

Universidade Federal de Minas Gerais

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Estudo de Descargas Atmosféricas  
em Modelo Reduzido:  
Caracterização do Campo Eletromagnético  
de canais artificiais

Aluno: David Augusto Lopes

Orientador: Wallace do Couto Boaventura

Março, 2009



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

David Augusto Lopes

Estudo de Descargas Atmosféricas  
em Modelo Reduzido:  
Caracterização do Campo Eletromagnético  
de canais artificiais

Belo Horizonte

2009



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**David Augusto Lopes**

**Estudo de Descargas Atmosféricas em Modelo Reduzido:  
Caracterização do Campo Eletromagnético  
de canais artificiais**

Dissertação apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica como  
requisito parcial para a obtenção  
do Título de Mestre em  
Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Wallace do Couto Boaventura

Belo Horizonte, 2009

*“ À minha mãe Cida, por estar valendo  
a pena as dificuldades passadas”*

## Agradecimentos

A Deus pela força nos momentos difíceis

Ao Prof. Wallace pela orientação, pela paciência e pela amizade. Suas palavras de incentivo e apoio foram primordiais para a conclusão deste trabalho.

Aos amigos do Laboratório de Engenharia de Alta Tensão e Aplicações, Ailton e Emerson pela ajuda e parceria.

Aos Professores Ivan J. S. Lopes, José Osvaldo Saldanha e Glássio Costa de Miranda pelo apoio.

Ao amigo Hudson pela ajuda com os equipamentos e na construção dos sensores.

Ao meu irmão, Diego, pela amizade.

À Juliana pelo amor e carinho, pelo abraço e beijo, por estar do meu lado e não me deixar cair.

Aos amigos da República Selvagem: Eduardo (Gordin), Edson (Cônsul), Brenno (Tio B), Diego (Dom), Marcos Flávio (Marcão), Edgar (Minino de Deus), Celso (Celsinho Gummy) e Luellerson (São) pela convivência e pelo aprendizado que tive com todos.

A todos que de alguma forma contribuíram com este trabalho.

À Capes (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo suporte financeiro.



## Resumo

Descargas atmosféricas são fenômenos naturais de alta ocorrência na superfície terrestre, e grandes responsáveis por interrupções no fornecimento de energia elétrica. Nas descargas indiretas, ou seja, as que têm sua incidência próxima a linhas aéreas ou sistemas elétricos, o campo eletromagnético irradiado pela descarga induz sobretensões na rede de fornecimento de energia elétrica, podendo ocasionar desligamentos. Os estudos destes campos irradiados pelo canal de descarga, bem como as tensões induzidas, são de grande importância para a melhor proteção desses sistemas elétricos frente a descargas atmosféricas indiretas. Este trabalho apresenta uma contribuição a um dos métodos de estudo de descargas atmosféricas e das tensões induzidas: as simulações em modelo reduzido. Foram medidos e analisados os campos elétrico e magnético gerados pelos canais artificiais utilizados nas simulações em modelo reduzido (fio condutor fio espiral). Para isso, foram construídos sensores apropriados para captar esses campos e uma metodologia para a calibração e validação dos sensores é apresentada. Medições dos campos de uma linha de transmissão horizontal, em modelo reduzido, foram realizadas para complementar a validação das medições dos sensores. Estas medições foram comparadas com os valores de campos calculados. Os campos gerados pelos dois tipos de canais artificiais foram medidos e comparados com cálculo, observando sua distribuição no espaço, analisando a validade das modelagens para utilização em simulações de descargas atmosféricas em modelo reduzido. Observou-se que os campos gerados pelo canal artificial espiral possuem componentes em outras direções além da utilizada em cálculos de tensões induzidas.

## Abstract

Lightning is a natural phenomenon of great occurrence and a major responsible for electric power supply interruptions. Considering indirect lightning, those discharges striking nearby aerial lines or electric systems, the radiated electromagnetic field causes overvoltages in the electric power systems which can lead to interruptions. The study of the irradiated fields from the lightning discharge channel, as well the induced voltages, is of great importance to better protect those systems against indirect lightning. This work contributes to a method for lightning studies: reduced model simulations. The electric and magnetic fields generated by artificial discharge channels used in reduced model simulations (conductor wire and spiral wire) were measured and analysed. For this task, appropriate sensors for field measurement were built and a calibration and validation methodology is presented. Field measurements in a reduced model horizontal transmission line were conducted to further complement the validation of the sensors and these measurements were compared with calculated values. The field generated by the two types of artificial channels were measured and compared to evaluate their spatial distribution, while analysing their validity for the purpose of lightning reduced model simulation. It was observed that the fields generated by spiral artificial channel have components in other directions than the one used in calculations of induced voltages.

## Sumário

Resumo.....	1
Abstract.....	2
1 - Introdução.....	1
1.1 - Revisão Bibliográfica.....	3
1.2 - Estrutura do Texto.....	6
2 - O Modelo Reduzido Implementado.....	7
2.1 - Introdução.....	7
2.2 - Fator de Escala e Sistema de Calibração.....	7
2.3 - Componentes e Estrutura Física do Modelo.....	9
2.3.1 - Geradores.....	11
2.3.2 - Processamento do Sinal do Gerador de Pulso Quadrado.....	12
2.3.3 - Osciloscópio.....	15
2.3.4 - Pontas de Prova de Tensão.....	16
2.3.5 - Ponta de Prova de Corrente.....	16
3 - O Sistema de Medição dos campos elétrico e magnético e sua Calibração.....	18
3.1 - Introdução.....	18
3.2 - O Sensor de Campo Elétrico.....	19
3.2.1 - Características.....	19
3.2.2 - Calibração.....	20
3.3 - O sensor de Campo Magnético.....	28
3.3.1 - Características.....	28
3.3.2 - Calibração.....	30
3.3 - Comentários finais.....	50
4 - Resultados: Campos Elétrico e Magnético.....	52
4.1 - Introdução.....	52
4.2 - Campos das Linhas de Transmissão (Canal Horizontal).....	52
4.2.1 - Medições realizadas.....	52

4.2.1.1 - Fio de cobre como linha de transmissão.....	52
4.2.1.2 - Fio espiral como linha de transmissão.....	64
4.2.2 – Discussão dos Resultados.....	75
4.3 – Campos dos Canais de Descarga (Canais Verticais) .....	77
4.3.1 - Medições Realizadas.....	78
4.3.1.1 – Canal de descarga: Fio condutor de cobre.....	78
4.3.1.2 – Canal de descarga: Fio Espiral .....	89
4.3.2 – Discussão dos Resultados.....	99
5 - Conclusões e Propostas de Continuação.....	101
5.1 - Conclusões.....	101
5.2 - Propostas de Continuação.....	102
Referências Bibliográficas.....	103
Anexo A: Cálculo do Campo Eletromagnético do Canal Vertical.....	107
Anexo B: Medições Realizadas com o Canal resistivo de Altas Perdas.....	115
B.1 - Fio Resistivo como Linha de transmissão.....	115
B.2 – Canal de Descarga: Fio Resistivo.....	126

# Capítulo 1

## Introdução

As descargas atmosféricas são fenômenos eletromagnéticos naturais de grande ocorrência na Terra. Os campos gerados pela corrente de retorno promovem tensões induzidas em corpos próximos ao ponto de incidência constituindo a principal fonte de danos em linhas de distribuição de energia e em circuitos de baixa tensão em geral [1]. O acoplamento entre a descarga atmosférica e um dado sistema elétrico pode ocorrer de forma direta ou indireta. Na forma direta, a descarga atinge o sistema elétrico (rede de transmissão, torres, prédios, estruturas elevadas, etc.) diretamente em algum ponto; já na forma indireta, a descarga atinge as proximidades desse sistema, e os campos irradiados são os responsáveis pelo acoplamento eletromagnético.

Embora a incidência direta da descarga em um corpo dissipe uma grande quantidade de energia, os efeitos mais freqüentes para sistemas de distribuição e circuitos de comunicação são associados às descargas indiretas [2].

A descarga atmosférica possui várias etapas, das quais a mais importante para estudos de engenharia é a descarga de retorno [3],[4]. Esta pode ser simplificada por uma corrente impulsiva que percorre o canal neutralizando as cargas já existentes nele. A onda de corrente percorre o canal com velocidade entre de 10 a 50% da velocidade da luz [5]. Isto torna a descarga atmosférica forte fonte de distúrbios eletromagnéticos, gerando danos e interferências em sistemas elétricos e eletrônicos, o que leva à necessidade de se obter mais informações sobre o fenômeno a fim de se minimizar seus efeitos danosos.

Pode-se fazer este tipo de estudo através das seguintes metodologias: estudo do fenômeno real [6], estudo através de descargas forçadas (*triggered*) [7], estudo através de modelo reduzido [8] e ainda simulações computacionais [9].

Os estudos em modelo reduzido são uma boa opção para este tipo de trabalho no que diz respeito a campos eletromagnéticos e também à tensão induzida em linhas aéreas. Eles permitem a simulação da descarga em diversos pontos ao longo da linha, ou edificação, sendo conhecidas as características da corrente como

a forma de onda, a velocidade de propagação, o tempo de frente de onda e o ponto de incidência [10].

Um ponto importante em todos os estudos em simulação, seja analógica ou computacional, é a correta modelagem do canal de descarga. De acordo com [5], a fase mais importante para os estudos de tensões induzidas por descargas atmosféricas é a descarga de retorno que, em modelo reduzido, pode ser simulada como uma corrente fluindo ascendentemente em um fio perfeitamente condutor ou num fio com perdas ou num fio em espiral.

O mais utilizado em estudos de modelo reduzido é o canal espiralado, já que com ele é possível controlar a velocidade de propagação do pulso de corrente com maior facilidade, aumentando a indutância (L) do canal através do número de espiras. Uma mudança na capacitância também influencia na velocidade de propagação, uma vez que a velocidade de propagação de uma onda numa linha de transmissão tem relação com a indutância e com a capacitância da linha de transmissão  $v=1/\sqrt{LC}$  [11]. O aumento da capacitância implica em um aumento considerável do diâmetro do canal que ficaria desproporcional ao modelo reduzido.

Uma análise simplificada dos campos gerados pelo canal fio condutor simples e canal fio espiralado, pode indicar diferenças conforme mostrado na Figura 1.1 e comentado a seguir.

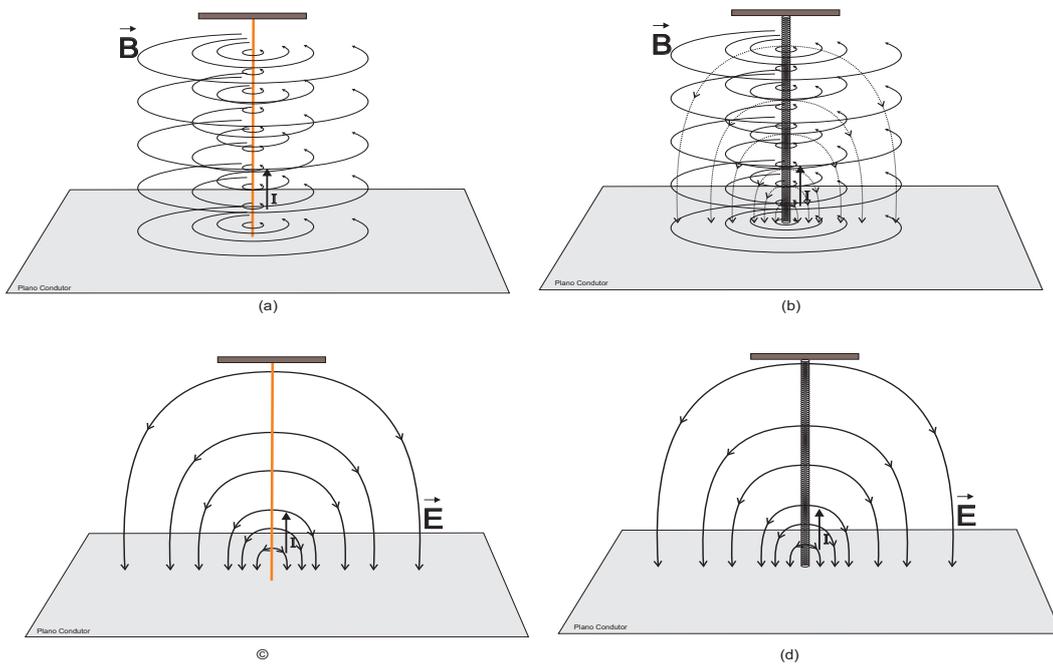


Figura 1.1: Campos gerados pelos canais de descarga fio condutor (a), (c) e espiral (b), (d)

Da teoria eletromagnética, tem-se que uma corrente percorrendo um fio gera um campo magnético tangencial a esse fio (regra da mão direita). Para o fio espiralado ter-se-ia, então, campo nas direções mostradas na Figura 1.1, tangencial e perpendicular ao plano de terra.

As direções de campos que são consideradas para fins de cálculos de tensões induzidas, por exemplo, são a vertical para o campo elétrico e a horizontal para o campo magnético [12]. De acordo com o mostrado na Figura 1.1, tem-se no canal espiral uma componente vertical do campo magnético. Qual seria, então a importância dessa componente de campo?

É nesse ponto que o presente trabalho pretende dar sua contribuição, caracterizando os campos elétrico e magnético gerados pelos canais utilizados nas simulações em modelo reduzido, especificamente o canal fio condutor e o canal espiral.

Os trabalhos que utilizam as medições com modelo reduzido para corroborar simulações computacionais, ou como sustentação para teoria, inserem como canal de descarga o espiralado, conseguindo bons resultados [5],[8],[13],[14]. Todavia, nas buscas bibliográficas para esse trabalho não encontrou-se material específico

sobre a distribuição dos campos para esse canal.

Para a caracterização dos campos, faz-se necessária, ainda, a construção e a calibração de um sistema de medição apropriado para tais campos.

Tem-se então que o trabalho possui dois objetivos: Um é o desenvolvimento do sistema de medição dos campos; o outro é a caracterização dos campos irradiados pelos canais utilizados em modelos reduzidos.

## 1.1 - Revisão Bibliográfica

Serão destacados aqui alguns dos trabalhos que utilizaram o modelo reduzido e servirão de embasamento para esta dissertação.

Inicialmente, pode-se citar o trabalho de Anderson [13], de 1960. Neste trabalho, é feito um estudo da descarga direta sobre uma torre e seus efeitos na linha de transmissão, em modelo reduzido com escala de 1/25, onde tem-se o canal de descarga representado como um fio espiral. São realizadas simulações do efeito da velocidade de propagação da descarga no canal utilizando ondas rápidas ( $1.0c$  e fio simples como canal de descarga) e ondas lentas ( $0.18c$  e  $0.32c$ , com fio espiral como canal de descarga, onde  $c$  é a velocidade da luz) e já nesse trabalho pode-se perceber a eficiência do método de modelo reduzido obtendo bons resultados comparados com simulações computacionais do fenômeno.

Outro trabalho importante na área é o de Yokoyama [8], 1985, onde é feito um estudo de tensão induzida por descarga indireta com fator de escala de 1/200. Também nesse modelo, o canal utilizado nas simulações é o espiral e os resultados obtidos nas medições são confrontados com simulações computacionais. Foram realizadas várias simulações observando o efeito dos cabos guarda e várias configurações de linhas e os resultados foram muito satisfatórios quando comparados com a teoria.

Recentemente, o trabalho de Ishii [14], 1999, que, diferentemente dos anteriores utiliza o modelo reduzido sobre um solo não condutor perfeito, ou seja, de condutividade finita, com escala 1/20, a fim de avaliar a influência da resistividade do solo nos valores de tensão induzida. Os valores encontrados tiveram uma boa relação com os valores calculados através da inserção de perdas no modelo de

cálculo de tensão induzida de Agrawal [15].

Boaventura [5], em sua dissertação de mestrado também trabalhou com o canal espiral para estudo de tensões induzidas em linha aéreas, fazendo comparação entre suas medições e a teoria de tensão induzida de Rusck [16]. O fator de escala utilizado foi de 1/200 e seus resultados tiveram boa correspondência com a teoria. Em um teste de sensibilidade, foram realizadas medições com solo de condutividade finita, obtendo-se resultados indicativos de que o modelo reduzido proposto também poderia ser aplicado em solo real, com bons resultados, podendo ser uma ferramenta importante nos estudos da influência da resistividade do solo nas tensões induzidas.

O grupo de Alta Tensão da UFMG tem estudado o fenômeno das descargas atmosféricas e sua implicação em linhas aéreas no que diz respeito a tensões induzidas. Podem ser citados os trabalhos de Fonseca [9] que utilizou de medições em modelo reduzido como comparação para os resultados encontrados por ele através do cálculo analítico do campo eletromagnético gerado por um canal de descarga. Fonseca propõe a utilização, no cálculos, do princípio da superposição o que o torna aplicável a qualquer forma de onda, uma vez que a aproximação da forma de onda de corrente para os cálculos realizados foi um degrau. Seus resultados comparados com os valores de medição em modelo reduzido obtiveram boa correlação. Lopes [16] propõe uma metodologia de cálculo para o estudo de tensões induzidas por descargas atmosféricas em linhas multi-aterradas. Nesse trabalho foi utilizado o modelo reduzido de linhas aéreas e subterrâneas para comparação com os resultados calculados, nas quais pode-se perceber uma ótima relação. Ribeiro [17], em sua tese de doutorado, utiliza as medições em modelo reduzido para verificar o cálculo de campos realizado através do método de dipolo. Tem-se ainda o trabalho de Santos [10], que utiliza o modelo reduzido na implementação de uma antena que gera, no interior de edificações, campos similares aos de descargas atmosféricas. É importante salientar que todos estes trabalhos citados do Grupo de Alta Tensão da UFMG utilizaram o canal espiral em suas simulações em modelo reduzido.

Em sua tese de doutorado Zago [18] faz comparações entre os métodos de cálculo propostos em seu trabalho com vários dados experimentais de outros

autores, tanto em escala real quanto reduzida. As medições em modelo reduzido escolhidas por ele foram as de Santos [10]. Utilizando as configurações do trabalho de Santos em seus cálculos, Zago obteve resultados para a tensão induzida em linha aérea e para a tensão em um loop dentro de uma edificação. A comparação entre os resultados medidos por Santos e os calculados por Zago levaram a uma correspondência entre forma de onda e tempo de subida.

Piantini também possui trabalhos com modelo reduzido dos quais destaca-se um de 2007 [19], no qual é aplicado o modelo reduzido no estudo de tensões induzidas por descargas atmosféricas em redes complexas de distribuição, com escala de 1/50 e utilizando o canal espiral. Nesse trabalho, o modelo reduzido é uma solução ao estudo em redes de distribuição, uma vez que o estudo teórico se torna muito complexo devido à diversidade de topologia nesse tipo de rede e também à proximidade de estruturas. Os resultados obtidos por medição foram comparados com os obtidos computacionalmente. Foram feitas também medições com a influência de estruturas próximas à rede.

Com base no contexto apresentado pode-se avaliar que simulações em modelo reduzido, com o canal de descarga espiral, são utilizadas e apresentam bons resultados quando comparados com métodos de cálculo. Contudo, não se tem informações específicas a respeito dos campos gerados por esse canal de descarga. O presente trabalho tem um de seus focos nesse ponto: a caracterização dos campos gerados pelos canais de descarga artificiais, entre eles o canal espiral.

## 1.2 – Estrutura do texto

O trabalho possui dois objetivos complementares, a montagem e calibração do sistema de medição de campos, e a caracterização dos campos gerados pelos modelos de canais de descargas atmosféricas. Dessa forma, o trabalho seguirá a seguinte estrutura, tendo 5 capítulos que podem assim ser descritos resumidamente:

- no capítulo 2, são apresentadas as especificações técnicas do modelo reduzido, bem como o sistema de geração de sinais e medições;
- o capítulo 3 apresenta o sistema de medição de campos elétrico e

magnético que foi desenvolvido especificamente para o presente trabalho. O método de calibração dos sensores de campo elétrico e campo magnético, uma das contribuições deste trabalho, é proposto e apresentado;

- no capítulo 4, tem-se a apresentação das medições realizadas com o intuito de caracterizar os campos gerados. Inicialmente são apresentadas as medições realizadas com o canal horizontal, onde são comparados os três tipos de canais ou linhas de transmissão (fio condutor simples e fio espiralado). Essas medições são a base para as observações que serão realizadas com o canal vertical. É feita uma discussão preliminar dos resultados obtidos, e após são apresentadas as medições do canal vertical, ou modelo de canal de descarga e a discussão dos resultados obtidos;
- o capítulo 5 apresenta a conclusão do trabalho e propostas de continuidade;
- em seguida tem-se os anexos. O anexo A demonstrando o cálculo utilizado para o campo eletromagnético do canal vertical e o anexo B com medições realizadas com um canal resistivo de altas perdas.

# Capítulo 2

## O Modelo Reduzido Implementado

### 2.1 – Introdução

Atualmente, trabalhos em modelo reduzido tem sido substituídos por modelos computacionais. No entanto, mesmo com o avanço desses modelos, em muitos casos, a simulação computacional pode se tornar inviável. Isso ocorre porque o fenômeno envolvido, a descarga atmosférica e seu acoplamento com sistemas elétricos possui uma grande quantidade de variáveis que podem inviabilizar a modelagem computacional, principalmente no que se diz respeito ao acoplamento dos campos irradiados. Segundo Zago [18], ocorrem restrições devido ao esforço computacional. Por isso, aplicações com modelos físicos em escala são utilizadas, onde se torna direta a montagem do modelo de sistemas complexos.

A avaliação de parâmetros como a influência do solo real na tensão induzida pode ser feita diretamente com a implementação do modelo [5], [14]. Podendo ainda se implementar e melhorar os resultados através de técnicas de medições em frequências mais elevadas (da ordem de centenas de MHz).

As maiores dificuldades encontradas nesse tipo de estudo estão nas frequências envolvidas nas simulações, nas baixas amplitudes de alguns sinais e nas interferências do ambiente, por isso foram escolhidos osciloscópios e pontas de provas adequados [20] e [21].

### 2.2 – Fator de Escala e Sistema de Calibração

O fator de escala é a relação entre grandezas do modelo e do sistema em escala real. Tem como fatores limitantes: a dimensão onde será montado o sistema em escala e os equipamentos de medição e geração. Por exemplo, em um fator de escala de 1/200, a simulação de um canal de descarga de 5000 metros leva a um canal reduzido de 25m, ou seja, o laboratório onde se deseja implementar o modelo deve comportar essa altura de canal. Já a questão dos equipamentos de medição e geração serem limitantes é devido ao fato de que para reproduzir um fenômeno, onde tem-se tempos de frente de onda real da ordem de  $1\mu\text{s}$  e tempos de propagação entre 10 a 50% da velocidade da luz, em escala, são necessários

geradores com frente de onda da ordem de nanosegundos e o sistema de medição com banda de passagem que comporte essas medições.

Para o modelo que foi utilizado neste trabalho, o fator de escala teve como limitante as dimensões disponíveis do laboratório de Engenharia de Alta Tensão e Aplicações da EEUFMG. Para mostrar a correspondência do modelo implementado com o fenômeno real, foi escolhida como fator de escala a relação entre a altura da linha de transmissão real e a altura de linha utilizada no modelo reduzido. A altura de linhas de distribuição reais está entre 8 e 10m, e a altura das linhas no modelo reduzido foram de 14cm, isto dá uma relação de aproximadamente 1/70. Aplicando este fator ao modelo, pode-se ter uma idéia da dimensão do fenômeno real modelado. Por exemplo, o tempo de frente de onda dos sinais aplicados no modelo reduzido está entre 20 e 30ns, o que é representativo de ondas reais de 1,4 a 2,1 $\mu$ s, valores correspondentes à frente de onda real de correntes de retorno[5]. Já o plano metálico utilizado com dimensões 3m x 2m, é correspondente a uma área real de dimensões 210m x 140m, dimensões que comportam os 100m de distância entre a descarga atmosférica e a linha aérea onde os campos gerados tem influência relevante nas tensões induzidas.

Os canais de descarga utilizados no modelo tem dimensão máxima de 3m. Aplicando-se o fator de escala, chega-se a 210m, que é pode ser representativo da parte do canal real que tem a maior influência nas tensões induzidas. Pontos mais altos no canal de descarga tem pouca influência pois a distância entre eles e a linha se torna grande e o valor do campo gerado cai com a distância.

No estudo de tensões induzidas em modelo reduzido, é importante que o modelo tenha seu fator de escala corretamente escolhido para que, assim, possa-se ter medições condizentes com o fenômeno em estudo.

Destaca-se, também, neste capítulo o sistema de calibração pois é parte importante deste trabalho e de suma importância na validação dos sinais captados pelos sensores.

A calibração de um sistema de medição pode ser considerada o ajuste da relação entre a entrada e saída do sinal a ser medido pelo sensor ou antena [10]. Foi proposto para a calibração do sensor de medição de campo magnético um método onde o sensor é modelado como um indutor. Esta consideração leva a uma

simplificação no processo de calibração. Sendo um indutor, o sensor tem uma resposta na frequência ( $Zl = j\omega L$ ), o que torna o sensor um filtro RL, em associação com a resistência de  $50\Omega$  na terminação do cabo coaxial que leva ao osciloscópio. Os detalhes serão descritos no capítulo 3.

Já o método de calibração do sensor de campo elétrico considera o sensor um capacitor. Obtêm-se a constante de proporcionalidade ou fator de antena, através da relação entre o sinal medido e o sinal aplicado. O valor de sinal aplicado e encontrado através de cálculos. O método foi utilizado por Ribeiro[17] e Santos [10], os quais verificaram sua validade.

Para ambos os métodos, serão realizadas toda uma sistemática de medições com frequências predefinidas, verificando o comportamento dos sensores com essa variação. No processo de calibração, as medições serão realizadas com linhas de transmissão pois para essa configuração pode-se calcular os campos na vizinhança da linha e assim compará-los com as medições dos sensores.

### 2.3 – Componentes e Estrutura Física do Modelo

As dimensões físicas do modelo levaram em conta o espaço físico que havia disponível.

#### - Plano condutor:

Foram utilizadas 3 chapas de alumínio de dimensões 2 x 1m cada, ficando uma superfície total de 3m x 2m e com espessura de 2 mm, que é muito maior que a profundidade de penetração das ondas que nele incidiram (da ordem de 0,02mm para 30MHz e tempo de frente de onda de aproximadamente 30ns).

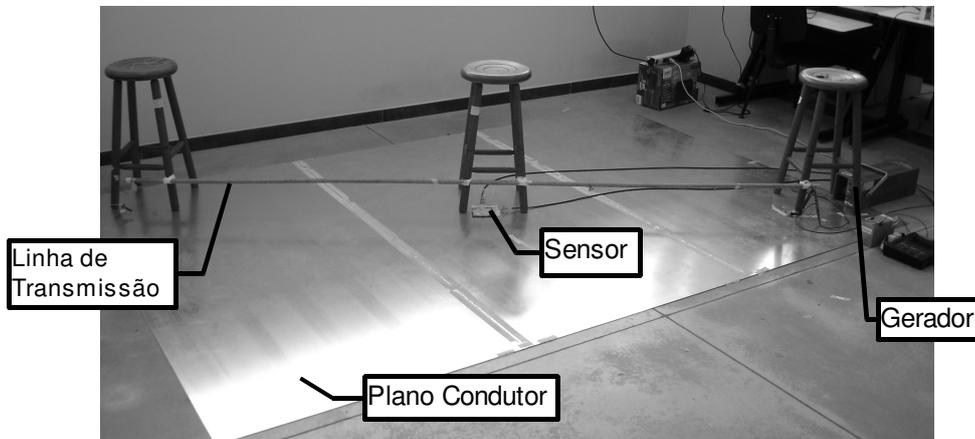
#### - Canais de descarga / Linhas de Transmissão:

Os canais utilizados foram:

- fio condutor de cobre AWG21, com 3 metros de comprimento;
- fio espiralado, tubo de 3m de comprimento por 2cm de diâmetro, no qual foi enrolado um fio de cobre, 6 voltas por cm.

Para a realização de todo o trabalho de calibração das antenas e medição dos campos, foram realizadas 6 montagens distintas: 3 correspondentes às medições com linhas de transmissão (canal horizontal) e 3 correspondentes às

medições do canal de descarga (canal vertical). Na Figura 2.1, observa-se uma das montagens realizadas para a linha de transmissão representada pelo canal espiral, banquetas de madeira foram utilizadas para deixar a linha de transmissão a 14 cm do solo condutor e isso ocorreu também nos outros dois casos estudados. Já na Figura 2.2, observa-se a montagem do canal de descarga espiral (vertical), no qual pode-se perceber que o gerador foi posicionado na base do canal, injetando diretamente o sinal no canal vertical.



*Figura 2.1: Exemplo da montagem utilizada nas medições de linha de transmissão (horizontal).*

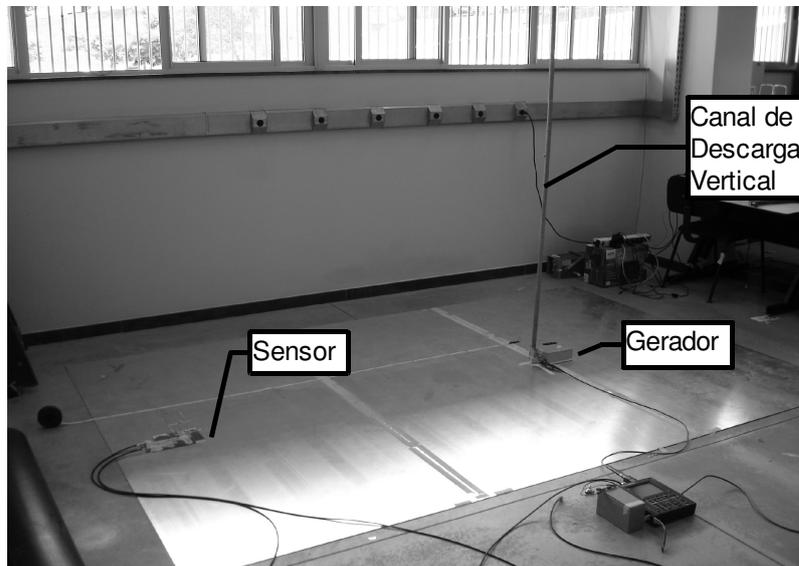


Figura 2.2: Exemplo da montagem realizada para as medições com o canal de descarga (vertical)

Feita esta visualização geral da estrutura física do modelo, partir-se-á para a caracterização de todo o sistema de geração e medição dos sinais.

### 2.3.1 – Geradores

Os geradores utilizados foram:

- Gerador 1: Modelo: Tektronix PG502 250MHZ Gerador de Pulso
  - Características: tensão de saída de  $-5V$  a  $+5V$ , com  $100mA$  de corrente. Tempo de subida da onda de aproximadamente  $4ns$  e frequência máxima de  $250MHz$ .  $Z = 50\Omega$  na saída.
- Gerador 2: Modelo: Tektronix CFG 280 Gerador de Função
  - Características: tensão de saída de  $20V$  pico a pico, com  $30mA$  de corrente. Saída terminada em  $50\Omega$ . Frequência máxima de  $11MHz$ .
- Gerador 3: gerador construído por Boaventura e Coelho [22]
  - características: alimentado por 3 baterias de  $9V$ , tem dimensões reduzidas,  $10\text{ cm}$  de largura,  $4\text{ cm}$  de altura e  $8\text{ cm}$  de profundidade. Gera onda impulsiva próxima a  $400V$  no modo de pulso não repetitivo

com tempo de subida aproximado de 30ns e semi-cauda maior que 400ns.

Foi necessário filtrar o sinal digitalmente do gerador 1, que por ser um gerador de pulsos, emitia apenas ondas quadradas. A filtragem foi realizada com o intuito de retirar a frequência fundamental do sinal emitido pelo gerador 1 para serem utilizadas apenas senóides puras nas comparações. O método é descrito a seguir.

### 2.3.2 – Processamento do Sinal do Gerador de Pulso Quadrado

O método utilizado para a filtragem do sinal do gerador de pulsos é baseado na Série de Fourier e sua relação com ondas quadradas. Uma onda quadrada pode ser representada por uma expansão da série de Fourier com os harmônicos ímpares,

$$q(t) = A \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) - \frac{A}{3} \cos(3\omega_0 \cdot t) + \frac{A}{5} \cos(5\omega_0 \cdot t) - \frac{A}{7} \cos(7\omega_0 \cdot t) + \dots \quad (1)$$

e o que graficamente pode ser representado como na Figura 2.3.

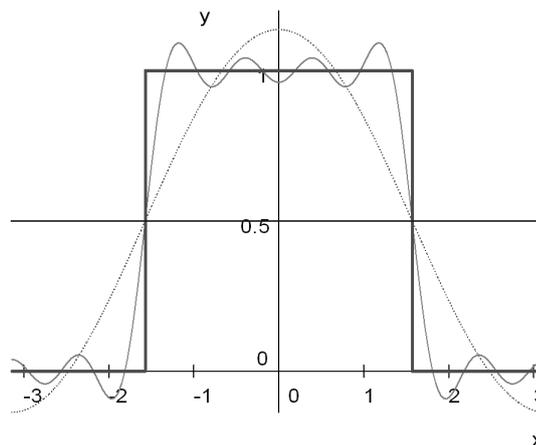


Figura 2.3: Representação da onda quadrada como a soma de harmônicos

Os sinais que foram trabalhados são ondas quadradas periódicas no tempo. Como visto, as ondas quadradas são um somatório de senóides, com uma frequência fundamental e seus harmônicos ímpares. Baseado nisto, foi criado um filtro digital baseado na FFT (Fast Fourier Transform), no MATLAB® [23], para retirar

do sinal composto a frequência fundamental.

O sinal, que está no domínio do tempo, é transformado para o domínio da frequência via FFT. É feita uma multiplicação desse sinal por um vetor que anule todas as frequências harmônicas, deixando apenas a fundamental. É aplicada a transformada inversa de Fourier, IFFT, para voltar ao domínio do tempo e assim tem-se uma senóide pura na frequência fundamental do sinal da onda quadrada do gerador de pulsos.

Foram feitas comparações entre a aplicação, no modelo reduzido, de um sinal senoidal puro e o sinal quadrado afim de verificar a validade da utilização do método de filtragem citado. A Figura 2.4 mostra o resultado da filtragem digital implementada, e as Figuras 2.5 e 2.6, a comparação com o sinal senoidal puro.

