

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC
ENGENHARIA DE INFORMAÇÃO

NICOLAS SOUZA LOPES

EFEITOS E BLINDAGEM DE PULSOS ELETROMAGNÉTICOS
NA INFRAESTRUTURA CRÍTICA

Monografia

SANTO ANDRÉ - SP
2017

Nicolas Souza Lopes

**EFEITOS E BLINDAGEM DE PULSOS ELETROMAGNÉTICOS NA
INFRAESTRUTURA CRÍTICA**

Monografia

Monografia apresentada ao curso de graduação da Universidade Federal do ABC como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro de Informação.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Bender Perotoni

SANTO ANDRÉ - SP
2017

Nicolas Souza Lopes

EFEITOS E BLINDAGEM DE PULSOS ELETROMAGNÉTICOS NA INFRAESTRUTURA CRÍTICA / Nicolas Souza Lopes – Santo André, SP 2017

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Bender Perotoni

74. p

Trabalho de Graduação – Universidade Federal do ABC – UFABC, 2017.

1. Interferência eletromagnética. 2. Eletromagnetismo computacional. 3. Eletromagnetismo aplicado. 4. Blindagem eletromagnética. I. Marcelo Bender Perotoni. II. Universidade Federal do ABC. III. Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas. IV. Efeitos e Blindagem de Pulsos Eletromagnéticos na Infraestrutura Crítica.

RESUMO

Este trabalho de graduação estuda os efeitos de pulsos eletromagnéticos na infraestrutura crítica e mecanismos de blindagem para a atenuação de tais efeitos. Inicialmente foi realizada uma revisão e contextualização histórica e científica dos efeitos da interferência eletromagnética em dispositivos eletrônicos e outros elementos de infraestrutura. Um modelo de linhas de transmissão infinito foi simulado para a verificação quantitativa dos efeitos causados por uma onda HEMP E1. Observou-se um acoplamento de até 30 kV tanto nas linhas, quanto próximo ao solo, sendo a faixa mais crítica até 1 MHz. Finalmente, foram simulados diversos mecanismos de blindagem a fim de verificar a eficiência de blindagem para diferentes geometrias e materiais. Paineis finos maciços exibiram a maior blindagem (até 160 dB), sendo tal valor reduzido na presença de elementos práticos como aberturas de ventilação e fios.

Palavras-chave: eletromagnetismo aplicado, eletromagnetismo computacional, blindagem eletromagnética, interferência eletromagnética.

ABSTRACT

This graduation work studies the effects of electromagnetic pulses on the critical infrastructure and shielding mechanisms for the attenuation of these effects. Firstly, a historic and scientific revision and contextualization of the electromagnetic interference effects on electronic devices and other infrastructure elements was made. An infinite transmission line model was simulated to verify on a quantitative basis the effects of a HEMP E1 wave. Coupling of up to 30 kV was observed on the lines and next to the ground, being the most critical band up to 1 MHz. Finally, several shielding mechanisms were simulated in order to verify the shielding effectiveness for different geometries and materials. Solid thin panels exhibited the greatest shielding (up to 160 dB), being such value reduced in the presence of practical elements such as ventilation and wire openings.

Keywords: applied electromagnetics, computational electromagnetics, electromagnetic shielding, electromagnetic interference.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IOT	<i>Internet of Things</i>
EMI	<i>Electromagnetic Interference</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
HPM	<i>High Power Microwaves</i>
SDCWA	<i>San Diego County Water Authority</i>
SDGE	<i>San Diego Gas and Electric</i>
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
FDA	<i>Food and Drug Administration</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
SWS	<i>Slow Wave Structures</i>
CRM	<i>Cyclotron Resonance Maser</i>
FCG	<i>Flux Compression Generator</i>
HEMP	<i>High-Altitude Electromagnetic Pulse</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
SE	<i>Shield Effectiveness</i>
CST	<i>Computer Simulation Technology AG</i>
EMC	<i>Electromagnetic Compatibility</i>
ICBM	<i>Intercontinental Ballistic Missile</i>
PEC	<i>Perfect Electric Conductor</i>
TLM	<i>Transmission Line Matrix</i>

ONU	<i>Organização das Nações Unidas</i>
ECM	<i>Electronic Countermeasures</i>
WBC	<i>Waveguide Below Cutoff</i>
FDTD	<i>Finite Difference Time Domain</i>
FIT	<i>Finite Integration Technique</i>
EMP	<i>Electromagnetic Pulse</i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Consumo de eletricidade per capita nos Estados Unidos, de 1960 a 2012 [3]	1
Figura 2 – Predição de dispositivos IOT até 2020 [5].....	2
Figura 3 – Exemplos de EMI [9].....	5
Figura 4 - Estruturas de ondas lentas [26]	11
Figura 5 - Dispositivo Gyrotron [28].....	12
Figura 6 - Dispositivo Vircator [30].....	12
Figura 7 - Dispositivo FCG [32].....	13
Figura 8 - Os três estágios de um HEMP	15
Figura 9 - Resposta em frequência do estágio E1	16
Figura 10 - Área atingida pelo EMP em diferentes altitudes de detonação [41].....	17
Figura 11 - Resposta em frequência do estágio E2	18
Figura 12 - Resposta em frequência do estágio E3	19
Figura 13 - Exemplos de atenuação elétrica e magnética para vários tipos de blindagem [43]....	22
Figura 14 - Defeitos em um invólucro de blindagem eletromagnética [43].....	26
Figura 15 - Configuração WBC [45].....	27
Figura 16 - Nó e malha TLM [48].....	29
Figura 17 - Aplicações do software CST Studio Suite® [48]	31
Figura 18 - Simulação de EMC: Vazamento de corrente em um conector Ethernet [48].....	32
Figura 19 - Modelo 3D do poste e linha trifásica.....	34
Figura 20 - Campo elétrico em 6 ns	35
Figura 21 - Campo elétrico em 36 ns	35
Figura 22 - Campo elétrico em 187 ns	36
Figura 23 - Corrente normalizada na linha.....	37
Figura 24 - Setup para simulação de um painel fino	38
Figura 25 - Onda HEMP E1	39
Figura 26 - Eficiência de blindagem de um painel de prata	40
Figura 27 - Eficiência de blindagem de um painel de cobre	40
Figura 28 - Eficiência de blindagem de um painel de alumínio.....	41
Figura 29 - Eficiência de blindagem de um painel de bronze	41
Figura 30 - Eficiência de blindagem de um painel de aço inoxidável.....	42
Figura 31 - Eficiência de blindagem para diferentes materiais	43
Figura 32 - Painel com abertura simulado.....	44
Figura 33 - Painel de cobre com abertura circular.....	45
Figura 34 - Campo elétrico - Painel sem abertura	46
Figura 35 - Campo elétrico - Painel com abertura ($r = 5$ cm)	46
Figura 36 - Painel com WBC utilizado nas simulações	47
Figura 37 - Blindagem de um dispositivo WBC de cobre.....	48
Figura 38 - Blindagem de um WBC em 500 MHz.....	49
Figura 39 - Campo elétrico em 1 GHz em um painel com abertura circular	50

Figura 40 - Campo elétrico em 1 GHz em um painel com WBC de profundidade 0.05 m	50
Figura 41 - Campo elétrico em 1 GHz em um painel com WBC de profundidade 0.1 m	50
Figura 42 - Campo elétrico em 1 GHz em um painel com WBC de profundidade 0.2 m	51
Figura 43 - Painel de cobre perfeitamente selado com dois fios	52
Figura 44 - SE de um painel perfeitamente selado com dois fios	52
Figura 45 - Campo elétrico no painel selado e com fios	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relatos de problemas de EMI em equipamentos médicos [17]	8
Tabela 2 - Modelo matemático para os estágios E1 e E2	15
Tabela 3 - Modelo matemático para o estágio E3	15
Tabela 4 - Materiais utilizados nas simulações [44].....	39
Tabela 5 - Comparação da blindagem de um WBC simulada e teórica	49

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa	3
1.2 Objetivos	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 EMI (Interferência Eletromagnética).....	5
2.1.1 EMI Não-Intencional.....	6
2.1.1.1 Tempestades Geomagnéticas	6
2.1.1.2 Raios.....	7
2.1.1.3 Vulnerabilidade à EMI Não-Intencional	7
2.1.2 EMI Intencional.....	9
2.1.2.1 HPM (Micro-Ondas de Alta Potência).....	10
2.1.2.2 HEMP (Pulso Eletromagnético de Alta Altitude).....	13
2.1.2.3 Vulnerabilidade à EMI Intencional	19
2.2 Blindagem Eletromagnética.....	21
2.2.1 Eficiência de Blindagem (SE)	22
2.2.2 Degradação da SE.....	25
2.3 Eletromagnetismo Computacional.....	28
2.3.1 Métodos de Solução.....	28
2.3.1.1 FDTD (Diferenças Finitas no Domínio do Tempo)	28
2.3.1.2 TLM (Método das Linhas de Transmissão)	29
2.3.1.3 FIT (Técnica da Integração Finita).....	30
2.3.2 CST Studio Suite®	30
3. SIMULAÇÕES ELETROMAGNÉTICAS.....	33
3.1 Efeitos de Pulsos Eletromagnéticos em Linhas de Transmissão	33
3.2 Simulações de Eficiência de Blindagem.....	37
3.2.1 Painéis Finos.....	37
3.2.1.1 Painéis Finos Maciços.....	39
3.2.1.2 Painéis Finos com Abertura Circular	44
3.2.1.3 Painéis Finos com WBC	46
3.2.1.4 Painéis Finos Perfeitamente Selados com Fios	51

4. CONCLUSÃO.....	54
REFERÊNCIAS.....	55
APÊNDICE I - IMPLEMENTAÇÃO DA SOLUÇÃO EXATA DA EFICIÊNCIA DE BLINDAGEM	59

1. INTRODUÇÃO

Com o avanço da tecnologia a sociedade se torna cada vez mais dependente da eletricidade. Neste contexto, grande parte dos aspectos relacionados ao modo de vida no século XXI utilizam algum tipo de equipamento elétrico ou eletrônico – Indústria, hospitais, bancos, comunicação, alimentação e transporte são apenas alguns dos setores fundamentais onde o funcionamento e equilíbrio da sociedade dependem predominantemente da energia elétrica.

A introdução da eletricidade como fonte de alimentação e iluminação data da segunda revolução industrial, quando em 1879 foi realizada a primeira instalação elétrica de iluminação pública em Newcastle Upon Tyne, Reino Unido [1]. A utilização da eletricidade foi tão aclamada pelos cientistas e engenheiros que foi nomeada “a maior realização na área da engenharia no século XX”, pela Academia Nacional de Engenharia, dos Estados Unidos [2]. Desde então o uso da eletricidade tem apresentado um crescimento contínuo, refletindo, assim, a demanda por energia proporcionada pelo crescimento significativo do uso de eletroeletrônicos. A Figura 1 ilustra essa expansão no consumo de energia elétrica, utilizando como exemplo os Estados Unidos.

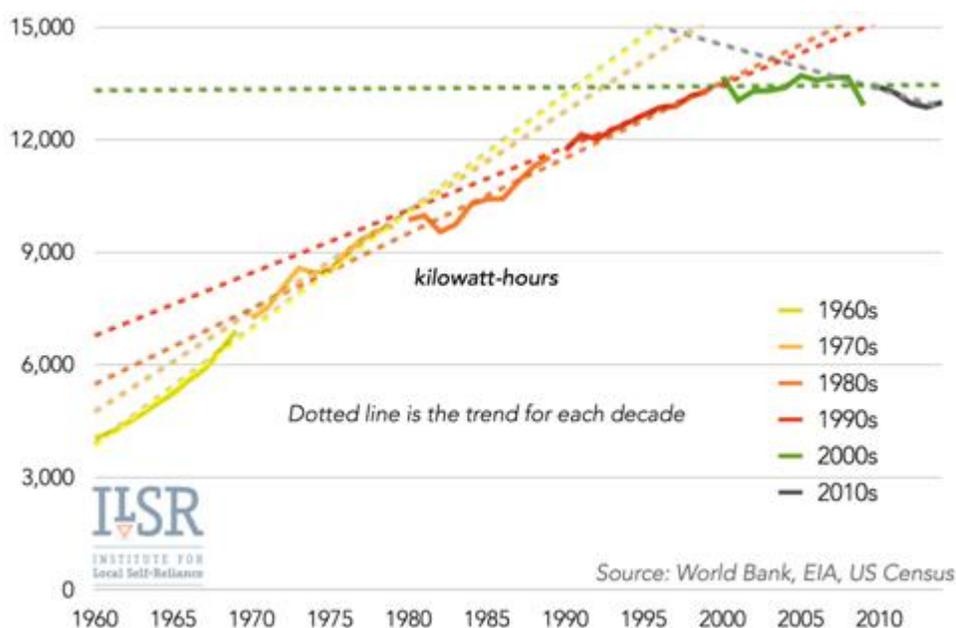


Figura 1 - Consumo de eletricidade per capita nos Estados Unidos, de 1960 a 2012 [3]

Atualmente, várias tecnologias tais como a Indústria 4.0, IOT (Internet das Coisas) e Cidades Inteligentes surgem como consequência da evolução tecnológica, em sociedades que buscam a

automação e comunicação de dispositivos e processos através da computarização industrial e doméstica. Estima-se que em 2020 o número de objetos conectados chegará a 50 bilhões [4]. A Figura 2 ilustra uma predição do uso de dispositivos conectados na internet das coisas em diversos setores.

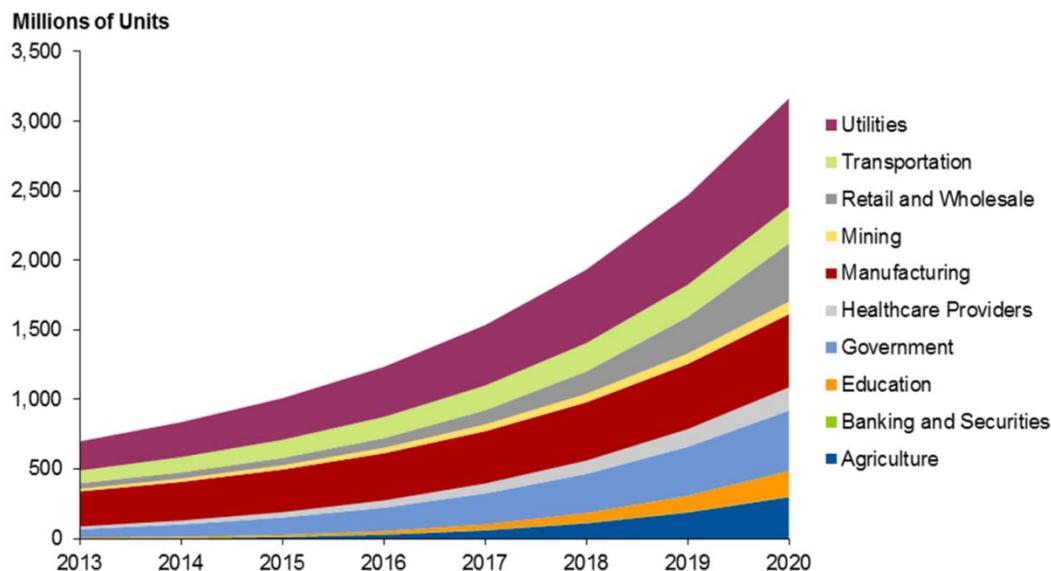


Figura 2 – Predição de dispositivos IOT até 2020 [5]

O uso massivo de equipamentos eletroeletrônicos conectados às redes de comunicação visa facilitar e melhorar a vida das pessoas. No entanto, a dependência da eletricidade pode resultar em um colapso total da sociedade caso esse recurso se torne indisponível.

Adicionalmente, equipamentos elétricos e eletrônicos estão sujeitos à interferência eletromagnética, e, dessa forma, podem ter seu desempenho degradado ou até mesmo serem destruídos devido ao acoplamento de energia eletromagnética. Tal efeito deletério de desempenho, por sua vez, pode ser gerado por diversas fontes não intencionais (raios, tempestades geomagnéticas) e intencionais (geradores de pulsos eletromagnéticos e dispositivos de micro-ondas de alta potência).

Atualmente, uma das fontes de interferência eletromagnética de maior preocupação são os HEMP (Pulso Eletromagnético de Alta Altitude) – pulsos eletromagnéticos gerados pela explosão de um artefato nuclear em altas altitudes. Esse tipo de pulso oferece um grande risco devido à sua alta potência e área de cobertura, causando danos irreparáveis e até mesmo a destruição total da rede

de energia elétrica. Isso, por sua vez, pode acarretar no desligamento de inúmeros equipamentos eletrônicos essenciais para o funcionamento da sociedade.

Portanto, é necessária a utilização de mecanismos de blindagem eletromagnética para atenuar os efeitos de acoplamento eletromagnético em estruturas críticas e evitar danos massivos na ocorrência de um ataque como esse.

1.1 Justificativa

Antigamente, realizavam-se estudos de campo envolvendo a detonação de artefatos nucleares em altas altitudes e posterior análise dos efeitos em equipamentos eletrônicos na área de cobertura do pulso para o dimensionamento de sistemas de blindagem eletromagnética contra HEMPs [6]. Atualmente, testes nucleares foram banidos no mundo todo após a ONU (Organização das Nações Unidas) estabelecer o Tratado de Interdição Completa de Ensaios Nucleares, em 1996 [7], impossibilitando a realização desses estudos. Entretanto, vê-se necessário o prosseguimento dos estudos que referem-se aos efeitos dos HEMPs gerados pela detonação de artefatos nucleares para que possam ser desenvolvidas tecnologias eficazes de blindagem contra interferência eletromagnética. O desenvolvimento dessas tecnologias é essencial na iminência de um ataque nuclear, tendo em vista a atual vulnerabilidade da infraestrutura, área de efeito de um HEMP e poder de destruição.

A existência de modelos matemáticos aceitáveis abre caminho para a utilização de simulações como uma confiável fonte de resultados. No contexto deste trabalho, será utilizado o software CST Studio Suite[®] 2016 da CST (Computer Simulation Technology AG) para a realização de simulações eletromagnéticas.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem os seguintes objetivos:

- A contextualização histórica e científica dos efeitos de pulsos eletromagnéticos de altas altitudes.
- A simulação e descrição de efeitos de pulsos eletromagnéticos do tipo HEMP E1 definido pela IEC (Comissão Eletrotécnica Internacional) em modelos aplicáveis à infraestrutura crítica.

- A simulação e descrição de metodologias convencionais de blindagem eletromagnética contra campos elétricos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 EMI (Interferência Eletromagnética)

De acordo com a ITU (União Internacional de Telecomunicações), a interferência eletromagnética é definida como o “efeito de energia indesejada causado por uma ou pela combinação da emissão, radiação ou indução na recepção em um sistema de radiocomunicação, manifestando-se através da degradação do desempenho, interpretação errada ou perda de informação que poderia ser extraída na ausência de tal energia indesejada [8].

A interferência eletromagnética está bastante presente na sociedade moderna devido a crescente utilização no uso de equipamentos eletrônicos. Os efeitos variam desde a um ruído acústico até a execução de comandos indesejados em sistemas de controle industriais e aeronaves. A Figura 3 ilustra alguns exemplos de interferência entre dispositivos.

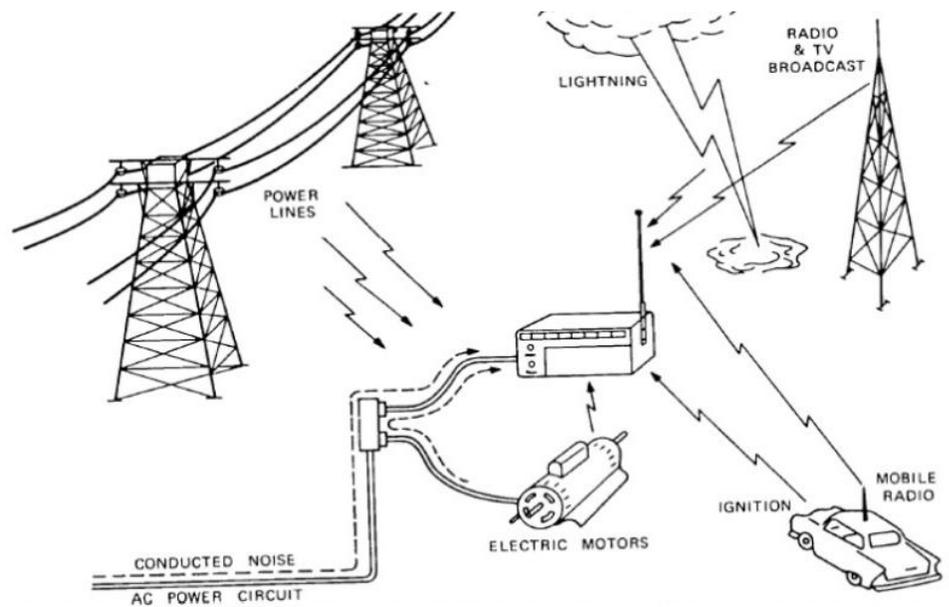


Figura 3 – Exemplos de EMI [9]

O acoplamento da energia eletromagnética pode ocorrer de quatro formas:

- **Conduutivo:** Quando há uma rota de condução, como cabos ou interconexões. Neste caso, a interferência pode ser de modo comum (em fase) ou diferencial (fora de fase).

