



ESTUDO DA FERRAMENTA COMPUTACIONAL CST NA ANÁLISE DE FSS COMO METODOLOGIA DE ENSINO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES

Victor Hugo Barata de Magalhães – victorhbmagalhães@gmail.com
Universidade Federal do Pará - Faculdade de Computação e Telecomunicações
Rua Augusto Correa, 1 – Guamá
66075-110 - Belém – Pará

Miércio Cardoso de Alcântara Neto – miercio@ufpa.br
Universidade Federal do Pará - Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica
Rua Augusto Correa, 1 – Guamá
66075-110 - Belém – Pará

Jasmine Priscilla Leite de Araujo – jasmine@ufpa.br
Universidade Federal do Pará - Faculdade de Computação e Telecomunicações
Rua Augusto Correa, 1 – Guamá
66075-110 - Belém – Pará

Walter Jesus da Costa Martins Filho - walterjcmf@gmail.com
Universidade Federal do Pará - Faculdade de Computação e Telecomunicações
Rua Augusto Correa, 1 – Guamá
66075-110 - Belém – Pará

Edemir Marcus Carvalho de Matos – edemirmatos@ufpa.br
Universidade Federal do Pará - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Rua Augusto Correa, 1 – Guamá
66075-110 - Belém – Pará

Maria Emilia Lima Tostes - tostes@ufpa.br
Universidade Federal do Pará - Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica
Rua Augusto Correa, 1 – Guamá
66075-110 - Belém – Pará

Fabricio José Brito Barros – fbarros@ufpa.br
Universidade Federal do Pará - Faculdade de Computação e Telecomunicações
Rua Augusto Correa, 1 – Guamá
66075-110 - Belém – Pará



Resumo: O avanço de soluções computacionais tem contribuído com a engenharia, no auxílio de projetos envolvendo simulações. Na engenharia de telecomunicações, o emprego dessas ferramentas tem sido de suma importância para o projeto de antenas, filtros, FSS (Superfícies Seletivas de Frequência) e demais componentes. Através de simulações é possível encorajar o aprendizado de forma mais dinâmica e aplicada, mostrando aos discentes o comportamento de ondas eletromagnéticas, em determinados dispositivos, por exemplo. Os simuladores de campo eletromagnético de onda completa possibilitam a análise de estruturas complexas, e permitem a substituição do processo de projeto experimental iterativo. Entretanto, não é comum os discentes do curso de graduação em engenharia de telecomunicações e afins da Universidade Federal do Pará, Campus Belém, tenham contato com este tipo de software. Neste artigo é proposta a análise de uma FSS (Superfície Seletiva de Frequência) de Patch Triangular, a fim de explorar as ferramentas do software CST®, familiarizar o discente com o software e acerca do método numérico utilizado na modelagem e simulação da estrutura em forma de tutorial, utilizado como metodologia de ensino para auxílio de disciplinas que envolvam projetos com antenas, propagação, circuitos e dispositivos de RF (Radiofrequência).

Palavras-chave: FSS, Ensino em engenharia, Eletromagnetismo, Métodos numéricos, Formação profissional, CST.

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da computação tem possibilitado avanços substanciais na indústria e nas áreas mais tradicionais da engenharia, especialmente em engenharia de antenas, caracterizando um crescente emprego de modelos de otimização como paradigmas para problemas de tomada de decisão em projetos de estruturas eletromagnéticas, tais como antenas, filtros e Superfícies Seletivas de Frequência (FSS - *Frequency Selective Surfaces*). Neste contexto, destacam-se os simuladores de campo eletromagnético tridimensional de onda completa, que possibilitam a análise de estruturas complexas e viabilizam a substituição do processo de projeto experimental iterativo.