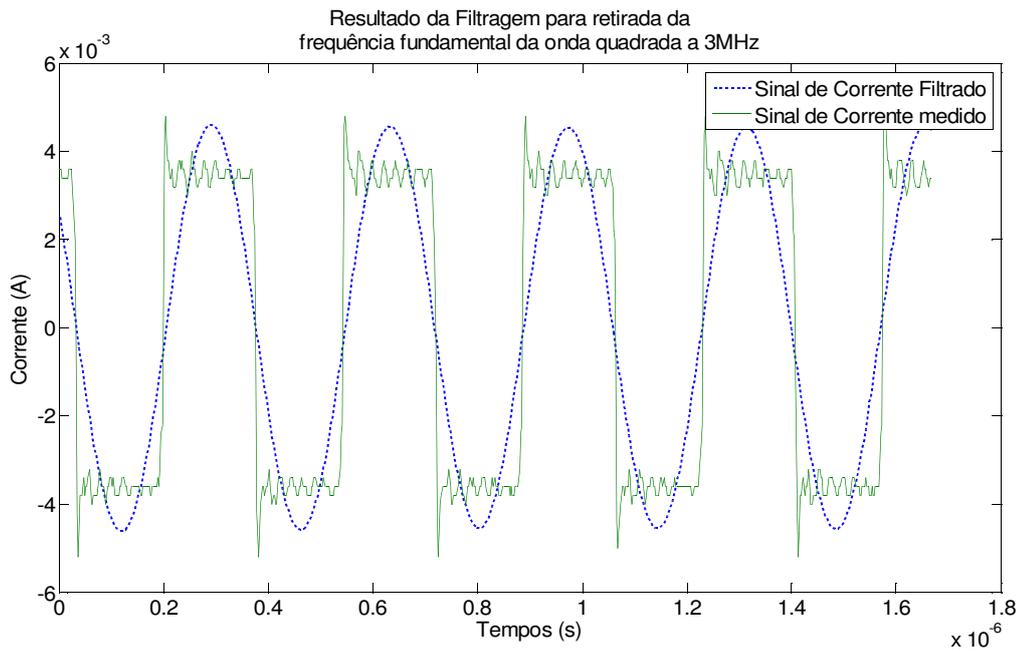


Figura 2.4: Onda quadrada e filtrada com frequência de 3MHz

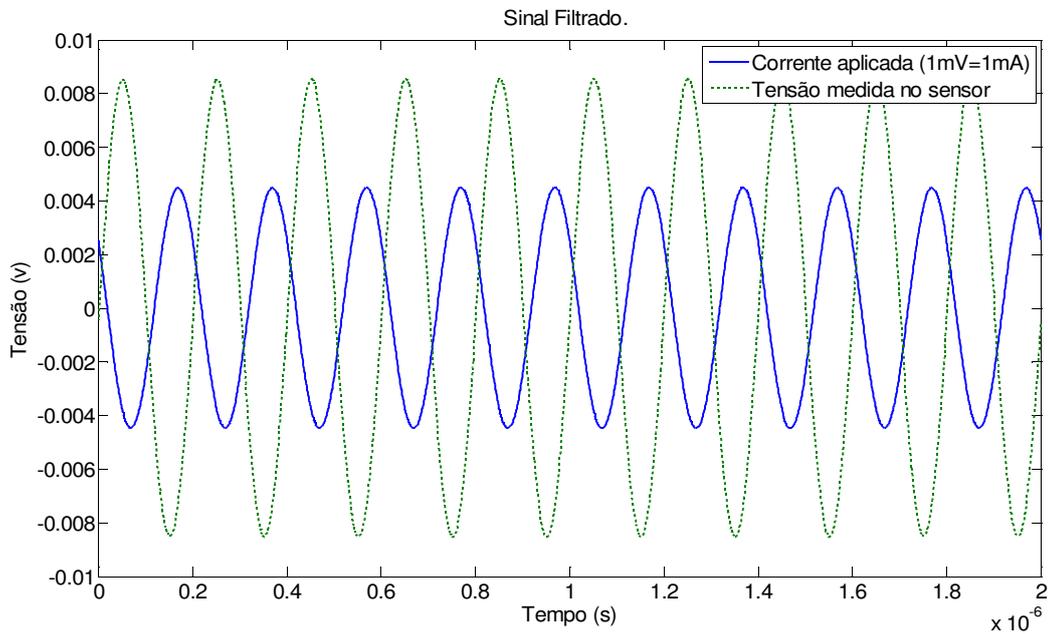


Figura 2.5: Relação entre os sinais de corrente e tensão medidos na antena, com a aplicação do filtro. 5 MHz

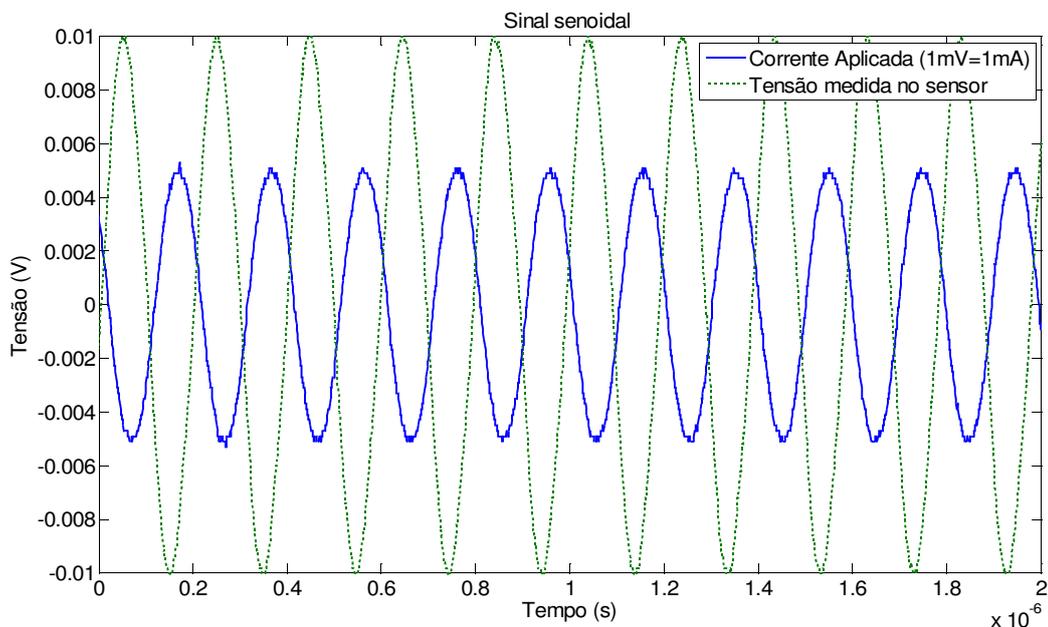


Figura 2.6: Relação entre os sinais de corrente e tensão medidos na antena, senóide pura. 5 MHz

Pode-se observar, nas Figuras 2.5 e 2.6, que a relação entre o sinal de corrente aplicado e a tensão medida no sensor se mantém em ambos os casos.

Esta análise foi feita também para as frequências de 1, 3, 7 e 10MHz, como mostra a Tabela 2.1.

*Tabela 2.1: Relação entre sinal aplicado e medido no sensor de campo magnético. Validação do método de separação da frequência fundamental da onda quadrada.*

	<b>Corrente (A)rms</b>	<b>Tensão no Sensor (V)rms</b>	<b>Relação Corrente/Tensão sensor</b>
1MHz senóide	0,00346	0,00168	2,064
1MHz quadrada filtrada	0,00305	0,00145	2,097
3MHz senóide	0,00350	0,00465	0,753
3MHz quadrada filtrada	0,00308	0,00399	0,772
5MHz senóide	0,00362	0,00690	0,525
5MHz quadrada filtrada	0,00317	0,00604	0,525
7MHz senóide	0,00354	0,00820	0,432
7MHz quadrada filtrada	0,00316	0,00755	0,418
10MHz senóide	0,00329	0,00881	0,373
10MHz quadrada filtrada	0,00307	0,00855	0,359

Com as observações feitas nesse item, pode-se validar o método de separação, através de filtro baseado em FFT, da frequência fundamental de sinais com onda quadrada. Pois como pode ser visto, a relação entre o sinal aplicado e o sinal medido na antena de campo magnético se mantém para os dois tipos de sinal. O estudo aqui realizado indica que o comportamento dos sinais envolvidos, sendo quadrado ou senóide, é o mesmo, portanto pode-se utilizar o gerador de pulso para gerar sinais nas frequências de interesse para a calibração dos sensores de campo, filtrando os sinais obtidos.

### 2.3.3 – Osciloscópio

- Modelo: THS720P
- Fabricante: Tektronix
- Banda de Passagem: 100MHz
- Impedância de Entrada:  $1M\Omega \pm 1\%$  em paralelo com  $25pF \pm 2pF$
- Base de tempo: 5 ns/div to 50 s/div
- Sensibilidade: 5 mV/div to 50 V/div

- Tempo de Subida: 3.5ns

#### 2.3.4 - Pontas de Prova de Tensão

- **Modelo: P2200**

- Fabricante: Tektronix
- Banda de Passagem: 200MHz a 10x
- Capacitância de entrada: 16pF a 10x
- Resistência de entrada: 10MΩ a 10x
- Atenuação: 10x
- Tensão Máxima de Entrada: 300V a 10x

- **Modelo: P6205 FET [24]**

- Fabricante: Tektronix
- Banda de Passagem: 750MHz
- Capacitância de entrada:  $\leq 2$ pF
- Resistência de entrada: 1MΩ $\pm$ 5% DC
- Atenuação: 10X  $\pm$ 1.8% DC com 50Ω $\pm$ 0.5%
- Tensão Máxima de Entrada: 40 VDC + pico AC
- Observação: foi adaptado sistema de alimentação para o circuito ativo da ponta de prova  $\pm$  5V, com pilhas recarregáveis associadas em série.
- Necessita de terminação em 50 ohms

#### 2.3.5 – Ponta de Prova de Corrente

- **Modelo: P6022**

- Fabricante: Tektronix
- Sensibilidade: 1mA ou 10mA para cada mV, dependendo da seleção feita no controle de sensibilidade
- Banda de Passagem: 8,5kHz a 100MHz (1mA/1mV)  
935Hz a 120MHz (10mA/1mV)
- Impedância de Inserção: 0.03Ω até 1MHz e 0.2Ω até 120MHz

Tem-se então todo um sistema preparado para as medições. As dimensões e escala das grandezas estão de acordo com o fenômeno real, bem como os equipamentos e o processamento de sinais bem especificadas e de acordo com as necessidades das medições.

## Capítulo 3

# O Sistema de Medição dos Campos Elétrico e Magnético e sua Calibração

### 3.1 - Introdução

A medição dos campos elétrico e magnético gerados foi feita através de sensores especialmente desenvolvidos para este propósito. Os quais foram construídos a fim de ter dimensões adequadas ao modelo de modo que sua influência sobre os campos fosse mínima.

Construídos os sensores, foi feita a calibração dos mesmos. E para tanto, utilizou-se uma configuração do modelo reduzido no qual poderia-se calcular os valores de campo para, assim, comparar com as medições dos sensores. A Figura 3.1 mostra a configuração do modelo reduzido e a distribuição espacial dos campos que serão utilizados no processo de calibração. A Linha de transmissão utilizada foi casada em sua terminação. E a distribuição dos campos gerados por essa configuração são de fácil caracterização e sua teoria bem conhecida.

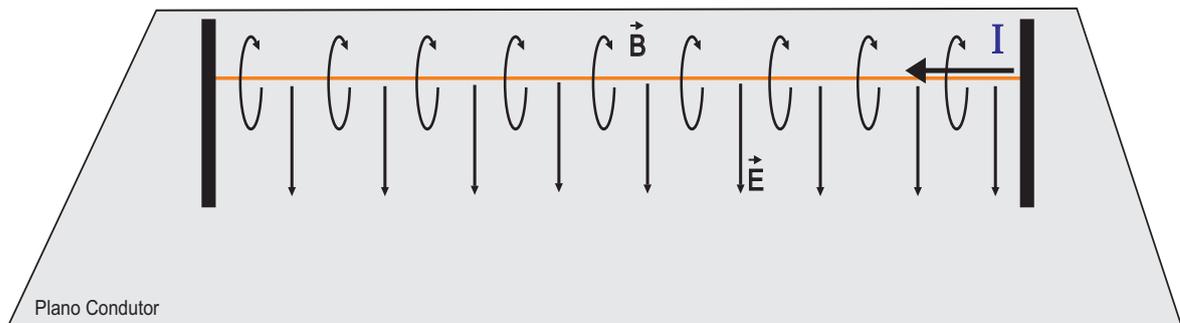


Figura 3.1: Distribuição dos campos gerados por uma linha de transmissão

Como se observa na Figura 3.1, o modelo implementado é composto de um fio condutor que representa a linha de transmissão a uma certa altura de um plano perfeitamente condutor. Quando percorrido por uma corrente gera campos elétrico e magnético nas direções mostradas. As medições foram realizadas logo abaixo da linha, onde tem-se campo elétrico na direção vertical e campo magnético na direção horizontal, ambos perpendiculares à linha e entre si.

Sabendo dessas direções dos campos, os sensores foram desenvolvidos. O

sensor de campo elétrico foi constituído para captar o campo elétrico vertical, e o sensor de campo magnético para captar o campo magnético horizontal. Todavia, para medições de campo magnético, o sensor desenvolvido possui ainda a possibilidade de captar a componente de campo horizontal paralela à linha de transmissão. A construção dos sensores foi adaptada de [10], [25] e [26].

## 3.2 - O sensor de Campo Elétrico

### 3.2.1 – Características

O sensor de campo elétrico foi desenvolvido de forma que sua interferência nas linhas de campo fosse mínima. Normalmente, uma antena fornece como sinal para equipamentos de medição, uma tensão que é proporcional ao campo elétrico que se pretende medir, sendo então importante que a configuração dos condutores da antena não alterem essa relação de proporcionalidade [10]. Baseado nessa informação foram construídos sensores com chapas de circuito impresso virgem, circulares e quadradas. Foram dispostas duas chapas, de mesmo tamanho, a 7 cm de altura uma da outra. A ponta de prova de tensão P6205FET, com capacitância aproximada de 2pF, foi conectada à chapa de baixo via conector BNC e adaptador.

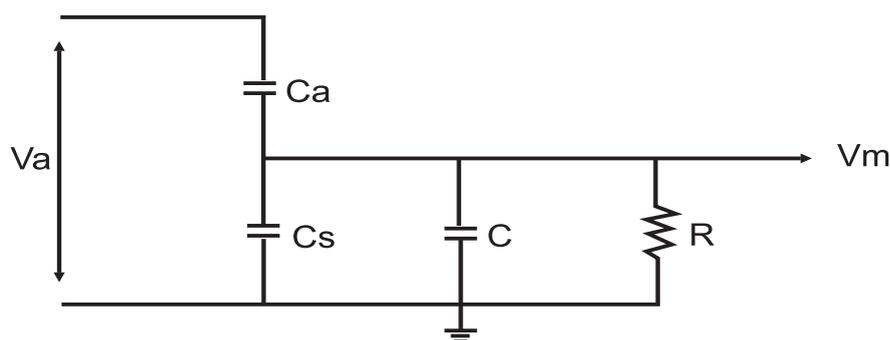


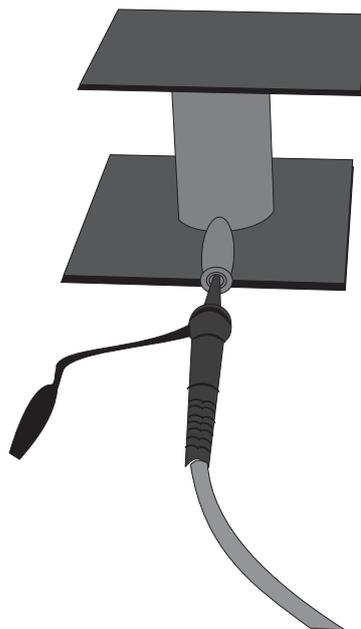
Figura 3.2: Circuito do sensor de campo elétrico e sistema de medição. Sendo  $V_a$  tensão aplicada na linha,  $C_a$  capacitância linha sensor,  $C_s$  capacitância do sensor,  $C$  capacitância da ponta de prova,  $R$  resistência  $1M\Omega$  do sistema de medição,  $V_m$  tensão medida

Testes de sensibilidade foram realizados comparando-se os sensores e o sensor com chapa quadrada, Figura 3.2, apresentou amplitude maior, como pode

ser observado na Tabela 3.1. O teste foi realizado com a montagem da Figura 3.1. Foi aplicado sinal na linha e medido o campo abaixo da mesma pelos sensores diferentes. Para estes testes a ponta de prova de tensão utilizada foi de 13pF de capacitância.

*Tabela 3.1: Comparação entre os dois sensores de campo elétrico. Valores em RMS*

Frequência do Sinal Aplicado	1MHz	3MHz	5MHz	7MHz	9MHz	11MHz
Tensão Aplicada (Volts)	5,71	5,95	6,16	6,24	6,11	5,94
<b>Tensão no Sensor circular (Volts)</b>	6,66E-002	6,88E-002	7,06E-002	7,09E-002	6,92E-002	6,66E-002
<b>Tensão no Sensor quadrado (Volts)</b>	7,93E-002	8,21E-002	8,46E-002	8,57E-002	8,34E-002	8,02E-002



*Figura 3.3: Sensor de Campo Elétrico*

As especificações do sensor são as seguintes:

- 2 Placas de Circuito integrado virgem de dimensões: 7 x 7 e a distância entre elas de 7cm;
- Ponta de Prova de Tensão utilizada: P6205FET.

### 3.2.2 - Calibração

O método para a calibração do sensor de campo elétrico é referenciado em

[10], onde são propostos dois métodos diferentes: um baseado em um arranjo onde o sensor a ser calibrado é inserido entre duas chapas metálicas ligadas a um gerador de tensão. Através da relação entre tensão aplicada, distância entre as placas e tensão medida no sensor obtêm-se o fator de calibração. O segundo é baseado em uma linha unifilar à qual é aplicada uma tensão. O campo elétrico na sua vizinhança é calculado [11] e comparado com a tensão medida no sensor. No presente trabalho utilizaremos apenas o método de determinação da constante via linha unifilar para frequências até 30MHz. As dimensões que do modelo, necessárias nos cálculos estão representadas na Figura 3.4, como o condutor está sobre um plano condutor perfeito é considerada também a imagem do condutor.

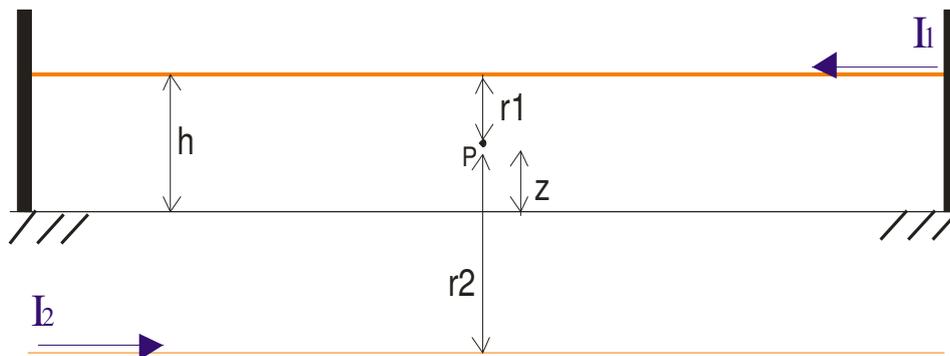


Figura 3.4: Dimensões para os cálculos de campo

Nos cálculos, o modelo foi considerado em regime estacionário. Estando a linha casada não ocorrem reflexões e sendo assim o sinal aplicado (senoidal) pode ser considerado em regime estacionário.

A linha de transmissão utilizada nos estudos para a calibração dos sensores foi um fio esmaltado de cobre AWG21 com 2,70m de comprimento, a 27cm do plano condutor perfeito e com sua terminação casada 407 ohms.

O sensor para campo elétrico tem seu funcionamento baseado em um capacitor inserido em um campo elétrico. As placas condutoras estão, uma numa linha de equipotencial e a outra no solo (potencial zero, solo condutor). Assim, tem-se entre as chapas uma diferença de potencial que será o sinal medido. A Figura 19 exemplifica o funcionamento do sensor.

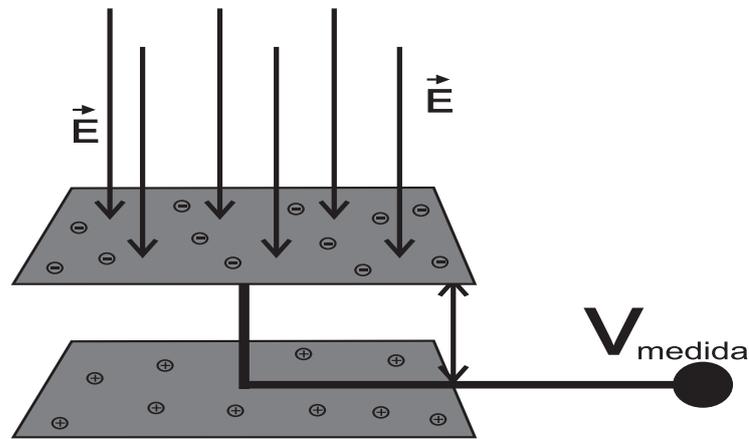


Figura 3.5: Funcionamento do sensor de campo elétrico

Para a calibração, inicialmente calcula-se o valor esperado de campo naquela posição, nesse caso o campo será calculado imediatamente acima da chapa de cobre superior do sensor. São feitas medições variando-se a frequência do sinal aplicado e os valores são comparados, gerando uma constante e uma curva de calibração. A Figura 3.4 mostra a configuração utilizada para o cálculo do campo elétrico gerado por uma linha unifilar de conduzindo corrente.

Os cálculos foram feitos para o ponto de observação no meio e abaixo da linha considerando-se sua imagem. A equação utilizada nos cálculos foi

$$\vec{E} = \frac{\rho_l}{2\pi\epsilon r} \hat{r} \quad (2)$$

onde  $\rho_l$  é a densidade linear de carga,  $\epsilon$  a permissividade elétrica e  $\hat{r}_1$  distância da linha ao ponto [11].

Considerando que  $\hat{r}_1$  é a distância da linha ao ponto e que  $\hat{r}_2$  é a distância da imagem ao ponto e que são representados por

$$\hat{r}_1 = \frac{(x, z-h)}{\sqrt{x^2 + z^2 - 2hz + h^2}} \quad (3)$$

$$\hat{r}_2 = \frac{(x, z-h)}{\sqrt{x^2 + z^2 - 2hz + h^2}} \quad (4)$$

sendo  $x=0$  (meio da linha),  $h$ = altura da linha e  $z$ =altura do sensor de acordo com a Figura 3.4. O valor do o campo elétrico no ponto é

$$\vec{E} = \frac{\rho_l}{2\pi\epsilon} \left[ \frac{1}{(z-h)} - \frac{1}{(z+h)} \right] \quad (5)$$

Tomando por base a equação fundamental da capacitância  $C=q/V$ , se dividirmos pelo comprimento  $l$ , tem-se  $C/l = (q/l)/V$ . Como  $q/l$  é a densidade linear de carga  $C/l = \rho_l / V$  ou

$$\rho_l = \frac{C}{l} V \quad (6)$$

Substituindo (6) em (5)

$$E = \frac{C/l}{2\pi\epsilon} \left[ \frac{1}{(z-h)} - \frac{1}{(z+h)} \right] V \quad (7)$$

A capacitância por unidade de comprimento ( $C/l$ ) de uma linha unifilar é [17]

$$\frac{C}{l} = \frac{24,2\epsilon_r}{\log\left[\left(\frac{h}{r_r}\right) + \sqrt{\left(\left(\frac{h}{r_r}\right)^2 - 1}\right)}\right]} \quad (\text{pF/m}) \quad (8)$$

Agora, substituindo os valores correspondentes da montagem do modelo:

- $h$  = altura da linha = 0,27 m
- $r_r$  = raio do condutor = 0,000357 m
- $\epsilon$  = permissividade do vácuo = 8,85 pF/m
- $z$  = ponto onde se vai avaliar o campo = 0,07 m

nas equações (7) e (8) tem-se a relação

$$E = 1,0874 V_{aplic} \quad (9)$$

Com a Equação (9) obtém-se o valor esperado de campo elétrico no ponto, devido à tensão aplicada na linha unifilar.

Para a calibração do sinal medido pelo sensor é necessário encontrar a constante de proporcionalidade, ou constante de calibração. Que nesse caso é o valor calculado de campo dividido pelo valor medido pela antena, ou seja

$$k = \frac{E}{V_m} \quad (10)$$

ou substituindo (9) em (10)

$$k = 1,0874 \frac{V_{aplic}}{V_m} \quad (11)$$

A constante  $k$  pode ser encontrada, de acordo com a equação 11, através da relação entre a tensão aplicada na linha e a tensão medida no sensor. De posse da constante  $k$  e do valor medido de tensão no sensor, utiliza-se a equação 10 para obter o campo elétrico medido no ponto

$$|E|_m = k \cdot V_m \quad (12)$$

A calibração do sensor consistiu na aplicação de sinais, de diferentes frequências na linha de transmissão, e na medição da tensão no sensor devido ao campo elétrico gerado pela linha. A constante de calibração ou proporcionalidade para cada frequência é dada pela equação 11.

Foram realizadas medições nas seguintes frequências 1MHz, 3MHz, 5MHz, 7MHz, 10MHz, 12MHz, 14MHz, 16MHz, 18MHz, 20MHz, 25MHz, e 30MHz, Os pulsos gerados foram filtrados conforme item 2.3.2. A Tabela 3.2 resume os

resultados obtidos.

A Figura 3.6 apresenta a tensão e a corrente medidas no início da linha de transmissão confirmando o correto casamento da impedância da linha.

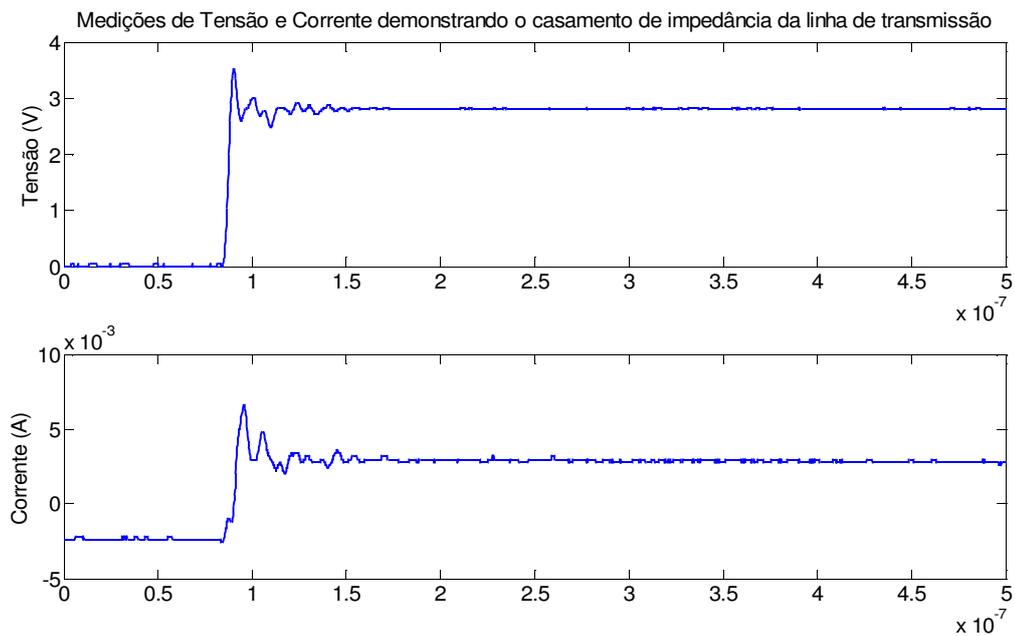


Figura 3.6:  $V$  e  $I$  medidos na LT a partir da aplicação de pulsos.

*Tabela 3.2: Levantamento do k para diversas frequências*

<b>Frequência do Sinal Aplicado</b>	<b>K</b>
1 MHz	38,26
3 MHz	38,43
5 MHz	37,62
7 MHz	39,25
10 MHz	42
12 MHz	40,95
14 MHz	37,93
16 MHz	41,28
18 MHz	38,03
20 MHz	39,47
25 MHz	40,37
30 MHz	45,37
<b>MÉDIA</b>	<b>39,91</b>

Através dos valores encontrados para a constante de proporcionalidade, pode-se adotar como valor de k, para o sensor de campo elétrico, a média desses valores, 39,91; ou seja, o valor do campo elétrico medido pelo sensor é igual à tensão medida multiplicada pelo valor de k, como na Equação 12. As Figuras 3.7, 3.8 e 3.9 mostram os resultados obtidos, o campo calculado nestas figuras é obtido através da Equação 9.

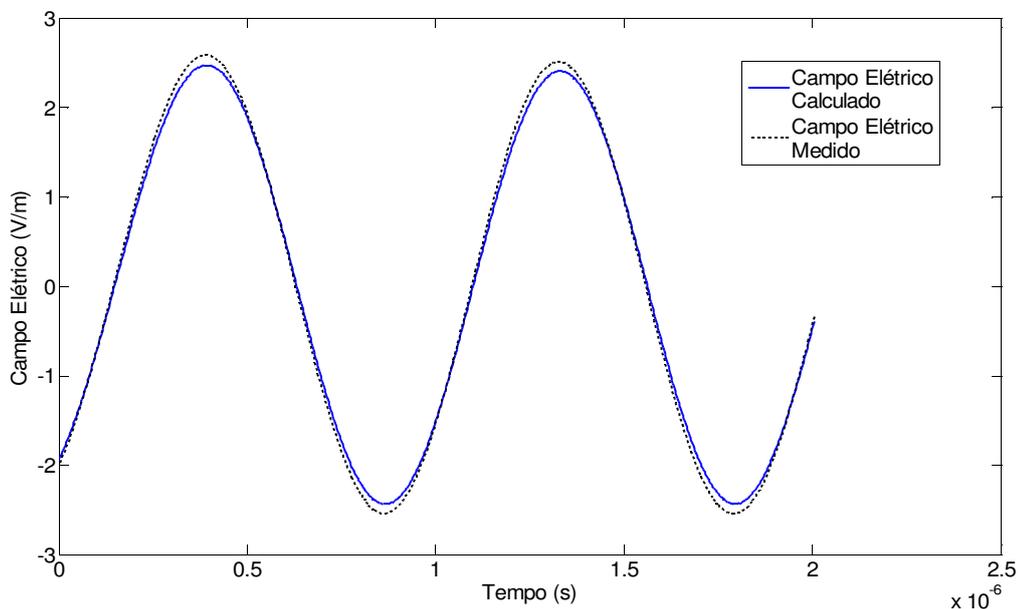


Figura 3.7: Comparação entre o sinal do campo elétrico medido e calculado. Utilizando  $k=39,91$  e  $1\text{MHz}$ .

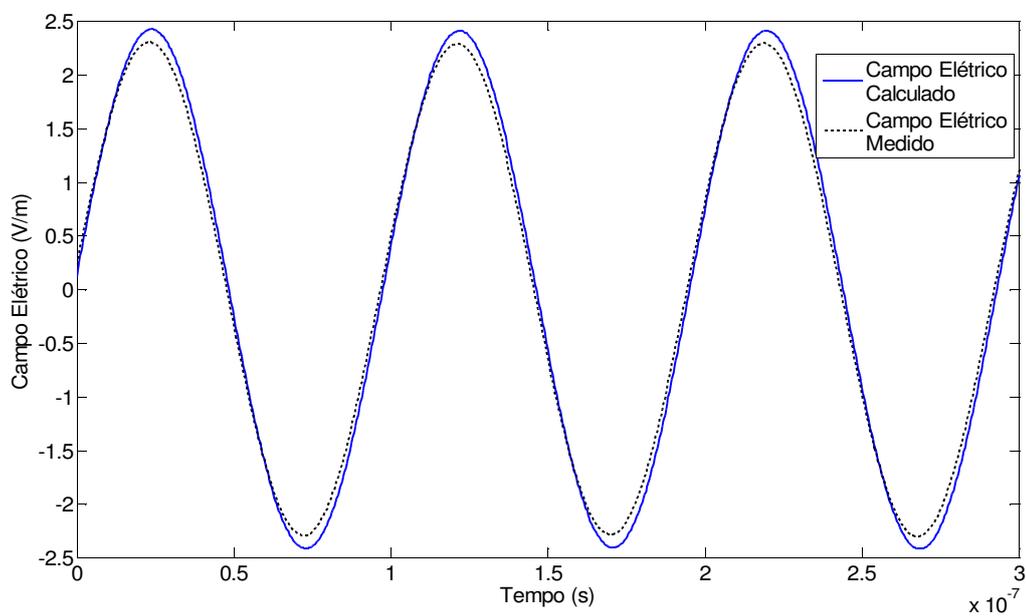


Figura 3.8: Comparação entre o sinal do campo elétrico medido e calculado. Utilizando  $k=39,91$  e  $10\text{MHz}$ .

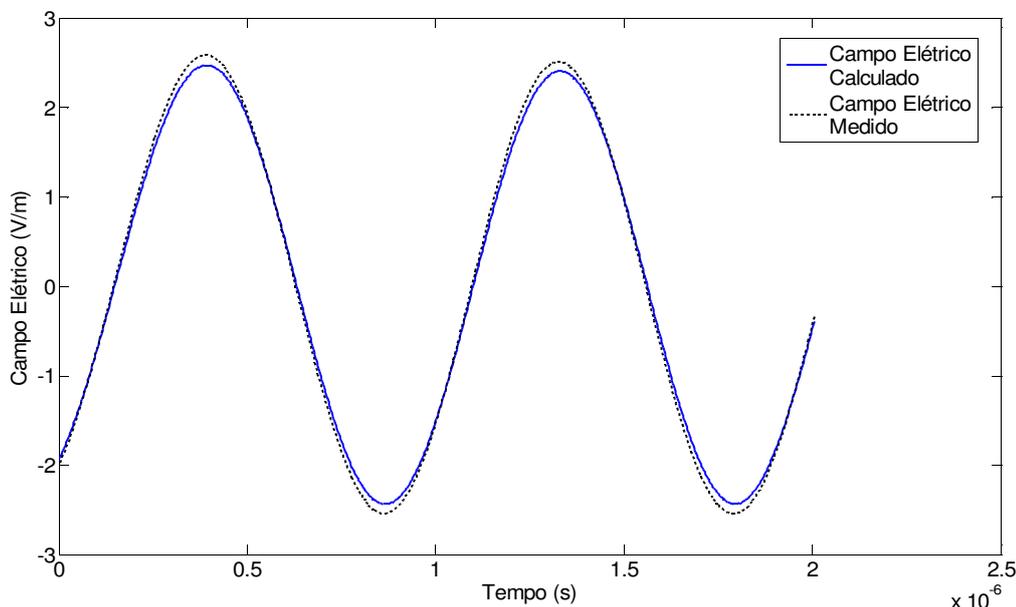


Figura 3.9: Comparação entre o sinal do campo elétrico medido e calculado. Utilizando  $k=39,91$  e  $30\text{MHz}$ .

### 3.3 – O sensor de Campo Magnético

#### 3.3.1 - Características

O sensor de campo magnético também foi construído de forma que sua interferência no sistema fosse mínima e ainda que gerasse sinais de amplitude suficiente para serem lidos pelos instrumentos de medição utilizados. O sensor será descrito a seguir. Sua construção e seu funcionamento foram baseados na Lei Faraday.

Basicamente o sensor é um *loop* quadrado construído com fio de cobre esmaltado e tendo um de seus lados com uma abertura onde é medida a tensão. Essa diferença de tensão é devida à corrente que é induzida no condutor pela densidade de fluxo magnético variável no tempo que atravessa a área do sensor (Lei de Faraday).

No caso do sensor criado, foram feitos alguns testes e estudos a fim de conseguir o melhor sinal possível tendo em vista que, no processo de calibração, as amplitudes de sinais envolvidas seriam baixas, da ordem de milivolts. Chegou-se

então ao modelo de sensor com loop de duas voltas, com blindagem a campo elétrico [26] e de dimensões de 10cmx10cm, como mostra a Figura 3.10.

