

Análise de Antenas em 2-D Utilizando o Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo com Processamento Paralelo e MPI

Josivaldo de S. Araújo, Carlos Leonidas S. S. Sobrinho, Ronaldo O. dos Santos, L. Affonso Guedes, Regiane Y. Kawasaki e Johnny M. Rocha

Universidade Federal do Pará (UFPA), DEEC, CEP: 66075-110, Belém, PA.

Resumo – Uma das técnicas numéricas mais utilizadas em eletromagnetismo é o método das diferenças finitas no domínio do tempo – FDTD, pois apresenta, em termos de credibilidade e precisão, resultados computacionais satisfatórios na solução de muitos problemas. No entanto, existem dois grandes desafios para a utilização deste método: um é a grande quantidade de memória requerida, e o outro é o longo tempo de processamento. Para reduzir esses problemas foi desenvolvido um *cluster* do tipo *Beowulf*, o qual foi utilizado na implementação paralela do código FDTD. A formulação, assim desenvolvida, foi aplicada na análise (2-D) de duas antenas: sendo uma antena monopolo cilíndrica e uma antena corneta setorial plano-E. O ganho computacional pode ser observado com a redução no tempo de resposta da implementação paralela, quando comparada com a implementação sequencial.

Palavras-chave: Método FDTD, *cluster*, antena corneta, antena monopolo e implementação paralela.

Abstract – The finite difference time domain method is one of the most used numerical techniques in electromagnetism, because it presents, in terms of both credibility and precision, satisfactory computational results in the solution of many problems. However, there are two big challenges for the use this method the first one is the big amount of memory required and the second one is the long processing time. To reduce these problems it was developed a Beowulf cluster, which was used to implement the parallel computing of FDTD code. The formulation, so developed, was applied in the two-dimensional analysis of two antennas: cylindrical first and the E-plane sectorial horn. The gain with the parallel processing can be observed through the reduction of computation time by setting a comparison with the serial implementation

Keywords: FDTD method, cluster, horn antenna, monopole antenna and parallel implementation.

I. INTRODUÇÃO

O método das diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD) foi introduzido por Yee em 1966 [1] e mais tarde desenvolvido por Taflov et al [2-7]. O método é uma técnica simples, porém robusta que fornece uma solução numérica para as equações de Maxwell, usando-se diferenças centradas com solução envolvendo precisão de segunda ordem no espaço e no tempo.

No trabalho desenvolvido por Yee, o método foi inicialmente usado para analisar o espalhamento de ondas eletromagnéticas por objetos, utilizando com isso, a solução das equações do rotacional no tempo de Maxwell. Posteriormente, com o aperfeiçoamento de técnicas que permitiram incluir fontes dentro do domínio computacional, o método foi utilizado para a análise de estruturas radiantes.

Por ter sido objeto de intensa pesquisa nos últimos anos, as técnicas numéricas tiveram uma grande evolução, como por exemplo, as condições de contorno absorvente, *Perfectly Matched Layer* (PML), proposta inicialmente por Berenger [8] e o algoritmo FDTD em coordenadas não ortogonais [9]. Estas técnicas fizeram com que o método pudesse hoje, ser utilizado para analisar estruturas maiores e mais complexas, obtendo com isso, resultados mais precisos e satisfatórios.

No entanto, apesar da facilidade na utilização e de todo o poder computacional proporcionado pelo método, tem-se dois grandes desafios a serem superados que são: a grande quantidade de memória requerida e o longo tempo de processamento. Para superar esses desafios e evitar o estrangulamento da simulação, a solução foi a implementação paralela do código FDTD utilizada conjuntamente com uma técnica surgida no início dos anos 90, os *cluster* de PCs [10].

O *cluster* surgiu com o objetivo de solucionar grandes tarefas, no menor tempo possível e com menor custo, ou seja, surgiu como uma solução computacional mais viável e tão eficiente quanto os chamados supercomputadores, que em geral, possuem uma hora-uso em tempo real com custo bastante elevado. Aliado a essa tecnologia de *hardware* aproxima-se o avanço da tecnologia de *software*, onde se desenvolveram sistemas mais leves, porém mais robustos como o *Linux* [11], e bibliotecas que pudessem realizar a comunicação entre os computadores interligados através de uma rede de dados. Para se ter uma continuidade nas tarefas, as bibliotecas de passagem de mensagem mais utilizadas são a MPI (*Message Passing Interface*) [12-14] e a PVM (*Parallel Virtual Machine*) [15], ambas definidas para as linguagens de programação C, C++ e Fortran (77 e 90).

Carlos Leonidas S.S. Sobrinho é coordenador do Laboratório de Análise Numérica em Eletromagnetismo – LANE. L.Affonso Guedes atualmente é professor da UFRN. Regiane Y. Kawasaki é professora do Departamento de Informática da UFPA. Josivaldo S. Araújo, Ronaldo O. Santos e Johnny M. Rocha são doutorandos do PPGEE da Universidade Federal do Pará.
E-mails: jsaraujo@interconect.com.br, leonidas@ufpa.br, ronaldo@ufpa.br, affonso@dca.ufrn.br, kawasaki@ufpa.br, jmarcusrocha@yahoo.com.br, ,

O Laboratório de Análise Numérica em Eletromagnetismo – LANE, do Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Federal do Pará – DEEC/UFPA, desenvolveu dois *clusters* do tipo Beowulf, o LANE1, composto de três máquinas e o AMAZÔNIA, que possui oito máquinas.

Neste trabalho, estaremos utilizando o *cluster* LANE1 para analisar uma antena corneta setorial plano-E e o *cluster* AMAZÔNIA para analisar uma antena monopolo cilíndrica, ambas em 2-D, para demonstrar o ganho computacional obtido com a implementação paralela do código FDTD [16]. Este ganho será apresentado através do *speedup* e do tempo de reposta, obtidos com o processamento sequencial e paralelo das antenas consideradas.

II. MODELAGEM DAS ANTENAS POR FDTD

Neste trabalho são apresentadas e analisadas duas antenas utilizando o método FDTD: uma antena corneta setorial plano-E com abertura de 14° , em coordenadas retangulares, e uma antena monopolo cilíndrica com plano de terra infinito, em coordenadas cilíndricas. Nas duas formas de cálculo, foram mantidas as discretizações espacial e temporal, além de serem analisadas sequencial e paralelamente. A seguir, é apresentada toda a formulação teórica para cada uma dessas antenas.

II. 1. Antena Corneta Setorial Plano-E

Observa-se na Fig.1 a seção transversal do modelo bidimensional para a corneta setorial plano-E com abertura de 14° . Nesta figura todos os parâmetros são normalizados pelo comprimento de onda.

