



Anais do XXXIV COBENGE. Passo Fundo: Ed. Universidade de Passo Fundo, Setembro de 2006.
ISBN 85-7515-371-4

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS PARA O CURSO DE ELETROMAGNETISMO

MSc. Arlindo Garcia Filho – arlindo@facens.br

MSc. Joel Rocha Pinto – joel@facens.br

Marcos Fabio Jardini - marcos.f.jardini@terra.com.br

Faculdade de Engenharia de Sorocaba

Rod. Sen. José Ermírio de Moraes, km 1.5, nº1425

CEP. 18087-125 – Sorocaba – S.P.

Resumo: *A disciplina Eletromagnetismo pode ser considerada como uma das que apresenta maior grau de dificuldade de assimilação por parte dos alunos. Concorre para isso o fato de necessitar de bom grau de abstração. E isso nem sempre é simples para os futuros engenheiros e sabe-se que a boa consolidação dos conceitos eletromagnéticos torna-se essencial para a formação de um engenheiro competente. Este trabalho apresenta aplicações do Matlab em aulas de Laboratório da disciplina de Eletromagnetismo. Apresenta também outra ferramenta, desenvolvida por programação computacional por alunos de Iniciação Científica e que também pode ser utilizada nessas aulas. O uso desses tipos de recurso contribui muito para assimilação de qualquer tipo de conceito que se queira desenvolver, devido à facilidade de uso, potencial para cálculos complexos ou repetitivos, geração de gráficos e interfaces de interação. Com isso, pretende-se contribuir para a formação de um profissional melhor capacitado.*

Palavras-chave: *Ferramenta computacional, Linha de transmissão, Matlab*

1. INTRODUÇÃO

As Diretrizes Curriculares Nacionais do Curso de Graduação em Engenharia, diz que devem ser estimuladas atividades complementares, de forma a dotar o profissional de conhecimentos requeridos para o exercício de competências e habilidades, que devem contemplar o perfil do formando egresso/profissional. Dentre essas atividades, as que se utilizam de ferramenta computacional muito podem contribuir para a consolidação de

conceitos e também no desenvolvimento de habilidades para a utilização de novas ferramentas e técnicas.

Com esses objetivos foram desenvolvidas duas ferramentas computacionais, para auxiliarem em conteúdos da disciplina de Eletromagnetismo. Uma delas, utilizando o ambiente de modelamento matemático MATLAB, foi direcionada para estudo sobre Ondas Planas. Outra, utilizando programação foi direcionada para estudos com Linhas de Transmissão. Essas ferramentas foram desenvolvidas por alunos do Programa de Iniciação Científica, da Faculdade de Engenharia de Sorocaba, FACENS.

2. AMBIENTE DE MODELAMENTO MATEMÁTICO MATLAB

O ambiente de modelamento matemático MATLAB, , proporciona uma interface simples, um conjunto abrangente de equações matemáticas e recursos para o desenvolvimento das próprias equações e interfaces.

O *software* se divide em três módulos básicos: principal, *Simulink* e *Guide*.

O módulo principal, apresentado ao se abrir o programa, é composto de três janelas, contendo a linha de comando, tabela de variáveis e tabela históricos, respectivamente.

O módulo *Simulink*, que apresenta um novo ambiente, semi-independente, para elaboração de diagramas de blocos e controles de fluxo.

O módulo *Guide*, que é voltado mais para a programação de janelas de interação com o usuário, com uma linguagem parecida com o *BASIC*, apesar de oferecer a possibilidade de se utilizar os comandos matemáticos do 1º módulo.

Foram utilizados o modulo principal e o modulo *Simulink*. No modulo principal, ambiente de comando, permite-se criar e executar funções, tanto internas do sistema como desenvolvidas pelo usuário. Pode-se produzir uma grande variedade de gráficos, com praticamente qualquer conjunto de variáveis, incluindo gráficos em três dimensões, dois eixos 'y', animados, curva, coluna, "torta", etc.

O módulo de diagrama de blocos, *Simulink*. destina-se à elaboração de esquemas visuais de controle de fluxo e até mesmo de desenvolvimento de equações matemáticas de forma bastante intuitiva.

O desenvolvimento de blocos dá-se de forma análoga à de uma função, com a diferença de ser em modo visual e não escrito. Após serem definidos os blocos com as funções desejadas e interligá-los é possível encapsular o diagrama em um novo bloco, deixando sua utilização transparente.

