

Interferencias Electromagnéticas debidas al Sistema de Trolebús de la Ciudad de Quito

Ing. Mario Cevallos Escuela Politécnica Nacional Quito – Ecuador

Resumen- Con el propósito de informar, concienciar y motivar sobre la importancia de la Compatibilidad Electromagnética, no solo como disciplina científica sino como la necesidad de su aplicación en el uso de los nuevos dispositivos y sistemas eléctricos y electrónicos, tecnológicos y de entretenimiento, desarrollados para el bienestar de la sociedad pero con el empeño de lograr un ambiente electromagnético más amigable para la aplicación de las modernas tectologías que se desarrollan en los campos eléctrico y electrónico. A manera de ejemplo se muestran los resultados sobre radiaciones electromagnéticas insospechadas que se generan en el sistema de trole buses de la ciudad de Quito.

I. INTRODUCCION

Por obra de la casualidad tuve la oportunidad de detectar, de manera recurrente, la presencia de señales electromagnéticas, al estar cerca o cruzar las líneas a alimentación de las unidades de transporte público de la ciudad de Quito que corresponden al sistema de trolebuses y consideré que este fenómeno merecía un estudio y análisis particular, lo que motivó que se lo incluyera dentro de un proyecto de investigación que con el apoyo del DETRI y el auspicio de la SENESCYT, finalmente se logró que dentro del proyecto: COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA, NORMALIZACIÓN INTERNACIONAL Y ARMONIZACIÓN PARA EL ECUADOR (PIC-08-335), se incluyera como uno de sus objetivos la confirmación de la presencia y la consiguiente evaluación de esas señales, responsabilidad que asumí personalmente.

Con relación a la presencia de señales electromagnéticas en el entorno del sistema, inicialmente se estimó que podrían provenir por dos causas: una, efectos de la fuente de alimentación DC que requiere el sistema para su funcionamiento y que opera en base a convertidores estáticos; y dos; la ocurrencia de desconexiones instantáneas, entre las líneas de suministro eléctrico y los contactos de las pértigas de alimentación a los motores eléctricos de los vehículos; que ocurren especialmente en los sitios donde se realiza el cambio de área de servicio de cada una de las subestaciones que constituyen el sistema de alimentación eléctrica de corriente

continua, del sistema produciendo descargas eléctricas visibles y audibles, la mismas que como se demostrará constituyen fuentes de radiación electromagnética.

II. INTERFERENCIA Y COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNETICAS

La interferencia electromagnética EMI (por sus siglas en inglés), es de una forma preocupante, continuamente creciente de polución ambiental [1], sus efectos fluctúan desde pequeñas molestias como los chasquidos en receptores de radio difusión, hasta potencialmente fatales accidentes debidos a corrupción de señales en sistemas sensibles de control de seguridad. Las EMI pueden presentarse comúnmente como señales electromagnéticas en diversas formas y causar disfuncionamiento en sistemas eléctricos y electrónicos diseñados precisamente para controlar y proteger unidades sensibles de riesgo, e incluso tener efectos perniciosos en el organismo humano.

Conforme los sistemas eléctricos y electrónicos se aplican más profusamente en todos los aspectos de la sociedad, tanto los efectos potenciales de interferencia como serios incidentes inducidos por las EMI, se incrementan sustantivamente.

Buscar y desarrollar soluciones tendientes a evitar o minimizar los efectos perjudiciales de las EMI es la misión fundamental de la compatibilidad electromagnética EMC (por sus siglas en inglés), cuya definición, como aparece en el *International Electrotechnical Vocabulary* [2]

“Compatibilidad electromagnética es la habilidad de un dispositivo equipo o sistema, de funcionar satisfactoriamente en un entorno electromagnético, sin introducir perturbaciones electromagnéticas intolerables para ningún otro componente, equipo o sistema, dentro de ese ambiente”

O una definición más simple:

“Campos electromagnéticos conviviendo juntos en armonía” [3]

Virtualmente cualquier fuente de campos eléctricos o magnéticos es una fuente potencial de EMI, debiendo distinguir entre fuentes intencionales de radiación tales como estaciones de difusión social de radio y televisión, sistemas de telecomunicaciones en general, radares y ayudas de radio navegación; cuya función es radiar energía electromagnética al espacio; y fuentes no intencionales como: motores, computadores, lámparas fluorescentes, sistemas de control industrial, aplicaciones en el hogar, etc, cuya radiación electromagnética no es parte esencial de su operación normal.

Adicionalmente, tenemos las fuentes de radiación electromagnética naturales como: descargas atmosféricas, radiación cósmica, auroras boreales, manchas solares, cuyos efectos, con excepción de las descargas atmosféricas, son menos problemáticos que las producidas por el hombre.

El espectacular incremento del uso y aplicación de equipos eléctricos y electrónicos en casi todas las faenas cotidianas, ha hecho que haya también aumentado la posibilidad de que unos equipos puedan interferir con otros, debido a sus propiedades electromagnéticas. Los voltajes junto con las corrientes que circulan en un sistema, producen campos electromagnéticos que a su vez dan lugar a voltajes y corrientes inducidas no deseadas en otros equipos, es decir son la causa de interferencias electromagnéticas (EMI).[4]

Alcanzar la coexistencia de todos los tipos de aplicaciones que utilizan el espectro electromagnético con procesos técnicos y productos desde los cuales se producen subproductos indeseables de energía electromagnética que crean los problemas de interferencia, es el esquema donde se desenvuelve la compatibilidad electromagnética, cuya finalidad es lograr un compromiso, entre las aplicaciones de sistemas eléctricos y electrónicos y los dispositivos, componentes y equipos aplicantes, los unos que deben tener la capacidad de soportar un cierto nivel de interferencia sin degradar su desempeño, mientras los que producen las emisiones interferentes no deben sobrepasar un nivel establecido.

Íntimamente ligados a la compatibilidad están los términos: susceptibilidad electromagnética (EMS) y su opuesto, la inmunidad electromagnética; que se emplean para indicar la mayor o menor propensión de un dispositivo o equipo a ser afectado por las interferencias, es decir, el nivel de susceptibilidad de un equipo, es la propiedad que

tiene este para funcionar correctamente en un ambiente de interferencia.

Para la confrontación de esta problemática, varios organismos internacionales han expedido normas sobre EMC que establecen las condiciones técnicas para la operación simultánea y compatible electromagnéticamente de equipos y sistemas. Estas directrices se aplican a todos los equipos eléctricos y electrónicos que se comercializan en el ámbito de la organización, imponiendo regulaciones en dos limitaciones esenciales: el dispositivo o sistema no puede interferir con el funcionamiento de otros equipos, límite de emisión, y el propio sistema debe ser inmune a perturbaciones de EMI procedentes de otras fuentes, límite de inmunidad. Todo esto encaminado a la protección del consumidor, la salud, el ambiente y la seguridad pública entre otros.

