

Implantação e automatização do laboratório de medições de compatibilidade eletromagnética para prestação de serviços aos Institutos de Pesquisa do Comando da Aeronáutica e empresas do setor aeroespacial

Implementation and automation of the electromagnetic compatibility measurement laboratory to provide services to Aeronautical Command Research Institutes and companies in the aerospace sector

Implementación y automatización del laboratorio de medición de compatibilidad electromagnética para prestar servicios a los Institutos de Investigación de Comando Aeronáutico y a las empresas del sector aeroespacial

Sérgio Baptista de Oliveira^I

Carlos do Nascimento Santos^{II}

RESUMO

O presente artigo tem como objetivo apresentar os ensaios técnicos de compatibilidade eletromagnética (EMC) em um equipamento, minimizando a interferência eletromagnética (EMI) em seu funcionamento normal para o qual foi projetado, executados em laboratório em área militar, em nível de desenvolvimento, segundo normas técnicas padronizadas internacionalmente. Esse laboratório, que é inovador para o Comando da Aeronáutica nesse tipo de prestação de serviços, foi implantado e está em fase de automatização com a utilização de *softwares* específicos, desenvolvidos para varrer-se a execução da faixa de frequência que é repetitiva durante o processo de determinados tipos de ensaio exigidos pela norma. Esse laboratório foi criado para atender principalmente sistemas de projetos espaciais e da aviação militar do Comando da Aeronáutica, mas esse serviço pode ser estendido a outras instituições militares aeroespaciais, de institutos de pesquisa, podendo inclusive atender projetos de desenvolvimento na área aeroespacial civil. Para demonstrar a capacidade técnica desse laboratório inovador e implantado para prestar esse tipo de serviço em EMC, em nível de desenvolvimento e com

expectativas futuras de acreditação pelo INMETRO, foram executados ensaios em um sistema de projeto espacial militar da aeronáutica seguindo todos os níveis e padrões estabelecidos em norma técnica internacional militar específica, exigida.

Palavras-chave: EMC. EMI. Normas técnicas. Laboratório de ensaios. Desenvolvimento.

ABSTRACT

This article aims to present the technical tests of electromagnetic compatibility (EMC) in an equipment, minimizing the electromagnetic interference (EMI) in its normal operation for which it was designed, performed in a military area laboratory, at a development level, according to international technical standards. This laboratory, which is innovative for the Air Force Command in this type of service provision, was implemented and is undergoing automation with the use of specific softwares, developed to scan the execution of the frequency range that is repetitive during the processing of certain types of tests required by the technical standard. This laboratory was created to serve mainly space projects and military aviation systems of the Air Force Command,

I. Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA) – São José dos Campos/SP – Brasil. Major Especialista em Armamento da Força Aérea Brasileira (FAB). *E-mail:* sergiosbo@ifi.cta.br

II. Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA) – São José dos Campos/SP – Brasil. Doutor em Engenharia Mecânica na área de Materiais pela Universidade Estadual Paulista (UNESP). *E-mail:* nascimento@ifi.cta.br

Recebido: 21/11/18

Aceito: 24/07/19

but this service can be extended to other military aerospace institutions, such as research institutes, and can even attend development projects in the civil aerospace area. To demonstrate the technical capacity of this innovative and recently implemented laboratory to provide this type of service at EMC, at a development level and with future expectations for accreditation by INMETRO, some tests were carried out in a military space design system of aeronautics, following all levels and standards established and required in a specific international military technical standard, required.

Keywords: EMC. EMI. Technical standards. Testing laboratory. Development.

RESUMEN

Este artículo tiene como objetivo presentar las pruebas técnicas de compatibilidad electromagnética (EMC) en un equipo, minimizando la interferencia electromagnética (EMI) en su funcionamiento normal para el que fue diseñado, realizadas en un laboratorio en el área militar, a nivel de desarrollo, de acuerdo con normas técnicas estandarizadas internacionalmente. Este laboratorio, que es innovador para el Comando de la Fuerza Aérea en este tipo de prestación de servicios, se implementó y está siendo automatizado con el uso de un software específico, desarrollado para escanear la ejecución del rango de frecuencia que es repetitivo durante el proceso de ciertos tipos de pruebas requeridas por la norma. Este laboratorio fue creado para servir principalmente proyectos espaciales y sistemas de aviación militar del Comando de la Fuerza Aérea, pero este servicio puede extenderse a otras instituciones aeroespaciales militares, de institutos de investigación, e incluso puede asistir a proyectos de desarrollo en el área aeroespacial civil. Para demostrar la capacidad técnica de este laboratorio innovador e implementado para proporcionar este tipo de servicio en EMC, a nivel de desarrollo y con expectativas futuras para la acreditación por INMETRO, se realizaron pruebas en un sistema de diseño de espacio militar de aeronáutica que sigue todos los niveles y estándares establecido en una norma técnica militar internacional específica, requerida.

Palabras clave: EMC. EMI. Normas técnicas. Laboratorio de pruebas. Desarrollo.

1 INTRODUÇÃO

Todos os sistemas com equipamentos elétricos e eletrônicos são susceptíveis a determinados níveis de ruídos de interferência eletromagnética (EMI) ou também são potenciais geradores, de forma que podem ou não afetar o seu funcionamento normal a que foram

projetados. Essas interferências podem ser em nível de emissões conduzidas (CE) ou por susceptibilidades conduzidas (CS), em sua fiação ou cablagem desses fios. Esses sinais podem vir também por efeito indireto do impacto de raios atmosféricos nas aeronaves ou em linhas de transmissão de alimentação.

Interferências por emissões irradiadas (RE) ou por susceptibilidades irradiadas (RS) são provenientes de seu circuito eletrônico, ou por rádio frequência (RF) em todos os tipos de telecomunicações. Próximo a regiões de aeroportos, estações meteorológicas, de lançamento de foguetes, temos sinais de radar, navegação, comunicação, telemetria que interferem como campos eletromagnéticos irradiados de alta intensidade (HIRF).

O ambiente eletromagnético em que esse sistema está inserido deve ser analisado em termos de sua compatibilidade eletromagnética, ou seja, esse sistema deve funcionar adequadamente não sendo interferido e sem interferir como fonte geradora de EMI e que venha afetar no funcionamento de outros equipamentos nessa região. Dependendo de como e onde vai ser utilizado, seja em área civil ou em área militar, o equipamento será desenvolvido e certificado em laboratórios capacitados e acreditados com pessoal qualificado para tal, aplicando-se normas técnicas aceitas e em algumas aplicações normas harmonizadas e desenvolvidas por comitês técnicos internacionais que se reúnem regularmente, estudando e promovendo atualizações.

Os governos mundiais possuem agências certificadoras que fiscalizam a produção e venda desses diversos equipamentos. Um dos grandes efeitos de interferência eletrônica, na área militar, é na conhecida guerra eletrônica onde são envolvidas ações para impedir ou reduzir o uso efetivo do espectro eletromagnético do inimigo, bem como destruir, neutralizar ou degradar sua capacidade de combate, usando energia eletromagnética ou armamento que empregue a emissão intencional do alvo para o guiamento de seus equipamentos, seja em terra, mar ou ar. Essas medidas de ataque eletrônico contemplam, em geral, sistemas de navegação, comunicação por rede de dados, voz, *links*. Também por sistemas de radares de vigilância, aquisição e (ou) acompanhamento ou tiro, e sistemas ópticos por infravermelho e visual. Esses equipamentos são projetados e devem ser blindados e não susceptíveis a esses níveis de sinais de interferência eletromagnéticos nocivos.

Dentro da área civil na aviação, na marítima, na indústria automobilística ou na indústria de equipamentos eletroeletrônicos para as diversas aplicações, os ensaios de compatibilidade eletromagnética são também necessários e equivalentes, porém os níveis de blindagem

a esses sinais eletromagnéticos indesejáveis não são tão rigorosos e elevados, o que levaria ao encarecimento do produto final. Por isso a necessidade de normas específicas e seu rigor para cada área de aplicação.

Durante determinados tipos de ensaios, temos faixas de frequências definidas que são varridas, passo a passo, tornando-se repetitivo o processo, que é muitas vezes cansativo e demorado para o especialista executor, por isso a necessidade de desenvolver *softwares* específicos de automatização para aquela montagem específica com os equipamentos de ensaio e repetibilidade da execução.