- Capacitivo: Quando uma mudança de tensão transfere carga para outro circuito, de forma capacitiva.
- Magnético: Quando há uma indução de corrente entre dois condutores devido à presença de um campo magnético variável.
- Radiado: Quando a interferência é causada pela recepção indesejada de uma onda eletromagnética radiada por uma outra fonte.

A interferência eletromagnética pode ser gerada tanto de forma não-intencional por dispositivos eletrônicos e por fontes naturais quanto de forma intencional por meio de equipamentos de alta potência. Relacionam-se à este trabalho:

- Descargas elétricas (Raios)
- Tempestades solares
- HPM (Micro-Ondas de Alta Potência)

2.1.1 EMI Não-Intencional

A interferência eletromagnética pode ocorrer de forma não-intencional através de dois meios: Devido ao acoplamento indesejado de ondas eletromagnéticas emitidas por um dispositivo em outro e pela ocorrência de fenômenos naturais emissores de ondas eletromagnéticas.

2.1.1.1 Tempestades Geomagnéticas

Uma fonte crítica de EMI são as tempestades solares. As tempestades solares – ou tempestades geomagnéticas – são perturbações no campo geomagnético terrestre causadas por atividade solar intensa. Mudanças rápidas nesses campos em regiões extensas induzem correntes quasi-DC, que fluem principalmente nas redes de distribuição de energia elétrica [10].

As correntes geomagnéticas acopladas nas linhas de transmissão danificam transformadores, causando um apagão em larga escala. Apesar da existência de tal fenômeno e o conhecimento de seus efeitos, apenas em 2012 foi proposta uma regularização da confiabilidade e segurança da infraestrutura de energia elétrica frente à perturbações geomagnéticas [11].

2.1.1.2 Raios

No passado, o interesse por raios limitava-se aos danos físicos causados pelas correntes de pico, que podem atingir até 200 kA. Entretanto, com o advento dos circuitos integrados de baixa tensão, surgiu o interesse no estudo dos efeitos causados pelos raios em circuitos internos aos sistemas presentes em edifícios e aeronaves atingidas. Com isso, foi descoberto que o estágio de um raio mais importante neste tipo de interação é a onda gerada antes do pico [12].

O sinal gerado no estágio pré-pico produz estresse que resulta em uma tendência de resposta não-linear dos sistemas atingidos, a qual tem por consequência a degradação do desempenho e possível envio de sinais indesejados de comando.

Devido ao estudo posterior da interferência eletromagnética causada por raios, muitos sistemas possuem proteção apenas contra o surto elétrico, ocasionando perturbações eletromagnéticas em dispositivos internos e pessoas presentes no volume protegido [13].

2.1.1.3 Vulnerabilidade à EMI Não-Intencional

Mesmo com a possibilidade de ocorrência de interferência eletromagnética não-intencional por dispositivos e fontes naturais sabe-se que a preocupação referente à proteção de elementos eletrônicos que fazem parte da infraestrutura crítica de telecomunicações, bancária, hospitalar e de energia elétrica é pequena, tornando a sociedade vulnerável à interferência eletromagnética e seus efeitos devastadores. Devido à confidencialidade, não é possível estimar o quanto é investido na proteção de equipamentos elétricos e eletrônicos, porém sabe-se que existe um histórico de desastres ocasionados pela vulnerabilidade à EMI nos mais diversos setores, refletindo a criticidade da situação. A seguir, serão apresentados alguns incidentes causados pela EMI não-intencional gerada por equipamentos desenvolvidos pelo homem:

- 1999 - San Diego, Estados Unidos – Em novembro de 1999, Duas companhias – SDCWA (Autoridade da Água do Condado de San Diego) e SDGE (San Diego Gás e Eletricidade) tiveram seus sistemas SCADA (Sistema Supervisório e de Aquisição de Dados) afetados pela interferência eletromagnética causada por um radar da marinha NAVY AN/SPS 49. Essa interferência impossibilitou a abertura e fechamento de válvulas críticas de gás e

água, sendo necessário o envio de técnicos à áreas remotas para a operação das mesmas [14].

- 1980's – Países Baixos – Um sistema SCADA que controlava a válvula de uma tubulação de gás falhou causando uma grande explosão. A falha ocorreu após o acoplamento de interferência eletromagnética gerada por um radar em um relé do sistema, fazendo-o abrir e fechar a válvula na frequência de operação do radar [15].
- 1967 – Vietnã – Um radar da marinha iluminou um jato que estava aterrissando no porta-aviões, causando interferência eletromagnética e resultando no lançamento não comandado de um foguete Zuni. O foguete atingiu um outro jato no convés - totalmente carregado e abastecido - que explodiu. Como consequência, 134 marinheiros foram mortos e dano massivo foi causado no porta-aviões e na frota [16].
- 1979 – 1993 – Durante os anos de 79 e 93 a FDA (Administração Alimentícia e de Drogas) recebeu cerca de 90 relatos de degradação do desempenho de equipamentos médicos devido à problemas de interferência eletromagnética. Dentre os relatos, 6 deles resultaram em fatalidades: Uma falha em um respirador, um monitor cardíaco, um ventilador e um marca passo. A Tabela 1 mostra a relação por tipo de equipamento médico.

<u>Conducted Interference</u>	<u>No.</u>	<u>Radiated Interference</u>	<u>No.</u>	<u>Magnetic Interference</u>	<u>No.</u>	<u>ESD</u>	<u>No.</u>
Bloodcell Counter	1	Fetal Heartbeat Monitor	2	Respirator (1D)	2	Respirator	2
Blood Warmer	1	Blood Pressure Monitor	2	Defibrillator	1	Ventilator	2
Cardiac Monitor	5	Infusion Pump	2	Pacemaker	1	Infusion Pumps	2
Defibrillator	2	Pacemaker (1D)*	9	MRI Machine	1	Apnea Monitors	1
Ventilator (1D)	2	Vascular Recorder	1	Pulse Oximeter	1	Radiation Therapy Unit	1
UV Phototherapy Unit	2	Cardiac Monitor (3D)	8			Feeding Pump	1
Infant Incubators	1	Defibrillator	2			Radiant Warmer	1
Infusion Device	2	Ventilator	8				
Intra-aortic Balloon Pump	1	Neo-natal Monitor	1				
Laparoscopy System	1	Chiropractic Table	1				
Radiation Therapy Device	1	Nerve Simulator	1				
Physiological Monitor	1	Pulse Oximeter	1				
Oxygen Monitor	1	Microsurgical Drill	1				
		Radiant Warmer	1				
		Laparoscopy System	1				
		Heater/Humidifier	1				
		Blood Warmer	1				
		Telemetry Monitors	1				
		Gas Monitor	1				
		Apnea Monitor	2				
		Blood Pressure Monitor	1				
		Ultrasound Scanner	1				
		Hearing Aid	1				
		Audiometer	1				
		Incubator	1				
		Wheelchairs	3				
Totals	20		55		6		10

*(#D) = number of deaths.

Tabela 1 - Relatos de problemas de EMI em equipamentos médicos [17]

Abaixo são apresentados alguns desastres relacionados à interferência eletromagnética causada por descargas elétricas e tempestades geomagnéticas.

- 1989 – Quebec, Canadá – Uma tempestade solar causou um apagão que durou 12 horas, além de outros efeitos como a interferência de rádios europeias na Rússia [18].
- 1859 – Evento Carrington – Em 1859 ocorreu a tempestade solar mais intensa já registrada. Na época, as correntes induzidas causaram o colapso de sistemas de telégrafo na Europa e América do Norte, porém estima-se que a ocorrência de uma tempestade de tal magnitude nos dias de hoje resultaria em um dano de 2 trilhões de dólares em 10 anos de recuperação [19].
- 1987 – Área de Testes do Leste, Estados Unidos – Em março de 1987 a NASA (Aeronáutica Nacional e Administração Espacial) lançou o veículo Atlas/Centaur AC-67 em condições adversas de clima. O movimento do veículo aeroespacial – que possuía uma superfície condutiva e uma saída de exaustão ionizada – resultou na distorção das linhas de campo elétrico, aumentando o gradiente de potencial nas extremidades do veículo, o que desencadeou um raio. Esse raio causou uma perturbação em uma posição de memória aleatória na unidade de computação digital, resultando no envio de um comando que estressou o veículo e causou ruptura estrutural [20].
- 2008 – O Instituto Nacional de Segurança para Descargas Elétricas realizou uma compilação dos danos causados por raios em diversos setores nos Estados Unidos. Estima-se que, anualmente, 30% da falta de energia é causada por raios, resultando em 1 bilhão de dólares em perdas. Ressalta-se que tais eventos poderiam ser evitados caso a infraestrutura de energia elétrica possuísse algum sistema de blindagem eletromagnética (atualmente inexistente ou precário) [21].

2.1.2 EMI Intencional

A interferência eletromagnética pode ser gerada de forma intencional através do uso de equipamentos projetados para a emissão de ondas de alta potência em diversas faixas e frequências. Grande parte das aplicações da EMI intencional são militares, tanto na categoria ECM (Contra-medida Eletrônica), que tem como objetivo a redução do uso do espectro

eletromagnético de um adversário de forma destrutiva ou não [22], quanto na categoria HPM, destinadas à destruição e desativação massiva de sistemas eletrônicos vulneráveis [23].

2.1.2.1 HPM (Micro-Ondas de Alta Potência)

HPM, ou Micro-Ondas de Alta Potência, é uma categoria de equipamento utilizado para produzir interferência ou dano eletromagnético intencional com níveis de potência radiada (pico) de 100 MW ou acima [23]. Este tipo de dispositivo de feixes de elétrons gera radiação eletromagnética coerente na faixa de 300 MHz a 300 GHz. No contexto de aplicação militar e de defesa, a capacidade de direcionar o feixe de ondas apresenta-se como desejável, sendo assim possível neutralizar alvos de maneira mais inteligente. Na invasão do Iraque em 1991 foi inicialmente empregado um sistema de neutralização eletromagnética das comunicações de Saddam Hussein, que impôs assim severo dano na articulação de suas defesas [24].

A radiação de elétrons em fase depende do sincronismo entre os elétrons e as ondas eletromagnéticas, sendo possível através da utilização de artefatos com estruturas de ondas lentas, de maneira a fazer os elétrons fornecerem energia a onda eletromagnética de maneira síncrona – a velocidade de fase da onda deve ser igual à da partícula. Como as partículas trafegam a velocidades menores que a luz, as ondas eletromagnéticas precisam ter suas velocidades reduzidas, originando o termo “ondas lentas”. Essas estruturas, geralmente de formato helicoidal, fornecem uma larga faixa de banda devido à independência da frequência, resultando na ausência de dispersão [25]. A Figura 4 apresenta algumas estruturas de ondas lentas.

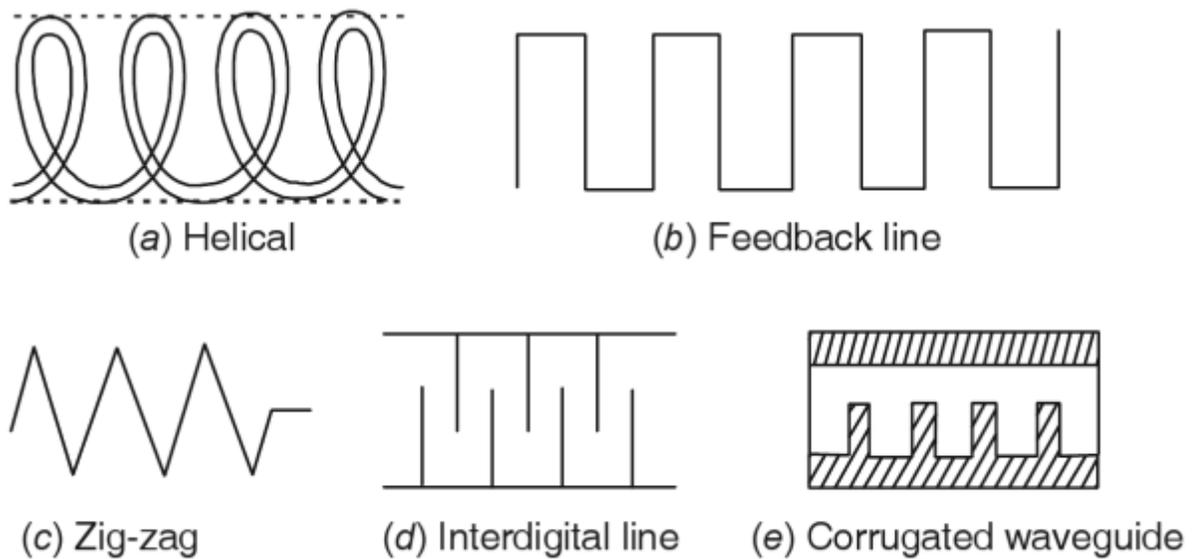


Figura 4 - Estruturas de ondas lentas [26]

Outro tipo de estrutura de ondas lentas é a cavidade acoplada, onde há dispersão porém permite a utilização de potências mais altas, resultando em artefatos com banda moderada e alta potência.

HPMs podem ser intencionalmente gerados a partir de fontes como:

- Gyrotrons/Gyromonotrons [27]: Gyrotron é uma configuração específica de cyclotron, onde um feixe eletrônico move-se numa trajetória helicoidal sob a influência de um campo magnético estático, interagindo com ondas eletromagnéticas provenientes de um guia de onda operando próximo da sua frequência de corte. Devido à condição de ressonância, que fornece uma interação eficiente entre os elétrons e a estrutura de microondas e a alta seletividade de circuitos abertos de micro-ondas, gyrotrons podem operar em modos de alta ordem (e.g. $TE_{22,6}$). Uma das aplicações práticas do gyrotron foi pelos Estados Unidos na Guerra do Afeganistão através de um dispositivo chamado Sistema de Negação Ativa. Este armamento funcionava emitindo uma HPM na faixa de 95 GHz causando queimaduras dolorosas àqueles próximos, para fins de interdição de área e controle de multidões. A Figura 5 exibe a seção de um Gyrotron e seus componentes.

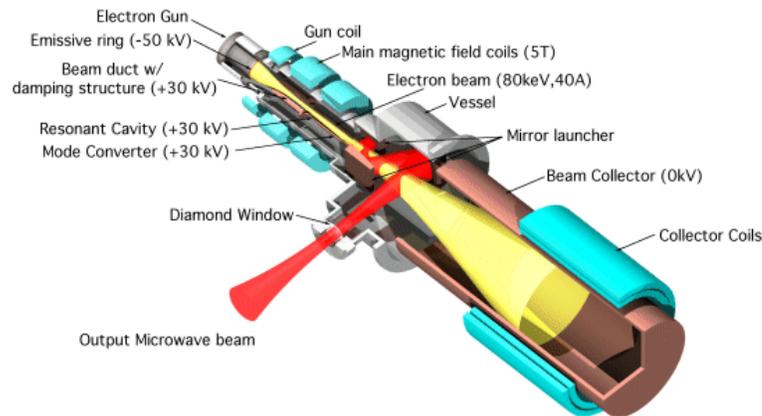


Figura 5 - Dispositivo Gyrotron [28]

- Vircators [29]: Osciladores de Catodo Virtual, são válvulas de vácuo que aceleram um fluxo denso de elétrons contra uma grade. Os diversos elétrons que passam pela grade formam uma região denominada “catodo virtual”, onde ocorre uma oscilação de micro-ondas. São dispositivos populares entre as fontes de HPM pois possuem relativa simplicidade de construção e altas potências. A Figura 6 ilustra a seção de um Vircator e seus componentes.

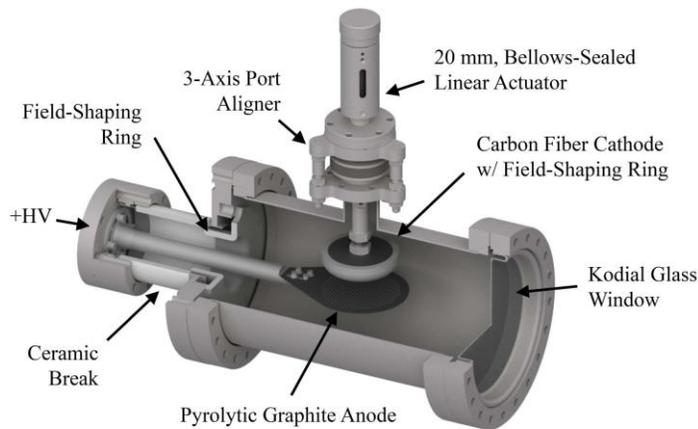


Figura 6 - Dispositivo Vircator [30]

- FCG (Geradores de Fluxo de Campo) [31]: Geradores de compressão de fluxo produzem um pulso eletromagnético a partir da compressão de um campo magnético causado pela explosão de um detonador (e.g. C4). Apresentam facilidade de construção mas a

exigência de explosivos químicos de certa forma impõe limites na utilização de FGCs. A Figura 7 apresenta a seção de um FCG e seus componentes.

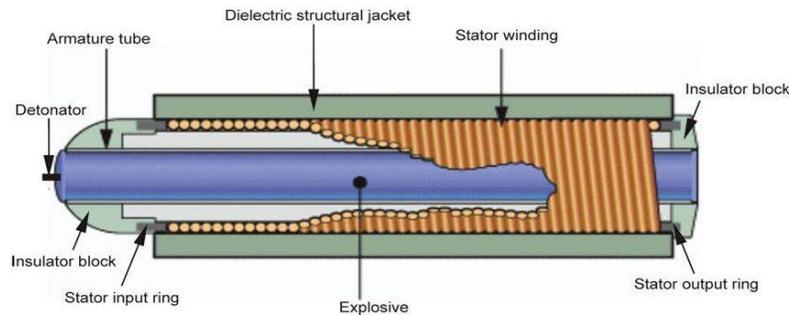


Figura 7 - Dispositivo FCG [32]

2.1.2.2 HEMP (Pulso Eletromagnético de Alta Altitude)

Define-se como HEMP, ou Pulso Eletromagnético de Alta Altitude, uma emissão de radiação eletromagnética associada à uma explosão nuclear em altas altitudes. HEMPs são fenômenos eletromagnéticos transientes e são produzidos pela interação dos produtos de artefatos nucleares com a atmosfera terrestre.

O estudo dos HEMPs iniciou-se em 1945 quando o físico Enrico Fermi previu a geração dos mesmos durante o primeiro teste nuclear nos Estados Unidos. No relatório oficial do evento, nomeado Trinity, o físico alerta sobre a dificuldade de transmissão de sinais durante a explosão, visto que os raios gama gerados pela reação ionizariam o ar e equipamentos em uma área ampla, causando efeitos similares ao de uma descarga elétrica causada por um raio [33].

Em 1958 foi realizada uma série de 35 testes nucleares denominados Operação Hardtack I, dentre eles a primeira detonação em altas altitudes, nomeada Yucca. Os efeitos gerados pelos pulsos eletromagnéticos neste cenário não eram conhecidos e criaram questionamentos, sendo o teste posteriormente caracterizado como “mal instrumentado e executado apressadamente” [34]. Finalmente, após medições realizadas durante a Operação Fishbowl, em 1962, um modelo preciso dos HEMPs foi desenvolvido pelo cientista Conrad Longmire [35].

Posteriormente, em meados da década de 1950, o engenheiro grego-americano Nicholas Christofilos sugeriu que explosões termonucleares em sucessão a altas altitudes poderiam gerar

um estado de plasma que serviria como blindagem contra ICBMs (Mísseis Balísticos Intercontinentais) soviéticos, fazendo com que os mesmos explodissem em altas altitudes livrando o solo norte-americano dos efeitos. Para efeitos de teste uma gigantesca força tarefa – denominada Projeto Argus - foi realizada com três explosões termonucleares executadas em altas altitudes no Atlântico Sul (próximo da costa Brasileira), em função de ser uma região com pouco monitoramento e fraco desenvolvimento econômico. Até os dias de hoje houve pouquíssima divulgação quanto aos resultados [36].