III. PATRONES DE INTERFERENCIA.

Conscientes de que las fuentes de EMI debidas a equipos o sistemas cuya función primordial no es precisamente la de radiar energía electromagnética tienen una amplia gama de variación en cuanto se refiere a las características de radiación, dentro de estas las de mayor variabilidad están: la frecuencia de emisión, frecuentemente con algún tipo de modulación, el patrón de radiación que presenta condiciones de dependencia diferentes si se trata de campo cercano o de campo lejano y la polarización, definida para el campo lejano como lineal, elíptica o circular, pero que en el campo cercano es muy dependiente de la posición de la fuente de EMI, del dispositivo de medida utilizado para determinar y evaluar respecto de la fuente radiante, lo que impone requerimientos de amplia versatilidad en los equipos y técnicas de medida y monitoreo.

En cualquier ambiente donde se requiera hacer mediciones de campo electromagnético, este comúnmente depende en mucho de la posición, esta dependencia se debe en general, a fenómenos de interferencia producidos por la combinación de ondas incidentes y reflejadas en los diferentes objetos del ambiente: edificios, vegetación, otros equipos, vehículos etc. Así como efectos de propagación por multi-trayectoria, los que contribuyen a conformar un patrón de onda estacionaria cuyos valores singulares pueden variar desde unos pocos centímetros a varios metros; si la fuente radia en varias frecuencias esta configuración es particularmente compleja. Por consiguiente la planificación de un programa de

medida debe tomar en cuenta tanto las variaciones espaciales como las temporales. Este requerimiento es importante desde dos puntos de vista la recolección de datos y la seguridad de operadores y equipos para efectos de protección de posible exposición electromagnética excesiva.

A. Fuentes de radiación.

Las posibles fuentes de radiación provenientes de sistemas y equipos eléctricos y electrónicos representan un problema especial debido a que la fuente de radiación no puede ser claramente especificada. Considerando las antenas, lineales o de abertura, que incluyen estructuras intencionalmente diseñadas para radiar o recibir eficazmente campos EM, los dispositivos que se aplican en procesos industriales o de producción, no son intencionalmente diseñados para radiar energía pero pueden contener dentro de su circuitería, estructuras que pueden funcionar como antenas produciendo campos de magnitudes apreciables en las cercanías de sus instalaciones.

La polarización de las señales electromagnéticas provenientes de tales fuentes tampoco puede ser establecida. Este es un caso especial de la situación de medición en campo cercano, ya sea que los campos radiados sean intencionales o accidentales.

Las técnicas de evaluación de tales campos, difieren sustancialmente de aquellas asociadas por los campos radiados por antenas. En los casos de campos debidos a fugas de RF, la localización de la fuente generalmente se realiza por prueba y error siendo necesario contar con un detector no direccional, no polarizado e isotrópico para medir en las vecindades cercanas al equipo o sistema radiante, donde antenas directivas mostrarán lecturas incorrectas ya que no son susceptibles de responder a señales multi trayectoria y la reducción de la ganancia para campos cercanos.

IV. CAMPO CERCANO REACTIVO

Inmerso dentro del fenómeno de radiación electromagnética están presentes las componentes de campo cercano de carácter reactivo. Los campos reactivos pueden ser de tipo inductivo cuando la relación E/H es baja o capacitivo en caso contrario. Las características de los campos reactivos están relacionadas con el comportamiento inductivo o capacitivo de la fuente radiante, parte de la energía electromagnética asociada se almacena, es decir no se propaga fuera de la región de campo

cercano. Esta energía almacenada es transferida periódicamente entre la estructura radiante y el campo cercano. La extensión de la región de campo cercano depende del tipo de fuente radiante, una aproximación aceptada es de unas pocas longitudes de onda, como ejemplo, para un dipolo ideal a una distancia entre dos y tres longitudes de onda, las componentes reactivas el campo cercano son menores que el 10% [5] de las componentes de radiación. Aunque las componentes reactivas no contribuyen a un flujo neto de energía radiada, pueden acoplarse a tejidos biológicos u otros materiales y consecuentemente afectar la absorción de energía, de manera que para la evaluación de potenciales peligros asociados a personas, equipos o componentes, es importante la medición de estos campos reactivos utilizando instrumentación y técnicas de medida apropiadas [6]

En el campo cercano se tienen tres componentes ortogonales con amplitudes y fases relativas arbitrarias, tanto para campo eléctrico como para campo magnético con polarización elíptica en planos diferentes. Consecuentemente en el campo cercano las medidas de amplitud y fase de cada una de las tres componentes de ambos campos generalmente no proveen de información suficiente, para determinar los campos en el mismo punto, siendo recomendable el uso de instrumentos que puedan medir tanto campos eléctricos como magnéticos y que respondan simultáneamente a todas las polarizaciones. No siempre se puede encontrar en el mercado tecnológico o su costo puede ser prohibitivamente elevado, situación que para este proyecto se solventó mediante el diseño y construcción de sensores y antenas ad hoc (diseñadas y construidas por el autor) que se aplicaron en las medidas.

V. EMISIONES ELECTROMAGNÉTICAS PRODUCIDAS POR EN EL SISTEMA DE TROLEBUS

Se indicó una de las posibles causas de radiación de interferencias desde el sistema de trole buses podría ser la ocurrencia de desconexiones instantáneas entre las líneas de suministro eléctrico y los contactos de las pértigas de alimentación a los motores eléctricos de los vehículos, produciendo descargas eléctricas visibles y audibles que potencialmente se constituyen en fuentes de radiación electromagnética.

Para ilustrar la presencia de EMI debidas a cortes de corriente en un circuito eléctrico analizaremos

el fenómeno de descargas eléctricas a través del aire que se producen entre conductores y superficies cargadas. Estas descargas dependen de muchos factores, incluyendo: diferencia de potencial entre las superficies o conductores, máxima corriente posible en la trayectoria de descarga, forma de los conductores y condiciones atmosféricas.

El resultado en cualquier caso es la emisión de campos electromagnéticos que pueden causar interferencias electromagnéticas (EMI) en otros equipos, componentes o sistemas, dependiendo de su localización.

En el caso particular del sistema de trolebús las desconexiones indicadas pueden ser consideradas como producidas por conmutadores o switches que conectan y desconectan la carga correspondiente al motor de tracción del sistema eléctrico general del trolebús de la línea de Para el voltaje sobre el condensador:

energía, cuyo comportamiento (de las descargas) nos proponemos analizar.

La situación circuital que consideramos, más se aproxima al comportamiento del trolebús se muestra en la figura 1, donde R sería la resistencia de los conductores de alimentación y de los bobinados de los motores, L la inductancia propia de los motores y C una capacidad parásita entre los diferentes conductores y bobinados, en paralelo con la combinación de R y L.

