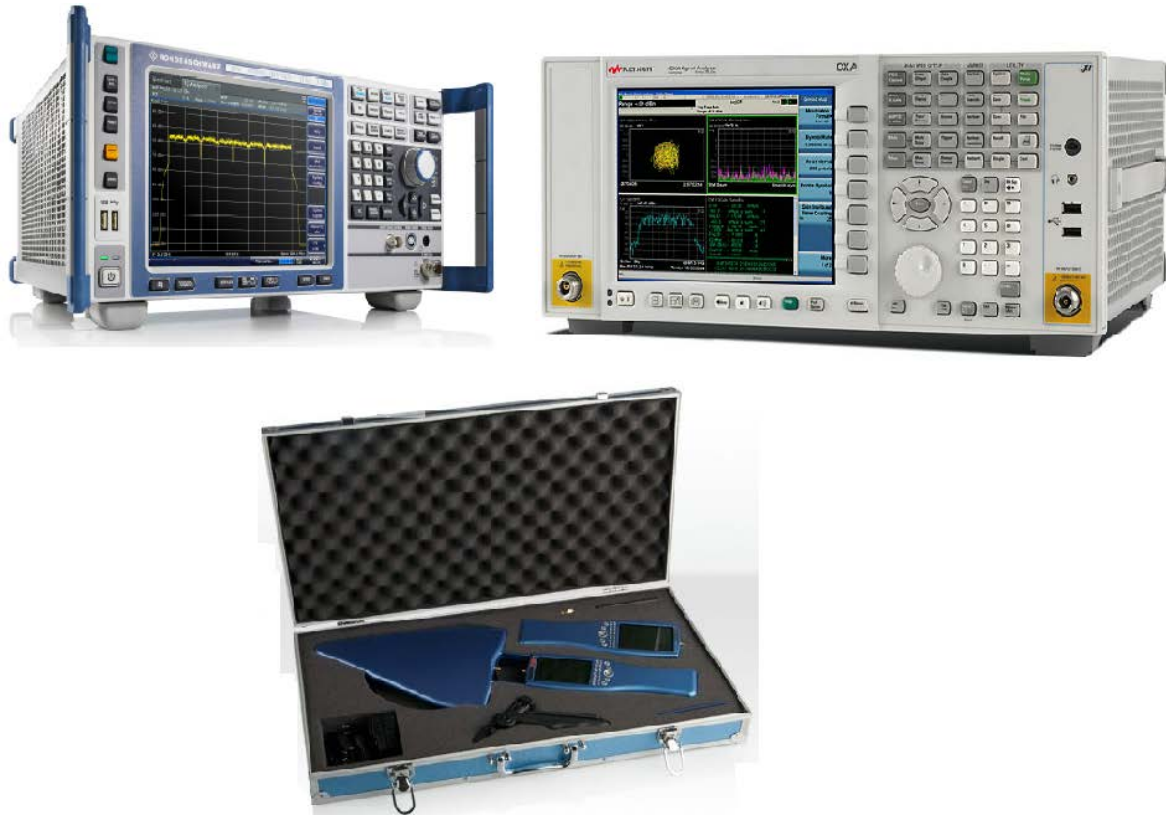


Figura 6.2. Equipos de medición.

### 6.3.2. Antenas y puntas de prueba.

Estos dispositivos funcionan como transductores, captando la energía EM para que el equipo de medición analice y despliegue en su pantalla esta. Como ejemplo, en el estándar MIL-STD461 indica para los diferentes intervalos de frecuencia, se utilicen varias antenas. Las puntas de prueba son específicamente para realizar mediciones en *zona cercana*. En la figura 6.3 se muestran las puntas de prueba para realizar mediciones en zona cercana y las antenas para realizar mediciones en zona lejana.

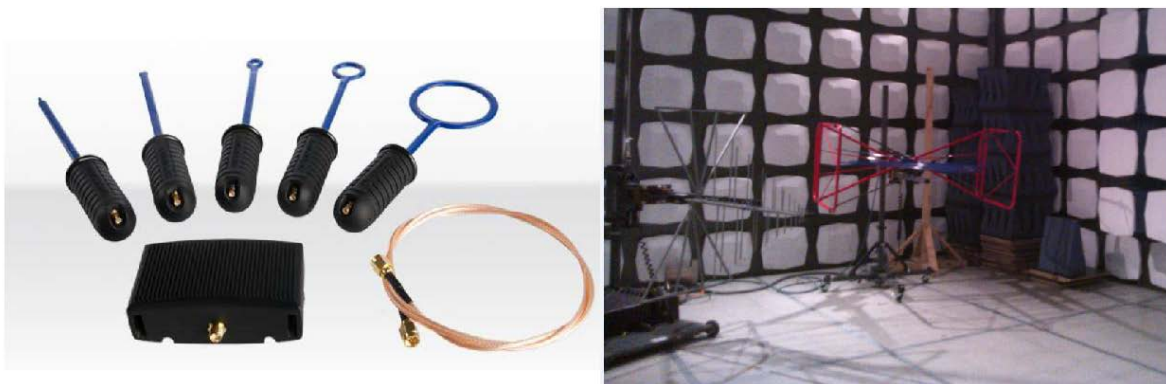


Figura 6.3. Puntas de prueba (izquierda) y antenas (derecha).

#### 6.4. Lugares para realizar las pruebas.

Otra de las indicaciones incluida en estos es el lugar en donde se pueden realizar las pruebas; tanto las normas estadounidenses como las europeas recomiendan hacerlas en lo que se conoce como un *Lugar de Pruebas al Aire Libre (Open Area Test Site, OATS por sus siglas en inglés)*, son espacios localizados fuera de las ciudades, se encuentran en lugares muy alejados de estas debido a las posibles fuentes de EMI que hay en ella, las emisiones en estos lugares deben de ser mínimas. Las figuras siguientes muestran el esquema general y el ejemplo de un OATS que hay en México.

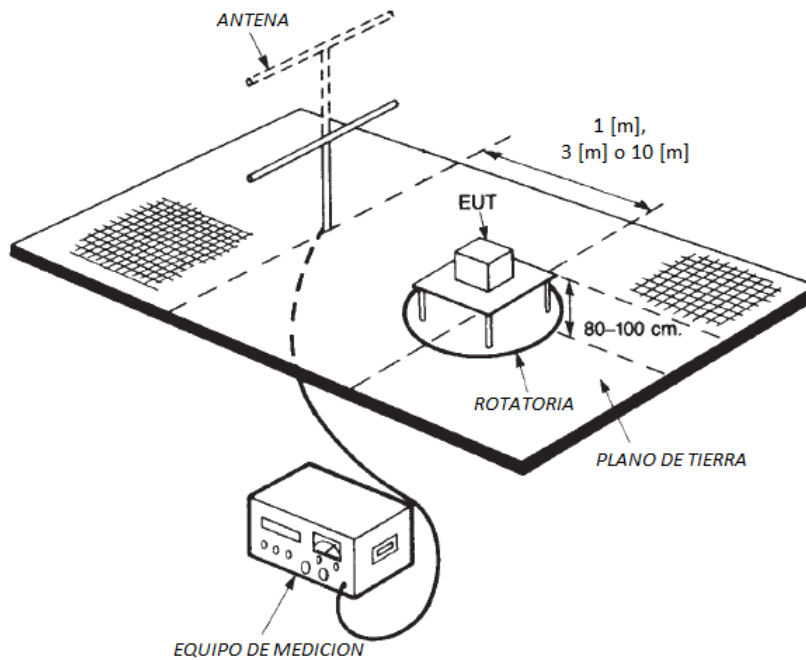


Figura 6.4. Esquema general de un OATS (Ott H. 2009).



Figura 6.5. OATS del CENAM ubicado en Querétaro, México.

### 6.4.1. Cámara Anecoica.

Otro de los lugares donde se pueden hacer las pruebas es en una cámara anecoica, un lugar diseñado para establecer las condiciones idóneas como temperatura y humedad pero principalmente contiene material que absorbe la energía EM que pueda emitir el EUT. La cámara está conectada a tierra para que todas las EMI no influyan en la medición. En la figura 6.6 muestra la configuración que tienen la mayoría de las cámaras y la instrumentación que contienen. El estándar MIL-STD 461 indica que las pruebas se deben de realizar en este tipo de cámaras.

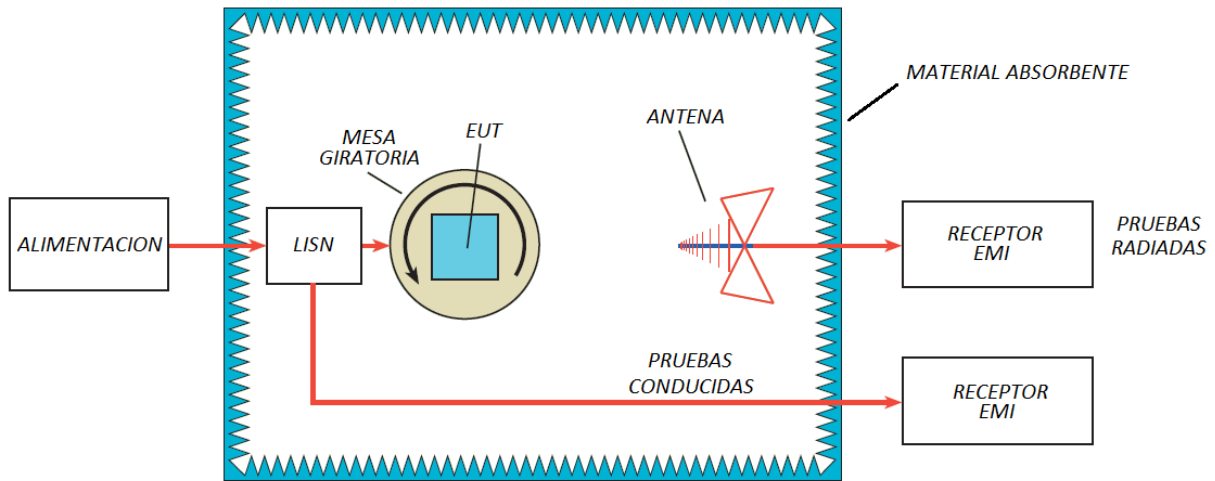


Figura 6.6. Cámara Anecoica.

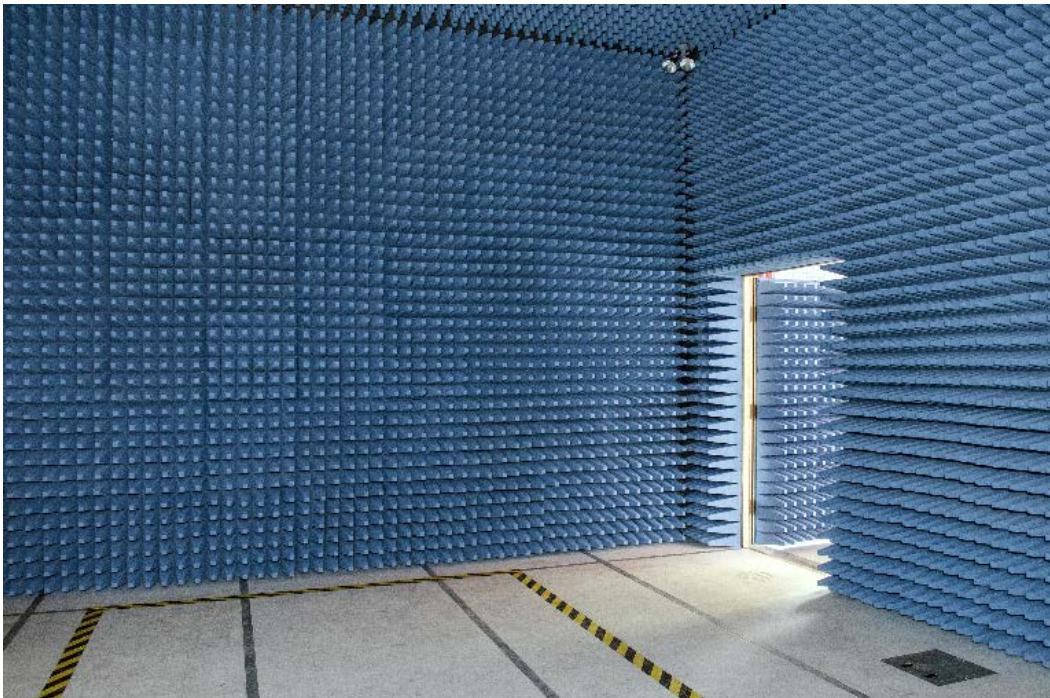


Figura 6.7. Interior de la cámara semi anecoica, Centro de Alta Tecnología UNAM, Campus Juriquilla Querétaro.

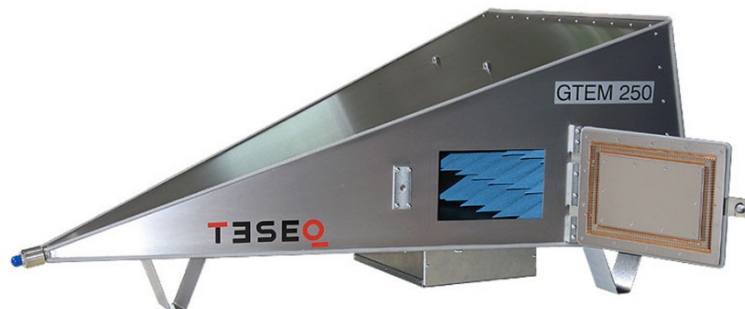


**Figura 6.8 Exterior de la cámara semi anecoica, CAT UNAM, Campus Juriquilla Qro.**

Las dos figuras anteriores muestran la cámara semi anecoica que pertenece al Centro de Alta Tecnología de la UNAM, ubicada en el campus Juriquilla, Querétaro. Las dimensiones de esta cámara son de  $7m \times 6.7m \times 4.3m$ , puede realizar pruebas con los estándares *MIL-STD 461F*, *RTCA-DO 160*, *CISPR 25* y *14*.

#### **6.4.2. Celdas TEM.**

Son cámaras más pequeñas utilizadas también para realizar pruebas de EMC pero a sistemas pequeños, están equipadas con material absorbente y la única diferencia con una cámara anecoica es el tamaño. A continuación se muestra una figura que muestra la celda TEM (dimensiones de largo 1.25x ancho 0.65x alto 0.45 m).



**Figura 6.9. Celda TEM (TESEQ, 2015).**

Entre otras cosas que se pueden encontrar en el setup son los mecanismos que permiten mover el EUT o las antenas para cambiar su *polarización* si se requiere. También cabe hacer mención del cableado que se utilice para conectar la instrumentación el cual debe estar blindado y certificado para no producir EMI durante la prueba.

El estándar que se pretende utilizar para realizar las pruebas de EMC-RE es el estándar militar, MIL-STD 461F usado para sistemas espaciales, estas son algunas de sus características comparadas con los estándares comerciales (FCC, CISPR EN, etc.) que se muestran en la tabla 6.10.

| MIL-STD 461.   | COMERCIALES (FCC, CISPR, EN's, etc.).   |
|--|---|
| Las pruebas se realizan a un distancia de 1 [m].   | Las pruebas se realizan a un distancia de 3 [m] o a 10 [m].   |
| Los límites de emisión son más restrictivos.   | Ver la figura 6.10.   |
| Las pruebas se realizan hasta una frecuencia de hasta 100 GHz, si se cuenta con el equipo y si es necesario. | Las pruebas de los estándares anteriores solamente indican como frecuencia final hasta 1 GHz pero especifica que si nuestro sistema usa una frecuencia arriba de esta, se hará la medición hasta 5 veces más de la frecuencia a la que trabaje. |
| El lugar en que se debe de efectuar las pruebas es en una <i>cámara anecoica</i> .                           | En los estándares comerciales indican que pueden ser en un lugar al aire abierto, libre de fuentes de EMI.  |

Tabla 6.10. Comparación del estándar militar con los estándares comerciales.

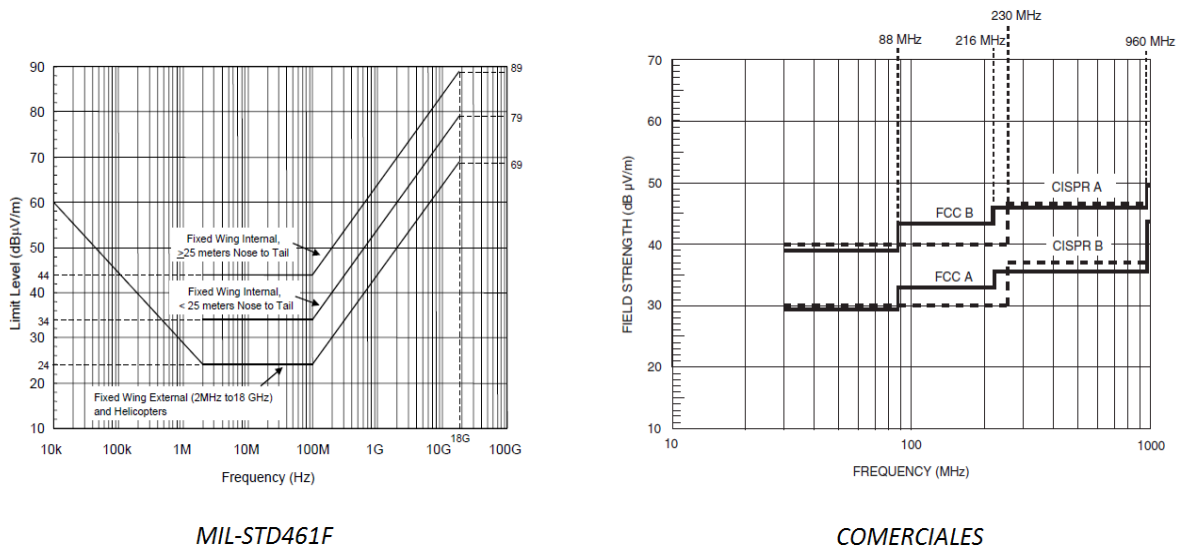


Figura 6.11. Comparación de los límites de emisión para campo  $\bar{E}$ .

| Requirement  | Description   |
|--------------|---|
| <b>CE101</b> | Conducted Emissions, Power Leads, 30 Hz to 10 kHz   |
| <b>CE102</b> | Conducted Emissions, Power Leads, 10 kHz to 30 MHz  |
| <b>CE106</b> | Conducted Emissions, Antenna Terminal, 10 kHz to 40 GHz   |
| <b>CS101</b> | Conducted Susceptibility, Power Leads, 30 Hz to 150 kHz   |
| <b>CS103</b> | Conducted Susceptibility, Antenna Port, Intermodulation, 15 kHz to 10 GHz                         |
| <b>CS104</b> | Conducted Susceptibility, Antenna Port, Rejection of Undesired Signals, 30 Hz to 20 GHz           |
| <b>CS105</b> | Conducted Susceptibility, Antenna Port, Cross-Modulation, 30 Hz to 20 GHz                         |
| <b>CS106</b> | Conducted Susceptibility, Transient, Power Leads  |
| <b>CS109</b> | Conducted Susceptibility, Structure Current, 60 Hz to 100 kHz                                     |
| <b>CS114</b> | Conducted Susceptibility, Bulk Cable Injection, 10 kHz to 200 MHz                                 |
| <b>CS115</b> | Conducted Susceptibility, Bulk Cable Injection, Impulse Excitation                                |
| <b>CS116</b> | Conducted Susceptibility, Damped Sinusoidal Transients, Cables and Power Leads, 10 kHz to 100 MHz |
| <b>RE101</b> | Radiated Emissions, Magnetic Field, 30 Hz to 100 kHz  |
| <b>RE102</b> | Radiated Emissions, Electric Field, 10 kHz to 18 GHz  |
| <b>RE103</b> | Radiated Emissions, Antenna Spurious and Harmonic Outputs, 10 kHz to 40 GHz                       |
| <b>RS101</b> | Radiated Susceptibility, Magnetic Field, 30 Hz to 100 kHz   |
| <b>RS103</b> | Radiated Susceptibility, Electric Field, 2 MHz to 40 GHz  |
| <b>RS105</b> | Radiated Susceptibility, Transient Electromagnetic Field  |

**Figura 6.12. Descripción de las pruebas de Emisiones y Susceptibilidad del estándar MIL-STD461F.**

La figura anterior muestra cómo se clasifican las pruebas y su descripción teniendo en cuenta los siguientes acrónimos [18]:

- CE: Conducted Emissions (*Emisiones Conducidas*).
- CS: Conducted Susceptibility (*Susceptibilidad Conducida*).
- RE: Radiated Emissions (*Emisiones Radiadas*).
- RS: Radiated Susceptibility (*Susceptibilidad Radiada*).

La sección del estándar que se utilizará (con algunas consideraciones) será la sección de *RE102* la cual es una prueba de emisiones radiadas de campo eléctrico en un intervalo de 10 KHz a 18 GHz.

El estándar también contiene una tabla que muestra las recomendaciones para utilizar las pruebas según la aplicación del EUT [18]:

| Equipo y subsistemas instalados dentro, sobre o lanzados de las siguientes plataformas o instalaciones | CE101 | CE102 | CE106 | CS101 | CS103 | CS104 | CS105 | CS106 | CS109 | CS114 | CS115 | CS116 | RE101 | RE102 | RE103 | RS101 | RS103 | RS105 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Buques.  | A     | A     | L     | A     | S     | S     | S     | A     | L     | A     | S     | A     | A     | A     | L     | A     | A     | L     |
| Submarinos.  | A     | A     | L     | A     | S     | S     | S     | A     | L     | A     | S     | L     | A     | A     | L     | L     | A     | L     |
| Aeronaves, ejército.   | A     | A     | L     | A     | S     | S     | S     |       |       | A     | A     | A     | A     | A     | L     | A     | A     | L     |
| Aeronaves, marina.   | L     | A     | L     | A     | S     | S     | S     |       |       | A     | A     | A     | L     | A     | L     | L     | A     | L     |
| Aeronaves, fuerza aérea.   |       | A     | L     | A     | S     | S     | S     |       |       | A     | A     | A     |       | A     | L     |       | A     |       |
| Sistemas Espaciales, vehículos de lanzamiento incluidos.   |       | A     | L     | A     | S     | S     | S     |       |       | A     | A     | A     |       | A     | L     |       | A     |       |
| Estación terrena, ejército.  |       | A     | L     | A     | S     | S     | S     |       |       | A     | A     | A     |       | A     | L     |       | A     |       |
| Estación terrena, marina.  |       | A     | L     | A     | S     | S     | S     |       |       | A     | A     | A     |       | A     | L     |       | A     |       |
| Estación terrena, fuerza aérea.  |       | A     | L     | A     | S     | S     | S     |       |       | A     | A     | A     |       | A     | L     |       | A     |       |

Figura 6.13. Tabla de pruebas según la aplicación, MIL-STD461F.