O emprego de simuladores que utilizam técnicas numéricas precisas para análises de onda completa, tal como a Técnica da Integração Finita (FILHO *et al*, 2004), são de interesse teórico/prático no processo de aprendizagem do aluno de engenharia de telecomunicações. O desenvolvimento matemático de disciplinas que envolvem Eletromagnetismo como, Teoria de Ondas Guiadas, Antenas e Propagação, Circuitos e Dispositivos de RF, se torna exaustivo e, em alguns casos, desmotivam o aluno de graduação em prosseguir em seus estudos por não visualizarem aplicações práticas do conteúdo estudado.

As ferramentas computacionais para cálculo das propriedades eletromagnéticas de dispositivos ressonantes, tal como o *software* computacional CST®, se apresentam como ferramentas robustas e atraentes por despertar nos alunos de graduação o interesse em simular estruturas teóricas no ambiente computacional.

Partindo desse princípio, o CST® além de ser um *software* robusto de simulação, possui interface gráfica e configuração simplificada, que facilita o manuseio do mesmo pelos discentes no processo de aprendizagem, exigindo do aluno apenas seus conhecimentos adquiridos pela teoria e organização de suas idéias. A vantagem do domínio do *software* de simulação agrega um diferencial na carreira do discente, afinal a etapa de simulações favorece a substituição do processo de projeto experimental iterativo.



Será elaborado um tutorial a fim de explanar as etapas de montagem de determinada estrutura, nesse caso, escolhida a FSS do tipo *patch* triangular (ALCANTARA NETO *et al*, 2015), devido a simplicidade na montagem da mesma, facilitando a compreensão do passo-a-passo nos processos de montagem do *software*.

Este artigo está dividido em quatro seções. Na segunda seção será descrito a metodologia de ensino proposta; um resumo teórico sobre FSS e a geometria utilizada na modelagem e o tutorial de montagem da mesma. Na terceira seção serão expostos os resultados da simulação e análise dos dados necessários. Na quarta seção será descrita a metodologia utilizada e os resultados do trabalho desenvolvido. Por fim serão comentadas as considerações finais da proposta.

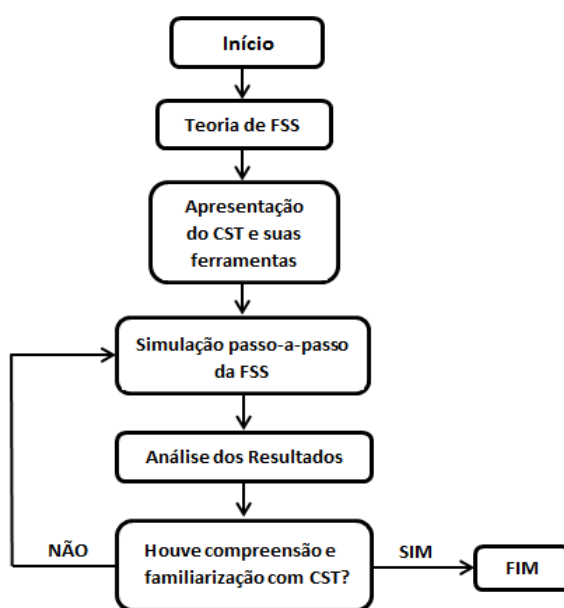
2 METODOLOGIA DE ENSINO NA ENGENHARIA COM O CST®.

A ferramenta computacional foi apresentada aos alunos do curso de engenharia de Telecomunicações da UFPA através de minicurso. Primeiramente foi abordada a teoria de FSS, comportamento, aplicações nos sistemas de telecomunicações e as pesquisas correlatas. Em seguida foi apresentado o *software* e suas variantes, afinal o CST® possui outras ferramentas de simulações, seja em cabos, antenas e circuitos, gerando interesse nos alunos em explorar mais o *software*.

Com os conhecimentos de FSS e sobre o CST®, prosseguiu-se para a simulação da estrutura, mostrando passo a passo as etapas, desde as pré-configurações dos parâmetros no *software* até o processo de simulação em si. Em seguida, mostraram-se os resultados que o CST® gera, no entanto para esse projeto, convém analisar os Parâmetros S, especificamente o S11 e S21, coeficientes de reflexão e transmissão respectivamente.

