

Artigo

Interface gráfica para simulação da perda por reflexão de materiais absorvedores de radiação eletromagnética.

Divani Barbosa Gavinier^[1], Lucas Barbosa Nascimento^[1,2], Glauber Rogério Lanziloti Alves^[1,2], Bráulio Haruo Kondo Lopes^[2], Jorge Tadao Matsushima^[3], Maurício Ribeiro Baldan^[2]

^[1] Centro Paula Souza, Faculdade de Tecnologia de Taubaté, Taubaté/SP – Brasil; divani.gavinier@fatec.sp.gov.br

^[2] Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos/SP – Brasil

^[3] Centro Paula Souza, Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos, São José dos Campos/SP – Brasil

Recebido: 14/05/2025;

Aceito: 07/07/2025;

Publicado: dia/mês/ano.

Resumo: O parâmetro de perda por reflexão dos Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (MARE) é de grande interesse científico, tanto do ponto de vista de medidas de desempenho quanto de aplicações práticas em diversas áreas como telecomunicações, ciência de materiais, saúde, segurança militar e de defesa. Esse parâmetro é uma medida quantitativa que descreve a capacidade do material de atenuar a onda incidente. Em laboratório, sua determinação envolve a obtenção de dados do MARE por meio de um equipamento denominado Analisador de Rede Vetorial (VNA), a partir dos quais a perda por reflexão é calculada. Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma interface gráfica na internet (GUI web) para apoiar os pesquisadores no cálculo e simulação da perda por reflexão dos materiais analisados pelo VNA. A interface desenvolvida oferece praticidade, possibilita a rápida simulação dos resultados e facilita a análise por meio de gráficos interativos e dinâmicos. Além disso, sua simplicidade de uso proporciona uma experiência intuitiva, tornando o processo mais acessível aos pesquisadores envolvidos na fabricação de MARE. A validação dos resultados obtidos pela interface gráfica é realizada por meio do *software* comercial FEKO, garantindo a precisão e a confiabilidade das análises conduzidas pelo sistema proposto.

Palavras-chave: MARE; VNA; “perda por reflexão”.

Abstract: The reflection loss parameter of Electromagnetic (EM) absorbing materials is of great scientific interest, both for assessing performance and for practical applications in areas such as telecommunications, materials science, healthcare, and military and defense security. This parameter provides a quantitative measure of a material's ability to attenuate incident electromagnetic waves. In laboratory settings, this parameter is determined using a Vector Network Analyzer (VNA), which collects the necessary data to calculate reflection loss. This study aims to develop a web-based Graphical User Interface (GUI) to assist researchers in calculating and simulating the reflection loss of materials analyzed with the VNA. The development interface offers convenience, enables rapid simulations, and facilitates data interpretation through interactive and dynamic graphs. Furthermore, its user-friendly design provides an intuitive experience, making the process more accessible to researchers involved in the development of EM absorbing materials. The results obtained through the GUI are validated using the commercial software FEKO, ensuring accuracy and reliability in the analyses performed by the proposed system.

Key-words: EM; VNA; reflection loss.

1. INTRODUÇÃO

Os Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (MARE) desempenham um papel crucial em uma variedade de aplicações científicas e tecnológicas [1-5], sendo o cálculo do parâmetro de perda por reflexão um aspecto central na avaliação de seu desempenho. Este parâmetro quantifica a radiação eletromagnética refletida por um material quando uma onda eletromagnética incide sobre sua superfície. Geralmente expresso em decibéis (dB), ele indica a eficiência do material em atenuar a onda incidente, quanto mais negativa for o valor de perda por reflexão, maior será a absorção da radiação pelo material, o que pode ser desejável ou não,

dependendo da aplicação. Como por exemplo, esse mecanismo é explorado de forma diversificada: Fionov et al. [2] usou para otimizar compósitos poliméricos com propriedades dielétricas e magnéticas para reduzir reflexões em aplicações de compatibilidade eletromagnética; Gutierrez et al. [3] controlaram a perda por reflexão em filmes de grafeno-cobre ajustando a condutividade; Michaels [4] abordou a redução da reflexão em telecomunicações para mitigar riscos à saúde; Ananth et al. [5] compararam a eficiência da absorção de micro-ondas de materiais à base de RGO (óxido de grafeno reduzido) e GNP (grafeno nanoplaquetas), variando a espessura; Lopes et al. [6] desenvolveram compósitos híbridos (nanotubos de carbono/ferrita/ferrocarbonila) para otimizar a reflexão e absorção na banda X; Ma et al. [7] projetaram estruturas 3D de Co_3O_4 -grafeno com porosidade para induzir múltiplas reflexões internas; e Xu et al. [8] modificaram a morfologia de híbridos grafeno-Ni visando otimizar a relação entre reflexão e absorção. Esses estudos ilustram como a perda por reflexão pode ser ajustada conforme a necessidade de aplicação, seja para blindagem eletromagnética, tecnologias *stealth* ou proteção em telecomunicações [1].

A análise da perda por reflexão de MARE requer o uso de um analisador de rede vetorial (conhecido pela sigla VNA), amplamente empregado em ambientes laboratoriais para obter os valores de permissividade elétrica e permeabilidade magnética dos materiais em função da frequência da onda radiada. No entanto, seu cálculo envolve operações complexas, com o uso de números imaginários e funções hiperbólicas, sendo frequentemente realizado manualmente ou com auxílio de *softwares* comerciais.