- **A:** Prueba Aplicable.
- **L:** Prueba limitada como se especifica en las secciones del estándar.
- **S:** Se debe especificar en la documentación del sistema la prueba que se realizó.

Como lo indica la figura 6.13, la prueba de EMC RE102 es aplicable para el sistema de adquisición de datos debido a que formará parte de una plataforma satelital.

### 6.5. Setup 'real' para realizar las pruebas.

Es cierto que se debe seguir el estándar para poder cumplir la prueba pero hay que tener todo el entorno para realizarlas; el equipo de medición, las antenas y una cámara anecoica, siendo esta última, la más difícil y costosa de conseguir.

El setup que se utilizó para realizar la prueba se limitó al equipo de medición y una serie de puntas de prueba pero se puede clasificar como pruebas de *pre-conformidad* para tener una idea de cuánta intensidad de campos EM radia el sistema.

Además del setup, en el capítulo siguiente se van a proponer una serie de técnicas de medición para obtener mejores resultados a la hora de realizar las pruebas. Va enfocado principalmente para zona cercana pero también se aborda el tema para zona lejana y tienen el objetivo de localizar la máxima intensidad de los campos EM estableciendo algunas consideraciones.

# CAPITULO 7.

## Técnicas de medición para EMC.



En esta sección del trabajo se hablará de las *técnicas de medición de EMC* que se deben hacer para obtener una buena lectura, adecuada de acuerdo a la zona en que se haga esta. Hablar de técnicas de medición en EMC es *localizar la máxima intensidad de los campos EM* en el sistema que se analice, lo primero que se debe saber de un sistema son sus parámetros de diseño.

Con estos se establece la *relación de zona* para saber a qué distancia se considera zona cercana y zona lejana. Una vez que se establezca lo anterior se definirán las técnicas para cada una de las zonas.

### 7.1. Zona Cercana.

Para realizar mediciones en zona cercana lo más recomendable es usar las puntas de prueba, son básicamente antenas para medir la intensidad de los campos EM, utilizan el principio de los elementos fundamentales para  $\vec{E}$  (un dipolo eléctrico) y  $\vec{H}$  (un dipolo cerrado).

La técnica consiste en encontrar y establecer una posición en la antena para que capte la máxima intensidad de campo que se esté midiendo, esto se logra haciendo referencia a la teoría; anteriormente se hizo mención a los elementos fundamentales de campo  $\vec{E}$  y  $\vec{H}$ , en los cuales se obtienen sus componentes:

| ELEMENTO FUNDAMENTAL $\vec{E}$   | ELEMENTO FUNDAMENTAL $\vec{H}$  |
|--|---|
| $E_r = \frac{I l \eta}{2\pi} \left[ \frac{1}{r^2} + \frac{1}{jkr^3} \right] \cos \theta e^{-jkr}$                          | $H_r = \frac{I A k^3}{4\pi} \left[ \frac{2j}{k^2 r^2} + \frac{2}{k^3 r^3} \right] \cos \theta e^{-jkr}$                     |
| $E_\theta = \frac{I l \eta k}{4\pi} \left[ \frac{j}{r} + \frac{1}{kr^2} + \frac{1}{jk^2 r^3} \right] \sin \theta e^{-jkr}$ | $H_\theta = \frac{I A k^3}{4\pi} \left[ \frac{-1}{kr} - \frac{j}{k^2 r^2} + \frac{1}{k^3 r^3} \right] \sin \theta e^{-jkr}$ |
| $E_\varphi = 0$  | $H_\varphi = 0$   |
| $H_r = H_\theta = 0$   | $E_r = E_\theta = 0$  |
| $H_\varphi = \frac{I l k}{4\pi} \left[ \frac{j}{r} + \frac{1}{kr^2} \right] \sin \theta e^{-jkr}$                          | $E_\varphi = \frac{\eta I A k^3}{4\pi} \left[ \frac{1}{kr} + \frac{1}{jk^2 r^2} \right] \sin \theta e^{-jkr}$               |
| Donde $l$ es la longitud del dipolo.   | Donde $A = \pi a^2$ es el área de la antena.  |

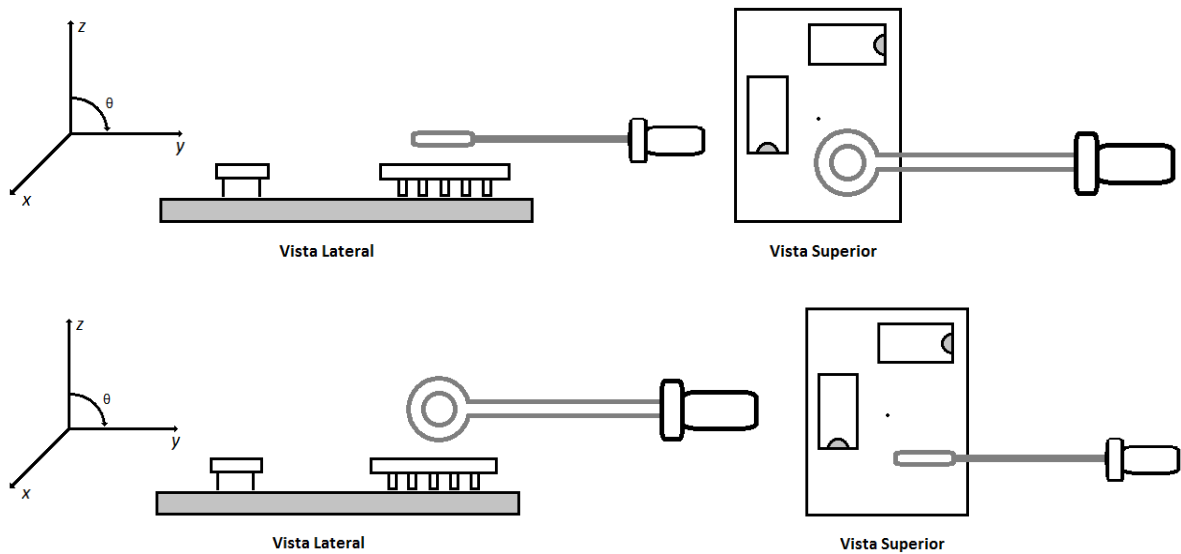
**Tabla 7.1 Ecuaciones de los elementos fundamentales de campo  $\vec{E}$  y  $\vec{H}$  (Balanis C. 2006).**

Se observa que todas las ecuaciones tiene una “dependencia” con el ángulo  $\theta$ , este es el parámetro que junto con la función trigonométrica se puede interpretar para conseguir la máxima intensidad.

Ya que las funciones trigonométricas que se encuentran en las ecuaciones son  $\sin \theta$  y  $\cos \theta$  se puede notar dos casos: cuando el ángulo  $\theta$  tiene como valor  $0^\circ$  y  $90^\circ$ . Para cada elemento fundamental se obtiene un resultado similar:

- Cuando  $\theta = 0^\circ$ , se logra una máxima intensidad de campo para la componente en  $r$  mientras que para las otras dos ( $\theta$  y  $\varphi$ ) su intensidad es cero:  $\sin 0^\circ = 0$  y  $\cos 0^\circ = 1$ .
- Cuando  $\theta = 90^\circ$ , se logra una máxima intensidad de campo para las componentes en  $\theta$  y  $\varphi$  mientras que para  $r$  su intensidad es cero:  $\sin 90^\circ = 1$  y  $\cos 90^\circ = 0$ .

La interpretación para lo escrito anteriormente es que se debe colocar la punta de prueba de tal manera que se tenga un ángulo de  $0^\circ$  o  $90^\circ$  entre el EUT y la punta de prueba, la figura 7.2 ejemplifica los dos casos:

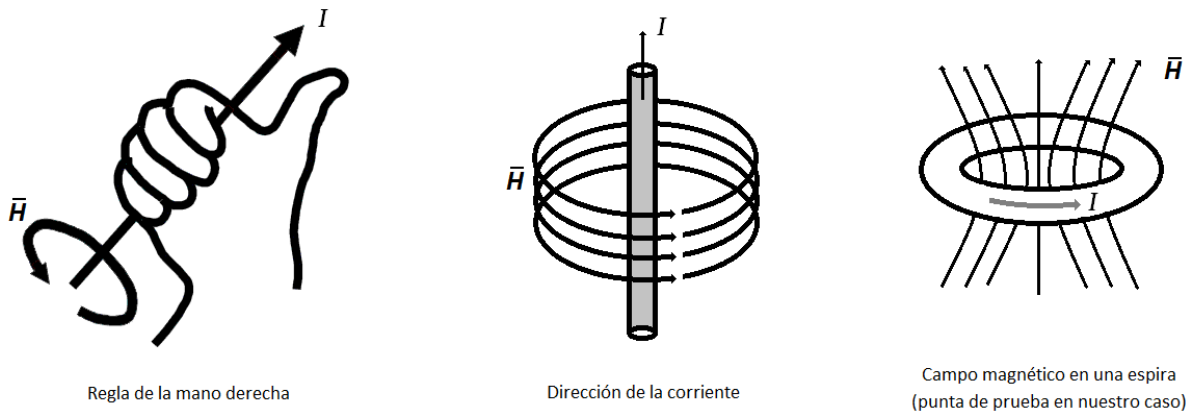


**Figura 7.2. Formas para medir la intensidad de campo.**

Estas técnicas se aplican también si se usan las puntas de prueba para medir la intensidad de campo eléctrico pero se utilizó las puntas de prueba para campo magnético debido a que ilustran mejor las posiciones en que se deben colocar.

Para realizar una correcta medición a una PCB o a algún EUT al que le hagan pruebas de este tipo se debe tener en cuenta que se desconoce cómo fluye la corriente eléctrica ya que a mayor sea esta, la intensidad de campo EM es mayor por lo que se debe buscar por todo el EUT hasta localizar la máxima intensidad. No se sabe que dispositivos utilizaron en el EUT por lo que no se pueden anticipar cuales son los que pueden generar EMI.

A través de la figura 7.3 ayuda a comprender la regla de la mano derecha, es una manera de definir la dirección del campo magnético, se puede hacer una interpretación; si se localiza la mayor intensidad de campo, a través de la regla sabremos hacia qué dirección fluye la corriente.



**Figura 7.3. Formas de definir el campo magnético.**

---

La medición de la intensidad de cualquier campo dependerá de la referencia (el origen del sistema de coordenadas definido en la figura 7.2) que se haya definido en un principio y por lo tanto, la forma de cómo se deben colocar las puntas para localizar la máxima intensidad.

Un complemento que en conjunto con la técnica anterior es *dividir nuestro EUT por secciones, las cuales se van a buscar para poder encontrar la máxima intensidad, se pueden dividir en las secciones que se quieran siempre y cuando sean necesarias y eficientes.*

En el ejemplo anterior, como se trata de una PCB, se dividirá el EUT en cuatro secciones como lo indica la figura 7.4:

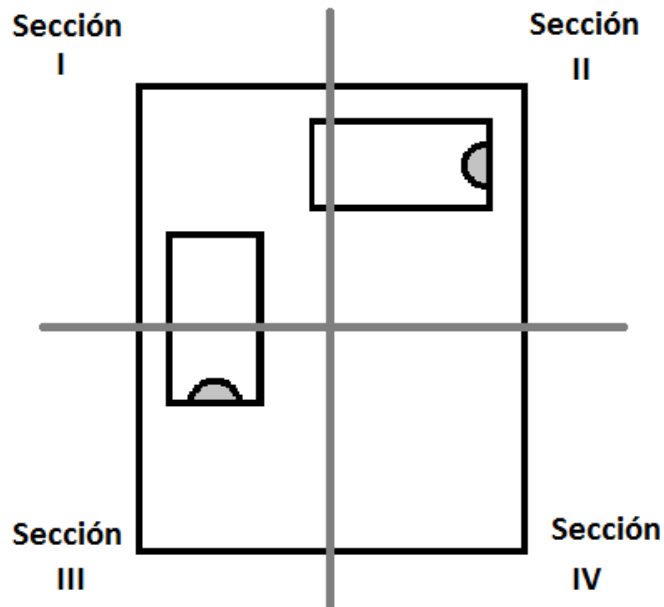


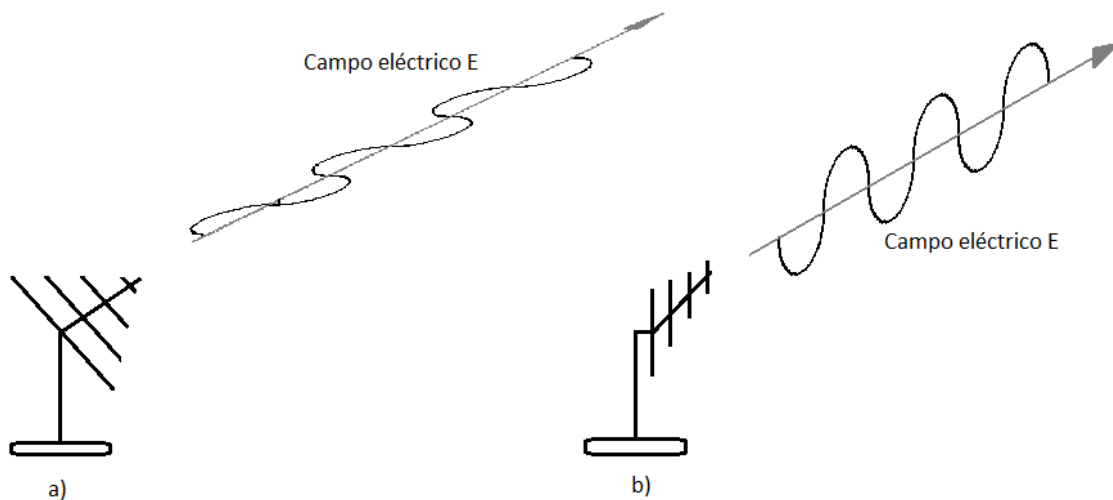
Figura 7.4. División de secciones en una PCB.

Se utilizará la técnica de buscar la máxima intensidad en esas secciones y establecer la medición en esta, para su posterior análisis.

## 7.2. Zona Lejana.

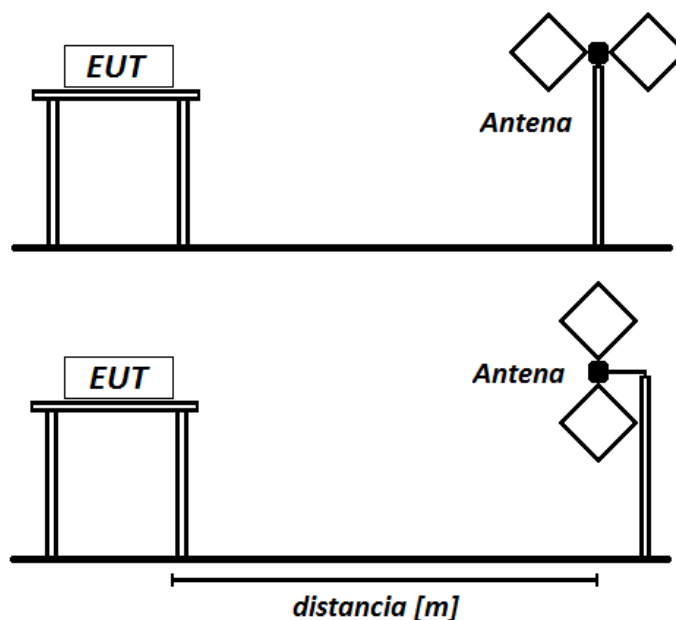
Se realizan las mediciones con las antenas que nos indiquen los estándares, también indican la distancia y la forma de colocarlas. Para obtener la máxima intensidad es necesario seguir minuciosamente las indicaciones, principalmente recomiendan establecer dos tipos de medición, que las antenas reciban las emisiones de EMI en los dos tipos de *polarización: horizontal y vertical.*

Uno de los parámetros que tienen las antenas es el tipo de polarización que es la orientación del campo eléctrico con respecto a una referencia, la medición consiste en recibir y medir las emisiones para los dos tipos y se logra esto simplemente moviendo la antena 90 grados con respecto a la referencia que se establezca. La figura 7.5 indica la manera de como las antenas captan el campo eléctrico de acuerdo a la posición de estas.



**Figura 7.5. Polarización de una antena, a) Horizontal y b) vertical.**

Los estándares indican que se deben realizar las pruebas con los dos tipos de polarización para captar todas las emisiones por lo que se puede analizar cómo se debe colocar nuestro equipo para que no haya acoplamiento de emisiones y también para que las emisiones de EMI que produzca no se acoplen en otros sistemas y/o equipos. La figura 7.6 muestra la posición de la antena, la distancia dependerá del estándar que se utilice.



**Figura 7.6. Prueba en los dos tipos de polarización, horizontal (arriba) y vertical (abajo).**

Una vez realizadas las pruebas se puede definir el *carácter electromagnético del sistema*.

### 7.3. Criterio para obtener el carácter electromagnético de un sistema.

Para poder establecer este criterio es necesario la realización de pruebas de EMC, NO se puede establecer teóricamente puesto que como primer criterio para obtenerlo es interpretar al sistema de una forma general; considerarlo solamente como una caja con dimensiones establecidas, corrientes, voltajes y frecuencias.

Con la ayuda de las pruebas de EMC, se miden las intensidades de los campos EM y se obtienen las gráficas de campo  $\vec{E}$  y  $\vec{H}$ , si se aplica la ecuación de la impedancia de la onda EM, se puede definir el carácter EM del sistema [1].

$$\frac{\vec{E}}{\vec{H}} = Z_w = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = 377[\Omega]_{vacio}$$

Si se observa la ecuación se puede identificar qué campo es el predomina en el sistema; una vez comprobado el carácter EM se procede a escoger y utilizar el elemento fundamental de campo EM que se acopla al carácter EM:

- Si  $Z_w$  es mayor a la impedancia del vacío ( $377[\Omega]$ ) se dice que el carácter EM es de tipo eléctrico por lo que se utilizan las ecuaciones de elemento fundamental de campo eléctrico ( $EF\vec{E}$ ).
- Si  $Z_w$  es menor a la impedancia del vacío ( $377[\Omega]$ ) se dice que el carácter EM es de tipo magnético por lo que se utilizan las ecuaciones de elemento fundamental de campo magnético ( $EF\vec{H}$ ).

La gráfica siguiente demuestra lo escrito anteriormente:

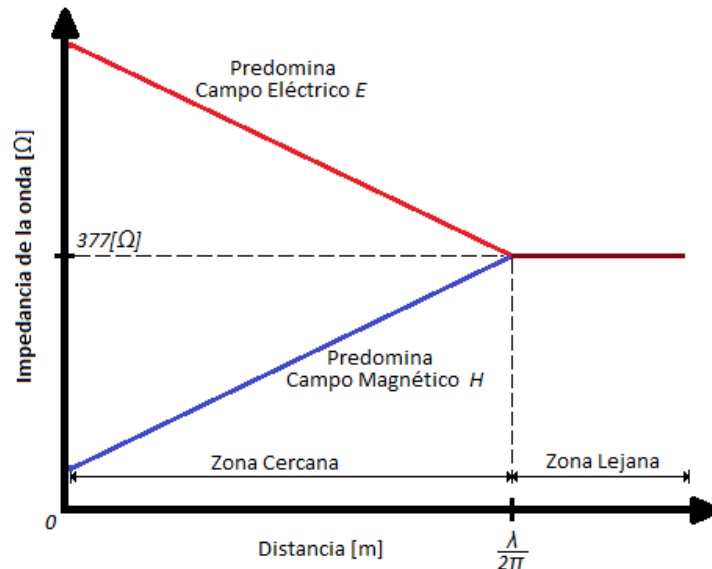


Figura 7.7. Impedancia de la onda, depende de la distancia y de la relación de zona (Ott H. 2009).

---

Como resumen, principalmente se necesitan técnicas de medición para zona cercana debido a que no se habla en los estándares acerca de cómo realizarlas. Realizar las pruebas en zona cercana da una buena aproximación de donde se localizan las mayores concentraciones de EMI en el sistema y así proponer soluciones tempranas antes de realizar las pruebas de conformidad, la cuales conllevan a una certificación además de que se pueden realizar a un costo menor.

En la siguiente parte del trabajo, se van a aplicar estas técnicas para localizar la máxima intensidad de los campos EM en las tarjetas de desarrollo que utiliza el sistema de adquisición de datos. El sistema debe funcionar de igual manera como si ya estuviera en una plataforma satelital. Las mediciones se harán con equipo de medición que tiene el CAT-UNAM y estas pruebas serán de pre-conformidad.

Como lo indicado en esta sección del trabajo, se harán las mediciones con las técnicas a cada una de las tarjetas de desarrollo de acuerdo a las consideraciones y enfoques debido a que se pretende principalmente que las tarjetas junto con los circuitos electrónicos necesarios, no sean fuentes de EMI y se afecten entre ellas. Todo esto es mostrado en el capítulo que sigue.

