

Aplicação da Transformada Rápida de Fourier em Equações Integrais no Domínio do Tempo para a Caracterização de Propagação Radioelétrica

Renata Alves Antunes Teles

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Minas Gerais

Fernando José da Silva Moreira

Departamento de Engenharia Eletrônica
Universidade Federal de Minas Gerais

Resumo—Neste trabalho, a Transformada Rápida de Fourier (FFT) é utilizada em uma técnica - *marching-on-in-time* (MOT) - baseada na equação integral do campo magnético (TD-MFIE), aplicada na predição da propagação de um pulso eletromagnético sobre um terreno suavemente irregular. Assume-se incidência rasante de uma onda polarizada verticalmente, sendo o terreno tratado como um condutor magnético perfeito.

Palavras chave—FFT, MOT, Equações integrais, Domínio do tempo, MFIE, Previsão de propagação.

I. INTRODUÇÃO

Métodos de predição de cobertura radioelétrica são altamente desejados, não só para o cálculo da potência do sinal transmitido que viabilize a comunicação em um determinado ambiente, bem como para estimar os efeitos de interferências do ambiente sobre o sinal. Isso permite que um sistema de comunicação sem-fio seja projetado de forma mais eficiente, possibilitando altas taxas de transmissão e uso apropriado do espectro.

Os métodos para a caracterização de canais de rádio podem ser classificados como empíricos ou determinísticos. Os empíricos, como os modelos Log-Distância e Okumura-Hata, consistem em obter curvas ou expressões que se aproximam dos resultados obtidos por medições locais. São métodos que levam em consideração, de forma implícita, fatores como reflexões, espalhamento, difrações e componentes multipercurso, e normalmente possuem baixo custo computacional. No entanto, geralmente demandam novas medições para calibrar o modelo a cada ambiente e frequência de operação [1]. Métodos determinísticos, por sua vez, possuem custo computacional maior que os empíricos. Em princípio, são mais precisos por utilizarem fórmulas diretamente oriundas das Equações de Maxwell [2].

Com o aumento da capacidade de processamento computacional, em casos onde a geometria do ambiente não é muito complexa e a precisão de resultados é fundamental, simulações obtidas de métodos determinísticos tornam-se altamente interessantes e práticas. Por exemplo, em terrenos eletricamente suaves, caracterizações de canal rádio utilizando equações integrais têm sido extensivamente investigadas [3], [4].

A previsão da propagação eletromagnética pode ser realizada no domínio da frequência ou do tempo. A predição no domínio da frequência é comumente utilizada para sistemas

faixa estreita. Neste caso, o cálculo é feito para uma única frequência e assume-se um comportamento espectral uniforme na amplitude e linear na fase pra toda a faixa de operação. Predição baseada na Equação Integral do Campo Elétrico (*Electric Field Integral Equation* - EFIE), no domínio da frequência, foi proposta em [4] para terrenos levemente irregulares. Outra proposta, também no domínio da frequência, foi baseada na Equação Integral do Campo Magnético (*Magnetic Field Integral Equation* - MFIE) [3], onde concluiu-se que a MFIE apresenta melhor convergência e, portanto, exige menor custo computacional. Em [3] e [4], assumiu-se incidência rasante, possibilitando a aproximação do terreno por uma superfície condutora magnética perfeita. O princípio da equivalência foi aplicado e correntes superficiais magnéticas equivalentes foram obtidas pelo Método dos Momentos (*Method of Moments* - MoM). Assumindo terreno invariável na direção transversal ao plano de incidência, utilizou-se o Método da Fase Estacionária para transformar a integral de superfície correspondente em uma integral de linha.