Neste artigo temos por objetivo apresentar os ensaios de compatibilidade eletromagnéticos realizados em equipamentos da área aeroespacial, com tecnologia de defesa, em laboratório implementado, em fase de automatização para atender o Comando da Aeronáutica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste artigo a principal aplicabilidade será para área militar da força aérea e aeroespacial tendo como principal norma técnica utilizada a norma militar MIL-STD-461, Revisão G.

Nos ensaios de compatibilidade eletromagnética, segundo as principais normas técnicas militares ou civis utilizadas são divididas em emissões conduzidas (CE), ou susceptibilidades conduzidas (CS), ou emissões irradiadas (RE), ou susceptibilidades irradiadas (RS). Nesses tipos de ensaios utiliza-se *Line Impedance Stabilization Network* (LISN) como uma das funções de filtragem da linha de alimentação de energia em corrente elétrica alternada ou contínua do equipamento sob ensaio (ESE) para garantir a não interferência nesses sinais.

2.1 Ensaio de emissão conduzida CE102

Esse teste é utilizado para verificar as emissões eletromagnéticas conduzidas ruidosas que surgem por meio dos cabos de alimentação de energia elétrica do equipamento sob ensaio (ESE). Segundo a MIL-STD-461 a faixa de frequência especificada para o ensaio é de 10 kHz a 10 MHz. Deve incluir cabos de retorno e aqueles que são fontes de outros equipamentos que não foram parte do ESE, mas que o influenciam.

Estabelecidas e ajustadas pela norma os limites aceitáveis de ruídos de interferência que o equipamento ESE deve suportar, monta-se o *setup* de ensaio em laboratório monitorando o funcionamento do ESE constantemente para avaliar se irá funcionar adequadamente dentro da faixa de frequência e limites especificados.

2.2 Ensaio de susceptibilidade conduzida CS101

Segundo a MIL-STD-461 a faixa de frequência especificada para o ensaio é de 30 Hz a 150 kHz. Esse ensaio é utilizado para verificar a capacidade do ESE em suportar sinais ruidosos acoplados a cabos de alimentação de energia elétrica em baixas frequências. Ele é aplicável a equipamentos e subsistemas de corrente alternada, limitado a corrente elétrica menor ou igual a 30 amperes por fase e condutores de alimentação de entrada com corrente contínua, sem incluir os retornos.

Se o ESE é operado com corrente contínua (CC) ou alternada (CA), este ensaio é aplicável normalmente ao longo do intervalo de 30 Hz a 150 kHz. Se o ESE é operado com corrente alternada, este ensaio é aplicável a partir da segunda harmônica da frequência de alimentação do ESE estendendo-se até 150 kHz.

Estabelecidas pela norma os limites aceitáveis dos ruídos de interferência que o equipamento ESE deve suportar, monta-se o *setup* de ensaio em laboratório e aplica-se esse sinal ao ESE, monitorando-o constantemente, para avaliar se irá funcionar adequadamente dentro da faixa de frequência especificada.

2.3 Ensaio de susceptibilidade conduzida CS114

Segundo a MIL-STD-461, a faixa de frequência especificada para o ensaio é de 10 kHz a 200 MHz. Esse procedimento de teste é utilizado para verificar a capacidade do ESE em suportar sinais ruidosos, acoplados aos cabos de interconexão e alimentação de energia elétrica desse equipamento nessa faixa de frequência.

Estabelecidos pela norma os limites aceitáveis dos ruídos de interferência que o equipamento ESE deve suportar, monta-se o *setup* de ensaio em laboratório e aplica-se esse sinal ao ESE, monitorando-o constantemente, para avaliar se o mesmo irá funcionar adequadamente dentro da faixa de frequência especificada.

2.4 Ensaio de susceptibilidade conduzida CS115

Nesse ensaio sinais pulsados ruidosos são injetados nos cabos de alimentação ou de sinais de dados do ESE. Esse procedimento de teste é utilizado para verificar a capacidade do ESE em suportar impulso desses sinais ruidosos acoplados a cabos de alimentação de energia, de dados ou de sistemas aterrados dos cabos de interconexão. O nível de pulso utilizado para o ensaio é especificado segundo a norma MIL-STD-461.

Estabelecido esse nível, monta-se o *setup* de ensaio em laboratório e aplica-se esse sinal ao ESE,

monitorando-o constantemente, para avaliar se o mesmo irá funcionar adequadamente.

2.5 Ensaio de susceptibilidade conduzida CS116

Nesse ensaio, segundo a norma MIL-STD-461, trabalha-se com a injeção de um sinal ruidoso de corrente elétrica pulsada transiente senoidal amortecido na faixa de frequência de 10 kHz a 100 MHz. Esse sinal é injetado nos cabos de alimentação de energia ou de sinais de dados do ESE.

Estabelecido pela norma esse nível de sinal, monta-se o *setup* de ensaio em laboratório e aplica-se esse sinal ao ESE, monitorando-o todo o tempo, para verificar a capacidade desse em suportar sinais acoplados aos cabos de alimentação de energia, de dados ou de sistemas aterrados dos cabos de interconexão, ou seja, o ESE deverá funcionar adequadamente na presença desses pulsos transientes de sinais dentro dessa faixa de frequência especificada.

2.6 Ensaio de emissão irradiada RE102

Esse ensaio, segundo a norma MIL-STD-461, é utilizado para verificarem-se as emissões irradiadas de campos elétricos provenientes do ESE, bem como de seus subsistemas e cablagens associadas que poderão interferir em outros equipamentos instalados nesse ambiente.

Esse ensaio é realizado em câmara anecóica e aplicável normalmente ao longo do intervalo de frequência de 10 kHz a 18 GHz. Acima de 30 MHz as polarizações vertical e horizontal das antenas são aplicadas. Conforme a faixa de frequência aplicada, deve-se utilizar uma antena com características próprias. São conhecidas como antena ROD, para varrer a faixa de 9 kHz a 30 MHz, antena BICONILOG, para varrer a faixa de 26 MHz a 6 GHz, e antena DOUBLE RIDGE HORN, para varrer a faixa de 750 MHz a 18 GHz.

As antenas são posicionadas a um metro de distância do ESE e a uma altura de 1,20 m do solo, conforme a norma. A intensidade do campo elétrico irradiado pelo ESE é monitorada na faixa de frequência especificada e o seu limite é comparado com o especificado pela norma. O resultado dessa monitoração é representado em um gráfico com os limites medidos e irradiados do ESE e o especificado pela norma.

2.7 Ensaio de susceptibilidade irradiada RS103

Esse ensaio, segundo a norma MIL-STD-461, é utilizado para verificar a capacidade do ESE em suportar as emissões irradiadas de interferência de campo elétrico sobre ele, bem como de seus subsistemas e cablagens

associadas proveniente de outros equipamentos instalados nessa vizinhança ou de outras fontes nesse ambiente.

Esse ensaio pode ser realizado em câmara anecóica ou de reverberação. A intensidade de campo elétrico é de 20 Volts por metro para projetos espaciais e de 200 Volts por metro para aviação militar, conforme a norma. Esse requisito é aplicável normalmente ao longo do intervalo de frequência de 10 kHz a 18 GHz. Acima de 30 MHz as polarizações vertical e horizontal das antenas são aplicadas.

Esse ensaio é semelhante ao RE102 somente que agora o ESE, suas cablagens e subsistemas estão sendo irradiados pelo campo elétrico emitido pelas antenas. Conforme a faixa de frequência aplicada, deve-se utilizar uma antena com características próprias. São conhecidas como antena ROD, para varrer a faixa de 9 kHz a 30 MHz, antena BICONILOG, para varrer a faixa de 26 MHz a 6 GHz, e antena DOUBLE RIDGE HORN, para varrer a faixa de 750 MHz a 18 GHz.

As antenas são posicionadas a um metro de distância do ESE, ou suas cablagens, e a uma altura de 1,20 m do solo, conforme a norma.

O limite para intensidade de campo elétrico é ajustado segundo a norma para aplicabilidade em projetos da força aérea ou aeroespacial. Constantemente, durante o ensaio, um sensor de campo elétrico é posicionado o mais próximo possível do ESE, suas cablagens e subsistemas para conferir a intensidade de campo elétrico irradiado sobre essa montagem. O ensaio, conforme sua complexidade, pode ser repetido várias vezes, em que são variadas as posições do sensor e das antenas para varrer todos os pontos críticos desse sistema de montagem, conforme especificado em norma.