## CAPITULO 8.

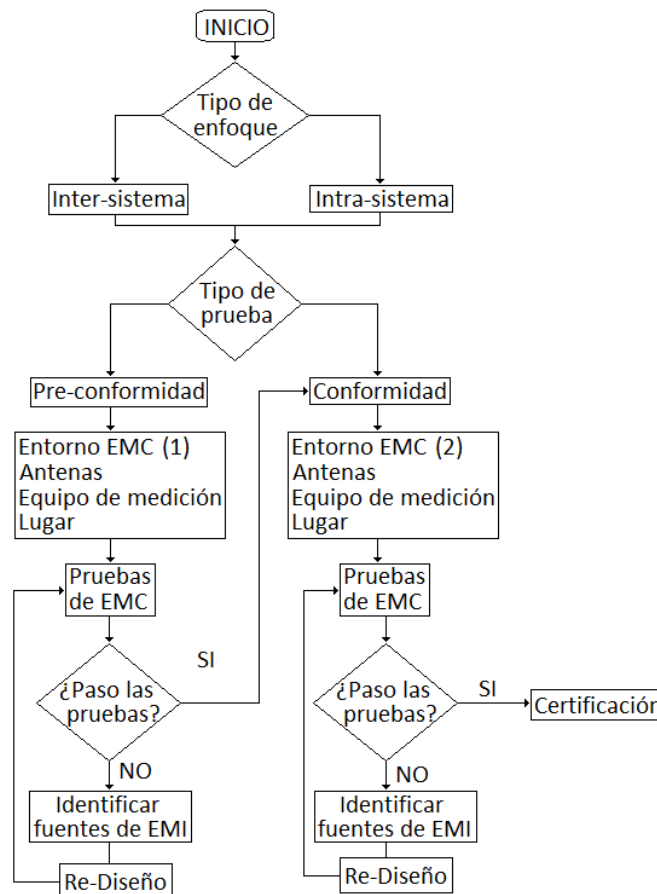
Pruebas de EMC con equipo  
de medición.

Una vez establecidas las técnicas para poder realizar una medición se aplicaran en el equipo de adquisición de datos que usa dos tarjetas de desarrollo: *Arduino UNO* y *Raspberry Pi* junto con los componentes necesarios para realizar la tarea.

A continuación se enlista el proceso que se seguirá para realizar las pruebas (protocolo experimental) de EMC:

1. Definir el tipo de enfoque que se usará en la pruebas.
2. Definir el tipo de prueba.
3. De acuerdo al tipo de prueba, definir el entorno para realizarlas; lugar, material e instrumentación a usar, que el EUT funcione como fue diseñado, entre otros.
4. Presentar los resultados para sugerir recomendaciones y soluciones en base a estos.

El siguiente diagrama sugiere un método para realizar pruebas de EMC de acuerdo al tipo que se elija, cabe mencionar que si se escoge un enfoque intra-sistema, se deben efectuar las pruebas a cada etapa del EUT que tenga:



**Figura 8.1. Diagrama para realizar pruebas de EMC.**

(1): Analizador de espectros, puntas de prueba y un lugar con emisiones mínimas de EMI.

(2): Receptor de EMI, cámara semi anecoica, instrumentación para mover las antenas y el EUT, cableado blindado, entre otros.

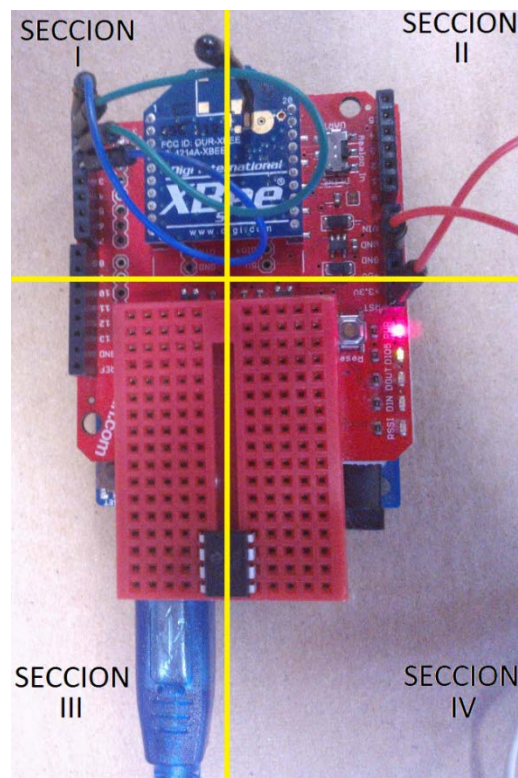


---

### 8.1. Consideraciones para la prueba de EMC-RE con técnicas de medición.

1. Vamos a definir un enfoque intra-sistema, o sea, que vamos a poner nuestra atención en el interior del sistema, midiendo cada tarjeta de desarrollo incluidos los componentes electrónicos.
2. Se eligió un tipo de prueba de pre-conformidad debido a que no se cuenta con todo el entorno de EMC necesario para realizar las pruebas de conformidad.
3. Las pruebas se realizaron en el laboratorio de sistemas espaciales ubicado en el edificio de posgrado de la facultad de ingeniería de la UNAM.
4. Esta prueba también pretende verificar las técnicas propuestas en el capítulo anterior.

La figura 8.1 muestra una parte del EUT el cual está conformado principalmente por la tarjeta de desarrollo Arduino UNO además de otros elementos que conforman el sistema, como se mencionó antes, se va a dividir en secciones para que se pueda medir la intensidad de campo EM de cada una de estas:



**Figura 8.2. Divisiones propuestas para la medición.**

Las mediciones se van a realizar con dos tipos de equipo: un analizador de espectros de mano fabricado por *Aaronia AG* [35] y un analizador de señales del fabricante de instrumentos de medición *Rohde & Schwarz* [33].

La principal ventaja del equipo de medición de mano del fabricante *Aaronia AG* es, que es un instrumento pequeño, liviano y practico que permite hacer las mediciones a distancias cortas, cuenta con puntas de prueba para zona cercana y tiene un programa que permite el uso de la PC para observar, grabar y manipular las mediciones que hayamos realizado.

Es un equipo muy útil para realizar el tipo de prueba que se quiere hacer puesto que cuenta con todos los elementos necesarios para realizar las mediciones.

El analizador de señales FSV de Rohde & Schwarz es un equipo de medición destinado a realizar más pruebas, además de la de EMC, algunas rigurosas debido a su precisión, que es mejor que el equipo anterior. Una de sus desventajas es que es un equipo grande y pesado pero con la ventaja de que podemos realizar pruebas de EMC ya que contiene una aplicación la cual contiene las características (límites de estándares, detector de señales, tabulación de los valores, entre otras importantes) para obtener la mejor medición de fuentes de EMI. Con las puntas de prueba del equipo de Aaronia AG se puede obtener las mediciones ya que a través de un adaptador se pueden conectar también al FSV. Cuenta también con la opción de guardar los resultados de la prueba para manipularlos en una computadora.

## 8.2. Equipo de Aaronia AG.

Se mostrarán los resultados del equipo de Aaronia AG para campo magnético  $\vec{H}$  teniendo en cuenta que vamos a buscar la máxima intensidad (una de las técnicas de medición) por lo que vamos a colocar la punta de medición de diferentes formas para lograr el objetivo.

En esta prueba se colocó la punta de prueba de tres formas distintas de acuerdo a la figura 7.2:

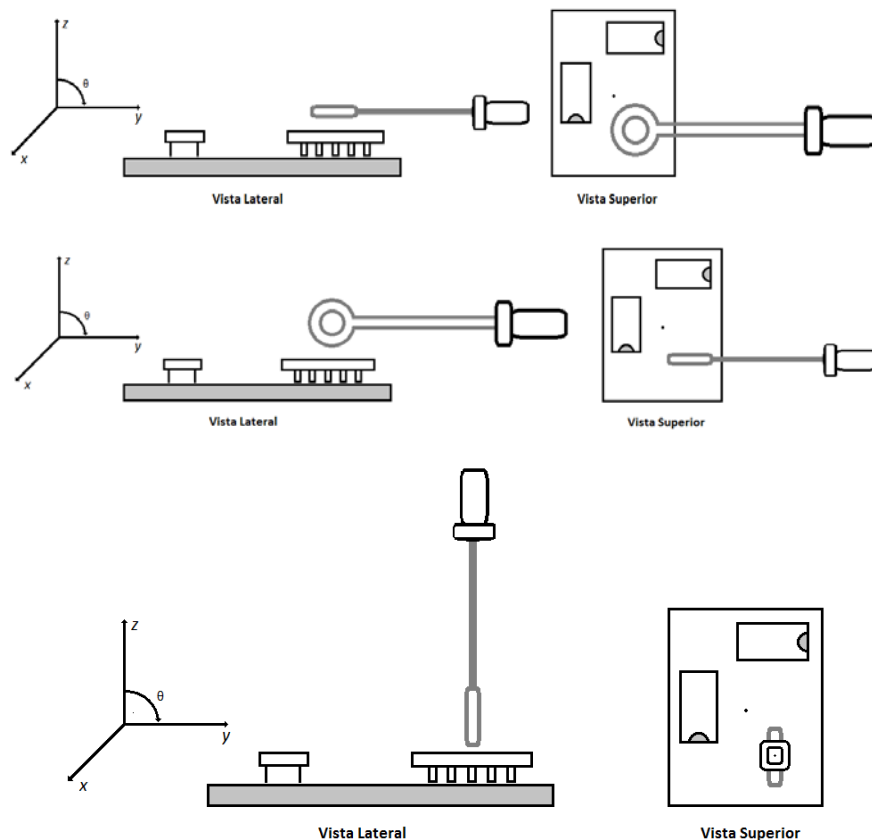


Figura 8.3. Forma 1 (arriba), forma 2 (centro)  $\vec{H}$  y forma 3 (abajo) para medir la máxima intensidad de campo  $\vec{H}$ .

Se muestran los resultados con las técnicas en la *sección I*, aplicadas en las tres formas, las tres gráficas se crearon al utilizar el programa incluido en el analizador de espectros de mano y con una computadora que guarda la gráfica de cada forma (*Spectran MCS software*):

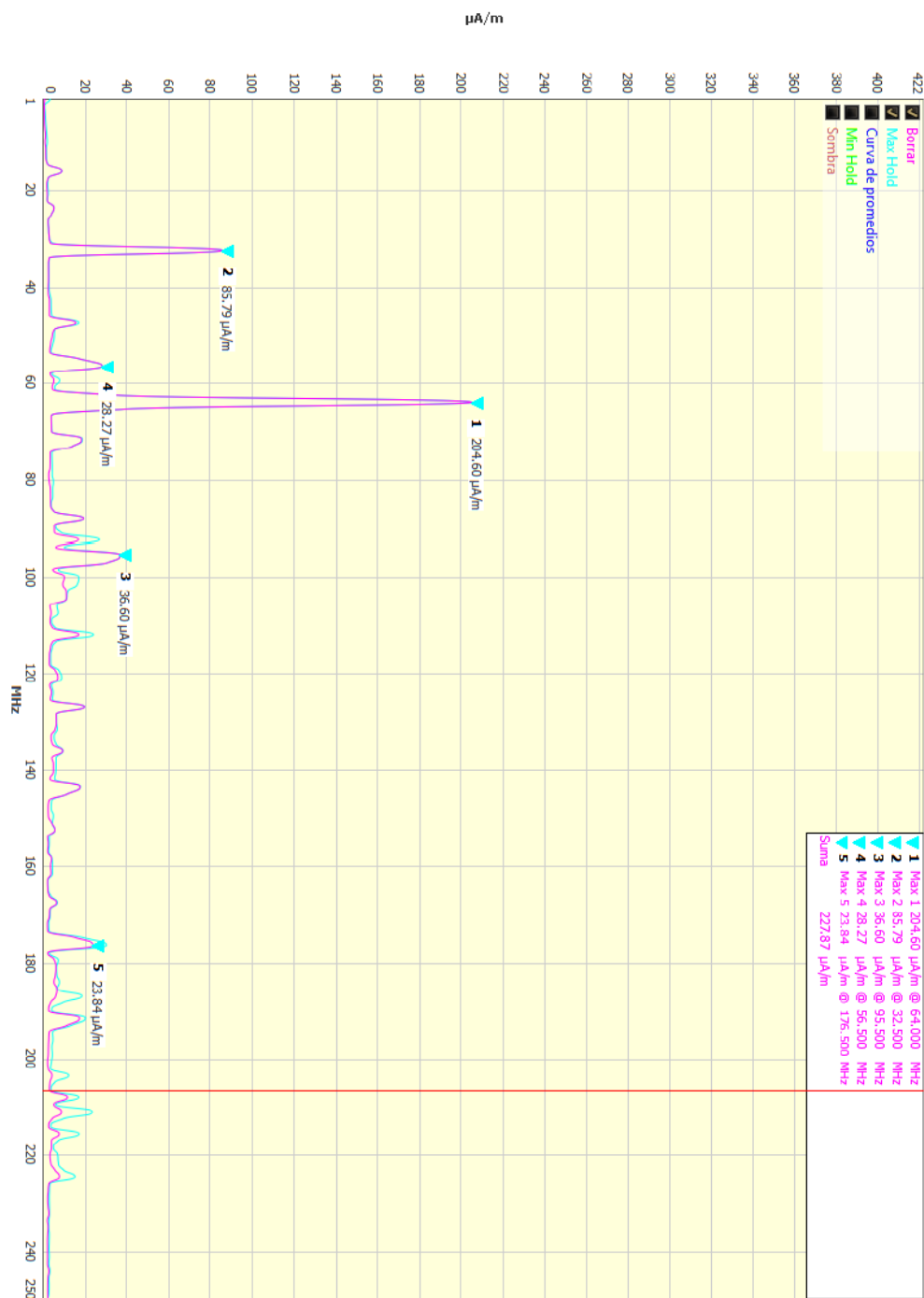


Figura 8.4. Resultado de la prueba de emisión de campo  $\bar{H}$ , sección I, forma 1. Tarjeta Arduino UNO.

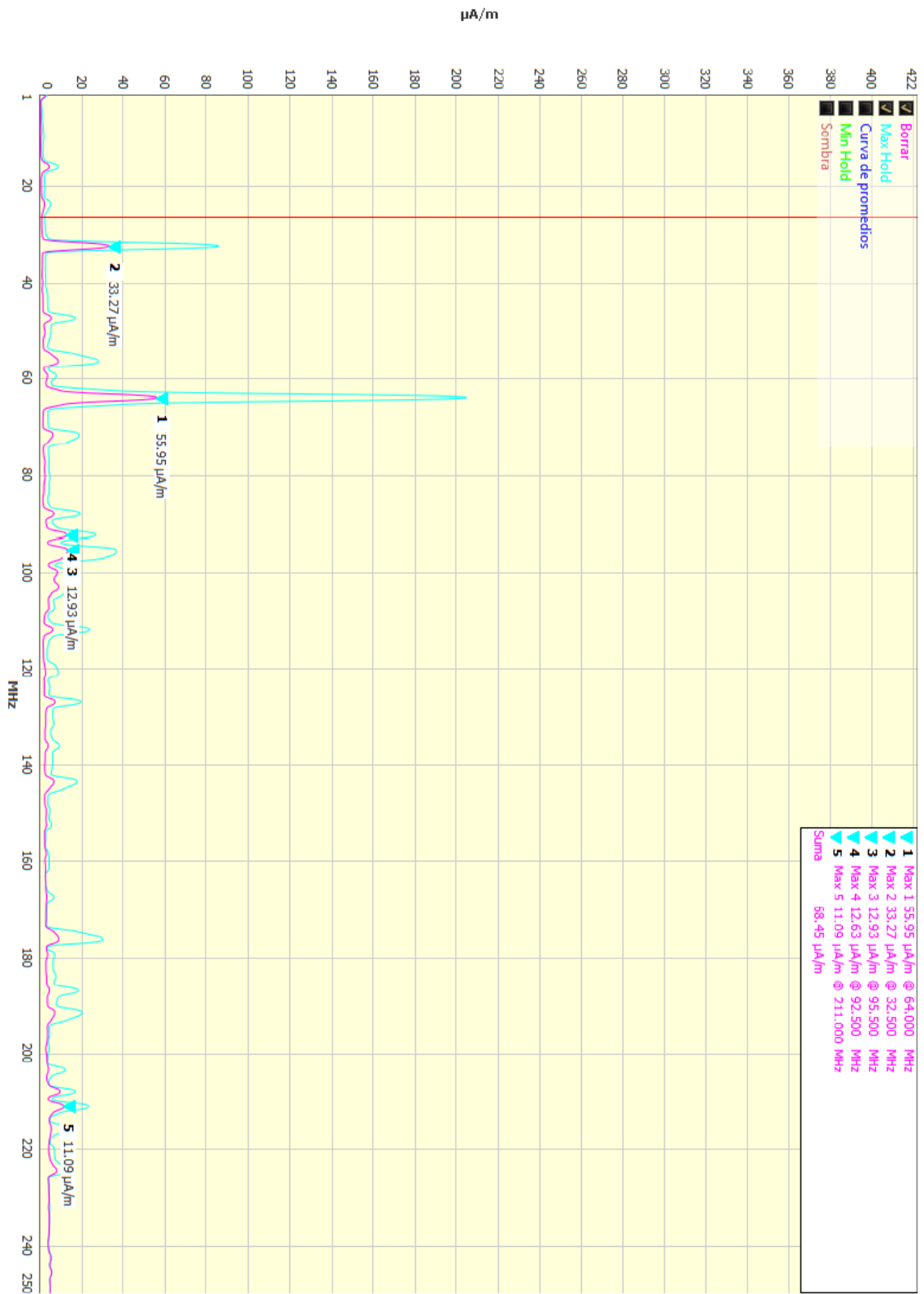


Figura 8.5. Resultado de la prueba de emisión de campo  $\bar{H}$ , sección I, forma 2. Tarjeta Arduino UNO.

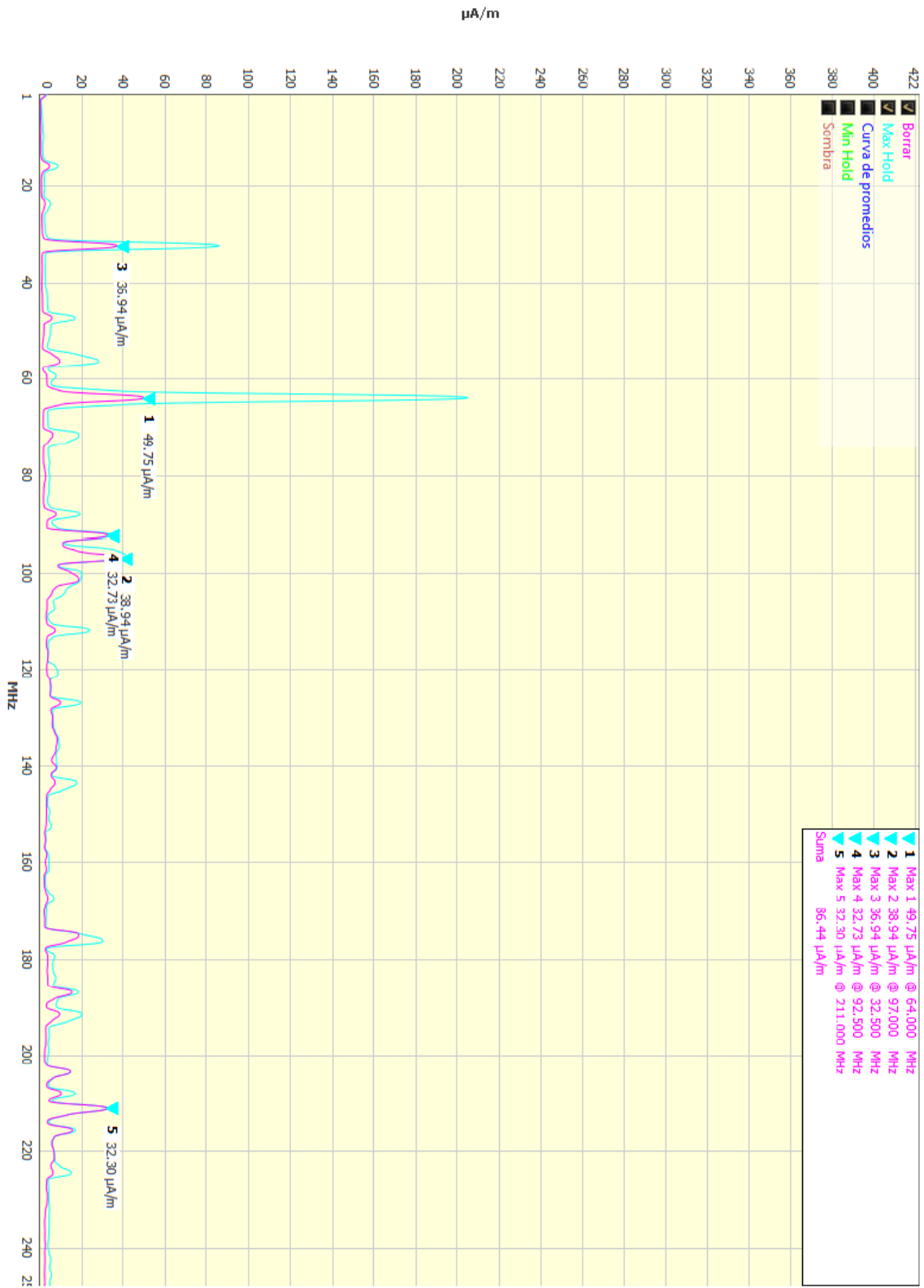


Figura 8.6. Resultado de la prueba de emisión de campo  $\bar{H}$ , sección I, forma 3. Tarjeta Arduino UNO.

El programa también proporciona una tabla con los valores con la mayor intensidad de campo  $\bar{H}$  y la frecuencia a la que se encuentra. Se observa que de las tres gráficas, la forma 1 nos indica que contiene los valores con mayor intensidad de campo magnético  $\bar{H}$  y también nos dice que si colocamos la punta de prueba de la forma 1, en este caso, se vamos a medir la máxima intensidad.

En la parte de anexos de este trabajo se encuentran las tres secciones con sus respectivas formas de medición donde se observa también que utilizando la forma 1 se medirá la máxima intensidad de campo  $\bar{H}$ .