A análise no domínio do tempo é geralmente recomendada para a caracterização de canais de rádio operando em faixas de frequência muito largas (*Ultra Wideband* - UWB), ou quando se quer conhecer a resposta transitória do sistema. Com esse tipo de análise é possível, ainda, obter a dispersão temporal do sinal e a resposta ao impulso do sistema, o que permite a determinação da função de transferência e de características como causalidade, estabilidade e variância no tempo [5]. Em [6] e [7] foram propostas formulações no domínio do tempo para as Equações Integrais do Campo Elétrico (*Time Domain Electric Field Integral Equation* - TD-EFIE) e Magnético (*Time Domain Magnetic Field Integral Equation* - TD-MFIE), respectivamente, assumindo as mesmas considerações geométricas feitas em [3] e [4] para o terreno. A transformada inversa de Fourier foi analiticamente aplicada sobre a formulação obtida anteriormente no domínio da frequência. O Método dos Momentos foi então utilizado para obter as correntes superficiais equivalentes, enquanto que a técnica *marching-on-in-time* (MOT) foi empregada para a avaliação das integrais de convolução. Nesse procedimento, as correntes em cada instante de tempo são calculadas a partir das correntes nos instantes anteriores. Os resultados obtidos foram bastante precisos; porém, as integrais de convolução

demandaram um tempo significativamente alto para serem avaliadas [6], [7].

No presente trabalho as integrais de convolução são avaliadas com o auxílio da transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* - FFT), com o objetivo de diminuir o tempo de processamento. Os resultados obtidos pela presente técnica são comparados aos obtidos pela TD-MFIE, TD-EFIE e Teoria Uniforme da Difração no domínio do tempo (*Time Domain Uniform Theory of Diffraction* - TD-UTD) [8]. Outro trabalho que uniu as técnicas FFT e MOT na resolução de um problema de espalhamento está descrito em [9]. Nesse trabalho, a técnica *marching-on-in-time* é aplicada na discretização da TD-EFIE e a FFT é utilizada na avaliação de convoluções espaciais para resolver um problema de espalhamento sobre uma superfície condutora elétrica perfeita.

O trabalho é estruturado da seguinte forma: na próxima seção as formulações da EFIE e MFIE no domínio da frequência são apresentadas, incluindo a aplicação do Método da Fase Estacionária na avaliação assintótica da integral na direção normal ao plano de incidência. Na Seção III é discutido o desenvolvimento das formulações integrais no domínio do tempo (i.e., TD-EFIE e TD-MFIE), a aplicação do MoM (exemplificado para a TD-MFIE) e uma breve explicação sobre a técnica FFT implementada. Na Seção IV são apresentados resultados da presente técnica, que são comparados aos obtidos por outras técnicas independentes da presente. Finalmente, na Seção V são apresentadas as conclusões do trabalho.

II. FORMULAÇÃO INTEGRAL NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

O sistema de coordenadas utilizado para descrever o problema é ilustrado na figura 1. $\vec{r}$ e $\vec{r}'$ localizam, respectivamente, o observador e a fonte de corrente equivalente. $\hat{n}$ e $\hat{n}'$ são vetores unitários normais à superfície em $\vec{r}$ e $\vec{r}'$, respectivamente, e $\hat{l}$ e $\hat{l}'$ são as correspondentes direções tangentes ao perfil do terreno. $\vec{R}_1$ localiza a fonte de corrente equivalente em relação à antena (fonte) transmissora e $\vec{R}_2 = \vec{r} - \vec{r}'$. A antena transmissora e o observador estão no plano de incidência $y = y_0 = 0$.

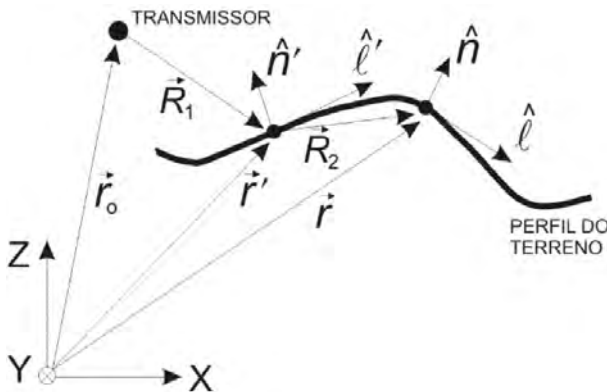


Figura 1. Sistema local de coordenadas descrevendo o perfil do terreno.