Na Figura 1 está descrito o fluxograma da metodologia de ensino.

Figura 1. Fluxograma da Metodologia proposta e implementada no minicurso.





2.1 Breve resumo de teoria de FSS

A denominação de superfície Seletivas em Frequência (*Frequency Selective Surfaces - FSS*) é dada a um arranjo periódico, geralmente planar, composto por uma camada de material condutor, fixada sobre um substrato dielétrico, apresentando como uma de suas principais propriedades a capacidade de atuar como um filtro passa ou rejeita faixa em determinadas frequências. Tal comportamento se deve a fatores como dimensões da estrutura, formato geométrico da célula unitária, polarização da onda incidente, periodicidade entre os elementos, espessura e permissividade do substrato (MOURA, 2015)

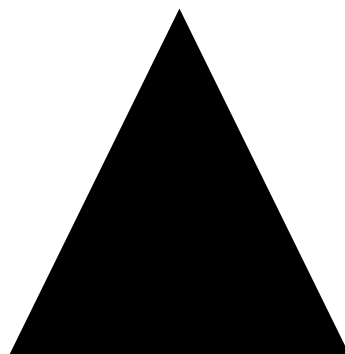
O estudo dessas estruturas periódicas planares bidimensionais (ou tridimensionais), para aplicações em altas frequências, tem atraído pesquisadores da área por causa da propriedade de filtragem de frequências específicas, ferramenta fundamental em sistemas multifrequências. Podem ser destacadas por exemplo antenas, radomes, blindagens eletromagnéticas, filtros angulares e absorvedores de micro-ondas, aplicações militares e segurança em redes sem fio (JANG *et al*, 2013).

2.2 Apresentação do CST e simulação da FSS

O *software* computacional CST *Microwave Studio*® (CST MWS®) é uma ferramenta voltada para simulações eletromagnéticas 3D de dispositivos de alta frequência. Tal ferramenta permite simulações rápidas e precisas de dispositivos, como antenas, filtros e estruturas multicamadas, assim como outras aplicações.

A estrutura tipo *patch* triangular (ALCANTARA NETO *et al*, 2015), abaixo ilustrada na Figura 1, utilizada nesse trabalho fora reproduzida e simulada no software comercial, CST *Microwave Studio*®, versão 2016.

Figura 2. FSS tipo *patch* de geometria triangular.



A seguir, tem-se as etapas da montagem da estrutura no CST, seguindo o passo-a-passo do tutorial:

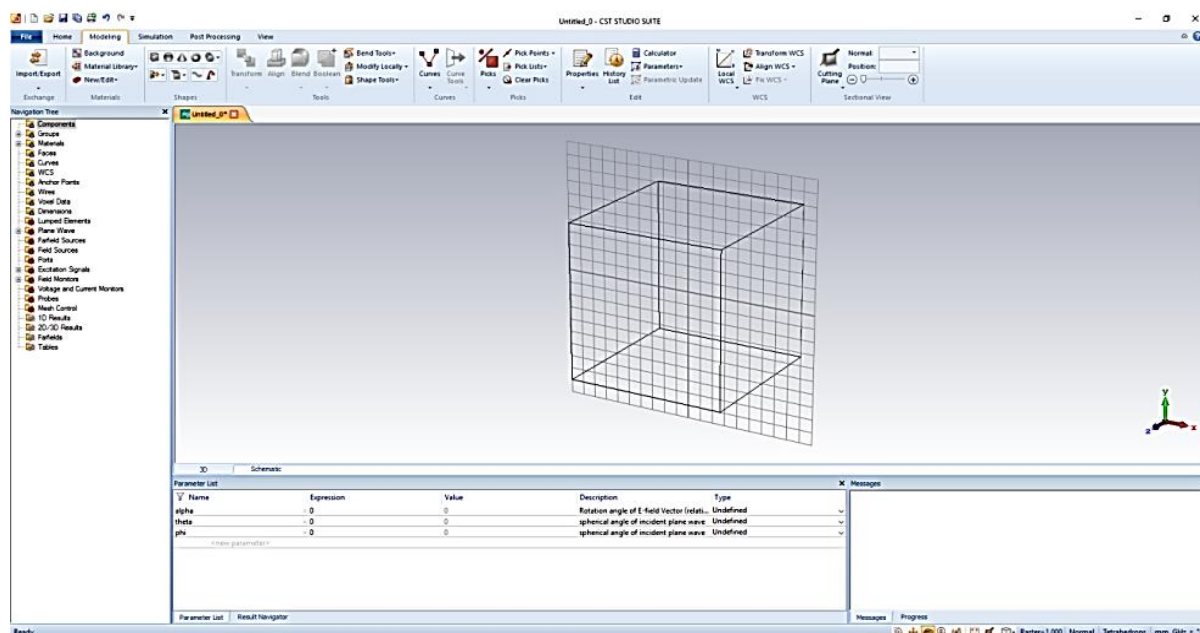
- Instalado o software no terminal de trabalho, partiu-se para a montagem da estrutura. Após aberto, seleciona-se a ferramenta adequada para a montagem da FSS, na opção **modules**, ferramenta essa o **CST MICROWAVE STUDIO**, como mostra na figura abaixo. Vale ressaltar que o CST® possui vários módulos de simulação, no caso de FSS e antenas, usamos o módulo **Microwave Studio**.