### 8.3. Equipo de Rohde & Schwarz.

Se hizo también la prueba con el equipo de Rohde & Schwarz, utilizando las puntas de prueba del equipo anterior, se mostrarán los resultados de la medición de la *sección I* con la *forma 1* para sacar conclusiones:

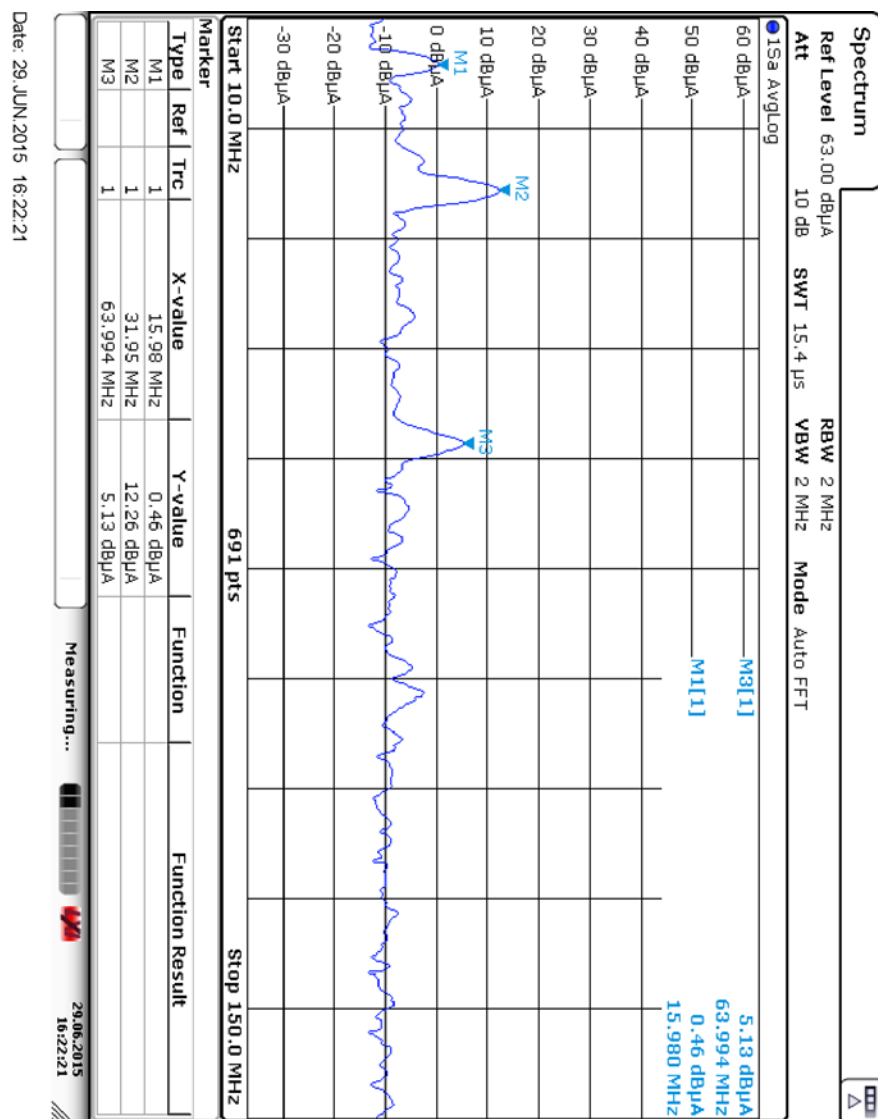


Figura 8.7. Resultado de la prueba de emisión de campo  $\bar{H}$ , equipo Rohde & Schwarz. Sección I, forma 1. Tarjeta Arduino UNO.

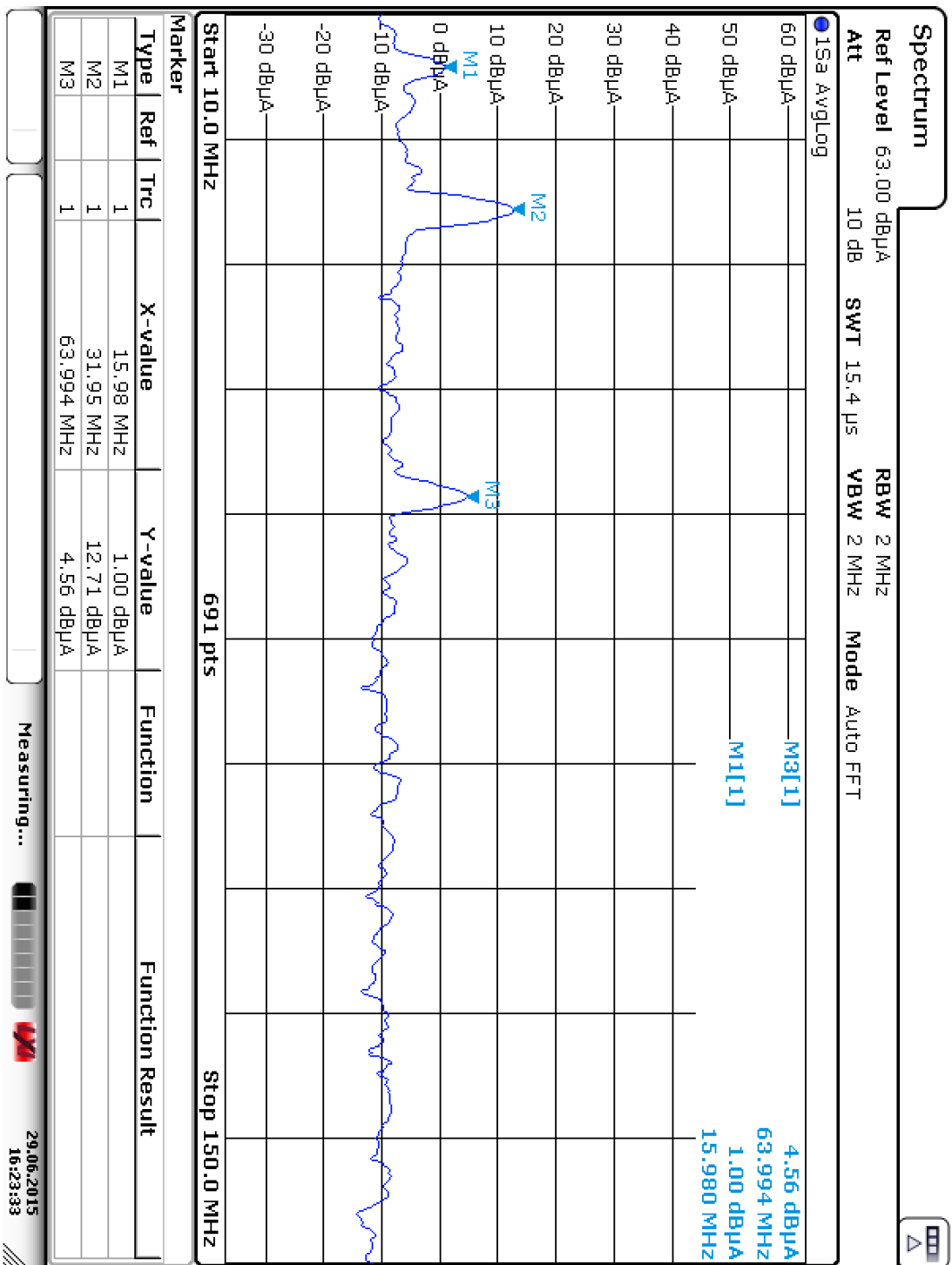


Figura 8.8. Resultado de la prueba de emisión de campo  $\bar{H}$ , equipo Rohde & Schwarz. Sección I, forma 2. Tarjeta Arduino UNO.

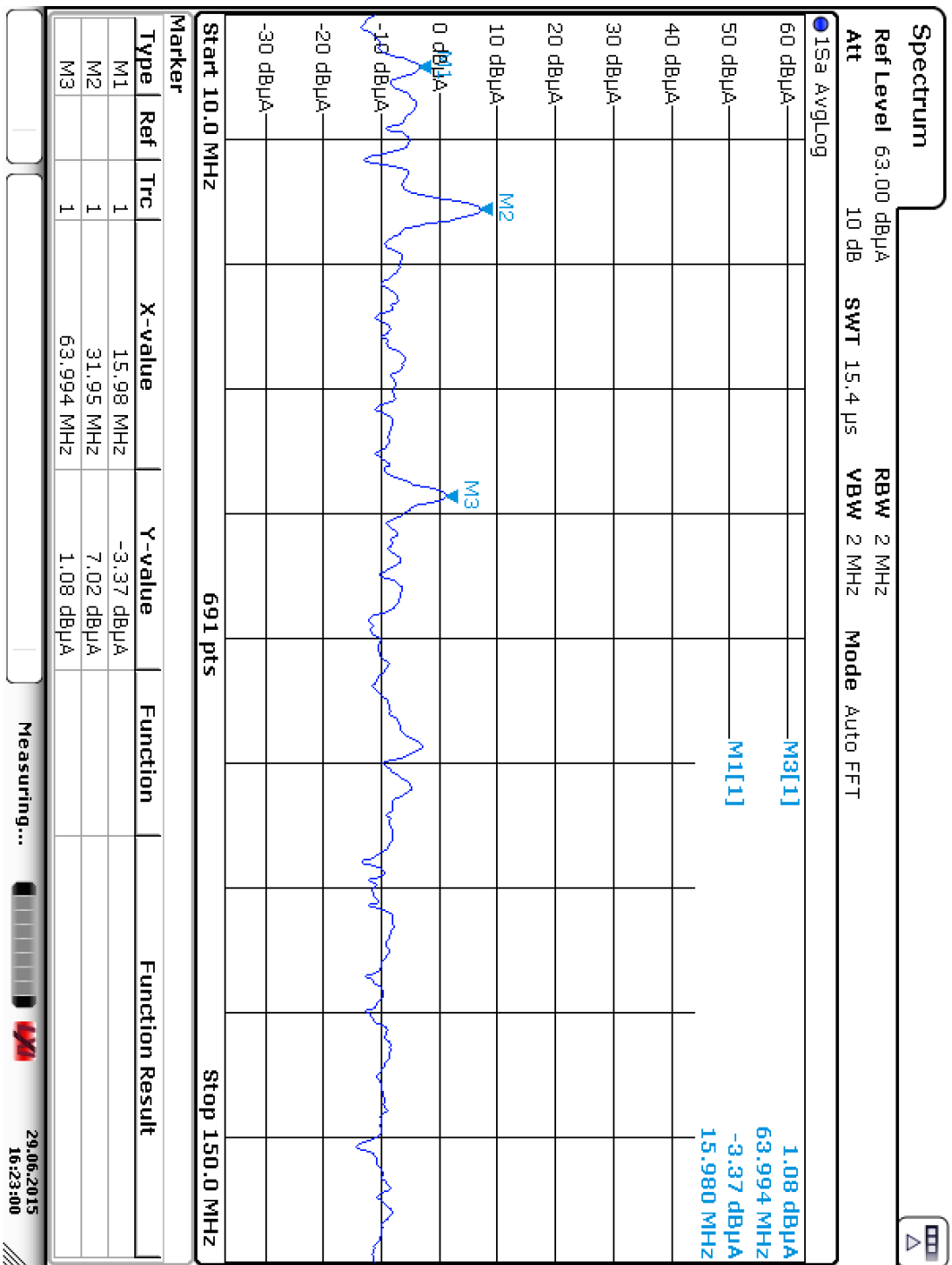


Figura 8.9. Resultado de la prueba de emisión de campo  $\bar{H}$ , equipo Rohde & Schwarz. Sección I, forma 3. Tarjeta Arduino UNO.



---

Se puede observar el mismo comportamiento en el equipo con la diferencia de que la intensidad de campo magnético no es tan grande como la del equipo de Aaronia AG debido a que el equipo de Rohde & Schwarz es más exacto y preciso.

En las pruebas con los dos equipos se concluye que utilizando las técnicas de medición en zona cercana *se obtiene la medición de la máxima intensidad que para este caso de estudio se detectó con la forma 1.*

Se observa que de acuerdo a las gráficas de campo magnético en las cuatro secciones, si se hace una comparación de estas, se concluye que en la *sección I se localiza la mayor intensidad de campo magnético.*

Una vez hecho las pruebas, se pueden mencionar algunos resultados:

- No podemos colocar elementos arriba de nuestro sistema ya podría haber acoplamiento de EMI, de ser necesario colocarlos, podemos blindar nuestro sistema para que no haya fuga de EMI.
- Si es posible, se puede colocar el sistema de la forma en la cual emita menos EMI, vertical a la posición donde se encuentra la mayor intensidad de campo.
- Blindar el sistema para poder colocarlo en cualquier sitio.

#### **8.4. Análisis y pruebas de campo eléctrico $\bar{E}$ .**

##### **8.4.1. Características de la prueba.**

Se realizó una prueba de EMC-RE para campo eléctrico para la mayoría del sistema utilizando el equipo de medición de Rohde & Schwarz el cual cuenta con las características adecuadas para efectuar la prueba.

Las características son las que tiene el equipo de medición y pueden destacar las siguientes:

- El equipo tiene la aplicación de medición de fuentes de EMI.
- Contiene marcadores para ver la intensidad de campo EM medido y la frecuencia a la que se encuentra.
- Cuenta con detectores de señales y mediciones con ancho de banda distintos para medir fuentes de EMI.
- Contiene límites programados en la aplicación para pruebas de EMC.

Se utilizó la mayoría de las características para realizar la prueba de pre-conformidad de EMC-RE para campo eléctrico. Las pruebas se basaron en el estándar de MIL-STD461F RE 102 con las diferencias siguientes:

1. Se utilizó un a antena logarítmica periódica.
2. Se definió un intervalo de frecuencias de 1 MHz-3 GHz.
3. La prueba se realizó a la mayoría del sistema de adquisición de datos, las tarjetas de desarrollo Arduino UNO, Raspberry Pi y el módulo de XBee.

El estándar indica que la prueba se debe de efectuar en una cámara anecoica, sin embargo, como se definió que es una prueba de *pre-conformidad* se realizó en el laboratorio de sistemas espaciales. La figura 8.9 muestra los resultados que se obtuvieron con las condiciones mencionadas anteriormente:

#### 8.4.2. Resultados.

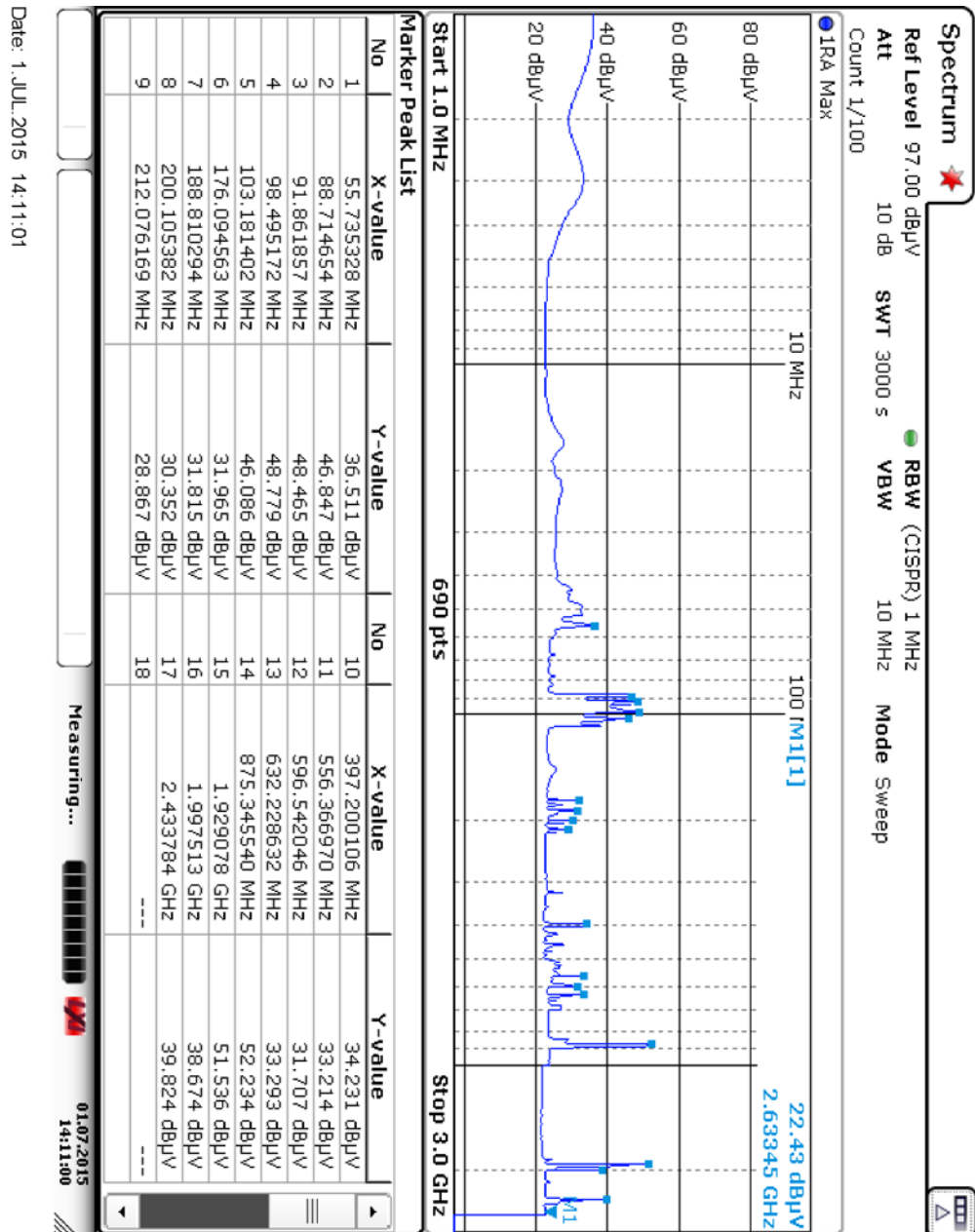
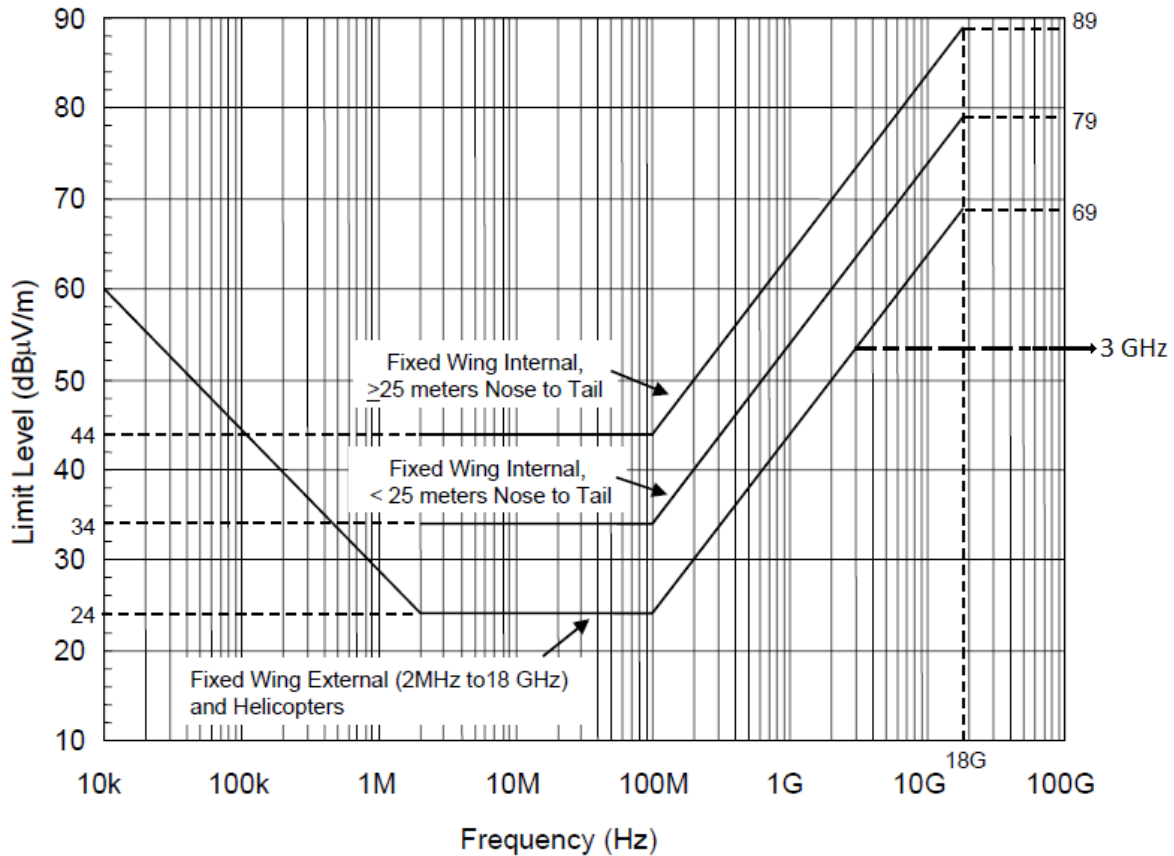


Figura 8.10. Resultados de la prueba de EMC-RE 102 basado en el estándar MIL-STD461F.

Se observa que la gráfica muestra también una tabla con los valores máximos que se midieron en la prueba.

De acuerdo a la gráfica que contiene los límites de emisión para el estándar utilizado (figura 8.11) se concluye que en los límites que el estándar indica no pasa la prueba de EMC-RE 102, se observa en la gráfica de resultados que en el intervalo de 1 MHz a 100 MHz sobrepasa el límite de emisión del estándar, que es de 24 dBμV/m o 15.84 μV/m.



**Figura 8.11 Límites de emisiones radiadas del estándar MIL-STD461F.**

La intensidad mayor se midió a una frecuencia de 875.74 MHz y con una amplitud de 52.234 dBμV/m que en unidades de V/m es igual a:

$$x[V/m] = 10^{\left(\frac{y[dB\mu V/m]-120}{20}\right)}$$

$$x[V/m] = 10^{\left(\frac{52.234[dB\mu V/m]-120}{20}\right)} = 0.4089[mV/m]$$

Los resultados pueden ser alterados por las siguientes causas:

- Se considera al sistema como un elemento fundamental, un caso ideal, pero el sistema cuenta con muchos elementos como cables, pistas y dispositivos los cuales no se consideran en el análisis.
- El acoplamiento de señales externas como las comunicaciones (celular, radio AM y FM, Wi Fi, entre otras), el servicio de energía eléctrica para alimentar los equipos, entre otros.
- El lugar en donde se realizaron las pruebas, ya que permite el acoplamiento de fuentes de EMI externas.