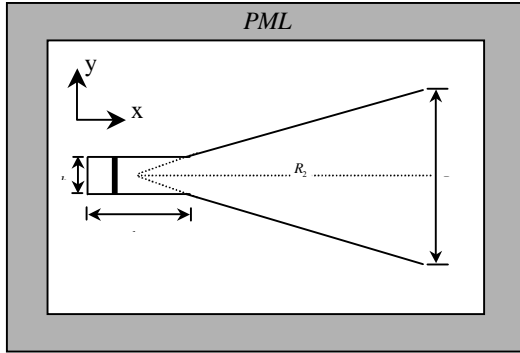


Fig.1 - Antena corneta setorial plano-E com abertura de 14° .

A corneta foi escolhida de acordo com a condição ótima, ou seja, $B=(2\lambda R_2)^{1/2}$ com $R_2 = 8\lambda$ [17] e o guia de onda com dimensões: $b=\lambda/2$ e $l=2\lambda$. Em nossa análise somente o modo TE é considerado, de forma que o problema se reduz nas seguintes componentes (E_x, E_y) para o campo elétrico e (H_z) para o campo magnético.

Na região de PML, as equações rotacionais de Maxwell são expressas por [18]:

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega \epsilon_0 \epsilon_r \vec{S} E, \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega \mu_0 \mu_r \vec{S} H, \quad (2)$$

onde

$$\vec{S} = \begin{bmatrix} \frac{S_y S_z}{S_x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{S_x S_z}{S_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{S_x S_y}{S_z} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

e

$$S_x = 1 + \frac{\sigma_x}{j\omega \epsilon}; S_y = 1 + \frac{\sigma_y}{j\omega \epsilon}; S_z = 1 + \frac{\sigma_z}{j\omega \epsilon}. \quad (4)$$

Observa-se que S_x , S_y e S_z estão associados com os planos normais às direções x , y e z , respectivamente. Fora da região de PML os respectivos $\sigma_i = 0$ ($i = x, y, z$). Além disso, os S_i devem ser invariantes ao longo de suas direções transversais, com os seus σ_i tendo a seguinte forma:

$$\sigma_i(i) = \frac{\sigma_{MAX} (|i - i_0| \Delta x)^m}{d^m}, \quad (5)$$

onde i_0 é a posição da interface, d é a profundidade da PML e m é a ordem da variação polinomial. As equações para as componentes E_x , E_y e H_z , para o modo TE, são obtidas das equações (1) – (3), respectivamente, por:

$$j\omega \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S_y S_z}{S_x} E_x = \frac{\partial H_z}{\partial y}, \quad (6)$$

$$j\omega \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S_x S_z}{S_y} E_y = -\frac{\partial H_z}{\partial x}, \quad (7)$$

$$-j\omega \mu_0 \mu_r \frac{S_x S_y}{S_z} H_z = \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y}. \quad (8)$$

Para a obtenção da expressão de atualização da componente E_x , equação (6), introduz-se a definição da densidade de fluxo elétrico, o que é feito através da seguinte equação:

$$D_x = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S_y}{S_x} E_x, \quad (9)$$

então, a equação (6), passa a ser:

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} = j\omega S_z D_x = j\omega \left(1 + \frac{\sigma_z}{j\omega \epsilon_0} \right) D_x = j\omega D_x + \frac{\sigma_z D_x}{\epsilon_0}, \quad (10)$$

transformando a equação (10) para o domínio do tempo, obtém-se a equação para D_x na forma discretizada:

$$D_x^{n+1}(i, j) = D_x^n(i, j) \left(\frac{1 - \frac{\sigma_z \Delta t}{2\epsilon_0}}{1 + \frac{\sigma_z \Delta t}{2\epsilon_0}} \right) + \frac{\Delta t}{2\epsilon_0} \left[\frac{H_z^{n+1/2}(i, j) - H_z^n(i, j - 1)}{\Delta y} \right]. \quad (11)$$

A partir da equação (9), calcula-se as componentes E_x , E_y e H_z , as quais são expressas, na forma discretizada por:

$$E_x^{n+1}(i, j) = E_x^n(i, j) + \frac{\Delta t}{\epsilon_0 \Delta y} \left[H_z^{n+\frac{1}{2}}(i, j) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i, j-1) \right], \quad (12)$$

$$E_y^{n+1}(i, j) = E_y^n(i, j) - \frac{\Delta t}{\epsilon_0 \Delta x} \left[H_z^{n+\frac{1}{2}}(i, j) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i-1, j) \right], \quad (13)$$

$$H_z^{n+\frac{1}{2}}(i, j) = H_z^{n-\frac{1}{2}}(i, j) - \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta x} [E_y^n(i+1, j) - E_y^n(i, j)] - \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta y} [E_x^n(i, j+1) - E_x^n(i, j)]. \quad (14)$$

Na discretização da região de interesse utilizou-se uma malha uniforme bidimensional com elementos de dimensões de 310x248, sendo imposta a condição, $\lambda/20$ por $\lambda/20$ e, para a dependência temporal, $\Delta t \leq \Delta x / 2c$ obedecendo o critério de estabilidade proposto por Courant at all [19].

Como função de excitação usou-se o pulso gaussiano modulado em seno, expresso por:

$$f(t) = 1.484 \exp \left\{ - \left[(t - 3\tau_0) / \tau_0 \right]^2 \right\} \cdot \sin(2\pi f_c t) \quad (15)$$

onde

$\tau_0 = [\pi(f_h - f_c)]^{-1}$, $f_h = 15 \text{ GHz}$, $f_c = 10 \text{ GHz}$, com $t = n \cdot \Delta t$, $\Delta t = \lambda / (40 \cdot c)$ e $c = 2,99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$. Sendo, esta fonte, posicionada à $\lambda/4$ da parte traseira do guia (Fig.2).

Com o objetivo de truncar a malha FDTD optou-se pela técnica da PML anisotrópica uniaxial desenvolvida por S.D. Gedney [18], pelo fato da mesma mostrar-se mais eficiente, sob o aspecto computacional, que a PML de Berenger [8].

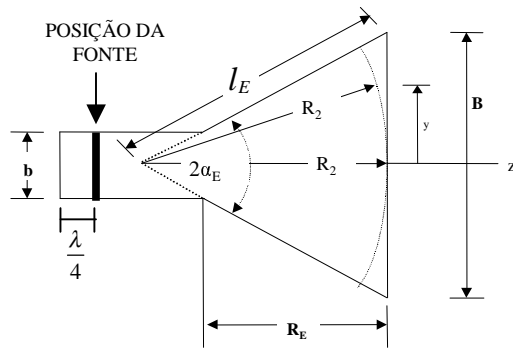


Fig.2 – Dimensões consideradas na Antena Corneta

II. 2. Antena Monopolo Cilíndrica

A Fig.3 apresenta a geometria para a antena monopolo, a qual é alimentada através de um plano imagem a partir de uma linha de transmissão coaxial. Todos os condutores são considerados perfeitos.