3 METODOLOGIA

O objetivo principal dessa metodologia técnica é a demonstração da capacidade do laboratório em executar esse tipo de ensaio de EMC, com perspectivas de extensão dessa prestação de serviços, em nível de desenvolvimento, mas com expectativas futuras de acreditação.

Para demonstração dos ensaios de compatibilidade EMC nesse laboratório do DCTA/IFI, utilizou-se um determinado sistema que compõe um veículo aeroespacial do DCTA/IAE, preservados alguns detalhamentos técnicos devido ao sigilo da tecnologia militar envolvida, bem como da montagem para ensaiá-lo.

Esse sistema possui um ou mais aparelhos ESE, composto pela sua fiação, cablagens, conectores e subsistemas. Tanto a configuração da disposição desse sistema quanto os equipamentos para o ensaio e a mesa de montagem são padrões que seguem a norma. A mesa de ensaio de EMC utilizada no laboratório segue padrão

segundo a norma MIL-STD-461, com plano de terra em chapa metálica de cobre e ligações de aterramento em malha de terra externa do laboratório projetados para essa finalidade. A parte não condutiva utilizada sob a mesa condutiva é uma placa de isopor isolante. Os equipamentos do laboratório de testes representados nas figuras e utilizados em cada tipo de ensaio estão discriminados e/ou representados por letras A, B, C, D, E, F, ou G. Os outros não discriminados apenas fazem parte da bancada de testes devem ser utilizados conforme o tipo de ensaio.

Esse sistema ESE é operado normalmente pelo projetista, durante o ensaio em laboratório, como se estivesse funcionando em condições normais em seu veículo espacial, para que se possa analisar sua operacionalidade normal dentro desses limites de EMI aceitáveis pela norma utilizada. As normas que seguimos ou mesmo os equipamentos utilizados no laboratório estão em constante atualização.

O Laboratório do DCTA/IFI possui documentos técnicos de procedimentos interno para execução desses tipos de ensaio que seguem rigorosamente o que determina a norma, especificando as fases de ajustes dos equipamentos e ensaio do sistema ESE e sua cablagem, os quais são avaliados constantemente e, caso seja necessário, é emitida uma nova revisão. Os dados de resultados apresentados pelo laboratório, dependendo do tipo de ensaio, podem ser fornecidos em gráficos ou em tabelas, mas se o sistema funcionou ou não adequadamente somente o projetista pode declarar.

3.1 Ensaio de emissão conduzida CE102

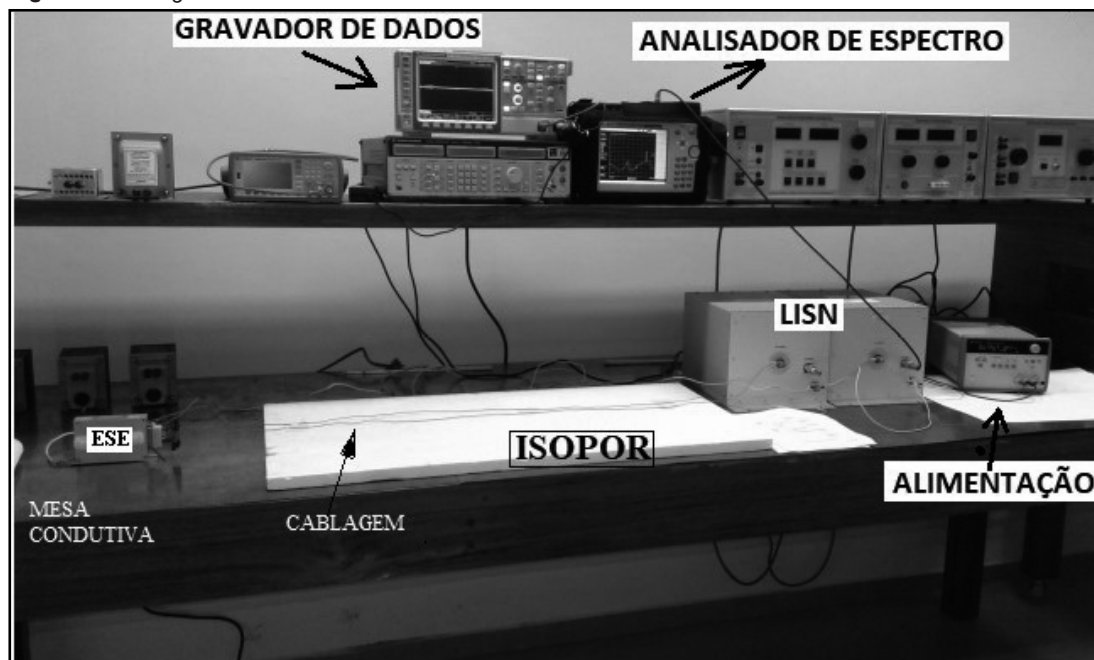
Para esse tipo de ensaio, a primeira fase é chamada de calibração, segundo a norma em que é feita a verificação e o ajuste somente dos equipamentos, sem o ESE, conforme os níveis especificados nessa norma varrendo-se a faixa de frequência de 10 kHz a 10 MHz. A segunda fase já com os equipamentos ajustados e que utiliza o ESE é o ensaio por meio do qual é observado esse tipo de emissão conduzida. A montagem representativa para esse ensaio em laboratório é descrita na Figura 1 e os equipamentos utilizados nesse ensaio estão nela discriminados.

Este ensaio verificou os sinais de emissões eletromagnéticas conduzidas por meio dos cabos de alimentação de energia do ESE, ou seja, avaliou o sinal que interfere nesse equipamento com relação ao limite aceitável pela norma e que foi ajustado na primeira fase. Incluiu, também, os cabos de retorno e aqueles que são fontes de outros equipamentos que não formam parte do ESE, mas que nele deveriam influenciar. ESE, LISN e equipamentos estão dispostos em parte condutiva da mesa de teste. A cablagem está sob material isolante, no caso isopor.

A Figura 2 apresenta o resultado medido do nível de sinal ruidoso (amplitude do sinal em decibéis micro Volts - dBuV) no ESE, comparado ao limite estabelecido pela norma na faixa de frequência especificada.

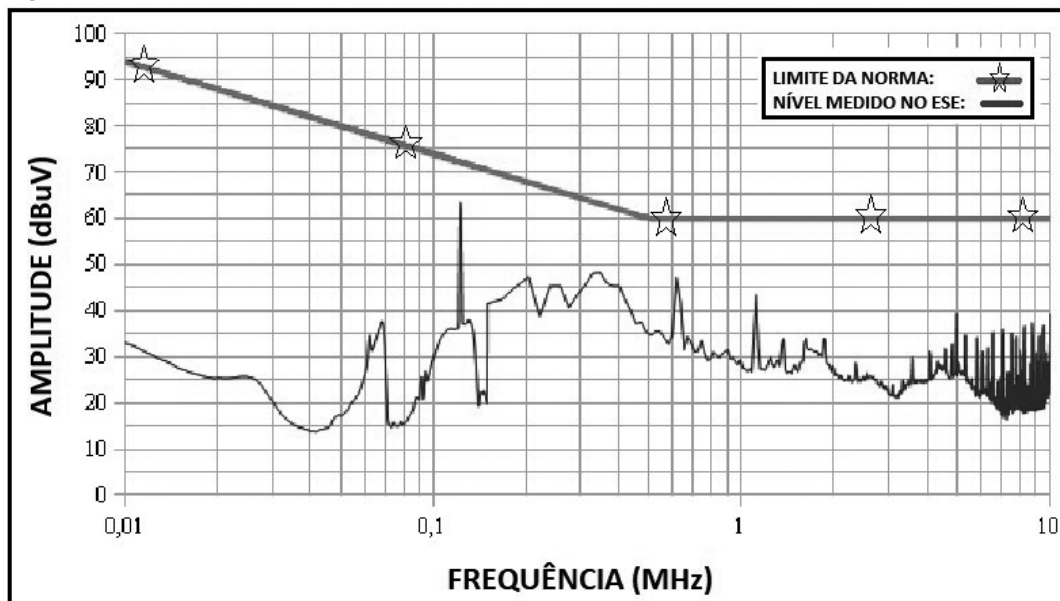
As distâncias de cablagens, equipamentos e do sistema ESE em geral seguem os padrões da norma, mas não estão indicados na montagem da Figura 1.