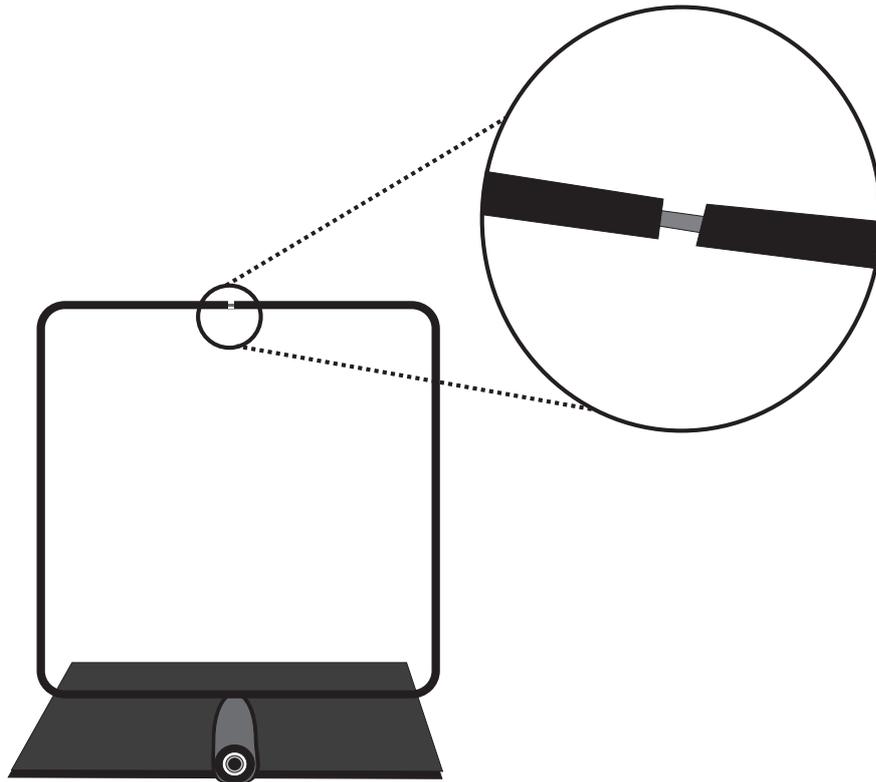
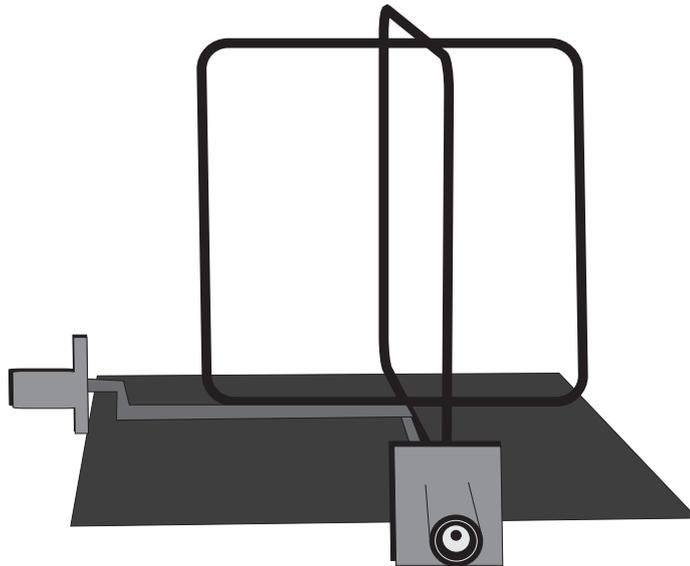


Figura 3.10: Modelo de sensor para campo magnético unidirecional. No detalhe, o “gap” na blindagem do sensor.

A blindagem a campo elétrico consistiu no envolvimento do *loop* com folha de papel alumínio deixando-se um *gap*, como na Figura 3.10, no lado oposto ao lado onde está o terminal da medição. Este *gap* deve estar exatamente no meio da dimensão do lado, assim como a terminação onde é feita a medição e o ponto de contato da blindagem com o terra, que também deve ser único, para assim ter-se simetria na blindagem. A simetria na blindagem permite a correta distribuição e fluxo para a terra de cargas nos dois lados da mesma, sendo o princípio básico de funcionamento da blindagem.

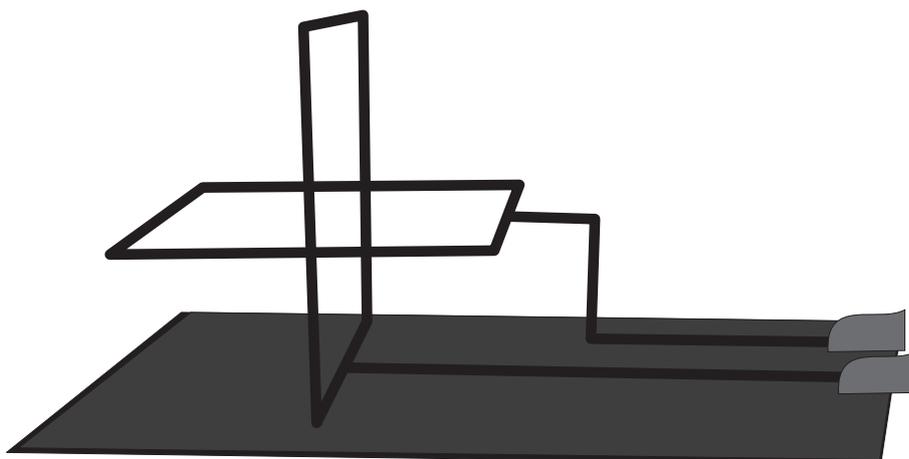
O *loop* foi fixado a uma chapa de cobre ou chapa de circuito impresso virgem, que funcionou como terra. Na abertura onde é feita a medição de tensão, foi

adaptado um conector BNC, e nesta conecta-se um cabo coaxial para levar o sinal até o osciloscópio, acrescentando-se a terminação em  $50\Omega$  para conectar o cabo ao osciloscópio.



*Figura 3.11: Sensor para medição de campos magnéticos horizontais, em duas direções, simultaneamente*

Um segundo e terceiro modelos de sensor foram construídos, para medir campos em 2 direções simultaneamente. Eles foram utilizados para a medição abaixo da linha de transmissão e nas proximidades do canal de descarga.



*Figura 3.12: Sensor de campo magnético para medição de campo vertical e horizontal, simultaneamente*

### 3.3.2 - Calibração

O método de calibração do sensor de campo magnético é uma proposta para facilitar o processo de calibração e consiste basicamente em uma análise da resposta do sensor.

Como dito no item 3.1, uma antena ou sensor emite um sinal proporcional ao campo medido. O caso do sensor de campo magnético não é diferente. Como será demonstrado, este tem proporcionalidade com a derivada da densidade de fluxo magnético no tempo. Todavia, por ter seu comportamento aproximado de um indutor, o sistema de medição se comporta como um filtro RL, atenuando o sinal. Assim se faz necessário, a partir de certas frequências, uma correção que leve em conta isso.

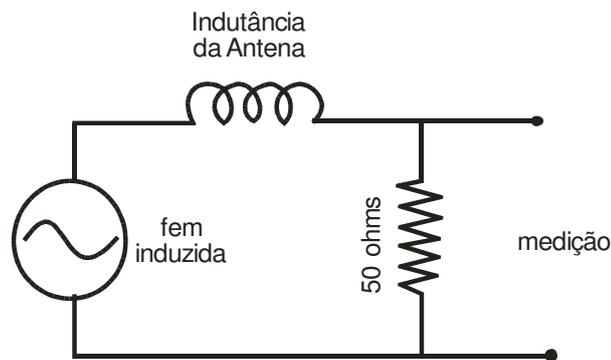


Figura 3.13: Circuito correspondente, sensor de campo magnético

O sensor pode ser representado por uma indutância (Figura 3.13) e como tal tem sua resposta dependente da frequência. Sua impedância pode ser representada por [27]

$$Z_l = j\omega L \quad (14).$$

A resistência de  $50\Omega$  no circuito, transforma o sensor em um filtro RL. O qual tem sua frequência de corte igual a

$$50 = |j\omega L| \quad (15)$$

de onde tem-se

$$f = \frac{50}{2\pi L} \quad (16)$$

sendo  $f$  a frequência de corte, na qual o filtro RL introduz atenuações próximas a 3dB.

Para realizar esse cálculo, é necessário encontrar o valor da indutância do sensor. Isto foi feito experimentalmente aplicando-se um sinal degrau diretamente ao sensor e medindo-se, com o osciloscópio, sua resposta, que foi comparada com simulação computacional realizada como software PSPICE® [28]. Este método, além de encontrar o valor da indutância, demonstrou que a modelagem do sensor por uma indutância é uma ótima aproximação. O valor encontrado para a indutância do sensor foi de 1,2μH.

A Figura 3.14 mostra o circuito utilizado para a simulação computacional no PSPICE.

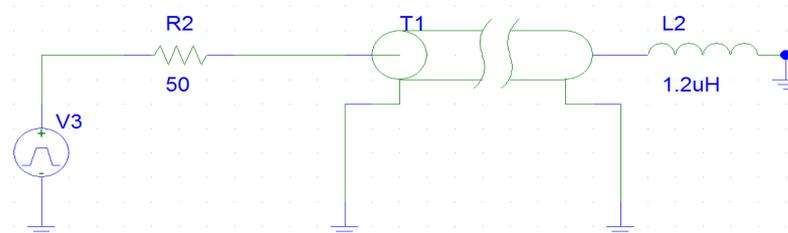


Figura 3.14: Circuito da simulação computacional

O valor da indutância, na simulação, foi sendo variada até encontrar-se uma boa correspondência com o sinal medido (Figura 3.15). Na montagem para as medições, o sensor foi conectado à terminação de um cabo coaxial. Foi aplicada um degrau de tensão, via gerador. A resposta foi medida diretamente pelo osciloscópio, ligado à terminação emissora. As medições foram realizadas com os três sensores construídos, mostrados nas Figuras 3.10, 3.11 e 3.12, e em todos obteve-se os mesmos resultados. As Figuras 3.15, 3.16, 3.17 mostram os resultados de simulações e medições.

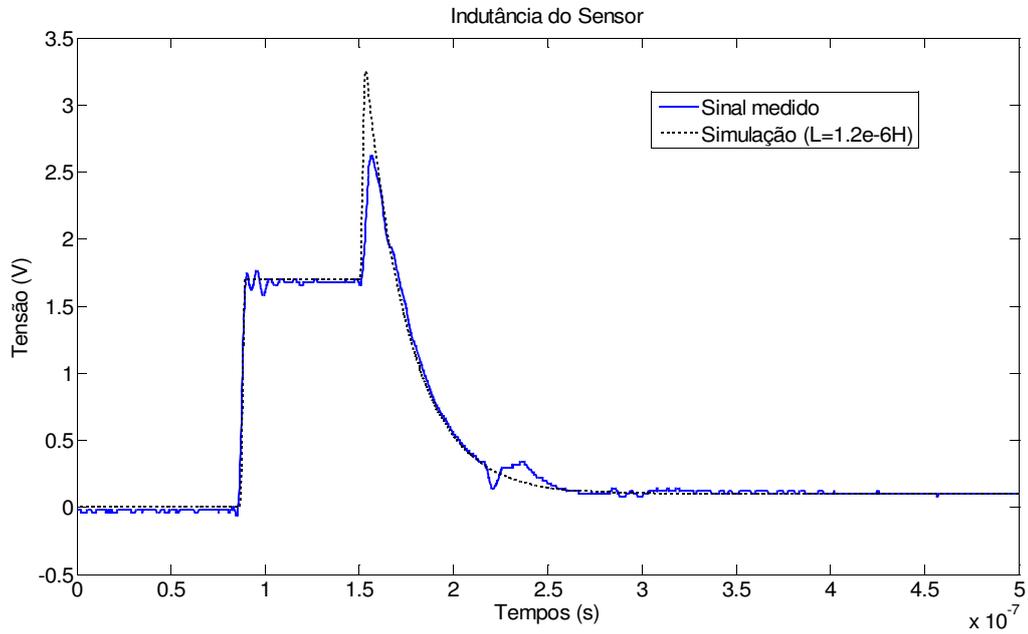


Figura 3.15: Comparação entre sinal medido e simulado para encontrar o valor da indutância correspondente ao sensor de campo magnético.

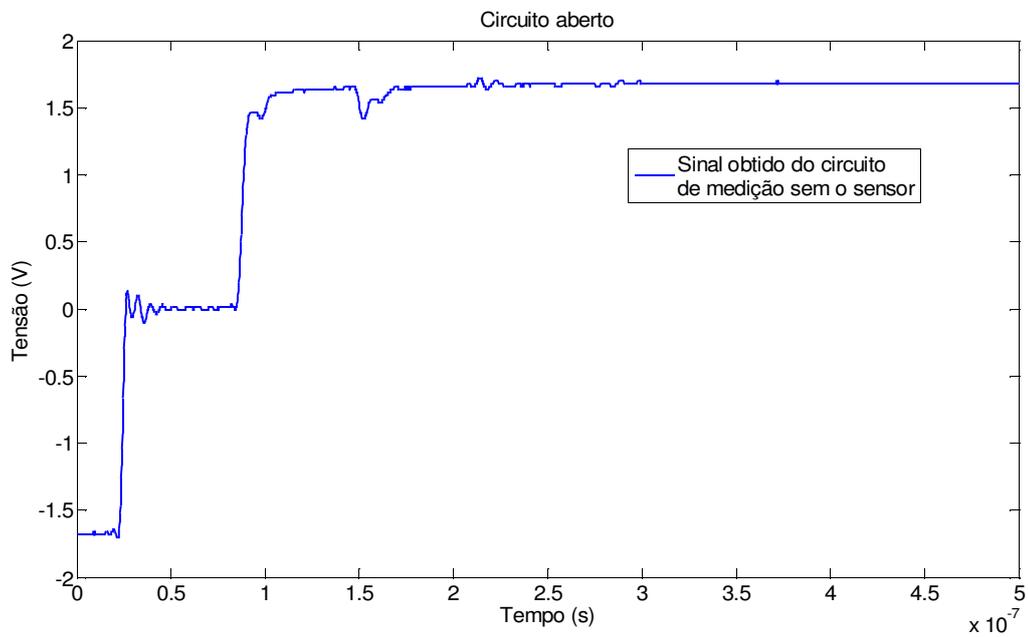


Figura 3.16: Sinal com o circuito aberto, sem o sensor de campo magnético

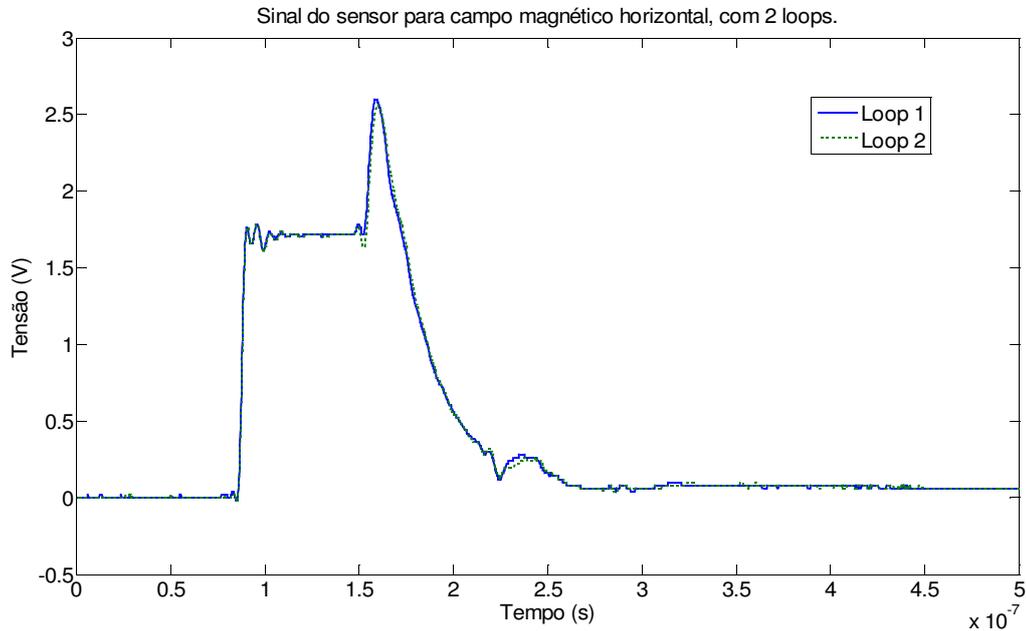


Figura 3.17: Sinais obtidos para o sensor de campo magnético com dois loops.

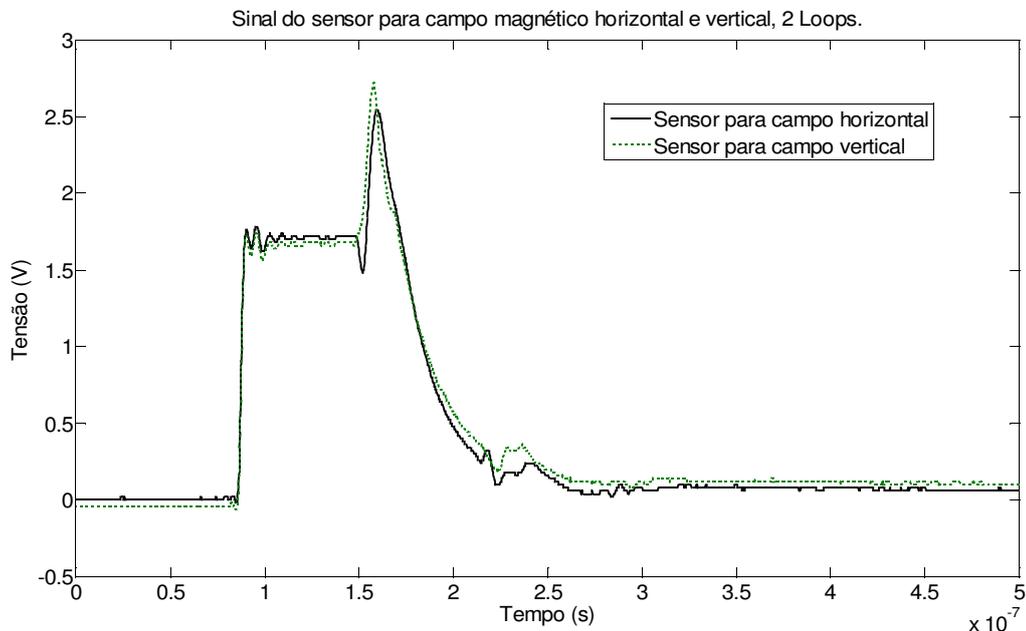


Figura 3.18: Sinal obtido com o sensor de campo magnético horizontal e vertical, 2 loops.

Feitas estas medições e simulações, o valor adotado para a indutância do sensor de campo magnético será  $1.2\mu\text{H}$ .

De acordo com a Equação 16, a frequência de corte para o sensor construído será,

$$f = \frac{50}{2\pi 1.2 \mu H} = 6.63 \text{ MHz} \quad (17).$$

A partir deste valor, 6,63MHz, a atenuação do sinal captado pelo sensor começa a ser mais considerável com valores maiores que 3dB.

Sabendo disto, foi realizado um estudo, a fim de encontrar a curva de resposta do sensor para frequências de 500kHz a 30MHz. Para isso foi realizada uma montagem com o fio de cobre AWG21 sendo a linha de transmissão a 27cm do plano condutor, com 3m de comprimento e terminação casada com 407Ω. O sensor de campo magnético (Figura 3.11) foi posicionado logo abaixo e no meio da linha de transmissão e conectado ao osciloscópio através de um cabo coaxial terminado em 50Ω.

Os sinais foram aplicados utilizando o gerador de pulso (onda quadrada) que foi conectado à linha de transmissão com um fio de cobre para evitar reflexões devido a diferença de impedâncias. As ondas aplicadas tinham as seguintes frequências: 500kHz, 600kHz, 900kHz, 1MHz, 3MHz, 5MHz, 7MHz, 10MHz, 12MHz, 14MHz, 16MHz, 18MHz, 20MHz, 24MHz, 27MHz e 30MHz, e tensão de aproximadamente 4 Vpp. Devido à baixa amplitude do sinal gerador dos campos, houve uma certa dificuldade em se captar os sinais de frequências abaixo de 1MHz. Foi necessária a inserção, em paralelo, na saída do gerador de um capacitor de 94pF, pois a frente de onda do gerador, próximo a 4ns, muito rápida, estava causando problemas nas medições (*overshoot*) [29].

As Figuras 3.20, 3.21 e 3.22 mostram os sinais medidos pelos sensores. Foram medidas as correntes e tensões no sensor para cada frequência. As tensões medidas nos sensores são devidas aos campos tangencial e longitudinal de acordo com a Figura 3.19, percebe-se que as medições estão de acordo com a teoria, uma vez que para um corrente fluindo em um fio, o campo magnético gerador por ela é tangencial ao fio. Pelas medições, tem-se um sinal medido muito pequeno paralelo a linha, que comparado com o tangencial pode ser desconsiderado. E ainda corroborando a teoria, ocorre um aumento da tensão com a frequência. Os sinais foram filtrados de acordo com o método descrito no item 2.3.2. É importante

salientar que a componente de campo azimutal foi denominada componente tangencial por não estar se levando em conta, nas avaliações, a variação do ângulo azimutal. Sendo assim a componente tangencial é aquela tangente à linha de campo no ponto em estudo.

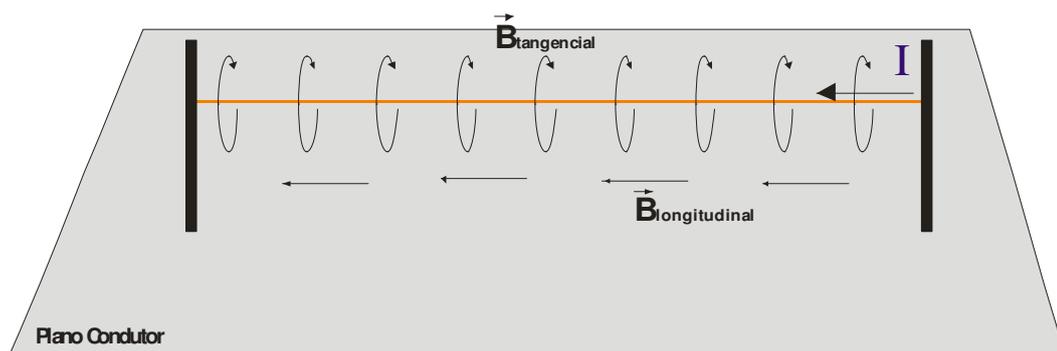


Figura 3.19: Direção dos campos medidos pelo sensor de campo magnético abaixo da linha de transmissão. Campo Tangencial e Campo Longitudinal

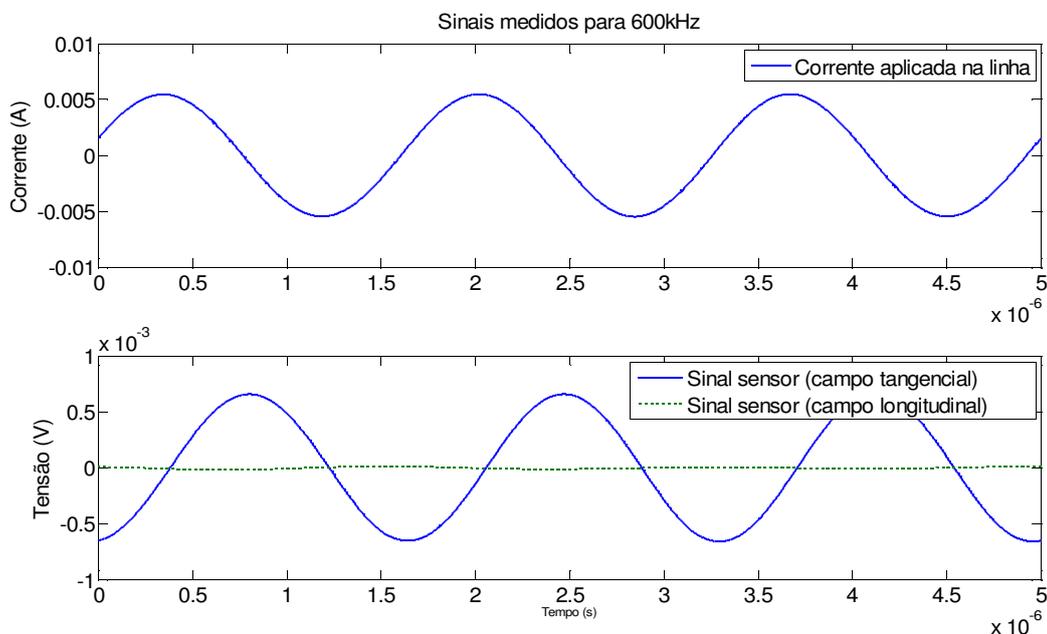


Figura 3.20: Sinais medidos de corrente na linha e tensão nos sensores de campo magnético, 600kHz

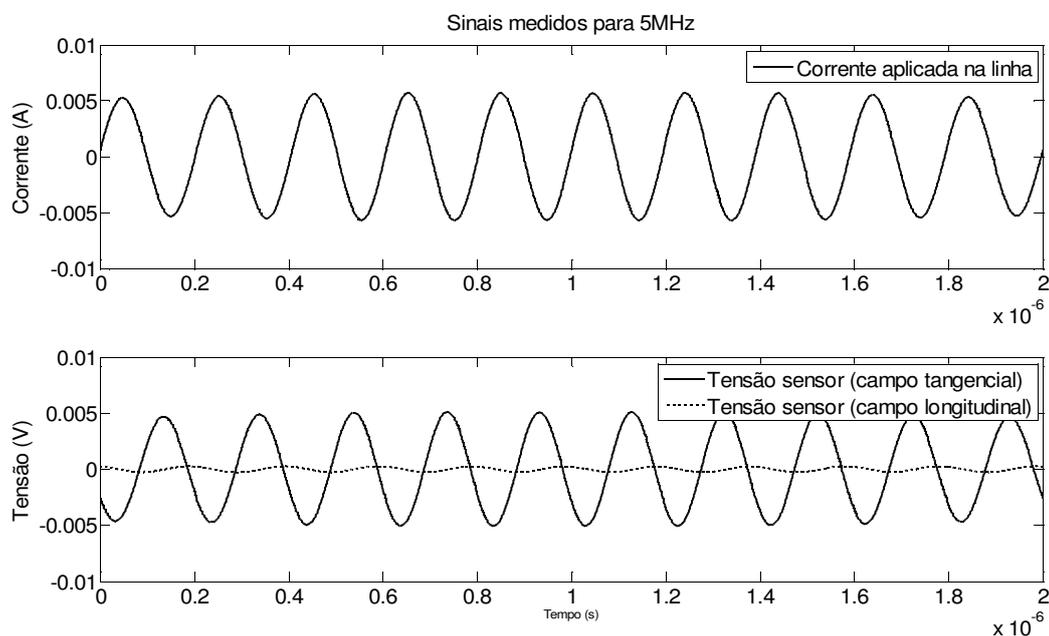


Figura 3.21: Sinais medidos de corrente na linha e tensão nos sensores de campo magnético, 5MHz

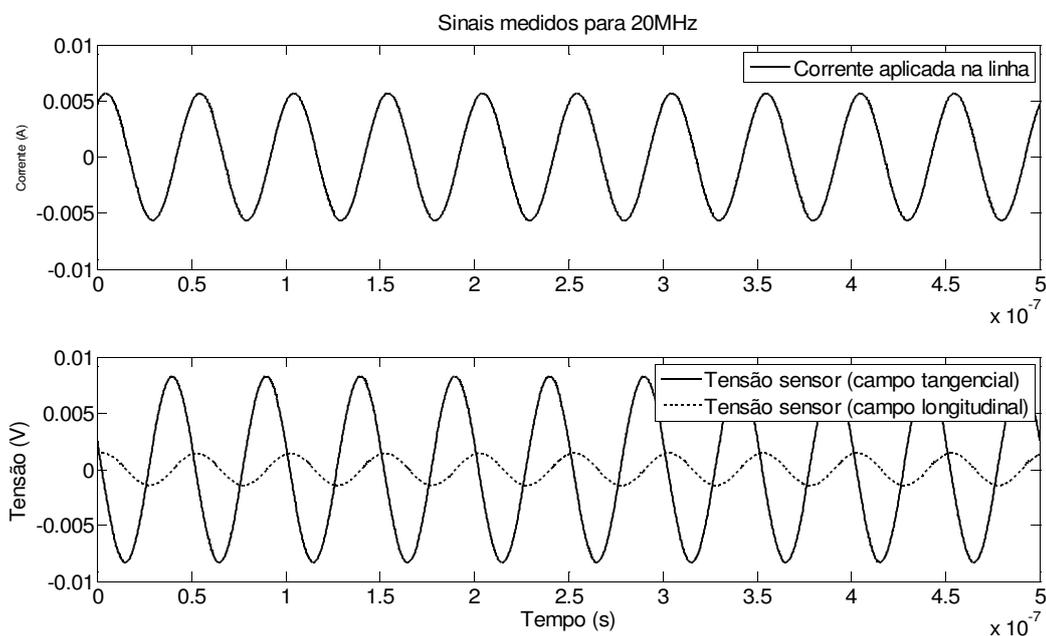


Figura 3.22: Sinais medidos de corrente na linha e tensão nos sensores de campo magnético, 20MHz

A Tabela 3.3 mostra os resultados do estudo da resposta do sensor magnético, todos os valores apresentados correspondem ao valor eficaz.

Tabela 3.3: Resultado das medições para análise da resposta do sensor frente a variação de frequência

Frequência	Corrente (mA)	Tensão sensor campo tangencial (mV)	Tensão sensor campo longitudinal (mV)	Relação Campos Tangencial / Longitudinal
500kHz	3,92	0,38	0,0037	102,98
600kHz	3,92	0,45	0,0069	65,5
900kHz	3,92	0,70	0,0109	64,22
1MHz	3,85	0,74	0,0108	68,52
3MHz	3,92	2,20	0,0655	33,59
5MHz	4,07	3,57	0,1710	20,88
7MHz	4,10	4,41	0,2920	15,1
10MHz	4,31	4,96	0,4550	10,9
12MHz	4,56	5,33	0,6060	8,8
14MHz	4,43	5,46	0,8360	6,53
16MHz	4,08	5,45	0,8830	6,17
18MHz	4,10	5,55	0,8910	6,23
20MHz	3,94	6,00	1,0000	6
24MHz	4,23	6,98	1,1900	5,87
27MHz	4,09	5,13	5,1200	1
30MHz	3,74	6,00	1,0700	5,61

Com os resultados da Tabela 3.3, foram plotados gráficos do sinal medido no sensor de campo tangencial (por ser o de maior amplitude) pela frequência (Figura 3.23). No gráfico, pode ser observado o comportamento do sensor como um filtro RL que atenua a amplitude do sinal (-3dB) a partir das frequências entre 5 e 7MHz, o que é condizente com a frequência de corte, calculada através da equação 17 ( $f = 6,63\text{MHz}$ ), sendo mais uma prova da validade da aproximação do sensor de campo magnético a uma indutância de valor  $1.2\mu\text{H}$ .

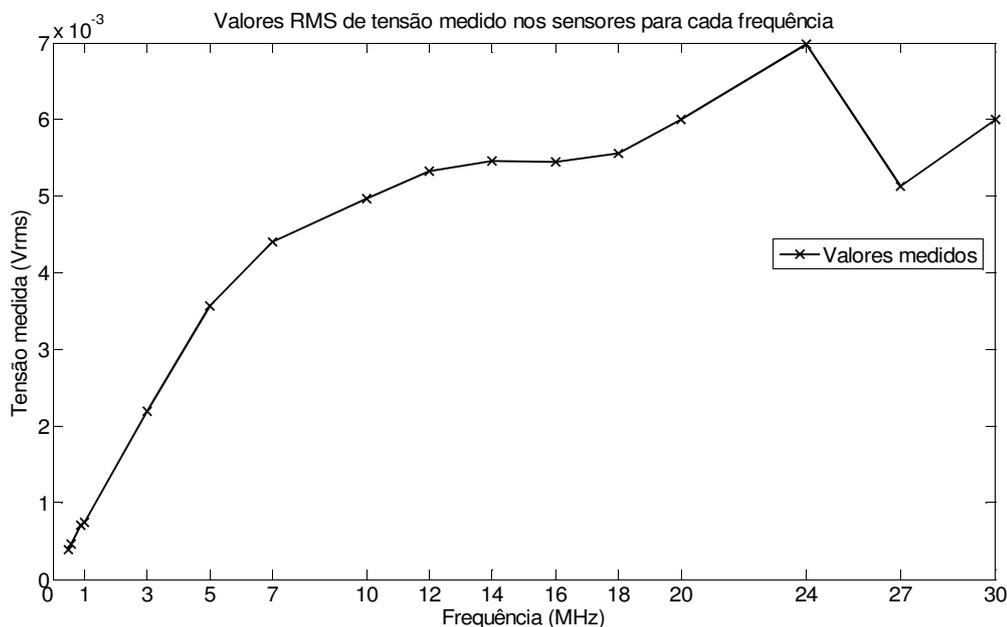


Figura 3.23: Resposta da antena aos sinais aplicados, para as frequências entre 0.5 e 30MHz

Os dados encontrados dizem respeito a características específicas do sensor, não se teve a preocupação quantitativa da medição de campo propriamente dita. Apenas foi utilizado o sinal de tensão medido no sensor para demonstrar o comportamento do sensor na frequência.

Para o processo de calibração do sensor, será calculado o campo magnético esperado no ponto de medição. Este valor será comparado com o medido a fim de encontrar uma relação de calibração entre eles.

Seu funcionamento está baseado no princípio de que uma força eletromotriz é induzida em um circuito fechado (*loop*) pela variação temporal de fluxo magnético que enlaça esse circuito [29]. Esse princípio é a Lei de Faraday, que pode ser descrita como a Equação 18. A Figura 3.24 mostra o funcionamento básico do sensor.

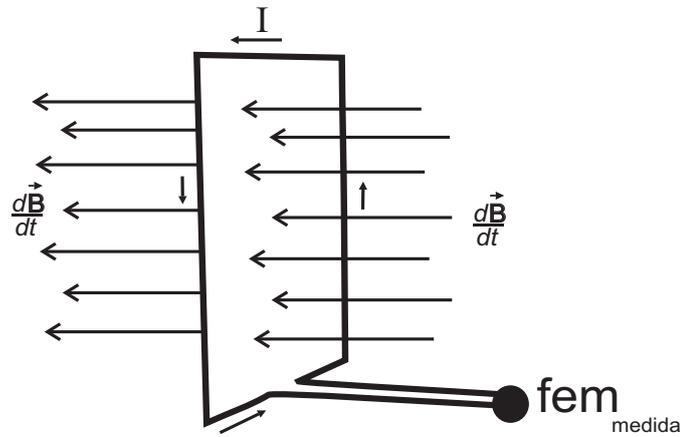


Figura 3.24: Funcionamento do sensor: Lei de Faraday

$$fem = - \frac{d\phi_m}{dt} \quad (18)$$

Já o fluxo magnético é a componente normal da densidade de fluxo magnético ( $B$ ) que passa pela área do circuito [11], ou seja o fluxo magnético é dado por

$$\phi_m = \iint \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (19).$$

O cálculo do campo magnético será feito através do fluxo magnético (Equação 19), devido ao fluxo de corrente por um fio a 27cm de um plano condutor, em uma área igual à do sensor (Figura 3.25). O valor do fluxo será então dividido pela área. O valor encontrado será a densidade de campo magnético média, esperada naquela região. Foi utilizado este método para considerar a variação de campo dentro da área em questão.