- Seleciona-se o *template* em que a estrutura vai ser montada. Esse *template* simula o ambiente em que a FSS vai atuar nesse caso, Micro-ondas. Seleciona-se a opção **MW & RF & OPTICAL**, afinal a FSS vai operar a nível de RF. Selecionado o *template*, seguimos para a estrutura que será simulada, podendo ela ser uma antena, Circuitos e seus componentes, *Radar Cross Section*, Aplicações óticas e finalmente seleciona-se a opção, **estruturas periódicas**.
- Ainda na criação do *Template*, o CST® já possui carregado em suas bibliotecas os demais tipos de FSS, pela aplicação pretendida, seleciona-se **FSS, Metamaterial – Unit Cell**, pois a simulação em si é da estrutura periódica e se trata de materiais metálicos em sua composição.
- Como nos interessa analisar o comportamento da estrutura em diferentes frequências, convém obter dados provenientes de simulações no domínio da Frequência, portanto seleciona-se essa opção.
- Para finalizar os parâmetros de construção, determinam-se as unidades a serem utilizadas no projeto. Para a Dimensão da célula unitária adota-se o milímetro (mm); Faixa de frequência da simulação em GHz; Tempo, será analisado em Segundos (s). Outros parâmetros como temperatura, Tensão, Corrente, Resistência, Condutância, Indutância e Capacitância poderão ser utilizados conforme o projeto do aluno (RIEDEL, 2008).
- Por último, determina-se a faixa de frequência que deseja-se analisar o comportamento da estrutura. No caso deste trabalho, foi escolhido a banda X, correspondente a faixa de 8 a 12 GHz, para a simulação estabeleceu-se uma faixa de 7 GHz a 13 GHz. Em seguida o usuário tem a liberdade de selecionar os dados a serem gerados, dentre eles o Campo Elétrico (*E-field*), Campo Magnético (*H-field*), Campo distante (*Farfield*), Fluxo de Potência (*Power flow*) e Perda de Potência (*Power loss*).
- Concluídos os pré-requisitos para a montagem, a Figura 3 mostra o ambiente de montagem do CST®, onde o usuário pode definir os formatos das estruturas, dimensões, e outras configurações necessárias para realização das atividades. Sem falar no ambiente que atualiza em tempo real toda e qualquer mudança na estrutura, recurso importante para acompanhar os progressos.