As dimensões da linha de transmissão coaxial, a e b , são escolhidas de forma que somente o modo eletromagnético transverso (TEM) possa ser propagado dentro da linha para o sinal de interesse.

A antena monopolo cilíndrica representa um problema eletromagnético bidimensional, pois tanto a antena como a sua fonte de alimentação são rotacionalmente simétricas. Os campos eletromagnéticos são independentes da coordenada cilíndrica ϕ , e as equações de Maxwell podem ser expressas como dois conjuntos independentes: Um que envolve somente as componentes E_r , E_z , H_ϕ , modo TM ou modo magnético transverso; e um que envolve somente as componentes E_ϕ , H_r , H_z , modo TE ou modo elétrico transverso. Como a excitação da antena é feita através de uma linha coaxial, somente os modos TM rotacionalmente simétricos serão excitados, dessa forma esse modo é utilizado em nossa análise.

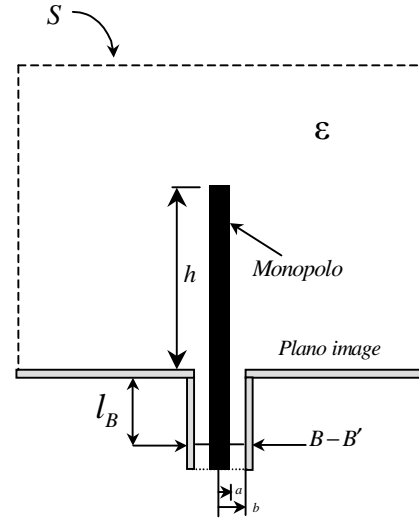


Fig.3 – Geometria da antena monopolo cilíndrica alimentada através de um plano imagem, por uma linha de transmissão coaxial.

Sendo assim, as equações de Maxwell para esse modo, obtém-se de:

$$\frac{\partial E_r}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial r} = -\mu_0 \frac{\partial H_\phi}{\partial t}, \quad (16)$$

$$-\frac{\partial H_\phi}{\partial z} = -\epsilon_0 \frac{\partial E_r}{\partial t}, \quad (17)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial (r H_\phi)}{\partial r} = \epsilon_0 \frac{\partial E_r}{\partial t}, \quad (18)$$

estas equações são, então, discretizadas usando-se o método FDTD. Tendo-se como resultado, as seguintes equações.

$$H_\phi^{n+\frac{1}{2}}(i, j) = H_\phi^{n-\frac{1}{2}}(i, j) + \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta r} [E_z^n(i, j) - E_z^n(i-1, j)] - \quad (19)$$

$$\frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta z} [E_r^n(i, j+1) - E_r^n(i, j)],$$

$$E_r^{n+1}(i, j) = E_r^n(i, j) - \frac{\Delta t}{\epsilon_0 \Delta z} \quad (20)$$

$$[H_\phi^{n+0.5}(i, j) - H_\phi^{n+0.5}(i, j-1)],$$

$$E_z^{n+1}(i, j) = E_z^n(i, j) - \frac{\Delta t}{\epsilon_0 \Delta r} \frac{1}{r_{i+0.5}} \left[r_{i+1} H_\phi^{n+0.5}(i+1, j) - r_i H_\phi^{n+0.5}(i, j) \right]. \quad (21)$$

Os parâmetros que descrevem a antena monopolo são: a altura h e os raios a e b dos condutores da linha coaxial. A antena é caracterizada pelo tempo $\tau_a = h/c$, que é o tempo necessário para a luz percorrer o comprimento da antena. Na região de análise usou-se uma malha uniforme bidimensional de 600×600 , com $\Delta r = \Delta z = h/250$ e $\Delta t = h/(500.c)$.

O monopolo cilíndrico foi excitado por um pulso gaussiano de 1V. O ponto de excitação foi a seção transversal B-B' localizado na linha de alimentação, Fig.3. Nessa seção transversal o campo elétrico incidente é dado por:

$$E^i(t) = \frac{V^i(t)}{\ln(b/a)r} \hat{r} \quad (22)$$

onde

$$V^i(t) = V_0 \exp(-t^2 / 2\tau_p^2) \quad (23)$$

O plano B-B' tomado como referência na linha de alimentação foi escolhido de forma que os modos evanescentes, presentes na transição linha coaxial - antena monopolo, sejam desprezíveis, tipicamente $l_B = 3(b-a)$ [2].

Para limitar o domínio computacional usou-se como condição de contorno absorvente (ABC) Mur de 1ª ordem [20], a qual é aplicada sobre a superfície tracejada S , conforme mostrada na Fig.3.

III. PARALELISMO DE DADOS E A BIBLIOTECA DE COMUNICAÇÃO MPI

Com a crescente evolução das pesquisas na área da computação, a Cray apresenta na década de 70, o seu supercomputador, juntando em uma única máquina um conjunto de processadores que partilham a mesma memória, ou seja, as tarefas podiam ser realizadas de modo paralelo. Contudo, o acesso a esses supercomputadores era dificultado devido ao alto custo e com isso somente grandes instituições podiam adquiri-los [21].

Para superar o problema do alto custo e popularizar o processamento paralelo, no início dos anos 90 [21], o Centro de Excelência em Dados Espaciais e Informações Científicas (CESDIS), órgão da NASA, montou a primeira arquitetura paralela de computadores, denominada *cluster Beowulf* [21].

O paralelismo é uma técnica utilizada para solucionar problemas complexos e de grandes volumes de dados no menor tempo possível [22]. Para isso, divide-se o problema em tarefas menores que serão, então, distribuídas entre os vários processadores, para serem executadas cooperativamente [23], conforme esquema mostrado na Fig 4.

A programação paralela é significativamente mais difícil que a programação sequencial, isso porque envolve a preocupação com a sincronização entre as tarefas, assim como, a análise de dependência de dados [24].

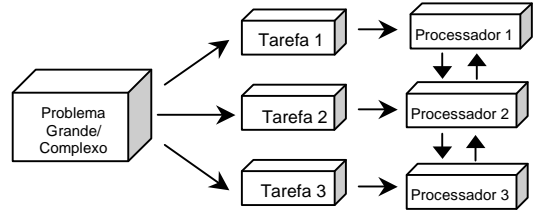


Fig. 4 – Divisão do problema, em tarefas menores, entre os vários processadores.

Neste trabalho, utilizou-se como biblioteca de passagem de mensagem a LAM/MPI desenvolvida pelo Ohio Supercomputer Center [25].