Este trabalho propõe facilitar esse processo de cálculo otimizando a interpretação dos dados e acelerando o desenvolvimento de materiais, ao mesmo tempo em que aumenta a precisão e a eficiência das análises. A automatização dessas etapas permite que os pesquisadores concentrem seus esforços na avaliação do desempenho e na aplicação prática dos MARE, ou seja, a simplificação desses processos pode acelerar o ciclo de testes e inovações, promovendo avanços significativos em tecnologias aplicadas às telecomunicações, à segurança e à saúde. Com esse objetivo, o presente trabalho propõe uma interface gráfica *web* que torna mais acessível e interativo o cálculo e a simulação da perda por reflexão em MARE. A plataforma permite que os pesquisadores visualizem os resultados, de forma interativa, em função da espessura e da frequência de forma gráfica, interativa e dinâmica. Além disso, os resultados obtidos pela interface foram validados com o *software* comercial FEKO (Altair), assegurando sua precisão e confiabilidade.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Analisador de Rede Vetorial

Um analisador de rede vetorial (VNA, do inglês *Vector Network Analyzer*), é um equipamento usado para medir as propriedades de redes de radiofrequência e micro-ondas. Neste trabalho, foi utilizado o modelo N5232A PNA-L da empresa *Keysight Technologies* acoplado ao guia de onda retangular WR 90, como apresentado na Figura 1. O VNA é essencial para a caracterização e os testes de materiais que compõem antenas, filtros, amplificadores e circuitos de alta frequência. Por meio do VNA, obtêm-se as medidas de parâmetros como a magnitude e a fase das ondas refletidas e transmitidas, permitindo uma análise detalhada do desempenho e do comportamento dos dispositivos sob teste. Este equipamento é amplamente utilizado nas indústrias de telecomunicações, defesa, eletrônica e pesquisa científica. A Figura 1(b) apresenta duas imagens: a primeira mostra o VNA conectado aos cabos transmissores e ao guia de onda retangular, destacando o local onde se encontra o *offset* (porta amostra); a segunda apresenta uma vista frontal da porta amostra, indicando onde posicionar o material a ser analisado, com as devidas dimensões, bem como a placa metálica que fica posicionada atrás da amostra.

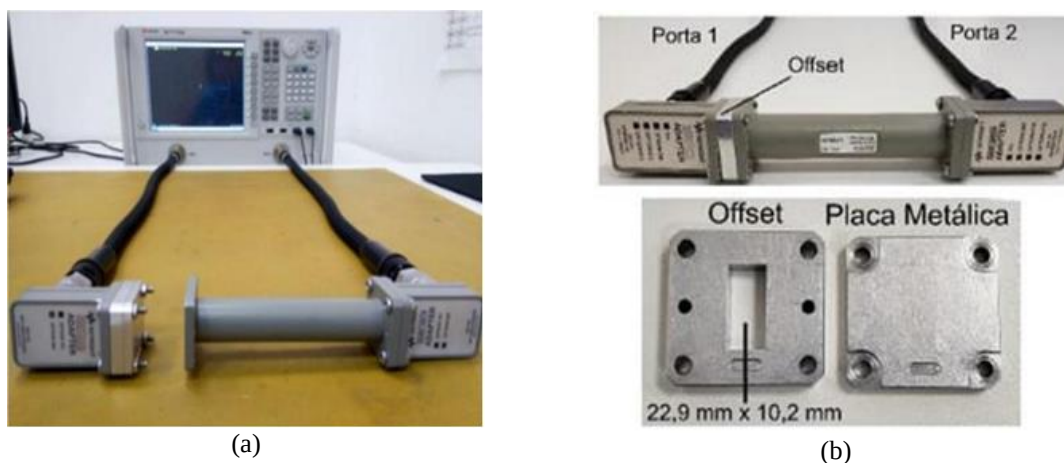


FIGURA 1. (a) Fotografia do equipamento VNA. (b) Fotografia da vista frontal do porta amostra (*Offset*) e da placa metálica utilizada para medida (autoria própria).

A metodologia de análise consiste em posicionar uma placa metálica atrás da amostra, com a função de refletir a onda eletromagnética incidente. Nessa configuração, o equipamento quantifica, por meio do parâmetro de espalhamento S_{11} , a razão entre a amplitude da onda refletida e da onda incidente na porta 1 do VNA. A magnitude de S_{11} está diretamente relacionada às propriedades eletromagnéticas do material analisado, especificamente à sua permissividade elétrica e permeabilidade magnética.

Tais propriedades eletromagnéticas dos materiais, permissividade elétrica e a permeabilidade magnética, são dependentes da frequência da onda incidente e podem ser determinadas experimentalmente por meio do VNA. Essas grandezas fundamentais descrevem o comportamento elétrico e magnético dos materiais, expressando o grau de polarização e magnetização induzida em resposta a um campo eletromagnético aplicado. A permissividade elétrica expressa a capacidade do material armazenar energia elétrica sob a ação de um campo elétrico aplicado, enquanto a permeabilidade magnética indica a facilidade com que o material conduz linhas de fluxo magnético em seu interior. Ambas as propriedades incorporam efeitos capacitivos/indutivos e dissipativos que são fundamentais para o cálculo da perda por reflexão, sendo determinantes na avaliação do desempenho eletromagnético de materiais aplicados em sistemas de alta frequência.

2.2. Cálculo da Perda por Reflexão

A perda por reflexão, expressa em decibéis (dB) e denotada por RL (do inglês *Reflection Loss*), é calculada conforme a Equação (1) e constitui uma métrica amplamente empregada nas áreas de engenharia de materiais e eletromagnetismo para avaliar a capacidade de absorção de ondas eletromagnéticas por determinados materiais. Esse parâmetro, fundamentado na teoria das linhas de transmissão, quantifica o desempenho do material em termos de atenuação do sinal incidente, promovida pela redução da reflexão [9,10]. Na equação considerada, Z representa a impedância do meio material, enquanto Z_0 corresponde à impedância intrínseca do cabo empregado nas medições. O valor de Z é determinado pela Equação (2), e neste estudo, adota-se $Z_0 = 50$ Ohms, conforme especificação do equipamento VNA utilizado. Valores de RL mais negativos indicam uma menor reflexão, ou seja, uma maior absorção da onda incidente, característica desejável em materiais projetados para aplicações de absorção eletromagnética. Assim, no desenvolvimento do material MARE, busca-se a minimização da RL, ao longo da faixa de frequência de interesse, maximizando, desse modo, a eficiência de absorção.

$$RL(dB) = 20 \log_{10} \left| \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \right| \quad (1)$$

onde:

$$Z = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh \left[j \left(\frac{2\pi f d}{c} \right) \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \right] \quad (2)$$

Na Equação (2), c denota a velocidade da luz no vácuo, enquanto d representa a espessura da amostra analisada. Os parâmetros f , μ_r e ϵ_r são obtidos por meio de medições realizadas com o VNA, correspondem, respectivamente, a frequência da onda incidente, à permeabilidade relativa e à permissividade relativa do material. A permeabilidade relativa (μ_r) e a permissividade relativa (ϵ_r) apresentam componentes reais e imaginários, conforme evidenciado nas Equações (3) e (4).