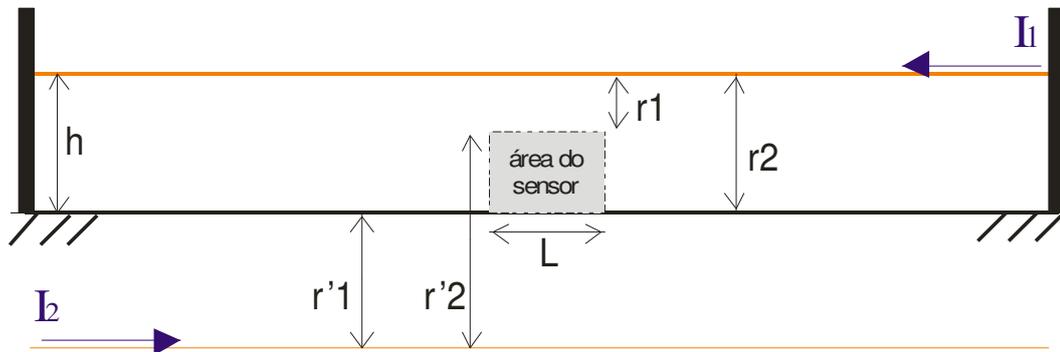


Figura 3.25: Dimensões utilizadas para calibração do sensor de campo magnético

O densidade de campo magnético de um fio é

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (20)$$

onde  $I$  é a corrente em Ampéres,  $\mu_0$  é a permeabilidade do meio, no caso o ar, e  $r$  é a distância entre o ponto onde se quer calcular o campo e o fio em m.

Substituindo (19) em (18)

$$\varphi = \iint \frac{\mu_0 I}{2\pi r} ds \quad , \quad (21)$$

donde resolvendo a integral de área fica

$$\varphi = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \cdot l \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (22),$$

onde  $l$  é o comprimento da área igual a um dos lados do sensor e  $r_1$  e  $r_2$  são as distâncias radiais do fio até os pontos que delimitam a área, ver Figura 3.25.

O cálculo é feito para o condutor e sua imagem já que estamos sobre um plano condutor perfeito.

- para o condutor:
- $r_1 = 0,17$  m

- $r_2 = 0,27 \text{ m}$
- $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N.A}^{-2}$
- $l = 0,1 \text{ m}$
- para a imagem do condutor:
  - $r'_1 = 0,27 \text{ m}$
  - $r'_2 = 0,37 \text{ m}$
  - $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N.A}^{-2}$
  - $l = 0,1 \text{ m}$

Foram encontrados os seguintes valores de fluxo para os dois casos

$$\varphi_1 = 9,2525 \times 10^{-9} I_{aplic} \quad (23)$$

e

$$\varphi_2 = 6,3016 \times 10^{-9} I_{aplic} \quad (24)$$

sendo o índice 1 indicativo do valor para o condutor e o índice 2 indicativo do valor para a imagem do condutor.

Somando-se as Equações (23) e (24) tem-se o valor de fluxo magnético, esperado, para a área do sensor, que fica

$$\varphi_1 = 1,5554 \times 10^{-8} I_{aplic} \quad (25)$$

Dividindo-se a equação (25) pela área do sensor, obtém-se o valor médio de densidade de campo magnético esperado que atravessará o sensor.

$$B = \frac{\varphi}{\text{área}} \quad (26)$$

sendo a área igual a  $0,01 \text{ m}^2$ , tem-se:

$$B_{calc} = 1,5554 \times 10^{-6} I_{aplic} \quad , \quad (27)$$

onde o  $I_{aplic}$  é o valor de corrente injetado na linha de transmissão (fio condutor).

A Equação (27) dá como resultado o campo magnético gerado por um fio quando circula por ele uma certa corrente. Esse valor será comparado com o valor de campo medido pelo sensor. O valor que é medido pelo sensor de campo magnético é a tensão entre os terminais sobre a resistência de  $50\Omega$  do cabo que leva ao osciloscópio. Baseado na teoria eletromagnética, pode-se calcular o valor de campo correspondente a essa tensão medida.

O funcionamento do sensor é baseado na Lei de Faraday [11],[29],

$$fem = - \iint \frac{dB}{dt} ds \quad , \quad (28)$$

A tensão medida no osciloscópio é justamente a “fem”, força eletromotriz, da Equação 28.

Resolvendo a integral, tem-se

$$v_{med} = - \frac{dB}{dt} \cdot S \cdot N \quad , \quad (29)$$

onde S é a área do sensor e N é o numero de voltas do loop, neste caso  $N=2$ .

A Equação 29 resulta no valor medido no osciloscópio,  $v_{med}$ . Todavia, o que se quer encontrar é o valor de campo B. Para isso, é necessário a integração do valor  $v_{med}$  no tempo, que fica

$$B = \frac{1}{N \cdot S} \int v_{med} dt \quad . \quad (30)$$

O valor de  $v_{med}$ , para a calibração é da forma

$$v(t) = v_{med} \cos(\omega t) \quad . \quad (31)$$

Logo, a Equação 30 pode ser reescrita como

$$B = \frac{1}{N.S} \int (v_{med} \cos(\omega t)) dt \quad (32)$$

Resolvendo (32), tem-se

$$B_{med} = \frac{v_{med}}{N.S. \omega} \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (33)$$

Substituindo  $N=2$  e  $S=0.01\text{m}^2$  e sendo  $\omega=2\pi f$  ( $f$ = frequência em Hz) em (33)

$$B_{med} = \frac{50 \cdot v_{med}}{2 \pi f} \text{sen}(\omega t) \quad (34).$$

Com a equação 34 tem-se o valor do campo medido no sensor,  $B_{med}$ , de acordo com o valor de tensão indicado no osciloscópio,  $v_{med}$ . Como os dados obtidos nas medições são valores RMS, necessita-se transformar a Equação 34 de forma que se possa utilizar esses valores RMS.

O valor RMS de uma senóide é igual ao seu valor de pico dividido por  $\sqrt{2}$ . O valor de pico da Equação 34 é

$$B_{pico} = \frac{50 \cdot v_{med}}{2 \pi f} \quad (35)$$

que dividido por  $\sqrt{2}$  fica

$$B_{RMS} = \frac{50}{2 \pi f} \frac{v_{med}}{\sqrt{2}} \quad , \quad (36)$$

$\frac{v_{med}}{\sqrt{2}}$  é o valor RMS,  $v_{rms}$  que substituído na equação (36), dá o valor de campo magnético medido pelo sensor em RMS.

$$B_{RMS} = \frac{50}{2\pi f} v_{RMS} \quad (37)$$

Serão utilizadas as Equações (37) e (27), para obter os valores de campo magnético medido pelo sensor e comparar com o calculado. A Figura 3.26 mostra a relação entre os campos medido e calculado. Os valores de tensão medidos pelos sensores e corrente injetada na linha estão na Tabela 3.3, página 39.

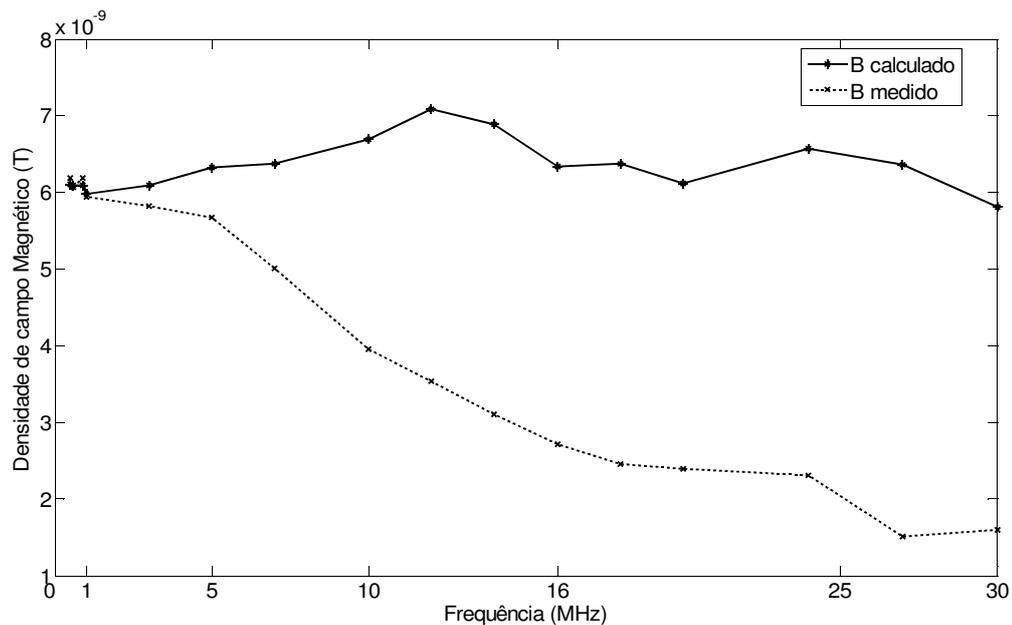


Figura 3.26: Campos medido e calculado, via equações 27 e 37 e dados da tabela 3.3.

A diferença entre os valores de campo medido, mostrado na Figura 3.26, pode ser explicada pela curva de resposta do sensor na frequência. Será demonstrado, a seguir, que o gráfico do campo medido segue a curva de resposta, na frequência, do sensor.

Como já foi verificado, o sensor pode ser representado por uma indutância e o circuito correspondente, como na Figura 3.13, por um circuito RL. O circuito pode ser

considerado um divisor de tensão. Sendo assim, a tensão sobre o resistor no ponto onde são feitas as medições, é

$$V_{res} = \frac{R}{R + L(j\omega)} V_i \quad (38),$$

onde  $V_{res}$  é a tensão sobre o resistor ou tensão de saída,  $R$  é o valor da resistência,  $L$ , o valor da indutância e  $V_i$  a tensão inicial do circuito ou tensão de entrada. No caso específico do sensor,  $V_i$  é a tensão que o fluxo de campo magnético induz nele (a medição do osciloscópio).

Inicialmente, a Equação 38 será utilizada para encontrar os valores de tensão, em um circuito RL, que aqui será chamado RL padrão, sobre um resistor de  $50\Omega$ , sendo a indutância no circuito de  $1.2\mu\text{H}$  e a tensão de entrada  $V_i$  normalizada em 1V, para todas as frequências. A resposta do circuito à variação de frequência é a relação entre o sinal de entrada e o de saída e pode ser representada por

$$Res_{dB} = 20\log\left(\frac{V_{res}}{V_i}\right) \quad (39),$$

que é a curva de atenuação do circuito, em dB. A Figura 3.27 mostra esta curva para o circuito RL padrão.

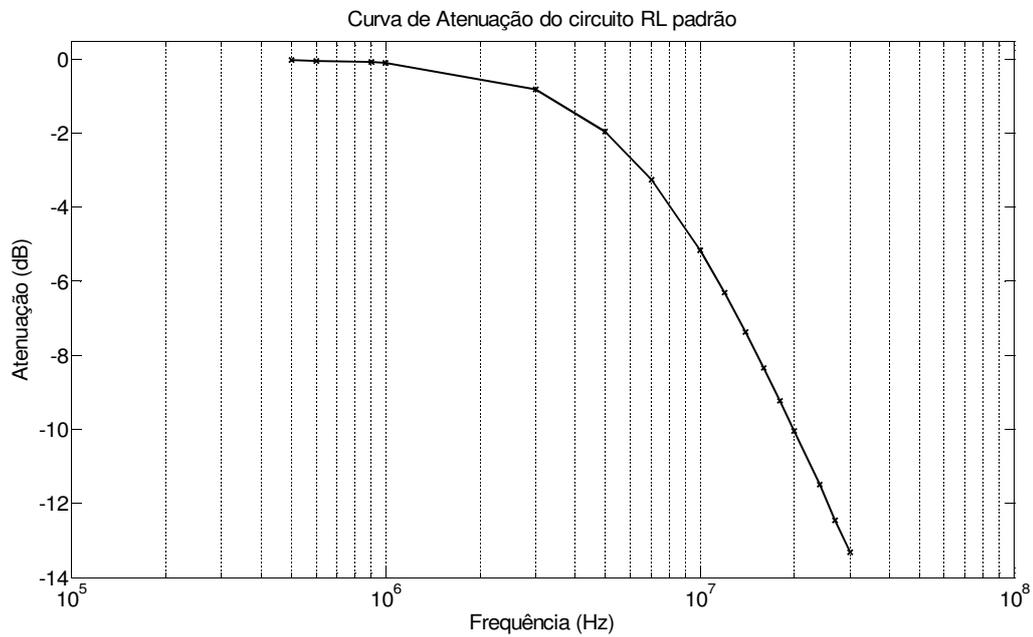


Figura 3.27: Curva de atenuação do circuito RL padrão. (Equação 39)

O sensor de campo magnético tem como seu circuito correspondente um circuito RL. Sua curva de atenuação também foi plotada e comparada com a do circuito RL padrão (Figura 3.28). Para o sensor a curva de atenuação foi calculada através dos campos medidos e calculados (Equação 40).

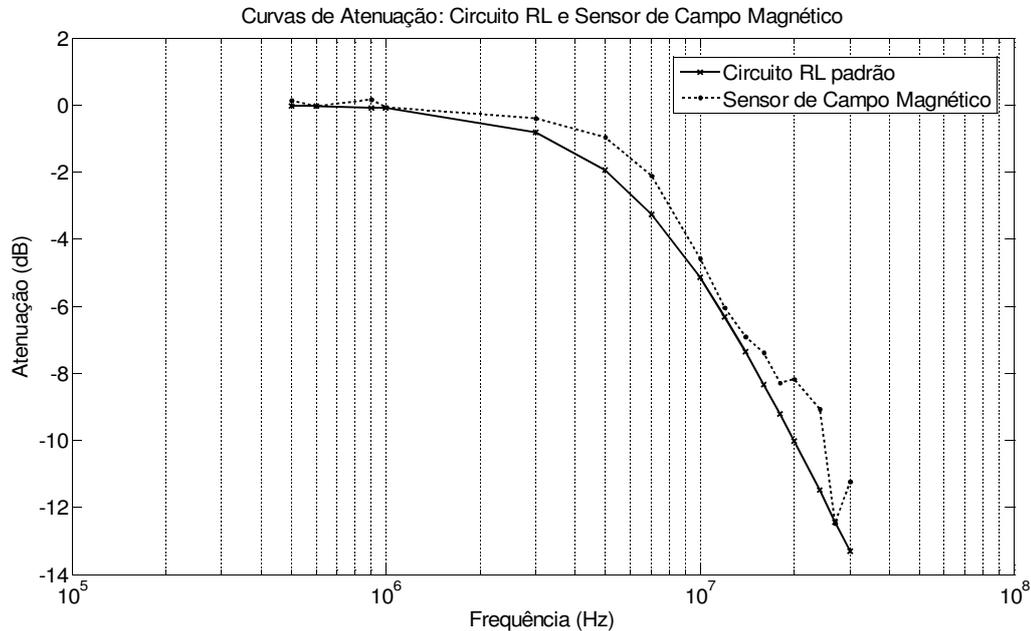


Figura 3.28: Comparação entre as curvas de atenuação para o sensor de campo magnético e o circuito RL padrão.

$$R_{sensor\ dB} = 20 \log \left( \frac{B_{med}}{B_{calc}} \right) \quad (40).$$

A comparação das duas curvas mostra a correspondência entre a resposta do circuito com o indutor e com o sensor utilizado. Esta correspondência valida todo o processo de medição do campo magnético, pois como visto na Figura 3.28, o comportamento dos campos medidos está de acordo com o comportamento de um circuito RL. A queda no sinal medido é o comportamento esperado para um circuito RL. Sendo assim, pode-se corrigir o valor medido pelo sensor de campo magnético aplicando-se o inverso da curva de atenuação nos sinais medidos. As curvas das Figuras 3.29 e 3.30 exemplificam isto.

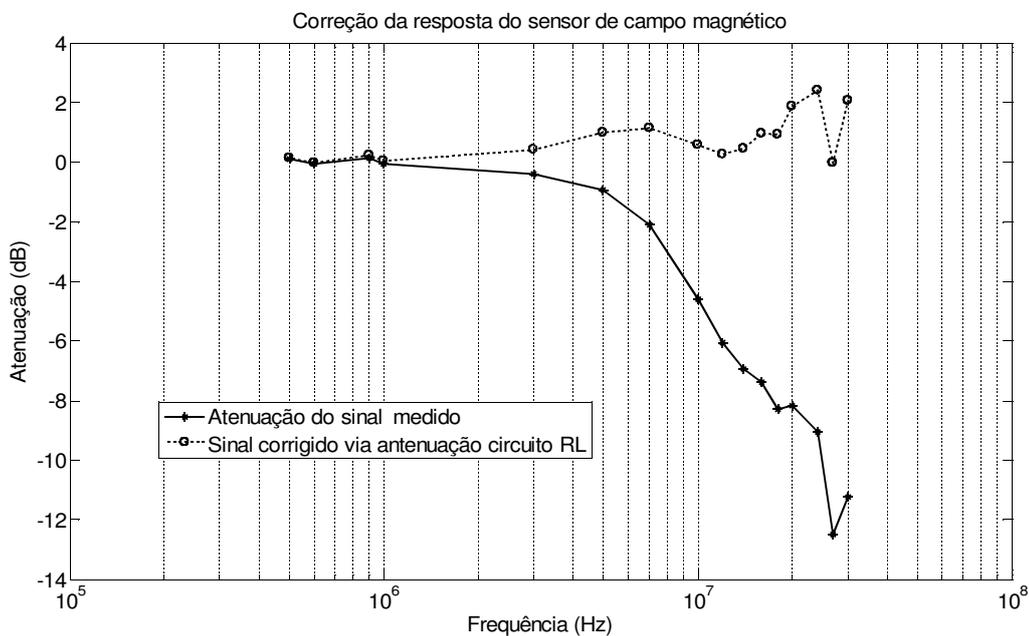


Figura 3.29: Correção da resposta do sensor de campo magnético utilizando os valores da curva de atenuação do circuito RL.

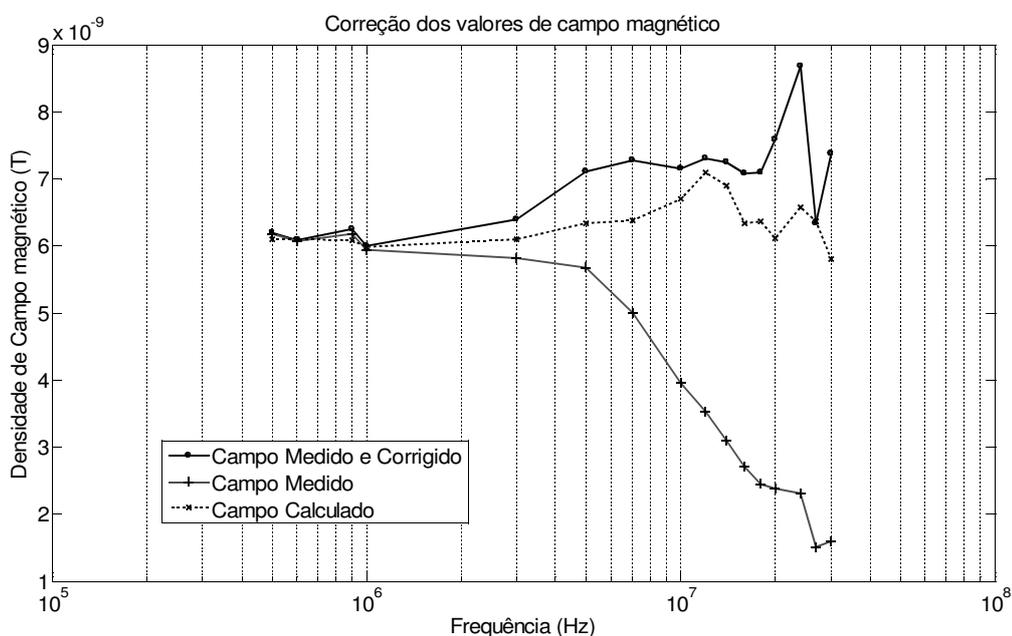


Figura 3.30: Correção dos valores de campo magnético medido através da curva de atenuação do circuito RL

Pode-se perceber na Figura 3.29 que, ao aplicar o ganho correspondente à curva de atenuação do circuito RL nos sinais do sensor, não ocorre o decréscimo

dos valores medidos, deixando a resposta do sensor mais plana. Já a Figura 3.30 mostra a relação entre os campos medidos e calculados. Pode-se observar uma boa relação entre o campo calculado e o medido corrigido.

**Observação:**

- O método utilizado para o cálculo do campo medido contempla sinais periódicos no tempo. Para sinais sem esta característica o cálculo para o campo medido é feito através da integração no tempo do sinal medido pelo sensor, como feito na Equação 32, ou

$$B_{med} = \frac{1}{N.S} \int f(t) dt \quad (41),$$

onde  $f(t)$  é o sinal medido pelo sensor,  $N$  o número de voltas do loop e  $S$  a área.

### 3.3 – Comentários finais

Pode-se concluir que os sensores de campos desenvolvidos estão preparados para as medições dos campos gerados abaixo de uma linha de transmissão e ao redor de um canal de descarga atmosférica simulados em modelo reduzido.

A utilização de blindagem ao campo elétrico no sensor de campo magnético colaborou para diminuir interferências e os sensores duplos facilitaram as medições realizadas.

No método proposto no trabalho de calibração do sensor, o ponto importante é a utilização do apenas do circuito RL como correspondente ao sensor, o que possibilitou a validação das medições realizadas, as quais seguem o comportamento da curva de atenuação do circuito RL. O indutor mostrou-se uma boa aproximação para o sensor.

Os resultados obtidos no processo de calibração indicam que é possível, a partir da curva de atenuação, reconstruir os valores de campo medido.

Através do processo de calibração, tanto do sensor para campo magnético

como do sensor para campo elétrico, demonstrou-se que as medições realizadas por eles está de acordo com o campo calculado.

# Capítulo 4

## Resultados: Campos Elétrico e Magnético.

### 4.1 – Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados das medições realizadas com os sensores construídos e calibrados. Inicialmente, foram realizadas medições dos campos gerados por uma linha de transmissão, canal horizontal, com o objetivo de avaliar o comportamento dos campos gerados pelos dois tipos de linha de transmissão modeladas (fio condutor e fio espiralado). O campo elétrico é medido na direção vertical e o campo magnético nas direções tangencial e paralela ao canal.

Feito isso, parte-se para as medições do campos gerados pelo canal de descarga, que neste trabalho é modelado utilizando-se um fio condutor de cobre e um fio espiralado. Os campos elétrico e magnético para estes modelos de canais serão caracterizados, dando-se maior ênfase ao canal espiral já que é o mais utilizado em trabalhos com modelos reduzidos.

### 4.2 – Campos das Linhas de Transmissão (Horizontal)

Medições de campos das linhas de transmissão horizontal foi realizada pois com o modelo de linha de transmissão foram efetuadas as calibrações dos sensores. A validação das medições feitas pelos sensores fica facilitada nesta configuração por se ter equações analíticas fechadas para o cálculo comparativo. Como são utilizados dois tipos de canais de descarga (fio de cobre e fio espiralado), utilizou-se, também, os dois como linha de transmissão.

#### 4.2.1 – Medições realizadas

#### 4.2.1.1 – Fio de cobre como linha de transmissão

Neste item, serão mostrados os resultados dos campos elétrico e magnético medidos abaixo da linha de transmissão. O modelo utilizado apresentava as seguintes dimensões:

- Plano condutor de alumínio com 2mm de espessura e dimensões de 3m x 2m;
- Altura da linha ao plano de 14cm;
- Linha modelada com fio de cobre AWG21, esmaltado com 0,723mm de diâmetro;

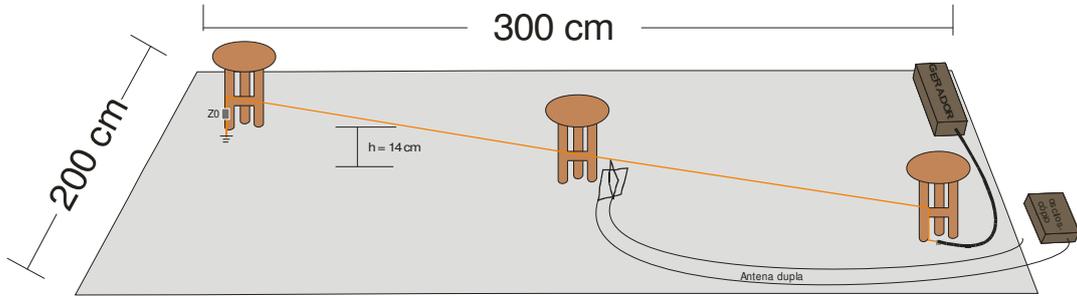
O sistema de medição apresentava as seguintes características:

- A impedância para casamento da linha foi de  $407\Omega$ ;
- Ponta de prova de corrente utilizada P6022;
- Cabos coaxiais de 3m para conectar o sensor de campo magnético ao osciloscópio;
- Ponta de prova de tensão P6205 FET, para medição de tensão no sensor de campo elétrico;
- Gerador de pulso PG502;
- $k$  do sensor de campo elétrico: 39,91.

A Figura 4.1 mostra um diagrama com a configuração física do modelo implementado no laboratório de Engenharia de Alta Tensão e Aplicações. A Figura 4.2 demonstra a montagem realizada para essas medições iniciais.

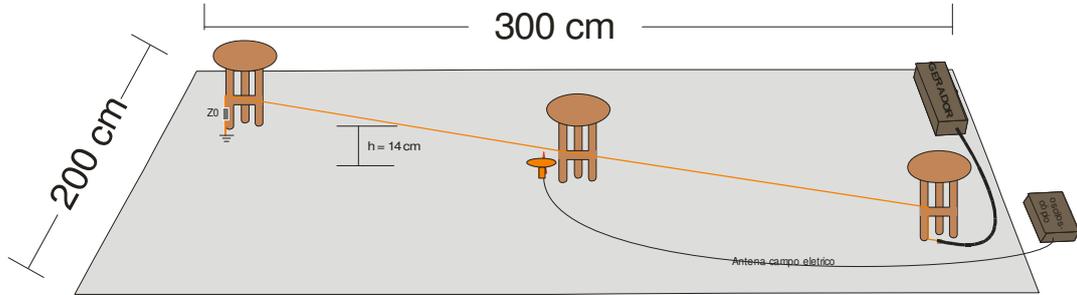
Esquema das Medições

**Esquema 01 - (antena dupla campo magnético)**



Medições no meio da linha (antena 0 e 90 graus),

**Esquema 02 - (antena campo elétrico vertical)**



Medições no meio da linha

Figura 4.1: Esquema para a montagem do modelo reduzido em laboratório.

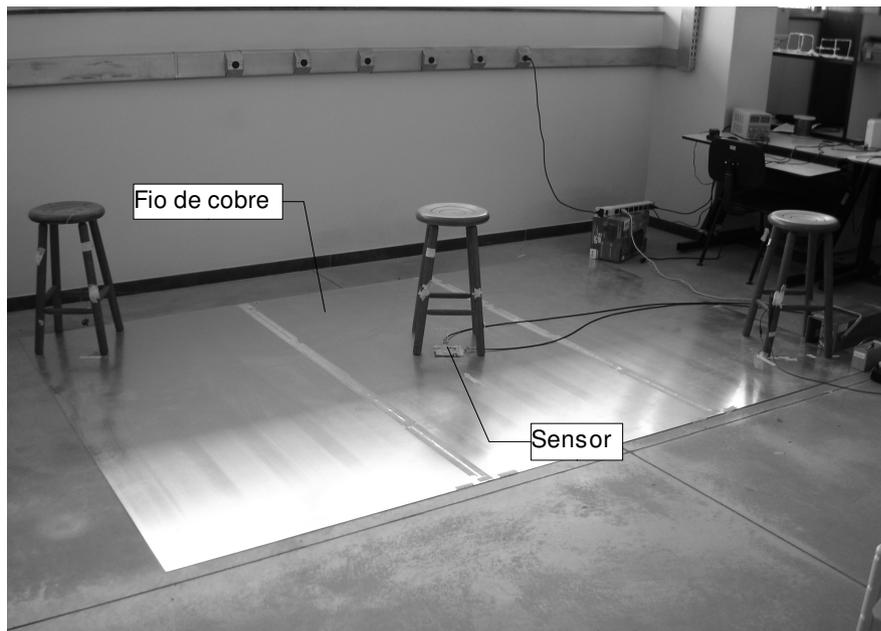


Figura 4.2: Foto da montagem implementada com o fio de cobre.

### a) Medições de Campo Elétrico

Para esse grupo de medições, foram aplicados à linha de transmissão sinais de frequências de 1MHz a 30MHz e um degrau de tensão. As medições foram realizadas no início e no meio da linha, abaixo dela, e comparadas com os valores calculados através das equações 9 e 12 na página 25.

A Figura 4.3 mostra o degrau de tensão que foi aplicado à linha de transmissão.

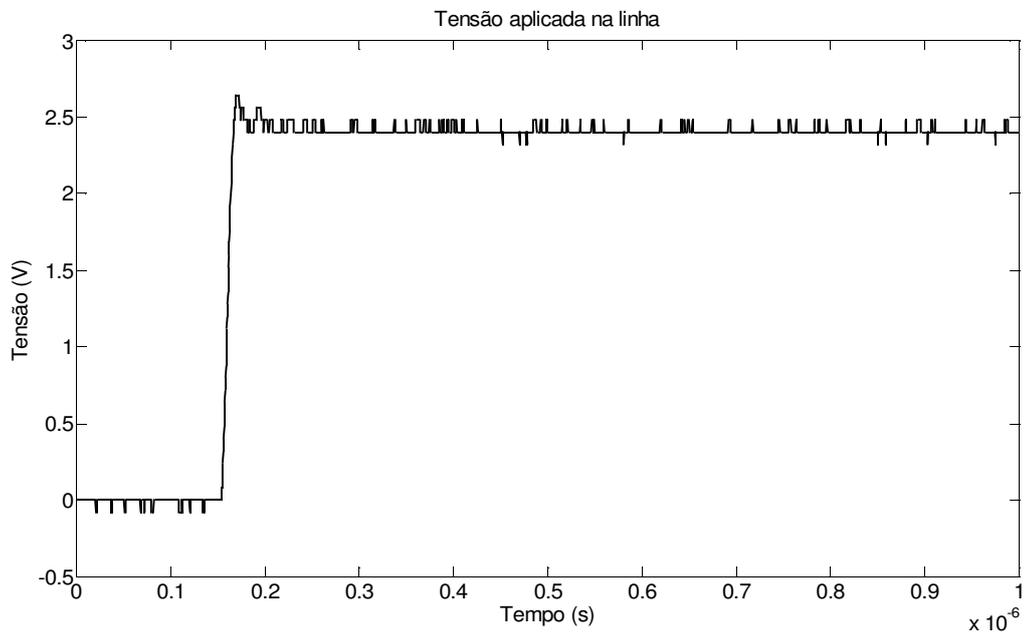


Figura 4.3: Degrau de tensão aplicada à linha

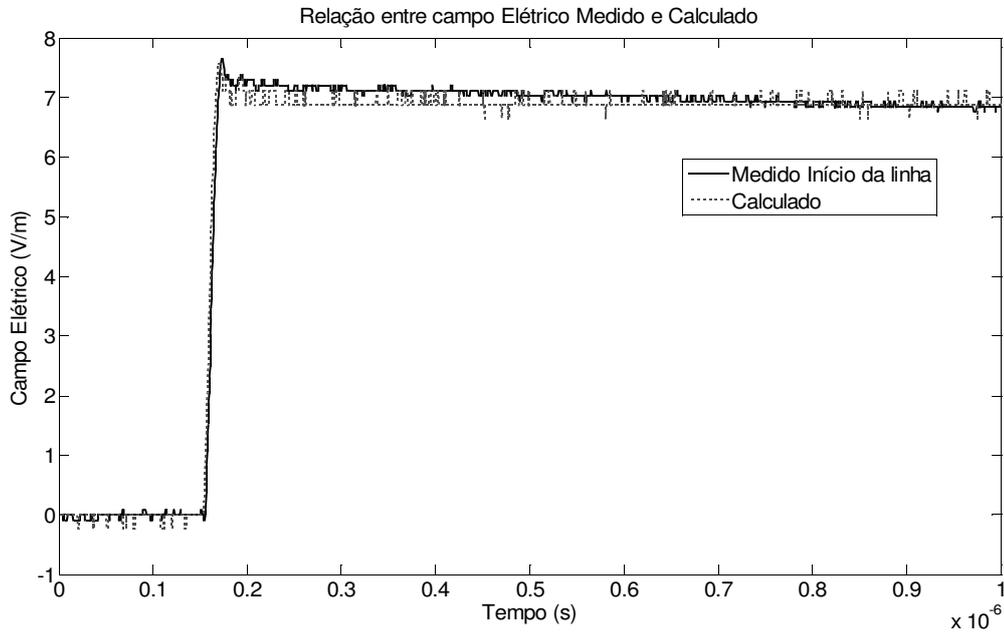


Figura 4.4: Campo Elétrico medido no sensor, com  $k=39,91$  e campo calculado através da equação 10. Sensor posicionado no início da linha.

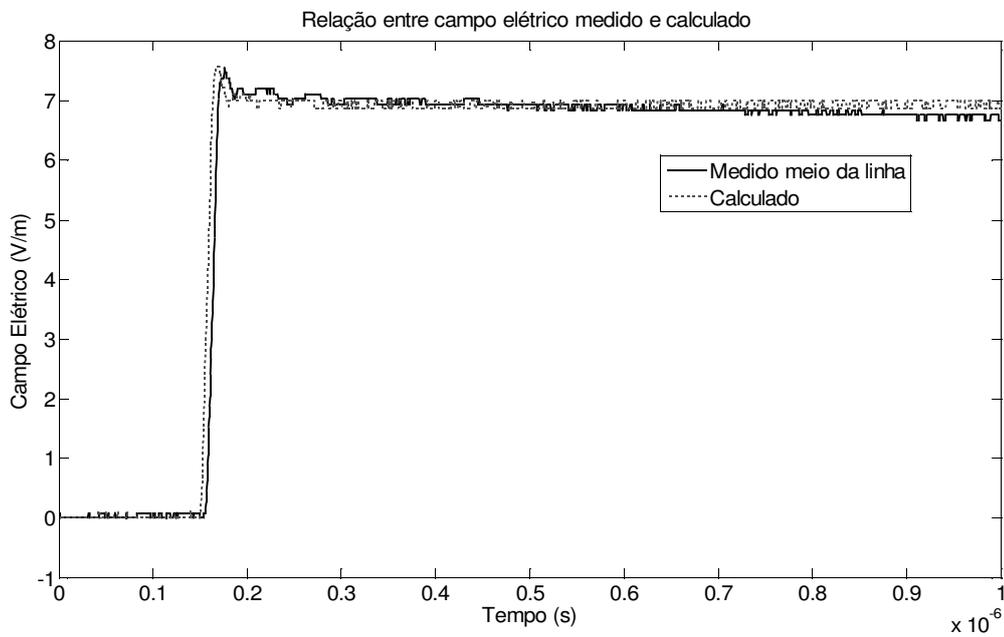


Figura 4.5: Campo Elétrico medido no sensor, com  $k=39,91$  e campo calculado através da equação 10. Sensor posicionado no meio da linha.