Un análisis de este circuito considerando diferentes tiempos; antes y después de la apertura del switch, el estado transitorio para el voltaje en el condensador y la corriente en la inductancia y el estado estable, no lleva a los siguientes resultados:[3]

$$V_C(t) = -B\omega L e^{-\alpha t} \left[\cos(\omega_d t) + \frac{\alpha}{\omega_d} \text{sen}(\omega_d t) \right] \quad (1)$$

Para el voltaje sobre S:

$$V_{CS}(t) = B\sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \cos \left[\omega t + \text{tg}^{-1} \left(\frac{R}{-\omega L} \right) \right] - V_C(t)$$

$$V_{CS}(t) = B\sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \cos \left[\omega t + \text{tg}^{-1} \left(\frac{\omega L}{R} \right) + \frac{\pi}{2} \right] + B\omega L e^{-\alpha t} \left[\cos \omega_d t + \frac{\alpha}{\omega_d} \text{sen} \omega_d t \right] \quad (2)$$

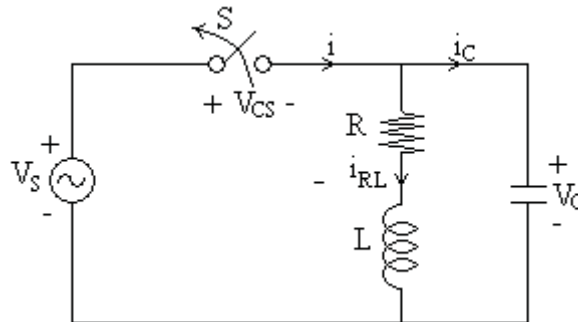


Fig. 1. Circuito equivalente al comportamiento del trolebús, en el momento de una desconexión momentánea.

Como se puede observar, el voltaje sobre los contactos del switch tiene dos componentes; una que depende de la fuente de excitación y otra que se produce por la auto oscilación debida a la

resonancia del circuito, como resultado del almacenamiento de energía tanto eléctrica como magnética en los componentes del circuito y cuya amplitud depende de la amplitud de la corriente

que se interrumpe por efecto de la apertura de los contactos del switch.

Debe tomarse en cuenta que en esta expresión, no se han considerado varios factores adicionales que están presentes en la situación real; como descargas a través del switch y una resistencia no lineal dependiente del tiempo que presenta la resistencia de los contactos.

VI. SIMULACION DEL COMPORTAMIENTO DEL TROLEBUS

Para efectos de cuantificar el efecto que se produce cuando accidentalmente se desconectan las poleas “escobillas” de las pértigas de alimentación de un trolebús o cambia de red de alimentación de una subestación a otra, resulta indispensable conocer los valores de los componentes circuitales de: resistencia inductancia y capacidad que correspondan al circuito equivalente, que hemos considerado como el idóneo para representar el comportamiento del vehículo y cuyo análisis hemos presentado.

Desgraciadamente, no son valores que se presentan en las características técnicas de este tipo de dispositivos, por lo que introduciremos valores tentativos que pueden inferirse de su estructura física, condiciones de operación: voltaje, corriente y potencia, circuitería utilizada y otras condiciones que se pueden derivar de la experiencia. Los resultados que se obtengan de estas tentativas, permitirán establecer rangos de magnitud y frecuencia con los cuales se posibilitará la selección de equipo apropiado, con el cual se podrá realizar mediciones que confirmen o descarten la teoría.

Conviene en primer término, conocer qué forma tendrá la respuesta de un circuito hipotético a fin de contar con una idea objetiva de lo que se pretende establecer en la aplicación práctica, para esto se han asumidos valores al azar para los componentes circuitales y se ha simulado la solución de las ecuaciones 1 y 2 obtenidas anteriormente, para las siguientes condiciones circuitales: $R = 50 \Omega$; $L = 20 \text{ mH}$; $C = 100 \text{ pF}$; $f = 600 \text{ Hz}$; $B = 100 \text{ A}$.

Como puede observarse los resultados en la figura 2, se presentan tres señales diferentes en amplitud y frecuencia. La primera, es una señal sinusoidal amortiguada cuya frecuencia corresponde a auto oscilación del circuito RLC, la segunda corresponde a la señal de la fuente y la tercera es la combinación de las anteriores y que

efectivamente representa la tensión generada entre los contactos del switch al abrirse y que da lugar a la interferencia electromagnética.

Estos resultados, confirman nuestra suposición de que el corte abrupto de una corriente eléctrica, produce una señal que al no tener una carga física donde disiparse, se convierte en energía radiante al espacio circundante.

De los datos circuitales tentativos, que fueron asumidos se tiene una frecuencia para la señal de radiación con una frecuencia en el orden de los 100 KHz, este valor simplemente es una guía, no hay que olvidar que el trole es una carga dinámica, consecuentemente los valores de los componentes del circuitos no son constantes en el tiempo.

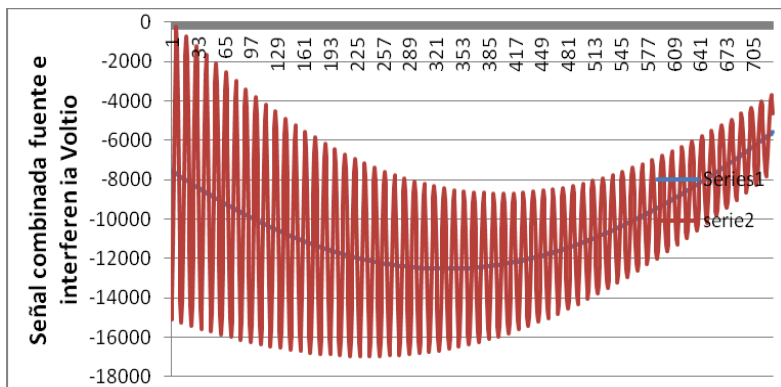
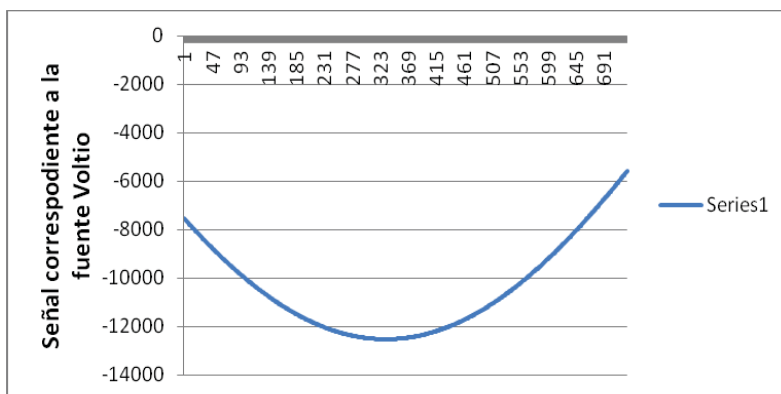
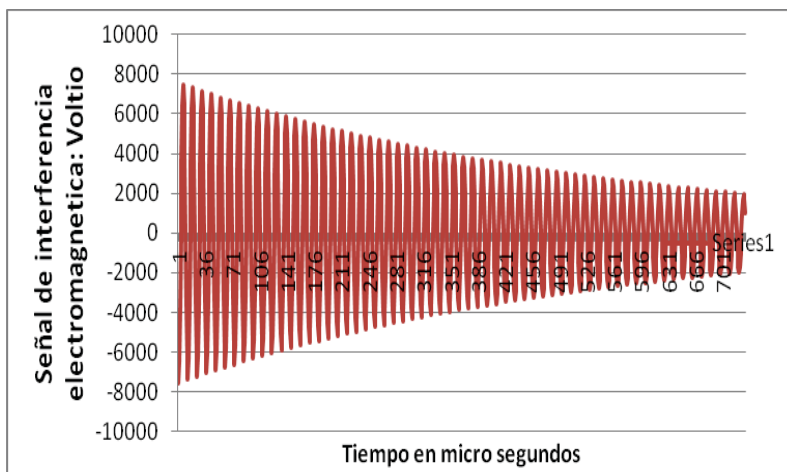