$$\mu_r = \mu'_r - j \mu''_r \quad (3)$$

$$\epsilon_r = \epsilon'_r - j \epsilon''_r \quad (4)$$

Nessas expressões, μ'_r e ϵ'_r denotam as componentes reais da permeabilidade magnética e da permissividade elétrica, respectivamente, enquanto μ''_r e ϵ''_r representam suas correspondentes partes imaginárias. O intervalo de frequência de operação do analisador do VNA é previamente definido pelo pesquisador, e, a partir desse intervalo, o equipamento determina os valores de ϵ'_r , ϵ''_r , μ'_r e μ''_r em função da frequência da onda eletromagnética incidente sobre a amostra do MARE em análise.

2.3. Interface Gráfica

Uma interface gráfica (*Graphical User Interface* – GUI) é um sistema visual que permite a interação entre o usuário e o computador por meio de menus, campos de entrada, botões e gráficos, eliminando a necessidade de comandos textuais. Neste trabalho, foi desenvolvida uma GUI *web*, programada em HTML, destinada ao processamento dos arquivos de saída do VNA. Esses arquivos apresentam os dados organizados em uma tabela composta por 1601 linhas e 5 colunas, contendo os valores de frequência e as componentes real e imaginária da permissividade elétrica e permeabilidade magnética.

O núcleo de processamento foi implementado em Python, responsável pelos cálculos da Equação (1). A escolha dessa linguagem de programação fundamentou-se na elevada eficiência das bibliotecas NumPy, para operações envolvendo números complexos e funções hiperbólicas, e Matplotlib, para a geração de visualizações gráficas dos resultados. A Figura 2 apresenta o diagrama de sequência com *frontend* HTML e *backend* Python. O usuário faz o upload de um arquivo CSV (1601×5), que é enviado ao *backend* programado em Python via Flask. O processamento dos dados é realizado com NumPy e os gráficos são gerados com Matplotlib e retornados ao *frontend* em formato Base64. Após visualização, o usuário pode baixar os dados em arquivo TXT.

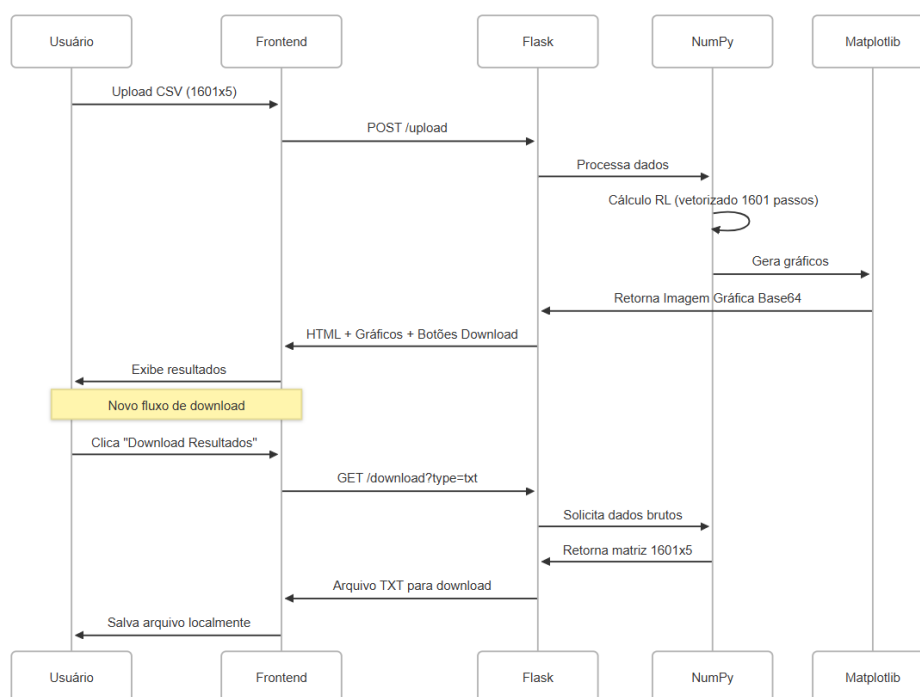


FIGURA 2. Diagrama de sequência do fluxo de interação entre o usuário, interface *web* (*frontend*), servidor Flask e as bibliotecas NumPy e Matplotlib do Python (autoria própria).

A aplicação *web* está disponível em <https://reflectionloss.pythonanywhere.com/> [11], sob a denominação “Analisador de Amostras VNA – Simulador do Parâmetro S_{11} em modo TEM”. O sistema é multiplataforma, acessível via navegadores com conexão à internet. O design minimalista e a interface intuitiva foram pensados para atender especialistas quanto pesquisadores de áreas afins.

A ferramenta integra recursos de análise de propriedades eletromagnéticas, processamento automatizado de dados experimentais, visualização gráfica, simulação e a comparação em uma única plataforma acessível. Esta abordagem substitui metodologias fragmentados por uma solução unificada, aliando precisão, eficiência e facilidade de uso.

3. RESULTADOS

3.1. Analisador de Amostras do VNA

A aplicação desenvolvida, nomeada como “Analisador de Amostras do VNA”, permite simular a perda por reflexão de MARE com base nos dados obtidos experimentalmente via VNA. Ao acessar a interface *web*, o usuário é direcionado a uma página simples e intuitiva. A Figura 3 apresenta a tela inicial da aplicação. A tela inicial é estruturada com botões que permitem o acesso às funcionalidades propostas: análise de amostras de uma camada e geração de arquivo no formato XML. O arquivo XML gerado é empregado como entrada de dados no *software* comercial FEKO. Ao selecionar a funcionalidade de análise de uma camada, é apresentada a interface mostrada na Figura 4, na qual o usuário pode selecionar o arquivo de entrada desejado e, em seguida, acionar o comando para o envio do arquivo.