- También para este caso estamos usando dispositivos que emiten energía radiada intencionalmente (módulo XBEE) el cual no se considera en el análisis teórico.

### 8.5 Comparación de los resultados de la prueba con los cálculos realizados en el capítulo 5.

A continuación la figura 8.12 muestra el resultado de la prueba de EMC-RE para campo eléctrico  $E$ , la prueba fue de pre conformidad y contiene los límites de acuerdo al estándar MIL-STD 461F. Se muestran las frecuencias a las que trabajan las dos tarjetas de desarrollo del sistema de adquisición de datos:

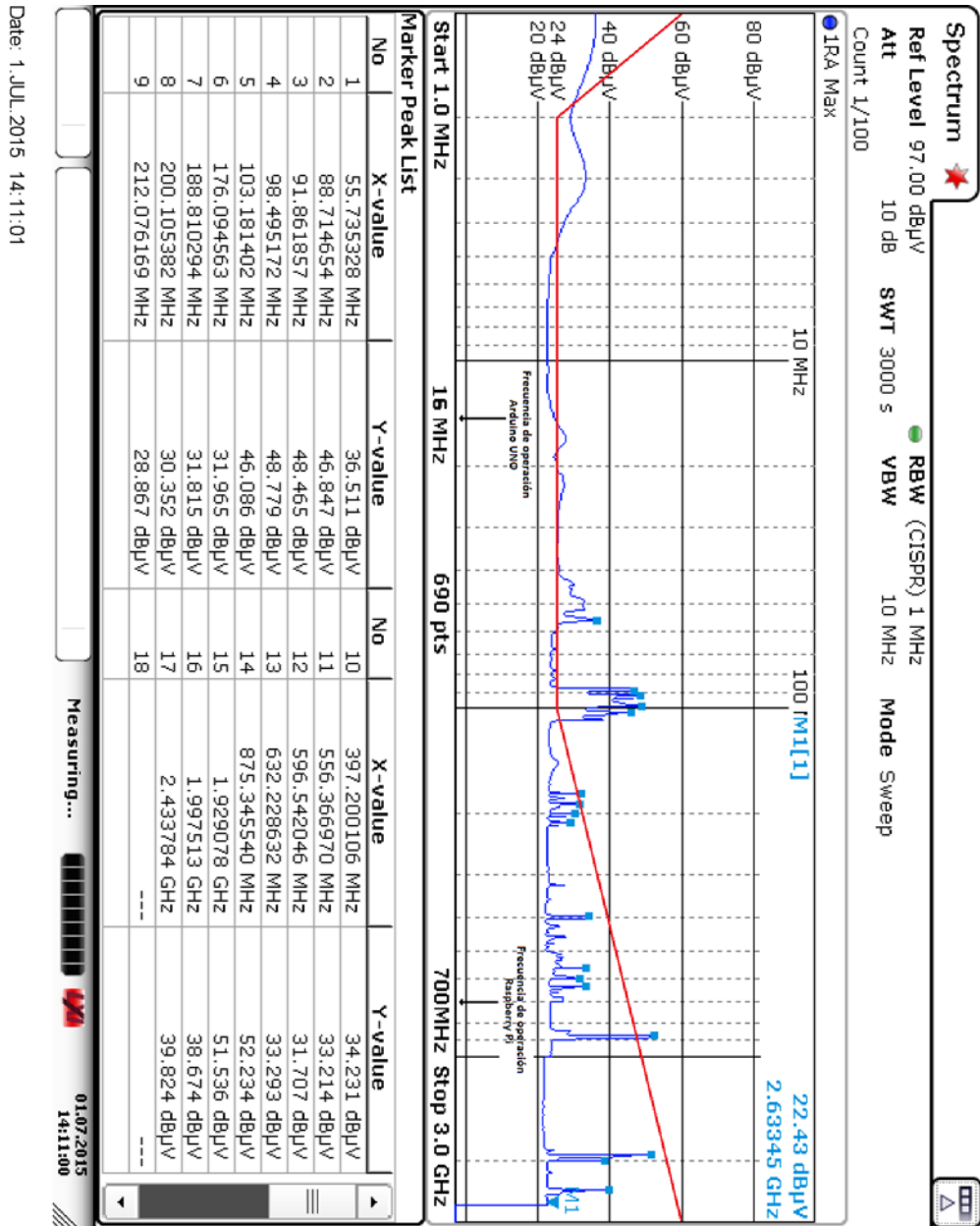


Figura 8.12. Resultado de la prueba de EMC-RE al sistema de adquisición de datos.

La intensidad de campo eléctrico  $\bar{E}$  a la frecuencia de operación de cada tarjeta de desarrollo se obtiene observando la figura 8.12:

**Arduino UNO:**

$$\bar{E} = 24 \text{ dB}\mu\text{V}$$

**Raspberry Pi:**

$$\bar{E} = 27 \text{ dB}\mu\text{V}$$

Se puede observar que a la frecuencia de operación de las tarjetas de desarrollo se genera campo eléctrico pero no afecta al sistema de acuerdo al estándar MIL-STD 461F, está por debajo de los límites de emisión. También en el resultado se observa que se genera campo eléctrico a frecuencias distintas de la frecuencia de operación de las tarjetas de desarrollo, las cuales no permiten pasar la pruebas de EMC-RE 102. Las causas por las que hay emisiones de campo eléctrico las cuales no permiten pasar la prueba pueden ser las mencionadas anteriormente.

Los resultados teóricos para cada tarjeta de desarrollo utilizada dependen de la relación de zona en que se encuentre para elegir las ecuaciones adecuadas. Estos resultados fueron calculados en el capítulo 4. En este caso se usará los resultados teóricos del elemento fundamental de campo magnético  $\bar{H}$ , el cual se asemejan a la operación normal del sistema [1]. Esta consideración puede ser usada si se desconoce el carácter electromagnético del sistema.

| Arduino UNO   |                                      |
|---|--------------------------------------|
| Teórico   | Experimental                         |
| $E_{\varphi} = 154.4006[\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}]$ | $\bar{E} = 24 \text{ dB}\mu\text{V}$ |

| Raspberry Pi   |                                      |
|--|--------------------------------------|
| Teórico:   | Experimental                         |
| $E_{\varphi} = 69.7067[\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}]$ | $\bar{E} = 27 \text{ dB}\mu\text{V}$ |

**Figura 8.13. Comparación de resultados a cada una de las tarjetas utilizadas en el sistema de adquisición de datos.**

Se observa que se los resultados teóricos son mayores que las mediciones de campo eléctrico de la prueba de EMC-RE 102; para la tarjeta Arduino UNO el resultado es aproximadamente 6.5 veces mayor al resultado experimental mientras que para la tarjeta Raspberry Pi es de 3 veces mayor.

Una de las razones por la cual los resultados no concuerdan es el hecho de considerar al sistema de una forma general; *se interpreta como un elemento con los parámetros necesarios para calcular la intensidad de los campos EM (dimensiones, frecuencias, voltajes y corrientes de operación)*. En este caso se utilizó a la frecuencia de operación de las tarjetas de desarrollo para el cálculo de estas intensidades, una consideración que puede asemejarse más a los resultados experimentales es *considerar solamente al elemento que genera la frecuencia*, en este caso, al circuito que la genera, establecer sus parámetros y calcular las intensidades de los campos EM.

**CONCLUSIONES.**

---

Se logró adquirir los conocimientos necesarios para entender el tema de EMC, el entorno y ambiente EM que puede estar afectando a un sistema que funcione en este.

Se obtuvieron los conocimientos de las pruebas de EMC que existen, los organismos encargados de crearlos según la aplicación del sistema que se diseñe. Se hizo énfasis en las pruebas de EMC para emisiones radiadas basado en el estándar MIL-STD 461F.

Uno de los objetivos de este trabajo era crear una propuesta de protocolo para realizar pruebas de EMC a sistemas eléctrico y/o electrónicos, hablando de protocolo como la serie de pasos que uno debe seguir para realizar las pruebas de manera efectiva, rápida y eficientemente.

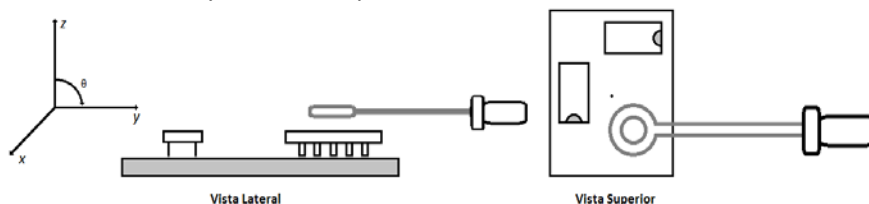
El propuesta se puede definir de dos formas: hacer pruebas en las dos zonas si uno conoce sus parámetros de diseño, el cual se propone un formato para recolectarlos y tenerlos a la mano la propuesta se encuentra en la parte de anexos de este trabajo. Para el análisis de las zonas, para zona cercana se propone las técnicas de medición mientras que para zona lejana es necesario tener en cuenta que estándar vamos a manejar y las condiciones que se necesitan para realizar las pruebas.

Se realizó el análisis para hacer pruebas de EMC al prototipo de un sistema de adquisición de datos que utiliza las tarjetas desarrollo *Arduino UNO* y *Raspberry Pi*, aplicando el protocolo de EMC propuesto se obtuvieron los siguientes resultados:

- Se define el enfoque de intra-sistema como análisis para el sistema de adquisición de datos.
- A través de las técnicas de medición en zona cercana se localizó la máxima intensidad de campo EM en las tarjetas de desarrollo las cuales se muestran en el trabajo.
- Se realizaron las pruebas de pre-conformidad para campo eléctrico al sistema con las condiciones que se tenían para realizarlas.

#### Consideraciones y recomendaciones.

1. Debido a que las tarjetas de desarrollo son la parte más importante del sistema y se encontró que la máxima intensidad de campo EM se localiza de la forma 1 como lo indica la figura siguiente por lo que si se coloca algún dispositivo arriba de estos, puede haber acoplamiento de señales y ocasionar que no funcionen como deberían.



**Figura. Forma donde se localiza la mayor intensidad de campo EM.**

2. Se encontró que en el cableado se utiliza en la tarjeta de desarrollo Arduino UNO se produce intensidad de campo EM, se debe considerar otras formas de colocar este, utilizar algún filtro o utilizar otra alternativa de cableado.
3. Otra alternativa podría ser colocar las tarjetas de desarrollo de una forma la cual no se pueda acoplar la energía EM, una forma vertical a la forma 1 puede ser una opción.

---

En la prueba de pre-conformidad de campo eléctrico  $\bar{E}$  bajo el estándar MIL-STD 461F se concluye que no paso la prueba debido a que sobrepasa los límites de emisión que establece el estándar, teniendo como consideración que se realizó a la mayoría del sistema pero esta prueba sirve para localizar las fuentes de EMI que tiene el sistema bajo prueba.

Se hizo un primer contacto con el entorno, equipo e instrumentación que se utiliza para realizar las pruebas de EMC:

- Antenas y puntas de prueba.
- Equipo de medición de diferentes fabricantes (Aaronia AG, Rohde & Schwarz y Keysight Technologies).
- Cámaras semi anecoicas.

Con el equipo de medición se aprendió a utilizarlo, también se utilizaron sus características específicas para realizar mediciones de fuentes de EMI.

Se hicieron los cálculos para obtener la intensidad de campo EM con las ecuaciones de los elementos fundamentales, eléctrico y magnético según los datos de las tarjetas de desarrollo, los cuales no coinciden con los resultados de las pruebas de zona cercana; se propuso una distancia de 1 [m] (distancia a la cual se hizo la prueba de campo eléctrico  $\bar{E}$ ) y a través de la relación de zona se establece que a 1 [m] debemos utilizar las ecuaciones de zona lejana para la tarjeta de desarrollo Raspberry Pi y zona cercana para la tarjeta Arduino UNO, dando los resultado mostrados, como justificación a los resultados se puede decir que las condiciones y el entorno para realizar las pruebas no eran las adecuadas, diversos factores mencionados afectan en la medición.

Cabe mencionar que si se establecen y utilizan las condiciones necesarias para realizar las pruebas de EMC como el lugar y las condiciones para realizarlas, los resultados teóricos *deben coincidir con los resultados de las pruebas*, con alguna diferencia en ellas pero debe de ser menor, como anteriormente se menciona, el hecho de considerar al sistema como un elemento fundamental se está calculando una forma ideal pero el sistema no es así.

Se utilizaron las ecuaciones con el objetivo de predeterminar la máxima intensidad de campo EM pero si se hacen las pruebas se puede determinar con mayor facilidad que ecuaciones usar para obtener las intensidades de campo EM.

Para atacar un problema de EMC lo primero que se debe hacer son pruebas, obtener la intensidad de los campos EM del sistema para utilizar el criterio y obtener su carácter EM. Una vez obtenido esto con la relación que tienen los campos EM, la ecuación de la impedancia de una onda se calculará y así establecer que campo es el que predomina para después elegir que elemento fundamental es el más adecuado junto con las ecuaciones.

Todos los resultados obtenidos en este trabajo dan una idea más a detalle de lo complicado que se puede tornar un problema de EMC si no se consideran todas las condiciones que deben tener las pruebas. Realizar mediciones de las intensidades de campos EM da la ventaja de poder definir el carácter EM del sistema y así utilizar las ecuaciones del elemento fundamental que más se aproxima a su comportamiento EM.



---

### **Trabajo a futuro.**

Una vez teniendo las condiciones para realizar una prueba de EMC-RE podemos hacer las pruebas para comparar los resultados que se obtuvieron con las ecuaciones de los elementos fundamentales.

Lo siguiente para realizar sería un análisis considerando las condiciones que se tienen al momento de realizar las pruebas, incluirlas en las ecuaciones para obtener las gráficas y valores que tenga una similitud con los resultados de las pruebas.

Cabe mencionar que únicamente se realizó un análisis para una parte de las pruebas de EMC que se hacen a un sistema, las de emisiones radiadas para campo eléctrico, todavía falta realizar las otras pruebas que complementan las pruebas de EMC.

Este trabajo se enfocó a la realización de la prueba EMC-RE para el sistema de una plataforma satelital pero con pocas diferencias, se puede utilizar para cualquier sistema eléctrico y/o electrónico.

Las pruebas de EMC no son solamente la medición de emisiones radiadas, de acuerdo al el diagrama que muestra el mapa general de EMC se deben de recolectar los conocimientos necesarios para realizar las demás pruebas de EMC: *Emisiones Conducidas*, *Susceptibilidad Radiada y Conducida* y pruebas de fenómenos transitorios como son las pruebas de *descarga electrostática* y *pulso electromagnético*.

**ANEXOS.**

# A. Resultados de la prueba de EMC-RE del sistema Pixqui.

TEST

Identificador: CA AEM-BF1

EUT: Cooperation Agreement-AgenciaEspacila Mexicana BallonFligh

Manufacturer: UNAM Operating Condition:

Test Site: FC-UNAM

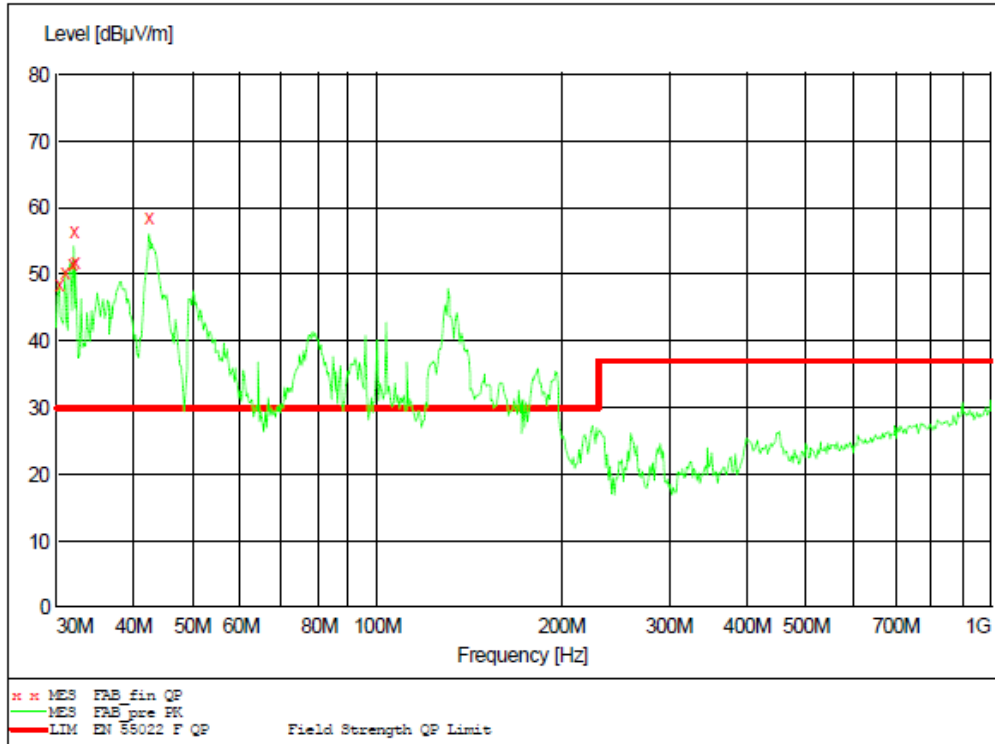
Operator: Fabian Vazquez

Test Specification: Vertical Comment:

Start of Test: 7/30/2013 / 5:33:14PM

**SCANTABLE: "EN55022Field-mod"**

| Start    | Stop    | Step  | Detector | Meas. Time | IF Bandw. | Transducer          |
|----------|---------|-------|----------|------------|-----------|---------------------|
| 30.0 MHz | 1.0 GHz | 0.5 % | MaxPeak  | 10.0 ms    | 120 kHz   | Biconilog3142 #1762 |



**MEASUREMENTRESULT: "FAB\_finQP"**

7/30/2013 6:17PM

| Frequency MHz | Level dBuV/m | Transd dB | Limit dBuV/m | Margin dB | Height cm | Azimuth deg | Polarisation |
|---------------|--------------|-----------|--------------|-----------|-----------|-------------|--------------|
| 30.300750     | 48.50        | 19.1      | 30.0         | -18.5     | 100.0     | 94.00       | VERTICAL     |
| 30.911325     | 50.20        | 18.7      | 30.0         | -20.2     | 106.0     | 183.00      | VERTICAL     |
| 31.691875     | 51.60        | 18.2      | 30.0         | -21.6     | 100.0     | 237.00      | VERTICAL     |
| 32.009586     | 56.50        | 18.0      | 30.0         | -26.5     | 100.0     | 161.00      | VERTICAL     |
| 32.330482     | 52.00        | 17.8      | 30.0         | -22.0     | 100.0     | 188.00      | VERTICAL     |
| 42.323299     | 58.70        | 12.4      | 30.0         | -28.7     | 100.0     | 317.00      | VERTICAL     |

Page 1/1 7/30/2013 6:17PM FAB

**Figura A1. Gráfica de los resultados de la prueba.**

Se observa que para el rango de  $30 - 230 [MHz]$  supera los límites del estándar teniendo como intensidad máxima de  $58.7 [dB\mu V/m]$  a una frecuencia de  $42.32 [MHz]$ .

Convertimos el valor de la intensidad de campo eléctrico a  $dB\mu V/m$  con la siguiente ecuación:

$$x[V/m] = 10^{\left(\frac{y[dB\mu V/m]-120}{20}\right)}$$

Para el valor de  $58.7 [dB\mu V/m]$ :

$$x[V/m] = 10^{\left(\frac{58.7[dB\mu V/m]-120}{20}\right)} = 0.86[mV/m]$$

Si utilizamos este valor en la ecuación de la intensidad de campo eléctrico en zona lejana:

Elemento fundamental de  $\vec{E}$ .

$$E_{\theta} = \frac{I l \eta k}{4\pi r} \sin \theta = \left(\frac{l I f \eta}{2rc}\right) \sin \theta \text{ para EFE.}$$

$$f = \frac{E_{\theta} 2rc}{l I \eta} = \frac{2(0.86 \times 10^{-3} [V/m])(3 [m])(3 \times 10^8 [m/s])}{(0.35 [m])(0.5 [A])(120\pi [\Omega])} = 11.73 \times 10^3 [Hz]$$

Elemento fundamental de  $\vec{H}$ .

$$E_{\phi} = \frac{\eta I A k^2}{4\pi r} = \left(\frac{A I f^2 \eta \pi}{rc^2}\right) \sin \theta \text{ para EFH.}$$

$$a = \sqrt{\left(\frac{0.35 [m]}{2}\right)^2 + \left(\frac{0.5 [m]}{2}\right)^2} = 0.305 [m^2]$$

$$f = \sqrt{\frac{E_{\phi} rc^2}{A I \eta \pi}} = \sqrt{\frac{(0.86 \times 10^{-3} [V/m])(3 [m])(3 \times 10^8 [m/s])^2}{(0.305 [m^2])(0.5 [A])(120\pi [\Omega])}} = 2 \times 10^6 [Hz]$$

Se observa que tenemos dos resultados diferentes para los dos elementos fundamentales, podríamos interpretar estos resultados como:

- Las frecuencias principales a las que trabajan algunos de los dispositivos que contiene el sistema.
- Componentes de la frecuencia principal a las que trabajan los dispositivos que contiene el sistema (armónicos).

Como no se tiene el datos exacto de la(s) frecuencia(s) de operación del sistema, lo anterior pasa a ser un ejercicio.

Para este caso lo único que podemos hacer es dar recomendaciones para reducir las fuentes de EMI.

---

## Resultados de la prueba.

La gráfica 1 contiene los resultados de la prueba y además el intervalo de esta, ancho de banda, el tipo de antena que se usó, entre otras cosas. El primer paso que hace el equipo que realizó la prueba fue detectar a que frecuencia está radiando más campo eléctrico el sistema, están marcados con una X en la gráfica. También nos proporciona una tabla que contiene la frecuencia a la que se hizo la detección del campo eléctrico, el valor del campo dado en  $dB\mu V/m$ , los límites permitidos también en  $dB\mu V/m$ , datos de la configuración del equipo, giro de la mesa de prueba y el tipo de polarización.