Fisicamente, elétrons são acelerados em percursos circulares ou espirais pelo campo geomagnético, produzindo as correntes de Compton que conseqüentemente geram o HEMP de acordo com as equações de Maxwell. O pulso eletromagnético resultante varia de acordo com a referência: Para um observador no solo, a onda propaga-se em um formato de guarda-chuva, enquanto que localmente, pode-se aproximar o pulso como uma onda plana [35].

A modelagem matemática que envolve a padronização dos HEMPs depende de diversos detalhes que se referem ao design e implantação de artefatos nucleares [37]. Devido à natureza confidencial de tais informações, apenas em 1975 a primeira expressão para um pulso nuclear foi publicada de forma aberta, sendo proposta por pesquisadores do Bell Labs [38]. Em 1996 a IEC definiu o ambiente de uma explosão típica sendo executada a 30 km de altitude, com três formas de onda descritas dependendo do estágio temporal pós-detonação [39]. A Figura 8 ilustra o formato das ondas no domínio tempo, com as respectivas expressões analíticas na Tabela 2 e na Tabela 3. A seguir serão apresentados de forma detalhada os três estágios da onda IEC.

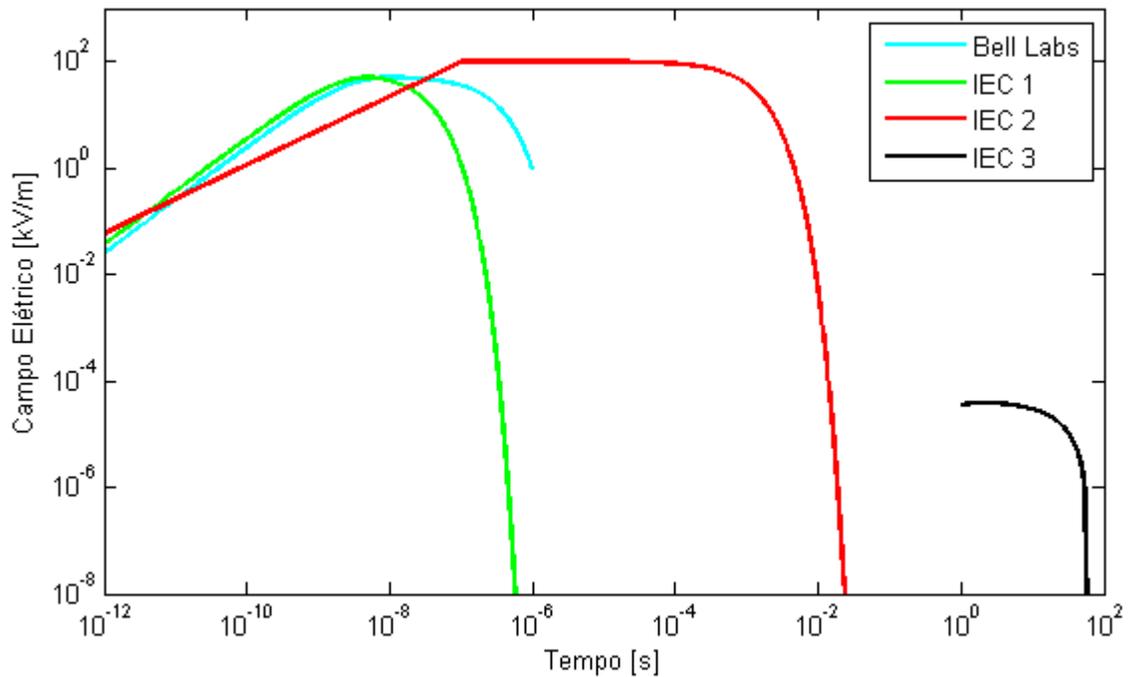


Figura 8 - Os três estágios de um HEMP

$E(t) = E_0 k (e^{-at} - e^{-bt})$				
Bell Labs	$E_0 = 50 \text{ kV/m}$	$k = 1.05$	$a = 4 \times 10^6$	$b = 4.7 \times 10^8$
IEC 61000-2-9 E1 <i>Early Time</i>	$E_0 = 50 \text{ kV/m}$	$k = 1.3$	$a = 4 \times 10^7$	$b = 6 \times 10^8$
IEC 61000-2-9 E2 <i>Intermediate Time</i>	$E_0 = 100 \text{ kV/m}$	$k = 1$	$a = 1 \times 10^3$	$b = 6 \times 10^8$

Tabela 2 - Modelo matemático para os estágios E1 e E2

$E(t) = E_{01} k_1 (e^{-a_1 t} - e^{-b_1 t}) - E_{02} k_2 (e^{-a_2 t} - e^{-b_2 t})$				
IEC 61000-2-9 E3 <i>Early Time</i> [12]	$E_{01} = 0.04 \text{ V/m}$	$k_1 = 1.058$	$a_1 = 0.02$	$b_1 = 2$
(válida para $t \geq 1 \text{ s}$)	$E_{02} = 0.01326 \text{ V/m}$	$k_2 = 9.841$	$a_2 = 0.015$	$b_2 = 0.02$

Tabela 3 - Modelo matemático para o estágio E3

O primeiro estágio E1, ocorre entre 10^{-10} e 10^{-6} segundos. Raios gama emitidos pela explosão nuclear descendem em uma região onde há o aumento da densidade atmosférica. Esses raios

gama interagem com as moléculas de ar formando as correntes de Compton [35]. Os elétrons são forçados pelo campo geomagnético transversal a seguir o mesmo caminho, resultando na emissão de radiação eletromagnética [40].

A faixa espectral do sinal depende do tempo de subida, sendo no geral da ordem de 10^{-8} , que corresponde a frequências de centenas de Megahertz. A Figura 9 ilustra o espectro de potência comparativo entre as curvas IEC E1 e Bell.

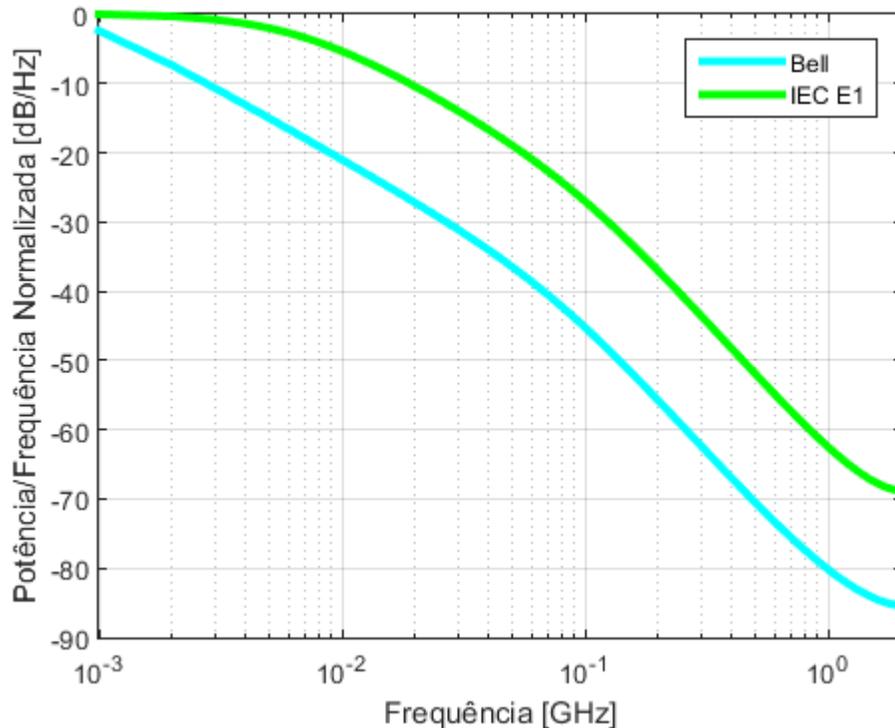


Figura 9 - Resposta em frequência do estágio E1

Os efeitos práticos deste estágio assemelham-se à eletricidade estática de alta amplitude em altas frequências. Ou seja, imediatamente após a detonação, serviços como Wi-Fi, telefonia móvel, Bluetooth e Zigbee serão prejudicados. O acoplamento da energia proveniente da onda eletromagnética com estruturas próximas aumenta com a frequência, sendo assim a parte E1 mais crítica quando o interesse é a análise de acoplamentos com estruturas metálicas [40].

Além disso, o acoplamento elétrico irá danificar equipamentos eletroeletrônicos em uma vasta área, cuja extensão é proporcional à altura de detonação. Por exemplo, estima-se que, para uma detonação a aproximadamente 50 km de altura, a área afetada pelo HEMP seria de $1.9E6 \text{ km}^2$,

enquanto que uma detonação a 480 km de altura atingiria uma área de $1.8E7 \text{ km}^2$, superior a do continente europeu [40]. A Figura 10 ilustra o potencial efeito dos HEMPs no território continental Norte-Americano.

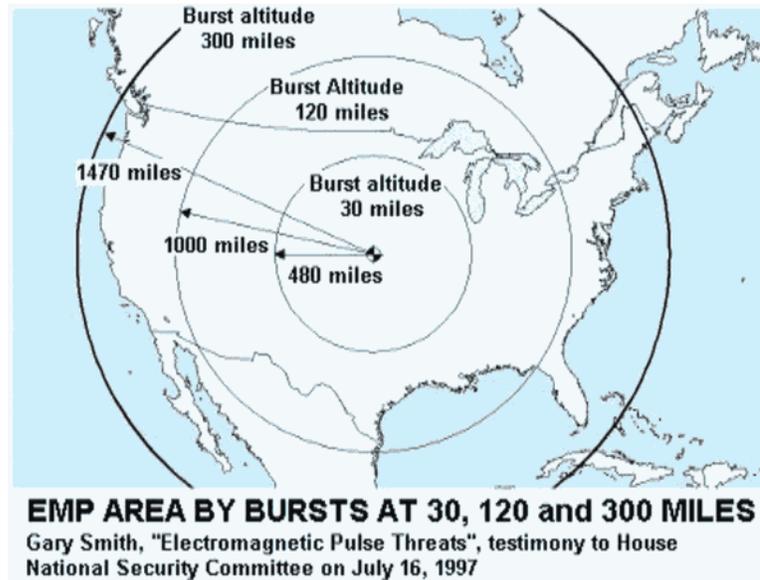


Figura 10 - Área atingida pelo EMP em diferentes altitudes de detonação [41]

A componente E2 é gerada pelos raios gama dispersos e inelásticos produzido pelos nêutrons. Este estágio ocorre entre 10^{-6} e 1 segundo e assemelha-se à uma descarga elétrica produzida por um raio (Figura 11 ilustra o espectro de potência). Geralmente, medidas de segurança já são rotineiramente tomadas a fim de proteger equipamentos elétricos e circuitos contra raios e assim os danos devido a essa componente podem vir a não ocorrer.. Entretanto, o dano causado pelo estágio E1 pode ser suficiente para que tais equipamentos de segurança sejam desativados. Nesse sentido, os efeitos da componente E2 apenas se somarão ao que já foi danificado [40].

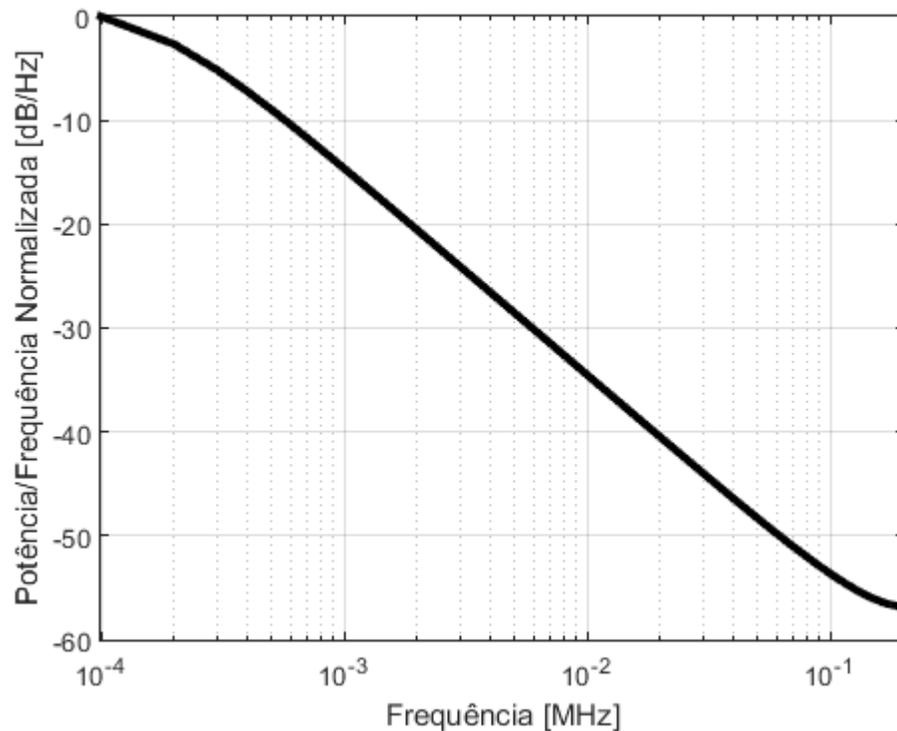


Figura 11 - Resposta em frequência do estágio E2

O estágio final, E3, é um pulso lento que dura segundos (Figura 12 ilustra o espectro de potência), causado pela expansão de uma camada de plasma cujo fluxo magnético cancela o da terra. Este último efeito, por sua vez, causa uma distorção do campo geomagnético terrestre. Este sinal magnetohidrodinâmico está relacionado à distorção da ionosfera e depende da energia total da detonação, assemelhando-se à uma tempestade geomagnética causada por uma explosão solar. Da mesma forma que uma tempestade solar, o estágio E3 pode produzir correntes induzidas em condutores elétricos longos, danificando equipamentos como transformadores. Entretanto, vale ressaltar que o dano à circuitos elétricos está primariamente ligado ao estágio E1 [40].

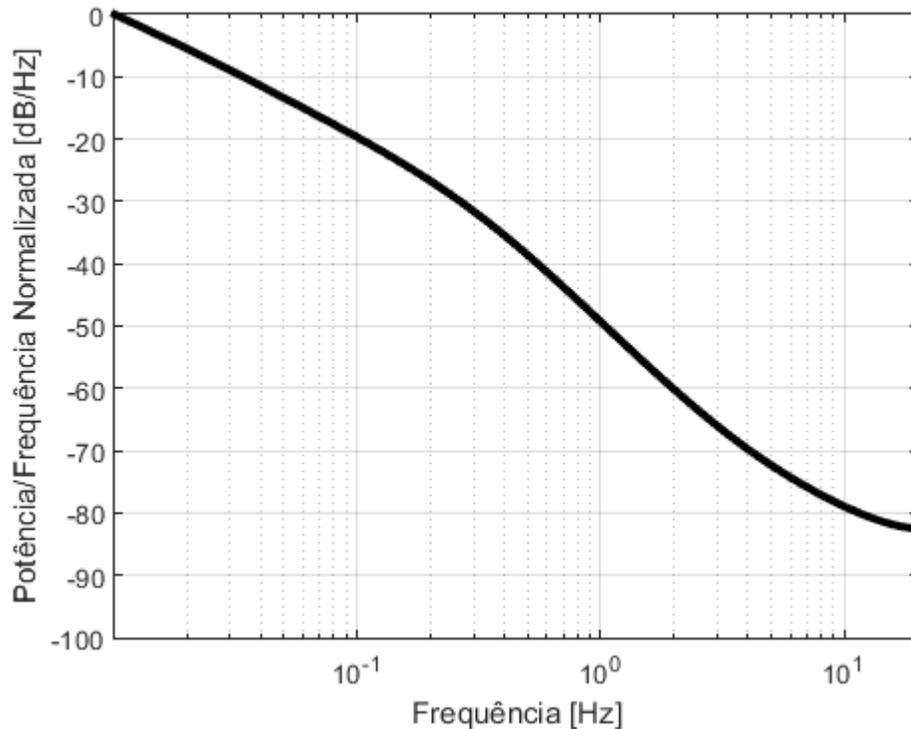


Figura 12 - Resposta em frequência do estágio E3

2.1.2.3 Vulnerabilidade à EMI Intencional

Até o momento não foram registrados no mundo atos terroristas com HEMPs, porém é possível prever os danos causados por HEMPs com base nos efeitos observados durante testes nucleares realizados em altas altitudes e também através de simulações e modelagem matemática.

Como citado anteriormente, um HEMP possui três estágios que ocorrem aproximadamente de forma simultânea, sendo o primeiro (E1) semelhante à eletricidade estática de alta amplitude, o segundo (E2) semelhante à um raio e o terceiro (E3) semelhante à uma tempestade geomagnética. Com base nessas características, e sabendo da vulnerabilidade de equipamentos eletroeletrônicos à essas fontes de EMI isoladas (Seção 2.1.2.2), será realizada abaixo uma análise dos possíveis efeitos de um incidente com HEMP em diversos setores da sociedade.

Inicialmente, em relação à detonação de um artefato nuclear, sabe-se através dos dados obtidos durante a operação Starfish Prime que a ativação de uma bomba de 1.4 Megatons a uma altura de 400 km resultaria em um HEMP com um raio de cobertura superior a 1000 km [6]. Entretanto,

foi provado que naquela época já haviam sido desenvolvidos artefatos mais poderosos, como a bomba russa Tsar, de 50 Megatons, que foi testada em solo e não em altas altitudes [42]. Ressalta-se que essa tecnologia nuclear data de 1960, ou seja, atualmente uma bomba de baixa potência, como a utilizada na operação Starfish Prime (1.4 Megatons) poderia ser desenvolvida com relativa facilidade.

Ao que se refere aos efeitos: Considerando inicialmente o dano à infraestrutura de energia elétrica, a componente E1 de um HEMP resultaria em danos imediatos no sistema de distribuição de baixa tensão e equipamentos de proteção contra descargas atmosféricas, enquanto a componente E2 afetaria os componentes desprotegidos. Por fim, a componente E3 afetaria a infraestrutura com linhas de transmissão longas. Conseqüentemente, a ação simultânea dos efeitos resultaria em um conjunto catastrófico de danos à rede de distribuição e causando *blackouts* de larga escala e de complexa manutenção. O nível de dano depende principalmente do funcionamento dos equipamentos de proteção, porém o colapso é virtualmente instantâneo. A amplitude dos transientes no sistema pode ser superior ao suportado pelos equipamentos, isso no caso de equipamentos de proteção que de alguma forma não foram afetados por uma das componentes do HEMP [15].

Com o colapso do sistema de energia elétrica, sistemas de telecomunicações possuiriam uma janela de 4-72 horas de funcionamento até que a energia reserva disponível esgote. Mesmo durante esse período, serviços de comunicação móvel serão criticamente degradados devido aos danos físicos causados pela iluminação do HEMP e o aumento esperado no tráfego telefônico devido à natureza emergencial pós-incidente [15].

A infraestrutura de alimentação, por sua vez, é totalmente dependente da eletricidade. Válvulas de irrigação, tratores e maquinários agrícolas, sistemas para a automação e controle de temperatura e alimentação de animais, indústrias de processamento e depósitos de armazenamento de alimentos funcionam com sistemas elétricos e eletrônicos que apresentam vulnerabilidade à interferência eletromagnética. A adoção de sistemas just-in-time resulta em supermercados com estoque imediato de 1 a 3 dias, com o objetivo de otimizar o fornecimento de alimentos de acordo com a demanda. Na ausência de energia elétrica, grande parte dos alimentos, armazenados em depósitos, estragariam e a indústria estaria impossibilitada de produzir maiores quantidades resultando na escassez de mantimentos durante dias ou semanas [15].

Além dos setores anteriormente citados, a interferência eletromagnética resultante do incidente danificaria permanentemente equipamentos eletrônicos presentes em hospitais, bancos e na infraestrutura de transporte [15].

Em suma, um incidente com um HEMP resultaria em danos imensuráveis na sociedade, não só devido à destruição do sistema de energia elétrica, resultando em um colapso da infraestrutura crítica citada, mas também devido ao dano físico permanente realizado através da indução de correntes em equipamentos eletrônicos vulneráveis à interferência eletromagnética.