O mecanismo básico de comunicação da MPI é a transmissão de dados envolvendo dois processos, onde um processo (fonte) faz uma chamada à biblioteca MPI para enviar (*send*) uma mensagem (dados) e um outro processo (destino), também fazendo uma chamada à MPI, recebe (*receive*) a mensagem enviada, conforme Fig.5.

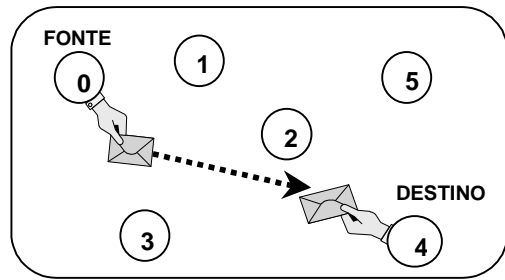


Fig. 5 – Esquema simplificado de envio e recebimento de mensagens.

A MPI, ao contrário das demais bibliotecas de passagem de mensagem, não adotou como padrão apenas uma plataforma e um ambiente, e sim incorporou as principais características dos melhores ambientes e plataformas existentes. Assim a MPI tem como base principal às bibliotecas *PVM*, *Express*, *P4*, *Zipcode* e o *Parmarcs*, além das plataformas vendidas pela *IBM*, *Intel*, *Meiko Scientific*, *Cray Research* e *nCube*.

IV. OS CLUSTERS LANE1 E AMAZÔNIA

Computação de *Clustering* é baseada na simples idéia de conectar alguns computadores e usar o poder coletivo deles para resolver um problema mais rapidamente. Um *cluster* consiste basicamente de um conjunto de computadores ou processadores conectados através de uma rede local (FDDI, *Fast Ethernet*) [26] ou através do compartilhamento de memória. Existem os mais diversos tipos de *clusters*, contudo o *cluster Beowulf* tornou-se bastante popular devido ao seu baixo custo operacional e facilidade de uso. Este modelo baseia-se em CPU's (gabinete, placa mãe, disco rígido, memória e placa de rede) conectadas através de rede de computadores, utilizando Sistema Operacional *Open source GNU/linux* e biblioteca de comunicação (MPI/PVM).

O Laboratório de Análise Numérica em Eletromagnetismo – LANE, juntamente com o Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação

da Universidade Federal do Pará desenvolveram dois *clusters* do tipo *Beowulf* para realizar estudos sobre processamento paralelo.

O primeiro *cluster* desenvolvido foi o LANE1 que é formado por três máquinas, sendo uma servidor (master) e duas escravas (*slaves*).

O hardware do *cluster* é baseado em Processadores Athlon 900MHz, com 256MB de memória SDRAM, disco rígido 10Gb e estão conectados através de Hub 10/100 Mbits, gerenciados pelo sistema operacional Linux, distribuição Red Hat 7.1, Kernel 2.4, e a biblioteca de comunicação é LAM/MPI versão 6.5.3.

O segundo *cluster* desenvolvido foi o AMAZÔNIA, uma parceria entre o DEEC/UFPa e as empresas Ericson e Amazônia Celular.

O *cluster* AMAZÔNIA é constituído por oito máquinas, uma servidor e sete escravos. O servidor possui dois processadores Athlon XP 1800+, 2 GB de memória DDRAM, 2 discos IDE ATA 133 de 60 GB uma placa controladora RAID ATA 133, uma placa de rede Gigabit 10/100/1000 e uma placa de rede Fast Ethernet 10/100. As máquinas escravas estão equipadas, cada uma, com um processador Athlon XP 1800+, 1,5 GB de memória DDRAM, um disco IDE ATA 133 de 60 GB e uma placa de rede Fast Ethernet 10/100. Assim como no *cluster* LANE1, o AMAZÔNIA também utiliza softwares de livre distribuição como o sistema operacional Linux, distribution Red Hat 7.3 e a biblioteca de passagem de mensagem MPI 2.0.

V. IMPLEMENTAÇÃO PARALELA DO CÓDIGO FDTD

A principal idéia da implementação paralela do código FDTD, neste trabalho, é dividir o domínio espacial em subdomínios de iguais dimensões (Decomposição de Dados ou Decomposição de Domínio) [23], em uma dada direção, onde as componentes de campo de cada subdomínio são calculadas por somente um processador, ou seja, o mesmo programa é executado por todos os processadores (nós), porém sobre dados diferentes. E para que haja uma continuidade na atualização das componentes de campo localizadas nas interfaces dos subdomínios, a distribuição dessas componentes é realizada explicitamente [23], ou seja, pelo próprio programador, via biblioteca de comunicação, através de rotinas de envio (*processo fonte*) e recebimento (*processo destino*) de mensagens.

V. 1. Antena Corneta Setorial Plano-E

A antena corneta foi analisada utilizando uma malha de 310x248 elementos. Esta malha foi dividida, inicialmente, em dois subdomínios de iguais dimensões e posteriormente, em três, resultando em matrizes de iguais dimensões de 104x248 [16], conforme apresentada na Fig.6.

Considerando-se o *cluster* LANE1, o domínio foi dividido em três subdomínios na direção *x*. Cada matriz foi armazenada e calculada por somente um processador, sendo que cada máquina calcula as componentes dos campos elétrico e magnético confinadas no seu domínio. Por exemplo, para a máquina 1, temos (H_{z1} , E_{x1} , E_{y1});

máquina 2, temos (H_{z2} , E_{x2} , E_{y2}) e para a máquina 3, temos (H_{z3} , E_{x3} , E_{y3}) conforme Fig.7.

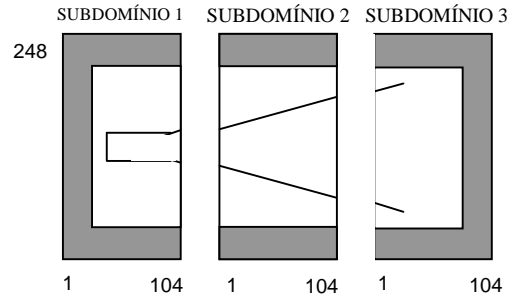


Fig.6 – Divisão do domínio em três subdomínios iguais.

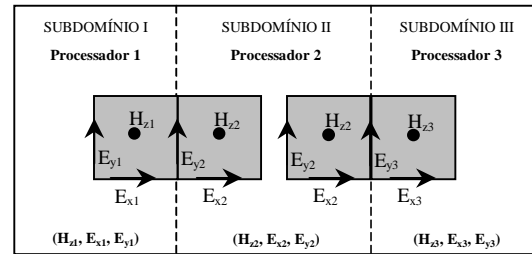


Fig.7 – Divisão do domínio da antena corneta em três subdomínios de iguais dimensões.