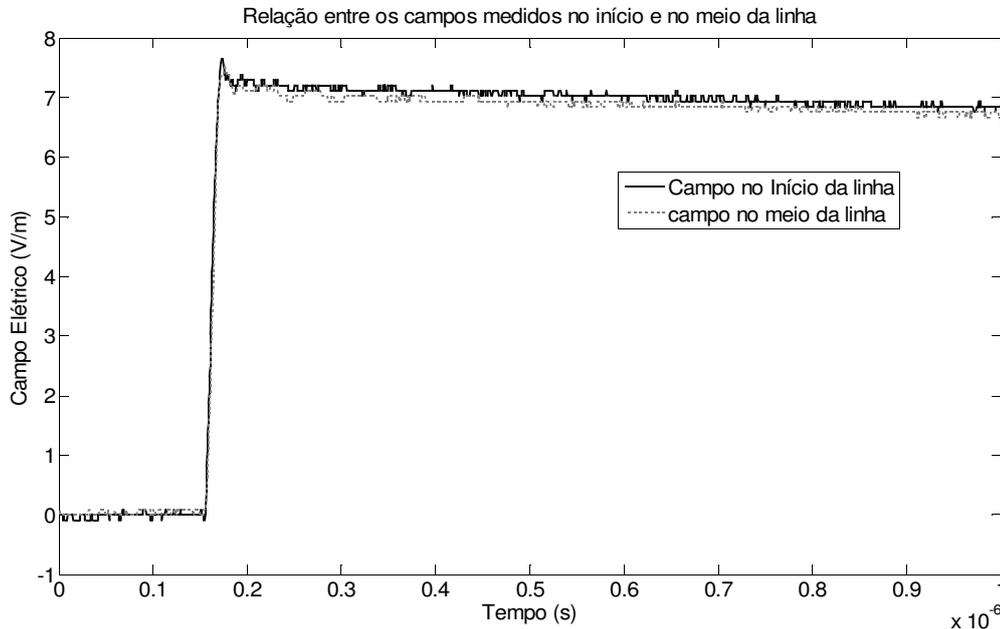


Figura 4.6: Campos medidos no início e no meio da linha de transmissão.

Pode-se perceber nas Figuras 4.4 e 4.5 a proximidade entre os valores de campo calculado e medido, a resposta do sensor mantém o mesmo tempo de subida da onda aplicada na linha. A diferença entre os sinais medidos no início e no meio da linha é mínima, como pode ser observado na Figura 4.6. O cálculo do campo é feito baseado no sensor no meio da linha portanto é razoável ocorrer diferenças entre medido e calculado no início da linha devido a essa aproximação.

Nas Figuras 4.7 e 4.8 tem-se um sinal senoidal de tensão aplicado (3MHz) na linha de transmissão e a comparação entre o valor medido no sensor e o calculado.

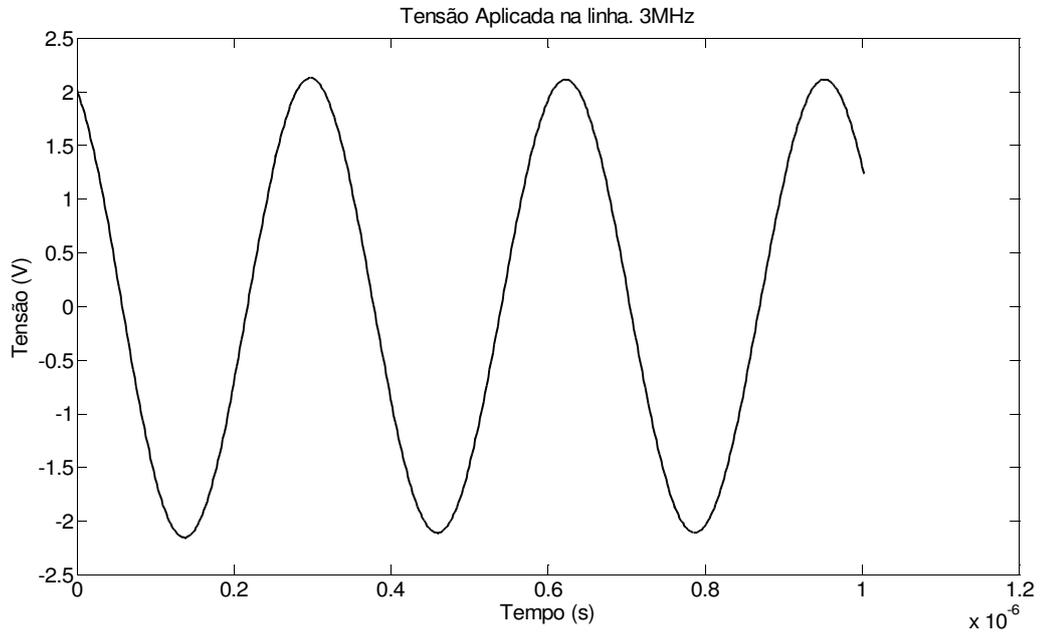


Figura 4.7: Tensão aplicada no linha de transmissão. Exemplo do comportamento do campo com ondas periódicas no tempo

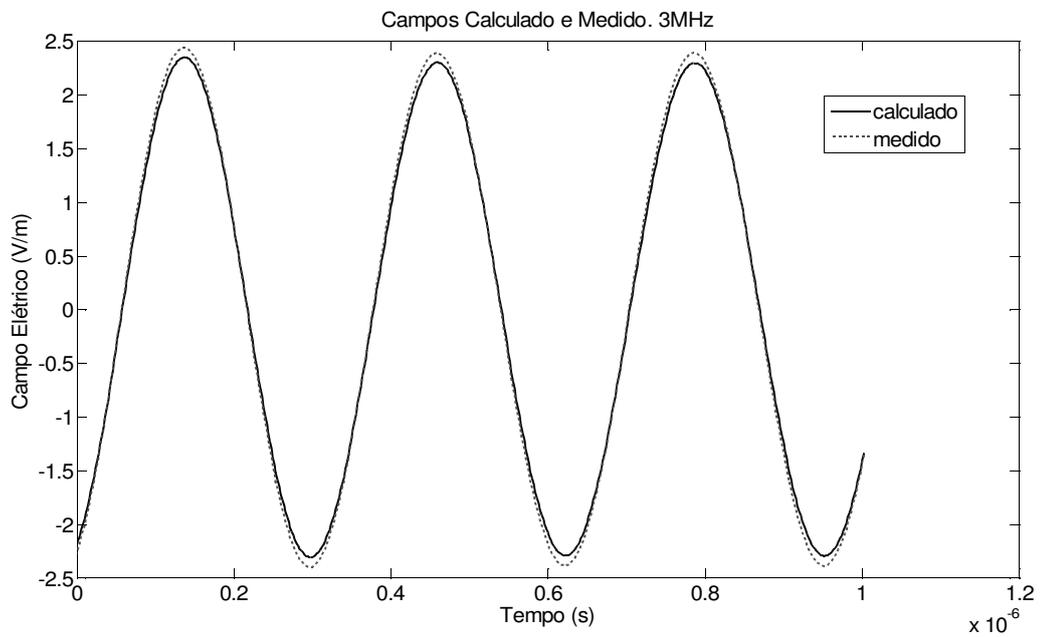


Figura 4.8: Campo Elétrico calculado e medido para a onda de tensão da Figura 4.7

O comportamento dos campos para outras frequências com o sensor no meio

da linha e o erro relativo entre o cálculo e a medição estão sintetizados na Tabela 4.1. Todos os valores estão em RMS.

*Tabela 4.1: Comportamento do Campo Elétrico para diferentes frequências*

Frequência (MHz)	Tensão Aplicada na linha (V)	Campo Elétrico Calculado (V/m)	Campo Elétrico Medido (V/m)	Erro relativo (%)
1	1,5632	1,6998	1,7733	4,14
3	1,5083	1,6401	1,7033	3,71
5	1,5380	1,6724	1,7740	5,73
7	1,5439	1,6789	1,7072	1,66
10	1,5553	1,6912	1,6071	5,23
12	1,5682	1,7052	1,6621	2,6
14	1,5455	1,6806	1,7683	4,96
16	1,5568	1,6928	1,6367	3,43
18	1,3597	1,4785	1,5517	4,72
20	1,3999	1,5222	1,5391	1,09
25	1,2520	1,3614	1,3460	1,15
30	1,0899	1,1851	1,0425	13,68
Média do Erro Relativo				3,26

### **b) Medições de Campo Magnético**

Para esse grupo de medições foram aplicados à linha de transmissão, sinais de frequências de 500kHz a 30MHz e foi medida a corrente que fluiu pela linha para utilizar nos cálculos de campo. As medições de campo foram realizadas no início e no meio da linha e comparadas com o valor calculado. Foi utilizado o sensor de campo magnético para medir as componentes de campos horizontais perpendicular e paralelo à linha, simultaneamente.

Na Figura 4.9 pode-se observar o sinal de corrente e tensão aplicados na linha.

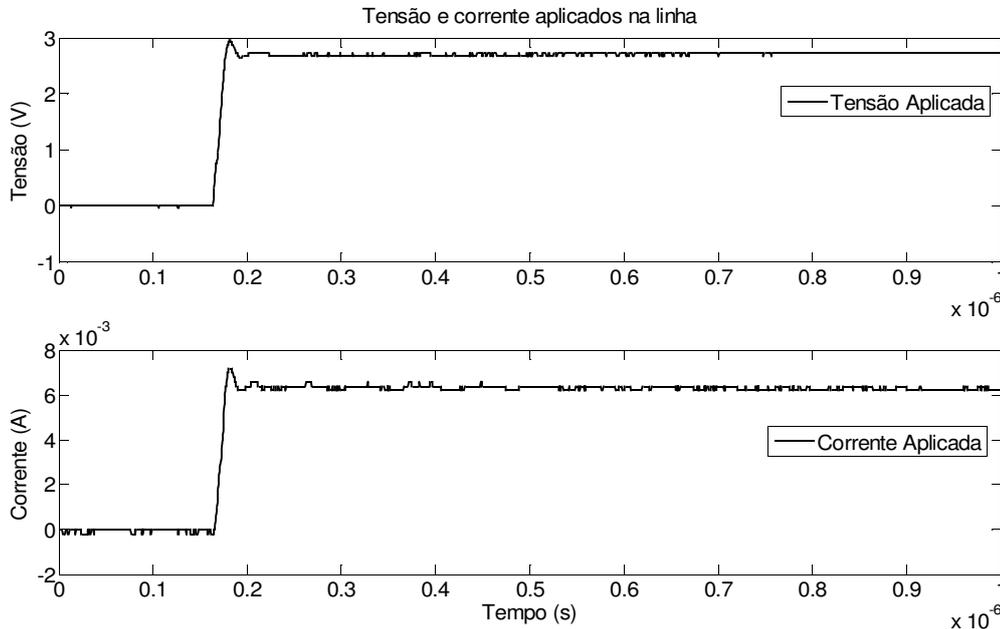


Figura 4.9: Ondas de tensão e corrente aplicadas, demonstração do casamento de impedância do canal.

O comportamento do campo magnético será analisado aplicando-se ondas periódicas no tempo na linha de transmissão e medindo através do sensor construído os campos magnéticos em duas direções, de acordo com a Figura 4.10, campo tangencial e campo longitudinal. A componente de campo azimutal foi aqui chamada de tangencial pois a avaliação do campo, tanto medição como cálculos, não leva em conta a variação do ângulo. Sendo assim, denominamos componente tangencial a componente que está tangenciando a linha de campo magnético no ponto em estudo.

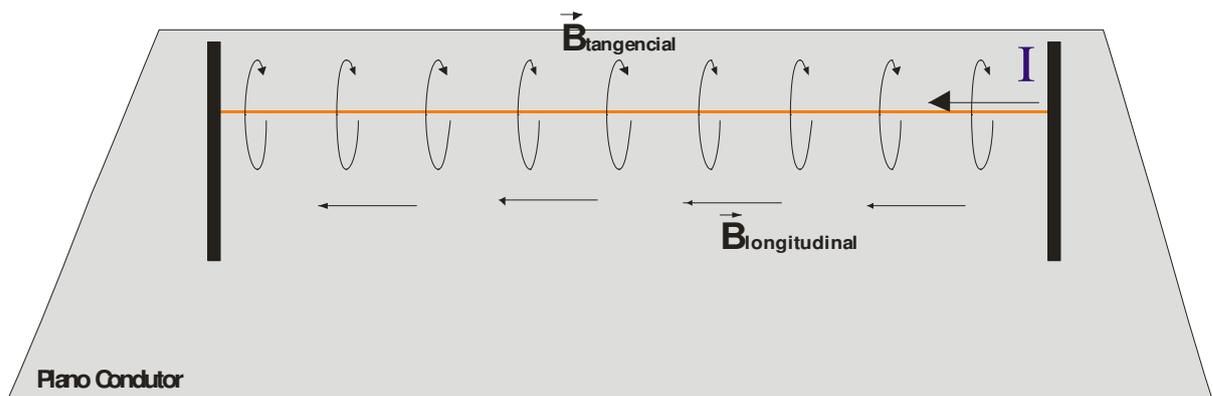


Figura 4.10: Direção dos campos medidos. Campo Tangencial e Campo Longitudinal

Nas Figuras 4.11 a 4.15 estão os gráficos dos campos medidos e do cálculo para o campo tangencial. As Equações 27 e 34 foram utilizadas para se determinar os valores de campo medido e calculado.

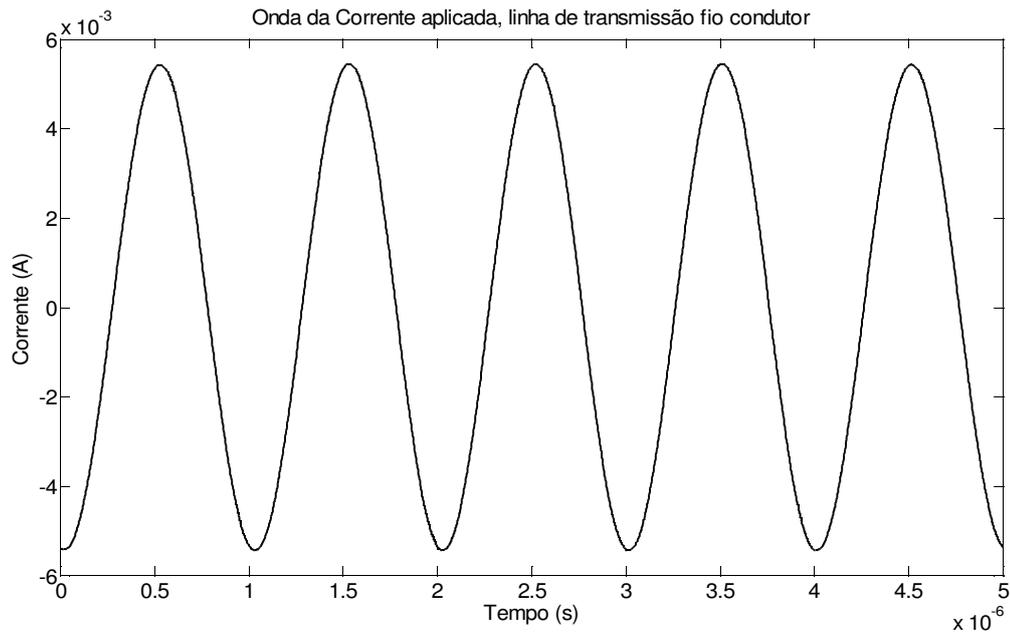


Figura 4.11: Corrente aplicada na linha.  $f=1\text{MHz}$

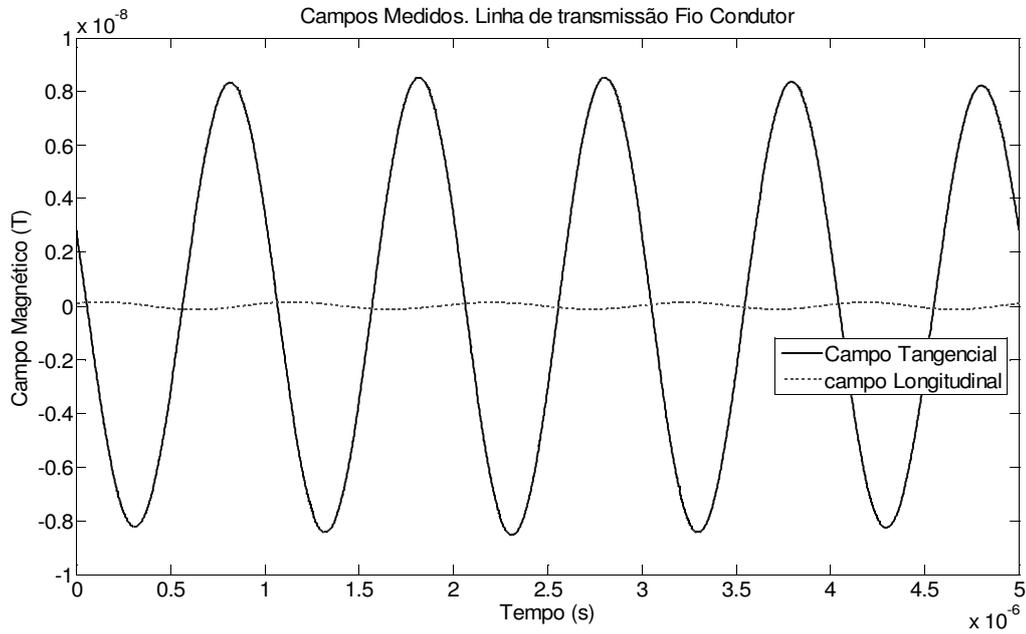


Figura 4.12: Campos Magnéticos medidos na duas direções, longitudinal e tangencial.  $f= 1\text{MHz}$

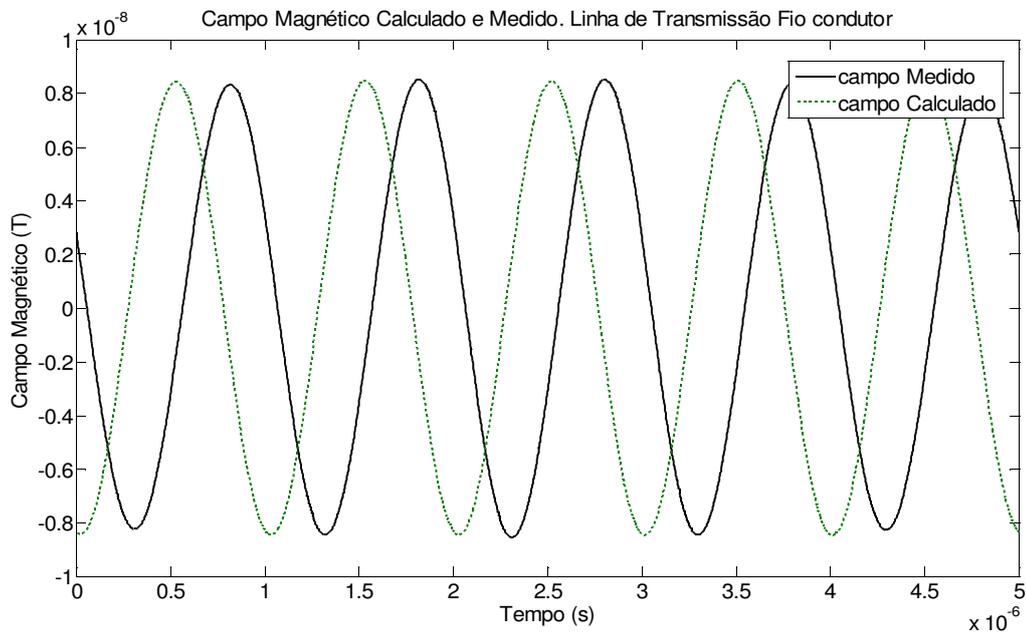


Figura 4.13: Comparação entre campo calculado e medido na direção tangencial.  $f= 1\text{MHz}$

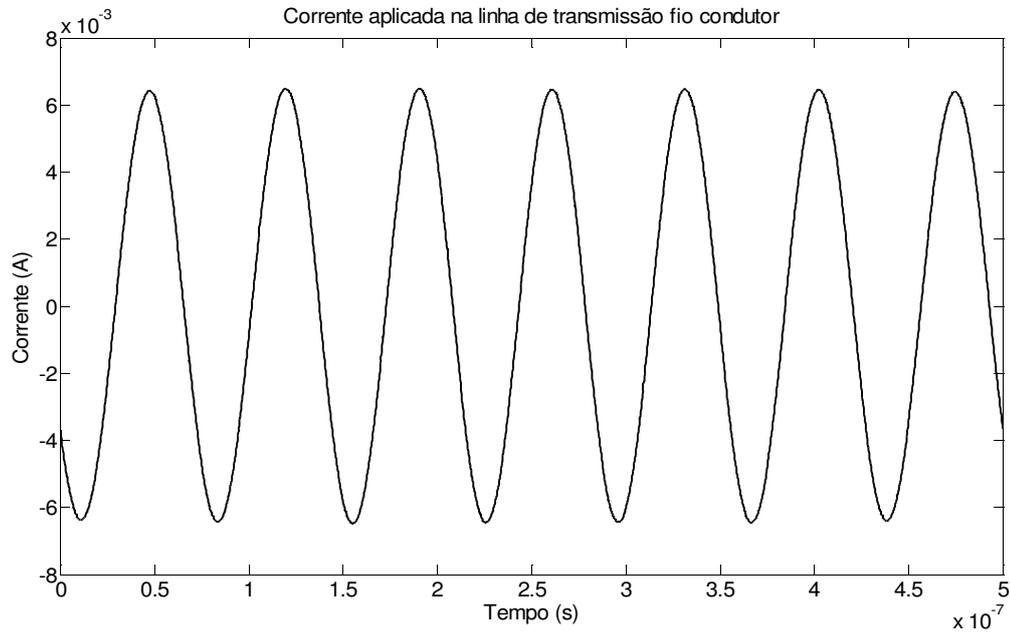


Figura 4.14: Corrente aplicada na linha.  $f=14\text{MHz}$

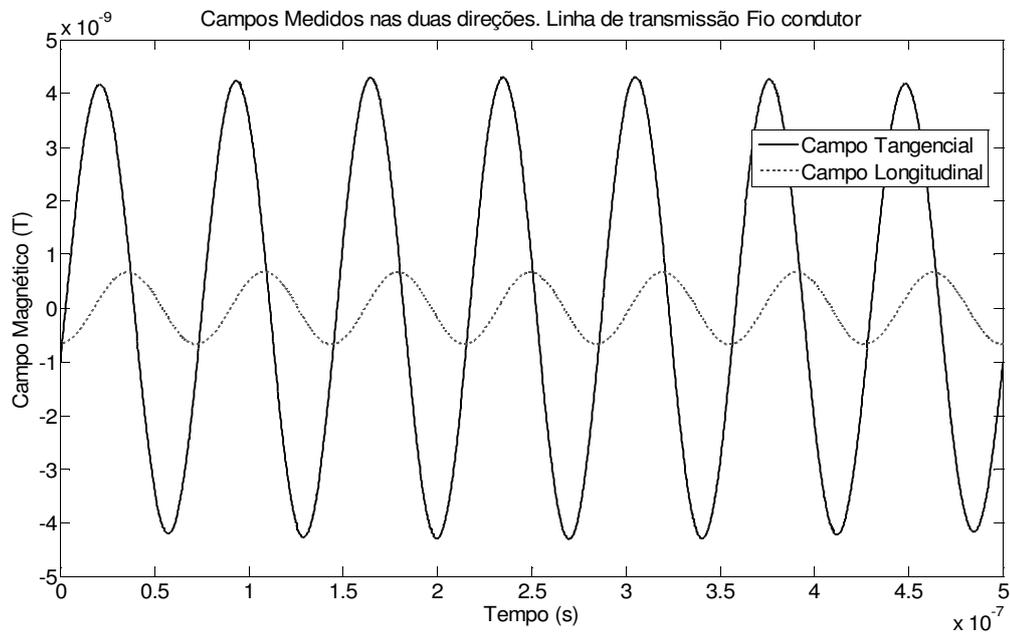


Figura 4.15: Campos Medidos na duas direções, longitudinal e tangencial  $f=14\text{MHz}$

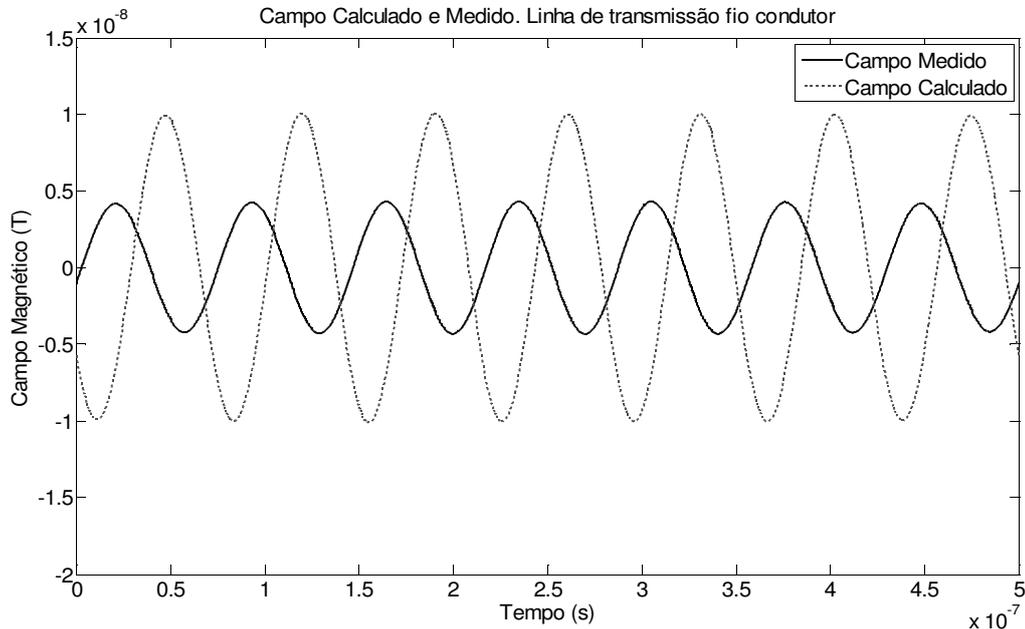


Figura 4.16: Comparação entre campo calculado e medido na direção tangencial.  $f=14\text{MHz}$

A atenuação do sinal, na Figura 4.16, de campo medido em relação ao campo calculado era esperada e está de acordo com a curva de atenuação da Figura 3.28.

A Tabela 4.2 resume os resultados para as outras frequências utilizadas. Pode-se perceber que ocorre nos campos medidos a atenuação do sinal, que era esperado, de acordo com o que foi analisado na curva da Figura 3.28 (página 49) da resposta do sensor. Além disso percebe-se que o campo medido longitudinal pode ser considerado desprezível comparado com o campo tangencial, chegando a 100 vezes menor, o que está de acordo com a teoria eletromagnética que prevê apenas campo tangencial ao redor de um fio conduzindo corrente elétrica.

Tabela 4.2: Resultados obtidos para as diferentes frequências. Valores sem a correção de atenuação e em RMS. Linha de transmissão fio condutor.

Frequência (MHz)	Corrente Aplicada (mA)	Campo Magnético Calculado Tangencial (nT)	Campo Magnético Tangencial Medido (nT)	Campo Magnético Longitudinal Medido (nT)	Relação Campo tangencial calculado / medido	Relação Campos medidos tangencial / longitudinal
0,5	3,9	6,10	6,18	0,059	0,99	105,1
0,6	3,9	6,09	6,07	0,091	1	66,63
0,9	3,9	6,09	6,19	0,096	0,98	64,41
1	3,8	5,98	5,94	0,086	1,01	69,23
3	3,9	6,09	5,82	0,174	1,05	33,45
5	4,1	6,33	5,67	0,273	1,12	20,77
7	4,1	6,38	5,01	0,332	1,27	15,09
10	4,3	6,69	3,95	0,362	1,69	10,91
12	4,6	7,09	3,53	0,402	2,01	8,78
14	4,6	6,89	3,11	0,475	2,22	6,55
16	4,1	6,33	2,71	0,439	2,34	6,17
18	4,1	6,37	2,45	0,394	2,6	6,22
20	3,9	6,12	2,39	0,398	2,56	6,01
24	4,2	6,57	2,31	0,395	2,84	5,85
30	3,7	5,81	1,59	0,284	3,65	5,6

#### 4.2.1.2 - Fio espiral como linha de transmissão

Neste item, serão mostrados os resultados dos campos elétrico e magnético medidos abaixo da linha de transmissão representada como um canal espiral na horizontal. O modelo utilizado tinha as seguintes dimensões:

- Plano condutor de alumínio com 2mm de espessura e dimensões de 3m x 2m;
- Altura da linha ao plano de 14cm;
- Linha modelada com fio espiralado

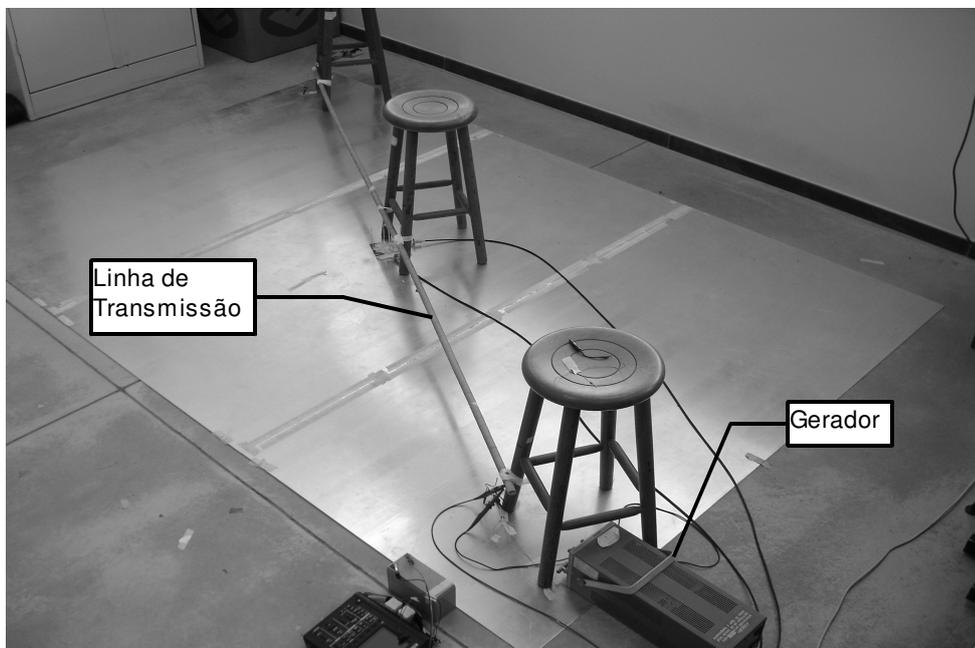
Já o sistema de medição possuía as seguintes características:

- A impedância para casamento da linha foi de 2.7kΩ;
- Ponta de prova de corrente utilizada P6022;
- Cabos coaxiais de 3m para conectar o sensor de campo magnético ao osciloscópio;
- Ponta de prova de tensão P6205 FET, para medição de tensão no sensor de

campo elétrico;

- Gerador de pulso PG502.

A Figura 4.17 mostra a configuração física do modelo implementado no laboratório. Foi necessário diminuir a altura da linha de transmissão ao solo porque no canal espiral a corrente que flui por ele é mais baixa devido a sua impedância maior ( $2.7k\Omega$ ). Por esse motivo os sinais envolvidos para medição também tiveram sua amplitude diminuída tornando difícil a medição com a altura de linha de 27cm utilizada na calibração dos sensores.



*Figura 4.17: Montagem física com o canal Espiral*

#### **a) Medições de Campo Elétrico**

Neste item, repetiu-se as medições realizadas em 4.2.1.1, substituindo-se o fio de cobre pelo canal fio espiralado. Frequências variando entre 500kHz e 30MHz e degrau de tensão.

Na Figura 4.18 tem-se o gráfico da tensão aplicada na linha. As Figuras 4.19 e 4.20 mostram uma comparação entre o sinal de campo medido no meio início da linha e no meio da linha, respectivamente. Tem-se ainda nessas figuras o sinal de campo elétrico calculado. Percebe-se uma correspondência em amplitude, entre os valores medidos e calculados.

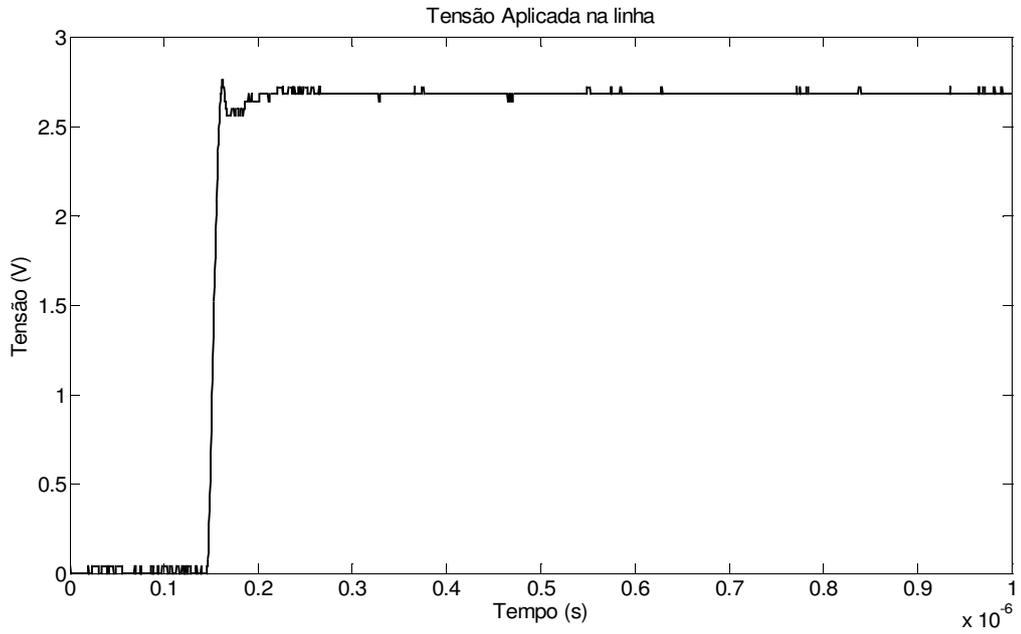


Figura 4.18: Degrau de tensão aplicada na linha canal espiral.