2.2 Blindagem Eletromagnética

A presença de vários equipamentos eletrônicos emissores de ondas eletromagnéticas em um mesmo ambiente e a possível ocorrência de incidentes com fontes de pulsos eletromagnéticos (descargas elétricas, tempestades geomagnéticas e HEMPs) torna necessário o uso de mecanismos de blindagem para reduzir a interferência eletromagnética entre ambiente-dispositivo, dispositivo-ambiente e intradispositivo. Entretanto, a inserção de tais mecanismos em sistemas eletrônicos deve ser realizada de forma minuciosa pois pode resultar em efeitos indesejados. A blindagem eletromagnética depende de inúmeras variáveis, como a frequência da interferência, tipo (elétrica ou magnética), localização (campo próximo ou campo distante), propriedades do material de blindagem, entre outros [43]. A Figura 13 ilustra a atenuação elétrica e magnética em função da frequência para diversos materiais e espessuras de blindagem.

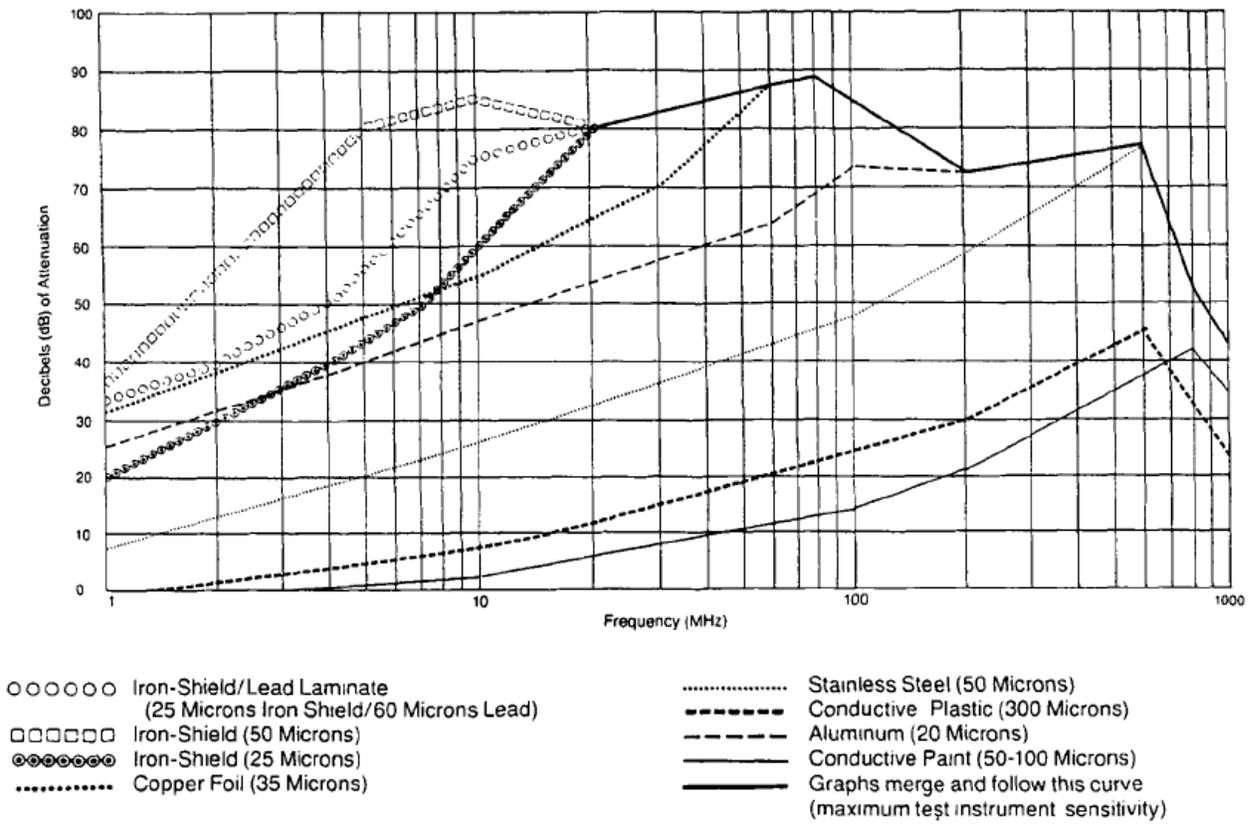


Figura 13 - Exemplos de atenuação elétrica e magnética para vários tipos de blindagem [43]

2.2.1 Eficiência de Blindagem (SE)

Um invólucro oferece blindagem eletromagnética de três formas:

- Absorção: Devido ao efeito pelicular, a corrente em um material tende a se concentrar na superfície e é atenuada ao longo da espessura, resultando em uma absorção efetiva da onda incidente. A absorção em um material é proporcional à espessura e inversamente proporcional ao efeito pelicular, e pode ser expressa pela equação abaixo [43]:

$$A = (3.338 \times 10^{-3}) t \sqrt{\mu_r f G_r} \text{ [dB]} \quad (1)$$

Equação 1 - Perda por absorção

Onde μ_r é a permeabilidade relativa, G_r é a condutividade relativa em siemens/metro, f é a frequência em hertz e t é a espessura em mils.

- Reflexão: Uma onda eletromagnética plana incidente sobre uma interface está sujeita à reflexão e conseqüente perda de acordo com a equação abaixo [43]:

$$R = 168.2 + 10 \log \left[\frac{G_r}{\mu_r f} \right] \text{ [dB]} \quad (2)$$

Equação 2 - Perda por reflexão

Onde μ_r é a permeabilidade relativa, G_r é a condutividade relativa em siemens/metro e f é a frequência em hertz. Para outros tipos de onda (e.g. magnética), a perda por reflexão é determinada por outras expressões matemáticas.

- Re-Reflexão: A perda por re-reflexão é um fator de correção subtraído da eficiência de blindagem quando a perda por absorção não é muito maior que 5 dB e é representada pela equação abaixo [43]:

$$R_r = 20 \log \left\{ \left(\frac{Z_m - Z_w}{Z_m + Z_w} \right)^2 (10^{-0.1A} (e^{-j0.227A})) \right\} \text{ [dB]} \quad (3)$$

Equação 3 - Perda por re-reflexão

Onde Z_m é a impedância do metal, em ohms, Z_w é a impedância da onda, em ohms e A é a perda por absorção, em dB.

Por fim, a eficiência de blindagem (SE) é definida na equação abaixo por:

$$SE = R + R_r + A \text{ [dB]} \quad (4)$$

Equação 4 - Eficiência de blindagem [43]

Como representado pelas equações, a eficiência de blindagem de um determinado invólucro depende das características intrínsecas dos materiais utilizados, fazendo com que a consideração da origem e frequência da interferência alvo na escolha. Por exemplo, um material que exibe baixa condutividade possui baixa eficiência de blindagem contra campos magnéticos de baixa

impedância (geralmente 0 dB), mas apresenta uma eficiência alta contra campos elétricos de alta impedância [43].

Além disso, segundo [44], a eficiência de blindagem de uma barreira metálica pode ser descrita de forma exata através da equação abaixo, que representa a razão entre a onda incidente e a transmitida [44]:

$$\frac{E_i}{E_t} = \frac{(\eta_0 + \eta)^2}{4\eta_0\eta} \left[1 - \left(\frac{\eta_0 - \eta}{\eta_0 + \eta} \right)^2 e^{-2t/\delta} e^{-j2\beta t} \right] e^{t/\delta} e^{j\beta t} e^{-j\beta_0 t} \quad [\text{dB}] \quad (5)$$

Equação 5 - Eficiência de blindagem - solução exata

Onde t é a espessura da barreira, em mils e os seguintes parâmetros:

- η_0 : Impedância intrínseca do espaço livre, descrita por [44]:

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad [\Omega] \quad (6)$$

Equação 6 - Impedância intrínseca do espaço livre

Onde μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo, cujo valor é $4\pi \times 10^7$ henrys/metro e ϵ_0 é a permissividade do vácuo, cujo valor é aproximadamente 8.854×10^{-12} farads/metro.

- η : Impedância intrínseca da interface, descrita por [44]:

$$\eta = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}} \quad [\Omega] \quad (7)$$

Equação 7 - Impedância intrínseca da barreira

Onde μ é a permeabilidade magnética do material que constitui a barreira, em henrys/metro ϵ é a permissividade do material que constitui a barreira em farads/metro, ω é a frequência angular em hertz e σ é a condutividade elétrica do material em ohms/metro.

- β : Parte imaginária da constante de propagação, descrita por [44]:

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)} \quad (8)$$

Equação 8 - Constante de propagação

Onde μ é a permeabilidade magnética do material que constitui a barreira, em henrys/metro ϵ é a permissividade do material que constitui a barreira em farads/metro, ω é a frequência angular em hertz e σ é a condutividade elétrica do material em ohms/metro.

- β_0 : Constante de fase do espaço livre, descrita por [44] :

$$\beta_0 = \omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0} \text{ [rad/m]} \quad (9)$$

Equação 9 - Constante de fase do espaço livre

Onde μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo, cujo valor é $4\pi \times 10^{-7}$ henrys/metro e ϵ_0 é a permissividade do vácuo, cujo valor é aproximadamente 8.854×10^{-12} farads/metro e ω é a frequência angular, em hertz.

- δ : Efeito pelicular, descrito por [44]:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \text{ [m]} \quad (10)$$

Equação 10 - Efeito pelicular

Onde μ é a permeabilidade magnética do material que constitui a barreira, em henrys/metro, f é a frequência da onda incidente em hertz e σ é a condutividade elétrica do material em ohms/metro.

2.2.2 Degradação da SE

Mesmo após um meticuloso estudo e instalação de um sistema de blindagem eletromagnética para determinado equipamento eletrônico, o mesmo está sujeito à degradação. Geralmente, a blindagem inadequada não ocorre devido às propriedades dos materiais escolhidos, mas pela presença de aberturas, fendas, aberturas para ventilação, passagem de cabos e junções, gerando

acoplamento de campo magnético e elétrico através da abertura. Nesse contexto, os fatores que mais negativamente impactam a eficiência de blindagem são:

- Corrosão: A não-compatibilidade galvânica entre dois metais em contato gera corrosão galvânica, degradando os materiais e reduzindo a eficiência de blindagem de um invólucro. A corrosão também pode ser causada de forma eletroquímica quando uma reação corrosiva é induzida por um potencial elétrico externo.
- Fendas: A presença de aberturas em invólucros (Figura 14) impacta negativamente na eficiência de blindagem, sendo representado pela equação a seguir [43]:

$$SE = 20 \log \left(\frac{\lambda}{2L} \right) [\text{dB}] \quad (11)$$

Equação 11 - Eficiência de blindagem de uma fenda

Onde λ é o comprimento de onda, em metros, L o tamanho da fenda (maior dimensão) em metros. Esta equação aplica-se à fendas com dimensão menor ou igual a $\lambda/2$. A eficiência de blindagem de uma fenda é 0 dB quando a fenda é de tamanho $\lambda/2$, e aumenta 20 dB/década conforme L diminui [43].

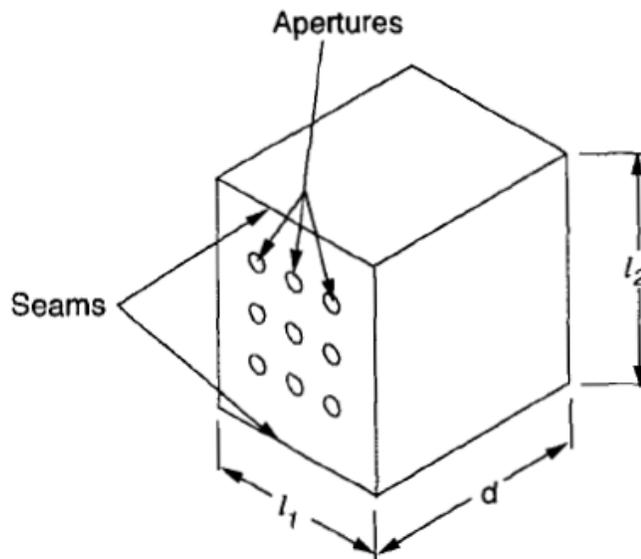


Figura 14 - Defeitos em um invólucro de blindagem eletromagnética [43]

Para contornar a redução na blindagem de invólucros devido à presença de fendas, é possível utilizar uma configuração alternativa chamada de Guia de Onda Abaixo da Frequência de Corte (WBC). Para isso, as aberturas são modificadas de forma a possuírem profundidade, tornando-se guias de onda. Enquanto o dispositivo for iluminado por frequências inferiores à frequência de corte desse guia de onda, as aberturas irão atuar como atenuadores, oferecendo uma blindagem adicional baseada na dimensão do guia, conforme Figura 15 e equações a seguir. [45]

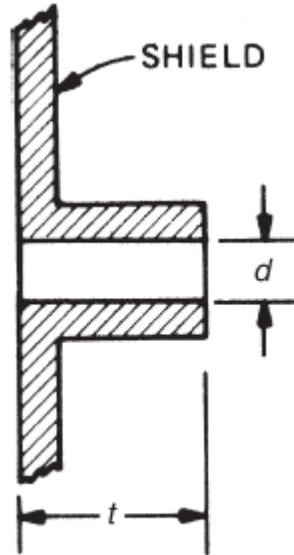


Figura 15 - Configuração WBC [45]

$$S = 32 \frac{t}{d} \text{ [dB]} \quad (12)$$

Equação 12 - Eficiência de blindagem de um WBC circular

$$f_c = \frac{6.9 \times 10^9}{d} \text{ [Hz]} \quad (13)$$

Equação 13 - Frequência de corte de um WBC circular

$$S = 27.2 \frac{t}{d} \text{ [dB]} \quad (14)$$

Equação 14 - Eficiência de blindagem de um WBC retangular

$$f_c = \frac{5.9 \times 10^9}{l} \text{ [Hz]} \quad (15)$$

Equação 15 - Frequência de corte de um WBC retangular

Onde t é a profundidade do guia, em polegadas, d é o diâmetro da abertura, em polegadas e l é a maior dimensão da secção transversal do guia de onda retangular, em polegadas.

2.3 Eletromagnetismo Computacional

Diversos problemas eletromagnéticos práticos não são calculáveis analiticamente devido à presença de geometrias irregulares encontradas em dispositivos e equipamentos reais. Por isso, recorre-se amplamente ao eletromagnetismo computacional, que envolve utilizar aproximações eficientes das equações de Maxwell para realizar cálculos - principalmente de campos magnéticos e elétricos - em um determinado problema e domínio. Na literatura, encontram-se diversos métodos de solução bem consolidados, e a escolha do método apropriado é essencial para que o problema seja resolvido no menor tempo computacional possível, e com resultados coerentes.

2.3.1 Métodos de Solução

2.3.1.1 FDTD (Diferenças Finitas no Domínio do Tempo)

O método FDTD foi introduzido em 1966 por Yee para suprir às limitações existentes na solução computacional por equações integrais de Maxwell no domínio da frequência. O método FDTD (e relacionados) é baseado na amostragem volumétrica de campos elétricos e magnéticos de uma estrutura, em um período de tempo. No geral, a técnica é um procedimento temporal que simula as ondas eletromagnéticas contínuas em uma região espacial finita. [46]

Métodos no domínio do tempo geram sequências temporais que podem ser transformadas para o domínio da frequência através da Transformada de Fourier, resultando em um espectro completo. Em suma, o FDTD possui diversas vantagens sobre os outros métodos, como a solução de comportamentos não-lineares, sua robustez devido à ótima consolidação dos conceitos

envolvidos nos métodos matemáticos de solução, a ausência de limitações de variáveis desconhecidas devido à não-utilização de álgebra linear e as capacidades de visualização da dinâmica de campos em ferramentas de simulação mais completas. [47]

2.3.1.2 TLM (Método das Linhas de Transmissão)

O método TLM trabalha através da combinação dos campos magnéticos e elétricos, representados como pulsos se propagando em uma grade tridimensional de linhas de transmissão. Nas intersecções (nós - Figura 16), os pulsos estão espalhados de acordo com as matrizes de espalhamento S . Com a condição das matrizes serem unitárias, a conservação de energia é imposta e há estabilidade no método. [46]

TLM pode ser classificado como uma técnica de onda completa e de discretização volumétrica. A cada passo temporal, pulsos incidentes nos nós são refletidos de acordo com as matrizes S e conectados com os nós vizinhos, combinando-se e gerando as componentes elétrica e magnética dos campos. [46]

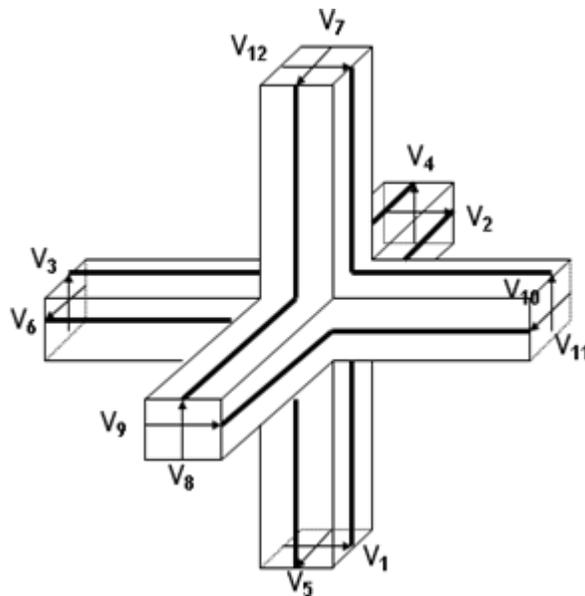


Figura 16 - Nó e malha TLM [48]

2.3.1.3 FIT (Técnica da Integração Finita)

O método FIT é baseado na representação integral das equações de Maxwell. Os campos são representados em termos das tensões magnéticas e elétricas, organizadas nos vetores \mathbf{e} e \mathbf{h} , respectivamente. Tais vetores são relacionados aos fluxos magnéticos e elétricos (\mathbf{d} e \mathbf{b}) através das relações constitutivas. Logo, as equações de Maxwell em um espaço livre de fontes, podem ser escritas da seguinte forma: [46]

$$\begin{aligned}\mathbf{C}\mathbf{e} &= -\frac{d}{dt}\mathbf{b}, \\ \tilde{\mathbf{C}}\mathbf{h} &= -\frac{d}{dt}\mathbf{d}\end{aligned}\tag{16}$$

Equação 16 - Equações de Maxwell para o método FIT [46]

Neste método, propriedades topológicas básicas das equações contínuas são mantidas, como a conservação de carga e energia. O método de discretização do FIT é semelhante ao do FDTD, porém o FIT transforma as equações de Maxwell, em sua forma integral, em um sistema linear de equações. [46]

O método FIT possui vantagens semelhantes à do método FDTD, como implementação simples e computação paralela eficiente, entretanto, sua maior desvantagem também é semelhante ao método FDTD, que é a dependência temporal no tamanho da malha. Para malhas refinadas, o passo temporal é muito pequeno, resultando em um tempo computacional extenso. [49]

2.3.2 CST Studio Suite[®]

O CST Studio Suite[®] é um software apropriado para uma vasta gama de aplicações eletromagnéticas, como simulações de alta e baixa frequência, eletro- e magnetostática, efeitos de campos eletromagnéticos em materiais, tecidos e partículas, simulação de conectores, antenas, guias de onda, sensores, entre outros. Devido à abrangência do software, o mesmo inclui diversos tipos de métodos de solução, como o método TLM, FIT, assintótico, parâmetros S ressonantes, *eigenmode*, entre outros. [48] A Figura 17 resume as categorias de aplicação do software CST Studio Suite[®].