Na Fig. 8, mostra-se como é realizada a atualização das componentes de campo elétrico e magnético nas interfaces dos domínios de cada máquina.

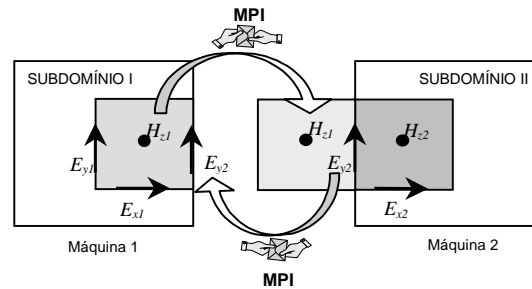


Fig.8 – Atualização das componentes de campo nas interfaces dos subdomínios utilizando coordenadas retangulares.

Observa-se que pela equação (24), que a componente de campo magnético (H_{z1}), foi calculada pela máquina 1, no instante $(n+1/2)$, para uma célula qualquer localizada na interface entre os subdomínios I e II, seu conhecimento é necessário no cálculo da componente de campo elétrico (E_{y2}) efetuada pela máquina 2, no instante (n) e, enviado por ela, através da biblioteca de comunicação MPI, para a máquina 1, no mesmo instante (n) .

$$H_{z1}^{n+1/2}(i,j) = H_{z1}^{n-1/2}(i,j) - \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta x} [E_{y2}^n(i+1,j) - E_{y1}^n(i,j)] - \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta y} [E_{x1}^n(i,j+1) - E_{x1}^n(i,j)] \quad (24)$$

O mesmo procedimento é realizado para a atualização da componente do campo elétrico (E_{y2}) para o instante $(n+1)$, analisando uma célula qualquer, na interface entre os subdomínios I e II. Na equação (25) se observa que é necessário o conhecimento da componente do campo magnético (H_{z1}), que foi calculada pela máquina 1 e enviada, através da MPI, para a máquina 2, no mesmo instante $(n+1/2)$.

$$E_{y2}^{n+1}(i, j) = E_{y2}^n(i, j) - \frac{\Delta t}{\epsilon_0 \Delta x} \left[H_{z2}^{n+\frac{1}{2}}(i, j) - H_{z1}^{n+\frac{1}{2}}(i-1, j) \right], \quad (25)$$

V. 2. Antena Monopolo Cilíndrica

A antena monopolo foi analisada utilizando uma malha com 600x600 elementos. Esta malha foi dividida, inicialmente em dois, quatro, seis e finalmente oito subdomínios, todos de iguais dimensões [16]. Para a divisão em oito subdomínios, resultaram matrizes de 300x200, e a divisão pode ser visualizada na Fig. 9.

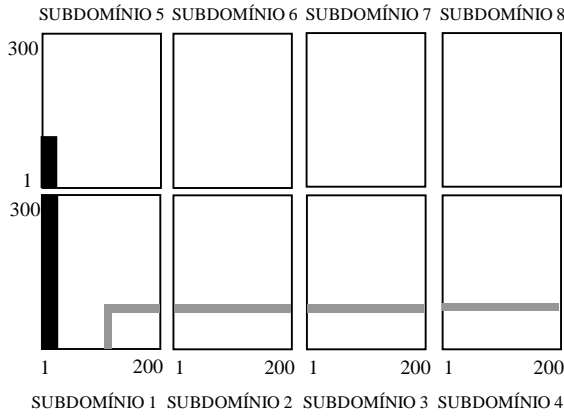


Fig.9 – Divisão do domínio em oito subdomínios iguais.

Para realizar esse estudo foi utilizado o *cluster* AMAZÔNIA e, o domínio foi dividido tanto na direção radial (r) quanto na direção (z). Assim como na antena corneta, cada matriz foi armazenada e calculada por somente um processador, sendo que cada um irá calcular as componentes dos campos elétrico e magnético confinadas no seu domínio. A atualização das componentes é realizada de maneira análoga a que foi apresentada anteriormente.

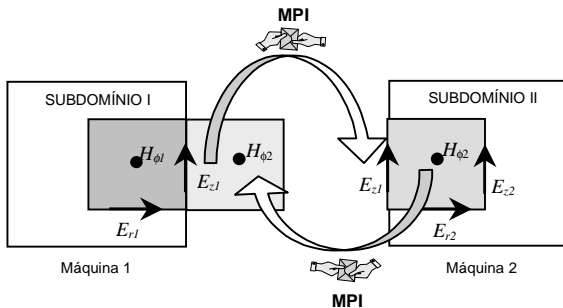


Fig.10 – Atualização das componentes de campo nas interfaces dos subdomínios utilizando coordenadas cilíndricas.

Dessa forma, tem-se, para cada máquina, as seguintes componentes de campo: para a máquina 1 (E_{r1} , E_{z1} , $H_{\phi1}$), para a máquina 2 (E_{r2} , E_{z2} , $H_{\phi2}$), para a máquina 3 (E_{r3} , E_{z3} , $H_{\phi3}$), etc.

Pela Fig.10 e pela equação (26), observa-se que para atualizar a componente do campo elétrico (E_{z1}) no instante $(n+1)$ para o subdomínio I, necessita-se da componente do campo magnético ($H_{\phi2}$) que se encontra no subdomínio II e que já foi obtida no instante $(n+1/2)$ e transferida para a máquina 1, via MPI, no mesmo instante de tempo.

$$E_{z1}^{n+1}(i, j) = E_{z1}^n(i, j) + \frac{\Delta t}{\epsilon_0 \Delta r} \frac{1}{r_{i+\frac{1}{2}}} \left[r_{i+1} H_{\phi2}^{n+\frac{1}{2}}(i+1, j) - r_i H_{\phi1}^{n+\frac{1}{2}}(i, j) \right]. \quad (26)$$

De maneira análoga irá acontecer na obtenção da componente do campo magnético ($H_{\phi2}$) que se encontra no subdomínio II. Como se pode observar pela equação (27).

$$H_{\phi2}^{n+\frac{1}{2}}(i, j) = H_{\phi2}^{n-\frac{1}{2}}(i, j) + \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta r} \left[E_{r2}^n(i, j) - E_{r2}^n(i, j-1) \right]. \quad (27)$$

VI. RESULTADOS OBTIDOS

O principal objetivo de uma arquitetura paralela é melhorar o desempenho dos programas, tornando-os mais eficientes e, utilizando para isso, toda a potência computacional. No entanto, a inclusão de mais processadores nem sempre significa uma redução no tempo de execução.

Para se realizar a avaliação no ganho de desempenho e potência computacional, algumas medidas são necessárias. Neste trabalho, utilizou-se para análise, uma granulosidade grossa, ou seja, o tempo de processamento é maior que o da comunicação e o *speedup*, que é a razão entre o tempo de execução em apenas um processador (processamento sequencial) e o tempo de execução em múltiplos processadores (processamento paralelo) [27].