Hay que tener en cuenta que para poder dar un resultado concreto, los diseñadores del sistema deben proporcionar las características mínimas de este, como las frecuencias de operación de cada dispositivo, los voltajes y corrientes de operación del sistema entre otras. Sin estas características no es posible dar un buen resultado.

El equipo no paso la prueba por las siguientes causas.

- El sistema genera radiación en un intervalo de *30 MHz* a *200 MHz* que excede los requerimientos mínimos de la prueba.
- Hay acoplamiento de señales.
- La localización y posición de las tarjetas de circuito impreso (PCB) no es la adecuada, colocarlas en pila puede generar acoplamiento eléctrico y magnético.

## Notas.

- Los resultados obtenidos son incompletos debido a que la tarjeta del CPU del sistema no tuvo respuesta de comunicación con la terminal de control, sin embargo, los encargados del sistema comentaron que sí se encendió la tarjeta y estaba realizando algunos procesos, por lo tanto, se midieron las emisiones de campo eléctrico resultante junto con los sistemas en completo funcionamiento (HK1, HK2, LVPS, Quetzalito).
- No se modificó ninguna línea de código de operación ni funcionamiento del equipo.
- La estructura mecánica del equipo no se modificó para la realización de la prueba.
- Los resultados obtenidos muestran niveles de campo eléctrico mayores a los definidos por el estándar propuesto, lo que implica que en caso de que funcione la tarjeta del CPU, estos niveles serán mayores.
- El reporte de los datos y las gráficas entregadas se generó desde la terminal de control que se tiene en el cuarto de control de la cámara anecoica de la Facultad de ciencias.
- Se probaron los dos modos de polarización, horizontal y vertical.
- La prueba en polarización horizontal se interrumpió debido al tiempo de ejecución de la prueba (prioridad 2).
- La prueba de polarización vertical (prioridad 1) se realizó completamente.
- Se realizó una adecuación al cable de alimentación del sistema debido que su longitud no era suficiente para conectar el sistema a la fuente de alimentación.

---

El equipo bajo prueba es de clase B, de acuerdo a la clasificación de equipos en el estándar.

Las pruebas se realizaron con una distancia horizontal entre el equipo bajo prueba y la antena de 3 m. Las pruebas se realizaron con una distancia vertical entre el plano de tierra y el punto máximo superior de 4 m. Se consideran los niveles de equipo de clase B para tener una conclusión.

**Propuestas.**

Se propone blindar el sistema debido a que es la opción más viable en el poco tiempo con el que se cuenta.

**Opción 1:** Forrar el sistema completamente con papel aluminio pegado con el kapton, después forrar la caja con mylar pegado con kapton.

**Opción 2:** cubrir todas las aberturas (orillas o filos) de cada caja con cinta de cobre papel aluminio pegado con kapton.

**Material:**

- Papel aluminio.
- Cinta de cobre.
- Kapton.
- Mylar

## B. Programa para calcular y graficar la intensidad de campos EM.

Los programas se hicieron con el programa *MATLAB*, de la empresa *Mathworks*. Se hicieron a través de *scripts* que es básicamente la secuencia de pasos y comandos que utilizamos para calcular la intensidad de los campo EM con la diferencia de se guardan en el script y solamente tenemos que llamarlo en la ventana de comandos para que se ejecute y evitar tener que volver a escribirlos las veces que lo necesitemos. Se muestran los scripts que muestran los resultados en  $V/m$  y  $dB\mu V/m$  respectivamente para los dos elementos fundamentales, además de la gráfica, también muestra la longitud de onda, el número de onda y la relación de zona.

### Elemento fundamental de campo eléctrico $\bar{E}_r$ .

#### Zona Cercana.

| $\bar{E}_r$  |   |
|--|---|
| En [V/m].  | En [dB $\mu$ V/m]   |
| <pre>frecuencia = input('Escribe la frecuencia de: '); frecuencia corriente = input(' Escribe la corriente de: '); corriente longitud = input('Escribe la longitud: '); longitud theta = input('Escribe el ángulo (en radianes): '); theta r=[0.01:0.001:1]; c=3e8; eta=377; disp('La longitud de la onda es de:') lambda=c/frecuencia disp('El número de onda es de:') k=(2*pi)/lambda disp ('La relacion de zona es de:') rz=lambda/(2*pi) disp('El campo eléctrico en r es de:') Er=((corriente*longitud*eta)./(2*pi*k*r.^3) )*cos(theta); semilogy(r,Er,'b','LineWidth',1.4); grid on xlabel('Distancia r[m]','FontSize',15); ylabel('Campo eléctrico en r [V/m]','FontSize',15); title('Campo eléctrico en r, Zona Cercana','FontSize',15);</pre> | <pre>frecuencia = input('Escribe la frecuencia de: '); frecuencia corriente = input(' Escribe la corriente de: '); corriente longitud = input('Escribe la longitud: '); longitud theta = input('Escribe el ángulo (en radianes): '); theta r=[0.01:0.001:1]; c=3e8; eta=377; disp('La longitud de la onda es de:') lambda=c/frecuencia disp('El número de onda es de:') k=(2*pi)/lambda disp ('La relacion de zona es de:') rz=lambda/(2*pi) disp('El campo eléctrico en r es de:') Er=((corriente*longitud*eta)./(2*pi*k*r.^3) )*cos(theta); Er_dBuV=20*log10(Er/1e-6); plot(r,Er_dBuV,'b','LineWidth',1.4); grid on xlabel('Distancia r[m]','FontSize',15); ylabel('Campo eléctrico en r [dBuV/m]','FontSize',15); title('Campo eléctrico en r, Zona Cercana','FontSize',15);</pre> |

| $\bar{E}_\theta$  |  |
|---|--|
| En [V/m].   | En [dB $\mu$ V/m]  |
| <pre>frecuencia = input('Escribe la frecuencia de: '); frecuencia corriente = input(' Escribe la corriente de: '); corriente longitud = input('Escribe la longitud: '); longitud theta = input('Escribe el ángulo (en radianes): '); theta r=[0.01:0.001:1]; c=3e8; eta=377; disp('La longitud de la onda es de:') lambda=c/frecuencia disp('El número de onda es de:') k=(2*pi)/lambda disp('La relacion de zona es de:') rz=lambda/(2*pi) disp('El campo eléctrico en theta es de:') Etheta=((corriente*longitud*eta)./(4*pi*k*r .^3))*sin(theta); semilogy(r,Etheta,'b','LineWidth',1.4); grid on xlabel('Distancia r[m]','FontSize',15); ylabel('Campo eléctrico en theta [V/m]','FontSize',15); title('Campo eléctrico en theta, Zona Cercana','FontSize',15);</pre> | <pre>frecuencia = input('Escribe la frecuencia de: '); frecuencia corriente = input(' Escribe la corriente de: '); corriente longitud = input('Escribe la longitud: '); longitud theta = input('Escribe el ángulo (en radianes): '); theta r=[0.01:0.001:1]; c=3e8; eta=377; disp('La longitud de la onda es de:') lambda=c/frecuencia disp('El número de onda es de:') k=(2*pi)/lambda disp('La relacion de zona es de:') rz=lambda/(2*pi) disp('El campo eléctrico en theta es de:') Etheta=((corriente*longitud*eta)./(4*pi*k*r .^3))*sin(theta); Etheta_dBuV=20*log10(Etheta/1e-6); plot(r,Etheta_dBuV,'b','LineWidth',1.4); grid on xlabel('Distancia r[m]','FontSize',15); ylabel('Campo eléctrico en theta [dBuV/m]','FontSize',15); title('Campo eléctrico en theta, Zona Cercana','FontSize',15);</pre> |

| $\bar{H}_\phi$   |   |
|--|---|
| En [V/m].  | En [dB $\mu$ V/m]   |
| <pre>frecuencia = input('Escribe la frecuencia de: '); frecuencia corriente = input(' Escribe la corriente de: '); corriente longitud = input('Escribe la longitud: '); longitud theta = input('Escribe el ángulo (en radianes): '); theta r=[0.01:0.001:1]; c=3e8; eta=377; disp('La longitud de la onda es de:') lambda=c/frecuencia disp('La relacion de zona es de:') rz=lambda/(2*pi) disp('El campo magnético en phi es de:') Hphi=((corriente*longitud)./(4*pi*r.^2))*si n(theta); semilogy(r,Hphi,'b','LineWidth',1.4); grid on xlabel('Distancia r[m]','FontSize',15); ylabel('Campo magnético en phi [A/m]','FontSize',15); title('Campo magnético en phi, Zona Cercana','FontSize',15);</pre> | <pre>frecuencia = input('Escribe la frecuencia de: '); frecuencia corriente = input(' Escribe la corriente de: '); corriente longitud = input('Escribe la longitud: '); longitud theta = input('Escribe el ángulo (en radianes): '); theta r=[0.01:0.001:1]; c=3e8; eta=377; disp('La longitud de la onda es de:') lambda=c/frecuencia disp('La relacion de zona es de:') rz=lambda/(2*pi) disp('El campo magnético en phi es de:') Hphi=((corriente*longitud)./(4*pi*r.^2))*si n(theta); Hphi_dBuA=20*log10(Hphi/1e-6); plot(r,Hphi_dBuA,'b','LineWidth',1.4); grid on xlabel('Distancia r[m]','FontSize',15); ylabel('Campo magnético en phi [dBuA/m]','FontSize',15); title('Campo magnético en phi, Zona Cercana','FontSize',15);</pre> |



## Zona Lejana.

| $\bar{E}_\theta$   |   |
|--|---|
| En [V/m].  | En [dB $\mu$ V/m]   |
| <pre>frecuencia = input('Escribe la frecuencia de: '); frecuencia corriente = input(' Escribe la corriente de: '); corriente longitud = input('Escribe la longitud: '); longitud theta = input('Escribe el ángulo (en radianes): '); theta r=[0.01:0.001:1]; c=3e8; eta=377; disp('La longitud de la onda es de:') lambda=c/frecuencia disp('El número de onda es de:') k=(2*pi)/lambda disp('La relacion de zona es de:') rz=lambda/(2*pi) disp('El campo eléctrico en theta es de:') EthetaZL=((corriente*longitud*eta*k)/(4*pi *r))*sin(theta); semilogy(r,EthetaZL,'b','LineWidth',1.4); grid on xlabel('Distancia r[m'],'FontSize',15); ylabel('Campo eléctrico en theta [V/m'],'FontSize',15); title('Campo eléctrico en theta, Zona Lejana','FontSize',15);</pre> | <pre>frecuencia = input('Escribe la frecuencia de: '); frecuencia corriente = input(' Escribe la corriente de: '); corriente longitud = input('Escribe la longitud: '); longitud theta = input('Escribe el ángulo (en radianes): '); theta r=[0.01:0.001:1]; c=3e8; eta=377; disp('La longitud de la onda es de:') lambda=c/frecuencia disp('El número de onda es de:') k=(2*pi)/lambda disp('La relacion de zona es de:') rz=lambda/(2*pi) disp('El campo eléctrico en theta es de:') EthetaZL=((corriente*longitud*eta*k)/(4*pi *r))*sin(theta); EthetaZL_dBuV=20*log10(EthetaZL/1e-6); plot(r,EthetaZL_dBuV,'b','LineWidth',1.4); grid on xlabel('Distancia r[m'],'FontSize',15); ylabel('Campo eléctrico en theta [dBuV/m'],'FontSize',15); title('Campo eléctrico en theta, Zona Lejana','FontSize',15);</pre> |
| $\bar{H}_\phi$   |   |
| En [V/m].  | En [dB $\mu$ V/m]   |
| <pre>frecuencia = input('Escribe la frecuencia de: '); frecuencia corriente = input(' Escribe la corriente de: '); corriente longitud = input('Escribe la longitud: '); longitud theta = input('Escribe el ángulo (en radianes): '); theta r=[0.01:0.001:1]; c=3e8; eta=377; disp('La longitud de la onda es de:') lambda=c/frecuencia disp('El número de onda es de:') k=(2*pi)/lambda disp('La relacion de zona es de:') rz=lambda/(2*pi) disp('El campo magnético en phi es de:') HphiZL=((corriente*longitud*k)/(4*pi*r))*s in(theta); semilogy(r,HphiZL,'b','LineWidth',1.4); grid on xlabel('Distancia r[m'],'FontSize',15); ylabel('Campo magnético en phi [A/m'],'FontSize',15); title('Campo magnético en phi, Zona Lejana','FontSize',15);</pre>               | <pre>frecuencia = input('Escribe la frecuencia de: '); frecuencia corriente = input(' Escribe la corriente de: '); corriente longitud = input('Escribe la longitud: '); longitud theta = input('Escribe el ángulo (en radianes): '); theta r=[0.01:0.001:1]; c=3e8; eta=377; disp('La longitud de la onda es de:') lambda=c/frecuencia disp('El número de onda es de:') k=(2*pi)/lambda disp('La relacion de zona es de:') rz=lambda/(2*pi) disp('El campo magnético en phi es de:') HphiZL=((corriente*longitud*k)/(4*pi*r))*s in(theta); HphiZL_dBuA=20*log10(HphiZL/1e-6); plot(r,HphiZL_dBuA,'b','LineWidth',1.4); grid on xlabel('Distancia r[m'],'FontSize',15); ylabel('Campo magnético en phi [dBuA/m'],'FontSize',15);</pre>   |

|   |  |
|---|--|
| <pre>title('Campo magnético en phi, Zona Cercana','FontSize',15);</pre> | <pre>title('Campo magnético en phi, Zona Lejana','FontSize',15);</pre> |
|---|--|

## Elemento fundamental de campo magnético $\vec{H}$ .

### Zona Cercana.

| $\vec{H}_r$  |   |
|--|---|
| En [V/m].  | En [dB $\mu$ V/m]   |
| <pre>frecuencia = input('Escribe la frecuencia de: '); frecuencia corriente = input(' Escribe la corriente de: '); corriente radio = input('Escribe el radio: '); radio theta = input('Escribe el ángulo (en radianes): '); theta r=[0.01:0.001:1]; c=3e8; eta=377; disp('La longitud de la onda es de:') lambda=c/frecuencia disp('El número de onda es de:') k=(2*pi)/lambda disp ('La relacion de zona es de:') rz=lambda/(2*pi) disp('El campo magnético en r es de:') Hr=((corriente*radio^2)./(2*r.^3))*cos(theta); semilogy(r,Hr,'b','LineWidth',1.4); grid on xlabel('Distancia r[m]','FontSize',15); ylabel('Campo magnético en r [A/m]','FontSize',15); title('Campo magnético en r, Zona Cercana','FontSize',15);</pre> | <pre>frecuencia = input('Escribe la frecuencia de: '); frecuencia corriente = input(' Escribe la corriente de: '); corriente radio = input('Escribe el radio: '); radio theta = input('Escribe el ángulo (en radianes): '); theta r=[0.01:0.001:1]; c=3e8; eta=377; disp('La longitud de la onda es de:') lambda=c/frecuencia disp('El número de onda es de:') k=(2*pi)/lambda disp ('La relacion de zona es de:') rz=lambda/(2*pi) disp('El campo magnético en r es de:') Hr=((corriente*radio^2)./(2*r.^3))*cos(theta); Hr_dBu=20*log10(Hr/1e-6); semilogy(r,Hr_dBu,'b','LineWidth',1.4); grid on xlabel('Distancia r[m]','FontSize',15); ylabel('Campo magnético en r [dBuA/m]','FontSize',15); title('Campo magnético en r, Zona Cercana','FontSize',15);</pre> |

| $\vec{H}_\theta$   |  |
|--|--|
| En [V/m].  | En [dB $\mu$ V/m]  |
| <pre>frecuencia = input('Escribe la frecuencia de: '); frecuencia corriente = input(' Escribe la corriente de: '); corriente radio = input('Escribe el radio: '); radio theta = input('Escribe el ángulo (en radianes): '); theta r=[0.01:0.001:1]; c=3e8; eta=377; disp('La longitud de la onda es de:') lambda=c/frecuencia disp('El número de onda es de:') k=(2*pi)/lambda disp ('La relacion de zona es de:')</pre> | <pre>frecuencia = input('Escribe la frecuencia de: '); frecuencia corriente = input(' Escribe la corriente de: '); corriente radio = input('Escribe el radio: '); radio theta = input('Escribe el ángulo (en radianes): '); theta r=[0.01:0.001:1]; c=3e8; eta=377; disp('La longitud de la onda es de:') lambda=c/frecuencia disp('El número de onda es de:') k=(2*pi)/lambda disp ('La relacion de zona es de:')</pre> |

|   |  |
|---|--|
| <pre> rz=lambda/(2*pi) disp('El campo magnético en theta es de:') Htheta=((corriente*radio^2)/(4*r.^3))*sin(theta); semilogy(r,Htheta,'b','LineWidth',1.4); grid on xlabel('Distancia r[m]','FontSize',15); ylabel('Campo magnético en theta [A/m]','FontSize',15); title('Campo magnético en theta, Zona Cercana','FontSize',15); </pre> | <pre> rz=lambda/(2*pi) disp('El campo magnético en theta es de:') Htheta=((corriente*radio^2)/(4*r.^3))*sin(theta); Htheta_dBu=20*log10(Htheta/1e-6); semilogy(r,Htheta_dBu,'b','LineWidth',1.4); grid on xlabel('Distancia r[m]','FontSize',15); ylabel('Campo magnético en theta [dBuA/m]','FontSize',15); title('Campo magnético en theta, Zona Cercana','FontSize',15); </pre> |
|---|--|

| $\bar{E}_\phi$  |  |
|---|--|
| En [V/m].   | En [dB $\mu$ V/m]  |
| <pre> frecuencia = input('Escribe la frecuencia de: '); frecuencia corriente = input(' Escribe la corriente de: '); corriente radio = input('Escribe el radio: '); radio theta = input('Escribe el ángulo (en radianes): '); theta r=[0.01:0.001:1]; c=3e8; eta=377; disp('La longitud de la onda es de:') lambda=c/frecuencia disp('El número de onda es de:') k=(2*pi)/lambda disp ('La relacion de zona es de:') rz=lambda/(2*pi) disp('El campo eléctrico en phi es de:') Ephi=((corriente*radio^2*k*eta)/(4*r.^2))*sin(theta); semilogy(r,Ephi,'b','LineWidth',1.4); grid on xlabel('Distancia r[m]','FontSize',15); ylabel('Campo eléctrico en phi [V/m]','FontSize',15); title('Campo eléctrico en phi, Zona Cercana','FontSize',15); </pre> | <pre> frecuencia = input('Escribe la frecuencia de: '); frecuencia corriente = input(' Escribe la corriente de: '); corriente radio = input('Escribe el radio: '); radio theta = input('Escribe el ángulo (en radianes): '); theta r=[0.01:0.001:1]; c=3e8; eta=377; disp('La longitud de la onda es de:') lambda=c/frecuencia disp('El número de onda es de:') k=(2*pi)/lambda disp ('La relacion de zona es de:') rz=lambda/(2*pi) disp('El campo eléctrico en phi es de:') Ephi=((corriente*radio^2*k*eta)/(4*r.^2))*sin(theta); Ephi_dBu=20*log10(Ephi/1e-6); figure; plot(r,Ephi_dBu,'b','LineWidth',1.4); grid on xlabel('Distancia r[m]','FontSize',15); ylabel('Campo eléctrico en phi [dBuV/m]','FontSize',15); title('Campo eléctrico en phi, Zona Cercana','FontSize',15); </pre> |

### Zona lejana.

| $\bar{H}_\theta$  |   |
|---|---|
| En [V/m].   | En [dB $\mu$ V/m]   |
| <pre> frecuencia = input('Escribe la frecuencia de: '); frecuencia corriente = input(' Escribe la corriente de: '); corriente radio = input('Escribe el radio: '); radio theta = input('Escribe el ángulo (en radianes): '); </pre> | <pre> frecuencia = input('Escribe la frecuencia de: '); frecuencia corriente = input(' Escribe la corriente de: '); corriente radio = input('Escribe el radio: '); radio theta = input('Escribe el ángulo (en radianes): '); </pre> |

|  |  |
|--|--|
| <pre> theta r=[0.01:0.001:1]; c=3e8; eta=377; disp('La longitud de la onda es de:') lambda=c/frecuencia disp('El número de onda es de:') k=(2*pi)/lambda disp('La relacion de zona es de:') rz=lambda/(2*pi) disp('El campo magnético en theta es de:') HthetaZL=((corriente*radio^2*k^2)./(4*r))*s in(theta); semilogy(r,HthetaZL,'b','LineWidth',1.4); grid on xlabel('Distancia r[m]','FontSize',15); ylabel('Campo magnético en theta [A/m]','FontSize',15); title('Campo magnético en theta, Zona Cercana','FontSize',15); </pre> | <pre> theta r=[0.01:0.001:1]; c=3e8; eta=377; disp('La longitud de la onda es de:') lambda=c/frecuencia disp('El número de onda es de:') k=(2*pi)/lambda disp('La relacion de zona es de:') rz=lambda/(2*pi) disp('El campo magnético en theta es de:') HthetaZL=((corriente*radio^2*k^2)./(4*r))*s in(theta); HthetaZL_dBu=20*log10(HthetaZL/1e-6); plot(r,HthetaZL_dBu,'b','LineWidth',1.4); grid on xlabel('Distancia r[m]','FontSize',15); ylabel('Campo magnético en theta [dBuA/m]','FontSize',15); title('Campo magnético en theta, Zona Lejana','FontSize',15); </pre> |
|--|--|

| $\bar{E}_\phi$   |   |
|--|---|
| En [V/m].  | En [dB $\mu$ V/m]   |
| <pre> frecuencia = input('Escribe la frecuencia de: '); frecuencia corriente = input(' Escribe la corriente de: '); corriente radio = input('Escribe el radio: '); radio theta = input('Escribe el ángulo (en radianes): '); theta r=[0.01:0.001:1]; c=3e8; eta=377; disp('La longitud de la onda es de:') lambda=c/frecuencia disp('El número de onda es de:') k=(2*pi)/lambda disp('La relacion de zona es de:') rz=lambda/(2*pi) disp('El campo eléctrico en phi es de:') EphiZL=((corriente*radio^2*k^2*eta)./(4*r)) *sin(theta); semilogy(r,EphiZL,'b','LineWidth',1.4); grid on xlabel('Distancia r[m]','FontSize',15); ylabel('Campo eléctrico en phi [V/m]','FontSize',15); title('Campo eléctrico en phi, Zona Lejana','FontSize',15); </pre> | <pre> frecuencia = input('Escribe la frecuencia de: '); frecuencia corriente = input(' Escribe la corriente de: '); corriente radio = input('Escribe el radio: '); radio theta = input('Escribe el ángulo (en radianes): '); theta r=[0.01:0.001:1]; c=3e8; eta=377; disp('La longitud de la onda es de:') lambda=c/frecuencia disp('El número de onda es de:') k=(2*pi)/lambda disp('La relacion de zona es de:') rz=lambda/(2*pi) disp('El campo eléctrico en phi es de:') EphiZL=((corriente*radio^2*k^2*eta)./(4*r)) *sin(theta); EphiZL_dBu=20*log10(EphiZL/1e-6); semilogy(r,EphiZL_dBu,'b','LineWidth',1.4); grid on xlabel('Distancia r[m]','FontSize',15); ylabel('Campo eléctrico en phi [dBuV/m]','FontSize',15); title('Campo eléctrico en phi, Zona Lejana','FontSize',15); </pre> |