Analizador de Amostras VNA | Home



Fatec

Analizador de Amostras VNA

Simulador do Parâmetro S_{11} em modo TEM

Selecione a opção correspondente à sua amostra:

Análise com 1 camada

Gerar arquivo XML

Verifique se o seu arquivo está na formatação correta:

1. Formato .csv

2. Deve possuir 1616 linhas (incluso cabeçalho)

3. Cabeçalho como apresentado no exemplo abaixo

	A	B	C	D	E	F
1	Transmission Line And Free Space Method 15.1.16021801					
2	Agilent Technologies,N5230C,MY49000690,A.09.42.22					
3						
4	Ch 1					
5	Ports:, 1 & 2					
6	Measurement Model:, Reflection/Transmission Mu and Epsilon					
7	Sample Holder Type:, Waveguide					
8	Cutoff Frequency:, 9.487103 GHz					
9	Sample Holder Length:, 6.500000 mm					
10	Distance to Sample:, 0.000000 mm					
11	Sample Thickness:, 2.000000 mm					
12	IFBW:, 300.000000 Hz					
13	Power:, 0.000000 dBm					
14	Date:,"Friday, January 01, 1988 04:04:08"					
15	frequency(GHz),e",e",u",u"					
16	12.4000, 4.6784, 0.1428, 0.9948, 0.0058					
17	12.4035, 4.6751, 0.1483, 0.9978, 0.0017					
18	12.4070, 4.6775, 0.1446, 0.9961, -0.0069					

Agradecimento: PIBIC/CNPq processo nº 101700/2024-5 - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

FIGURA 3. Interface da página principal do site online (autoria própria).

Para começar a análise siga este passo:

Qual é o arquivo .csv da sua amostra analisada no VNA?

Escolher ficheiro Nenhum ficheiro selecionado Enviar arquivo

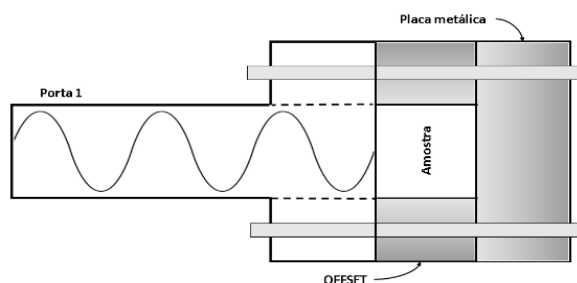


FIGURA 4. Página de carregamento do arquivo a ser analisado (autoria própria).

Após o envio do arquivo, o sistema redireciona o pesquisador para a interface apresentada na Figura 5, a qual exibe um menu opções organizados em cinco etapas. A primeira corresponde à verificação das informações do arquivo submetido, permitindo a conferência quanto a compatibilidade com a amostra a ser analisada. Para fins de demonstração, foi utilizado neste estudo o arquivo de saída do VNA referente a uma amostra de MARE composta por 70% em massa de ferrocabolina dispersa em uma matriz de silicone, com espessura total de 2

mm, conforme descrito nas referências [6, 12]. O material referido foi desenvolvido com o objetivo de mitigar interferências eletromagnéticas em sistemas embarcados em satélites. A caracterização eletromagnética da amostra foi conduzida por meio do VNA na faixa de 8,2 a 12,4 GHz, correspondente à banda X, à qual é amplamente empregada em aplicações de radar para satélites. A varredura de frequência foi configurada com 1601 pontos de medição, resultando em uma resolução de 2,56 MHz entre os pontos, o que possibilita uma análise de alta precisão do desempenho do material ao longo da faixa de frequência de interesse.

Analizador de Amostras VNA | Home




Passo 1: Verifique se as informações da amostra condizem com sua análise:

Nome do arquivo: **ferrocarbonila70.csv**

Informações da amostra analisada

Frequência de Corte:	6.56001 GHz
Comprimento do suporte da amostra (Offset):	9.87 mm
Distância da amostra:	7.87 mm
Espessura da amostra:	2.0 mm
IFBW:	300.0 Hz
Power:	0.0 dBm
Banda:	Banda X

Passo 2: Plotar gráfico de μ (permeabilidade magnética relativa) e ϵ (permissividade elétrica relativa) em função da frequência

Clique aqui para gráfico de permeabilidade e permissividade

Passo 3: Plotar gráfico de Perda por Reflexão versus frequência com espessura fixa

Clique aqui para gráfico R.L. espessura fixa

Passo 4: Plotar gráfico de Perda por Reflexão versus frequência com espessura variável

Espessura inicial em mm:

Espessura final em mm:

Variação em mm:

Clique aqui para gráfico R.L. espessura variável

Passo 5: Plotar gráfico de Perda por Reflexão dinâmico

Espessura mínima em mm:

Espessura máxima em mm:

Clique aqui para gráfico R.L. dinâmico

Agradecimento: PIBIC/CNPq processo nº 101700/2024-5 - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

FIGURA 5. Página de apresentação das informações da amostra analisada e dos botões que permitem quatro diferentes tipos de plotagens gráficas (autoria própria).

O segundo procedimento consiste na representação gráfica dos parâmetros de permeabilidade magnética e permissividade elétrica, com a separação de suas componentes real e imaginária, conforme obtidas experimentalmente pelo VNA e apresentadas na interface ilustrada na Figura 6. Esta etapa é crucial, pois permite a análise crítica da variação dos parâmetros em função da frequência, favorecendo a detecção precoce de anomalias ou desvios que possam indicar falhas no processo de aquisição de dados. A visualização gráfica, portanto, configura-se como uma ferramenta indispensável para a verificação da consistência interna dos resultados experimentais, orientando o pesquisador na decisão de prosseguir com o processamento ou repetir as medições. No presente estudo, os parâmetros extraídos revelaram-se consistentes com os valores reportados na literatura para amostras de ferrocarbonila [6, 12], o que corrobora a confiabilidade da metodologia empregada.