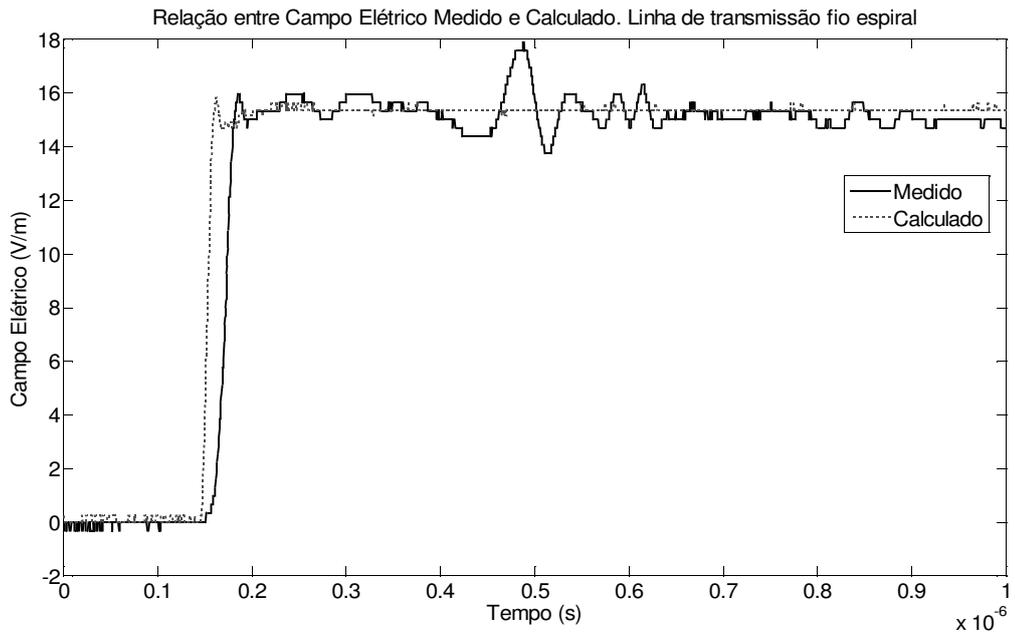


Figura 4.19: Campo Elétrico medido e calculado. Medição realizada no início da linha.

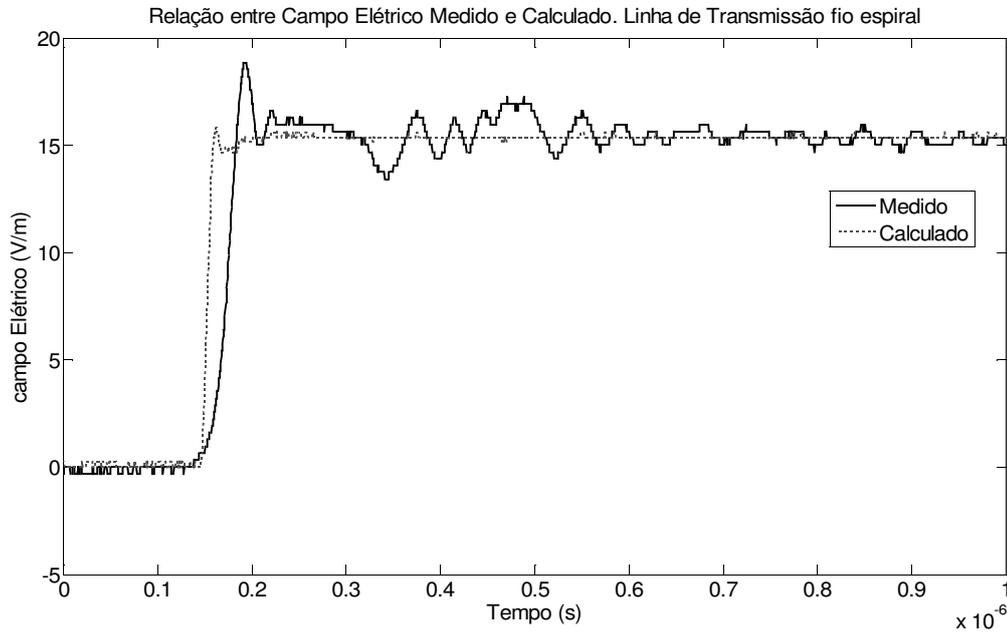


Figura 4.20: Campo Elétrico medido e calculado. Medição realizada no meio da linha.

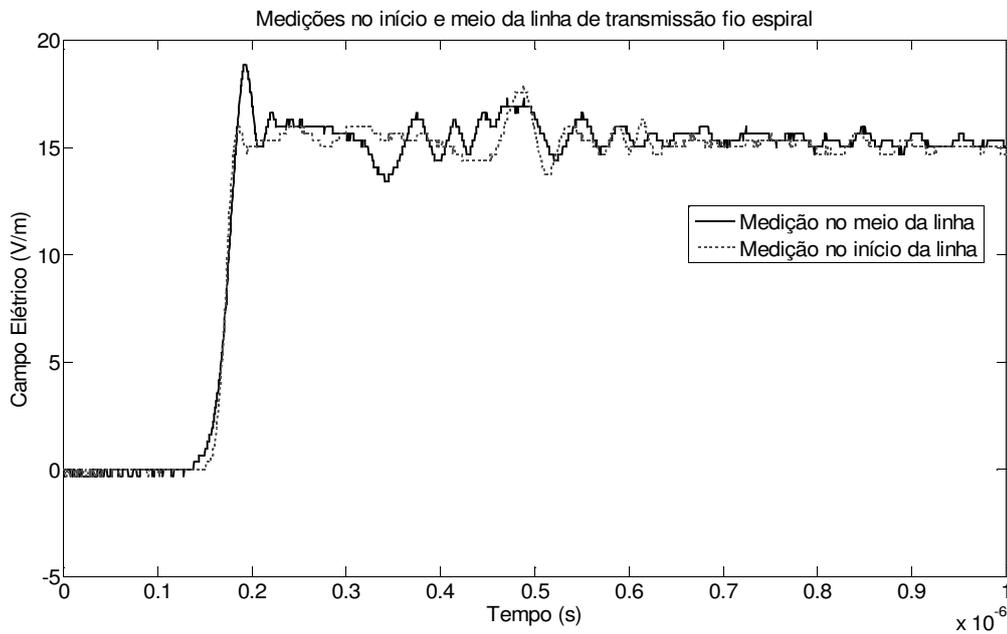


Figura 4.21: Comparação entre campo medido no início e no meio da linha de transmissão

A Figura 4.21 mostra a diferença entre os sinais medidos no início e no meio da linha de transmissão.

A seguir, nas Figuras 4.22 e 4.23 e na Tabela 4.2 serão apresentados o comportamento do campo para sinais periódicos no tempo.

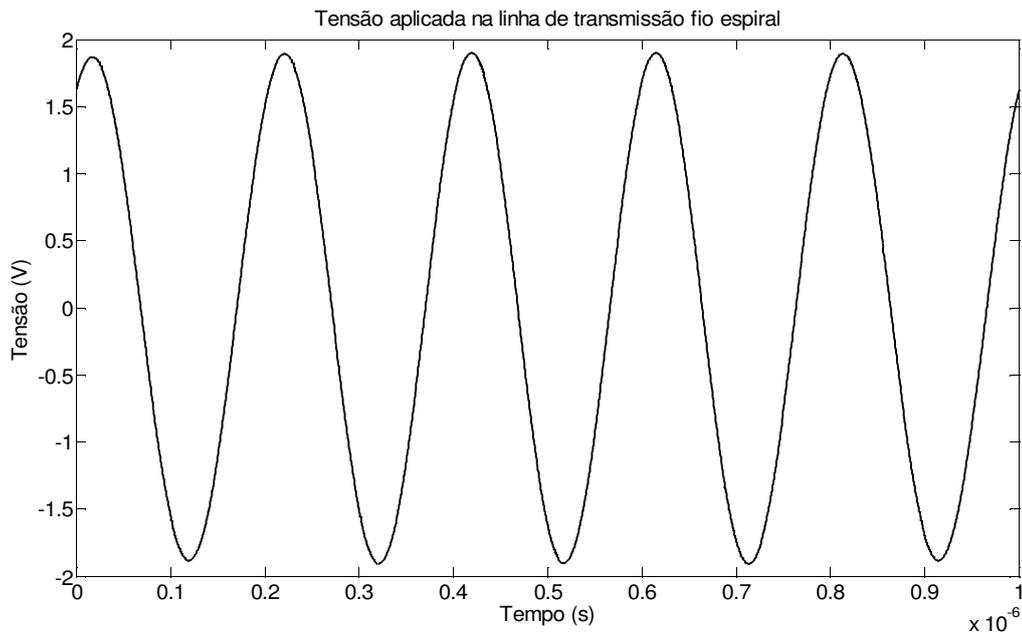


Figura 4.22: Tensão aplicada na linha de transmissão espiralada. 5MHz

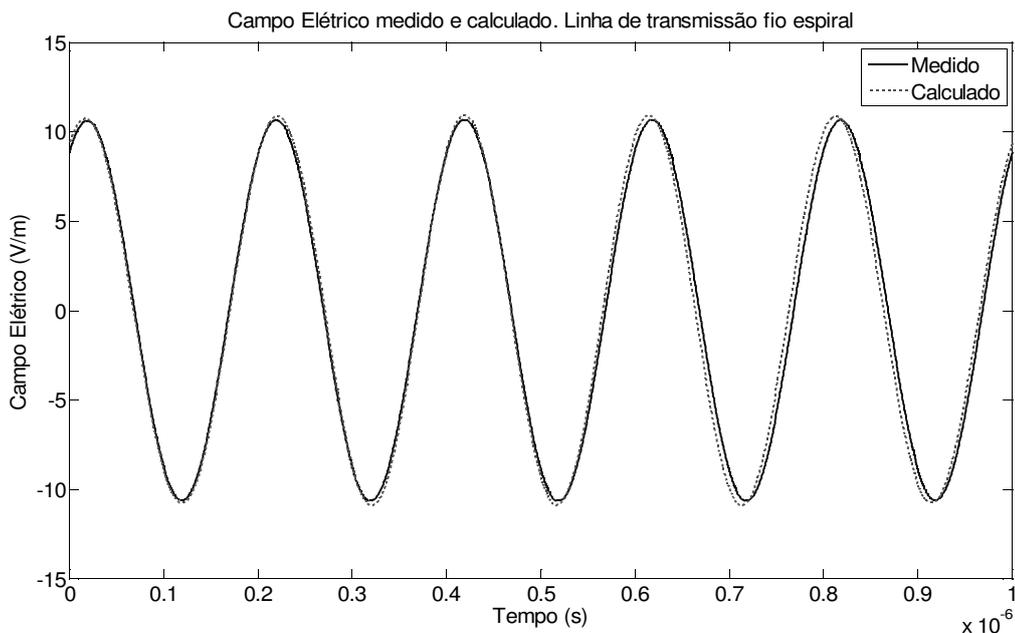


Figura 4.23: Campo Elétrico Medido e Calculado para onda de 5MHz

Tabela 4.3: Comportamento do campo Elétrico para várias frequências.

Canal Espiral

Frequência (MHz)	Tensão Aplicada na linha (V)	Campo Elétrico Calculado (V/m)	Campo Elétrico Medido no Meio da linha (V/m)	Erro relativo (%)
0,5	1,371	7,859	7,241	8,53
0,6	1,333	7,642	7,032	8,67
0,9	1,396	8,002	7,346	8,93
1	1,362	7,811	7,130	9,55
3	1,317	7,553	7,123	6,04
5	1,379	7,906	7,723	2,37
7	1,358	7,787	6,795	14,6
10	1,373	7,874	7,636	3,12
12	1,339	7,676	5,389	42,44
14	1,319	7,563	5,705	32,57
16	1,241	7,116	7,262	2,02
18	1,216	6,973	3,934	77,26
20	1,229	7,047	5,692	23,81
27	1,269	7,275	4,564	59,39
30	1,113	6,382	3,885	64,29

A Tabela 4.3 mostra que ocorre um aumento do erro relativo para valores maiores que 10% a partir dos sinais de 12MHz. Este fato será estudado em trabalhos futuros.

No estudo dos campos gerados pelos canais de descarga artificiais, serão utilizadas ondas de corrente com tempo de subida de aproximadamente 30ns. A relação entre tempo de subida de uma onda e o tamanho da banda de passagem é dada por  $B_w = 0.35/T_s$ , sendo  $B_w$  a banda de passagem e  $T_s$  o tempo de subida. Aplicando o valor de tempo de subida característico das onda em estudo (30ns) tem-se um tamanho de banda de 11,6MHz. Como as medições de campo elétrico realizadas abaixo de 10MHz tiveram um bom resultado, de acordo com a Figura 4.3, pode-se concluir que são válidas as medições realizadas pelo sensor de campo elétrico, na faixa de frequência de até 10MHz.

O diâmetro maior do canal, juntamente com a proximidade do sensor podem ter ocasionado distorções nas linhas de campos levando aos erros de cerca de 8% indicados e serão melhor analisados, assim como a flutuação dos valores para as

frequências maiores que 10MHz.

### b) Medições de Campo Magnético

Este item apresenta medições realizadas em frequências entre 500kHz a 30MHz, das componentes tangenciais e longitudinais do campo magnético, vide Figura 4.10. É avaliado o comportamento dos campos nesta faixa de frequência. As Figuras 4.24 e 4.25 mostram as formas de onda de tensão e corrente demonstrando o casamento de impedância da linha devido à não reflexão das ondas na terminação da linha.

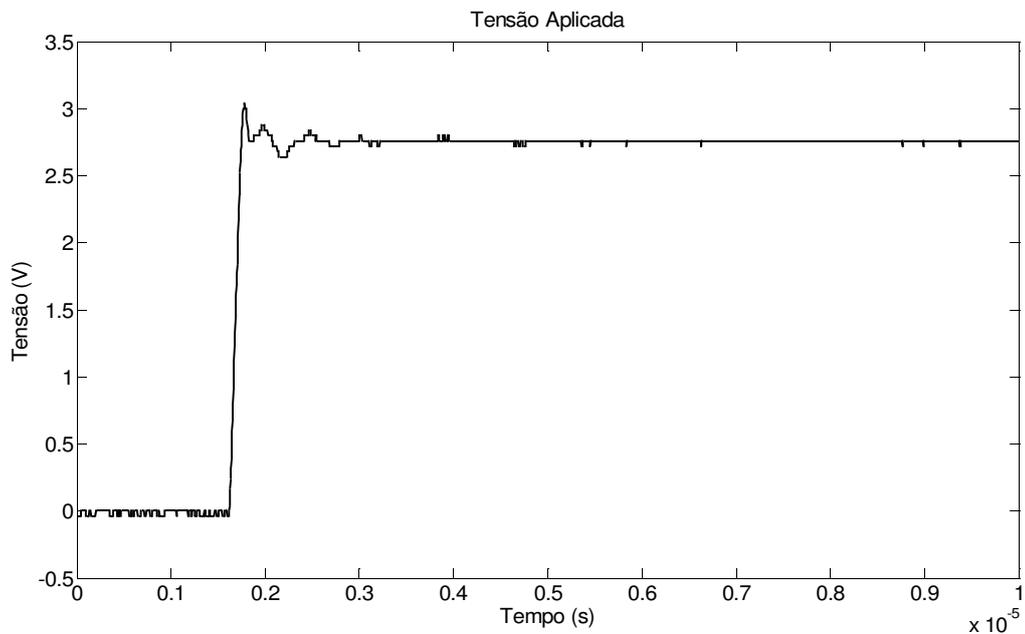


Figura 4.24: Tensão aplicada, casamento de impedância da linha de transmissão fio espiral

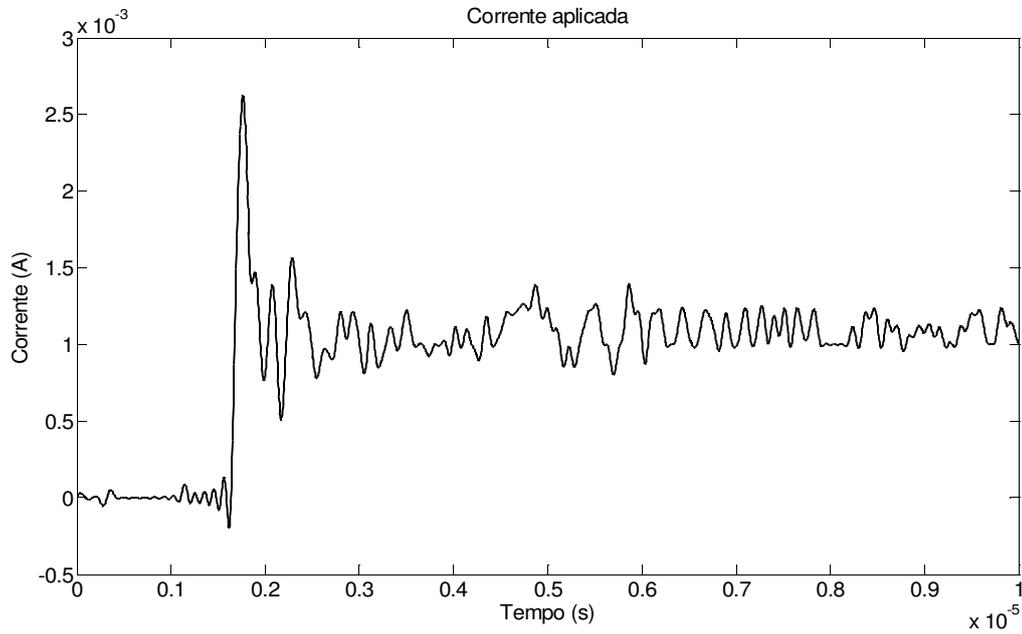


Figura 4.25: Corrente aplicada, casamento de impedância da linha de transmissão fio espiral.

As Equações (27) e (34) foram utilizadas para encontrar os valores de campo medido e calculado. As Figuras 4.26 a 4.31 apresentam os resultados.

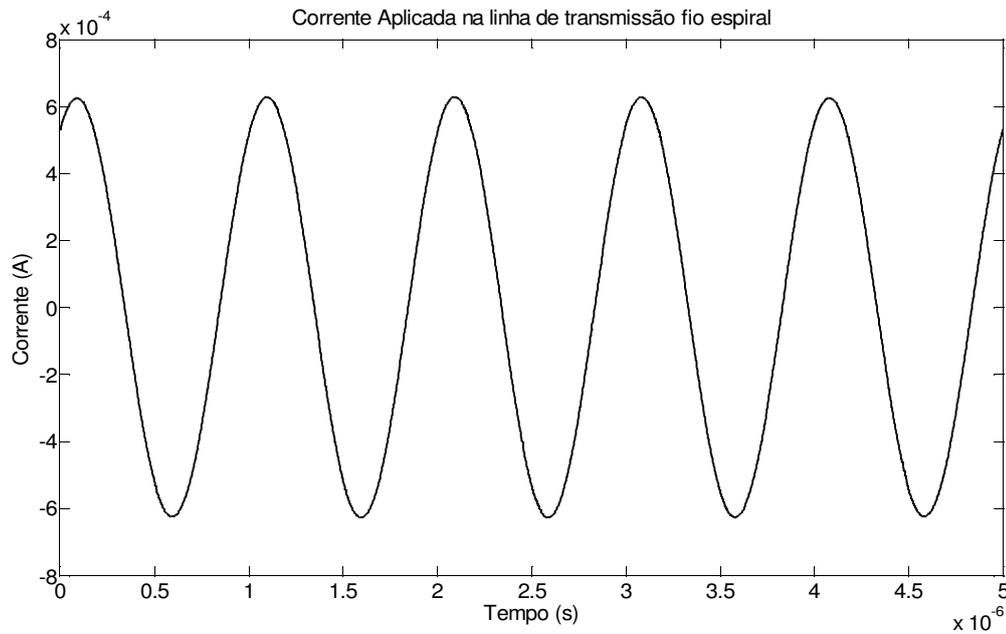


Figura 4.26: Corrente aplicada na linha espiral.  $f=1\text{MHz}$

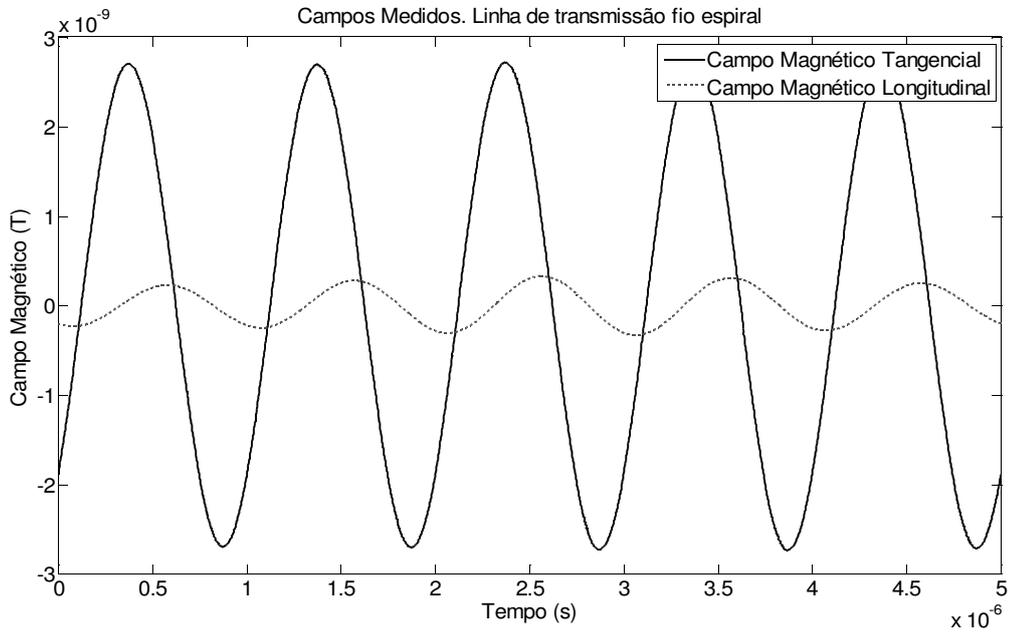


Figura 4.27: Campos magnéticos medidos duas direções.  $f=1\text{ MHz}$

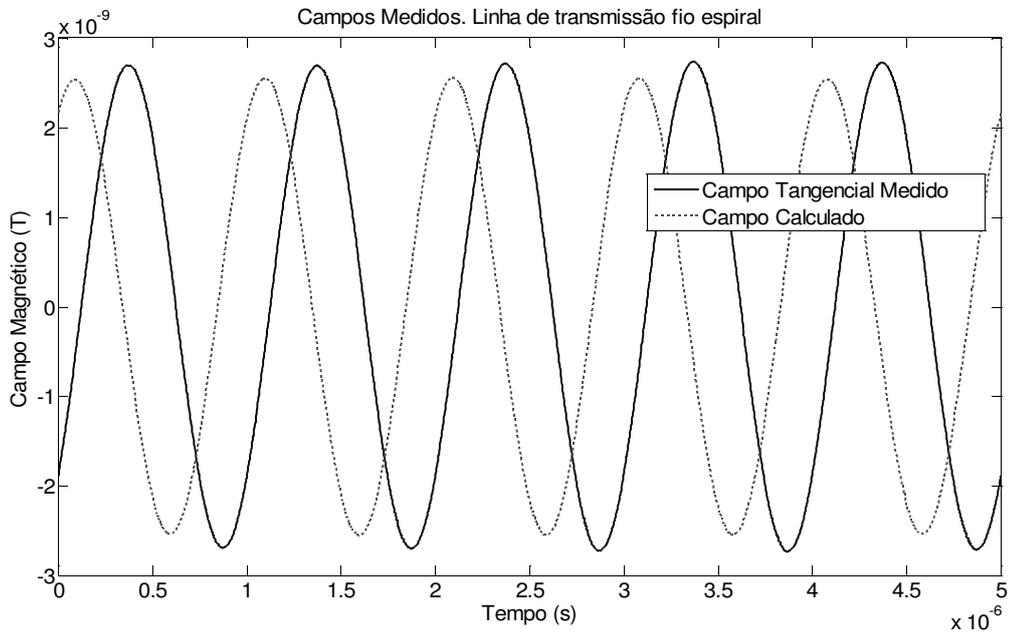


Figura 4.28: Relação entre Campo medido e calculado, linha espiral,  $f=1\text{MHz}$

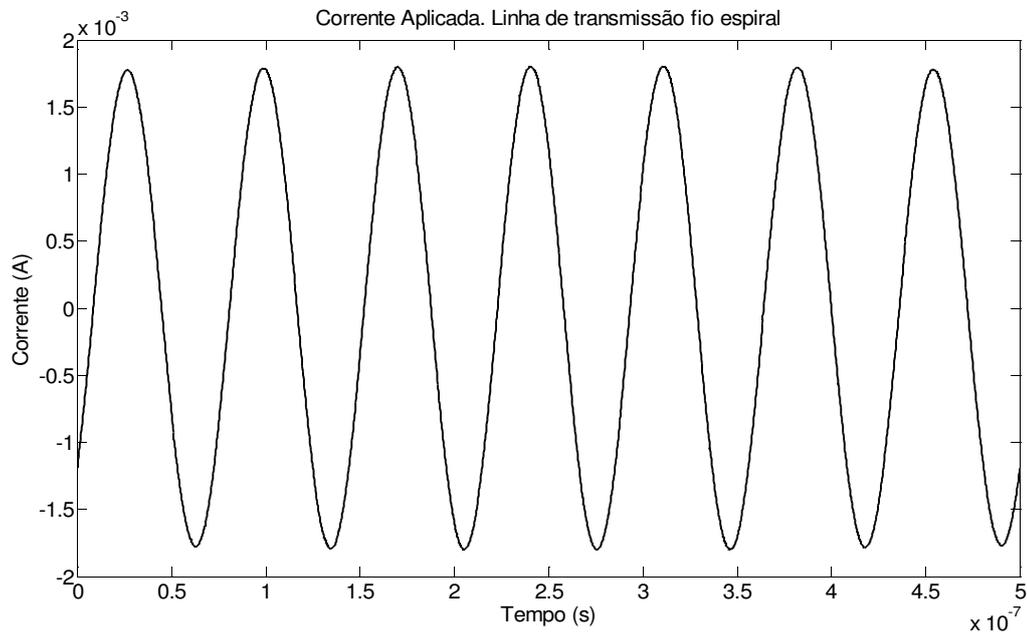


Figura 4.29: Corrente aplicada na linha espiral,  $f=14\text{MHz}$

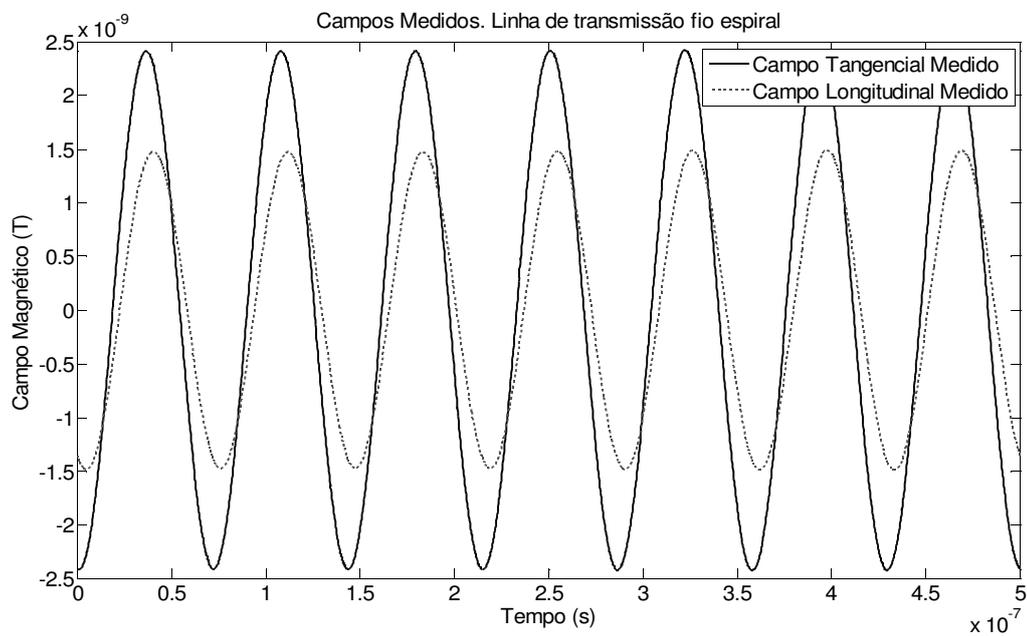


Figura 4.30: Campos Magnéticos medidos, duas direções,  $f=14\text{MHz}$

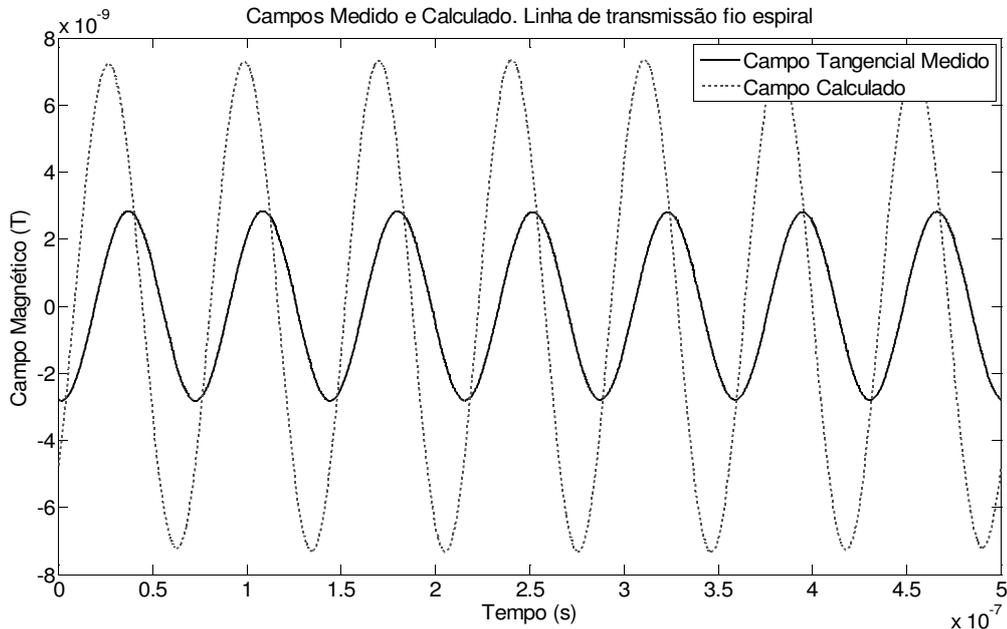


Figura 4.31: Campos Magnéticos medido e calculado,  $f=14\text{MHz}$ .

Pode-se observar que a componente longitudinal de campo magnético na linha espiral tem valores mais elevados em relação a linha de transmissão fio simples (Figuras 4.12 e 4.15). As medições realizadas para as outras frequências estão na Tabela 4.4.

Pode-se observar na Figura 4.31 a diferença entre o valor medido e o calculado é explicada pela curva de atenuação do sensor e também através da Figura 4.32, a qual demonstra os valores das tensões medidas nos sensores. Para frequências maiores que 10MHz, ocorre uma “oscilação” dos valores medidos, o que merece investigações futuras.

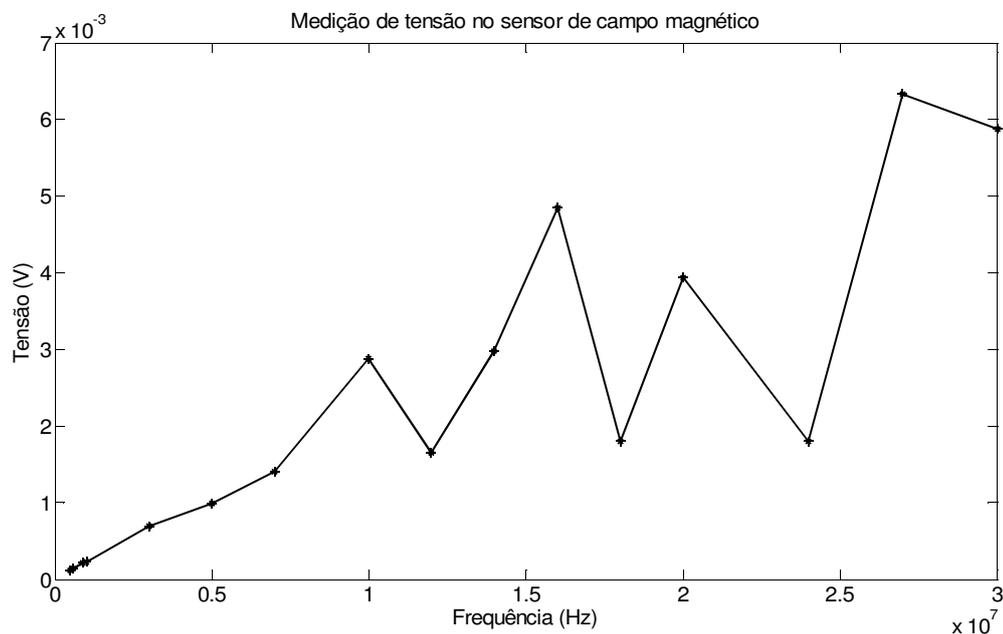


Figura 4.32: Valores de tensão medido no sensor de campo magnético de acordo com a frequência

Tabela 4.4: Resultados obtidos para as diferentes frequências. Valores sem a correção de atenuação e em RMS.

Canal Espiral

Frequência (MHz)	Corrente Aplicada (mA)	Campo Magnético Calculado Tangencial (nT)	Campo Magnético Tangencial Medido (nT)	Campo Magnético Longitudinal Medido (nT)	Relação Campo tangencial calculado / medido	Relação Campos medidos tangencial / longitudinal
0,5	0,5000	1,900	1,840	0,084	1,03	<b>21,9</b>
0,6	0,5000	1,870	1,840	0,110	1,02	<b>16,73</b>
0,9	0,5000	1,910	1,860	0,210	1,03	<b>8,86</b>
1	0,5000	1,850	1,770	0,194	1,05	<b>9,12</b>
3	0,5000	1,910	1,840	0,562	1,04	<b>3,27</b>
5	0,5000	1,940	1,580	0,850	1,23	<b>1,86</b>
7	0,7000	3,040	1,600	0,925	1,9	<b>1,73</b>
10	0,8000	3,200	2,290	1,390	1,4	<b>1,65</b>
12	0,7000	2,780	1,090	0,861	2,55	<b>1,27</b>
14	1,3000	5,360	1,690	1,010	3,17	<b>1,67</b>
16	1,0000	4,230	2,410	1,710	1,76	<b>1,41</b>
18	0,6000	2,460	0,790	0,620	3,11	<b>1,27</b>
20	0,7000	2,680	1,570	1,020	1,71	<b>1,54</b>
24	1,2000	4,800	0,590	0,298	8,14	<b>1,98</b>
27	1,4000	5,850	1,860	1,280	3,15	<b>1,45</b>
30	1,9000	7,680	1,560	1,130	4,92	<b>1,38</b>

A Tabela 4.4 mostra os valores de campo magnético medidos para a linha de transmissão espiral. Observa-se na coluna em destaque da Tabela 4.4 que a componente de campo longitudinal tem valores próximos aos valores medidos da componente tangencial.

#### **4.2.2 – Discussão dos Resultados**

Algumas considerações sobre as medições realizadas no item 4.2.1 são necessárias. A comparação dos resultados obtidos demonstra uma diferença entre os campos do fio condutor simples e fio espiralado. Percebe-se no fio espiral o aparecimento, com amplitude considerável, da componente de campo magnético longitudinal, a qual no fio condutor simples é desprezível. As Figuras 4.33 e 4.34 demonstram o comportamento dos campos magnéticos medidos nas duas direções de acordo com a frequência do sinal aplicado.

A aproximação, para cálculos de campos, do fio espiralado por um fio condutor simples é válida, pois o fio espiralado tem a componente tangencial com o valor mais alto, todavia deve-se ter atenção aos campos longitudinais gerados. Estes se tornam mais pronunciáveis a frequências maiores.