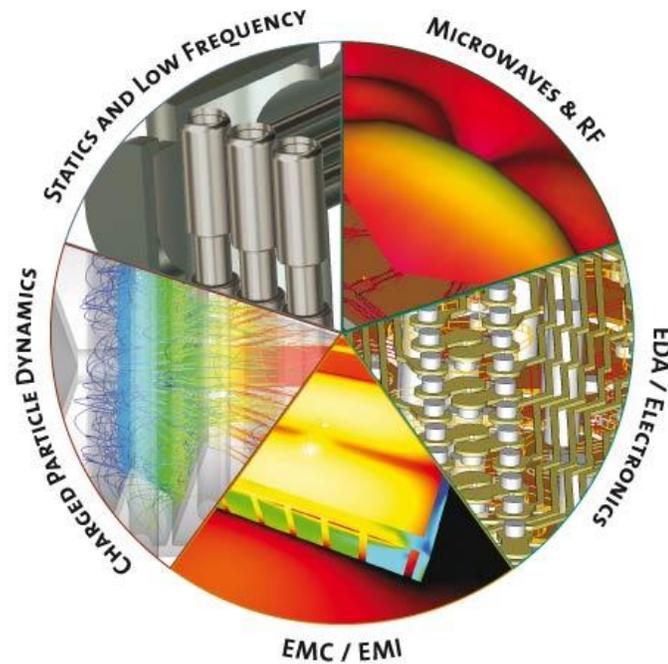


Figura 17 - Aplicações do software CST Studio Suite® [48]

O CST Studio Suite® é utilizado mundialmente tanto em aplicações teóricas quanto em aplicações práticas de engenharia na indústria e na área acadêmica. Dentre os exemplos de aplicações reais relacionadas à EMC (Compatibilidade Eletromagnética)/EMI presentes no website oficial da empresa, pode-se citar a solução de um problema de acoplamento elétrico entre transmissores AM e guindastes [50] e a análise da eficiência de blindagem em estruturas de proteção contra EMP (Pulso Eletromagnético) e descargas elétricas [51]. O software inclui funcionalidades como: compatibilidade com ferramentas externas (e.g. Dassault Systèmes Solidworks), solução 3D de onda completa no domínio do tempo e da frequência e a possibilidade de simulações de alto desempenho para sistemas complexos utilizando aceleração de hardware e computação em nuvem [48]. A Figura 18 representa uma simulação de EMC realizada em um conector Ethernet através do CST Studio Suite®.

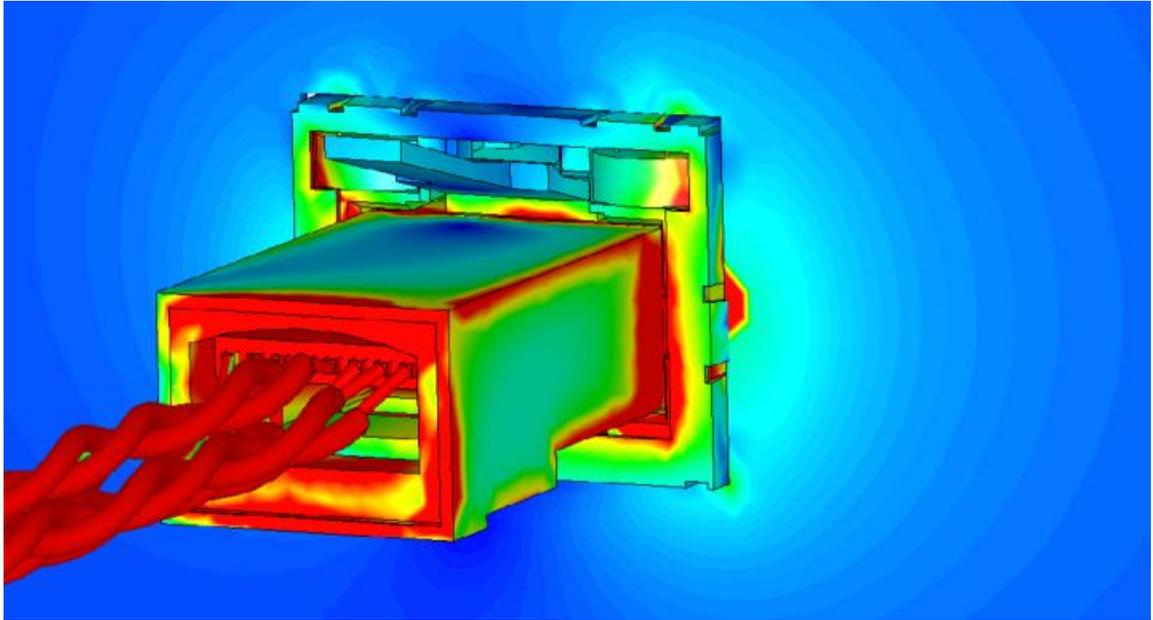


Figura 18 - Simulação de EMC: Vazamento de corrente em um conector Ethernet [48]

3. SIMULAÇÕES ELETROMAGNÉTICAS

3.1 Efeitos de Pulsos Eletromagnéticos em Linhas de Transmissão

Conforme descrito em [15], uma onda HEMP poderia causar danos irreparáveis no sistema de distribuição de energia elétrica de um país, causando um apagão em uma vasta área, resultando em um colapso da infra-estrutura em diversos setores críticos da sociedade (hospitais, bancos, indústrias, etc.). Visto isso, nesta seção serão simulados os efeitos de uma onda HEMP em seu estágio E1 - onde há maior acoplamento em estruturas metálicas. Neste contexto, este trabalho propõe um modelo computacional para a avaliação dos efeitos de ondas HEMP sobre a infraestrutura crítica, cujos resultados são obtidos por meio de simulações auxiliadas pelo software CST Studio Suite® 2016.

O modelo desenvolvido consiste de um poste de concreto em formato cônico, de 10 metros de altura, sendo 2 metros enterrados no solo. Na extremidade superior do poste há um aparato de madeira suportando um trecho de 20 metros de linha trifásica (material PEC - Condutor Elétrico Perfeito). O solo é considerado infinito e de material seco ($\epsilon_r = 2.53$, $\tan \delta = 0.0036$).

O modelo tem fronteiras periódicas em x , resultando em uma série infinita de postes e linhas de transmissão. Em y e z as fronteiras são abertas com espaço adicional, para que não haja contato do solo (material dispersivo) com as fronteiras, o que pode gerar resultados imprecisos.

O modelo é iluminado por uma onda plana na direção do solo cujo perfil temporal é um pulso HEMP no estágio E1, de duração 150 ns. O campo elétrico está alinhado com as linhas de transmissão. A Figura 19 ilustra o modelo proposto.

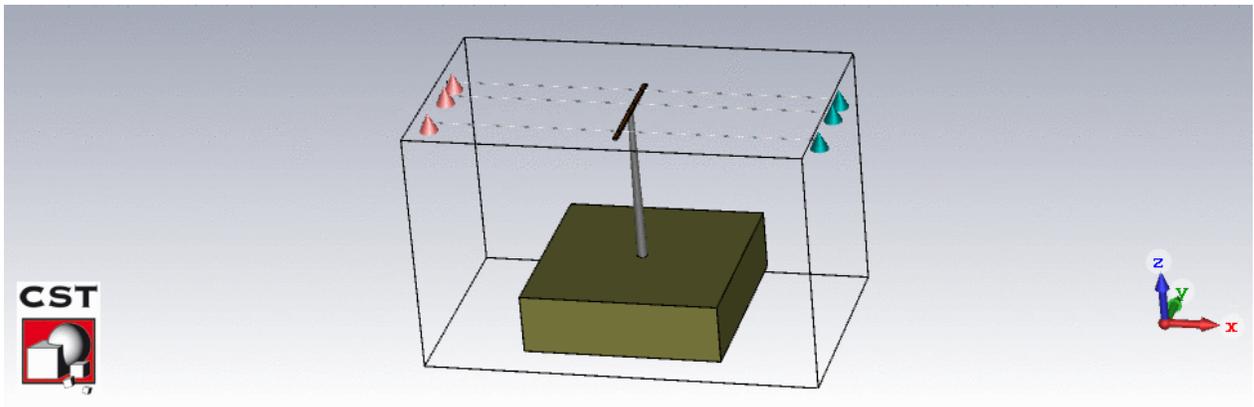


Figura 19 - Modelo 3D do poste e linha trifásica

A solução especificada foi no domínio do tempo e a malha utilizada foi do tipo hexaédrica. A malha foi reduzida globalmente para tornar o tempo de simulação mais curto, porém foi refinada localmente em regiões de interesse, no caso, nas linhas de transmissão, evitando perda de precisão nos resultados.

Finalmente, foram verificadas as correntes acopladas na linha e a propagação do campo elétrico no tempo. A Figura 20 ilustra o campo elétrico na vista em corte A-A, onde há um acoplamento de cerca de 36 kV nas proximidades das linhas de transmissão 6 ns após a iluminação da onda HEMP.

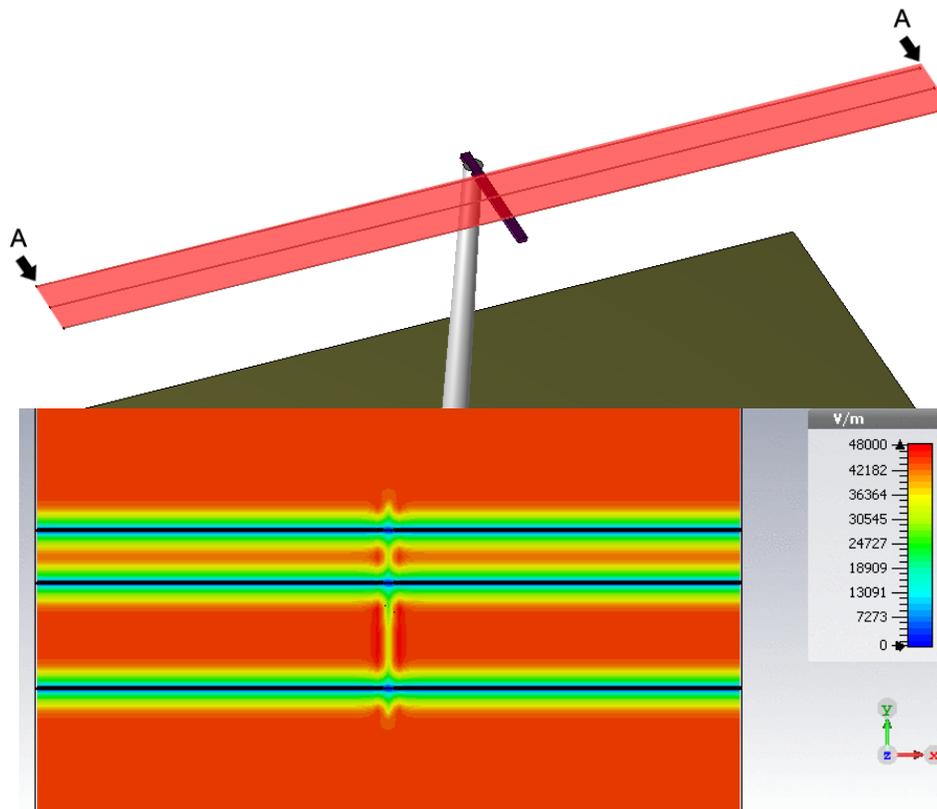


Figura 20 - Campo elétrico em 6 ns

Na Figura 21 observa-se um acoplamento no solo, cuja magnitude é de aproximadamente 30 kV após 36 ns, podendo-se prever que em uma situação como essa ocorreria também um acoplamento em objetos em alturas inferiores à do poste, como por exemplo eletrônicos presentes em casas ou utilizados por pessoas na rua, além de carros trafegando.

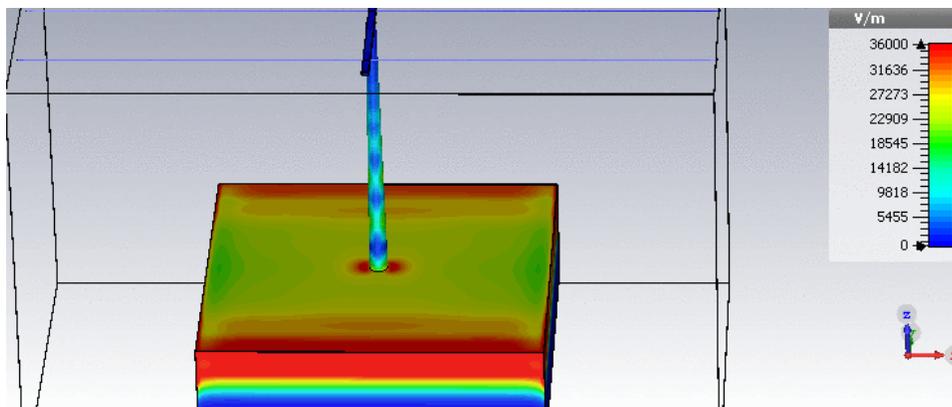


Figura 21 - Campo elétrico em 36 ns

Mesmo após o encerramento do estágio E1 - aproximadamente 150 ns, um acoplamento da energia eletromagnética de aproximadamente 10 kV está presente nas linhas de transmissão, conforme Figura 22, que ilustra o campo elétrico na vista em corte A-A.

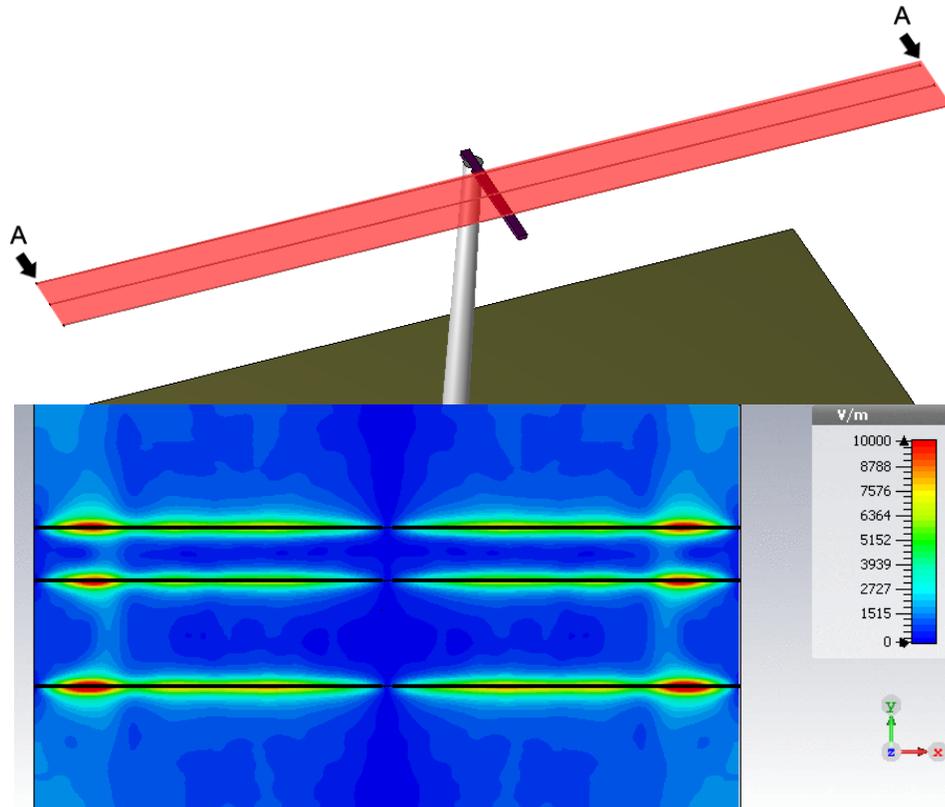


Figura 22 - Campo elétrico em 187 ns

Para a determinação das correntes nas linhas de transmissão, foi configurado um monitor de corrente à uma distância de 30 cm da extremidade da linha superior. O gráfico normalizado da função de transferência do acoplamento, extraído da simulação (para essas condições geométricas e de excitação) encontra-se na Figura 23.

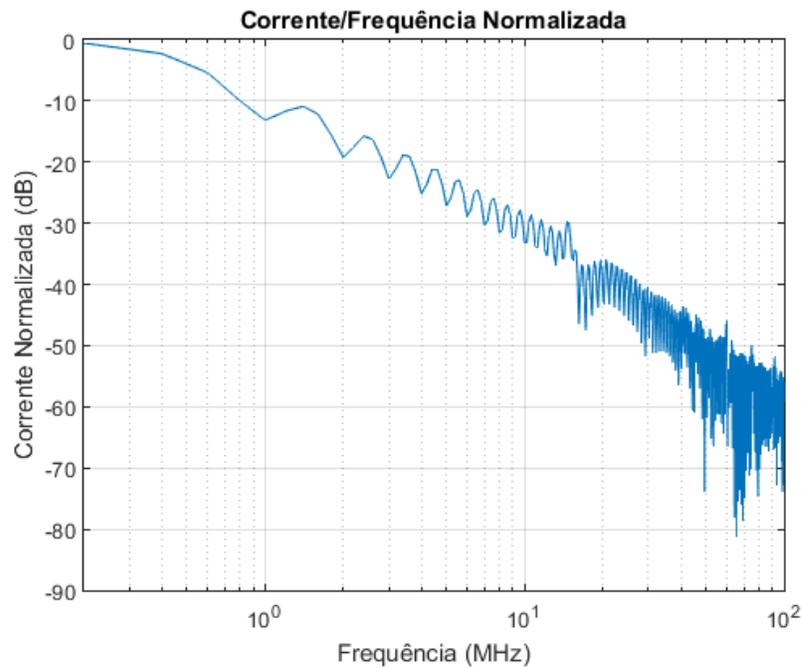


Figura 23 - Corrente normalizada na linha

Conforme pode-se observar, o maior acoplamento encontra-se em até aproximadamente 1 MHz. Em linhas de transmissão urbanas otimizadas para o transporte de correntes de 50-60 Hz, a transmissão de energia do sinal HEMP pode atingir grandes amplitudes.

3.2 Simulações de Eficiência de Blindagem

Nesta seção serão apresentados os resultados e análises de simulações eletromagnéticas de eficiência de blindagem em diferentes configurações, utilizando CST Studio Suite® 2016.

3.2.1 Painéis Finos

Um painel fino é um modelo de material disponível no CST Studio Suite® 2016 que leva em consideração as perdas relacionadas ao efeito pelicular e à penetração do campo elétrico em camadas de diferentes espessuras.

Neste cenário, foi modelado um painel fino de 1x1 metro, espessura t e material A em um ambiente composto por duas portas de guia de onda posicionadas nas fronteiras em z e dois

eletrodos monitores de campo elétrico, distantes 0.25 metros de cada lado do painel, ao longo de z (Figura 24). Adicionalmente, configurou-se as condições de fronteira como magnética ($H_t = 0$) em x , elétrica ($E_t = 0$) em y e aberta em z - configuração que emula uma condição onde a placa é infinita nas direções x e y da figura, assim eliminando eventuais problemas de difrações nas bordas.

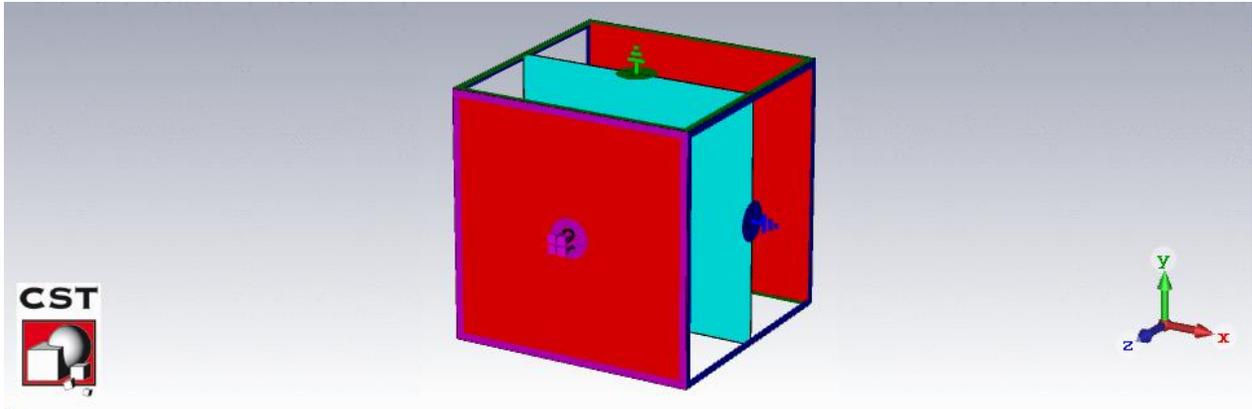


Figura 24 - Setup para simulação de um painel fino

Para a excitação, foi selecionada a onda HEMP IEC 61000-2-9 E1 *Early Time* (Figura 25) durante 150 ns e o método TLM na porta 1, no intervalo de frequências de 0 a 1 GHz (amplitude da excitação em volts). Finalmente, fixou-se a espessura t como 10 μm e a simulação foi executada para diferentes materiais no painel fino. A Tabela 4 abaixo exhibe os materiais testados e suas propriedades de interesse. O solver TLM apresenta algumas funcionalidades particularmente interessantes para a área de EMC, entre as quais estudos na área de blindagens. O mesmo modela, basicamente, o efeito da propagação da onda eletromagnética através de uma rede LC, trechos canônicos de uma linha de transmissão (daí o nome).