O *speedup* pode ser representado pela seguinte equação, a qual foi utilizada neste trabalho [23]:

$$Speedup = \frac{\text{tempo 1 processador}}{\text{tempo } N \text{ processadores}}. \quad (28)$$

A relação entre os tempos resulta no desempenho, nunca superior ao número de processadores.

VI. 1. Validação dos Resultados Obtidos

A estabilidade da antena corneta foi alcançada após 800 iterações no tempo. Na Fig.11 mostra-se a distribuição do campo elétrico, componente E_y , após 550 iterações no tempo unificando as saídas de cada domínio. Os resultados apresentados utilizando-se processamento paralelo foram validados por comparação com aqueles

disponíveis na literatura utilizando-se processamento sequencial [28].

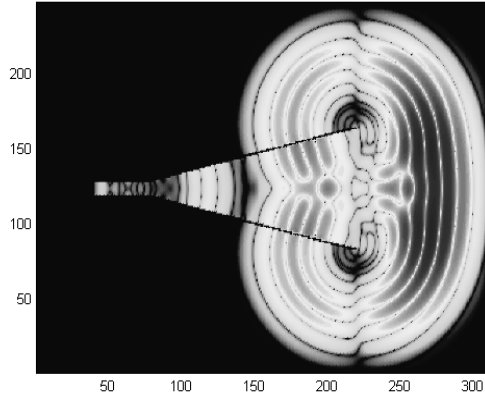


Fig.11 – Resultado obtido unificando as saídas de cada subdomínio.

Para a antena monopolo cilíndrica utilizou-se 10000 iterações no tempo. Para o resultado mostrado na Fig.12 usou-se $b/a=2.3$ que corresponde a uma impedância característica de 50Ω para a linha coaxial, $h/a=32.8$, $q/a=32.8$ e $\epsilon_r=1$. A razão do tempo característico do pulso gaussiano τ_p e do tempo característico da antena foi $\tau_p/\tau_a=1.61 \times 10^{-1}$. Esse resultado tem boa concordância com o resultado obtido por Maloney [29], com a diferença que em [29] é calculado a voltagem refletida, enquanto que na Fig.12 tem-se a voltagem incidente mais a voltagem refletida (voltagem total). A voltagem refletida pode ser facilmente obtida subtraindo a voltagem total da voltagem incidente.

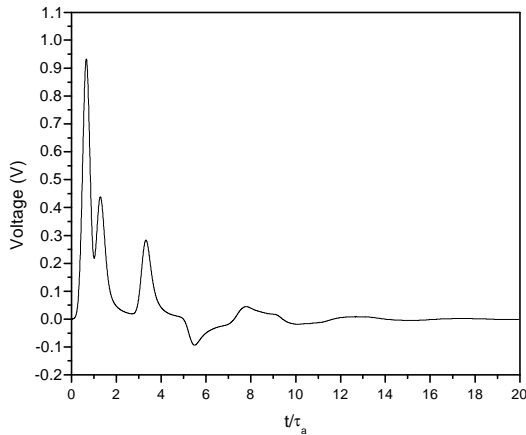


Fig.12 - Voltagem na linha coaxial para uma antena monopolo cilíndrica excitada por um pulso gaussiano de 1 V.

Já para o resultado mostrado na Fig.13 utilizou-se a componente de campo elétrico E_z , com 1200 iterações para a verificação da propagação da onda eletromagnética. O resultado obtido em processamento paralelo está em plena concordância com o resultado obtido no processamento serial. A Fig.13 apresenta o resultado obtido em cada um dos oito subdomínios do cluster AMAZÔNIA.

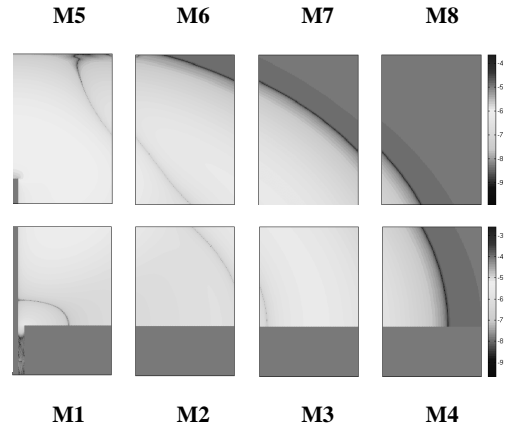


Fig.13 – Resultado apresentado em cada um dos oito subdomínios no cluster AMAZÔNIA.

VI. 2. Análise de Desempenho e Eficiência

Por se tratar do estudo da propagação de ondas eletromagnéticas por diferentes antenas em meios variados, os domínios (matrizes) utilizados para analisar as estruturas com o método FDTD são, geralmente, bastante grandes. Com isso, um dos principais problemas que começaram a ser solucionados, com o início da utilização da computação paralela, foi a diminuição do tempo de processamento.

Para validar o poder computacional do processamento paralelo implementado com FDTD em relação ao processamento serial, realizou-se uma comparação entre os tempos de resposta em ambos os códigos.

Na Fig.14 é apresentado o gráfico com os tempos de resposta para a antena corneta, utilizando o cluster LANE1, para o processamento serial e para o processamento paralelo em duas e três máquinas.

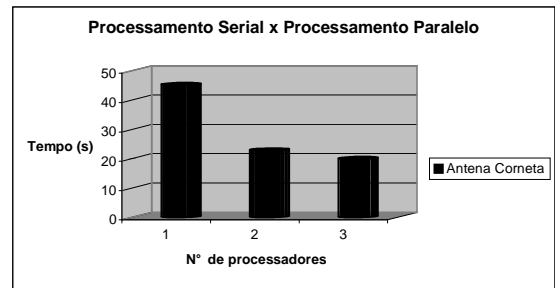


Fig. 14 – Tempos de resposta para a antena corneta utilizando o cluster LANE1.

Na Fig.15, apresenta-se o gráfico com os tempos de resposta para a antena monopolo cilíndrica, utilizando o cluster AMAZÔNIA, para o processamento serial e para o processamento paralelo em duas, quatro, seis e oito máquinas.

Já na Fig.16 é apresentado o gráfico do *speedup* para a antena corneta. Observa-se que há um ganho no tempo de resposta com o incremento de novas máquinas (processadores)

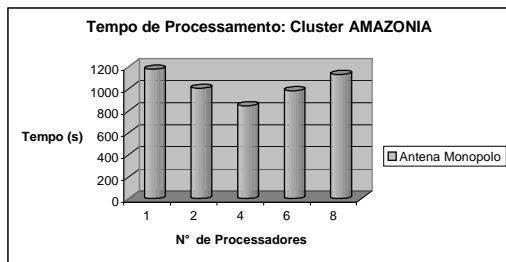


Fig.15 - Tempos de resposta para a antena corneta utilizando o cluster AMAZÔNIA.