Figura 1 - Montagem em laboratório de ensaio de CE-102.



Fonte: Laboratório de ensaios eletromagnéticos DCTA/IFI/CMA.

Figura 2 - Modelo de resultado obtido do ensaio de emissão conduzida sobre o ESE.



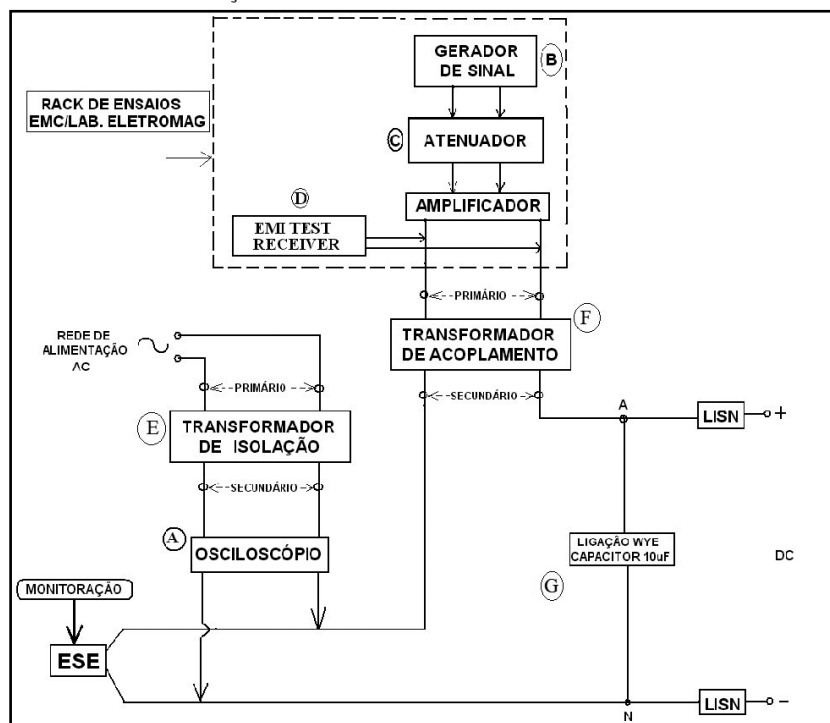
Fonte: Laboratório de ensaios eletromagnéticos DCTA/IFI/CMA.

3.2 Ensaio de susceptibilidade conduzida CS101

Para esse tipo de ensaio, a primeira fase é chamada de calibração, segundo a norma em que é feita a verificação e ajuste somente dos equipamentos, sem o ESE, conforme os níveis especificados nessa norma varrendo-se a faixa de frequência de 30 Hz a 150 kHz. A segunda fase, já com

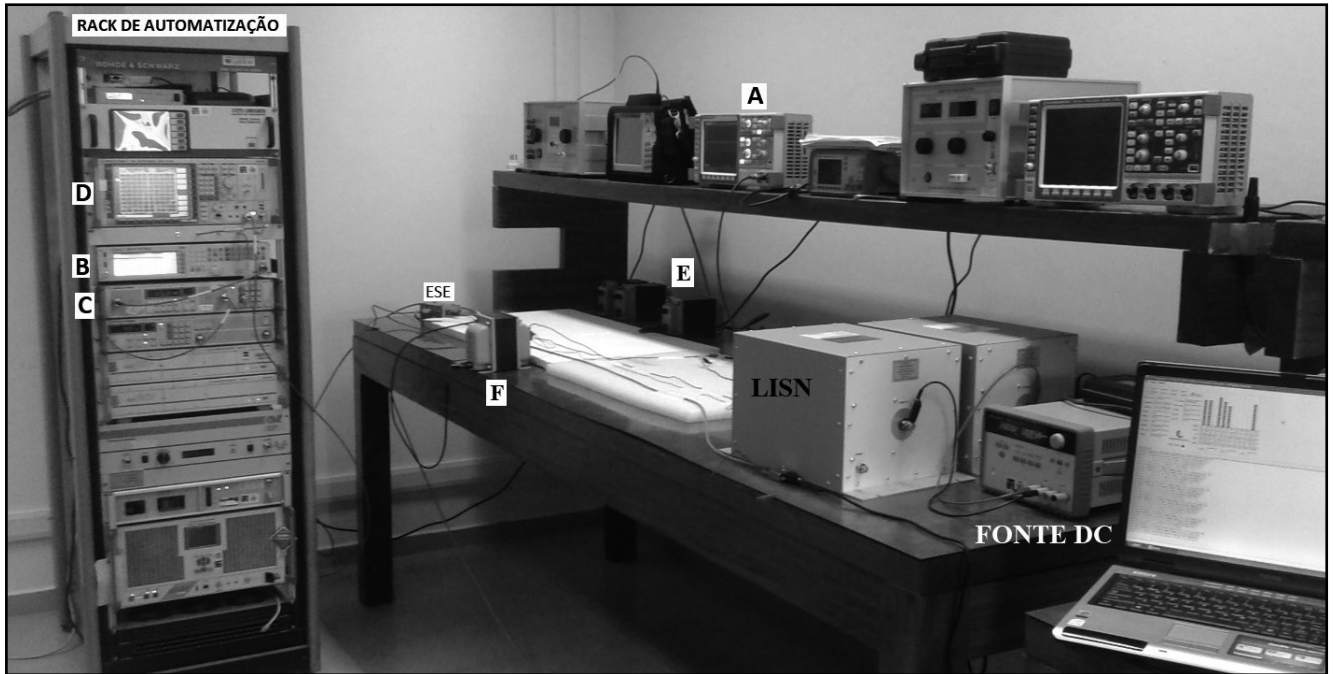
os equipamentos ajustados e que utiliza o ESE, é a de ensaio em que será observado esse tipo de susceptibilidade conduzida. Nesse caso é feita a varredura desse nível de sinal nos cabos de alimentação de energia elétrica do ESE na faixa de frequência da primeira fase. A representação e a montagem para esse ensaio com automatização em rack do laboratório são descritos nas Figuras 3 e 4.

Figura 3 - Diagrama do esquema de montagem com Rack portátil do laboratório para ensaio com automatização de CS-101.



Fonte: Laboratório de ensaios eletromagnéticos DCTA/IFI/CMA.

Figura 4 - Montagem em laboratório de ensaio de CS-101 com ESE e sua cablagem.



Fonte: Laboratório de ensaios eletromagnéticos DCTA/IFI/CMA com o rack de automatização.

O laboratório do IFI possui e desenvolveu um *rack* portátil de automatização, onde estão montados e integrados os equipamentos necessários para esses tipos de ensaios. Esses equipamentos funcionam de forma automática, controlados e programados por *software* para executar cada tipo de ensaio característico conforme a norma. As cablagens para ensaio interligam o ESE e a LISN. Os equipamentos utilizados para esse tipo de ensaio estão representados pelas letras A, B, C, D, E, F e G respectivamente. O capacitor G que não aparece na Figura 4, está ligado à fase positiva de alimentação do ESE sendo acoplado na saída da LISN. O amplificador está acoplado à saída do gerador de sinal no rack de automatização.

Os outros estão apenas sobre a bancada e serão utilizados conforme o tipo de teste. ESE, LISN e equipamentos estão dispostos em parte condutiva da mesa de teste. A cablagem está sob material isolante, um isopor. As distâncias de cablagens, equipamentos e do sistema ESE seguem os padrões da norma, mas não estão indicados na montagem da Figura 4.

Durante o ensaio é monitorado constantemente o funcionamento do sistema, sendo registrada qualquer anomalia ou não pelo projetista.