Figura 3. Área de trabalho do CST



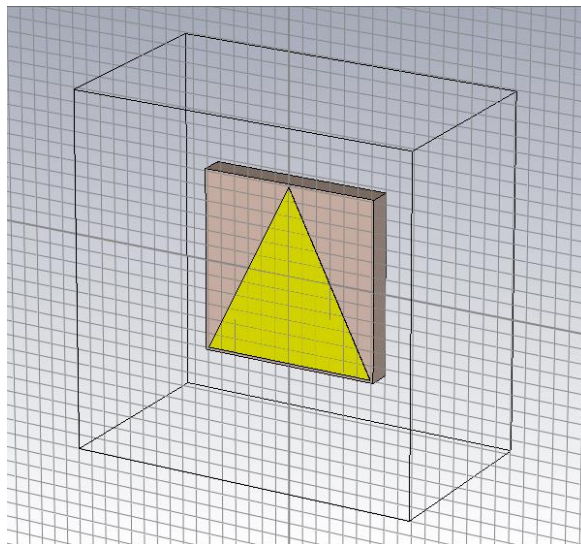
- Antes de montar a estrutura, é importante listar os parâmetros para a montagem da mesma. Tais parâmetros dizem respeito a construção da Célula, por ser uma estrutura periódica, o próprio CST monta o restante da estrutura. Nesses parâmetros, colocam-se os valores referentes das medidas da célula
- Outro ponto importante será selecionar os tipos de materiais compostos na estrutura. Por isso, selecionam-se os materiais antes de começar a montar a estrutura, pois dessa maneira facilitará no momento da escolha do material de acordo com o componente. Para esse projeto, utilizou-se o FR-4, ou mais conhecido como Fibra de Vidro, material muito comum na produção de Placas de Circuito Impresso (PCI), para a montagem do Substrato. Já na montagem da célula unitária, utiliza-se o tradicional Cobre (*Cooper – Anelydeo*), comumente utilizado nos circuitos elétricos e estruturas eletromagnéticas.
- Selecionados os materiais, segue-se para a montagem do Substrato. Na interface seleciona-se **Modeling>Brics**, pressiona-se **ESC** e então será aberta uma janela para definir a forma desse Substrato.
- Os padrões de dimensão do CST são baseados no plano Cartesiano Tridimensional (x, y, z). Recomenda-se que toda e qualquer estrutura parta do ponto 0. Como a célula unitária possui dimensão quadrada, vamos dividir então os lados do quadrado para cada componente do plano. Plano X, adotamos como a base e Plano Y, como altura. Por esse motivo as medidas dos lados vão partir do lado negativo ao positivo, cuja a soma é o valor do parâmetro T_x . Por se tratar de um quadrado, $T_x = T_y$ e seus lados vão de $-T_x/2$ à $T_x/2$ de largura e $-T_y/2$ à $T_y/2$ de altura. A espessura desse substrato será definida pelo parâmetro T_s na direção Z, no entanto adota-se $-T_s$, devido a projeções futuras que serão criadas em sentido oposto, para as mesmas não se sobreporem ao substrato. Vale ressaltar que para o Substrato utilizou-se o FR-4, também conhecido como fibra de vidro.
- Em seguida, prossegue-se para a montagem da estrutura proposta da FSS, que seria a célula da mesma. Nesse caso será criado mais um componente, a partir do substrato. Em **Extrude Profile** definem-se os parâmetros para dar origem a célula em forma triangular. Essa forma triangular vai se formar através da ligação de pontos no plano cartesiano. Essa



estrutura é composta por um triângulo equilátero, por isso concentra um de seus vértices em $(0, W/2)$, $(-W/2, -W/2)$, $(W/2, -W/2)$. O CST® facilita a visualização, antes mesmo de a estrutura ficar pronta, mostrando seu esboço.

- Por fim, a Figura 4 ilustra a célula unitária pronta para avançar nas simulações.

Figura 4. Célula Unitária da FSS montada.