Fig.2 Señales presentes en la desconexión de un circuito R-L-C. De arriba abajo: 1 señal de interferencia, 2 señal de fuente, 3 señal combinada de fuente e interferencia

VII. FUENTE DE ALIMENTACIÓN DEL TROLE BUS

Tanto en el análisis teórico como en los resultados experimentales, se consideraron los dispositivos alimentados por fuentes de corriente alterna; sin embargo en el caso práctico del trolebús, la alimentación del mismo es de corriente continua,

pero por la forma de operación de una unidad, ésta consume energía cuando circula por terreno plano y en las cuestas, en cambio en las bajadas donde debe frenar, la acción del frenado se logra invirtiendo la operación del motor en generador y en este caso la unidad entrega energía a la línea. Esta forma de operación hace que la corriente de línea no sea constante sino que presenta

fluctuaciones, las mismas que se muestran en los gráficos de la figura 3. Fueron obtenidos utilizando el Analizador de Energía, “ESPEC G450073500 Series BLACK BOX”. La simple observación de estos resultados, muestran que las

fluctuaciones de corriente en valores eficaces de los picos máximos de corriente cercanos a los 400 A, mientras en la variación instantánea se observan picos cercanos a 800 A.

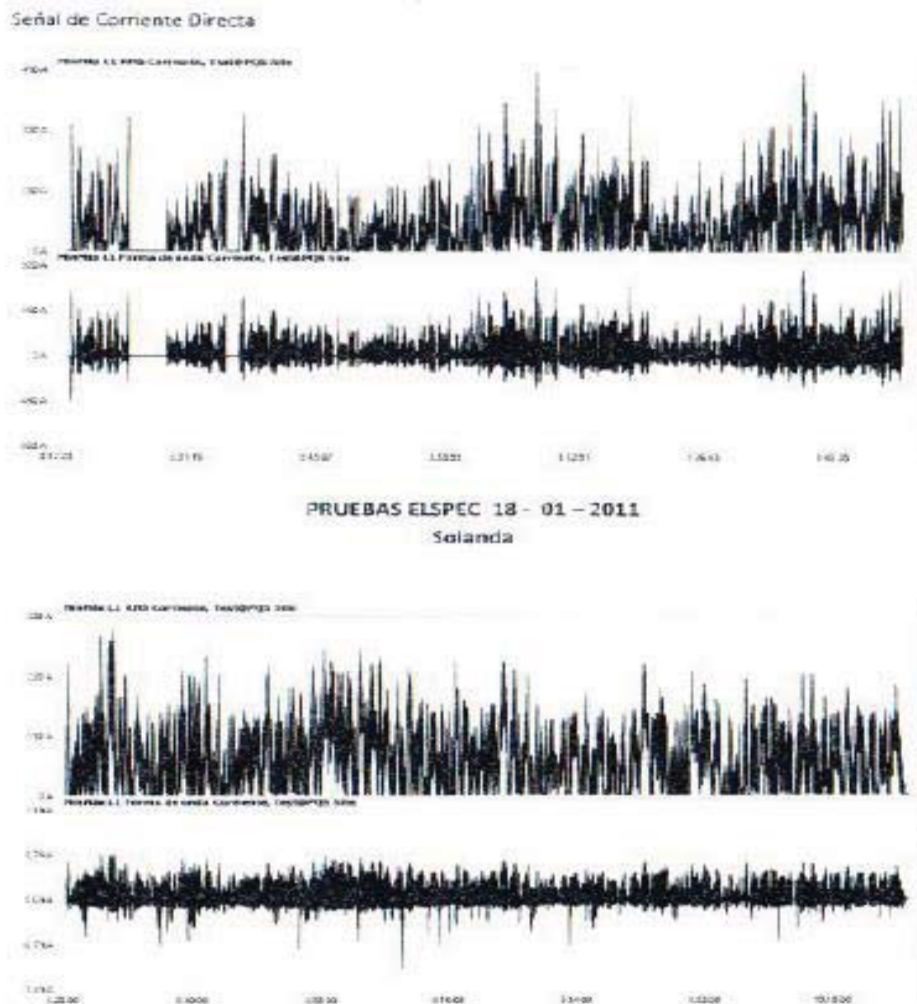


Fig. 3 Registro de la corriente en las subestaciones Moran Valverde y Solanda, tomadas en las barras der alimentación a los trole buses

En cuanto a la variación temporal, se evidencia que no se trata de una señal periódica, pero que en su contenido espectral se podrán encontrar múltiples señales con infinidad de frecuencias, amplitudes y fases. Conviene aclarar que estas fluctuaciones de voltaje y corriente, no corresponden a una sola unidad de trole bus; sino que resultan de la combinación a todas las unidades que se encuentran el tramo de servicio de una subestación.

VIII. EQUIPO APLICADO Y PRUEBAS EN EL CAMPO

Un vez desarrollado el modelo teórico, y comprobada experimentalmente la emisión de radiaciones electromagnéticas producidas por descargas al cortar una corriente eléctrica, nos dio confianza para asegurar que en el comportamiento del trole bus se podrían encontrar emisiones electromagnéticas importantes.

Para las mediciones se utilizó el equipo AARONIA modelo: SPECTRAN NF 3050 que cubre un espectro de 30Hz a 20 MHz, con capacidad para realizar medidas de campos electromagnéticos de baja frecuencia y con

sensibilidad suficiente, dado que se esperaban señales de muy bajo nivel, adicionalmente al ser portátil, convenía para su operación en el campo.

Este equipo dispone internamente de sensores de campo eléctrico en un eje y de campo magnético en tres ejes y entrada análoga; por razones de operación del equipo NF 3050 con los sensores internos, se determinó como más conveniente utilizar la escala de entrada análoga, para lo que fue necesario diseñar y construir antenas apropiadas sensibles tanto para campo eléctrico como para campo magnético. Se diseñaron, construyeron y probaron tres antenas, una antena de lazo para campo eléctrico y dos antenas magnéticas, una con blindaje de aluminio y otra antena con blindaje de cobre.

Se planificó el proceso de medida, montaje de los equipos y toma de muestras, considerando los sitios estratégicos, de fácil acceso y ofrezcan amplitud para las medidas. Se eligieron las siguientes sub estaciones: El Ejido, Mariana de Jesús, Cumandá, Villa Flora, El Recreo, Solanda y Moran Valverde.