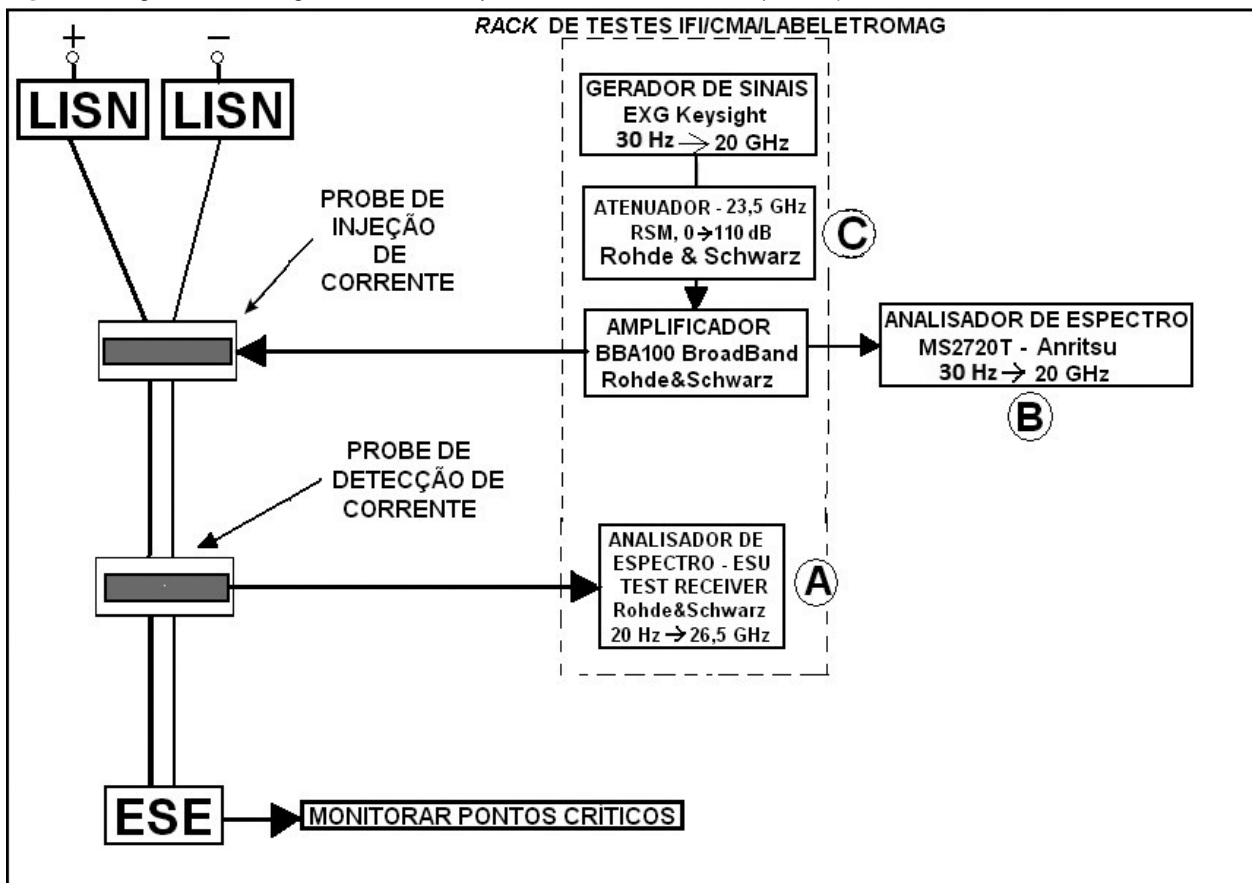
3.3 Ensaio de susceptibilidade conduzida CS114

Para esse tipo de ensaio, a primeira fase é chamada de calibração, segundo a norma para características de projeto da FAB e Espacial, em que é feita a verificação e o ajuste somente dos equipamentos, sem o ESE, conforme os níveis especificados nessa norma, varrendo-se a faixa de frequência de 10 kHz a 200 MHz. A segunda fase, já com os equipamentos ajustados e que utiliza o ESE, é o ensaio para que é observado esse tipo de susceptibilidade conduzida. As montagens para o ensaio automatizado com *rack* do laboratório são descritas nas Figuras 5 e 6. As cablagens para ensaio estão interligando o ESE e a LISN. Nesse ensaio são usados dois equipamentos A e B como receptores de sinal.

Após o ajuste dos equipamentos para ensaio, é feita a varredura desse nível de sinal nos cabos de alimentação e interconexão do ESE na faixa de frequência especificada. No ensaio verificou-se a capacidade do ESE em suportar sinais ruidosos acoplados aos seus cabos de interconexão e alimentação de energia elétrica.

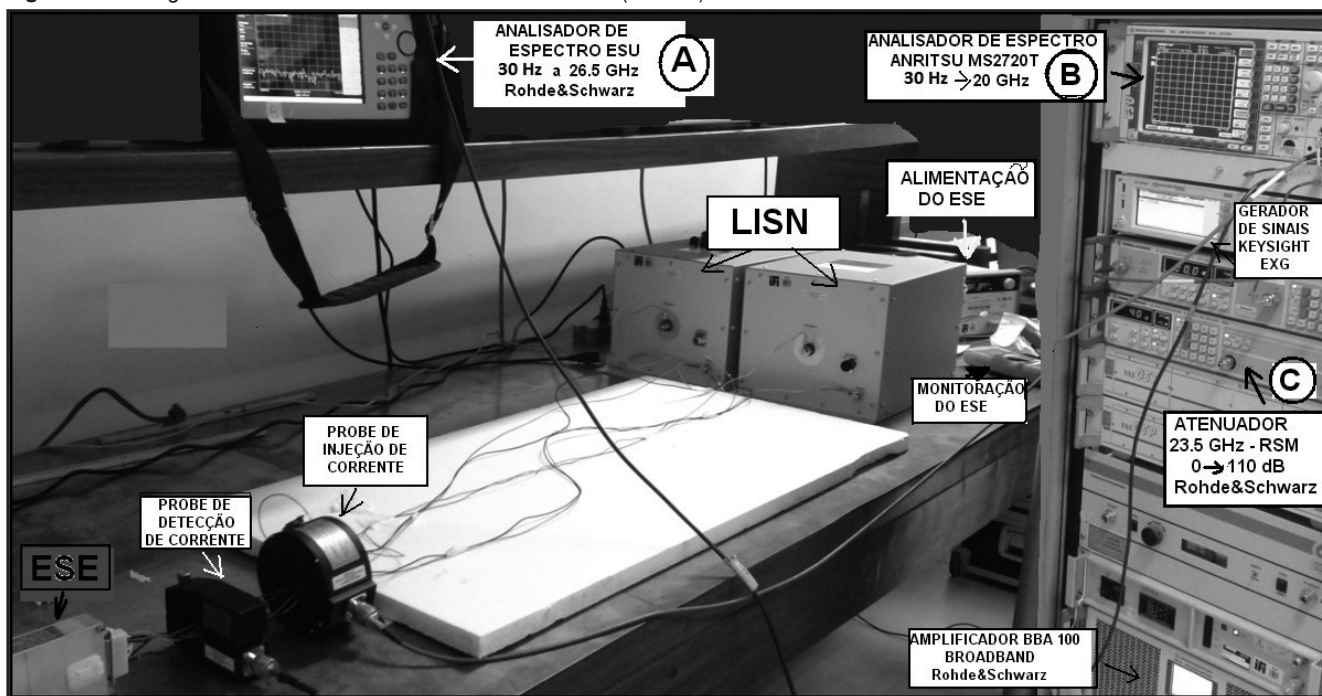
Durante o ensaio é monitorado constantemente o funcionamento do sistema, sendo registrada qualquer anomalia ou não pelo projetista.

Figura 5 - Diagrama de montagem em laboratório para ensaio automatizado de (CS-114).



Fonte: Laboratório de ensaios eletromagnéticos DCTA/IFI/CMA.

Figura 6 - Montagem em laboratório de ensaio automatizado de (CS-114).



Fonte: Laboratório de ensaios eletromagnéticos DCTA/IFI/CMA.

3.4 Ensaio de susceptibilidade conduzida CS115

Para esse tipo de ensaio, a primeira fase é chamada de calibração, segundo níveis de sinal pela norma, em que são feitas a verificação e o ajuste somente dos equipamentos, sem o ESE. Na segunda fase, já com os equipamentos ajustados, injetam-se os sinais pulsados nos cabos de alimentação ou de sinais de dados do ESE, onde será observado esse tipo de susceptibilidade conduzida. A montagem para o ensaio é descrita na Figura 7. O equipamento A é a probe de injeção de sinal, o B é a de medição, C é um atenuador de sinal para não danificar o osciloscópio e D são os espaçadores de 5 cm. As cablagens para ensaio estão interligando o ESE e a LISN. Os outros equipamentos não discriminados apenas estão sobre a bancada e alguns são de sinal de alimentação do ESE.