Assim como uma função, um bloco possui parâmetros de entrada, mas estendendo a mesma, ele pode possuir vários parâmetros de saída. Como se trata de um ambiente de desenvolvimento visual é necessário, mas não obrigatório, a construção de uma máscara de entrada. Esta máscara guia o usuário do bloco a entrar com os parâmetros desejados de forma correta.

3. FUNÇÕES DESENVOLVIDAS

No estudo de ondas planas a determinação de alguns parâmetros dependem das características do meio onde elas se propagam. Lista-se abaixo algumas funções que foram desenvolvidas para a determinação desses parâmetros, bem como alguns exemplos dessas determinações. São elas :

Função constante de defasagem – β

Função impedância característica do meio – Z

Função comprimento de onda – λ

Função constante de propagação – γ

Função Constante de Defasagem Beta (β)

Sintaxe: $B = \text{beta}(Er, ur, w)$

Onde:

B é a constante de defasagem (β em rad/m)

Er é a constante de permissividade relativa ϵ_r .

ur é a constante de permeabilidade relativa μ_r .

w é frequência em rad/s, obtida por $w = 2\pi f$, onde f é a freq. em Hz (hertz)

Para o espaço livre Er e ur devem ser iguais a 1. Assim:

$$\beta = \omega \cdot \sqrt{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \mu_r \cdot \mu_0} \quad (1)$$

$$\text{Para } Er = ur = 1; \beta = \omega \cdot \sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0} = \omega \cdot \frac{1}{3 \cdot 10^8}$$

Ex.: Uma onda de 1MHz no espaço livre, 100 pontos de amostragem e $t = 0$.

$Er = 1$;

$ur = 1$;

$f = 1000000$;

$B = \text{beta}(Er, ur, 2 \cdot \pi \cdot f)$;

$L = \text{lambda}(B)$;

$z = 0:L/100:L$;

$\text{plot}(z, 10 \cdot \sin(-B \cdot z), 'b-')$;

Função Conversão de Onda Elétrica/Magnética

Sintaxes: $H_{\text{max}} \rightarrow E_{\text{max}}(Z)$

$E_{\text{max}} \rightarrow H_{\text{max}}(Z)$

Onde:

H_{max} corresponde à amplitude máxima da onda Magnética.

E_{max} corresponde à amplitude máxima da onda Elétrica.

Z é a impedância característica do meio.

Apenas calcula o módulo da amplitude magnética com relação à amplitude elétrica e vice-versa. A relação é dada por:

$$\left| \frac{E}{H} \right| = Z \Rightarrow \begin{cases} E_{\max} = H_{\max} \cdot Z \\ H_{\max} = \frac{E_{\max}}{Z} \end{cases} \quad (2)$$

Exemplo: Onda elétrica de amplitude 10 A/m no espaço livre

$E = 10$;

$H = E_{\max} / Z_{\text{max}} (10, 120 \cdot \pi)$

$H = 0.0265$

Função Impedância Característica do Meio

Sintaxe: $Z = \text{impedance}(Er, ur, w, d)$

Onde:

Z é a impedância característica do meio

Er é a constante de permissividade relativa ϵ_r .

ur é a constante de permeabilidade relativa μ_r .

w é frequência em rad/s, obtida por $w = 2\pi f$, onde f é a freq. em Hz (hertz)

d é a constante de condutividade do meio

Para o espaço livre Er e ur devem ser iguais a 1 e a condutividade igual a 0 (dielétrico perfeito). Assim:

$$Z = 120 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon}}} \quad (3)$$

Para o espaço livre: $Z = 120 \cdot \pi$; e para um dielétrico:

$$Z = 120 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \quad (4)$$

Ex.:

$f = 1000000$;

$Z = \text{impedance}(1, 1, 2 \cdot \pi \cdot f, 0)$

$Z = 376.8$

$Z = \text{impedance}(1, 1, 2 \cdot \pi \cdot f, 1)$

$Z = 1.9870 + 1.9869i$

$Z = \text{impedance}(1, 1, 2 \cdot \pi \cdot f, 1000)$

$Z = 0.0628 + 0.0628i$

Função Comprimento de Onda (λ)

Sintaxe: $L = \text{lambda}(\beta)$

Onde:

L é o comprimento de onda λ dado em metros (m).