Neste problema, assume-se que o campo incidente possui polarização vertical e que a incidência é rasante. Nessa situação, as condições de contorno sobre a superfície de um terreno suavemente irregular aproximam-se às de uma superfície condutora magnética perfeita (CMP) [4]. Caso a polarização seja horizontal, a aproximação mais adequada é a de uma superfície condutora elétrica perfeita (CEP) e o problema será dual ao presente. Sendo a superfície CMP, o problema equivalente é o de uma densidade superficial de corrente magnética ($\vec{M}_s$) sobre a superfície do terreno [4]. Portanto, as equações EFIE e MFIE no domínio da frequência são [10]:

$$\vec{H}(\vec{r}) = T[\vec{H}_{in}(\vec{r}) + \frac{1}{\eta} \vec{L}_1(\vec{M}_s)], \quad (1)$$

$$\vec{E}(\vec{r}) = T[\vec{E}_{in}(\vec{r}) + \vec{L}_2(\vec{M}_s)], \quad (2)$$

onde $\vec{H}_{in}$ e $\vec{E}_{in}$ são os campos incidentes radiados pela antena transmissora,

$$\vec{L}_1(\vec{M}_s) = -jk \int_{V'} \int_{-\infty}^{\infty} [\vec{M}_s(\vec{r}') G - \frac{1}{k^2} \nabla' \cdot \vec{M}_s(\vec{r}') \nabla' G] dy' dl', \quad (3)$$

$$\vec{L}_2(\vec{M}_s) = - \int_{V'} \int_{-\infty}^{\infty} [\vec{M}_s(\vec{r}') \times \nabla' G] dy' dl', \quad (4)$$

$$\nabla' G = \frac{(\vec{r} - \vec{r}')}{4\pi} \left(\frac{jk|\vec{r} - \vec{r}'| + 1}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} \right) e^{-jk|\vec{r} - \vec{r}'|}, \quad (5)$$

G é a função de Green do espaço livre, $T = 1$ ($T = 2$) se o observador $\vec{r}$ estiver fora (sobre) a superfície do terreno, $k = 2\pi/\lambda$, λ é o comprimento de onda, e η é a impedância intrínseca da atmosfera em questão. Para uma superfície CMP as condições de contorno são:

$$\hat{n} \times \vec{H} = 0 \quad \text{e} \quad \hat{n} \times \vec{E} = -\vec{M}_s. \quad (6)$$

Aplicando (6) às equações (1) e (2) com $T = 2$ (ou seja, observador sobre o terreno) temos [2]:

$$\hat{n} \times \vec{H}_{in}(\vec{r}) = -\frac{1}{\eta} \hat{n} \times \vec{L}_1(\vec{M}_s), \quad (7)$$

$$\hat{n} \times \vec{E}_{in}(\vec{r}) = -\frac{\vec{M}_s(\vec{r})}{2} - \hat{n} \times \vec{L}_2(\vec{M}_s). \quad (8)$$

Caso a antena transmissora esteja suficientemente afastada do terreno, pode-se considerar que $\vec{M}_s$ possui distribuição de fase aproximadamente esférica [10]. Neste caso:

$$\vec{M}_s(\vec{r}') \approx \vec{M}_a(\vec{r}') e^{-jk|\vec{r}' - \vec{r}_0|} = M_a(\vec{r}') \hat{y} e^{-jk|\vec{r}' - \vec{r}_0|}, \quad (9)$$

$$\nabla' \cdot \vec{M}_s \approx \left(-jk \vec{M}_a \cdot \frac{\vec{r} - \vec{r}_0}{|\vec{r} - \vec{r}_0|} + \nabla' \cdot \vec{M}_a \right) e^{-jk|\vec{r}' - \vec{r}_0|}, \quad (10)$$

onde $\vec{r}_0$ localiza a antena transmissora (figura 1).