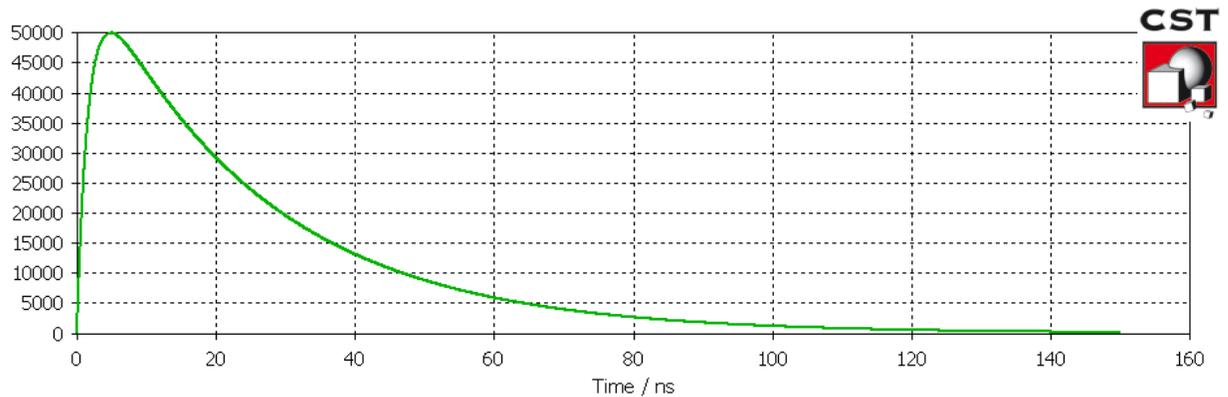


Figura 25 - Onda HEMP E1

Material	σ_r (S/m)	μ_r (H/m)
Prata	1.05	1
Cobre	1	1
Alumínio	0.61	1
Bronze	0.18	1
Aço Inoxidável (430)	0.02	500

Tabela 4 - Materiais utilizados nas simulações [44]

3.2.1.1 Painéis Finos Maciços

Para a obtenção da eficiência de blindagem, utilizou-se os parâmetros de espalhamento S_{21} , que descrevem a potência transferida da porta 1 para a porta 2. Entretanto, como deseja-se obter a potência atenuada, e não a recebida, bastou calcular-se o módulo do valor obtido através da simulação. Além disso, para fins comparativos, a Equação 5 foi implementada utilizando o software MathWorks Matlab[®] R2015a, calculando-se a curva de SE para o mesmo painel, materiais e intervalo de frequência. Com isso, os seguintes gráficos foram obtidos através da sobreposição da solução exata e simulada.

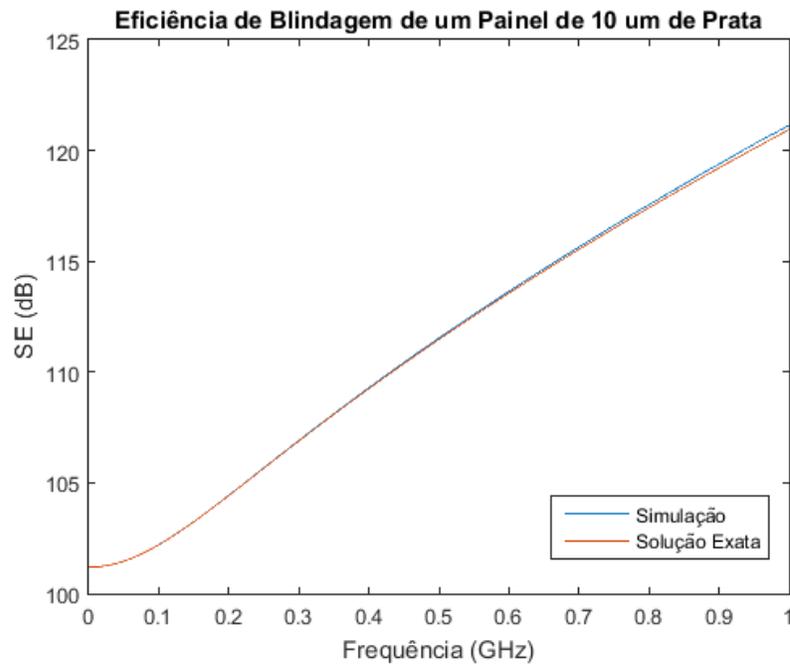


Figura 26 - Eficiência de blindagem de um painel de prata

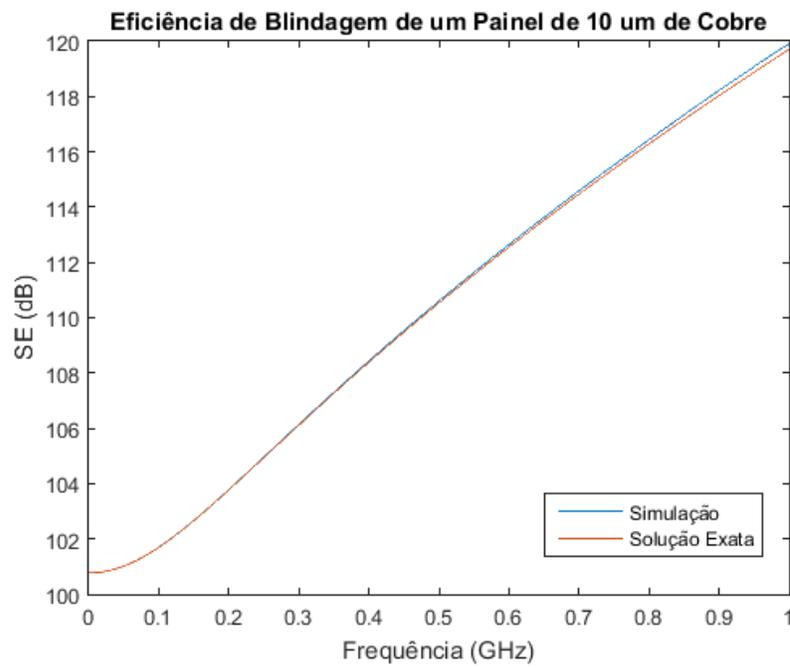


Figura 27 - Eficiência de blindagem de um painel de cobre

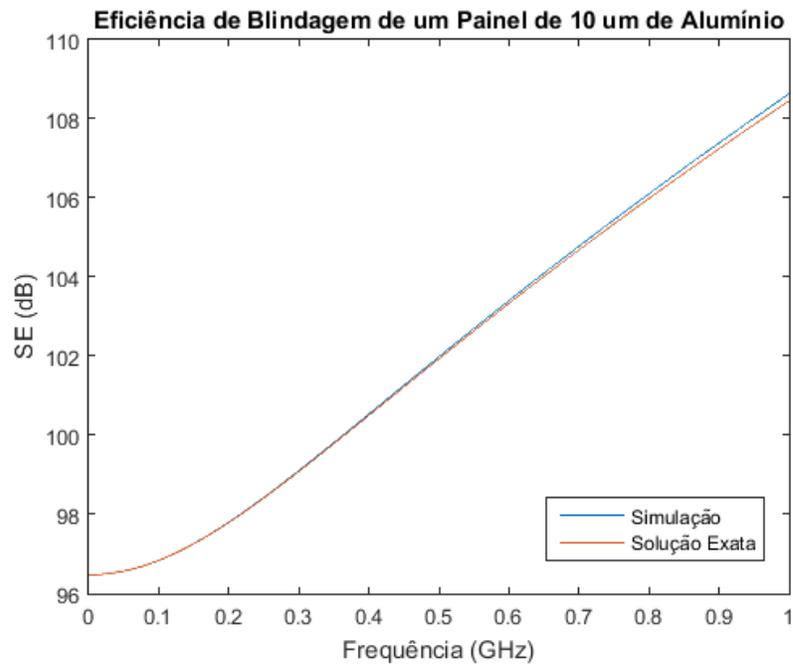


Figura 28 - Eficiência de blindagem de um painel de alumínio

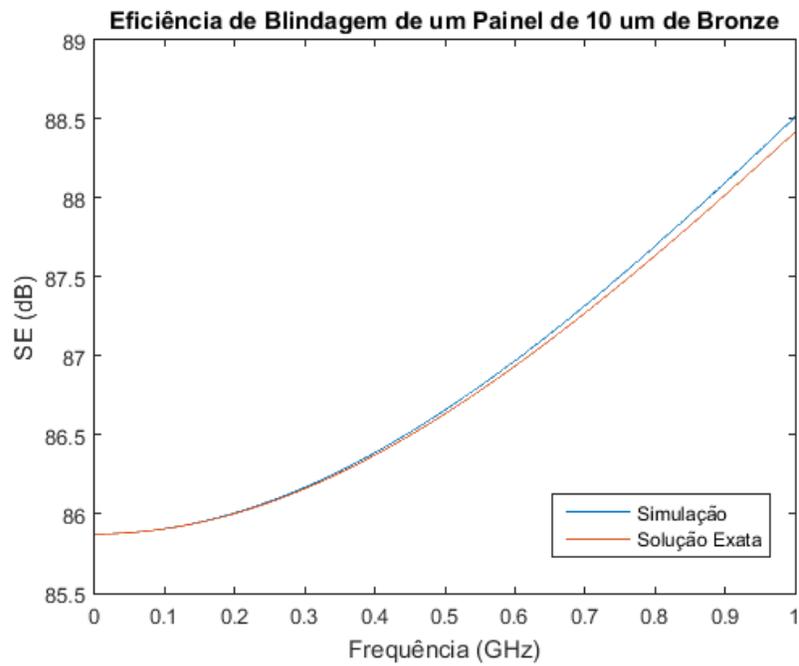


Figura 29 - Eficiência de blindagem de um painel de bronze

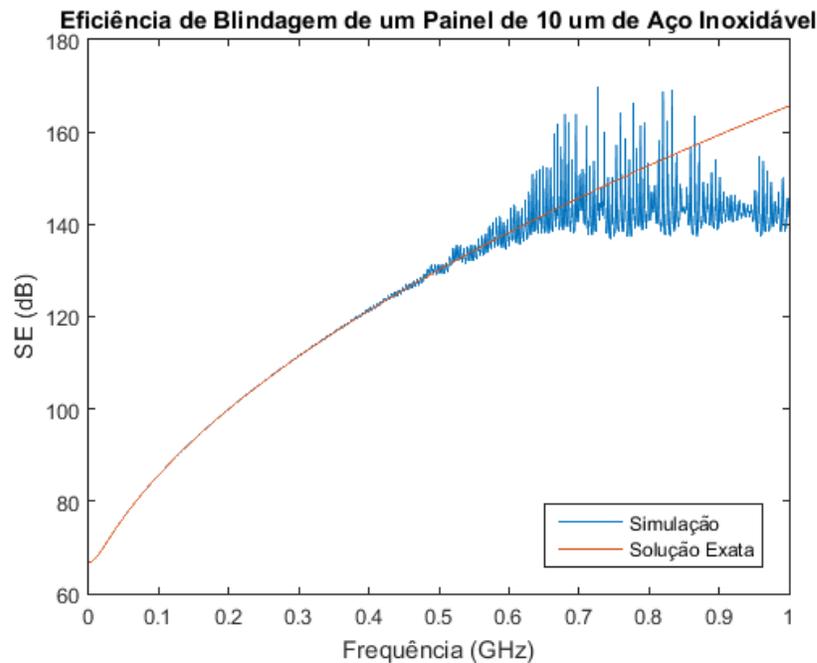


Figura 30 - Eficiência de blindagem de um pannel de aço inoxidável

Visualmente, é possível observar que a simulação coincide com os valores teóricos, com diferenças iniciando apenas nas faixas de frequências mais altas. Calculando-se o coeficiente de correlação entre os dados simulados e a solução exata, obteve-se o valor de 1.0000 para todas as comparações, exceto para o aço inoxidável, cujo valor resultante foi de 0.9683. As oscilações presentes na curva do aço inoxidável podem ter sido causadas por diversos fatores limitantes na configuração da simulação, tais como: quantidade de elementos na malha, tempo de excitação da onda HEMP IEC E1, proximidade à região de ruído numérico do software (aproximadamente -200 dB), entre outros. De qualquer forma, o alto coeficiente de correlação indica uma alta confiabilidade nos resultados simulados em relação à solução exata proposta por [44]. A figura a seguir ilustra uma sobreposição de todas as curvas de eficiência de blindagem simuladas.

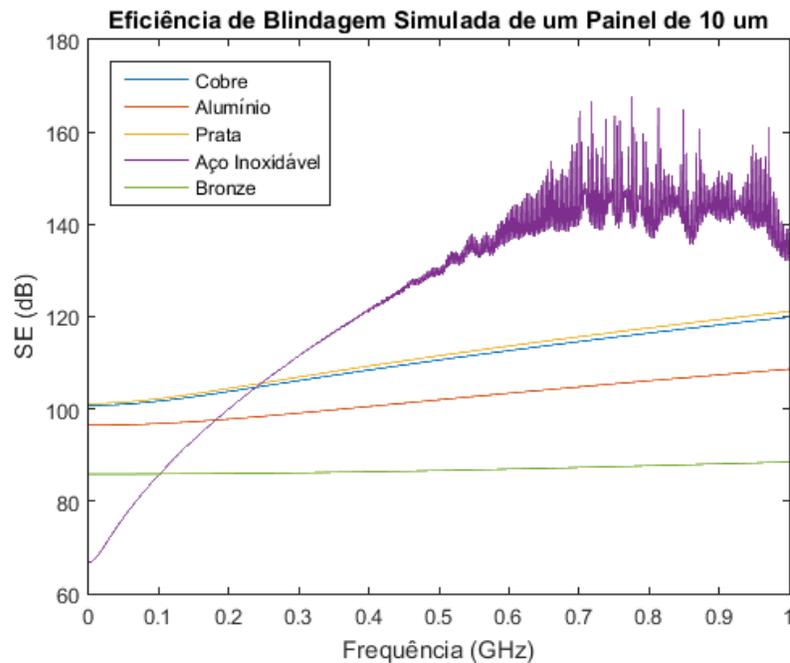


Figura 31 - Eficiência de blindagem para diferentes materiais

Nota-se que o aumento da condutividade elétrica do material aumenta a eficiência de blindagem do painel. Este comportamento está de acordo com os trabalhos existentes na literatura, visto que materiais condutivos são mais absorvedores. Em contraste, materiais magnéticos ($\mu_r > 1$) degradam as perdas por reflexão, conforme Equação 2, por exemplo no caso do aço inoxidável, cuja permeabilidade relativa é de 500. Entretanto, com o aumento da frequência, a perda por absorção se torna mais significativa, visto que a mesma é proporcional a $\mu_r f$. Essa característica, por sua vez, resulta em uma maior eficiência de blindagem em altas frequências.

A observação de que as características dos materiais pertinentes ao estudo – permissividade e permeabilidade complexas – são dispersivas (variam com frequência), e seus valores na prática são dificilmente conhecidos com precisão a não ser em casos especiais, sendo a respectiva medida complexa e necessitando em altas frequências sofisticados aparatos laboratoriais. [52]

3.2.1.2 Painéis Finos com Abertura Circular

Conforme verificou-se através das simulações anteriores, um painel maciço e fino de metal consegue fornecer uma blindagem eletromagnética de até 160 dB. Entretanto, na prática, dispositivos eletrônicos não são perfeitamente selados, possuindo aberturas para ventilação, passagem de cabos e visualização, ou seja, a chamada gaiola de Faraday é na prática dificilmente blindada na medida que se deseja. Com isso, foi considerado o mesmo painel anterior porém com uma abertura circular de raio r ($r = 5, 10, 15, 20$ e 25 cm) e única no centro do painel, conforme Figura 32. O material adotado para a simulação foi o cobre devido à alta eficiência de blindagem e baixo custo em relação à prata. O aço inoxidável, apesar de oferecer a maior eficiência de blindagem dentre os materiais, não foi utilizado como referência devido à imprecisão observada nos resultados em alta frequência. Os resultados obtidos com a utilização do cobre são ilustrados na Figura 33 abaixo.

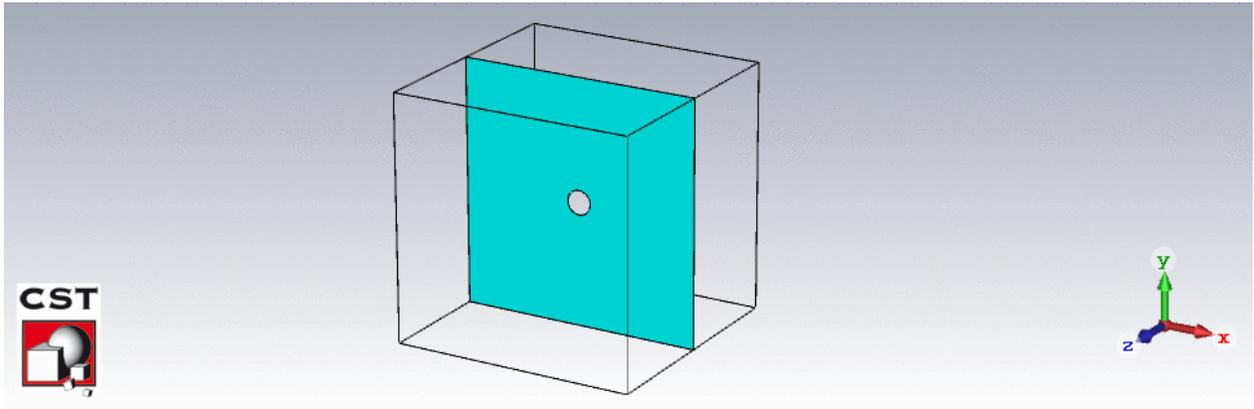


Figura 32 - Painel com abertura simulado

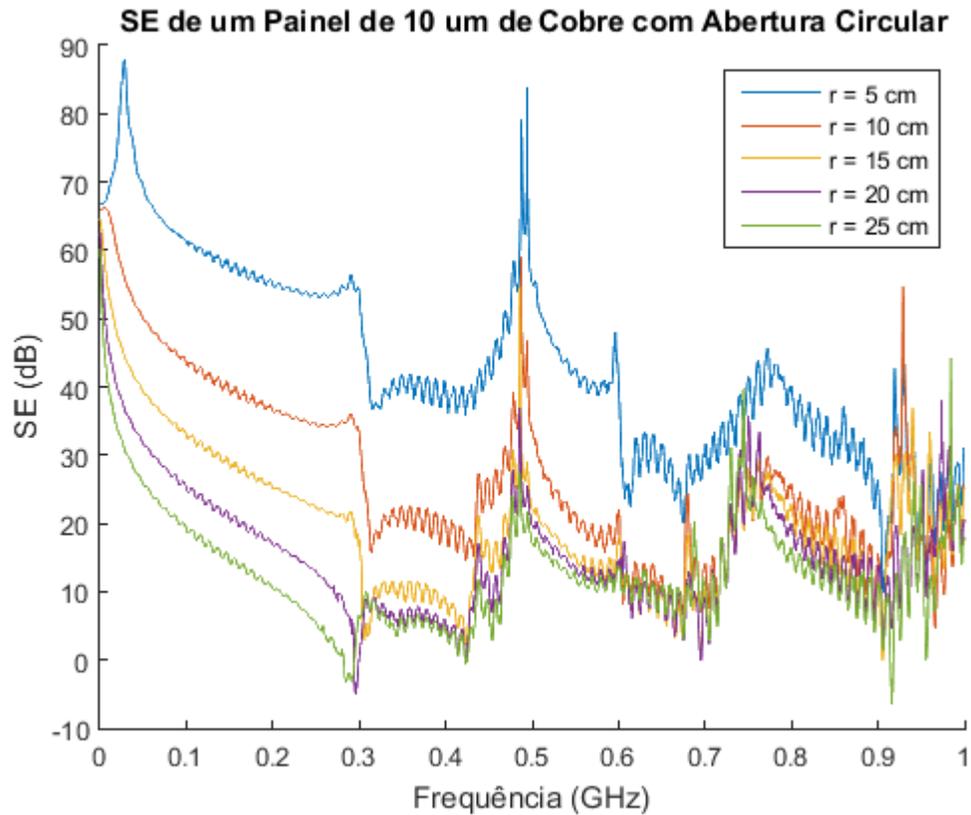


Figura 33 - Painel de cobre com abertura circular

Nota-se que a presença de uma abertura reduz drasticamente a eficiência de blindagem do painel. Isso ocorre porque um efeito de ressonância é inserido na resposta. Assim, algumas faixas de frequência possuem atenuação maior ou menor, sendo possível ao engenheiro projetar via simulação as dimensões dos furos para bloquear algum sinal particular (harmônico) que antecipadamente sabe-se que será presente no sistema. A Figura 34 e Figura 35 ilustram o efeito da abertura na blindagem do painel.