β é a constante de defasagem (β dado em rad/m).

Existem diferentes maneiras para se calcular o comprimento de onda, esta função enfatiza a equação (5).

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} \quad (5)$$

Função Freqüência de Onda Omega (□)

Sintaxe: `w = omega(freq)`

Onde:

w é a freqüência da onda em rad/s.

freq é a freqüência da onda em Hz.

Opera a transformação de Hz para rad/s conforme a equação: $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$

Função Constante de Propagação (□)

Sintaxe: `Y = propagcte(Er,ur,w,d)`

Onde:

Y é a constante de propagação do meio □ dada por □ □ □ j □ unidade [m⁻¹].

Er é a constante de permissividade relativa □_r.

ur é a constante de permeabilidade relativa □_r.

w é freqüência em rad/s.

d é a constante de condutividade do meio, □

A expressão geral para a constante de propagação é dada por:

$$\gamma = j\omega\sqrt{\mu\varepsilon} \cdot \sqrt{1 - j\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}} \quad (6)$$

Ex.:

`Er = 30;`

`ur = 1;`

`f = 1000000;`

`d=20;`

`Y=propagcte(Er,ur,omega(f),d)`

`Y = 8.8854 + 8.8861i`

`[abs(Y) angle(Y)] %angulo em rad`

`ans = 12.5664 0.7854`

Função Tangente de Perdas

Sintaxe: `tgP = tanlose(Er,w,d)`

Onde:

tgP é a tangente de perdas que caracteriza o meio.

Er é a constante de permissividade relativa □_r.

w é freqüência em rad/s.

d é a constante de condutividade do meio, □

A expressão geral para a tangente de perdas é dada por:

$$tgP = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon} \quad (7)$$

Podem ocorrer três casos com a tangente de perdas que caracterizam o meio de propagação:

$tgP \cong 1$: Meio quase condutor.

$tgP \gg 1$: Meio Condutor, $\sigma = \tilde{\sigma}$

$tgP \ll 1$: Meio não Condutor, $\sigma = \sigma = 0$ e $\tilde{\sigma} \neq 0$ (apenas parte imaginária).

4. BLOCOS DESENVOLVIDOS PARA O MÓDULO SIMULINK

Através de blocos, descritos abaixo, pode-se calcular as amplitudes de ondas eletromagnéticas planas; refletida e transmitida, a partir de uma onda plana incidente e das impedâncias dos meios envolvidos. Permitem também que se determine a atenuação na amplitude de uma onda, quando ela se propaga em um meio onde ocorrem perdas.

Trans_Refl_E – Bloco de Transmissão e Reflexão de Ondas Elétricas

Possui entradas IN1 e IN2, e saídas Transmit e Reflect.

As entradas IN (1,2) são independentes e utilizadas para o cálculo das saídas Trans. E Ref. respectivamente.

Internamente devem ser preenchidos os campos correspondentes às impedâncias do meio de entrada (A) e saída (B).

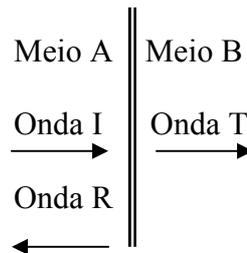


Figura 1 – Transmissão e Reflexão entre dois Meios A e B.

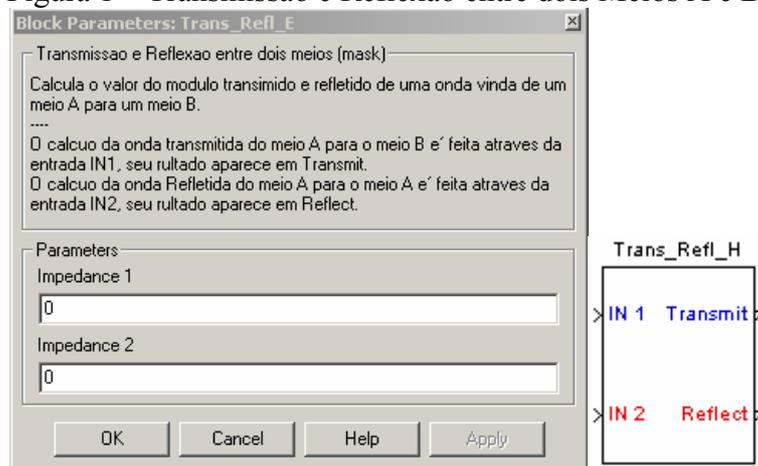


Figura 2 – Tela da entrada de dados dos blocos de reflexão e transmissão.