Assumindo $kr \gg 1$ (ou seja, que as dimensões do terreno são muito maiores do que λ) e que a variação do perfil do terreno não é significativa na direção $\hat{y}$, o Método da Fase Estacionária pode ser empregado para avaliar assintoticamente

as integrais em y' em (3) e (4). Nesse caso, (7) e (8) são reescritas como [3], [4]:

$$\hat{n} \times \vec{H}_{in} = \frac{k}{\eta} \int_{l'} \hat{n} \times \vec{M}_a G_1 dl', \quad (11)$$

$$\hat{n} \times \vec{E}_{in} = -\frac{\vec{M}_a}{2} e^{-jkR_1} + k \int_{l'} (\hat{n} \cdot \hat{R}_2) \vec{M}_a G_2 dl', \quad (12)$$

onde

$$G_1 = \frac{e^{j\pi/4} e^{-jk(R_1+R_2)}}{4\pi\sqrt{(1+R_2/R_1)R_2/\lambda}}, \quad (13)$$

$$G_2 = \left(1 - \frac{j}{kR_2}\right) G_1. \quad (14)$$

A corrente equivalente $\vec{M}_a$ pode ser calculada aplicando o Método dos Momentos (MoM) em (11) ou (12) e, a partir dela, encontra-se o campo espalhado pelo terreno com o auxílio de (1)–(5) e (9), agora com $T = 1$.

III. MFIE NO DOMÍNIO DO TEMPO (TD-MFIE)

Como as condições geométricas do problema em questão são invariantes no tempo, o desenvolvimento da formulação no domínio do tempo é espacialmente semelhante ao da formulação da seção anterior, bastando, então, aplicar a transformada inversa de Fourier sobre (11) e (12) [2]:

$$\hat{n} \times \vec{\mathcal{H}}_{in}(\vec{r}, t) = \frac{-\hat{l}}{4\pi\eta} \int_{l'} F(R_1, R_2) J_1 dl', \quad (15)$$

$$\hat{n} \times \vec{\mathcal{E}}_{in}(\vec{r}, t) = -\frac{\vec{\mathcal{M}}(\vec{r}, t)}{2} + \int_{l'} \frac{(\hat{n} \cdot \hat{R}_2) \hat{y}}{4\pi} F(R_1, R_2) (J_1 + J_2) dl', \quad (16)$$

onde

$$F(R_1, R_2) = \sqrt{\frac{2c}{R_2(R_1 + R_2)}} \quad (17)$$

e as integrais de convolução são dadas por

$$J_1 = \frac{\delta \mathcal{M}(\vec{r}', \tau)}{c \delta \tau} * \frac{1}{\sqrt{\tau}} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\delta \mathcal{M}(\vec{r}', t')}{c \delta t'} \frac{dt'}{\sqrt{\tau - t'}}, \quad (18)$$

$$J_2 = \frac{\mathcal{M}(\vec{r}', \tau)}{R_2} * \frac{1}{\sqrt{\tau}} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\mathcal{M}(\vec{r}', t')}{R_2} \frac{dt'}{\sqrt{\tau - t'}}. \quad (19)$$

e c é a velocidade da luz na atmosfera em questão.

Como demonstrado em [3], para o presente problema a MFIE é computacionalmente mais eficiente do que a EFIE. Por isso, aqui iremos apresentar a solução MoM apenas para a TD-MFIE. Porém, passos semelhantes podem ser empregados na solução da TD-EFIE [2]. Para calcular as correntes magnéticas equivalentes $\vec{\mathcal{M}}$, utiliza-se o MoM - semelhantemente ao realizado no domínio da frequência - e a técnica *marching-on-in-time* (MOT), comumente utilizada na avaliação de integrais no domínio do tempo. Esta técnica consiste em calcular $\mathcal{M}$ em um determinado instante de tempo a partir de valores calculados em instantes anteriores. Para isso, divide-se o

terreno em segmentos de reta e discretiza-se o tempo, obtendo-se o seguinte sistema de equações [2]:

$$[\mathcal{V}_{i,p}]_{MFIE} = [\mathcal{Z}_{ij,p}]_{MFIE} [\mathcal{M}_{i,p} - \mathcal{M}_{i,p-1}]_{MFIE}, \quad (20)$$