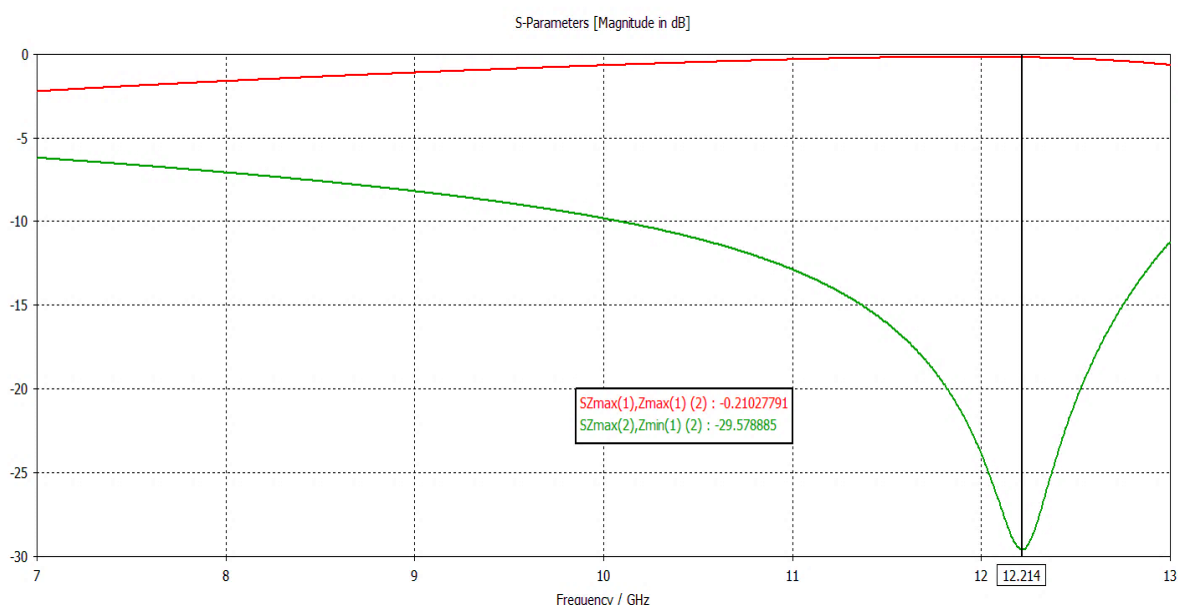
- Com a estrutura montada, e para a garantia dos resultados, é importante verificar as condições de contorno da estrutura, tal condição essa que vai ajustar todos os parâmetros necessários para a simulação. A aba **Simulation**, onde seleciona-se a opção **Boundaries**. O ângulo de incidência da onda plana pode ser especificado definindo os valores de Theta e Phi, apesar de ambos já estarem parametrizados pelo template. A Periodicidade da FSS pode ser configurada de acordo com os objetivos da simulação.
- A periodicidade pode também ser especificada como no exemplo, definindo o tamanho do substrato para a periodicidade desejada, podendo ainda ser verificado na opção **Boundaries**. Ainda nas configurações de contorno, em **Floquet Boundaries**, pode-se definir o modo em que a estrutura irá operar, nesse caso, seria nos modos $(TE(0,0))$ e $(TM(0,0))$, dependendo da aplicação, outros modos poderão ser selecionados. Com os modos definidos, visa-se analisar nos resultados os coeficientes de transmissão $SZ_{max(2)}SZ_{min(1)}$ e o coeficiente de reflexão $SZ_{max(1)}$ e $SZ_{min(1)}$.
- Com as condições de simulação ajustadas, é a vez de definir a discretização da malha, onde o software irá aplicar o método numérico da simulação. Na opção **Messh View**, a malha é gerada, e em **Global Properties** ajusta-se a malha para forma **Tetrahedral**, que vai abranger toda a estrutura para a simulação. Nessas configurações, define-se a malha em **Steps per Wavelength = 4** e **Min. Steps of steps = 10**, essa configuração é o suficiente para gerar resultados precisos sem consumir tanto o poder computacional. Feitos todos os ajustes, a simulação pode ser iniciada. Dependendo da configuração do computador utilizado na execução desta tarefa, o tempo de processamento pode variar, por isso não se recomenda executar tal tarefa em computadores cuja a configuração seja básica, pois o FIT, exige bastante poder de processamento.