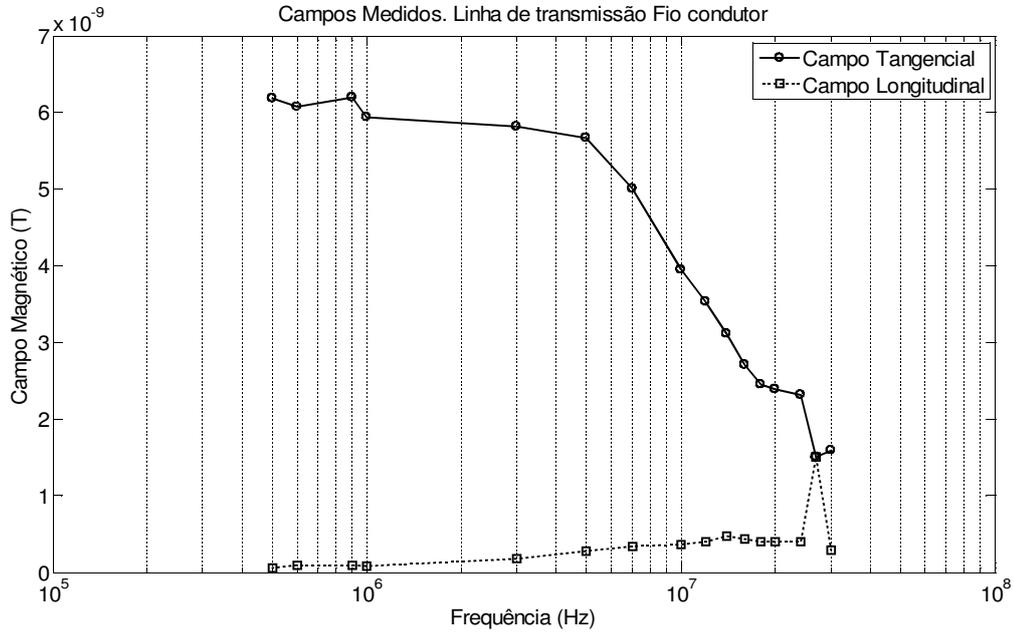


Figura 4.33: Comportamento dos campos magnéticos medidos nas direções longitudinal e tangencial na frequência. Linha de transmissão fio condutor. Campo Longitudinal muito menor que o Tangencial.

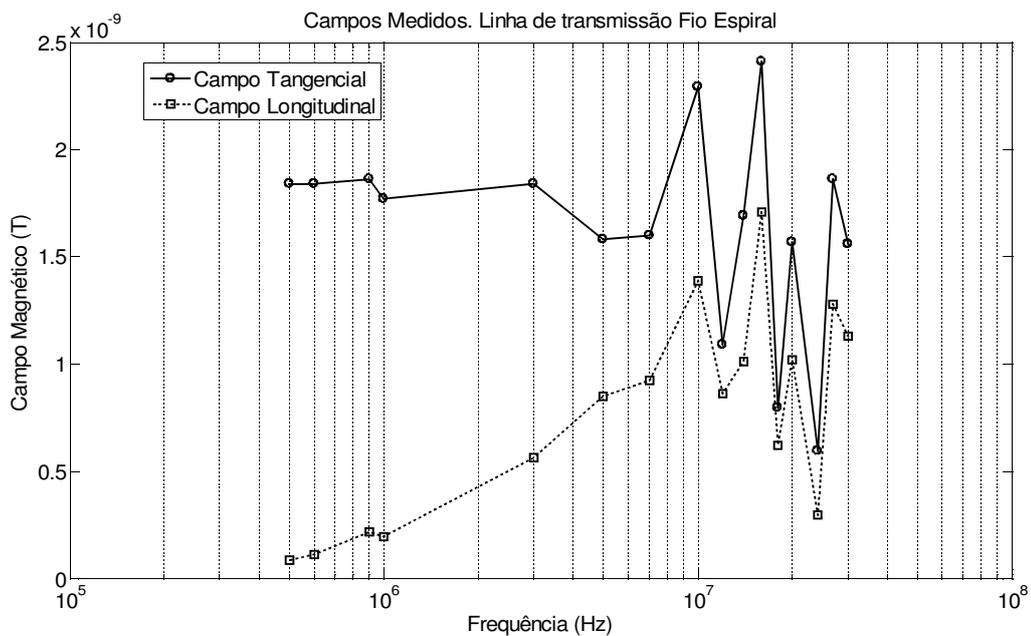


Figura 4.34: Comportamento dos campos magnéticos medidos nas direções longitudinal e tangencial na frequência. Linha de transmissão fio espiral. Campo Longitudinal crescente com a frequência se aproximando do campo tangencial em frequências maiores que 10MHz.

As medições de campo elétrico também foram satisfatórias validando o sensor criado. Para fio condutor, a correspondência entre os valores calculado e medido obtiveram erros menores que 5%. Já para o fio espiral, os resultados obtidos até 10MHz foram satisfatórios. Uma melhor avaliação do comportamento das medições a frequências maiores deve ser foco de trabalhos futuros. Todavia para a faixa de frequência dos fenômenos nos quais os sensores serão utilizados, medições de campos gerados por canais de descargas artificiais com ondas de tempo de subida de até 30ns e banda de passagem correspondente de 11MHz, os sensores estão se comportando satisfatoriamente.

### **4.3 – Campos dos Canais de Descarga (Canais Verticais)**

Neste item, serão efetuadas as medições dos campos elétrico e magnético gerados pelos canais de descarga atmosférica utilizadas em modelo reduzido. A caracterização dos campos será realizada por meio de medições dos sensores de campo elétrico e magnético percorrendo pontos na distância radial ao canal.

Os sensores desenvolvidos captam os campos elétrico vertical e magnético tangencial, radial e vertical de acordo com a Figura 4.35.

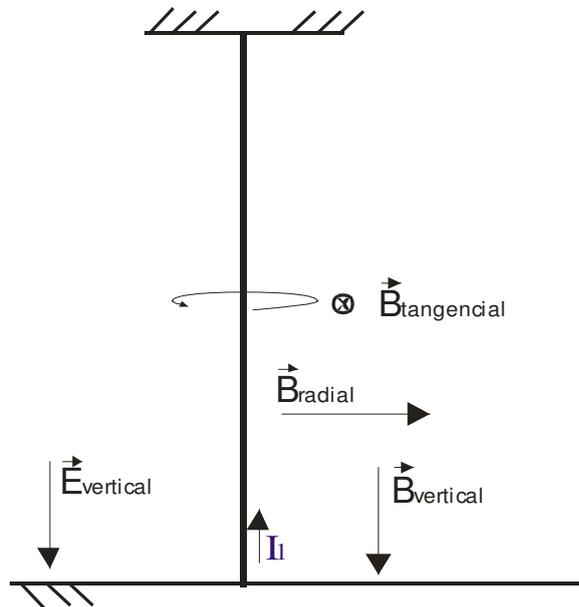
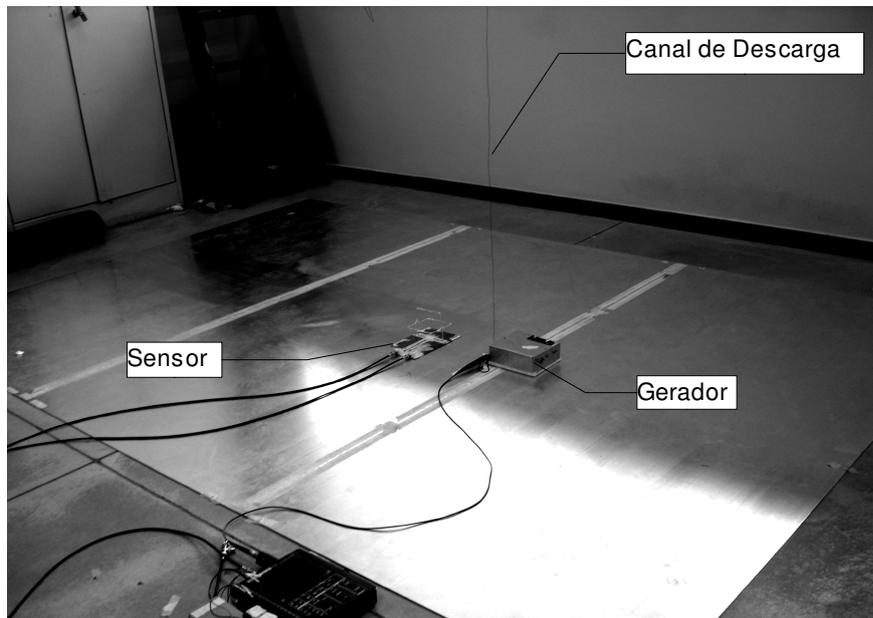


Figura 4.35: Direção dos Campos Medidos

Os campos elétrico vertical e magnético tangencial serão comparados com valores de cálculo de campo cujo o método referenciado em [30] e [9], e está especificado no anexo A .

### 4.3.1 – Medições Realizadas

#### 4.3.1.1 – Canal de descarga: Fio condutor de cobre



*Figura 4.36: Montagem do canal de descarga fio de cobre. Ao centro da Figura está o gerador conectado ao pé do canal*

O modelo montado para estas medições foi num plano condutor de alumínio com 2mm de espessura e 2m x 3m. O gerador utilizado foi o gerador 3 construído por Coelho e Boaventura [22]. Este gerador tem tensão máxima de saída de aproximadamente 400V e tempo de frente de onda entre 20 e 30ns. Ele foi conectado diretamente à base do canal, a fim de evitarmos reflexões devido a conexões com cabos coaxiais. O canal de descarga foi mantido erguido por meio de fios de nylon e sua terminação superior foi casada para evitar reflexões, com resistência de  $400\Omega$  conectada ao teto do laboratório. A Figura 4.36 apresenta os detalhes da montagem.

Apresentar-se-á os valores de tensão e corrente aplicados no canal e os valores de tensão medidos nos sensores de campo elétrico e magnético, variando-se a distância em relação ao canal.

As Figuras 4.37 e 4.38 mostram os valores de tensão aplicada e de da corrente que flui no canal, respectivamente.

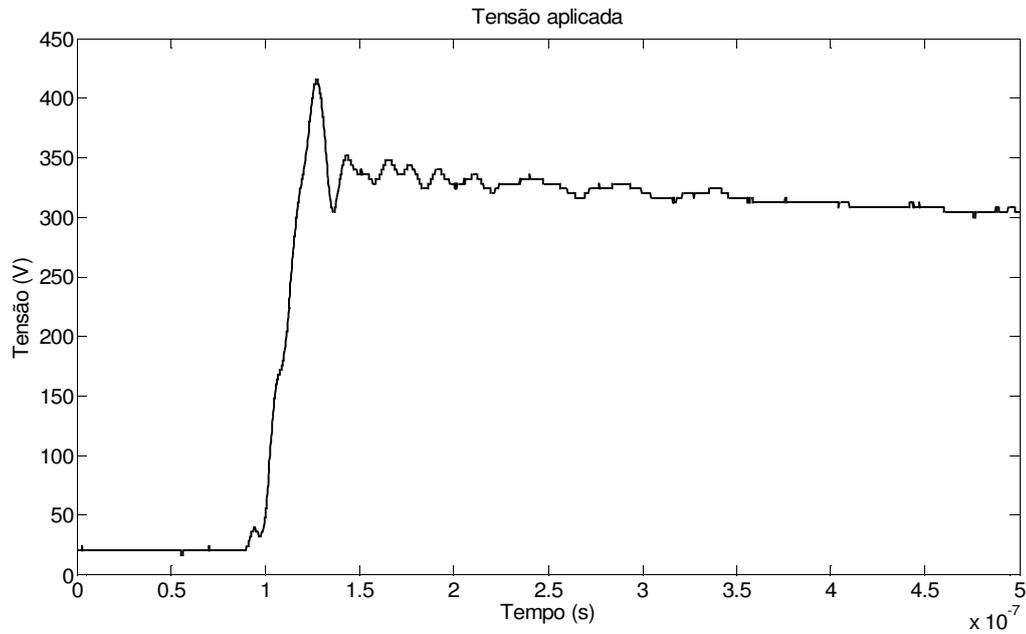


Figura 4.37: Onda de tensão aplicada no canal de descarga, fio condutor casado

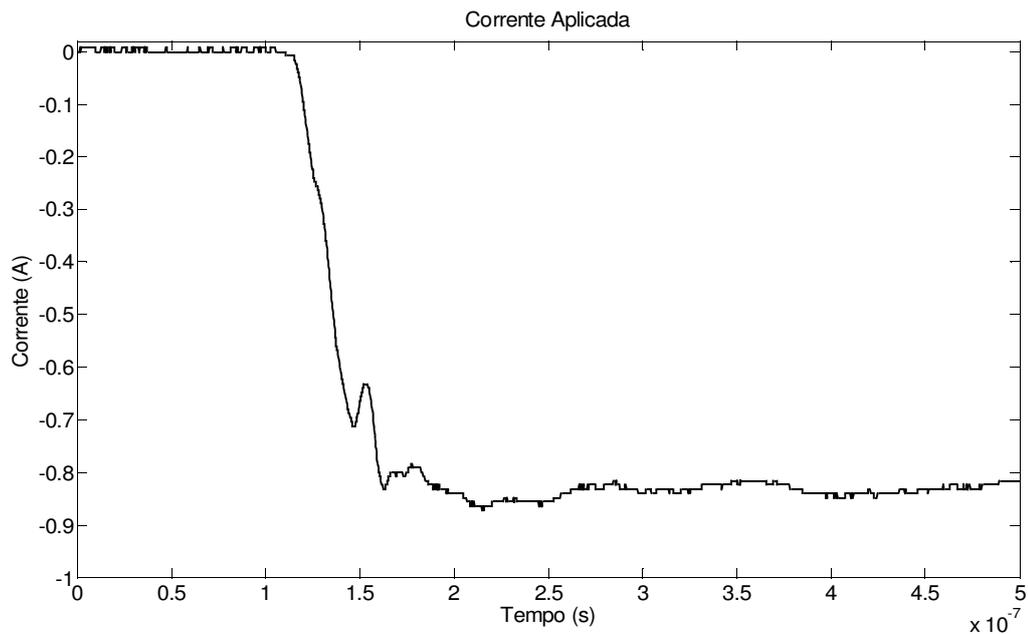


Figura 4.38: Corrente aplicada na base da canal de descarga fio condutor casado.

### a) Medições de Campo Elétrico

As medições com o sensor de campo elétrico foram realizadas em cinco pontos (P1 a P5) com distâncias radiais em relação ao canal de descarga de 20, 70, 120, 145 e 170 cm. Os resultados não tem correlação temporal já que não houve uma única referência de tempo para os sinais medidos.

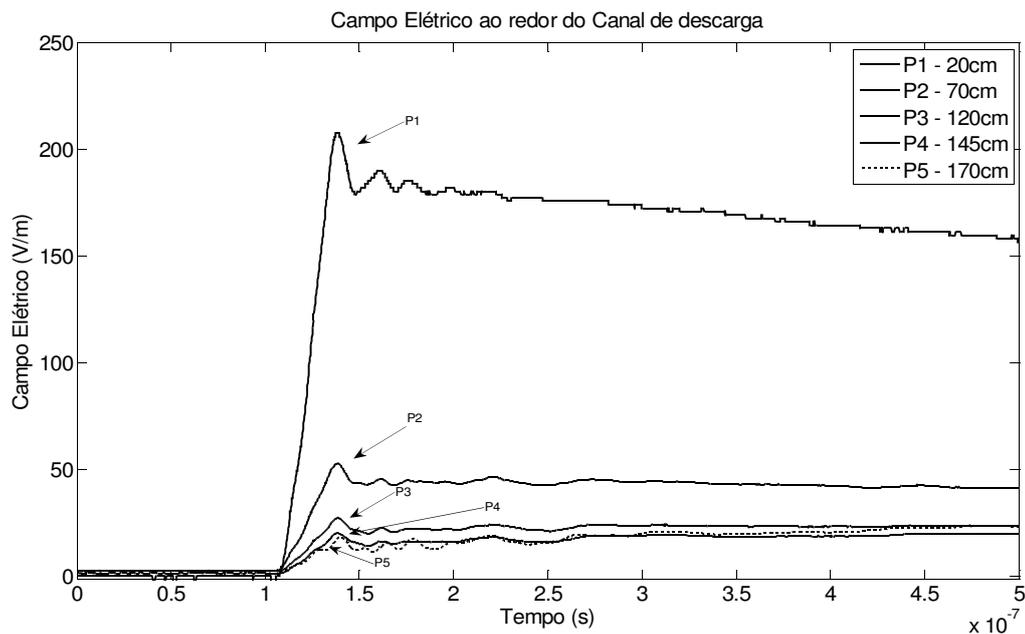


Figura 4.39: Distribuição do Campo Elétrico ao redor do canal de descarga fio condutor.

O método de cálculo de campo elétrico para canal de descarga do anexo A foi utilizado para comparar e validar as medições realizadas pelo sensor de campo elétrico. Os cálculos foram realizados com a onda de corrente aplicada no canal, Figura 4.38, e em três pontos na distância (20, 70 e 120cm), ficando os resultados sem correlação temporal. Os resultados comparativos estão nas Figuras 4.39 a 4.42.

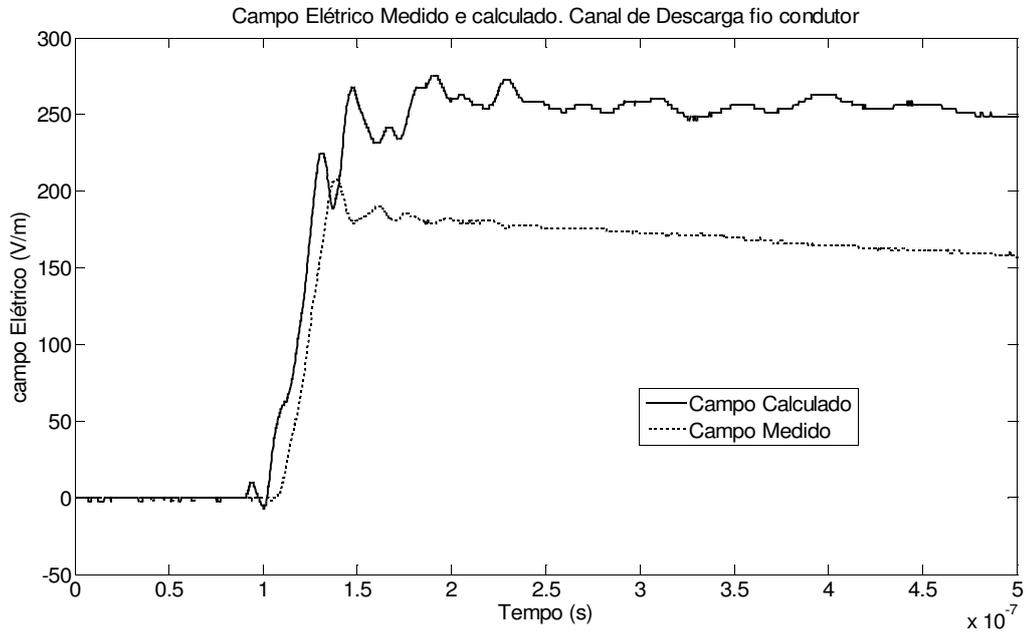


Figura 4.40: Comparação entre campo elétrico medido e calculado a 20cm do canal

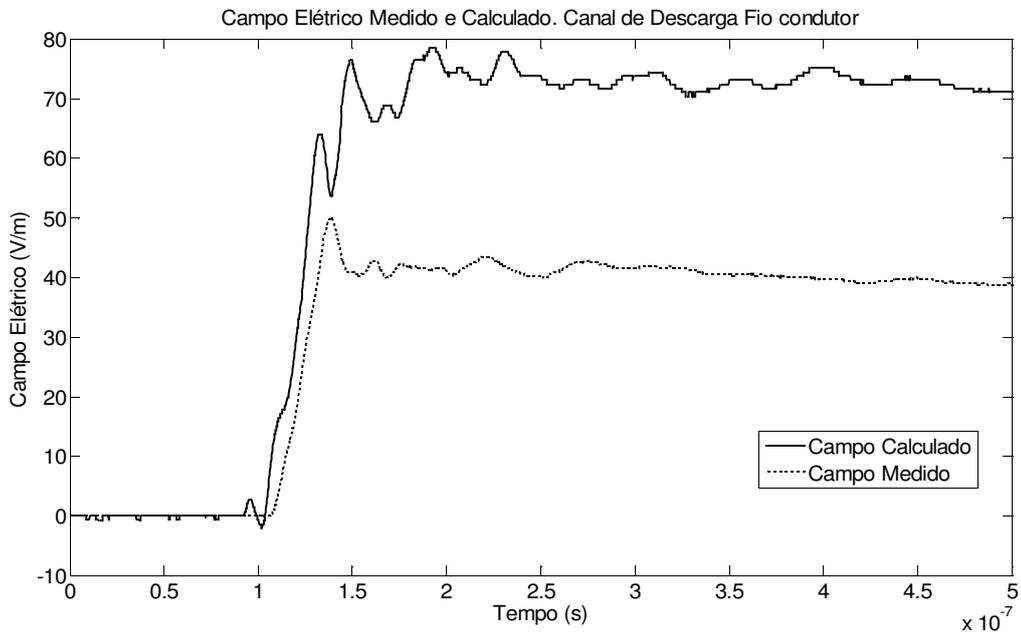


Figura 4.41: Comparação entre campo elétrico medido e calculado a 70cm do canal

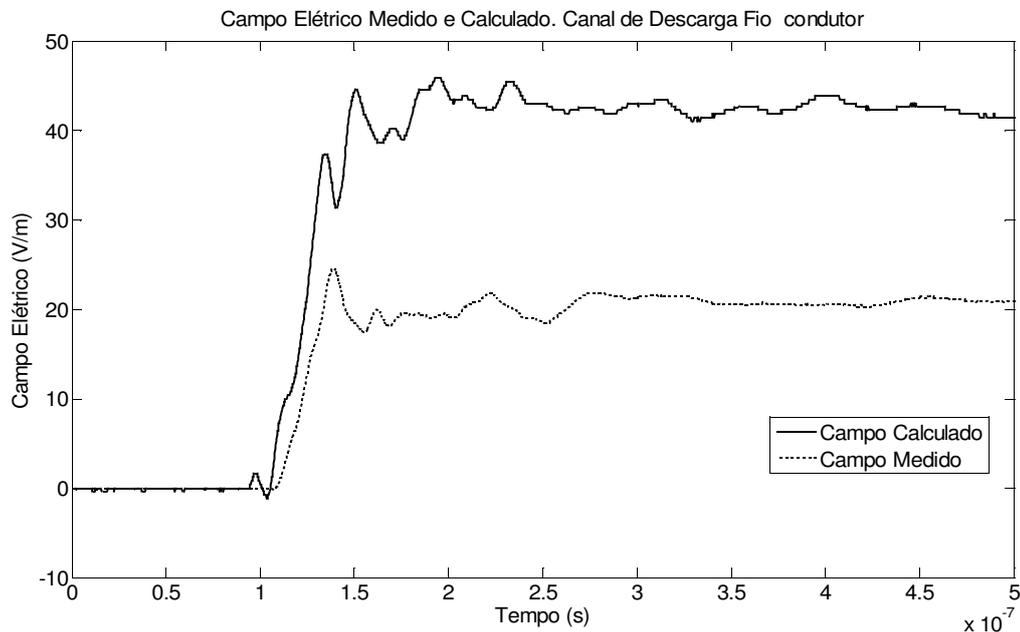


Figura 4.42: Comparação entre campo elétrico medido e calculado a 120cm do canal

A comparação dos valores calculados e medidos para o campo elétrico do fio condutor (Figuras 4.40 a 4.42) demonstram que o sistema de medição reproduz bem a forma de onda calculada, observando a correlação entre as taxas de subida das ondas. Todavia uma diferença de amplitude entre os sinais é observada. Um dos fatores que pode explicar o fato é a distorção do campo elétrico à medida que aumenta-se a distância do ponto de medição em relação ao canal de descarga, pois em pontos mais próximos as linhas de campo elétrico incidentes no sensor são praticamente perpendiculares ao sensor, já com o aumento da distância as linhas tendem a ângulos menores que  $90^\circ$  resultando em diferenças para os campos a altura de 7cm e a 0cm (junto ao plano de terra). Um estudo mais detalhado da variação do campo é proposta para trabalhos futuros.

#### b) Medições de Campo Magnético

As medições com o sensor de campo magnético foram realizadas em 4 pontos (P1 a P4) com distâncias radiais em relação ao canal de descarga de 20, 70, 120 e 170 cm (Figura 4.43). Os campos foram medidos em três direções: tangencial, vertical e radial. O sinal medido pelo sensor foi integrado, de acordo com a equação

30 (página 44).

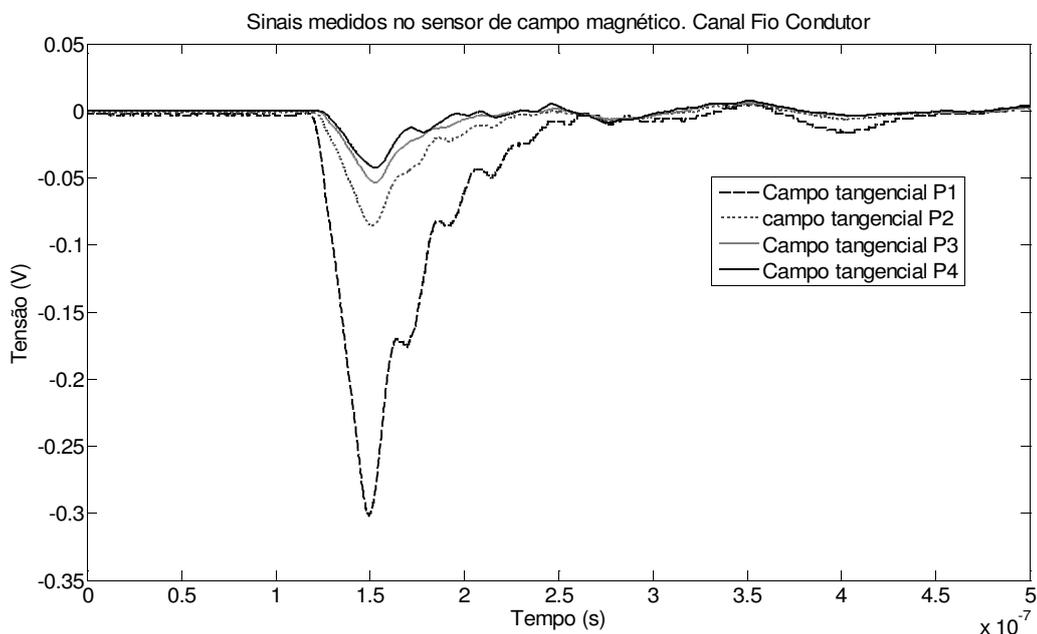


Figura 4.43: Valores de tensão medidos no sensor de campo magnético, direção tangencial. Canal de Descarga Fio condutor.

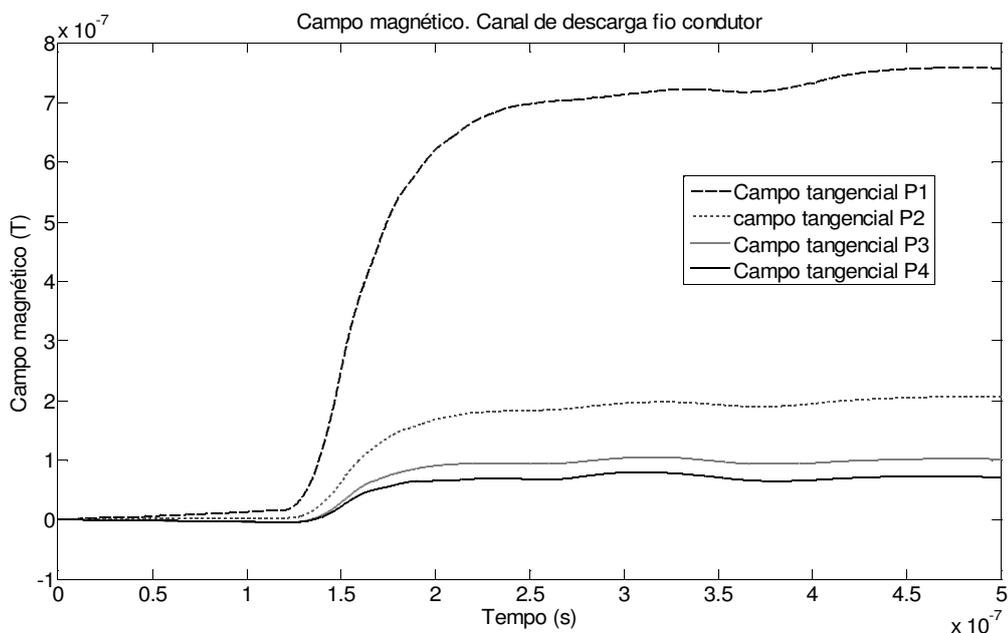


Figura 4.44: Valores de campo medidos, integração do sinal da Figura 4.43 via equação 30.

Os valores de campo magnético tangencial obtidos através das medições serão comparados com os valores calculados afim de avaliar as medições

realizadas, em três pontos (20, 70 e 120cm). Os cálculos, assim como do campo elétrico, são baseados na onda de corrente aplicada, Figura 4.38, estando os cálculos especificados no Anexo A .

Nas Figuras 4.45 a 4.47 tem-se os gráficos dos valores medidos e calculados de campo magnético tangencial ao canal de descarga fio condutor. Pode-se perceber que existe uma correlação entre as formas de onda medida e calculado. Observa-se uma diferença na taxa de subida dos sinais, sendo mais lento o medido, o que está de acordo com o esperado, uma vez que o sensor como já demonstrado pode ser modelado como um circuito RL e como tal tem sua banda de passagem limitada, que neste caso é a responsável pela atenuação da taxa de subida do sinal medido.

A diferença das amplitudes dos sinais é observada e será estudada em trabalhos futuros. Uma análise inicial pode inferir algumas causas para essa divergência. A diferença de geometria utilizada no processo de calibração do sensor e altura da linha de transmissão que foi utilizada nas medições e calibração. Um estudo mais detalhado se faz necessário. Todavia, a menos desse ajuste de amplitudes, o sensor tem seu funcionamento validado mantendo sua aplicabilidade no presente trabalho para avaliação comparativa dos campos tangencial, radial e vertical.

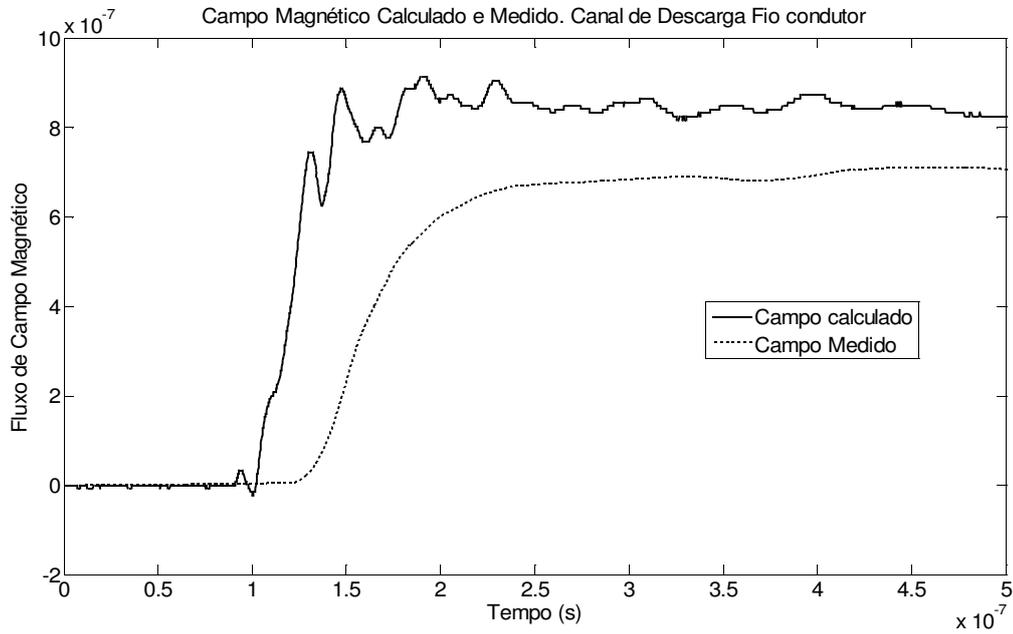


Figura 4.45: Comparação entre campo magnético tangencial medido e calculado a 20cm do canal

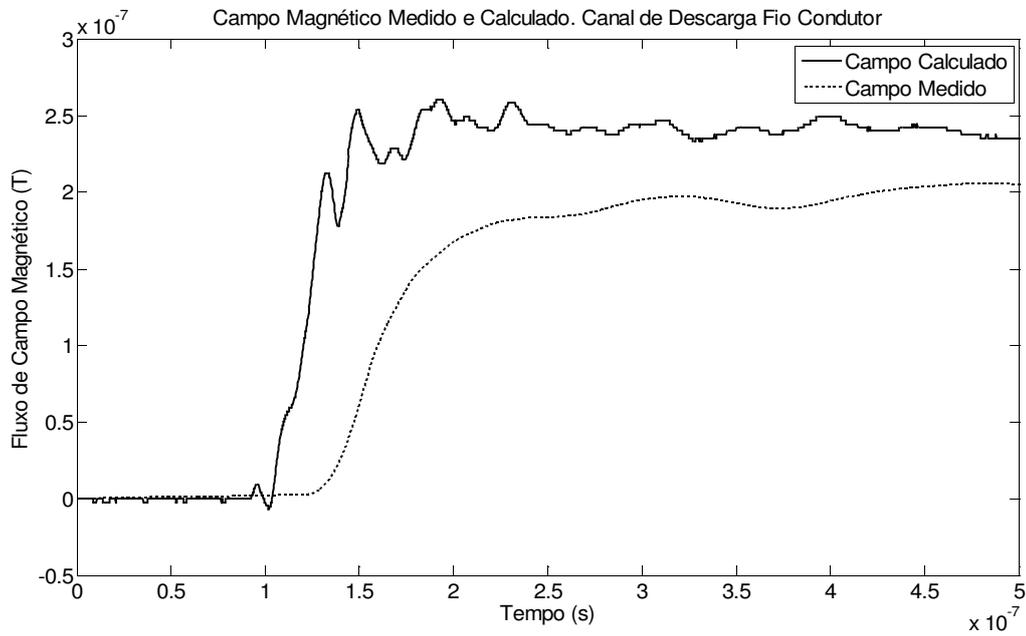


Figura 4.46: Comparação entre campo magnético tangencial medido e calculado a 70cm do canal

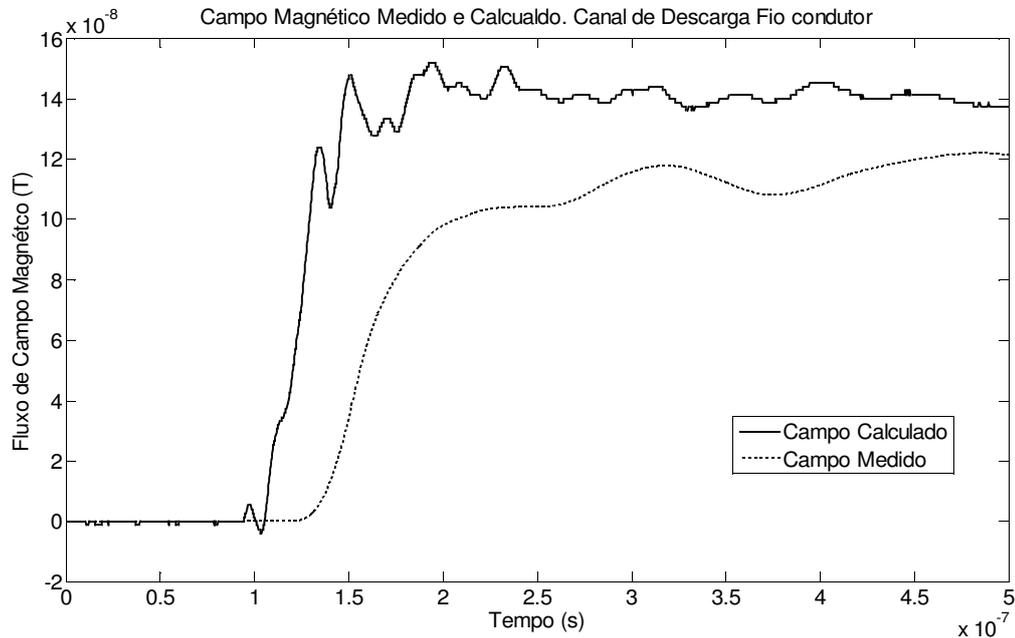


Figura 4.47: Comparação entre campo magnético tangencial medido e calculado a 120cm do canal

As Figuras 4.48 e 4.49 demonstram os valores de tensão medidos no sensor de campo magnético para as direções radial e vertical. Comparando-as com o sinal obtido no sensor para o campo na direção tangencial, (Figura 4.43) pode-se perceber que em amplitude o sinal do campo tangencial é cerca de 15 vezes maior que nas outras direções, ou seja, as componentes nas outras direções podem ser desconsideradas. Estando de acordo com o esperado teoricamente para o campo eletromagnético de um fio condutor no qual o campo é tangencial ao fio conduzindo corrente.