onde índices i, j indicam i - e j -ésimo segmentos do terreno, respectivamente, e índice p representa o p -ésimo instante de tempo. A convolução (18) pode ser calculada em cada intervalo de tempo Δt_i [2]:

$$J_1(\vec{r} = \vec{r}_i) = \int_{t_{p-1}}^{t_p} \frac{\mathcal{M}_{i,p} - \mathcal{M}_{i,p-1}}{c \Delta t_i} \frac{dt'}{\sqrt{\tau - t'}} = 2 \frac{\mathcal{M}_{i,p} - \mathcal{M}_{i,p-1}}{c \Delta t_i} [\sqrt{\tau - t_{p-1}} - \sqrt{\tau - t_p}]. \quad (21)$$

Após a aplicação de MOT em (20), os elementos das matrizes tensão ($[\mathcal{V}]$) e impedância ($[\mathcal{Z}]$) são dados por [2]:

$$\mathcal{V}_{i,p} = -\eta [\vec{\mathcal{H}}_{in}(\vec{r} = \vec{r}_i, t_p) \cdot \hat{y}], \quad (22)$$

$$\mathcal{Z}_{ij,p} = -\frac{1}{2\pi c} \sqrt{\frac{2c}{R_2 \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)}} \times \frac{\Delta_j}{\Delta t_j} (\sqrt{\tau - t_{p-1}} - \sqrt{\tau - t_p}), \text{ para } i \neq j, \quad (23)$$

$$\mathcal{Z}_{ii,p} = -\frac{2\sqrt{c\Delta_i}}{\pi c \Delta t_i} (\sqrt{\tau - t_{p-1}} - \sqrt{\tau - t_p}), \text{ } i = j. \quad (24)$$

Consequentemente, a solução de (20), negligenciando-se o retroespalhamento ($\mathcal{Z}_{ij,p} = 0$ para $i > j$), é dada por [2]:

$$\mathcal{M}_{i,p} = \frac{1}{\mathcal{Z}_{ii,p}} [\mathcal{V}_{i,p} + \mathcal{Z}_{ii,p} \mathcal{M}_{i,p-1} - \sum_{p_i=2}^{p-1} \mathcal{Z}_{ii,p_i} (\mathcal{M}_{i,p_i} - \mathcal{M}_{i,p_i-1}) - \sum_{j=1}^{i-1} \sum_{p_i=2}^p \mathcal{Z}_{ij,p_i} (\mathcal{M}_{j,p_i} - \mathcal{M}_{j,p_i-1})]. \quad (25)$$

Aplicando (21), (23) e (24) em (25), tem-se:

$$\mathcal{M}_{i,p} = \frac{1}{\mathcal{Z}_{ii,p}} [\mathcal{V}_{i,p} + \mathcal{Z}_{ii,p} \mathcal{M}_{i,p-1} + \frac{\sqrt{c\Delta_i}}{\pi} \int_{t_{p_i-1}=1}^{t_{p_i}=t_{p-1}} \frac{\mathcal{M}_{i,p_i} - \mathcal{M}_{i,p_i-1}}{c \Delta t_i} \frac{dt'}{\sqrt{\tau - t'}} + \frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^{i-1} F(R_1, R_2) \Delta_j \times \int_{t_{p_i-1}=1}^{t_{p_i}=t_p} \frac{\mathcal{M}_{j,p_i} - \mathcal{M}_{j,p_i-1}}{c \Delta t_j} \frac{dt'}{\sqrt{\tau - t'}}]. \quad (26)$$

A equação (26) envolve, portanto, o cálculo da convolução (18), caso isto seja feito diretamente no domínio do tempo, fazendo com que o tempo de processamento seja extremamente longo [2]. O objetivo deste trabalho é justamente reduzir este tempo de processamento. Para tal, antes da aplicação da FFT, a expressão (26) é reescrita da seguinte forma:

IV. RESULTADOS

Neste trabalho, a TD-MFIE é utilizada na previsão de propagação de um pulso eletromagnético sobre um perfil de terreno caracterizado por duas cunhas consecutivas. A Figura 2 representa um sistema de rádio enlace com uma distância de 200 m entre as antenas transmissora e receptora sem obstáculos que superem as alturas das antenas.