2.3 Analisando os resultados das simulações

Os resultados desejados para análise encontram-se no *S-Parameters*, nesse diretório, estão presentes os gráficos de todo o comportamento da estrutura de acordo com os parâmetros estabelecidos. Nesse caso, por se tratar de uma FSS tipo *patch* o objetivo é verificar a sua antirressonância, ou seja, a sua capacidade de reflexão a determinada faixa de frequência, tal informação presente no $SZ_{max}(1)$. $SZ_{max}(1)$ e a nível comparativo, as informações referentes a transmissão $SZ_{max}(2)$ $SZ_{min}(1)$ servirão de referência para análise do comportamento da antirressonância como mostra a Figura 5.

Figura 5. Parâmetros S: análise dos coeficientes de transmissão e reflexão.



Analisando esse gráfico, pode-se inferir que essa FSS cujo $W = 10 \text{ mm}$ e $T = 12 \text{ mm}$, apresenta sua frequência de ressonância em $12,2 \text{ GHz}$, e largura de banda limitada a aproximadamente 3 GHz , devido a frequência máxima, estabelecida na simulação. Percebe-se também, que a estrutura apresenta uma antirressonância quase perfeita, pois a potência é bem próxima de 0 dB , atuando na mesma faixa de frequência do parâmetro S_{21} .

3 AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA

Foi realizado um minicurso no Laboratório de Computação da Faculdade de Engenharia da Computação e Telecomunicações da UFPA, onde houve no total de 10 alunos, como ilustrado na Figura 6.



Figura 6. Minicurso realizado na UFPA



3.1 Pesquisa

Para avaliar o grau de contribuição do CST como ferramenta auxiliar no processo de aprendizado em Engenharia, um questionário foi efetuado no final do minicurso com os 10 alunos participantes. Esta pesquisa foi composta de 8 perguntas objetivas, as quais foram respondidas ao final do minicurso. O resultado do questionário consta na Tabela 1 com seus respectivos percentuais.

3.2 Resultados da pesquisa

De acordo com os resultados obtidos na Tabela 1, os participantes do minicurso julgaram a ferramenta computacional CST como meio adequado no aprendizado de antenas e dispositivos de RF através das simulações. Eles também concluíram que o uso do *software* facilitaria o ensino dessas disciplinas, cuja a carga matemática é densa, além de poder aplicar esses conhecimentos adquiridos na prática. Como esperado, no processo de aprendizagem, os alunos tiveram uma pequena dificuldade na compreensão do software, entretanto essas dúvidas foram sanadas com êxito. Para finalizar a proposta metodológica, 100% dos alunos gostariam de explorar mais a ferramenta CST e aplica-la em seus futuros projetos e trabalhos.



Tabela 1. Resultados das perguntas.

Perguntas sobre o Ensino de Propagação utilizando o <i>PyLayers</i>	%SIM	%NÃO	%NÃO INFORMADA	%TOTAL
1. A ferramenta computacional melhorou meu conhecimento sobre projetos de antenas e FSS?	100	0	0	100
2. Deixaria a matéria de antenas e propagação; circuitos de RF, mais interessantes?	100	0	0	100
3. Softwares como o CST deveriam ser mais utilizados?	100	0	0	100
4. Só um tutorial seria suficiente para utilizá-lo?	20	80	0	100
5. Alguma dificuldade no entendimento do uso do software?	60	40	0	100
6. Essa metodologia com o uso do simulador CST me deu mais motivação para aprender?	100	0	0	100
7. Eu lembro de conceitos ensinados melhor do que se tiver somente aulas teóricas?	70	30	0	100
8. Gostaria de explorar mais a ferramenta computacional?	100	0	0	100

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi desenvolvido nesse trabalho um tutorial do *software* computacional CST® aplicado a uma FSS. O principal objetivo do trabalho consistiu na familiarização do aluno com a ferramenta de estudo e análise de estruturas eletromagnéticas. No estudo apresentado, explorou-se as funcionalidades do software no processo de montagem da estrutura, além da definição de parâmetros de acordo com a problemática, nesse caso, era observar o coeficiente de reflexão (S11) da FSS analisando sua ressonância na faixa de frequência utilizada, a utilização desse software possibilitou adicionar conhecimentos ao aluno, tais como: teoria de antenas e conceitos de campos radiados e modos de propagação assim como, rotinas para projeto de FSS e os procedimentos necessários para obtenção dos resultados.