## C. Mapa de parámetros de diseño.

### REQUISICION DE PARAMETROS, DATOS E INFORMACION

#### PARA LA REALIZACION DE UN ANALISIS DE EMC.

Coordinador:

Solicitante:

Fecha:

Plataforma Satelital:

Subsistema:

Encargado(s) del subsistema:

Datos:

| Parámetro.               | Símbolo.          | Valor. | Unidades. | Tipo. |
|--------------------------|-------------------|--------|-----------|-------|
| Frecuencia de operación. | $f_{op}$          |        |           | -     |
| Frecuencia emitida.      | $f_{emitida}$     |        |           | -     |
| Voltaje de entrada       | $V_{in}$          |        |           | -     |
| Corriente de entrada     | $I_{in}$          |        |           | -     |
| Voltaje de salida.       | $V_{out}$         |        |           | -     |
| Corriente de salida.     | $I_{out}$         |        |           | -     |
| Impedancia de entrada.   | $Z_{in}/R_{in}$   |        |           |       |
| Impedancia de salida.    | $Z_{out}/R_{out}$ |        |           |       |
| Potencia del subsistema. | $P_{subs}$        |        |           | -     |

Protocolo(s) de comunicación:

**Cables.**

| <b>Tipo.</b> | <b>Numero de cables.</b> | <b>Voltaje en el cable.</b> | <b>Corriente en el cable.</b> | <b>Tipo de conector.</b> |
|--------------|--------------------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------------------|
|              |                          |                             |                               |                          |
|              |                          |                             |                               |                          |
|              |                          |                             |                               |                          |

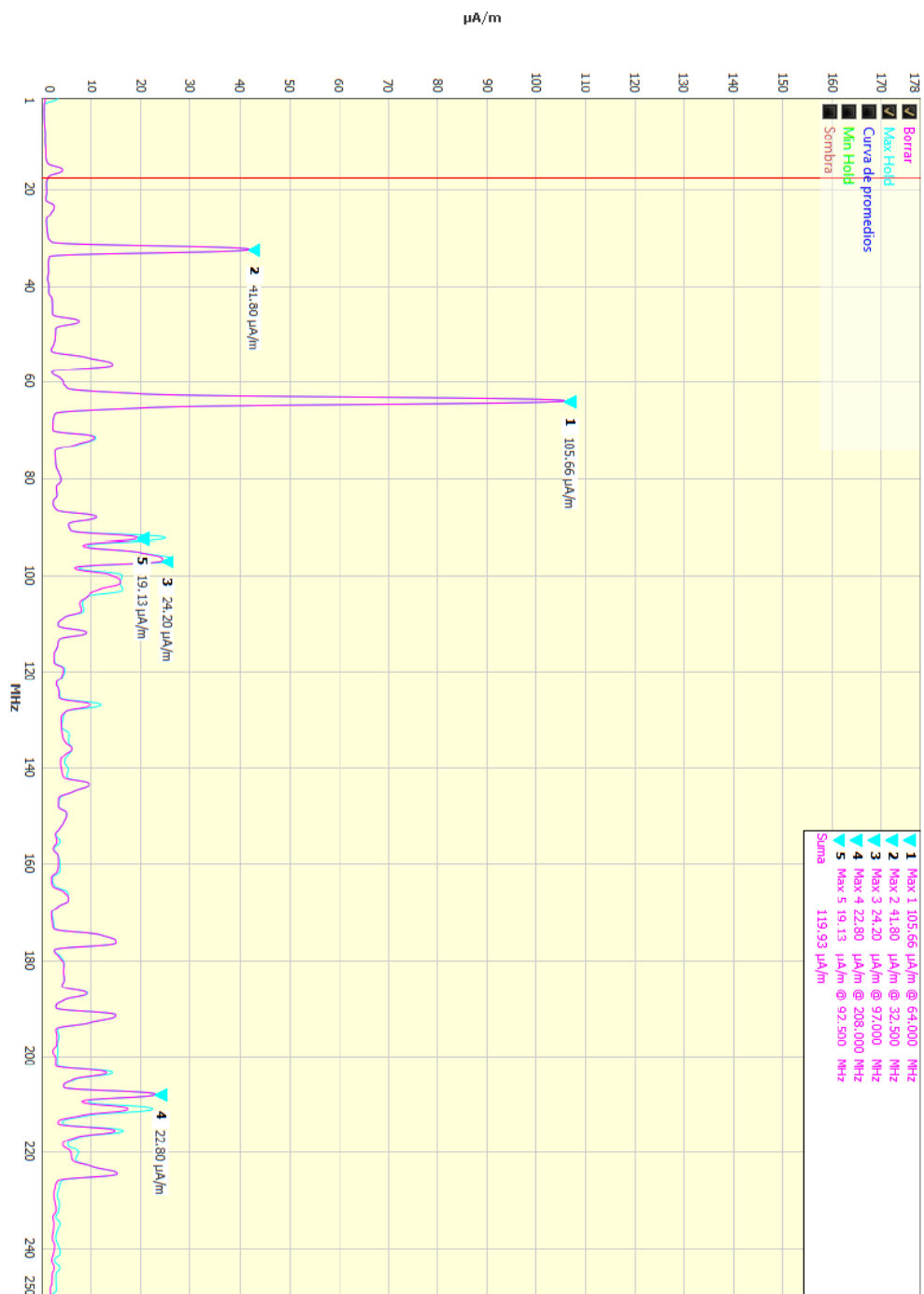
**Conexiones a tierra:**

**Dimensiones (incluir un dibujo aproximado):**

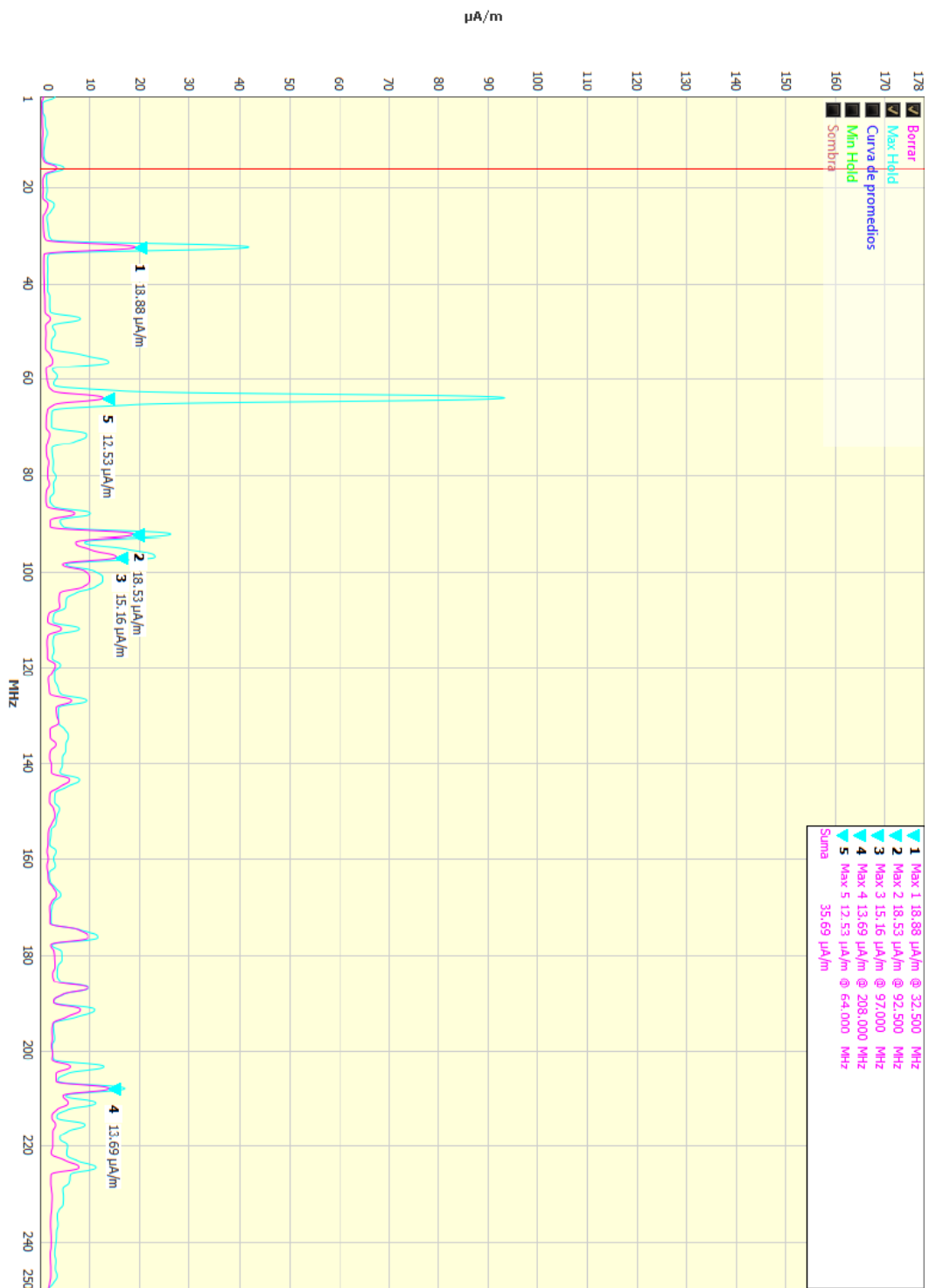
**Comentarios:**

## D. Graficas de las otras formas de medición con las técnicas de medición en zona cercana.

Sección II, forma 1.

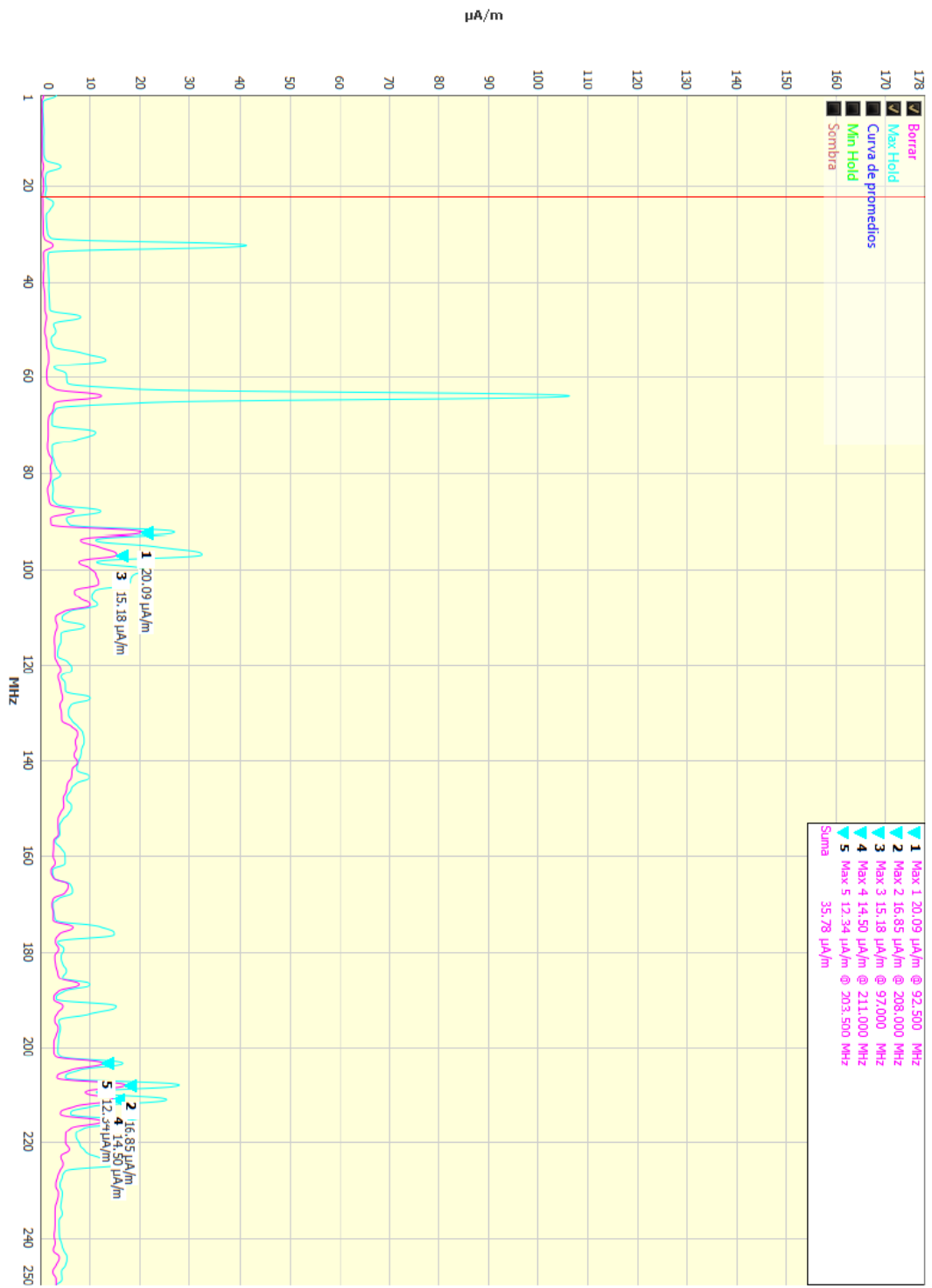


Sección II, forma 2.

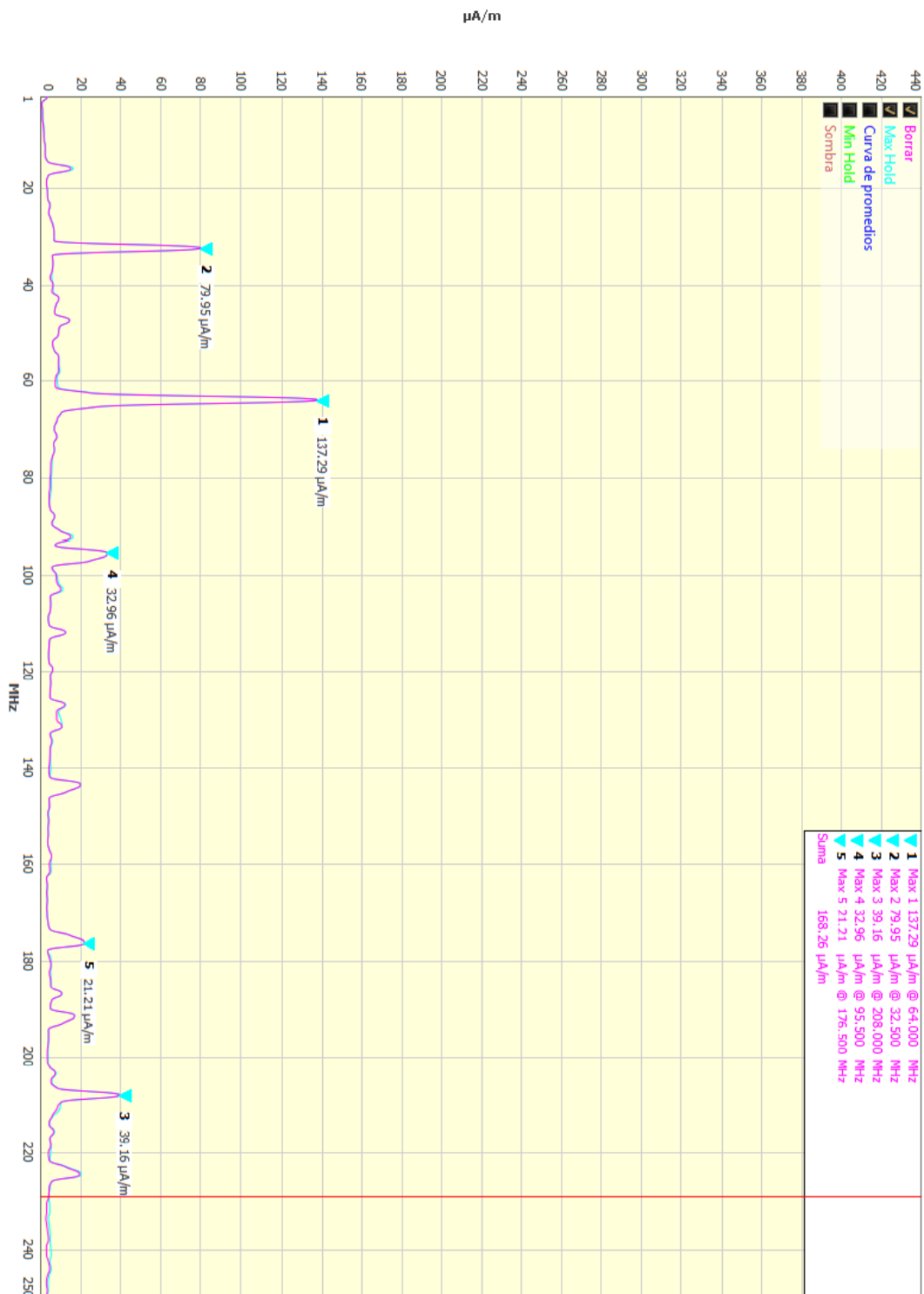




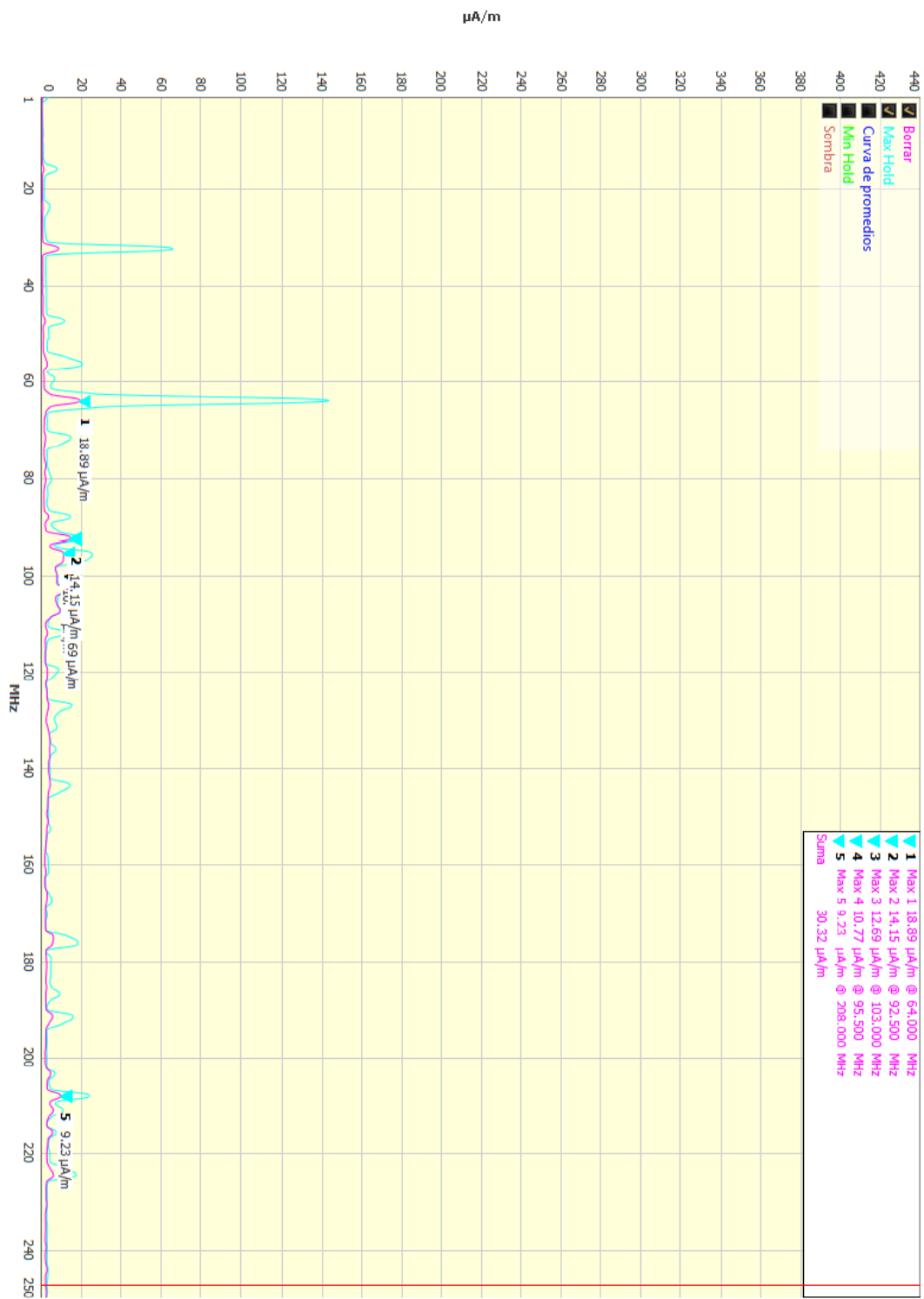
Sección II, forma 3.