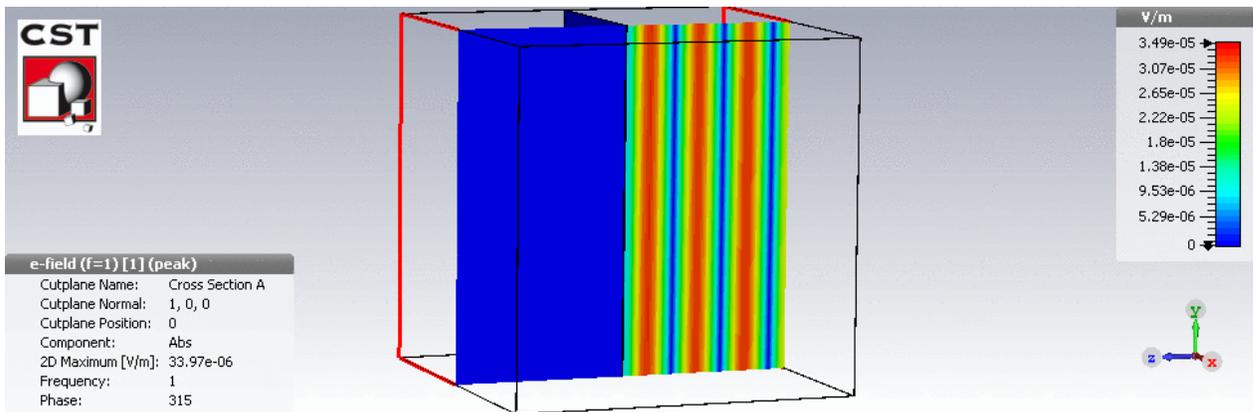


Figura 34 - Campo elétrico - Painel sem abertura

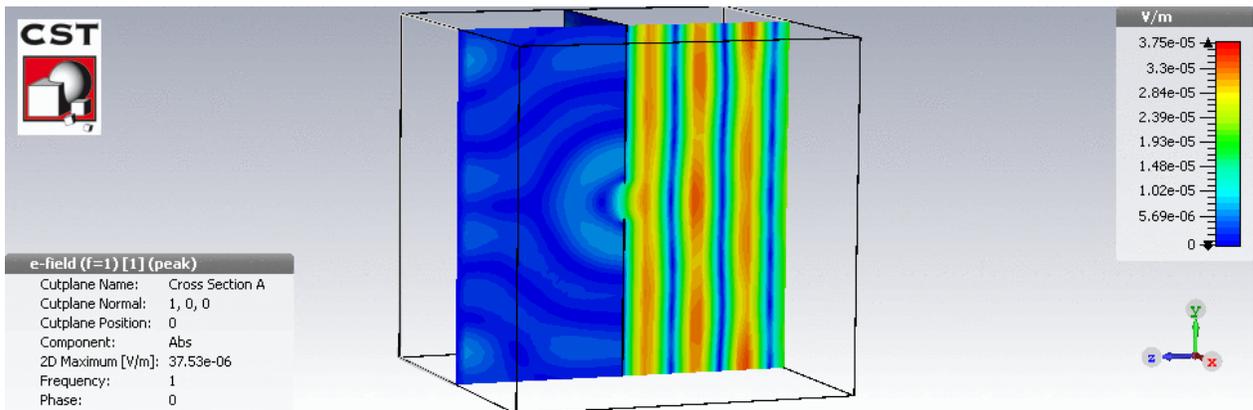


Figura 35 - Campo elétrico - Painel com abertura ($r = 5$ cm)

Na Figura 34 observa-se que o campo elétrico do lado esquerdo do painel é 0. A interface oferece blindagem suficiente para que a amplitude do campo seja reduzida a um valor desprezível. Conforme a Figura 27, a eficiência de blindagem de um painel de cobre de $10 \mu\text{m}$ em 1 GHz é aproximadamente 120 dB. Em contraste, na Figura 35 é possível observar a passagem do campo elétrico através da abertura, visto que, conforme a Figura 33, em 1 GHz, o painel com abertura circular de raio 5 cm possui uma eficiência de blindagem de aproximadamente apenas 30 dB.

3.2.1.3 Painéis Finos com WBC

Conforme exposto na seção 2.2.2, a redução na eficiência de blindagem de um painel com abertura pode ser atenuada caso seja inserida na abertura uma geometria de guia de onda. Partindo da simulação anterior, foi realizada uma comparação entre a blindagem de um painel

apenas com a abertura e um painel com guia de onda de profundidades diferentes. A Figura 36 exibe a configuração utilizada nas simulações desta seção.

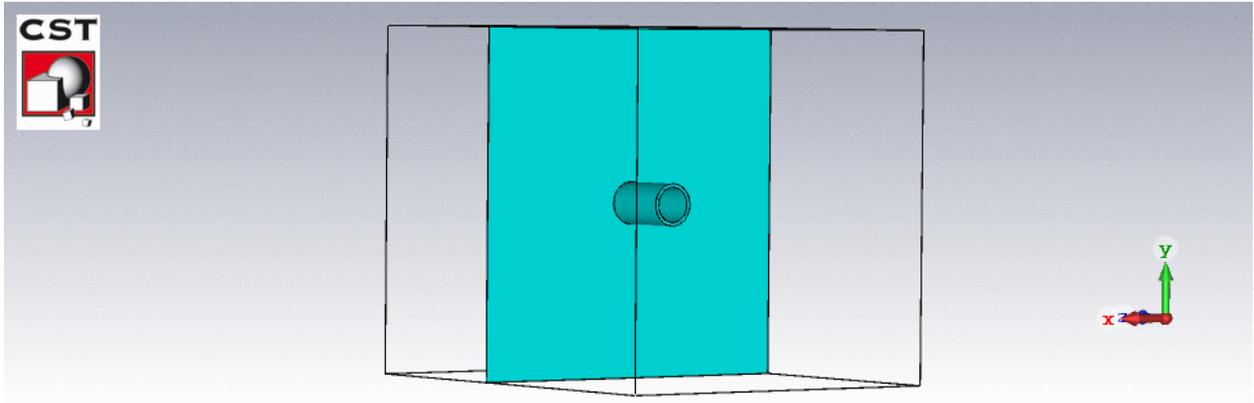


Figura 36 - Painel com WBC utilizado nas simulações

Considerando o painel com abertura de 5 cm, a frequência de corte de um guia de onda nessa abertura, segundo a Equação 13, é de aproximadamente 1.75 GHz. Como as simulações realizadas são até 1 GHz, a operação do guia de onda é mentida abaixo da frequência de corte. Testes foram realizados utilizando um guia de onda acoplado à abertura, com profundidade de 5, 10 e 20 cm. A Figura 37 exibe as diferentes curvas de eficiência de blindagem obtidas para as profundidades citadas.

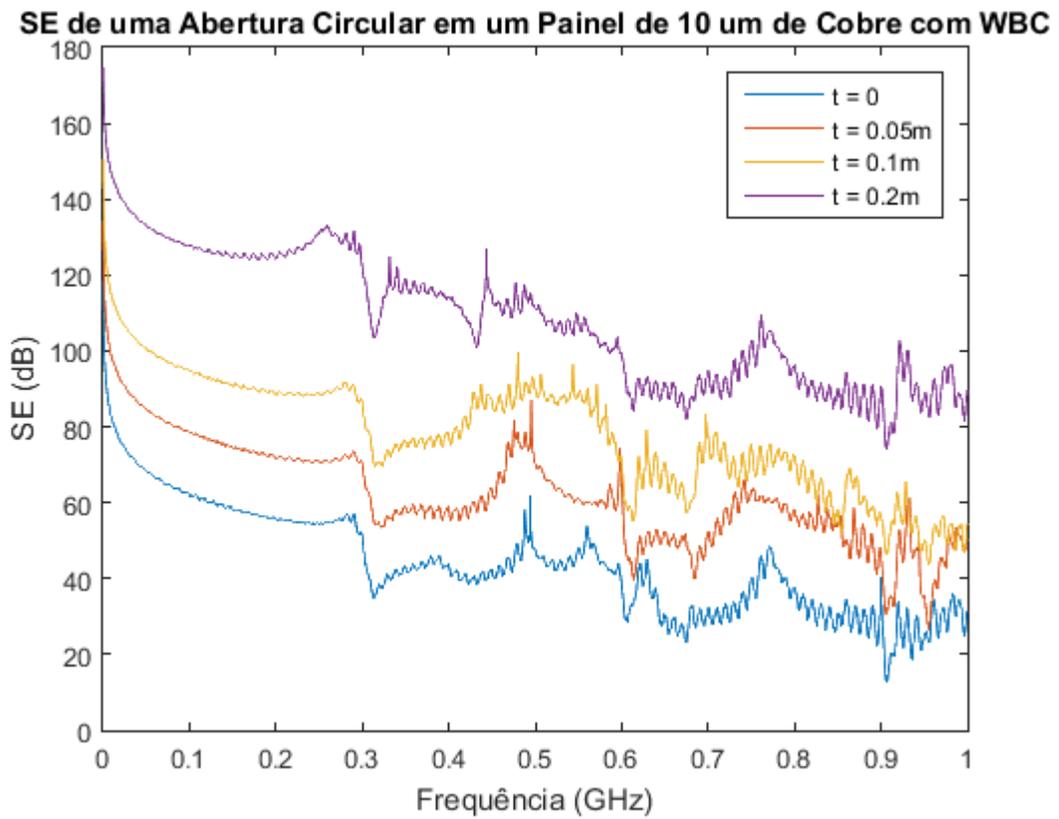


Figura 37 - Blindagem de um dispositivo WBC de cobre

A Figura 38 utiliza como exemplo a frequência de 500 MHz para ilustrar os resultados para a blindagem adicional devido à configuração de guia de onda.

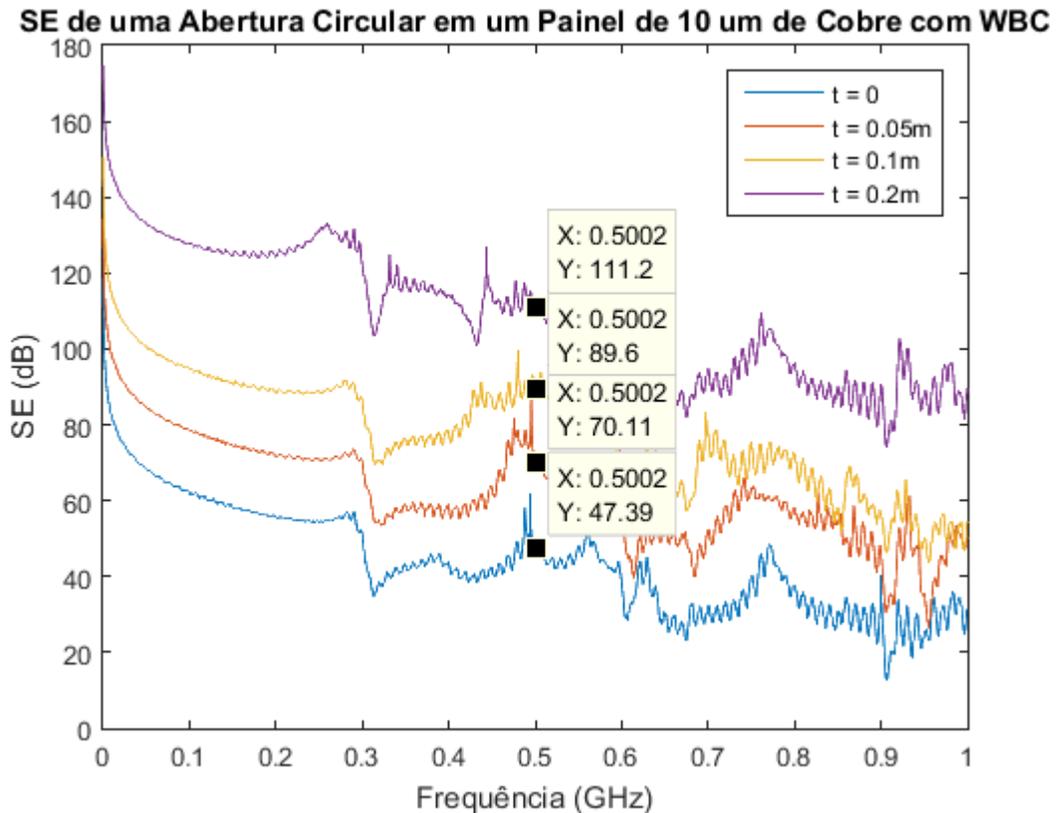


Figura 38 - Blindagem de um WBC em 500 MHz

Comparando-se os valores obtidos via simulação com os teóricos, calculados por meio da Equação 12, tem-se os resultados exibidos na tabela a seguir.

Profundidade do Guia de Onda [m]	Blindagem Adicional Simulada [dB]	Blindagem Adicional Teórica [dB]
0.05	23	16
0.10	42	32
0.20	64	64

Tabela 5 - Comparação da blindagem de um WBC simulada e teórica

Em média, houve um desvio de 15% do valor simulado em relação ao teórico. A Figura 39, Figura 40, Figura 41 e Figura 42 exibem o comportamento do campo elétrico em 1 GHz na abertura/fronteira do painel utilizando o WBC de diferentes profundidades e sem a presença do mesmo.

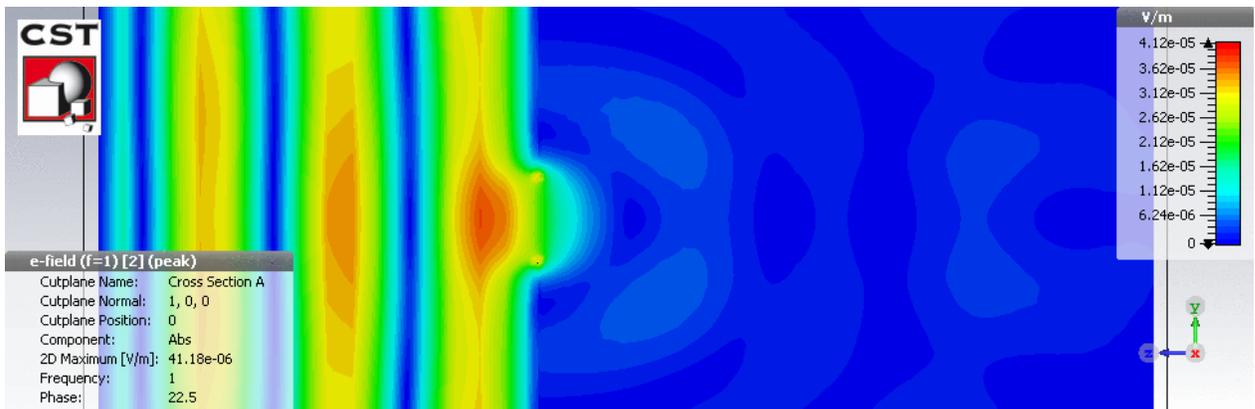


Figura 39 - Campo elétrico em 1 GHz em um painel com abertura circular

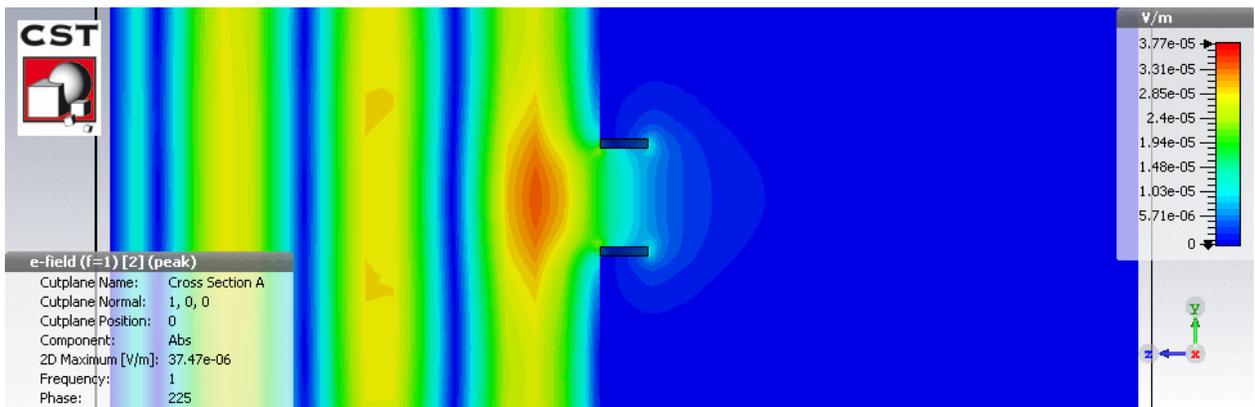


Figura 40 - Campo elétrico em 1 GHz em um painel com WBC de profundidade 0.05 m

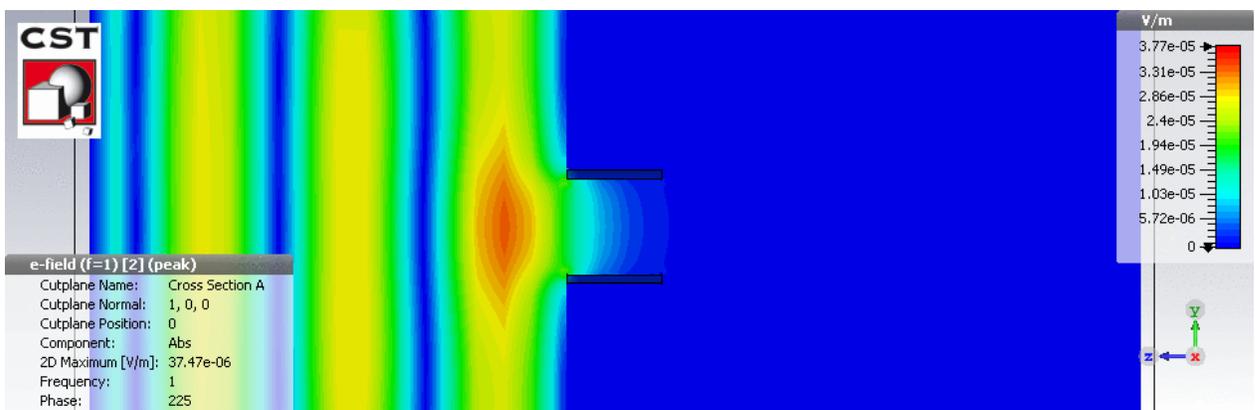


Figura 41 - Campo elétrico em 1 GHz em um painel com WBC de profundidade 0.1 m

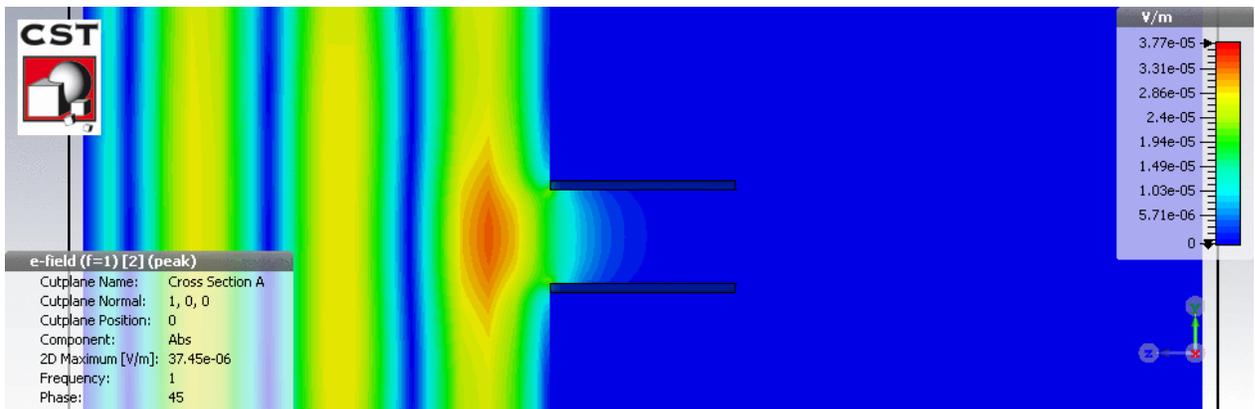


Figura 42 - Campo elétrico em 1 GHz em um painel com WBC de profundidade 0.2 m

Conforme pode-se observar na Figura 39, há um vazamento do campo elétrico para dentro do painel através da abertura circular. Com a adição de um guia de onda circular, o campo elétrico não atravessa mais o painel, conforme Figura 42. Desta forma, comprova-se a eficiência da geometria de guia de onda abaixo da frequência de corte para a blindagem eletromagnética de painéis com aberturas.