Trans_Refl_H – Bloco de Transmissão e Reflexão de Ondas Magnéticas

Possui entradas IN1 e IN2, e saídas Transmit e Reflect.

As entradas IN (1,2) são independentes e utilizadas para o cálculo das saídas Trans. E Ref. respectivamente.

Internamente devem ser preenchidos os campos correspondentes às impedâncias do meio de entrada (A) e saída (B)

Atenuação – Bloco de Atenuação do Meio em Ondas Eletromagnéticas

Possui como entrada ‘Sinal’ e como saída ‘Atenuado’.

A entrada de sinal é utilizada para o cálculo da onda atenuada após passar por um meio com perdas (α) de espessura X.

Devem ser fornecidos internamente a espessura do meio e o coeficiente de perdas α para o cálculo do novo módulo da onda.

Como exemplo, apresenta-se a simulação da passagem de uma onda Magnética, de amplitude máxima 1 A/m, proveniente do espaço livre através de um plano condutor de 5 m de espessura. Determina-se a amplitude máxima da onda após passar pelo condutor.

Cálculos:

Características da Onda:	Características do meio ²
Hmax = 1,0 A/m	$\mu = 61,7 \text{ M}; \mu_r = \epsilon_r = 1$
f = 200 MHz	$l = 5 \text{ m}$

No matlab:

```
Z = impedance(1,1,omega(200000000),61.7*1000000)
```

```
Z=0.0036 + 0.0036i
```

```
[abs(Z) angle(Z)]
```

```
ans = ans = 5.1E-3 0.7854
```

```
propagcte(1,1,omega(200000000),61.7*1000000)
```

```
ans=2.2072e+005 +2.2072e+005i
```

```
Z = 5,1 mΩ 220,72 · 103 Np/m
```

Simulink - instruções e telas

Digite “simulink” (sem as aspas) no ambiente do matlab e uma nova janela se abrirá. Clique em abrir (📁) e abra o arquivo “Eletromag.mdl”, clique em novo (📄) em qualquer uma das janelas. Arraste os módulos necessários da janela Eletromag e Simulink para a janela “novo”. Neste exemplo serão necessários:

blocos Trans_Refl_H (Eletromag)

bloco Atenuação (Eletromag)

1 bloco constante (Simulink -> Sources)

blocos display (Simulink -> Sinks)

vários terminadores (Simulink -> Sinks)

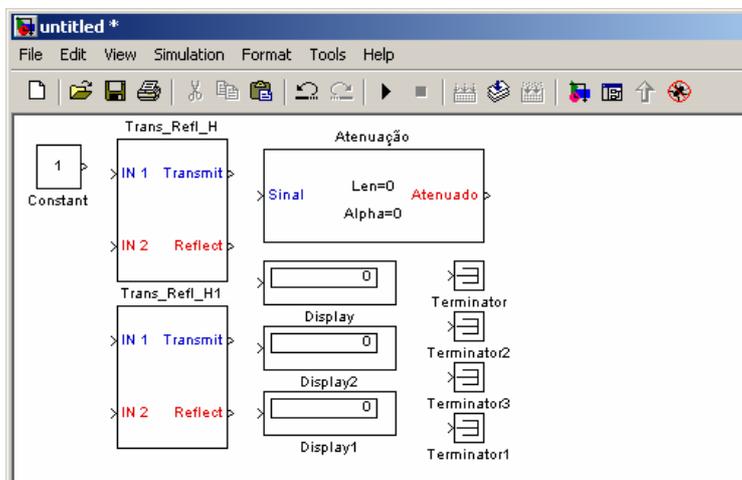


Figura 3 – Blocos necessários à construção do exemplo.