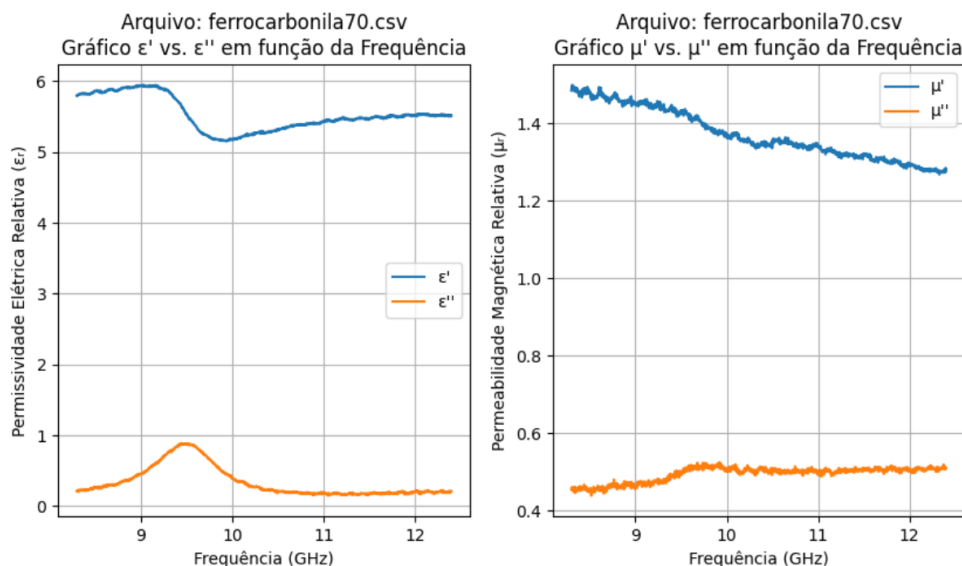


FIGURA 6. Tela de plotagem gráfica da permissividade elétrica e permissividade magnética em função da frequência (autoria própria).

O terceiro procedimento consiste na plotagem gráfica da perda por reflexão, calculada pela Equação (1), com base nos dados fornecidos pelo arquivo de entrada, por meio da interface exibida na Figura 7. Além da geração do gráfico, a interface disponibiliza um botão para a exportação dos resultados, permitindo a criação de um arquivo no formato .txt, contendo duas colunas: a primeira correspondente à frequência e a segunda à perda por reflexão, expressos em decibéis (dB). Essa funcionalidade facilita o uso posterior dos dados em análises complementares, conforme as necessidades do pesquisador.

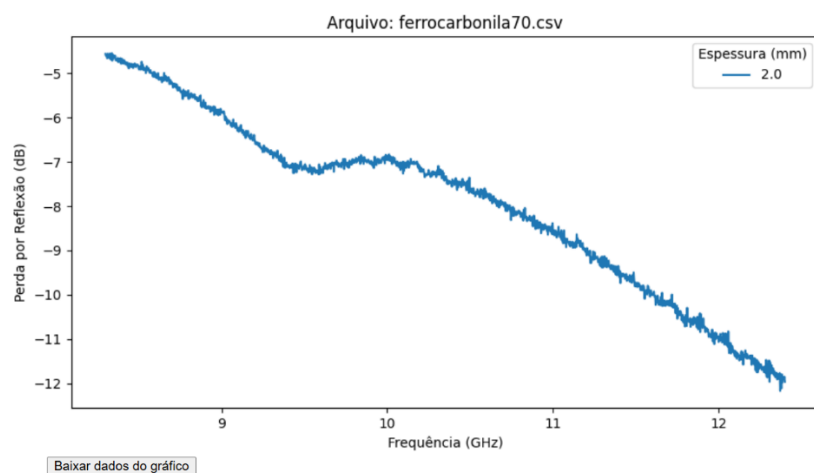


FIGURA 7. Tela de plotagem gráfica da perda por reflexão calculada (autoria própria).

Uma informação relevante apresentada na tela da Figura 7 é a espessura da amostra utilizada no cálculo. Neste caso, o valor de RL foi calculado considerando uma espessura de 2 mm, correspondente à espessura real da amostra de ferrocarbonila analisada. Em estudos envolvendo MARE, é prática comum empregar a Equação (1) para o cálculo do RL e ajustar a espessura do material (parâmetro d) a fim de determinar a espessura ideal do material [1, 2, 5, 7, 8, 13-15]. Tal prática se justifica pelo fato de que a espessura está diretamente envolvida no argumento da função tangente hiperbólica, impactando significativamente o valor de impedância de entrada Z_e e, por consequência a RL.

A variação do parâmetro d permite o ajuste da impedância de entrada do material para que esta se aproxime da impedância característica do meio externo (Z_0), minimizando, assim, a reflexão da onda incidente. No contexto de um MARE, esse ajuste possibilita que a onda eletromagnética penetre no material com reflexão mínima, sendo preferencialmente absorvida em seu interior, o que resulta na diminuição do retorno da energia eletromagnética ao meio original.

Além disso, a espessura da amostra influencia diretamente a fase da onda eletromagnética no interior do material. Durante a propagação, parte da energia pode ser refletida na interface oposta, neste caso, a placa

metálica posicionada atrás da amostra, resultando em interferências construtivas ou destrutivas. Por meio do ajuste da espessura, torna-se possível alcançar uma condição de cancelamento da onda, na qual as reflexões se anulam. Assim, ao determinar a espessura ideal, o pesquisador pode otimizar o desempenho do material conforme a aplicação desejada, multiplicando essa espessura por um número inteiro ímpar ($n = 1, 3, 5, \dots$), conforme previsto pela teoria do cancelamento por um quarto de onda [9, 10].

O quarto passo do procedimento consiste na geração de um gráfico que relaciona a perda por reflexão com a espessura da amostra, permitindo ao pesquisador simular diferentes configurações. A aplicação desenvolvida disponibiliza três campos de entrada: definição da espessura inicial, espessura final e o passo de variação, todos expressos em mm. Após o preenchimento desses campos, o comando “Clique aqui para gráfico RL espessura variável” pode ser acionado. Considerando, por exemplo, uma espessura inicial de 1 mm, uma espessura final 5 mm e um passo de 0,5 mm, obtém-se a visualização ilustrada na Figura 8. Nessa tela, o programa identifica automaticamente qual das curvas plotadas apresenta o menor valor de RL, destacando essa informação de forma clara para o usuário.