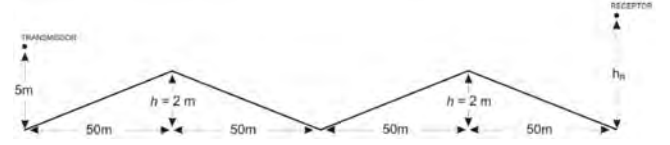


Figura 2. Duas cunhas CMP consecutivas.

$$\mathcal{M}_{i,pMFIE} = \frac{1}{\mathcal{L}_{ii,p}} \left\{ \mathcal{V}_{i,p} + \mathcal{L}_{ii,p} \mathcal{M}_{i,p-1} + \frac{\sqrt{c\Delta_i}}{\pi} \left[\frac{\delta \mathcal{M}_i(\vec{r}', \tau)}{c \delta \tau} * \frac{1}{\sqrt{\tau}} \right]_{\tau=t_p} + \frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^{i-1} F(R_1, R_2) \Delta_j \left[\frac{\delta \mathcal{M}_j(\vec{r}', \tau)}{c \delta \tau} * \frac{1}{\sqrt{\tau}} \right]_{\tau=t_p - \frac{R_2}{c}} \right\}. \quad (27)$$

Aplicando a FFT à expressão (27):

$$\mathcal{M}_{i,pMFIE} = \frac{1}{\mathcal{L}_{ii,p}} [\mathcal{V}_{i,p} + \mathcal{L}_{ii,p} \mathcal{M}_{i,p-1} + \frac{\sqrt{c\Delta_i}}{\pi} FFT^{-1} \left\{ FFT \left\{ \frac{\delta \mathcal{M}_i(\vec{r}', \tau)}{c \delta \tau} \right\} \cdot FFT \left\{ \frac{1}{\sqrt{\tau}} \right\} \right\} \Big|_{\tau=t_p} + \frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^{i-1} F(R_1, R_2) \Delta_j \cdot FFT^{-1} \left\{ FFT \left\{ \frac{\delta \mathcal{M}_j(\vec{r}', \tau)}{c \delta \tau} \right\} \cdot FFT \left\{ \frac{1}{\sqrt{\tau}} \right\} \right\} \Big|_{\tau=t_p - \frac{R_2}{c}} \right]. \quad (28)$$

É importante ressaltar que esta passagem culmina na perda da causalidade do problema, pois a convolução vai considerar toda a janela de tempo de teste, e não somente os instantes de tempo anteriores ao instante analisado. No entanto, ganha-se consideravelmente em tempo de processamento, pois não haverá necessidade de se avaliar uma convolução para cada instante de tempo e para cada segmento representando o perfil do terreno.

Em [9], a FFT é utilizada na avaliação de convoluções espaciais em duas dimensões. Aqui, a FFT é aplicada em convoluções temporais de uma dimensão. Uma sugestão para um trabalho posterior é estudar a possibilidade de se aplicar a FFT nas convoluções espaciais do problema. Isso demandará uma manipulação maior das equações, o que provavelmente envolverá separação de variáveis - para encontrar funções espaciais que dependam apenas de x ou de z - e outras aproximações. As técnicas utilizadas para acelerar a transformada discreta de Fourier são a decimação em frequência (*decimation-in-frequency*), que consiste em dividir a transformada de Fourier da função de interesse em subsequências menores [5], e a decimação no tempo (*decimation-in-time*), na qual formam-se subsequências a partir da função de entrada no domínio do tempo. A ferramenta utilizada foi a biblioteca FFTW [11], desenvolvida no MIT e implementada pela combinação dos dois métodos [12]. O programa foi desenvolvido em linguagem C. A máquina utilizada nas simulações possui as seguintes configurações:

- Processador Intel Core i7-3770 CPU @ 3,40 GHz
- Memória RAM - 24 GB
- Sistema Operacional - Windows 10 (64 bits)

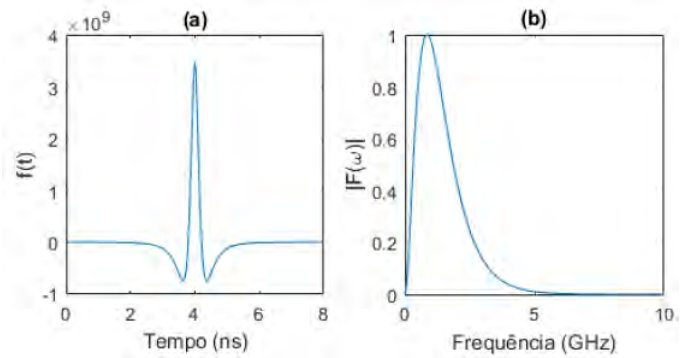


Figura 3. Pulso incidente (a) no domínio do tempo e (b) seu espectro.

As formulações apresentadas foram utilizadas na previsão da propagação de um pulso eletromagnético definido em [2] e [13], representado na Figura 3 no domínio do tempo e da frequência. O pulso da Figura 3 possui atraso de 4 ns e frequência central de 850 MHz.

Na análise temporal, o tempo foi discretizado com uma frequência de amostragem de 40 GHz e o terreno foi dividido em 0,5 segmentos/ λ , considerando a maior frequência significativa do espectro do sinal (em torno de 7 GHz). O pulso foi transmitido num intervalo de 0 a 8 ns e propagou ao longo do terreno representado por duas cunhas consecutivas, ilustradas na Figura 2. A simulação considerou o receptor a uma altura $h_R = 5m$ e polarização vertical. Os resultados obtidos pela aplicação da FFT na TD-MFIE foram comparados aos da TD-EFIE e da TD-MFIE obtidos em [2].

Em [2], a TD-MFIE e TD-EFIE, juntas, demandaram aproximadamente 21 horas de cálculo, enquanto a formulação no domínio da frequência demorou entre um e sete minutos. Os resultados obtidos de ambas formulações ficaram muito próximos entre si, embora a MFIE - que demandou aproximadamente 14 horas - convirja mais rápido que a EFIE - cujos cálculos foram computados em torno de 19 horas. Já com a utilização da técnica FFT, o tempo da simulação para a TD-MFIE cai para algo entre 30 e 60 minutos, representando uma diminuição considerável no tempo de processamento.

As Figuras 4 e 5 mostram que as diferentes formulações baseadas em equações integrais no domínio do tempo alcançaram resultados muito próximos entre si. Na Figura 5, essas formulações foram comparadas com a TD-UTD, observando-se pequenas discrepâncias. Para a presente geometria (Figura 2), tais discrepâncias estão basicamente associadas às múltiplas difrações entre cunhas, não consideradas pela TD-UTD [2].

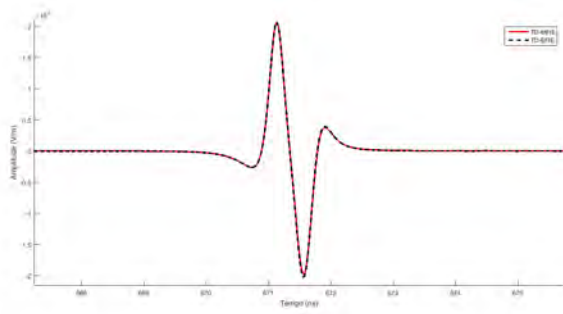


Figura 4. Pulso eletromagnético no receptor a 5m de altura, calculado pela TD-MFIE e TD-EFIE.