Verifica-se, também, que de duas para três máquinas, o ganho de processamento já não é tão expressivo, isto quer dizer que, com o acréscimo no número de máquinas, iria chegar o momento em que o ganho desapareceria, ou seja, ter-se-ia mais comunicação do que processamento. Isto pode ser observado, para o *speedup* da antena monopolo, utilizando o cluster AMAZÔNIA, Fig 17.

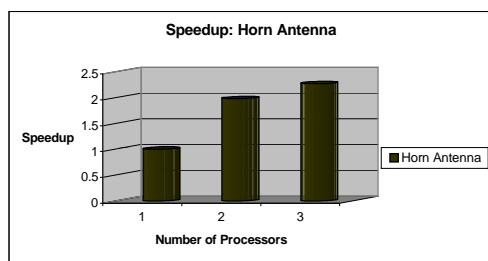


Fig.16 – Speedup para a antena corneta.

Na Fig. 17, apresenta-se o gráfico do *speedup* para a antena monopolo cilíndrica para uma, duas, quatro, seis e oito máquinas. Pode-se perceber uma perda de *speedup* a partir de seis máquinas. Como observado anteriormente, isso se dá devido ter um aumento na comunicação, o que acarreta uma diminuição no processamento.

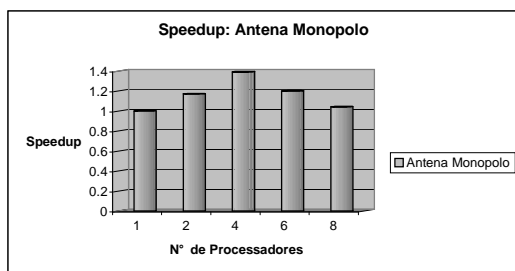


Fig.17 – Speedup para a antena monopolo cilíndrica.

Um outro fator que, também pode explicar essa diminuição do *speedup* é quanto ao tamanho do domínio, pois se tem uma malha de 600x600, ou seja, um domínio pequeno, e para tanto, não se necessita de muitos processadores para este caso.

VII. CONCLUSÕES

Neste trabalho, utilizou-se a implementação paralela do código FDTD, em 2-D, para analisar uma antena corneta setorial plano-E e uma antena monopolo

cilíndrica. O método FDTD, que é uma poderosa ferramenta computacional, devido a sua versatilidade e facilidade de uso, aplicado conjuntamente com o processamento paralelo mostrou-se ser uma ferramenta ainda mais poderosa para a solução de problemas em eletromagnetismo, pois permitiu a solução de tarefas envolvendo intenso processamento matemático e que, ao mesmo tempo, necessitavam de uma grande quantidade de memória e um longo tempo de processamento. Os resultados obtidos para cada caso analisado, apresentaram uma excelente concordância com aqueles disponíveis na literatura.

A computação paralela sobre uma arquitetura do tipo *cluster* é uma tendência forte, por apresentar uma relação custo/benefício atraente, como por exemplo, o uso de *softwares* de domínio público (*Linux* e *MPI*) e o uso de PCs comuns na implementação da arquitetura, bem como, pela facilidade de paralelizar códigos sequenciais, como o código FDTD.

Para realizar a comunicação entre os processos, utilizou-se, neste trabalho, a biblioteca de passagem de mensagem LAM/MPI, juntamente com o sistema operacional Linux, versão Red Hat.

Apesar da paralelização do código FDTD utilizando *MPI* ainda possuir uma bibliografia muito limitada, pôde-se perceber nos autores consultados que esta é uma área que se encontra em crescente expansão devido aos benefícios ofertados com o ganho no tempo de processamento e a utilização de memória compartilhada, o que permite a implementação do método em estruturas grandes e complexas.

A utilização paralela do código FDTD abre um vasto horizonte de aplicações, que vai desde a análise de estruturas simples em 1-D até as estruturas mais complexas em 3-D, com aplicações nas mais variadas áreas do conhecido.

Entre os trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos, usando-se a metodologia aqui aplicada, pode-se citar:

- ✓ O estudo da propagação de ondas eletromagnéticas em ambientes *indoor* como uma sala, uma casa, etc. Considerando o tamanho real das estruturas;
- ✓ O estudo de ondas eletromagnéticas utilizando estruturas grandes e complexas, como por exemplo, a propagação em ambientes *outdoors* como uma rua, um bairro, etc.
- ✓ No estudo das características dos mais variados tipos de antenas;
- ✓ Em projetos e análises de sistemas de aterramento, etc.

O principal objetivo deste trabalho foi alcançado, ou seja, iniciar o estudo de uma implementação paralela para o código FDTD, baseado na eficiência e confiabilidade do sistema utilizado e dos resultados obtidos, que como se pode observar, estão em plena concordância com aqueles presentes na atual literatura.

VIII. AGRADECIMENTOS

This work was supported by CNPq, CAPES and by contract UFPA01- Ericsson-UFPA with cooperation of Amazonia Celular.