Para las medidas se utilizó con una pértiga de fibra aislante de 2,6 m de altura, en cuyo extremo superior se adaptó un montaje con la posibilidad de orientación (de la antena) según cada uno de los planos cartesianos, sobre el cual se fijaban las antenas de prueba.

Para el registro de las medidas, el terminal de salida de las antenas se conectó a la entrada analógica del equipo de medida; analizador de espectro marca AARONIA, modelo SPECTRAM NF 3050; desde el cual, la información de las medidas, se registraba en una PC portátil, disponiendo de esta manera de archivos individuales, para cada medida realizada por cada paso del trole bus por la sub estación en prueba.

Para la toma de muestras, se fijaban los parámetros de operación del equipo de medida; tipo de sensor a aplicar, límites de frecuencia de barrido, ancho de banda de resolución, ancho de banda de video, tiempo de barrido y atenuación; se registraba la señal recibida en la PC, en la que se ha cargado previamente el software de operación del equipo de medida y se lo prepara para las condiciones de arranque y parada del registro de medición y grabación.

Se inicia el proceso cuando el vehículo se encuentra a una corta distancia del sitio en que se encuentra la antena y se termina cuando el

vehículo ha avanzado unos pocos metros luego de pasar por el puesto de medida. Durante el tiempo del recorrido de esta distancia, se está grabando la señal en forma de video, este proceso se repite con cada paso de un vehículo, el número de toma de muestras fue variable según la subestación en prueba, dependía en mucho la comodidad del sitio, la seguridad y la frecuencia de los pasos vehiculares. Finalizado el proceso de medida, se analizó cada una de las grabaciones del paso del trole bus, se eligieron las mejores y se imprimieron en papel para un posterior análisis.

Para la toma de medidas del espectro de las señales que provoca el paso del trolebús, se eligió utilizar un ancho de banda de resolución relativamente amplio con la finalidad que la toma de muestras sea rápida y puedan lograrse varias muestras dentro del espectro elegido, en cada paso de un trolebús, esto da como resultado una curva que corresponde a la envolvente de todas las señales presentes, en lugar de presentar las componentes individuales del espectro en el ancho de barrido utilizado.

Aplicando un menor ancho de banda de resolución, habría sido posible obtener en forma discreta valores de frecuencia y amplitud de manera exacta. No se aprovechó esta opción en razón de que al aplicar un ancho de banda de resolución menor traía como consecuencia una lentitud requerida por el equipo para la toma las muestras, consecuencia de lo cual habría sido posible tomar solo muy pocas señales del espectro por cada paso del trolebús.

IX. DETERMINACIÓN DEL UMBRAL DE RUIDO

Como en todo fenómeno electromagnético tenemos la presencia indeseable del ruido, por lo que fue menester determinar cuantitativamente su presencia, a fin de asegurar que las medidas de señales cuya presencia intentamos determinar sean confiables si sobrepasan este umbral. Con este propósito se realizaron varias medidas, en los sitios escogidos, en ausencia del paso de los trolebuses.

En la figura 4 se presenta una muestra de las tantas mediciones que se realizaron, se aplicó un barrido de 150 KHz a 350 KHz, el piso de ruido es menor que 0.5 mV en el medidor con entrada análoga, que en valor absoluto corresponde a 55.7 dBuV/m, valor que se tomó como referencia; (la relación entre el valor absoluto del campo eléctrico y la medida con entrada análoga del

medidor depende del factor de antena, FA, de la antena que se utilizó en la medida). Conviene indicar que en la realización de esta medida, no hubieron automotores circulando por el sitio de medida.

En este gráfico aparecen dos señales relativamente fuertes, una de 3,17 mv (71.3 dBuV/m) en la frecuencia de 330 KHz y otra de 2,7 mV (69.5 dBuV/m) en 342 KHz. No se pudo determinar la procedencia de estas señales.

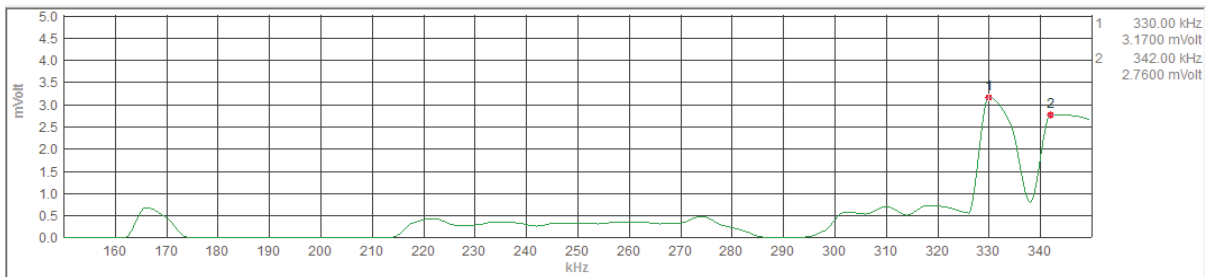


Fig. 4 Muestra de la señal en el espacio circundante a las líneas de alimentación; sin el paso del vehículo, para determinar el piso de ruido

X. MEDIDAS ANALOGICAS DE LAS RADIACIONES DE LOS TROLE BUSES

Como se indicó se realizaron las mediciones en cada una de las sub estaciones seleccionadas del sistema. En la figura 5 se incluye una muestra tomada al azar, del paso de un vehículo por uno de los sitios de medida, conviene indicar que este resultado se obtiene montando la antena, con la polarización conveniente, en el extremo de la pértiga de medida, mediante un cable de longitud

adecuada, la salida de la antena se conecta a la entrada análoga del analizador de espectro y la salida USB de éste se conecta a la PC para registro y grabación, (es preciso generar un archivo por cada paso de trole bus) Mediciones como la indicada se realizaban en cada paso del trole bus y en cada de las sub estaciones. Esto se hizo en varias oportunidades, en diferentes días y a diferentes horas del día, obteniéndose como resultado varios centenares de registros, los mismos que se disponen en copia dura y CD.

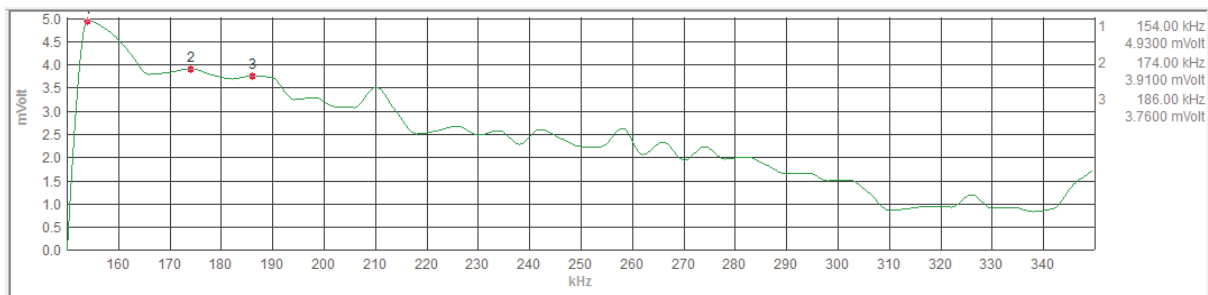


Fig. 5 Muestra de una señal (EMI) radiada, en el espacio circundante a las líneas de alimentación, con el paso del vehículo

XI. CADA TROLE BUS UNA ENTIDAD PARTICULAR

Conviene comentar que en la programación de las medidas, se buscaba establecer la dependencia de los campos electromagnéticos registrados como función de la distancia, a fin de determinar si las señales obtenidas correspondían a campos de radiación o inducción según su dependencia sea inversa con la distancia o inversa con el cuadrado de la misma respectivamente.