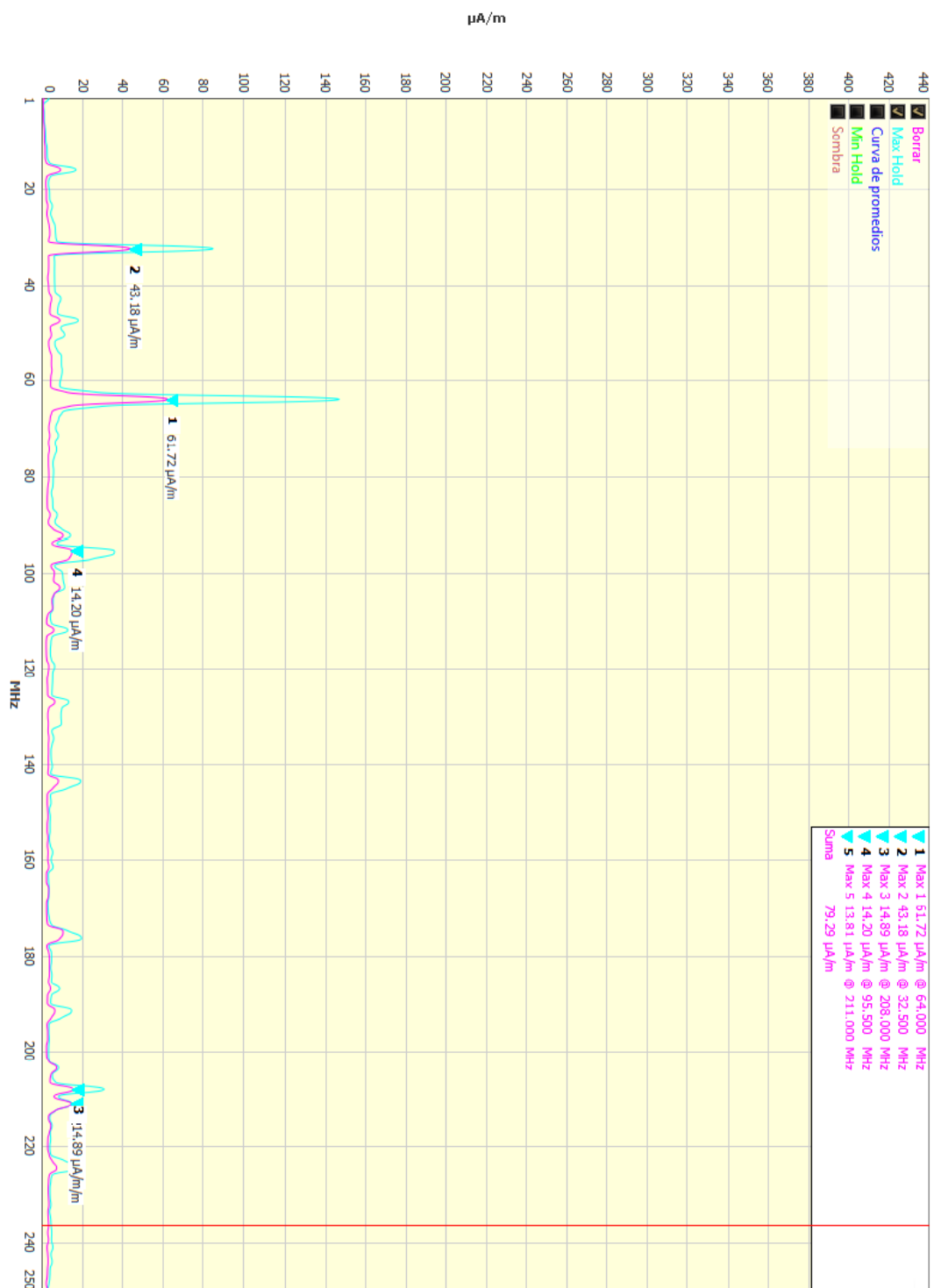
Sección III, forma 1.



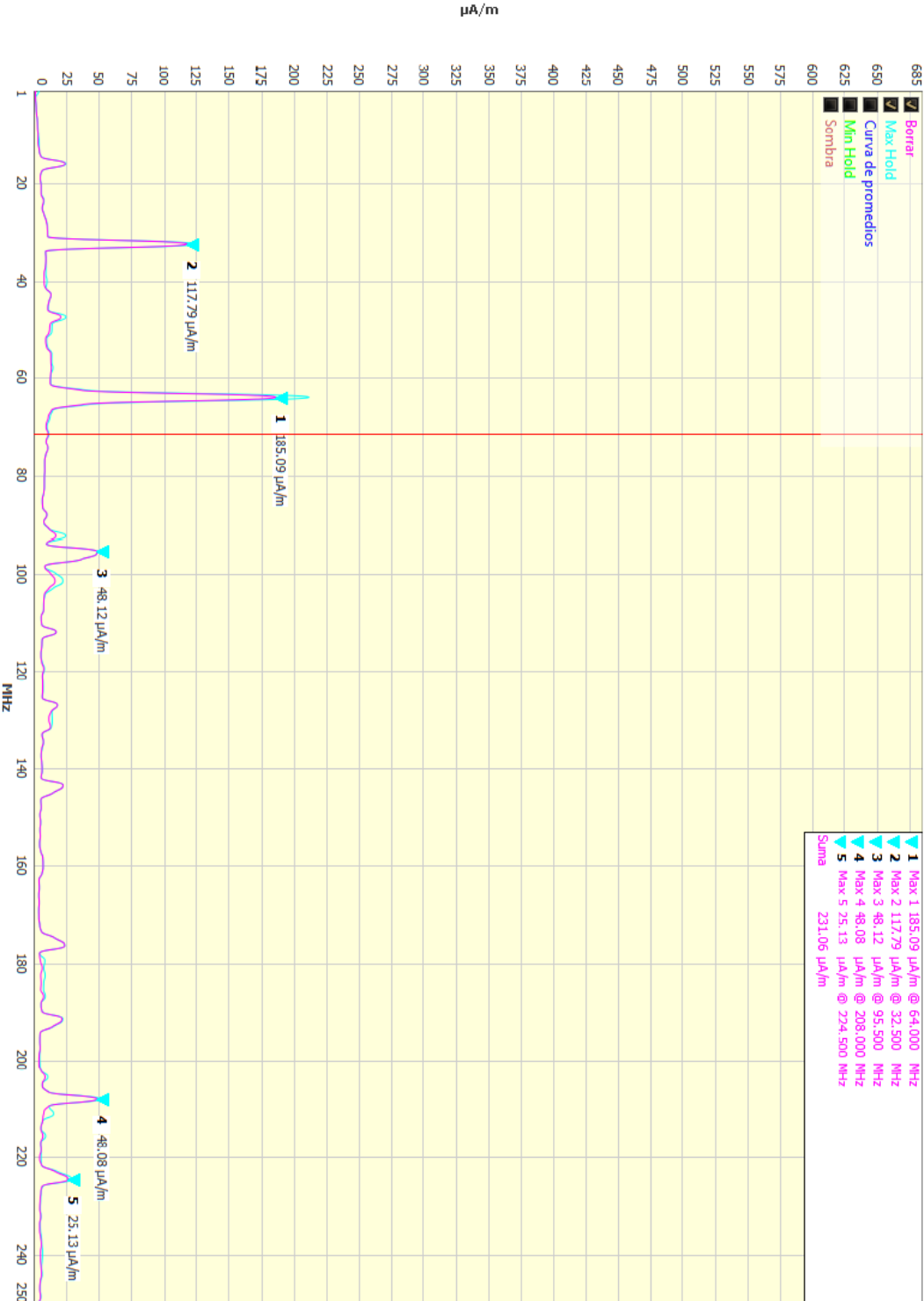
Sección III, forma 2.



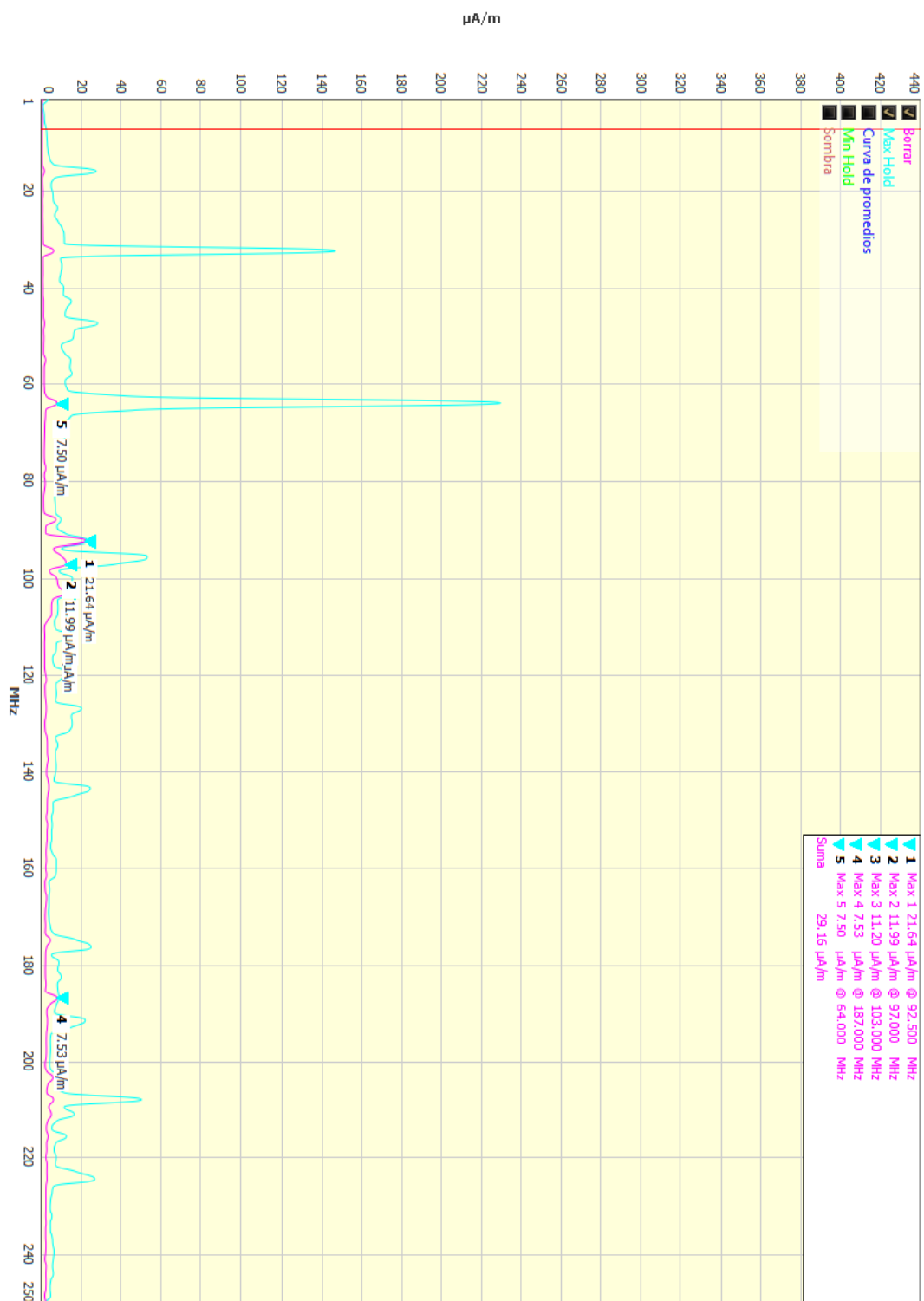
Sección III, forma 3.



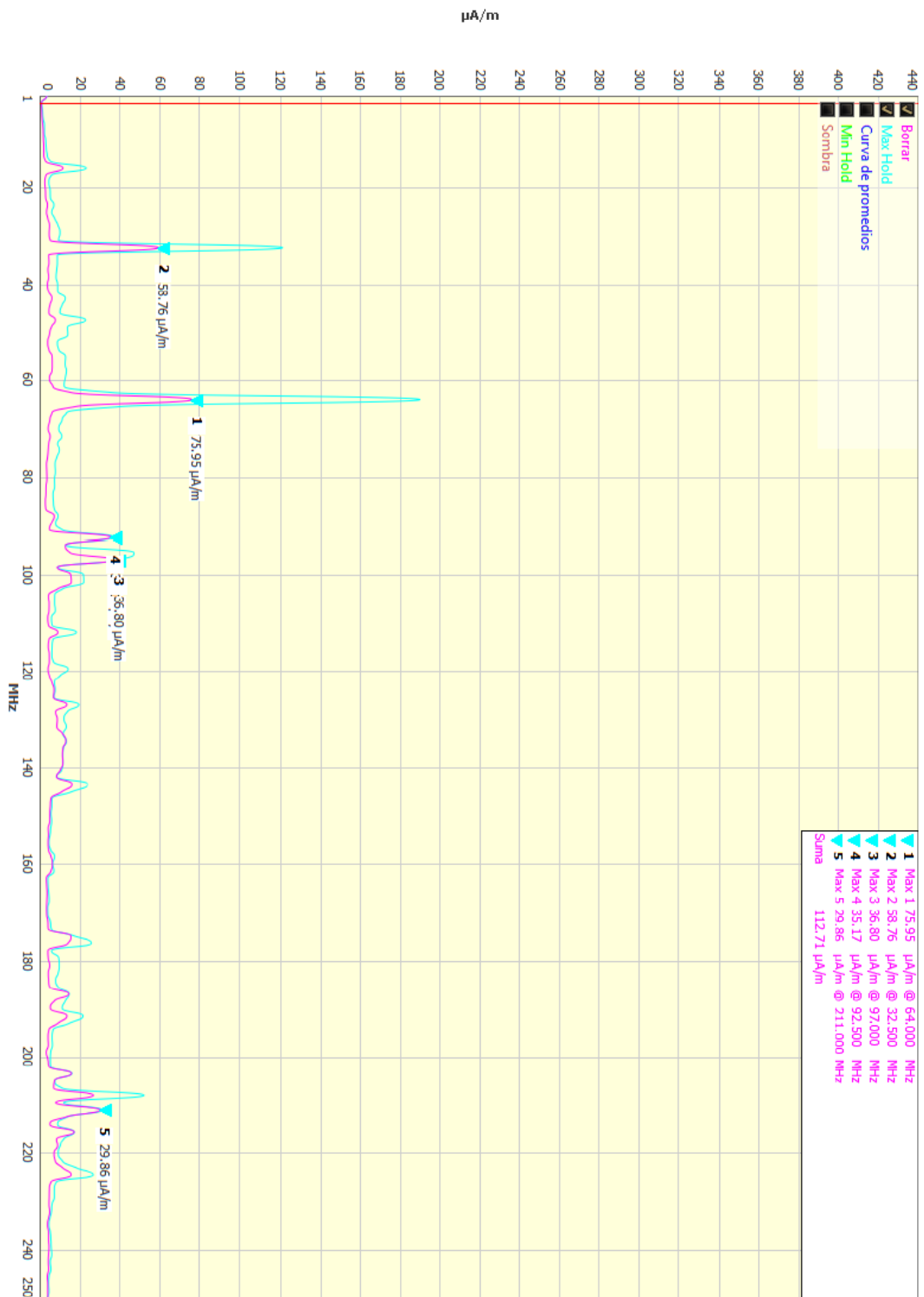
Sección IV, forma 1.



Sección IV, forma 2.



Sección IV, forma 3.



---

## BIBLIOGRAFIA.

- [1] Henry W. Ott. *Electromagnetic Compatibility Engineering*. Wiley. 2009.
- [2] Tim Williams. *EMC for product designers*. Newnes. 2007.
- [3] David Morgan. *A Handbook for EMC Testing and Measure, IET Electrical Measurements Series 8*. The Institution of Engineering and Technology. 2007.
- [4] Terence Ryback & Mark Steffka. *Automotive Electromagnetic Compatibility (EMC)*. Kluwer Academic Publishers. 2004.
- [5] William G. Duff. *Designing Electronic Systems for EMC*. Scitech Publishing Inc. 2011.
- [6] Karl-Heinz Gonsiorek & Ralf Vick. *Electromagnetic Compatibility for Device Design and System Integration*. Springer. 2009.
- [7] Dipak L. Sengupta & Valdis V. Liepa. *Applied Electromagnetics and Electromagnetic Compatibility*. Wiley Interscience. 2006.
- [8] Sonia Ben Dhia, Mohamed Ramdani & Etienne Sicard. *Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits, Techinques for Low Emission and Susceptibility*. Springer. 2006.
- [9] Paul R. Clayton. *Introduction to Electromagnetic Compatibility*. Wiley Interscience. 2da ed. 2006.
- [10] Francisco L. Mesa Ledesma. *Nociones Teóricas de Compatibilidad Electromagnética*. 2000.
- [11] *Manual Didáctico, Compatibilidad Electromagnética*. Schneider Electric. 2006.
- [12] *EMC Design Guide for Printed Circuit Boards*, Ford Motor Company. 2002.
- [13] Keysight Technologies, *Making Conducted and Radiated Emissions Measurements, Application Note*.
- [14] Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. *Guía de Compatibilidad electromagnética*.
- <http://www2.electron.frba.utn.edu.ar/~jceconi/Bibliografia/10%20-20Mediciones%20de%20EMC/Guia%20EMC.pdf>.
- [15] Martha H. López Sánchez. *La Importancia de las Mediciones de Compatibilidad Electromagnética como un Reto para México*. Centro Nacional de Metrología.
- [16] Azpura M. A., Páez E. J., Tremola C., Rodríguez Quiroz L. y Moruga G. *Normalización en Latinoamérica en Materia de Ensayos de Compatibilidad Electromagnética*. Fundación Instituto de Ingeniería para Investigación y Desarrollo Tecnológico y el Instituto Nacional de Tecnología industrial. Venezuela y Argentina.
- [http://www.researchgate.net/publication/255821992 Normalizacin en Latinoamrica en materia de Ensayos de Compatibilidad Electromagntica](http://www.researchgate.net/publication/255821992_Normalizacin_en_Latinoamrica_en_materia_de_Ensayos_de_Compatibilidad_Electromagntica)
- [17] Victoria Molina López. *Normalización Nacional en CEM*. Metrología, Boletín Informativo. Centro Nacional de Metrología (CENAM). 2004
-



- 
- [18] Department of Defense, Interface Standard, USA. *Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment (MIL-STD 461F)*.
- [19] CENELEC. *European Standard EN 55022*. 2006.
- [20] American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA). *Electromagnetic Compatibility Requirements for Space Equipment and Systems, Standard AIAA S-121-2009*.
- [21] European Commission. *Guide for the EMC Directive 2004/10/108/EC*. [http://ec.europa.eu/growth/sectors/electrical-engineering/emc-directive/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/growth/sectors/electrical-engineering/emc-directive/index_en.htm)
- [22] Constantine A. Balanis. *Antenna Theory, Analysis and Design*. Wiley Interscience. 3er ed. 2006.
- [23] John D. Kraus. *Antennas*. McGraw Hill. 2da ed. 1997.
- [24] Fawwaz T. Ulaby. *Fundamentos de Aplicaciones en Electromagnetismo*. Pearson. 5ta ed. 2007.
- [25] William H. Hayt Jr. & John A. Buck. *Teoría Electromagnética*. McGraw Hill, 7ma ed. 2001.
- [26] David K. Cheng. *Fundamentos de Electromagnetismo para Ingeniería*. Pearson. 1998
- [27] Peter Fortescue, Graham Swinerd & John Stark. *Spacecraft Systems Engineering*. Wiley. 4ta ed. 2011.
- [28] James R. Wertz, David F. Everett & Jeffery J. Puschell. *Space Mission Engineering: The New SMAD*. Space Technology Library & Microcosm Press. 2011.
- [29] Wiley J. Larson & James R. Wertz. *Space Mission Analysis and Design*. Space Technology Library, Microcosm Press & Kluwer Academic Publishers. 3ra ed. 1999.
- [30] Wilfred Ley, Klaus Wittman & Willi Hallmann. *Handbook of Space Technology*. Wiley. 2009.
- [31] Rudolf X. Meyer. *Elements of Space Technology*. Academic Press. 1999.
- [32] <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/OrbitsCatalog/>
- [33] <http://www.rohde-schwarz.com.mx/>
- [34] <http://www.keysight.com/>
- [35] <http://www.aaronia.com/>
- [36] The Clemson University Vehicular Electronics Laboratory:  
<http://www.cvel.clemson.edu/emc/>
- [37] <https://www.arduino.cc/>
- [38] <https://www.raspberrypi.org/>
- [39] <http://www.digi.com/lp/xbee/>
- [40] <http://www.sae.org/>
- [41] <http://www.iso.org/iso/home.html>
- [42] [http://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2013\\_511.html](http://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2013_511.html)
-

---

## ACRONIMOS.

EMC: Electromagnetic Compatibility (Compatibilidad Electromagnética).

EM: ElectroMagnéticas.

EMI: ElectroMagnetic Interference (Interferencia Electromagnética).

NEMP: Nuclear ElectroMagnetic Pulse (Pulso Electromagnético Nuclear).

RE: Radiated Emissions (Emisiones Radiadas).

CI: Circuito Integrado.

PCB: Printed Circuit Board (Tarjeta de Circuito Impreso).

PLD: Programmable Logic Device (Dispositivo Lógico programable).

PLC: Programmable Logic Controller (Controlador Lógico Programable).

GND: Ground (Tierra).

$EF\vec{E}$ : Elemento Fundamental de Campo Eléctrico.

$EF\vec{H}$ : Elemento Fundamental de Campo Magnético.

IEC: International Electrotechnical Commission (Comisión Electrotécnica Internacional).

CISPR: Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques (Comité Internacional Especial sobre Interferencias Radioeléctricas).

CEN: Comité Européen de Normalisation (Comité Europeo de Estandarización).

CENELEC: Comité Européen de Normalisation Électrotechnique (Comité Europeo de Estandarización Electrotécnica).

FCC: Federal Communications Commission (Comisión Federal de Comunicaciones).

MIL-STD: Military Standards (Estándares Militares).

EUT: Equipment Under Test (Equipo Bajo Prueba).

RF: Radio Frecuencia.

CENAM: Centro Nacional de Metrología.

DGN: Dirección General de Normalización.

SE: Secretaria de Economía.

OATS: Open Area Test Site (Lugar de Pruebas al Aire Libre).

LISN: Red Estabilizadora de impedancia (Line Impedance Stabilisation Network)

CAT: Centro de Alta Tecnología.