Montando e organizando os blocos basta clicar em (▶). Para o exemplo temos as seguintes impedâncias: meio A = $120 \cdot \pi$ e meio B = 0.0051 (calculado). Simulando teremos:

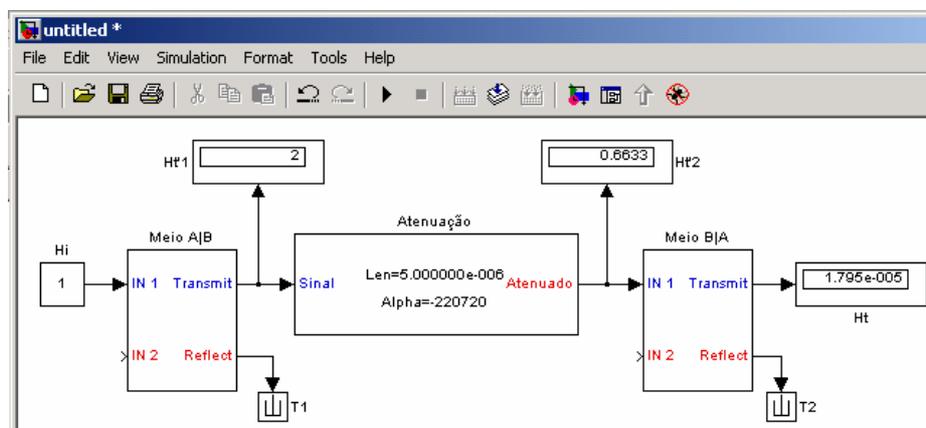


Figura 4 – Montagem final do Exemplo com valores e resultados.

5. DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE PARA ANÁLISE DE LINHA DE TRANSMISSÃO

Ao se conectar uma carga a um gerador através de uma linha de transmissão, tem-se um transitório de tensão até que o sistema entre em regime. Para a simulação desse transiente, foi desenvolvida uma ferramenta que permite determinar o comportamento da tensão nos terminais do gerador e da carga, bem como na interligação de duas linhas de transmissão de impedâncias diferentes. Isso é feito a partir da tensão e impedância do gerador e das impedâncias da linha de transmissão e da carga. Com esses dados, o software calcula os coeficientes de reflexão e transmissão, tanto no gerador como na carga. A partir desses coeficientes, determina as diversas tensões e exibe graficamente o comportamento da tensão ao longo do tempo, fornecendo ainda, a tensão de regime permanente.

A seguir são apresentados dois exemplos com os respectivos resultados e valores simulados no software.

Exemplo 1: Circuito em 1 meio.

Gerador com $E = 100 \text{ V}$

Impedância do Gerador $Z_G = 0,0005 \Omega$

Impedância da Linha de Transmissão $Z_O = 0,0025 \Omega$

Impedância da Carga $Z_L = 10 \Omega$

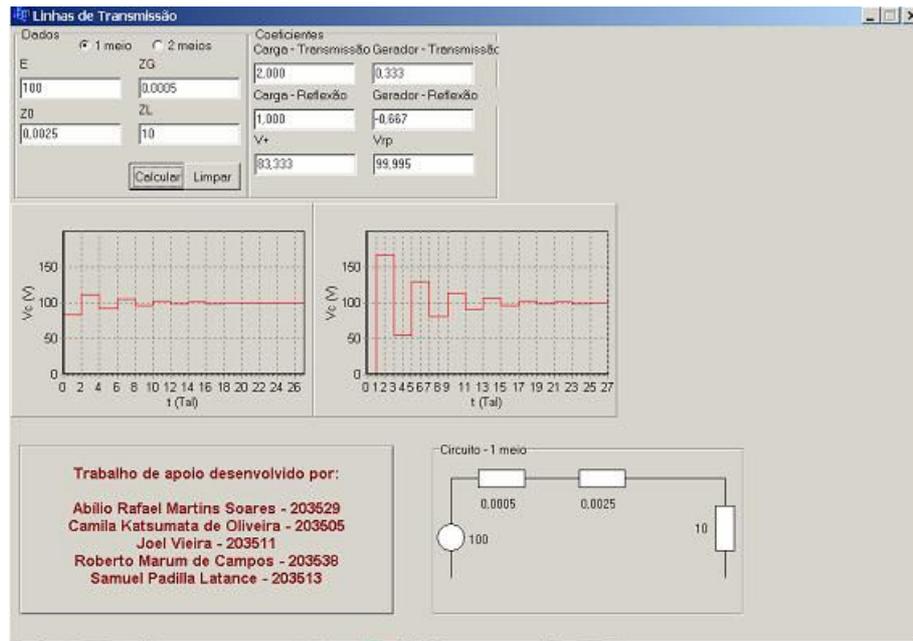


Figura 5 – Valores e resultados do exemplo 1, circuito em um meio.