Del análisis de los registros obtenidos por la medición de las señales tomadas a diferentes distancias respecto de las líneas de alimentación de los tolebus no se encontró ninguna de las relaciones esperadas, de donde se concluyó caímos en cuenta que cada unidad emitía un espectro particular, con diferentes valores de contenidos de frecuencias y amplitudes por lo que la alternativa de establecer la dependencia de las señales con la distancia, no era posible con el equipo disponible, pues para verificación de la dependencia de las señales con la distancia, habría

sido necesario disponer de tantos sensores e instrumentos de medida como de las distancias a las que se realizarían las pruebas, de manera que se pudieran tomar simultáneamente las señales provenientes de un mismo trole bus.

Por la razón expuesta los resultados obtenidos corresponden a una sola distancia, 3,6 metros, entre el centro de las líneas y el sensor para toma de muestras.

XII. VALORES DISCRETOS DE FRECUENCIA Y AMPLITUD

El haber optado por el ancho de banda de resolución más amplio permitió que se puedan evaluar, en forma discreta, muestras de frecuencia y amplitud de cada paso del trole bus en cada subestación seleccionada, se determinaron frecuencias separadas cada 50 KHz dentro de la banda de 150 KHz a 600 KHz. Sin que esto quiera significar que es el rango de radiación.

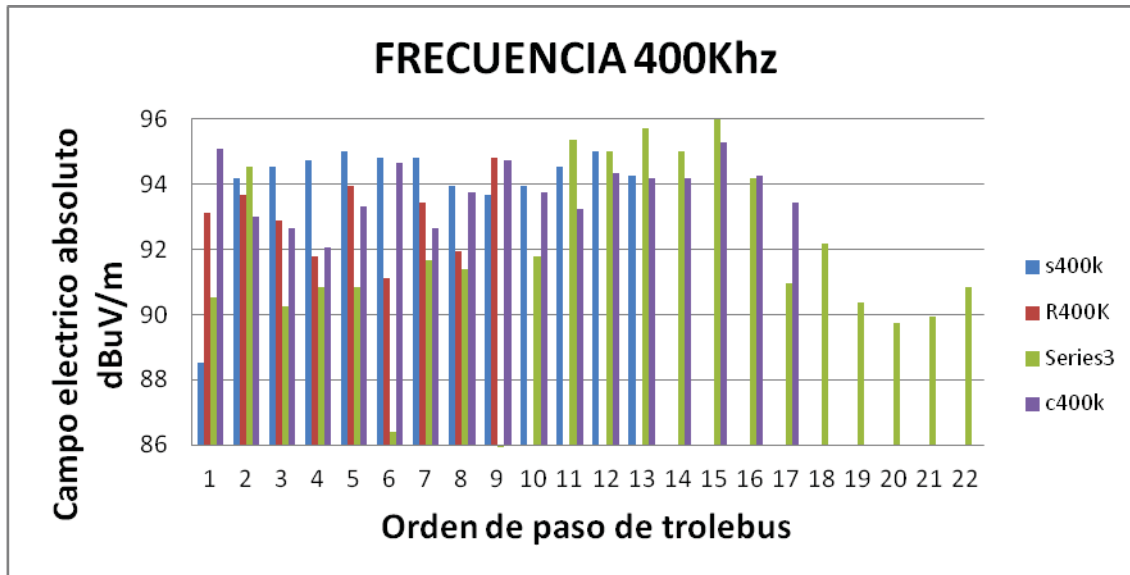


Fig. 5 Muestra del campo eléctrico radiado absoluto combinado, obtenido en las subestaciones: Solanda, El Recreo, El Ejido y Cumandá

En la figura 5 una muestra tomada al azar sobre los resultados obtenidos debidos a las radiaciones de la descarga que se produce entre las escobillas de alimentación a los vehículos y las líneas de energía (DC), en los sitios de interconexión de dos subestaciones. Cada barra, según el color, corresponde a una subestación. La diferencia en el número de tomas de las diferentes subestaciones se debe, como ya se indicó, a la facilidad, comodidad y seguridad del sitio. Por razones de espacio (en el artículo) se presenta una sola muestra, pero se disponen de registros de todas las medidas.

A. Comparación con estándares internacionales.

Los resultados mostrados en la figura 5, en cuanto a la magnitud del campo eléctrico no tendría significado sino la relacionamos con valores estandarizados. Pese a la búsqueda realizada sobre estándares internacionales específicos para radiaciones de trole buses, únicamente se encontró una norma genérica realizada por la *International Electrotechnical Commission (IEC)*, en el capítulo dedicado a “Aplicaciones Ferroviarias de Compatibilidad Electromagnética” IEC 62236 de las cuales se ha extraído la figura 6 [7].