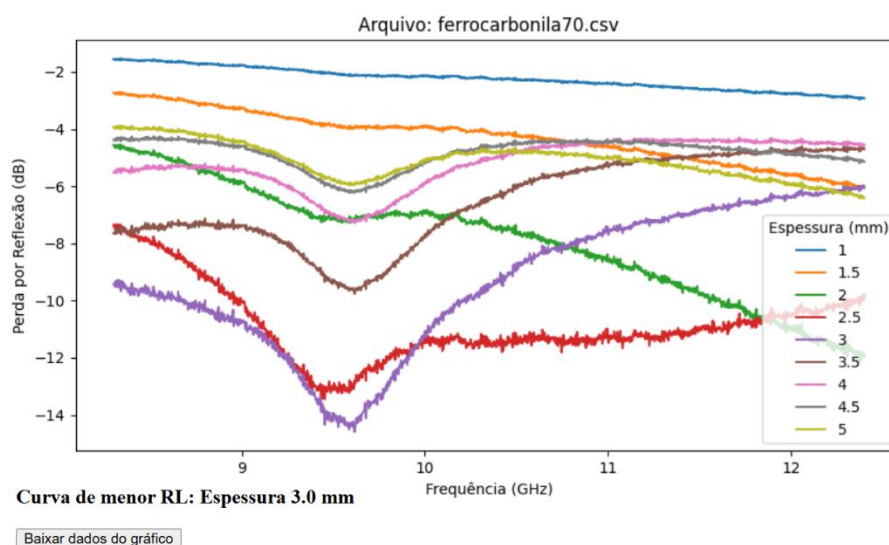


FIGURA 8. Tela de plotagem gráfica da perda por reflexão calculada e simulada para diferentes espessuras do material (autoria própria).

Cada curva da Figura 8 corresponde a uma espessura específica, variando de 1 mm a 5 mm, conforme indicado na legenda à direita. Como discutido previamente, quanto mais negativo for o valor de RL, maior será a eficiência do material na absorção da radiação eletromagnética incidente. Assim, a curva de maior interesse é àquela que exibe o menor valor de RL, evidenciado por um vale mais acentuado no gráfico.

Na análise dos dados, observa-se que a espessura de 3 mm proporciona o maior índice de absorção, com um valor mínimo de RL em torno de -14 dB em aproximadamente 9,7 GHz. Esse resultado indica que, para essa espessura específica, o material apresenta desempenho superior como absorvedor eletromagnético na Banda X, com máxima eficiência na frequência de 9,7 GHz.

A partir da definição dessa espessura, torna-se viável a confecção de amostras físicas em laboratório, otimizando o número de protótipos necessários e, conseqüentemente, reduzindo os custos experimentais e o tempo de execução. Adicionalmente, essa abordagem permite avaliar o desempenho das amostras em função da frequência, a largura de banda efetiva e o potencial de absorção, facilitando a seleção de parâmetros adequados ao projeto.

A interface exibida na Figura 8, também disponibiliza um botão para exportação dos dados do gráfico, permitindo ao usuário fazer *download* de diversos arquivos no formato txt. Cada arquivo contém os valores da frequência versus o RL calculado para cada uma das espessuras selecionadas, além de um arquivo único consolidado com todas as informações representadas graficamente.

Outro aspecto relevante diz respeito ao comportamento do ponto de mínima reflexão (vale de RL), que se desloca para frequências progressivamente mais baixas à medida que a espessura do material aumenta. Esse efeito evidencia a possibilidade de ajuste fino da frequência de operação, definida como aquela em que ocorre máxima absorção, por meio da variação controlada da espessura. Por exemplo, para a espessura de 3 mm, observa-se o valor mínimo de RL em torno de 9,7 GHz. Essa relação pode ser explicada com base na Equação (2), na qual a frequência (f) e a espessura (d) aparecem multiplicadas no argumento da função tangente hiperbólica. Isso implica que a impedância de entrada do material e, conseqüentemente sua capacidade de absorção, depende diretamente da interação entre esses dois parâmetros. O ajuste de d permite, portanto, a

sintonia da frequência de absorção máxima, característica típica de materiais absorvedores que operam com base s em ressonância e efeitos de interferência interna.

Considerando a ampla gama de espessuras que podem ser simuladas, a exibição simultânea de todas as curvas em um único gráfico comprometeria a clareza visual da análise. Para contornar essa limitação, foi desenvolvida uma interface interativa que permite a seleção dinâmica das curvas a serem visualizadas. A Figura 9 ilustra essa funcionalidade, na qual o usuário pode selecionar, por meio de listas suspensas ou botões de controle, quais espessuras deseja exibir. Essa abordagem favorece uma análise direcionada, permitindo comparações específicas entre diferentes configurações, sem sobrecarregar visualmente o ambiente gráfico. Esse recurso é particularmente útil em estudos com alto volume de dados simulados, contribuindo para uma maior eficiência e precisão da interpretação dos resultados.

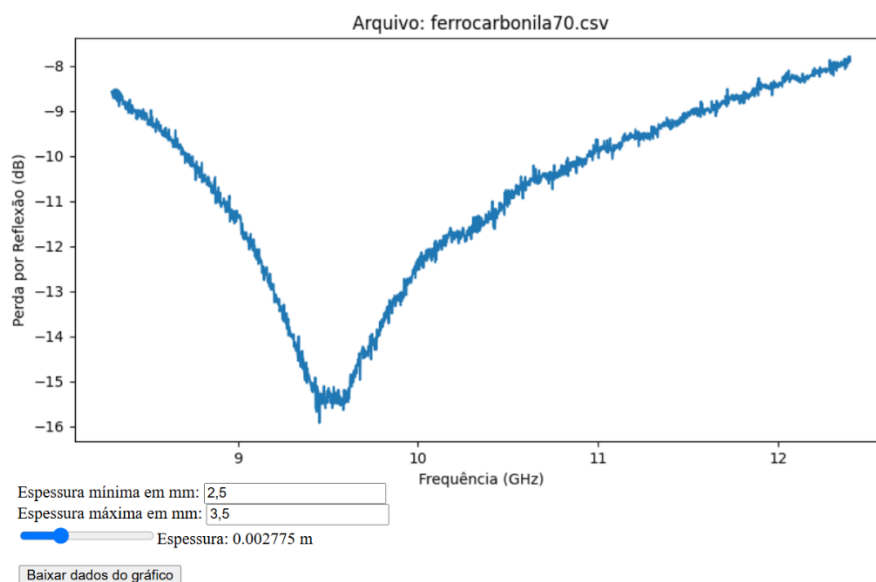


FIGURA 9. Tela de plotagem gráfica dinâmica da perda por reflexão, o botão de ação permite ao pesquisador mudar o valor da espessura somente com um arrastar do mouse (autoria própria).