Exemplo 2: Circuito em 2 meios.

Gerador com $E = 100 \text{ V}$

Impedância do Gerador $Z_G = 0,0005 \Omega$

Impedância da Linha de Transmissão $Z_1 = 0,0035 \Omega$

Impedância da Linha de Transmissão $Z_2 = 0,0030 \Omega$

Impedância da Carga $Z_L = 10 \Omega$

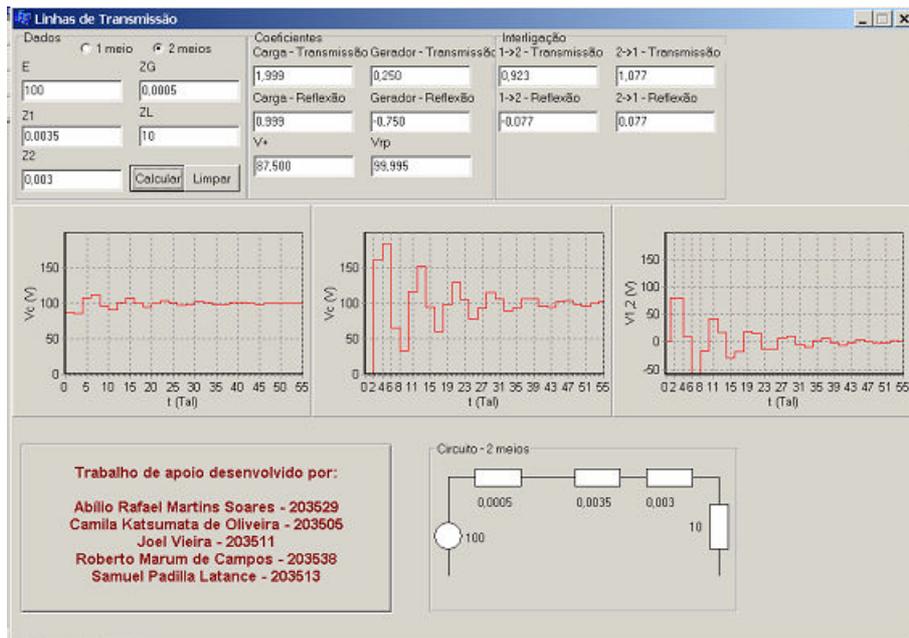


Figura 6 – Valores e resultados do exemplo 2, circuito em dois meios.

2. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As atividades que utilizam ferramentas computacionais têm contribuído para a formação de um profissional com competências e habilidades na resolução de problemas e também na utilização de novas ferramentas e técnicas. O uso dessas ferramentas motivou alunos a participarem de projetos, nas mais diversas áreas. Além disso, a simulação em muito tem contribuído no estudo de diversos conteúdos que envolvem o estudo de ondas planas e linha de transmissão. Para a melhoria e ampliação das aplicações das ferramentas foram constituídos grupos de estudos, formados por professores e alunos dos Cursos de Engenharia Elétrica e Engenharia da Computação da Faculdade de Engenharia de Sorocaba, FACENS.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. HAYT Jr., Willian H., **Eletromagnetismo**. Rio de Janeiro, ed.: L.T.C., 2002.
2. MATSUMOTO, Elia Yathie, **Matlab 6.5: Fundamentos de Programação**. São Paulo, ed. Érica, 2001.
3. LONNGREN, Karl Erik, **Eletromagnetics with MATLAB**. Cambridge, England : Cambridge International Science Publishing, 1997

DEVELOPMENT OF COMPUTATIONAL TOOLS FOR THE ELETROMAGNETISM COURSE

Summary: *The Eletromagnetism disciplin can be considered as one that presents the most difficult assimilation degree by the students. A fact that helps in that is the need to have a good abstraction level. And that is not always simple to the future engeneers, and its known that the good eletromagnetics concepts' consolidation become essential to a competent engeneer formation.*

This article presents Matlab applications in eletromagnetism's lab classes. It also presents another tool, developed by computer programming by cientific initiation's students, that can also be used in these classes. The use of these kind of resources contributes a lot to assimilate any kind of concept that is desired to be developed, due to the use's easiness, potential to complex or repetitive calculus, graphics generation and interaction interfaces. With that, it's intended to contribute to a better capacitated professional formation.

Keywords: *Computational tool, Transmission line, Matlab*