Constatou-se que, além dos conceitos citados acima, é muito importante para o aluno de graduação possuir o domínio de uma ferramenta de simulação, pois desperta no mesmo o interesse por áreas que utilizam conceitos de eletromagnetismo ampliando seus conhecimentos principalmente em telecomunicações tornando-se, dessa forma, um mecanismo facilitador ao desenvolvimento de trabalhos de conclusão de curso (TCC) e outros projetos correlatos.

No ponto de vista dos discentes, o *software* se mostra como uma poderosa ferramenta no auxílio de disciplinas cuja ementa envolva a teoria eletromagnética, haja vista que tais disciplinas possuem densa base matemática que tem sido muito explorada em sala de aula, tornando-as desestimulante para eles por não haver abordagem prática. Por esta razão, o CST® vem para suprir essa necessidade, criando grande expectativa na realização de projetos e demonstrações em sala.



Agradecimentos

O grupo envolvido neste trabalho agradece ao LDI (Laboratório de Desenvolvimento de Ideias) por fornecer suporte no desenvolvimento desse trabalho. Ao LCT (Laboratório de Computação e Telecomunicações) por oferecer todo o suporte técnico e teórico no desenvolvimento deste trabalho além do apoio oferecido a dar continuidade em projetos correlatos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FILHO, B. Sá de A.; PEROTONI, M.; JUNQUEIRA, C. Análise de impulsos em antenas UWB. Anais: IX - Simpósio de Guerra Eletrônica (SIGE). São Paulo: ITA, 2004.

ALCANTARA NETO, M. C.; ARAÚJO, J. P.; BARROS, F. J.; CAVALCANTE, G. P. S. Bioinspired multiobjective synthesis of X-band FSS via general regression neural network and cuckoo search algorithm. Microwave and Optical Technology Letters (Print), v. 57, p. 2400-2405, 2015.

MOURA, Leidiane, INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA, Caracterização de FSS com geometria estrela de quarto braços tipo fenda, 2015 Dissertação de Mestrado, , Brasil, 2015.

JANG, S. D.; KANG B. W.; KIM J., “Frequency selective surface based passive wireless sensor for structural health monitoring,” Smart Materials and Structures, n. 22, 2013.

RIEDEL, Susan A. NILSSON, James W. Circuitos Elétricos.8. ed. Prentice Hall/ Pearson, 2008

STUDY OF THE CST COMPUTATIONAL TOOL IN THE ANALYSIS OF FSS AS A TEACHING METHODOLOGY IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING

Abstract: *The advance of computational solutions has contributed to the engineering, in the aid of projects involving simulations. In telecommunication engineering, the use of these tools has been of great importance for the design of antennas, filters, FSS (Frequency Surfaces) and other components. Through simulations it is possible to encourage learning in a more dynamic and applied way, showing the students the behavior of electromagnetic waves, in certain devices, for example. Full-wave electromagnetic field simulators let the analysis of complex structures, and allow the replacement of the iterative experimental design process. However, students of the undergraduate degree in telecommunications engineering and related subjects of the Federal University of Pará, Campus Belém, have no contact with this type of software. In this paper we propose the analysis of a Triangular Patch Frequency Surface (FSS) in order to explore the CST software tools, to familiarize the student with the software and about the numerical method used in the modeling and simulation of the*



structure in form of tutorial, used as teaching methodology to aid disciplines involving projects with antennas, propagation, circuits and RF (Radiofrequency) devices.

Key-words: FSS, Engineering education, Electromagnetism, Numerical methods, Professional training.

Organização



Promoção