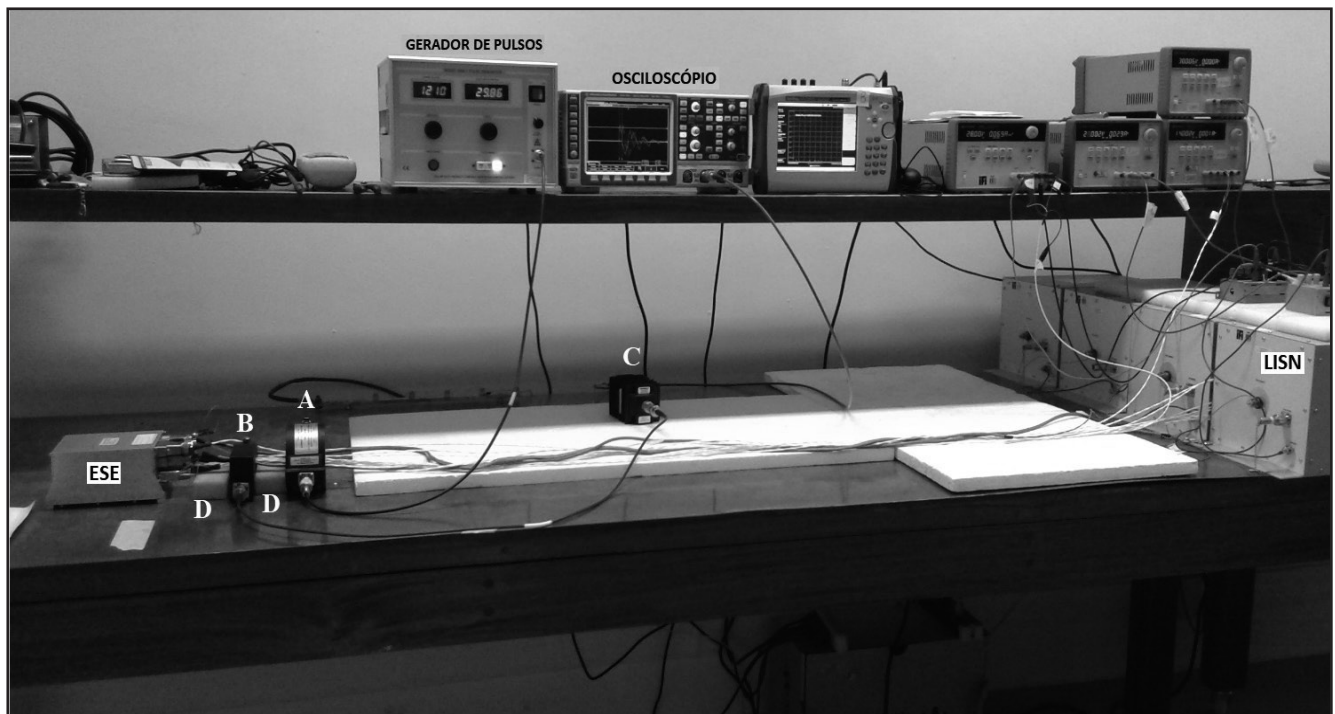
O ensaio verifica a capacidade do ESE em suportar impulso de sinais de interferência acoplados aos seus cabos de alimentação de energia elétrica, de dados ou dos sistemas aterrados de seus cabos de interconexão. Durante o ensaio é monitorado constantemente o funcionamento do sistema, sendo registrada qualquer anomalia ou não pelo projetista.

3.5 Ensaio de susceptibilidade conduzida CS116

Para esse tipo de ensaio, a primeira fase é chamada de calibração, segundo níveis de sinal pela norma, em que são feitas a verificação e o ajuste somente dos equipamentos, sem o ESE. Na segunda fase, já com os equipamentos ajustados, injeta-se esse sinal de corrente elétrica pulsada transiente senoidal amortecido, na faixa de frequência de 10 kHz a 100 MHz, nos cabos de alimentação de energia ou de sinais de dados do ESE onde será observado esse tipo de susceptibilidade conduzida. A montagem em laboratório para o ensaio é descrita na Figura 8. As cablagens para ensaio interligam-se o ESE e a LISN. Os espaçadores de 5 cm estão representados por A, o equipamento B é a probe de medição e C é a probe de injeção de sinal. Os outros equipamentos não discriminados apenas estão sobre a bancada. Não fazem parte desse ensaio.

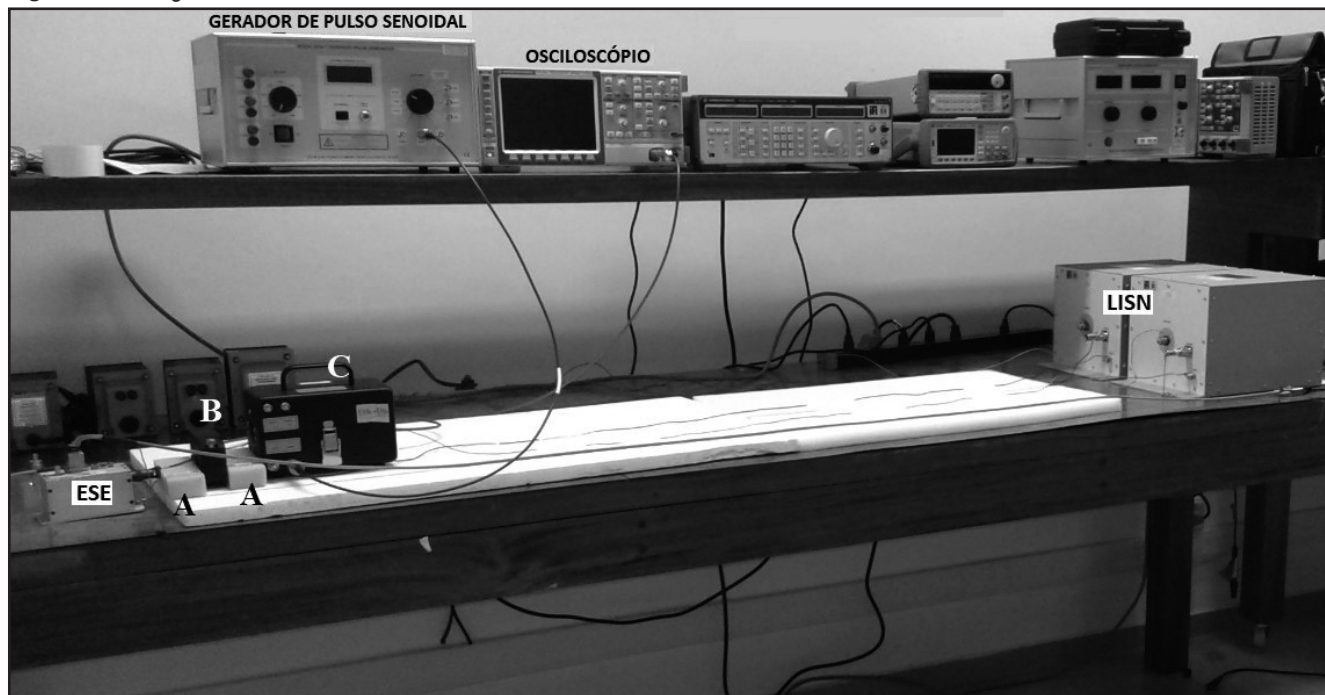
O ensaio verifica a capacidade do ESE em suportar esses sinais de interferência acoplados em seus cabos de alimentação de energia elétrica ou de sinais de dados na faixa de frequência especificada. Durante o ensaio é monitorado constantemente o funcionamento do sistema, sendo registrada qualquer anomalia ou não pelo projetista.

Figura 7 - Montagem em laboratório de ensaio CS115.



Fonte: Laboratório de ensaios eletromagnéticos DCTA/IFI/CMA.

Figura 8 - Montagem em laboratório de ensaio CS-116.



Fonte: Laboratório de ensaios eletromagnéticos DCTA/IFI/CMA.