O quinto e último passo do procedimento consiste na plotagem dinâmica e interativa da RL em função da frequência. Nessa etapa, a interação do pesquisador com os dados é realizada por meio de um controle deslizante, implementado como um botão de rolagem horizontal, o qual permite a variação contínua da espessura do material analisado. Essa funcionalidade viabiliza a visualização em tempo real das alterações na resposta eletromagnética, sem a necessidade de reprocessar ou redesenhar completamente o gráfico a cada ajuste. Adicionalmente, os valores mínimo e máximo da espessura são definidos pelo próprio usuário, conforme os parâmetros experimentais ou de simulação adotados. Assim como nas demais interfaces do sistema, essa também oferece a opção de exportação dos dados visualizados. Essa etapa final da aplicação não apenas favorece a exploração dos resultados simulados, mas também aproxima o ambiente computacional da realidade experimental, fornecendo subsídios para a tomada de decisões técnicas com base em dados simulados de forma eficiente e acessível.

No caso específico da análise da amostra de ferrocarbonila, verificou-se que a menor espessura considerada experimentalmente foi de 3 mm. A partir desse valor de referência, foram realizadas simulações variando a espessura no intervalo de 2,5 e 3,5 mm. A manipulação do controle deslizante permitiu identificar que a menor perda por reflexão ocorreu para uma espessura de aproximadamente 2,77 mm com valor de RL igual a -15,4 dB na frequência de 9,57 GHz. Esse resultado indica que o referido material apresenta desempenho significativo em absorção eletromagnética nessa faixa de frequência, evidenciado seu potencial para aplicações como material absorvedor em dispositivos operando na banca correspondente.

3.2. Comparação Resultados Obtidos com Software FEKO

Com o objetivo de validar os resultados obtidos com o *software* desenvolvido neste trabalho, foi realizada uma comparação com o *software* comercial FEKO (Altair), amplamente reconhecido na comunidade científica pelas suas capacidades robustas de simulação eletromagnética tridimensional. O FEKO é uma ferramenta consagrada em pesquisas avançadas da área, permitindo a modelagem de geometrias complexas e a simulação de uma ampla variedade de fenômenos eletromagnéticos.

Na comparação, adotou-se o mesmo modelo físico das amostras experimentais — uma camada de ferrocarbonila posicionada sobre uma placa metálica de 2,00 mm— conforme ilustrado na Figura 10. Para simular essa condição, foram aplicadas condições de contornos infinitos nos eixos x e y, com a incidência da onda ao longo do eixo z. Foram realizadas duas simulações: a primeira com a espessura real da amostra (2,00 mm), e a segunda com a espessura otimizada pelas simulações (2,77 mm). A Figura 10 apresenta a malha tridimensional gerada no FEKO, destacando a incidência da onda eletromagnética ao longo do eixo z, essencial para o cálculo da perda por reflexão no domínio da frequência.

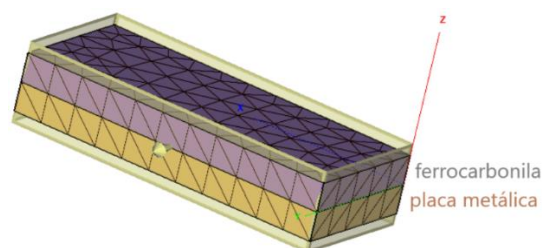


FIGURA 10. Geometria com malha gerada pelo *software* comercial FEKO (autoria própria).

A Figura 11 apresenta os resultados comparativos da perda por reflexão em função da frequência para duas espessuras analisadas: 2,00 mm e 2,77 mm. Os dados evidenciam excelente concordância entre os dados obtidos por meio do *software* FEKO (representados por marcadores) e aqueles gerados pela ferramenta computacional desenvolvida neste estudo (linhas contínuas).

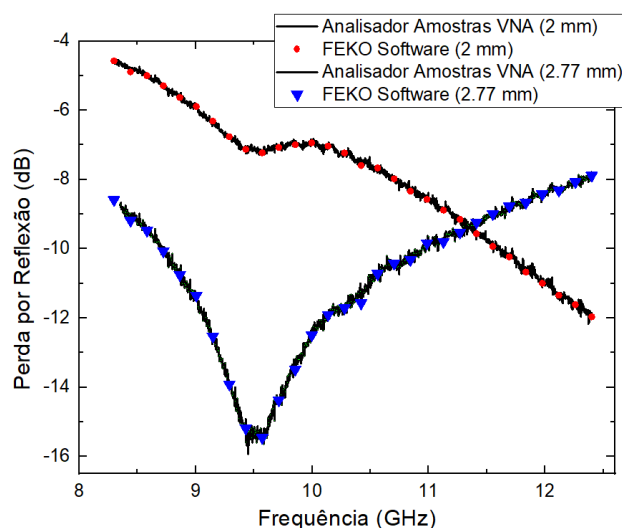


FIGURA 11. Comparação resultados obtidos da perda por reflexão versus a frequência pelo *software* desenvolvido nesse trabalho e *software* comercial FEKO (autoria própria).

Embora o sistema desenvolvido tenha sido direcionado exclusivamente para a simulação da perda por reflexão em função da espessura e da frequência - não realizando cálculos tridimensionais complexos como o FEKO - os resultados demonstram que ele é eficiente, preciso e adequado à análise direcionada de absorvedores de radiação eletromagnética. Dessa forma, a ferramenta pode ser utilizada com confiança no suporte à caracterização e à otimização de materiais, destacando-se ainda pela interface amigável e voltada ao pesquisador experimental.