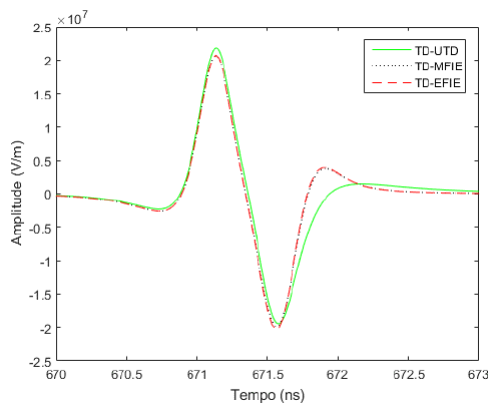


Figura 5. Pulso eletromagnético no receptor a 5m de altura, calculado pela TD-UTD, TD-MFIE e TD-EFIE.

V. CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos, pode-se concluir que a previsão de propagação de um pulso eletromagnético utilizando a TD-EFIE apresenta uma boa concordância com a previsão feita utilizando a TD-MFIE para o caso de uma cunha dupla, embora ambas as formulações demandem muito tempo de cálculo e alocação de memória. Enquanto a TD-MFIE, resolvida no domínio do tempo, demorava cerca de 14 horas para fornecer os resultados, a aplicação da FFT sobre a TD-MFIE levava entre 30 e 60 minutos, diminuindo drasticamente o tempo de processamento em cerca de 14 vezes.

Propostas de trabalhos futuros são estudar a viabilidade e as consequências no custo computacional à medida que se diminui a largura do pulso eletromagnético analisado, fazendo-o tender ao impulso. Pode-se analisar, também, outros tipos de

terrenos, o que implica uma revisão das condições impostas ao problema.

Convém estudar, também, a relação entre o problema, com suas condições e aproximações, e o fato de a MFIE ter convergido mais rapidamente que a EFIE. Um dos motivos pode ser o número maior de operações feitas no código que calcula a EFIE. Logo, é interessante analisar a relação entre as condições impostas e as formulações.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado por CNPq e Capes (PROCAD 068419/2014-01).

REFERÊNCIAS

- [1] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd ed., Prentice Hall PTR, 2002.
- [2] R. L. Barbosa, *Caracterização da Propagação Radioelétrica sobre Terrenos Irregulares Utilizando Equações Integrais no Domínio do Tempo*, Dissertação de Mestrado, PPGEE - UFMG, Belo Horizonte, MG, 2018.
- [3] F. J. S. Moreira, *MFIE-based propagation prediction*, SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC 01), Belém, PA, 2001.
- [4] J. T. Hviid, J. B. Andersen, J. Toftgard and J. Bojer, *Terrain-Based Propagation Model for Rural Area - An Integral Equation Approach*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 43, pp. 41–46, 1995.
- [5] A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, *Discrete-Time Signal Processing*, 2nd ed., Prentice Hall, 1998.
- [6] R. B. V. Teperino and F. J. S. Moreira, *A TD-MFIE for a Vertically Polarized Pulse Propagation over Irregular Terrains*, SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC 03), Foz do Iguaçu, PR, 2003.
- [7] R. L. Barbosa and F. J. S. Moreira, *Propagation Prediction Based on Time Domain Electric Field Integral Equation for Smoothly Irregular Terrains*, European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018), London, 2018.
- [8] K. L. Borges and F. J. S. Moreira, *Wideband channel propagation prediction in urban scenarios using TD-UTD*, SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC 03), Foz do Iguaçu, PR, 2003.
- [9] A. E. Yilmaz, J. M. Jin, E. Michielssen and D. S. Weile, *A Fast Fourier Transform Accelerated Marching-on-in-Time Algorithm for Electromagnetic Analysis*, Electromagnetics, 21:3, 181–197, 2010.
- [10] R. Mittra (ed.), *Computer Techniques for Electromagnetics*, Oxford: Pergamon Press Ltd., 1973, pp. 159–264.
- [11] FFTW Home Page, <http://fftw.org/>.
- [12] M. Frigo and S. G. Johnson, *The Design and Implementation of FFTW3*, Proceedings of the IEEE, 93:2, 216 - 231, 2005.
- [13] P. M. Johansen, *Time-domain analysis of electromagnetics scattering problems*, Ph.D. Thesis, Technical University of Denmark, 1996.