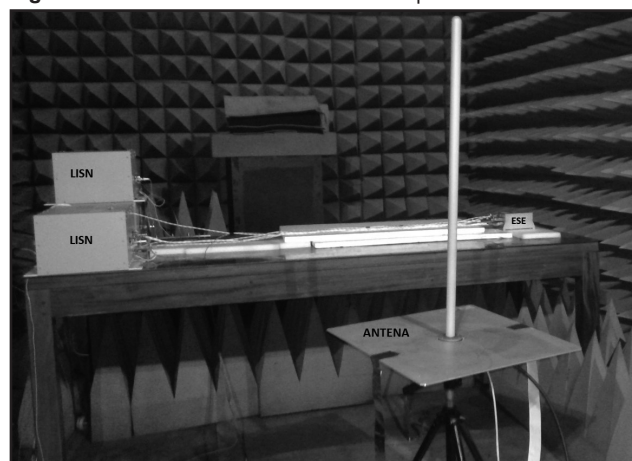
3.6 Ensaio de emissão irradiada RE102

Na primeira fase desse tipo de ensaio, chamada de calibração pela norma, são efetuados os ajustes e a verificação dos equipamentos e das antenas, segundo limites de intensidade de campo elétrico (amplitude em decibéis microvolts por metro - dBuV/m) aceitáveis pela norma. Nessa fase posicionam-se as antenas ROD, BICONILOG e DOUBLE RIDGE HORN, conforme a sua faixa de frequência entre 10 kHz a 18 GHz, a um metro de distância do ESE ou de suas cablagens e altura do solo de 1,20 m.

Na segunda fase de ensaio, com o equipamento ESE funcionando normalmente, mede-se a intensidade de campo elétrico irradiado em dBuV/m por esse sistema constituído pelo ESE e por suas cablagens. Esses níveis de emissão produzem efeitos de sinais ruidosos e devem estar entre os limites estabelecidos em norma e ajustados na primeira fase. Dependendo da complexidade desse sistema e tamanho de sua cablagem, esse ensaio pode ser repetido várias vezes até cobrir todo o ângulo de abrangência das antenas. As configurações das montagens para o ensaio em laboratório são descritas na Figura 9 de 10 kHz a 30 MHz, na Figura 10 de 30 MHz a 200 MHz e na Figura 11 de 200 MHz a 18 GHz, respectivamente. As cablagens para ensaio interligam o ESE e a LISN e estão sobre o isopor.

Esse tipo de ensaio foi realizado no interior da câmara anecóica do laboratório do IFI que possui absorvedores de EMI, justamente para garantir que os sinais eletromagnéticos, presentes nesse *setup*, são apenas os provenientes do sistema ESE mais cablagem e que

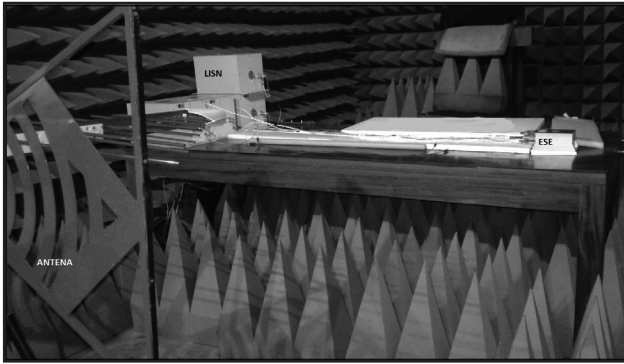
Figura 9 - Posicionamento da antena ROD para ensaio de RE-102.



Fonte: Laboratório de ensaios eletromagnéticos DCTA/IFI/CMA.

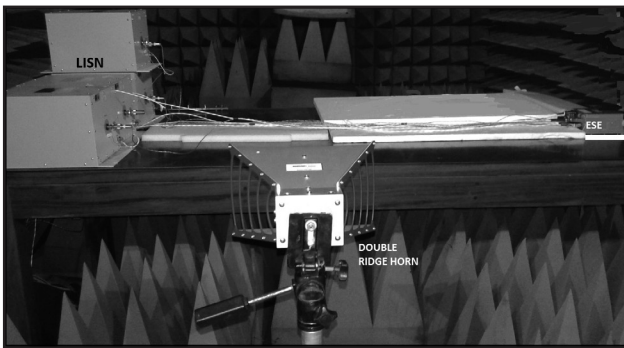
são medidos pelas antenas em seu interior. Os outros equipamentos que fazem parte do sistema de medição das antenas estão dispostos na parte exterior da câmara e estão montados segundo o *rack* de automatização portátil do IFI, conforme exibido na Figura 4. Durante o ensaio é monitorado constantemente o funcionamento do ESE, varrendo-se as faixas de frequência estabelecidas. Parte do resultado da medida dos níveis de emissão irradiados do ESE, comparados com os níveis aceitáveis pela norma, são apresentados na Figura 12. A faixa de frequência apresentada está entre 1GHz e 18 GHz em polarização horizontal com o nível de amplitude de sinal irradiado de campo elétrico em dBuV/m.

Figura 10 - Posicionamento da antena BICONILOG para ensaio de RE-102.



Fonte: Laboratório de ensaios eletromagnéticos DCTA/IFI/CMA.

Figura 11 - Posicionamento da antena DOUBLE RIDGE HORN para ensaio de RE-102.



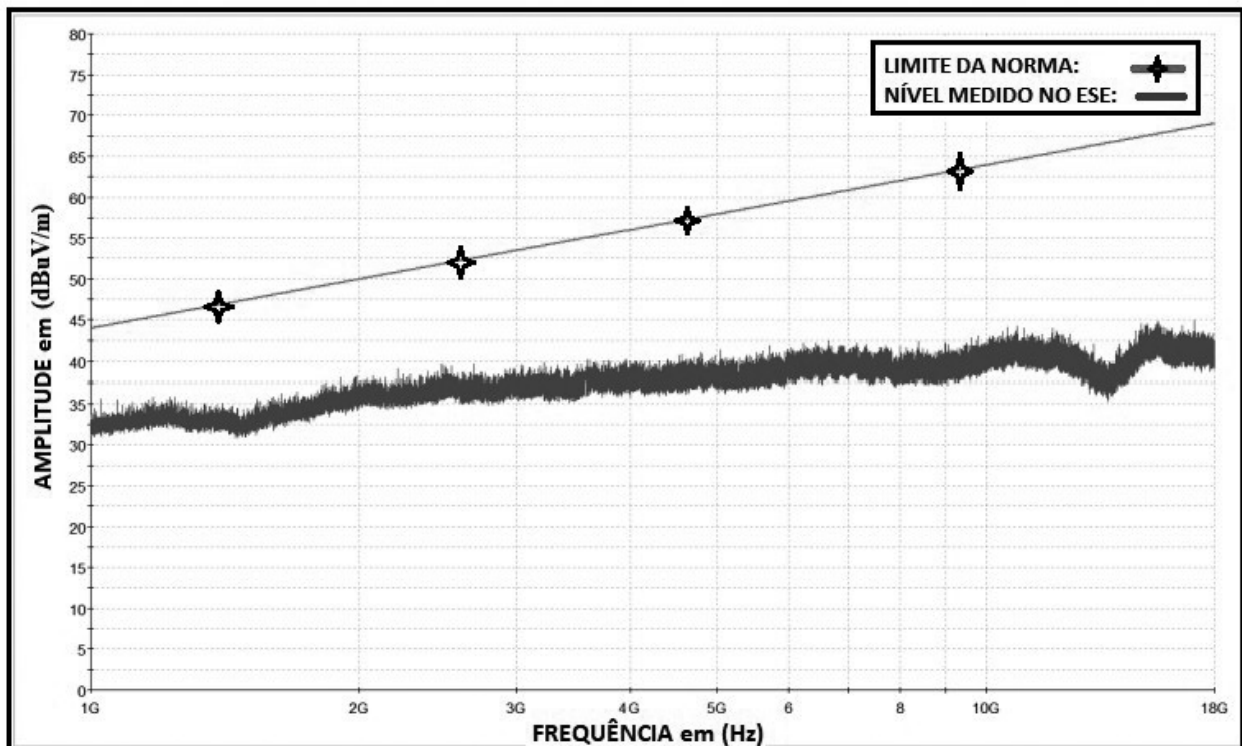
Fonte: Laboratório de ensaios eletromagnéticos DCTA/IFI/CMA.