IX. REFERÊNCIAS

- [1] YEE, K.S., "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-14, pp. 302-307, May 1966.
- [2] TAFLOVE, A., and UMASHANKAR, K.R. "Solution of complex electromagnetic penetration and scattering problem in unbounded regions," in A.J. Kalinowski (ed.), *Computational Methods for Infinite Domain Media-structure Interaction*. Washington, DC: ASME, vol. 46, 1981, pp. 83-113.
- [3] TAFLOVE, A., "Application of the finite-difference time-domain method to sinusoidal steady-state electromagnetic-penetration problems," *IEEE Trans. EM Comp.*, vol. EMC-22, no. 3, Aug. 1980, pp. 191-202.
- [4] UMASHANKAR, K.R. and TAFLOVE, A., "A novel method to analyze electromagnetic scattering of complex objects," *IEEE Trans. EM Comp.*, vol. EMC-24, no. 4, Nov. 1982, pp. 397-405.
- [5] TAFLOVE, A., and BRODWIN, M.E., "Numerical solution of steady-state electromagnetic scattering problems using the time-dependent Maxwell's equations," *IEEE Micro. Theo. Tech.*, vol. MTT-23, no. 8, Aug. 1975, pp. 623-630.
- [6] TAFLOVE, A., and UMASHANKAR, K.R. "A hybrid moment method/finite-difference time-domain approach to electromagnetic coupling and aperture penetration into complex geometries," *IEEE Trans. Ant. Prop.*, vol. AP-30, no. 4, July 1982, pp. 617-627. Also in B.J. Strait (ed.), *Applications of the Method of Moments to Electromagnetic Fields*. Orlando, FL: SCEE Press, Feb. 1980, pp. 361-426.
- [7] OKONIEWSKI, M., "Vector wave equation 2D-FDTD method for guided wave equation," *IEEE Micro. Guided Wave Lett.*, vol. 3, no. 9, Sept. 1993, pp. 307-309.
- [8] BERENGER, J.P., "A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves," *J. Computational Physics*, vol. 114, 1994, pp. 185-200.
- [9] LEE, J.F., and MITTRA, R., "Finite difference time domain algorithm for non-orthogonal grids," *Technical Rep. Eletromagnetic Communication Lab., Department of Electrical and Computer Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign*, 1991.
- [10] <http://www.beowulf.org/>
- [11] <http://www.linux.org/>
- [12] SNIR, M., OTTO, S., STEVEN, H., WALKER, D., DONGARRA, J.J., "MPI: The Complete Reference", The MIT Press, Massachusetts, 1996.
- [13] University of Illinois, "Introduction to MPI", 2001.
- [14] MPI Forum, "MPI-2: Extensions to the Message Passing Interface", 1997. Disponível: <http://www.mpi-forum.org>
- [15] *Parallel Virtual Machine (PVM) version 3*. Disponível: www.netlib.org/pvm3
- [16] ARAÚJO, J.S., SANTOS, R.O., SOBRINHO, C.L.S.S., ROCHA, J.M., GUEDES, L.A., KAWASAKI, R.Y., "Análise de Antenas por FDTD Utilizando Processamento Paralelo," *Anais do X SBMO*, Recife-PE, pp. 111-115, 2002.
- [17] STUTZMAN, W.L., and THIELE, G.A., *Antenna Theory and Design*, 2nd ed., John Wiley, New York, 1998.
- [18] GEDNEY, S., "An Anisotropic Perfectly Matched Layer Absorbing Media for the Truncation of FDTD Lattice", *IEEE Trans. On Antennas and Propagation*, vol. 44, Aug. 1996.
- [19] ISAACSON, E., and KELLER, H. B., *Analysis of Numerical Methods*, Wiley, New York, 1967.
- [20] TAFLOVE, A., *Computational Electrodynamics: The Finite Difference Time Domain Method*, Boston, Artech House, 1995.
- [21] Beowulf Underground, "The Beowulf Documentation Project". Disponível em: www.beowulfunderground.org/doc_project/index.html
- [22] CENAPAD_NE, "Apostila do Workshop MPF", Fevereiro, 1998.
- [23] FOSTER, T. Ian, "Designing and Building Parallel Programs: Concepts and tools for parallel software engineering", Addison-Wesley Publishing Company, 1994.
- [24] SATO, L.M., MIDORIKAWA, E.T., SENER, H., "Introdução à Programação Paralela e Distribuída", Laboratório de Sistemas Integráveis, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Disponível: www.lsi.usp.br/~liria/jai96.html
- [25] <http://www.mpi.nd.edu/lam>
- [26] TANENBAUM, ANDREW - "Redes de Computadores," 3ª Edição Ed. Campus - São Paulo.
- [27] Andrews, G. *Foundations of Multithreaded, "Parallel and Distributed Programming,"*. Addison wesley. 2000.
- [28] SANTOS, R. O. e SOBRINHO, C. L. S. S., "Análise FDTD - Efeitos de lentes dielétricas na irradiação de antena corneta b-dimensional," IX Simpósio Brasileiro de microondas e Optoeletrônica, de 07 a 11 de agosto de 2000, pp.608-612.
- [29] MALONEY, SMITH, J. G. S., and SCOTT, Jr., W. R., "Accurate computation of the radiation from simple antennas using the finite-difference time-domain method," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, Vol.38, 1990, pp.1059-1068

Carlos Leonidas da Silva Sobrinho realizou a graduação em engenharia elétrica pela Universidade Federal do Pará (UFPA), em 1981. Obteve o título de Mestre, em 1989, pela Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RJ) e, posteriormente, o grau de Doutor pela Universidade de Campinas (UNICAMP), em 1992. É professor do departamento de engenharia elétrica da UFPA desde 1986. Atualmente desenvolve pesquisas em: espalhamento eletromagnético e guias de ondas dielétricos com aplicação em bandas de frequências ópticas e milimétricas.

Josivaldo de Souza Araújo obteve a graduação no curso de Física pela Universidade Federal do Pará (UFPA), em 2000. Tornou-se Mestre em Engenharia Elétrica na área de Telecomunicações, com ênfase em computação paralela, pela UFPA, em 2003. Atualmente é aluno do doutorado do programa de pós-graduação em engenharia elétrica da UFPA na área de Computação Aplicada, fazendo parte do Laboratório de Análise Numérica em Eletromagnetismo (LANE).

Regiane Yumiko da Silva Kawasaki concluiu a graduação no curso de ciência da computação pela Universidade Federal do Pará (UFPA), em 1995. Obteve o título de Mestre em Ciências, com área de concentração em ciências de computação, pela Universidade de São Paulo (USP), em 1998. É professora do departamento de informática da UFPA desde 2000. Atualmente é aluna do doutorado do programa de pós-graduação em engenharia elétrica da UFPA, fazendo parte do Laboratório de Computação Aplicada (LACA), desenvolvendo estudos na área de sistemas distribuídos, sistemas operacionais e computação paralela.

Ronaldo Oliveira dos Santos realizou a graduação em engenharia elétrica pela Universidade Federal do Pará (UFPA), em 1998. Obteve o título de Mestre, em 2000, pela UFPA. É aluno do doutorado do PPGEE da UFPA. Sua pesquisa atual inclui, antenas e propagação; métodos numéricos e o comportamento transiente de sistemas de aterramento de subestações e sistemas de potência, fazendo parte do Laboratório de Análise Numérica em Eletromagnetismo (LANE).

Johnny Marcus Gomes Rocha realizou a graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará em 2001. Obteve o título de mestre em Engenharia Elétrica, com ênfase em Computação em 2003. É professor do curso de Ciência da Computação do Cesupa (Centro Universitário do Pará) desde 2002. Atualmente é bolsista do projeto ERICSSON/UFPA, fazendo parte do Laboratório de Análise Numérica em Eletromagnetismo (LANE), desenvolvendo estudos na área de sistemas operacionais, arquiteturas de computadores e programação paralela.

Luiz Affonso Guedes tornou-se Engenheiro elétrico pela Universidade Federal do Pará (UFPA) em 1989, Mestre em Engenharia Eletrônica e Computação pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) em 1992 e Doutor em ciências pela Universidade de Campinas (Unicamp) em 1999. Atua nas áreas de aplicação de sistemas distribuídos em processamento paralelo e automação industrial.