3.2.1.4 Painéis Finos Perfeitamente Selados com Fios

Nesta seção foi simulado um painel perfeitamente selado de cobre com dois fios de comprimento total 80 cm, raio 1 mm e material condutor perfeito - um de cada lado do painel - unidos por um elemento concentrado de resistência 0.01Ω simulando um curto (Figura 43). A Figura 44 exhibe a eficiência de blindagem do painel desenvolvido.

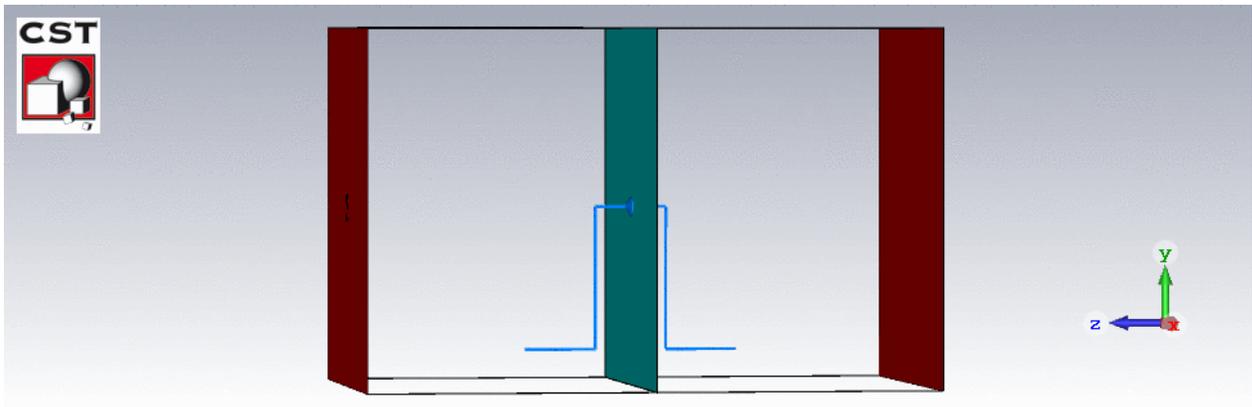


Figura 43 - Painel de cobre perfeitamente selado com dois fios

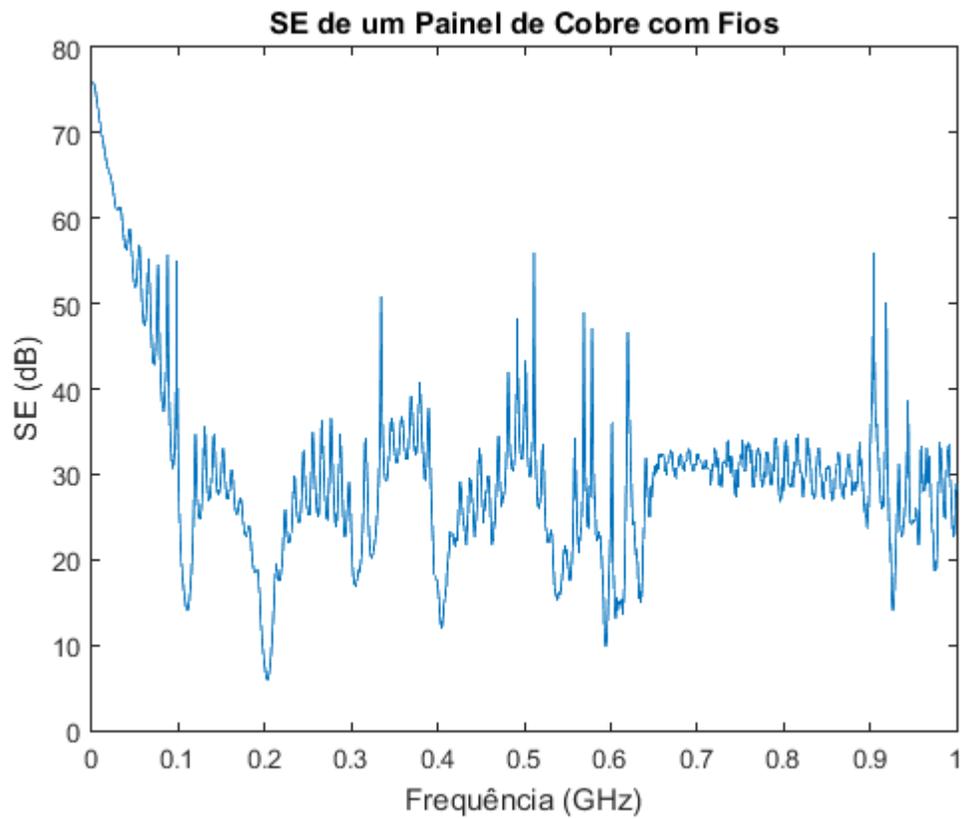


Figura 44 - SE de um painel perfeitamente selado com dois fios

Conforme verificado no gráfico acima, mesmo o painel sendo perfeitamente selado ocorre uma redução na eficiência de blindagem do mesmo. A Figura 45 exibe o comportamento do campo elétrico em 1 GHz nesta configuração.

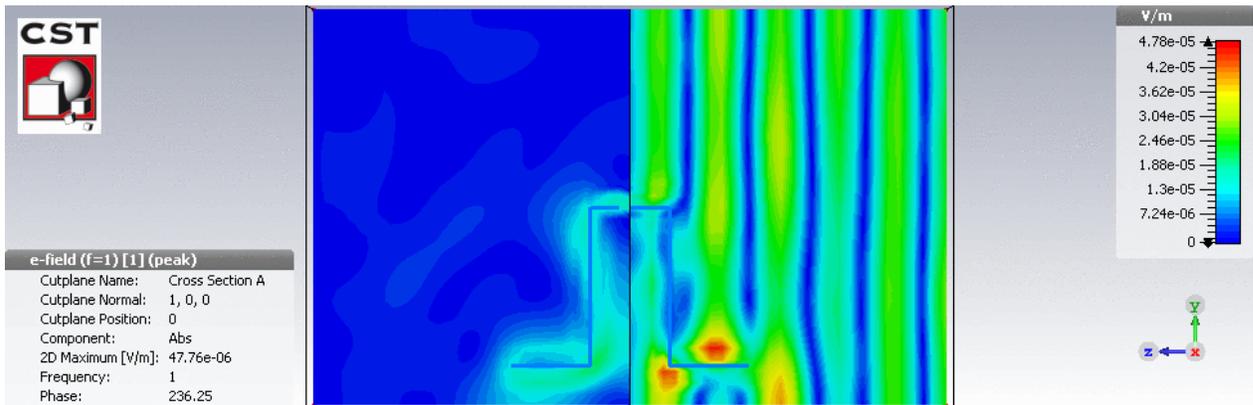


Figura 45 - Campo elétrico no painel selado e com fios

Nota-se a partir da figura acima que há um acoplamento do campo elétrico no fio iluminado pela onda HEMP, resultando em uma transmissão de energia através do cabo e conseqüente redução em sua blindagem.

4. CONCLUSÃO

Através deste trabalho foi possível realizar uma contextualização histórica e científica em relação aos efeitos dos pulsos eletromagnéticos na infraestrutura crítica. Os diversos relatos envolvendo acidentes causados por interferência eletromagnética intencional e não intencional reforçam a importância do investimento em mecanismos de blindagem contra esses efeitos.

Um exemplo de cenário onde uma onda HEMP ilumina uma série infinita de linhas de transmissão exibiu acoplamentos de até 30 kV em estruturas próximas ao solo e um acoplamento de até 10 kV até 150 ns após a iluminação da onda, sendo as maiores amplitudes na faixa de 0-1 MHz. Considerando a área de cobertura de uma onda HEMP, este cenário teria como consequência o colapso total do sistema de energia elétrica de um grande nação afetando indústria, bancos, hospitais e todos os dispositivos eletrônicos sem uma blindagem adequada contra esse tipo de interferência intencional.

Em relação à blindagem, foram modelados diferentes cenários envolvendo painéis finos. Os painéis finos maciços exibiram a maior blindagem (até 160 dB) porém não são práticos por serem perfeitamente selados. As configurações de painel com fio e com abertura assemelham-se à blindagem de dispositivos reais, onde há a presença de furos para ventilação e passagem de cabos, porém exibem uma queda considerável na eficiência de blindagem (de 160 dB para 30 dB para o painel com abertura de 5 cm). Entretanto, para o projeto da blindagem deve-se levar em conta a frequência de operação em relação ao tamanho das aberturas, evitando que as mesmas se tornem elementos radiantes.

Por fim, a configuração WBC exibiu uma melhora na blindagem de até 64 dB em relação à abertura circular sem profundidade, tornando-se o mais recomendado por ser prático e simultaneamente reduzir as perdas de eficiência de blindagem geradas pela presença de aberturas no invólucro.

REFERÊNCIAS

- [1] S. Van Dulken, *Inventing the 19th Century: 100 Inventions That Shaped the Victorian Age*. New York: New York University Press, 2001.
- [2] National Academy Engineering. (2016) Electrification History 1 - Early Years. [Online]. <http://www.greatachievements.org/?id=2988>
- [3] (2014) Institute for Local Self-Reliance. [Online]. <https://ilsr.org/capita-electricity-permanently-flat-u-s/>
- [4] J. Macaulay, L. Buckalew, and G. Chung, "Internet of Things in Logistics," Troisdorf, 2015.
- [5] Gartner, Forecast: Internet of Things, Endpoints, and Associated Services, 2014.
- [6] "Project Officer's Interim Report: STARFISH Prime. Report ADA955694," 1962.
- [7] United Nations Office for Disarmament Affairs - Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty. [Online]. <http://disarmament.un.org/treaties/t/ctbt>
- [8] "ITU Radio Regulations, Section IV. Radio Stations and Systems - Article 1.166, definition: interference".
- [9] Chaudhary M. Analysis of EMI/EMC Testings on Electrical Equipments. [Online]. <http://www.slideshare.net/meenu1190/emiemc>
- [10] J.G. Kappenman, "Impact of Severe Solar Flares, Nuclear EMP and Intentional EMI on Electric Grids," in *Electric Infrastructure Security Summit*, London, 2002.
- [11] D. Huff, "Reliability Standards for Geomagnetic Disturbances," 2012.
- [12] E.F Vance and M.A. Uman, "Differences Between Lightning and Nuclear Electromagnetic Pulses Interactions," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 30, no. 1, February 1988.
- [13] A. Geri and G.M. Veca, "A Complete Lightning Protection System Simulation in the EMI Analysis," in *IEEE 1991 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, New Jersey, 1991.
- [14] (2015) Repository of Industrial Security Incidents. [Online]. <http://www.risidata.com/Database/Detail/navy-radar-shuts-down-scada-systems>
- [15] J.S.F. Jr et al., "Report of the Commission to Assess the Threat of the United States from

Electromagnetic Pulse (EMP) Attack," 2008.

- [16] R.D. Leach and M.B. Alexander, "Electronic Systems and Anomalies Attributed to Electromagnetic Interference," Alabama, 1995.
- [17] J.L. Silverberg, "Performance Degradation of Electronical Medical Devices Due to Electromagnetic Interference," *Compliance Engineering*, pp. 25-39, 1993.
- [18] H. Zell. (2009) The Day the Sun Brought Darkness. [Online]. http://www.nasa.gov/topics/earth/features/sun_darkness.html
- [19] R.B. Britt. (2009) 150 Years Ago: The Worst Solar Storm Ever. [Online]. <http://www.space.com/7224-150-years-worst-solar-storm.html>
- [20] B.O. Connor, "Atlas Centaur (AC-67) Lightning Strike Mishap 1987," in *Leadership VITS Meeting*, 2007. [Online]. <https://sma.nasa.gov/docs/default-source/safety-messages/safetymessage-2007-03-01-lightningstrikemishap1987-vits.pdf?sfvrsn=6>
- [21] R. Bernstein, "EPRI," 1997.
- [22] P. Norman, "The U.S. Navy Electronic Warfare," in *United States Naval Institute Proceedings*, 1979.
- [23] G. Ni, B. Gao, and J. Lu, "Research on High Power Microwave Weapons," in *2005 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings*, vol. 2, 2005.
- [24] S.C. Tucker, *U.S. Conflicts in the 21st Century: Afghanistan War, Iraq War and the War on Terror.*: ABC-CLIO, 2015.
- [25] R.A Cairns and A.D.R. Phelps, *Generation and Application of High Power Microwaves*. Bristol: J.W. Arrowsmith Ltd, 1977.
- [26] K.K. Sharma, *Fundamental of Microwave & Radar Engineering.*: S Chand, 2016.
- [27] V. L. Granastein and I. Alexeff, *High-Power Microwave Sources*. Boston, Massachusetts: Artech House, 1987.
- [28] (2012) Swiss Plasma Center - Gyrotrons. [Online]. <http://spc.epfl.ch/TCV-gyrotrons>
- [29] L. Dražan and R. Vrana, "Axial Vircator for Electronic Warfare Applications," *Radioengineering*, vol. 4, no. 18, pp. 618-626, 2009.

- [30] J.M. Parson et al., "A Frequency Stable Vacuum-Sealed Tube High-Power Microwave Vircator Operated at 500 Hz," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 36, no. 5, 2015.
- [31] J. Benford, J.A. Swegle, and E. Schamiloglu, *High Power Microwaves.*: Taylor and Francis, 2007.
- [32] V.G. Baryshevsky. (2014) Research of Extreme Matter State Under Ultra-High Temperature and Pressure Using Magnetic Cumulation of Energy. [Online]. <http://inp.bsu.by/english/research/fcg.htm>
- [33] K.T. Bainbridge, "Trinity," 1978.
- [34] F.P Gladeck et al., "Operation Hardtack I," 1982.
- [35] C. L. Longmire, "On the Electromagnetic Pulse Produced by Nuclear Explosions," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 20, no. 1, 1978.
- [36] A. Jacobsen, *The Pentagon's Brain: An Uncensored History of DARPA, America's Top-Secret Military Research Agency.*: Little, Brown and Company, 2015.
- [37] R. Hoad and W.A. Radasky, "Progress in High-Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) Standardization," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 55, no. 3, 2013.
- [38] *EMP Engineering and Design Principles*. Whippany, New Jersey: Bell Telephone Labs, 1975.
- [39] "Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 2: Environment - Section 9: Description of HEMP Environment - Radiated Disturbance," 2002.
- [40] A. Richardt, B. Hülseweh, B. Niemeyer, and F. Sabath, *CBRN Protection: Managing the Threat of Chemical, Biological, Radioactive and Nuclear Weapons.*: Wiley-VCH, 2013.
- [41] G. Smith, "Electromagnetic Pulse Threat," in *House National Security Committee*, 1997.
- [42] V.I. Khalturin, T.G. Rautian, P.G. Richards, W.S. Leith, and S. William, "A Review of Nuclear Testing by the Soviet Union at Novaya Zemlya," *Science and Global Security*, 1990.
- [43] D. A. Weston, *Electromagnetic Compatibility: Principles and Applications*. New York, New York: Marcel Dekker, Inc., 2001.
- [44] C.R. Paul, *Introduction to Electromagnetic Compatibility*. Hoboken, New Jersey: John

Wiley & Sons, 2006.

- [45] W.O. Henry, *Electromagnetic Compatibility Engineering*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2009.
- [46] P.G. Ciarlet, *Handbook of Numerical Analysis: Special Volume - Numerical Methods in Electromagnetics*, XIII ed. Paris, França: Elsevier, 2005.
- [47] A. Bondeson, T. Rylander, and P.r Ingelström, *Computational Electromagnetics.*: Springer, 2005.
- [48] (2016) CST - Computer Simulation Technology. [Online]. <https://www.cst.com/>
- [49] Z. Rahimi, "The Finite Integration Technique (FIT) and the Application in Lithography Simulation," Technischen Fakultät der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Nürnberg, Tese de Doutorado 2011.
- [50] M. B. Perotoni and R. M. Barreto, "Resolving Safety-Critical EMI Problems Between AM Transmitters and Cranes Using a 3D Field Solver," *High Frequency Electronics*, pp. 22-32, 2014.
- [51] D. Johns, "Designing Building Structures for Protection Against EMP and Lightning," *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, pp. 50-58, 2016.
- [52] L.F. Chen, C.K. Ong, C.P. Neo, V.V. Varadan, and V.K. Varadan, *Microwave Electronics: Measurement and Materials Characterization.*: Wiley, 2004.
- [53] D.M. Pozar, *Microwave Engineering*, Quarta Edição ed.: John Wiley & Sons, 2012.

APÊNDICE I - IMPLEMENTAÇÃO DA SOLUÇÃO EXATA DA EFICIÊNCIA DE BLINDAGEM

Impedância Intrínseca

- η : Impedância intrínseca da barreira, descrita por:

$$\eta = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}} \text{ [\Omega]}$$

Onde μ é a permeabilidade magnética do material que constitui a barreira, em henrys/metro ϵ é a permissividade do material que constitui a barreira em farads/metro, ω é a frequência angular em hertz e σ é a condutividade elétrica do material em ohms/metro.

```

%          UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC - INFORMATION ENGINEERING
%
%Function:   Intrinsic Impedance (ohms)
%Authors:   Nicolas Souza Lopes

function [n] = intrinsic_impedance(f, mi, sigma, e)
    n = sqrt((1i*2*pi*f*mi)/(sigma + 1i*2*pi*f*e));
end

```

Variável de Entrada	Descrição
F	Frequência
Mi	Permeabilidade magnética do material
Sigma	Condutividade elétrica do material
E	Permissividade do material

Constante de Propagação

- γ : Constante de propagação, descrita por:

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)}$$

Onde μ é a permeabilidade magnética do material que constitui a barreira, em henrys/metro ϵ é a permissividade do material que constitui a barreira em farads/metro, ω é a frequência angular em hertz e σ é a condutividade elétrica do material em ohms/metro.

```

%           UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC - INFORMATION ENGINEERING
%
%Function:   Propagation Constant
%Authors:   Nicolas Souza Lopes

function [ gamma ] = propagation_constant(f,sigma,mi,e)
    gamma = sqrt(1i*2*pi*f*mi*(sigma + 1i*2*pi*f*e));
end

```

Variável de Entrada	Descrição
F	Frequência
Mi	Permeabilidade magnética do material
Sigma	Condutividade elétrica do material
E	Permissividade do material

Efeito Pelicular

- δ : Efeito pelicular, descrito por:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \text{ [m]}$$

Onde μ é a permeabilidade magnética do material que constitui a barreira, em henrys/metro, f é a frequência da onda incidente em hertz e σ é a condutividade elétrica do material em ohms/metro.

```

%           UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC - INFORMATION ENGINEERING
%
%Function:   Skin Depth (meters)
%Authors:   Nicolas Souza Lopes

function [delta] = skin_depth(f, mi, sigma)
    delta = 1/sqrt(pi*f*mi*sigma);
end

```

Variável de Entrada	Descrição
F	Frequência
Mi	Permeabilidade magnética do material
Sigma	Condutividade elétrica do material

Eficiência de Blindagem

$$\frac{E_i}{E_t} = \frac{(\eta_0 + \eta)^2}{4\eta_0\eta} \left[1 - \left(\frac{\eta_0 - \eta}{\eta_0 + \eta} \right)^2 e^{-2t/\delta} e^{-j2\beta t} \right] e^{t/\delta} e^{j\beta t} e^{-j\beta_0 t} \text{ [dB]}$$

Onde t é a espessura da barreira, em mils, η_0 a impedância intrínseca do espaço livre (377Ω), η a impedância intrínseca da barreira, em ohms, β a parte imaginária da constante de propagação, β_0 a constante de fase do espaço livre e δ o efeito pelicular, em metros.

```

%          UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC - INFORMATION ENGINEERING
%
%Function:   Shielding Effectiveness - Exact Solution (dB)
%Authors:   Nicolas Souza Lopes

function [ se ] = shielding_effectiveness(f,n,delta,gamma,t)
    mi_0 = 4*pi*10^-7;
    e_0 = 8.854187817*10^-12;

    beta_0 = 2*pi*f*sqrt(mi_0*e_0);
    n_0 = sqrt(mi_0/e_0);

    F1 = ((n_0 + n)^2)/(4*n_0*n);
    F2 = (1 - (((n_0 - n)/(n_0 + n))^2)*exp((-2*t/delta)-
    (1i*2*imag(gamma)*t)));
    F3 = exp((t/delta)-(1i*imag(gamma)*t)-(1i*beta_0*t));

    se = F1*F2*F3;
end

```

Variável de Entrada	Descrição
f	Frequência
n	Impedância intrínseca da barreira
delta	Efeito pelicular
gamma	Constante de propagação
t	Espessura da barreira