3.7 Ensaio de susceptibilidade irradiada RS103

Na primeira fase desse tipo de ensaio, também chamada de calibração pela norma, são feitos o ajuste e a verificação dos equipamentos e das antenas, segundo limites de intensidade de campo elétrico (amplitude em decibéis microvolts por metro - dBuV/m) aceitáveis pela norma. Nessa fase posicionam-se as antenas ROD, BICONILOG e DOUBLE RIDGE HORN, conforme a sua faixa de frequência entre 10 kHz e 18 GHz, a um metro de distância do ESE ou de suas cablagens e altura do solo de 1,20 m.

Esse ensaio é semelhante ao RE102, no entanto, somente agora as antenas irradiam um sinal ruidoso de campo elétrico, ajustado, inicialmente, sobre o sistema ESE e cablagem. Esse sinal é monitorado constantemente por um sensor de intensidade de campo elétrico, posicionado o mais próximo possível desse sistema. A intensidade de campo elétrico é de 20 Volts por metro, especificada em norma para projetos espaciais. As configurações das montagens para o ensaio em laboratório são descritas na Figura 13 de 10 kHz a 30 MHz, na Figura 14 de 30 MHz a 200 MHz e na Figura 15 de 200 MHz a 18 GHz, respectivamente.

Figura 12 - Modelo de resultado obtido do ensaio de RE102 no ESE.



Fonte: Laboratório de ensaios eletromagnéticos DCTA/IFI/CMA.

Figura 13 - Antena ROD para ensaio de RS-103 executado em laboratório.



Fonte: Laboratório de ensaios eletromagnéticos DCTA/IFI/CMA.

Esse tipo de ensaio foi realizado no interior da câmara anecoica do laboratório do IFI, que possui absorvedores de EMI justamente para garantir que os sinais eletromagnéticos, no caso o campo elétrico, gerados e irradiados sobre essa montagem do sistema ESE mais cablagem sejam apenas os provenientes das antenas em seu interior. Os outros equipamentos que fazem parte do sistema de geração de sinal para as antenas e medição de sinal do sensor de campo elétrico foram dispostos na parte exterior da câmara e estão montados segundo o *rack* de automatização portátil do IFI conforme exibido na Figura 4.

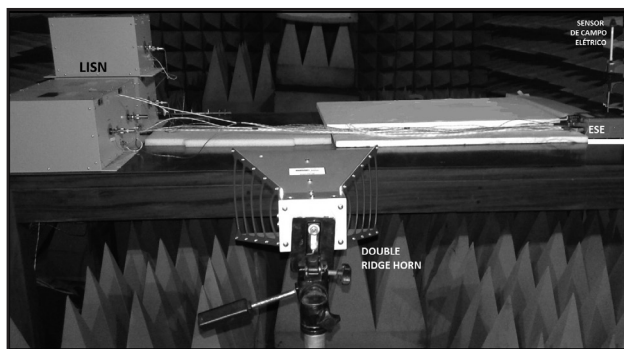
Figura 14 - Antena BICONILOG para ensaio de RS-103 executado em laboratório.



Fonte: Laboratório de ensaios eletromagnéticos DCTA/IFI/CMA.

Durante o ensaio é monitorado constantemente o funcionamento do sistema, sendo registrada qualquer anomalia ou não pelo projetista.

Figura 15 - Antena DOUBLE RIDGE HORN para ensaio de RS-103, executado em laboratório.



Fonte: Laboratório de ensaios eletromagnéticos DCTA/IFI/CMA.

4 CONCLUSÃO

Neste artigo apresentam-se os ensaios de compatibilidade eletromagnética EMC em um sistema desenvolvido na área aeroespacial de tecnologia de defesa do Comando da Aeronáutica, para o Instituto Aeroespacial, IAE, tendo-se principalmente como referência o requisito técnico MIL-STD-461 de padrão americano, com a sua revisão G.

O Laboratório de Ensaios Eletromagnéticos (Labeletromag) da Divisão de Confiabilidade Metrológica, CMA, no Instituto de Fomento e Coordenação Industrial, IFI, do Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial DCTA, em São José dos Campos (SP), encontra-se implantado, em fase de automatização, mas já executa esses tipos de serviços técnico-especializados de ensaios de EMC em emissões ou susceptibilidades conduzidas, (CE) e (CS), e emissões ou susceptibilidades irradiadas, (RE) e (RS), em nível de desenvolvimento de produto, para atender projetos na área aeroespacial de tecnologia de defesa do Comando da Aeronáutica.

Serviço que pode, logicamente, estender-se a outras instituições militares do Ministério da Defesa, indústrias civis no setor aeroespacial, estabelecimentos de ensino e pesquisa. Esse tipo de prestação de serviço inovador, nesta área no IFI e para o Comando da Aeronáutica, já executou ensaios para um projeto de armamento da Marinha e tem o Exército também em parceria. O laboratório disponibilizou parceria, a nível de desenvolvimento, para projetos de aviação militar ou civil da EMBRAER, visto que seus ensaios de desenvolvimento e certificação são executados quase que totalmente no exterior.

A norma seguida pela aviação civil, sendo a principal a RTCA/DO-160, Revisão G, por meio das seções 18 até 23, pode ser executada grande parte nesse laboratório. No Brasil o principal laboratório que tem conseguido atender esse tipo de serviço tem sido o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), mas, com a grande procura de seus serviços pela indústria nacional automobilística, a espera para a execução dos ensaios acaba comprometida por outros setores das áreas militar ou civil aeroespaciais de pesquisa e desenvolvimento.

Esse tipo de serviço técnico oferecido é de grande importância para autonomia e desenvolvimento do país, uma vez que grande parte desse serviço é executado no exterior. O laboratório também dispõe de uma câmara de reverberação em funcionamento, para executar ensaios de susceptibilidade irradiada, sendo a única no país. Com a implantação do Labeletromag no IFI, uma alternativa tem sido oferecida para atender essa demanda de serviço no Brasil.

REFERÊNCIAS

AR, RF/Microwave Instrumentation. Disponível em: <http://www.arworld.us>. Acesso em: 12 set. 2018.

DEPARTMENT OF DEFENSE INTERFACE STANDARD, **Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment**, MIL-STD-461, Rev. G, Washington, DC, 2007.

EMC 2018 Testing Guide. **Interference Technology Guide Series**. Disponível em: <http://www.interferencetechnology.com>. Acesso em: 14 nov. 2018.

ETS.LINDGREN COMPANY. **EMC Test and Measurement**, Disponível em: <http://www.ets-lindgren.com>. Acesso em: 20 Set. 2018.

FISHER, F. A.; PLUMER, J. A.; PERALA, R. A. **Lightning protection of aircraft**. 3. ed. Pittsfield, MA: Lightning Technologies Inc., 1990.

FISHER, F. A.; PLUMER, J. A. **Lightning protection of aircraft**. National Aeronautics and Space Administration. NASA Reference Publication N° 1008, Washington, DC, 1977.

KEYSIGHT TECHNOLOGIES, **EMC Teste e**

Medição, Disponível em: <http://www.keysight.com/br>. Acesso em: 16 ago. 2018.

MILITARY & AEROSPACE EMC 2018 Guide. **Interference Technology Guide Series**, Disponível em: <http://www.interferencetechnology.com>. Acesso em: 17 out. 2018.

MORGAN, D. A Handbook for EMC Testing and Measurement, **IET Electrical Measurement Series 8**, 2007.

RADIO TECHNICAL COMMISSION FOR AERONAUTICS. **Environmental conditions and test procedures for airborne equipment**. RTCA / DO-160, rev. G, Washington, DC, 2010.

ROHDE & SCHWARZ GmbH & Co. KG. **EMC Teste e Medição**. Disponível em: <http://www.rohde-schwarz.com/br>.

SOLAR ELECTRONICS COMPANY. **Equipments for EMI**. Disponível em: <http://www.solar-emc.com>. Acesso em: 18 set. 2018.

USER TEST PLANNING GUIDE. **Electromagnetic Interference/Compatibility (EMI/EMC) – Control Test and Measurement Facility**, NASA-Lyndon B. Johnson Space Center, Houston, Texas, 2016.