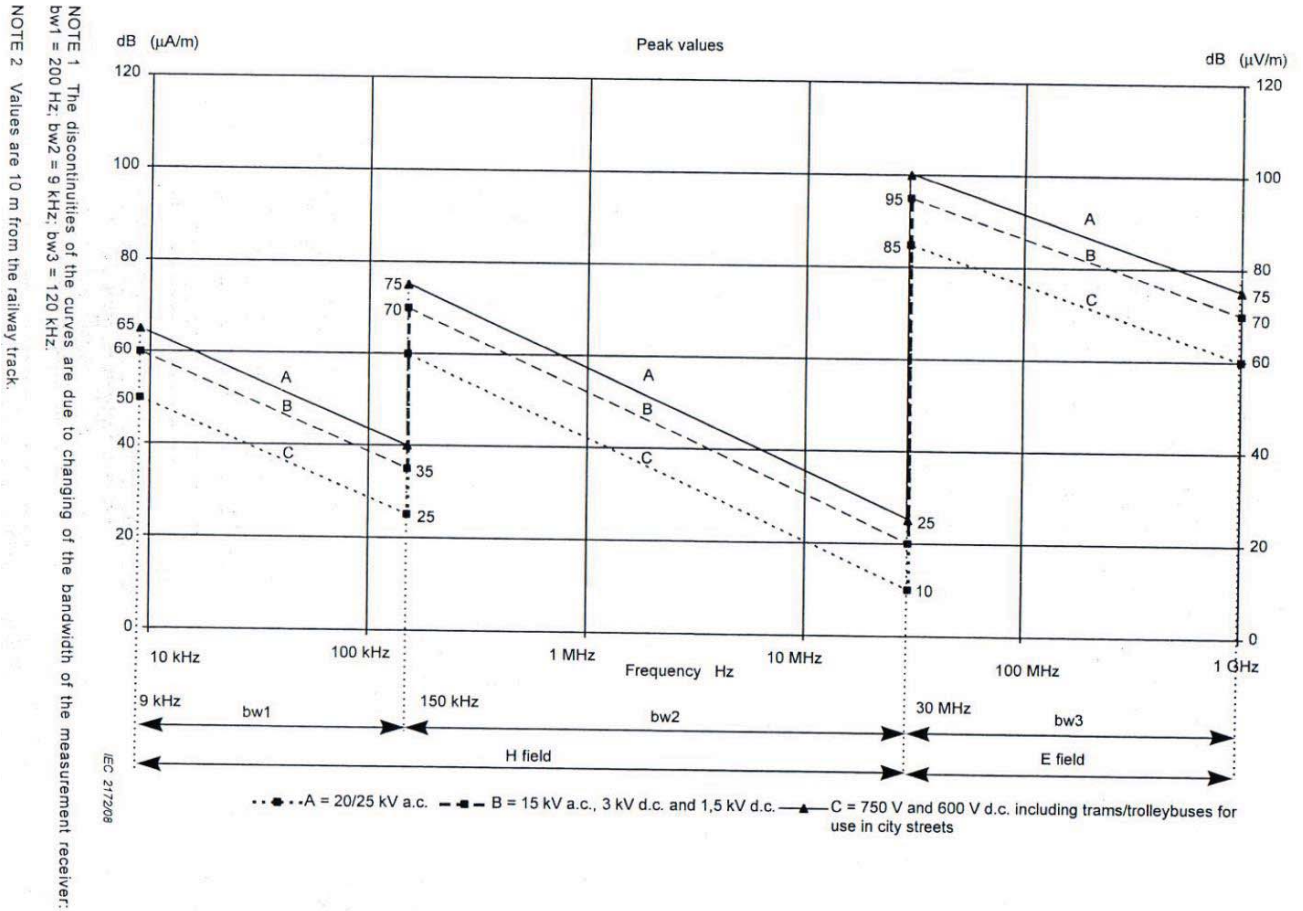


Fig. 6 Límites de emisión en el rango de 9 KHz a 1 GHz. La curva “C” sería la aplicable al caso presente

De acuerdo con el rango de frecuencia en el que se realizaron las medidas, corresponde al segmento central de la curva “C” cuyos valores están dados en intensidad de campo magnético, esto no permite hacer una comparación directa con los resultados obtenidos en el proyecto, que están en intensidad de campo eléctrico; sin embargo, aplicando la teoría de campo cercano, la relación entre campo eléctrico y campo magnético sería entre 30 dB y 40 dB, inferior en valor numérico, para el campo magnético. Aplicando esta restricción a los resultados presentados en la figura 5, estaríamos al borde o algo superiores a lo que establece la norma.

XIII. INTERERENCIAS CONDUCCIDAS

Inicialmente se pensó que la radiación observada en las cercanías de las subestaciones de alimentación, podía deberse a la tecnología aplicada para la transformación AC/DC. Para este tipo de fuentes, con base en las prestaciones cada vez mejores en potencia y rapidez de los semiconductores, ha dado lugar a un aumento

espectacular de las aplicaciones de convertidores estáticos en el campo industrial, electrónica de consumo, transformación y transporte de energía, tracción etc., con elevado rendimiento y baja disipación, sustituyendo con ventaja a otros sistemas. Sin embargo desde el punto de vista de EMC, estos sistemas presentan serias repercusiones sobre la generación y propagación de EMI.

Por su propia naturaleza muchas de estas fuente trabajan en un “permanente estado transitorio”, conmutando corrientes y dando lugar a la generación de armónicos, sobre tensiones locales, elevados picos de corriente, altos valores de dv/dt y di/dt , que como consecuencia se convierten en fuentes de EMI radiadas, que afectan a la propia red de alimentación, a consumidores conectados a la misma y a circuitos susceptibles de recibir perturbaciones.

Como el objetivo del proyecto era determinar el origen de las posibles fuentes de EMI, concebimos que en primer lugar, era conveniente

determinar el espectro de las corrientes que producían las subestaciones, para este propósito se diseñó y probó una sonda que acoplada a los cables de suministro de energía proporcionaría la información sobre el contenido de componentes de frecuencia variables con el tiempo

Se realizaron las mediciones ya sea en los pozos de revisión o en las cajas de distribución, de los postes, según la facilidad, y se encontraron resultados interesantes como los que se presentan en la muestra de la figura 7.

Como comentario de los resultados obtenidos, el conjunto de corrientes como el de la figura 7 coincidían con el paso de una unidad por la subestación, estableciéndose así una relación causa a efecto entre el paso del vehículo y la

presencia de corrientes alternas transitorias. Cada paquete de señales, contiene cinco barras correspondiendo cada una a una unidad de trole bus. El espectro correspondiente estuvo dentro de una pocas decenas de KHz, no se detectaron radiaciones dentro del rango de apareamiento de las corrientes, por lo que se concluye que se trata exclusivamente de interferencias conducidas, sobre las cuales no se encontró ninguna norma o elemento de comparación. Es sorprendente el valor que alcanzan las corrientes de interferencia en las frecuencias de 7,5 KHz, 12,5 KHz, 15 KHz y 17,5 KHz. No se pudo apreciar algún efecto que estas puedan causar ya sea en las unidades de transporte como en las fuentes de conversión, posiblemente por la alta impedancia que presentan estos elementos.