4. CONCLUSÃO

A interface gráfica (GUI *web*) desenvolvida neste estudo propõe-se como uma alternativa eficiente e acessível para a análise da perda por reflexão em MARE. Por meio da integração entre recursos de simulação computacional com uma interface web de uso intuitivo, a plataforma otimiza o fluxo de análise dos dados provenientes das medições realizadas com analisadores de redes vetoriais, eliminando etapas manuais, minimizando erros operacionais e promovendo a padronização e a visualização dos resultados. Além disso, a ferramenta permite a comparação direta entre diferentes amostras de forma clara e objetiva, contribuindo para o aumento da produtividade e da consistência nas análises experimentais.

A validação da ferramenta foi conduzida por meio da comparação com resultados obtidos utilizando o software comercial FEKO, amplamente reconhecido na comunidade científica por sua robustez em simulações tridimensionais e sua versatilidade em aplicações eletromagnéticas. A elevada concordância observada entre os dados obtidos com o FEKO e aqueles fornecidos pela plataforma desenvolvida confirma sua confiabilidade em estudos da área.

Ao viabilizar o acesso à análise gráfica de dados experimentais, sem a necessidade de licenças de *softwares* proprietários, a plataforma contribui significativamente para a democratização de ferramentas de simulação, permitindo que um número maior de pesquisadores, inclusive em instituições com recursos limitados, conduza estudos avançados. Nesse contexto, espera-se que a interface proposta fortaleça colaborações entre instituições e estimule avanços em áreas estratégicas como telecomunicações, ciência dos materiais, defesa, saúde e segurança.

Conclui-se, portanto, que a GUI *web* representa um avanço relevante na sistematização da análise de perda por reflexão em MARE. Ao aliar técnicas de simulação computacional a uma estrutura de visualização acessível e eficiente, a ferramenta desenvolvida contribui não apenas para a simplificação do tratamento de dados em função da frequência, como também para a ampliação das possibilidades de investigação experimental. Assim, a plataforma configura-se como um recurso promissor para aprimoramento das metodologias de caracterização eletromagnética, com potencial impacto em distintas áreas do conhecimento científico e tecnológico.

AGRADECIMENTOS

Centro Paula Souza pelo projeto RJI, bolsas PIBIC/CNPq números: 158179/2023-4 e 101700/2024-5. A empresa ALTAIR pela possibilidade de emprego do *software* FEKO®.

REFERÊNCIAS

- [1] Fionov, A.; Kraev, I.; Yurkov, G.; Solodilov, V.; Zhukov, A.; Surgay, A.; Kuznetsova, I.; Kolesov, V. Radio-Absorbing Materials Based on Polymer Composites and Their Application to Solving the Problems of Electromagnetic Compatibility. *Polymers* 2022, 14, 3026, 1–59. <https://doi.org/10.3390/polym14153026>
- [2] Elmahaishi, M.F.; Azis, R. S.; Ismail, I.; Muhammad, F. D. A review on electromagnetic microwave absorption properties: their materials and performance. *Journal of Materials Research and Technology* 2022, 20, 2188–220. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.07.140>
- [3] Gutierrez, D.; Doshi, P.; Wong, H.Y.; Nordlund, D.; Gandhiraman, R.P. Printed graphene and its composite with copper for electromagnetic interference shielding applications. *Nanotechnology* 2024, 35, 135202. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ad12e9>
- [4] Michaels, R.A. Telecommunications, Electromagnetic Fields, and Human Health. *Environmental Claims Journal* 2019, 31, 2, 93–132. <https://doi.org/10.1080/10406026.2019.1603442>
- [5] Ananth, P.B.; Abhiram, N.; Krishna, K.H.; Nisha, M.S. Synthesis of radar absorption material for stealth application. *Materials Today* 2021, 47, 14, 4872–4878. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.196>
- [6] Lopes, B.H.K.; Portes, R.C.; Amaral, M.A.J.; Florez-Vergara, D.E.; Gama, A.M.; Silva, V.A.; Quirino, S.F.; Baldan, M.R. X Band electromagnetic property influence of multi-walled carbon nanotube in hybrid MnZn ferrite and carbonyl iron composites. *Journal of Materials Research and Technology* 2020, 9, 2369–2375. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.068>
- [7] Ma, J.; Wang, X.; Cao, W.; Han, C.; Yang, H.; Yuan, J.; Cao, M. A facile fabrication and highly tunable microwave absorption of 3D flower-like Co₃O₄-rGO hybrid-architectures. *Journal of Alloys and Compounds* 2018, 339, 487–498. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.01.152>
- [8] Xu, W.; Wang, G.; Yin, P. Designed fabrication of reduced graphene oxides/Ni hybrids for effective electromagnetic absorption and shielding. *Carbon* 2018, 139, 759–776. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.07.057>
- [9] Ulaby, F.T. *Eletromagnetismo para Engenheiros*; Bookman: [S.l.], 2006; p. 382. ISBN 978-85-600-3119-1.
- [10] Pozar, D.M. *Microwave Engineering*, 4th ed.; John Wiley & Sons: [S.l.], 2011; p. 752. ISBN 978-0-470-63155-3.
- [11] Reflection Loss Calculator. *Analizador de Amostras do VNA*. Disponível online: <https://reflectionloss.pythonanywhere.com/> (acesso em 14/04/2025).
- [12] Lopes, B.H.K. Estudo da capacidade de absorção de onda eletromagnética por particulados de ferrita MnZn e ferrocarbonila dispersos em matriz de borracha de silicone na faixa de frequência referente à Banda X (8,2–12,4 GHz (dissertação), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2019. Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/03.05.12.48>

- [13] Ahlawat, A.; Bala, M.; Nayak, M.K.; Tyag, S. Development of cobalt oxide and titanium carbide based composite for microwave absorption in X-band, *Materials Science and Engineering: B* 2024, 305, 117447. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2024.117447>
- [14] Han, Y.; Han, M.; Zhao, T.; Zihao, X.; Zou, J.; Liu, X.; Lia, X. Design of morphology-controlled cobalt-based spinel oxides for efficient X-band microwave absorption. *Materials Research Bulletin* 2024, 172, 112670. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2023.112670>
- [15] Yoshikawa, A.; Kasai, H. Optimum design for window layer thickness of GaAlAs-GaAs heteroface solar cell regarding the effect of reflection loss. *J. Appl. Phys.* 1981, 52, 6. <https://doi.org/10.1063/1.329265>