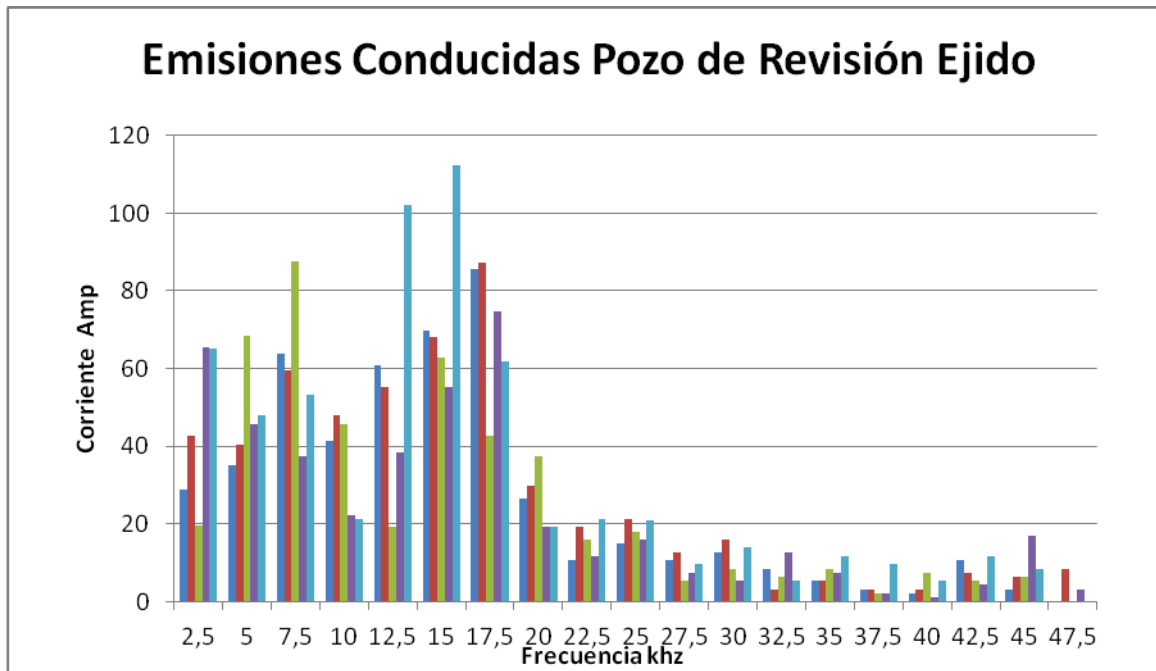


Fig.7 Interferencias conducidas en los cables de alimentación de las subestaciones a las barras del trole bus

XIV. CONCLUSIÓN

Por primera vez en el país, se ha abordado la temática de la compatibilidad electromagnética y obtenido resultados sobre la radiación de interferencias electromagnéticas, de un solo sistema de los inúmeros que deberían analizarse. Resultados que cuantitativamente, estarían al límite de lo establecido en la norma internacional. Con fundamento en que en nuestro país no se ha

abordado en absoluto el problema de la compatibilidad electromagnética, vislumbré como resultado del proyecto, el inicio de su inserción en la estructura normativa internacional sobre compatibilidad electromagnética, así como la promulgación de regulaciones, que permitan el uso seguro de las nuevas tecnologías, cada vez más abundantes, que hacen uso de señales electromagnéticas.

Confíe que el impacto que tendrían los resultados del presente proyecto sería, sin duda, muy significativo en nuestra sociedad. Por un lado, provocaría el inicio del desarrollo de una cultura de protección del medio ambiente, de radiaciones electromagnéticas no deseadas; perjudiciales para la salud y el funcionamiento seguro y eficiente de los equipos eléctricos y electrónicos en sus diferentes aplicaciones.

Nada de esto ha sucedido, desgraciadamente a todo nivel; estatal o privado, ya sea del segmento educativo de nivel superior, del empresarial o comercial, nadie le da importancia. Aprovechando el espectro radioeléctrico, mejor escuchar el pasillo “Decepciones”.

XV. AGRADECIMIENTOS

Debo dejar constancia de mi agradecimiento a todas las personas que hicieron posible llevar adelante este propósito; en especial al Dr. Nelsón Medina, Director del Proyecto PIC 08 335, al Ing. Jorge Suasnavas por su colaboración en la construcción de modelos para probar la radiación por cortes de corriente, a los ingenieros Mario Barba y Weymar Yepes, a Elizabeth Arboleda y Jorge Tobar por su importante ayuda en la realización de las medidas, en la selección de los registros idóneos y en la estructuración de las bases de datos con el contenido de las medidas. Finalmente al experto en mediciones de campos EM, Ing. Paco Ortiz, quien ratificó que nuestras mediciones eran coherentes.

XV. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA

- [1] Williams Tim, *EMC for Product Designer*, ELSEVIER, Great Britain, 2007.
- [2] IEC 60050(161) *International Electrotechnical Vocabulary, Electromagnetic compatibility*, Geneva Switzerland.
- [3] Kaiser Kenneth L. *Electromagnetic Compatibility Handbook*, CRC Press, New York, 2004
- [4] Dipak L. Sangupta, Valdis V. Liepa, *Applied Electromagnetics and Electromagnetic Compatibility*, Willey – Interscience, New York, 2005
- [5] IEEE, *American National Standard for Electromagnetic Compatibility. Radiated Emission Measurement in Electromagnetic Interference (EMI) Control. Calibration of Antennas (9KHz 40GHz)*, 3 Park Avenue, New York, USA, 2006.
- [6] W. Prasad Kodali, *Engineering Electromagnetic Compatibility; Measurements, Technology and Computer Models*, Willey – IEEE Press, New York 2006
- [7] IEC 62236-2 *Railway Applications- Electromagnetic Compatibility- Part 2: Emission of the whole railway system to the outside world*, Geneva Switzerland, 2008.
- Josep Balcells, Francesc Daura, Rafael Esparza, Ramon Pallas, *Interferencias Electromagnéticas en Sistemas Electrónicos*, Marcombo S.A. Barcelona España, 1992
- Clayton R. Paul *Introduction to Electromagnetic Compatibility*, John Willey & Sons, second edition 2006.
- CISPR 11 *Industrial scientific and medical equipment – Radio frequency disturbance characteristics – Limits and methods of measurement*, Geneva Switzerland, 2009.
- Vignesh Rajamani, Gustav Freyer, Chuck Bunting, *Introduction – Rationale for RC Testing*, EMC Symposium Austin Texas, USA, August 2009,
- Chistos Christopoulos, *Principles and Techniques of Electromagnetic Compatibility*, CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, USA,
- IEC 61000-1-1 *Electromagnetic Compatibility, Part 1: General, Section 1: Application and interpretation of fundamental definitions and terms*, Geneva, Switzerland, 1992.
- IEC 61000-1-2 *Electromagnetic Compatibility, Part 1-2: General- Methodology for achievement of functional safety of electric and electronic systems including equipment with regard to electromagnetic phenomena*, Geneva, Switzerland, 2008
- IEC 61000-1-2 *Electromagnetic Compatibility, Part 1-2: General- Historical rationale for the limitation of power-frequency conducted harmonic current emissions from equipment, in the frequency range up to 2KHz*. Geneva Switzerland, 2005.
- IEC 62236-1, *Railway Applications – Electromagnetic Compatibility, Part 1: General*, Geneva, Switzerland, 2008.
- IEC 62236-3-1, *Railway Applications – Electromagnetic Compatibility, Part 3-1: Rolling stock – Train and complete vehicle*, Geneva Switzerland, 2008.
- CISPR 11 *Industrial scientific and medical equipment – Radio frequency disturbance characteristics – Limits and methods of measurement*, Geneva Switzerland, 2009.

BIOGRAFIA

Mario Rubén Cevallos Villacreses, 1942. Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, Escuela Politécnica Nacional, 1968. Diploma de posgrado en Manejo de Señales; *Philips International Institute, Eindhoven*, Holanda 1968 – 1969. *Eindhoven Technical University*, Programas de Investigación: Multiplicadores Armónicos con Reactancias no Lineales y Radiocomunicaciones Espaciales, Eindhoven Holanda 1975 – 1976. Ex profesor principal de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Áreas de preferencia: Teoría Electromagnética, Compatibilidad Electromagnética, Propagación por medios físicos y por el medio geográfico, Micro ondas, Antenas.