De acordo com os valores medidos, tem-se que o campo magnético gerado pelo canal de descarga fio condutor de valores relevantes é o na direção tangencial, sendo os outros campos gerados desprezíveis.

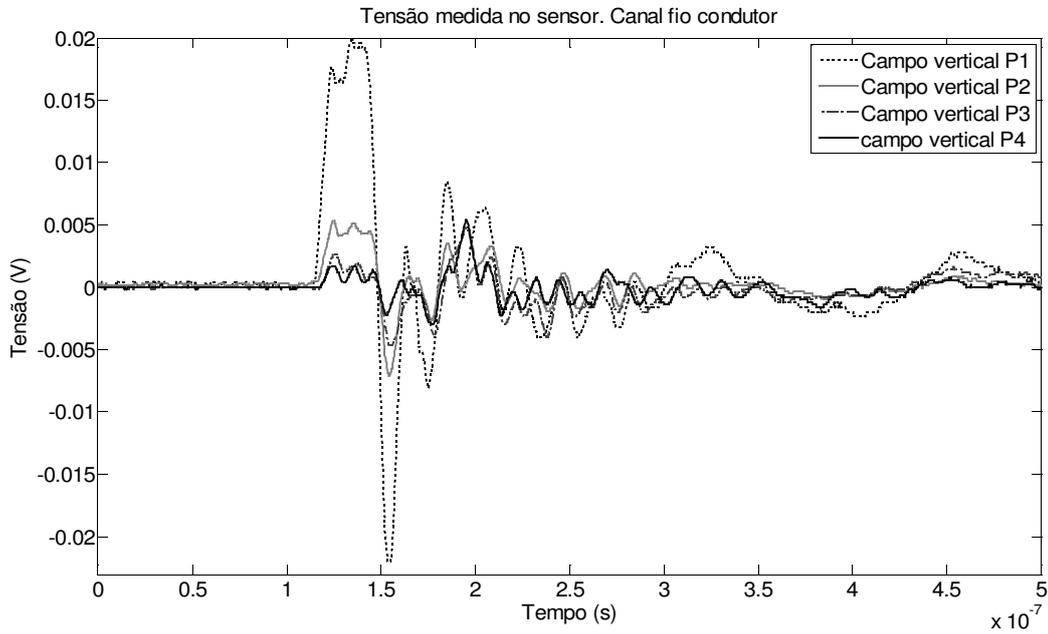


Figura 4.48: Valores de tensão medidos no sensor de campo magnético, direção vertical. Canal Fio Condutor.

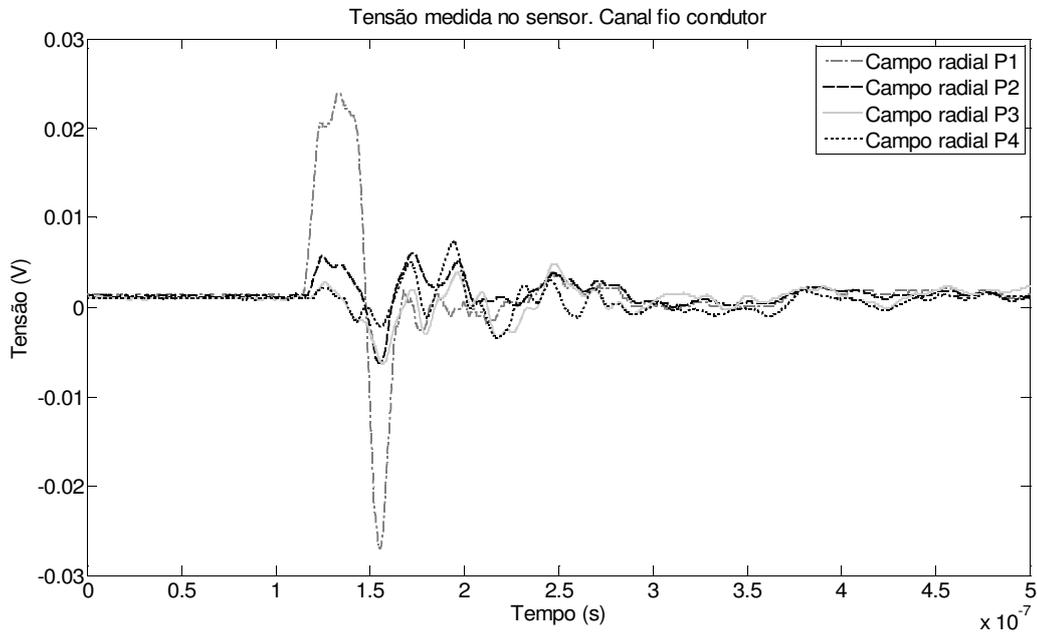
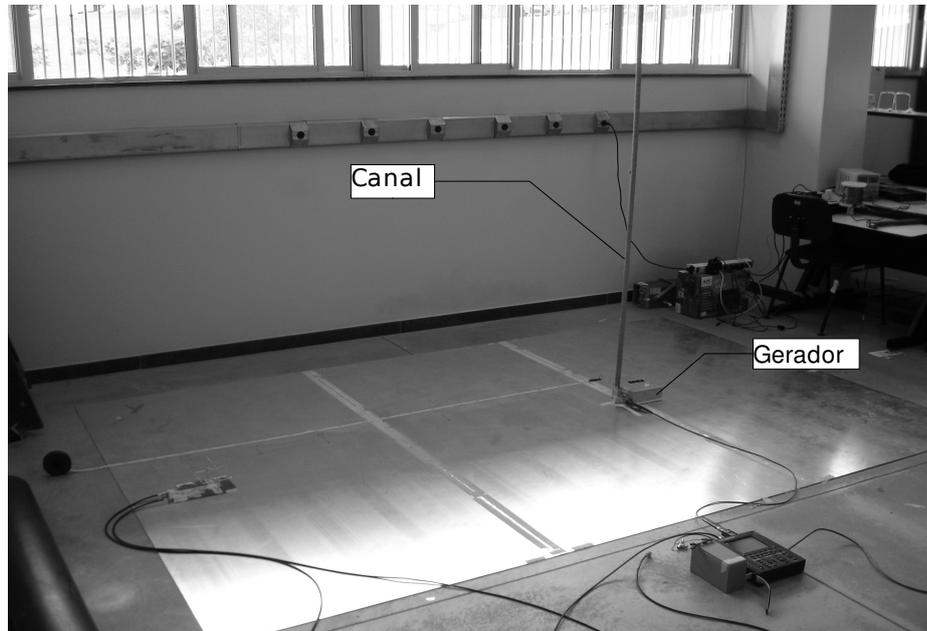


Figura 4.49: Valores de tensão medidos no sensor de campo magnético, direção radial. Canal Fio Condutor.

### 4.3.1.2 – Canal de descarga: Fio Espiral

As medições realizadas em 4.3.1.1 foram também realizadas para o canal espiral. O canal espiral foi erguido por fio de nylon (Figura 4.50) e sua terminação superior não foi casada, permaneceu aberta pois como a velocidade de propagação para este canal (8% da velocidade da luz, detalhe Figura 4.53) é menor que a do fio. Os fenômenos são observáveis antes de ocorrer a reflexão na terminação.

Na Figura 4.50 tem-se o aspecto geral da montagem realizada no laboratório.



*Figura 4.50: Montagem do modelo reduzido, canal espiral com o gerador ligado à base do canal*



Figura 4.51: Fio de nylon erguendo o canal espiral e terminação aberta

A Figura 4.52 mostra a onda de tensão aplicada no canal de descarga. Já a Figura 4.53 mostra a corrente que flui pelo canal e no detalhe os pontos utilizados para o cálculo da velocidade de propagação da onda pelo canal.

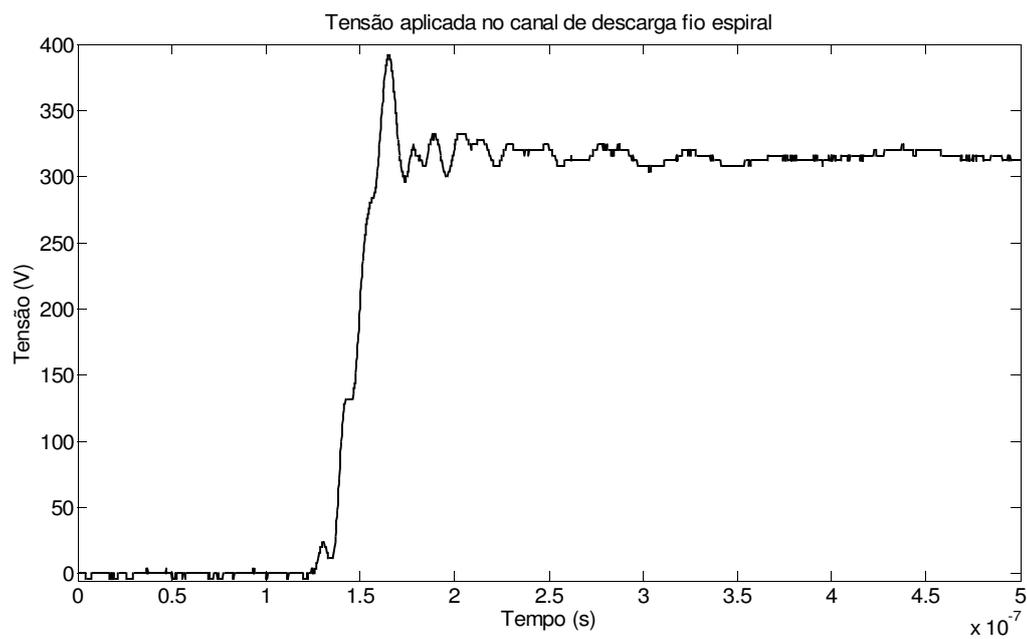


Figura 4.52: Tensão Aplicada

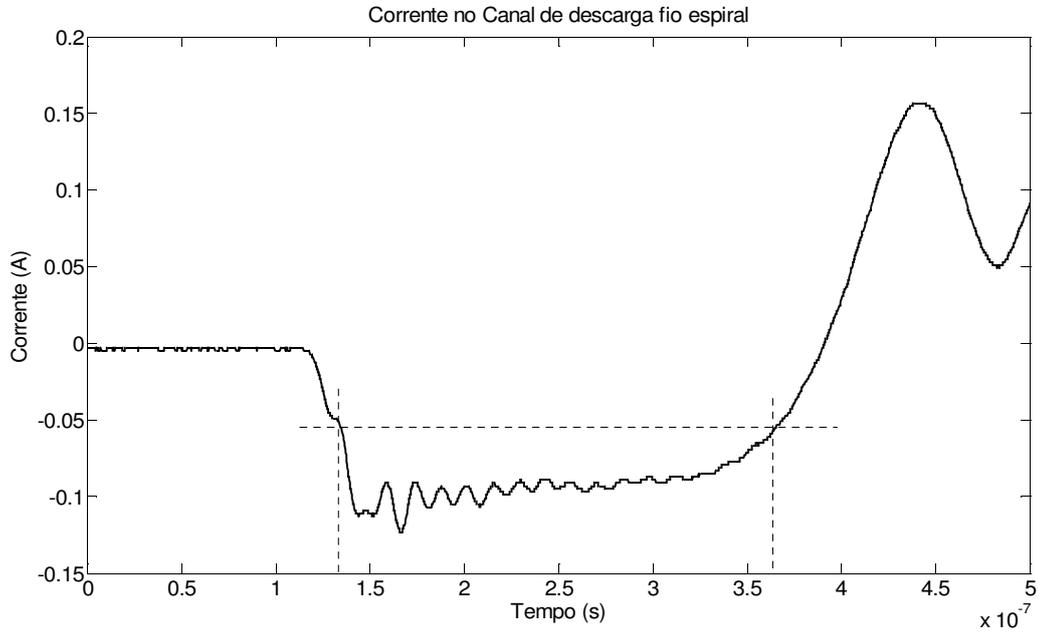


Figura 4.53: Corrente fluindo no canal de descarga espiral. Pode-se observar a reflexão devido a terminação aberta. Marcações na Figura para cálculo da velocidade de propagação da onda

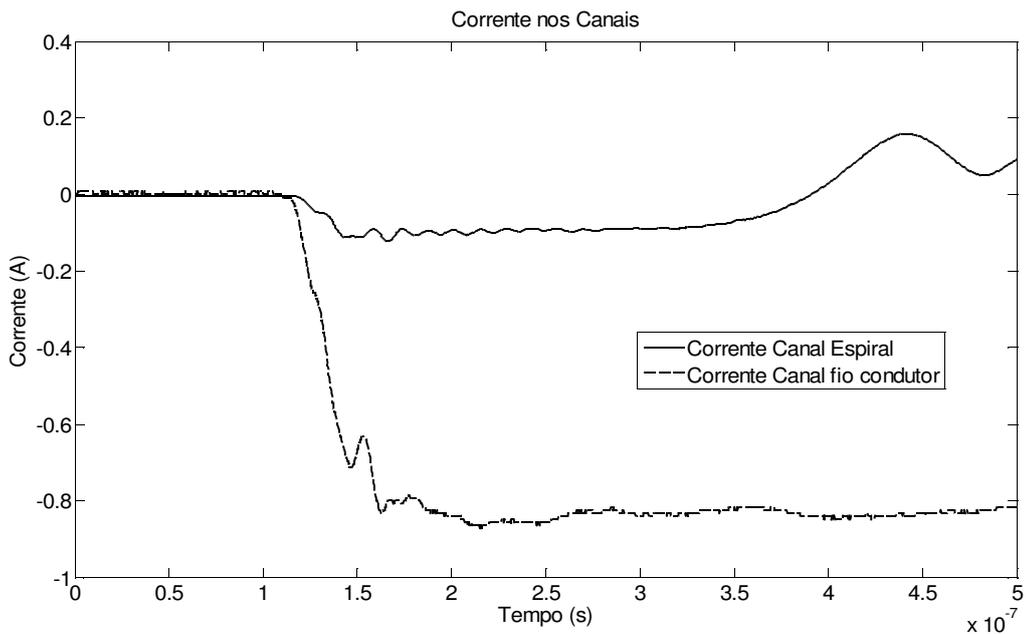


Figura 4.54: Comparação entre correntes fluindo nos canais de descarga fio condutor e espiral. A diferença de amplitude é causa da diferença de impedância dos canais.

Na Figura 4.54 tem-se a comparação entre as corrente aplicadas no canal fio condutor e espiral. A diferença de amplitude é devida à alta impedância do canal espiral. Por conseguinte, os campos gerados também terão suas amplitudes diminuídas.

### a) Medições de Campo Elétrico

As medições com o sensor de campo elétrico foram realizadas em cinco pontos (P1 a P5) com distâncias radiais em relação ao canal de descarga de 20, 70, 120, 145 e 170 cm. É importante ressaltar que os resultados não têm correlação temporal. Os resultados comparativos estão na Figura 4.55.

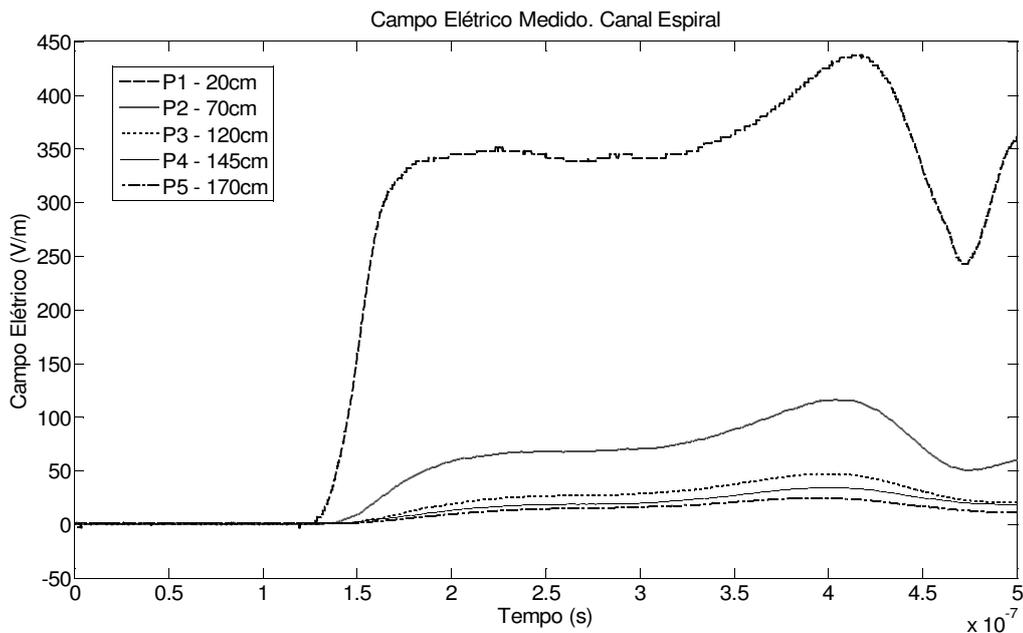


Figura 4.55: Distribuição do campo ao redor do canal espiral.

As Figuras 4.56 a 4.58 apresentam a comparação entre os valores de campo medidos e calculados para o canal espiral. Os cálculos foram realizados de acordo com o Apêndice A . O campo é calculado considerando-se o canal espiral um fio condutor simples sendo o parâmetro velocidade de propagação da onda de corrente o que caracteriza o fio como canal espiral. No canal espiral a velocidade de propagação é bem mais lenta que um fio condutor, cerca de 8% da velocidade da luz para o canal utilizado, de acordo com a Figura 6.53, na qual observa-se a reflexão da onda de corrente na terminação aberta do canal.

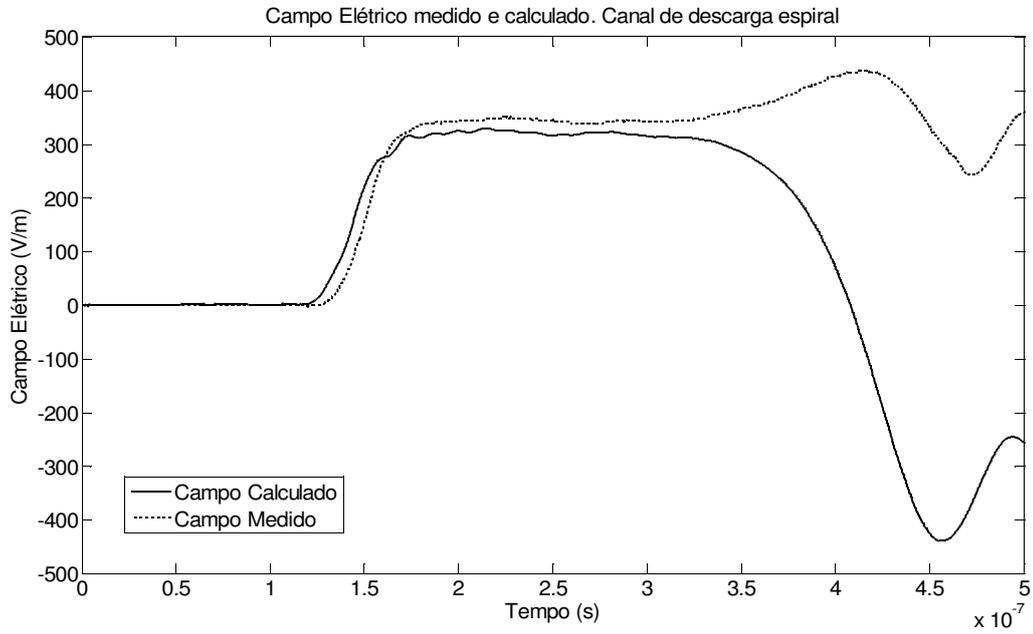


Figura 4.56: Comparação entre o campo elétrico medido e calculado a 20cm do canal

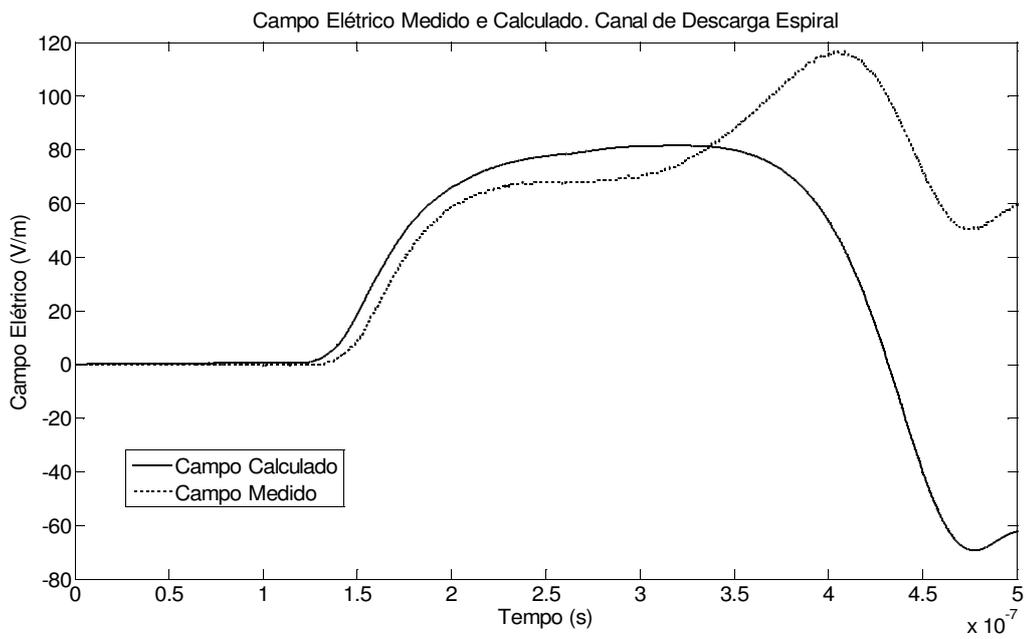


Figura 4.57: Comparação entre campo medido e calculado a 70cm do canal

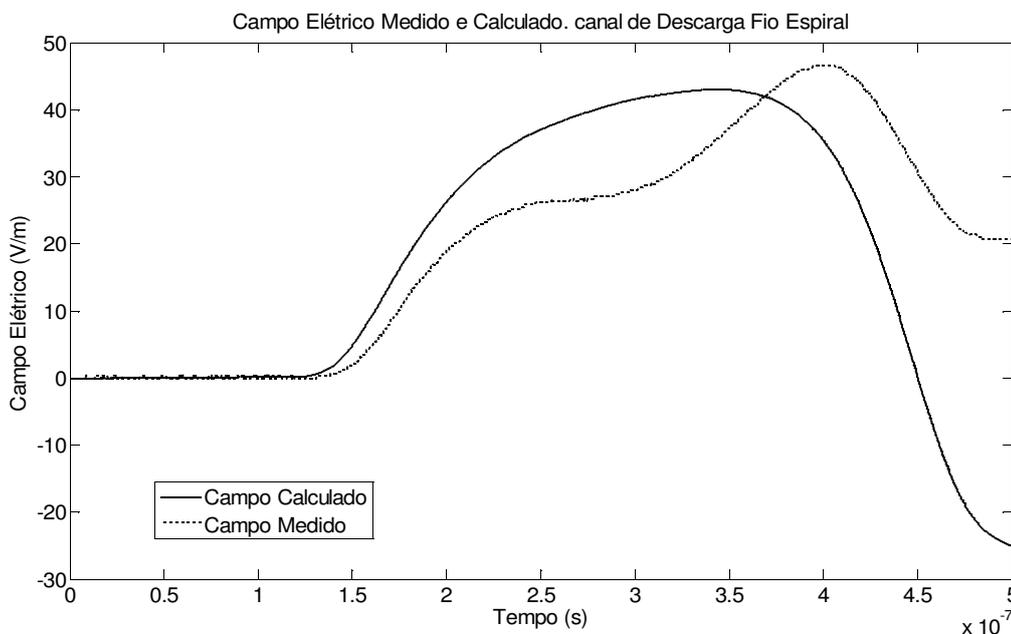


Figura 4.58: Comparação entre campo medido e calculado a 120cm do canal

Percebe-se, assim como nas comparações do canal fio condutor, perceber a relação entre o sinal medido e calculado no que se diz respeito às formas de onda, nas quais observa-se a correlação entre as taxas de subida dos sinais. A divergência quanto as amplitudes também ocorre para o canal espiral, mas como já dito anteriormente, será objeto de estudos futuros.

### b) Medições de Campo Magnético

As medições com o sensor de campo magnético foram realizadas em 4 pontos (P1 a P4) com distâncias radiais em relação ao canal de descarga de 20, 70, 120 e 170 cm. Os campos foram medidos em três direções: tangencial, vertical e radial.

A Figura 4.59 mostra os valores de tensão medidos pelo sensor de campo magnético tangencial para os cinco pontos de distância em estudo. Já a Figura 4.60 mostra o sinal de campo correspondente aos sinais medidos de tensão da Figura 4.59. O sinal medido pelo sensor foi integrado, de acordo com a equação 30.

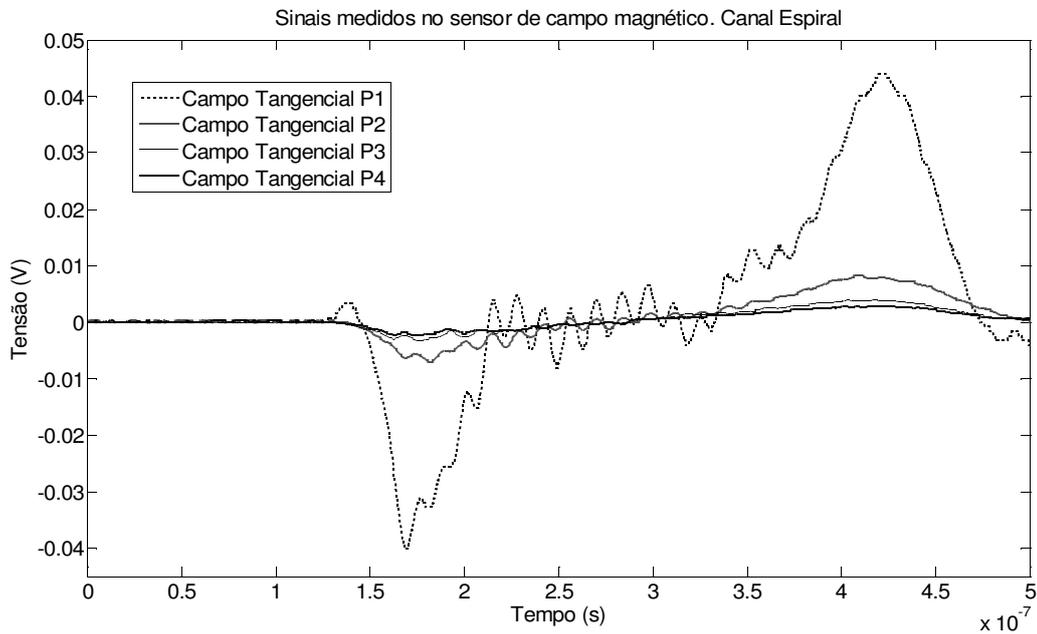


Figura 4.59: Sinais medidos no sensor de campo magnético tangencial.

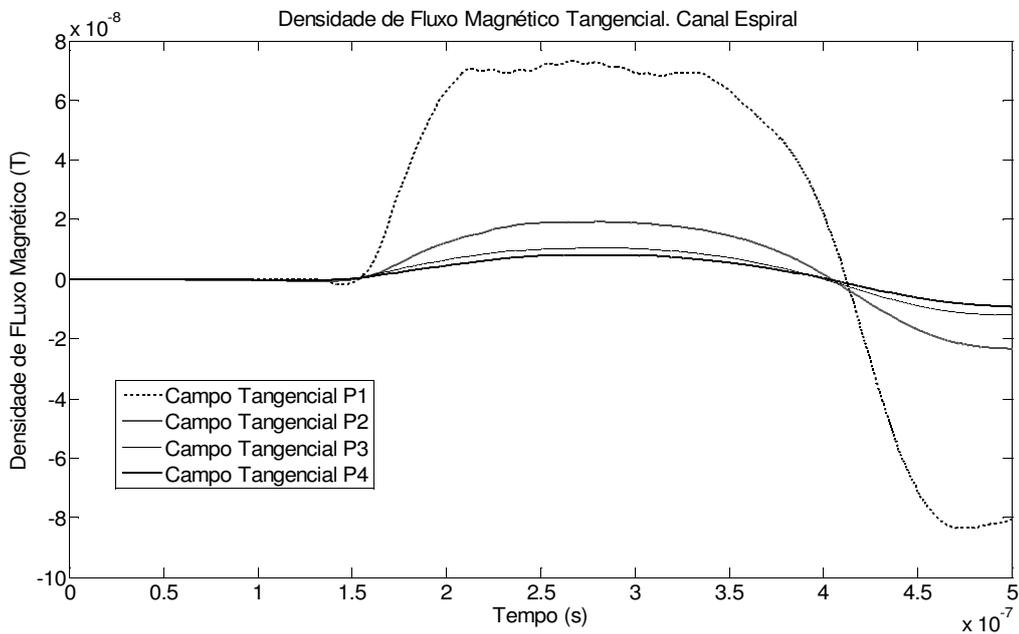


Figura 4.60: Valores de Campo Medido, via integração do sinal.

Os sinais de campo medido foram comparados com o cálculo de campo, o resultado está demonstrado nas Figuras 4.61 a 4.63.

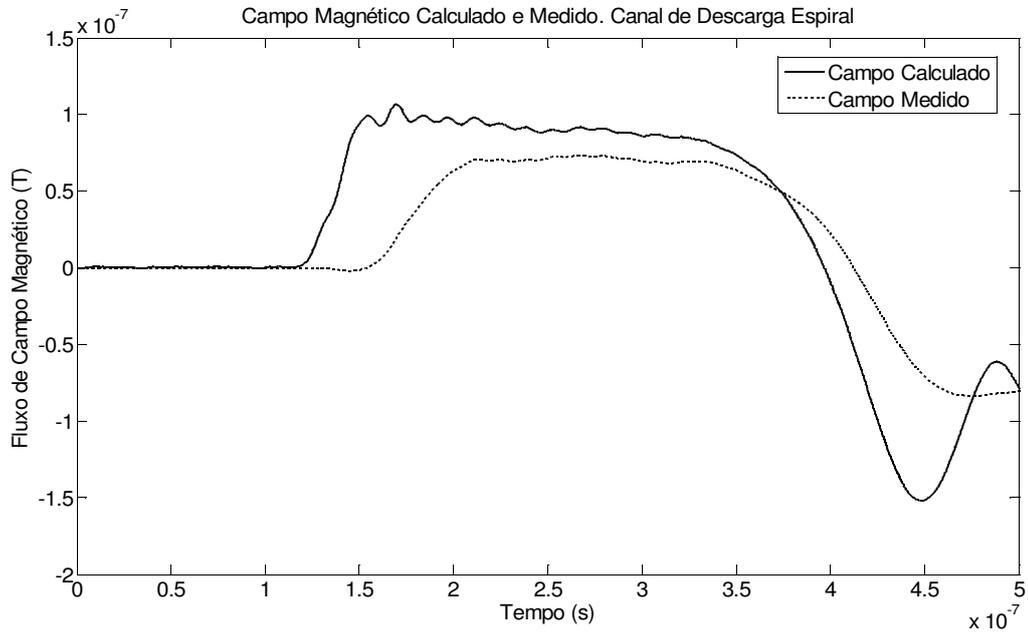


Figura 4.61: Comparação entre campo medido e calculado a 20cm do canal

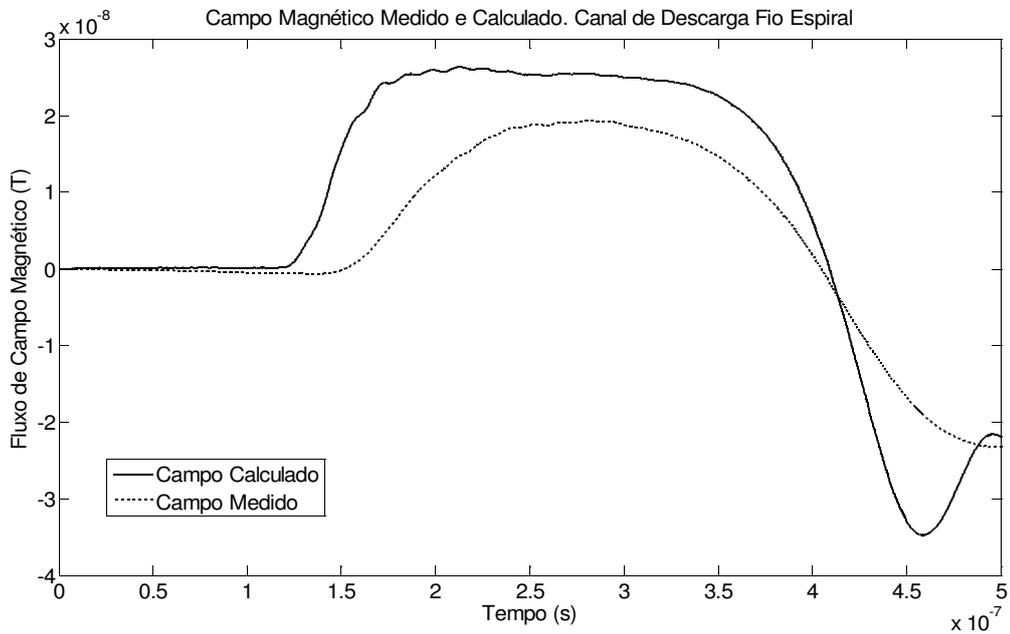


Figura 4.62: Comparação entre campo medido e calculado a 70cm do canal

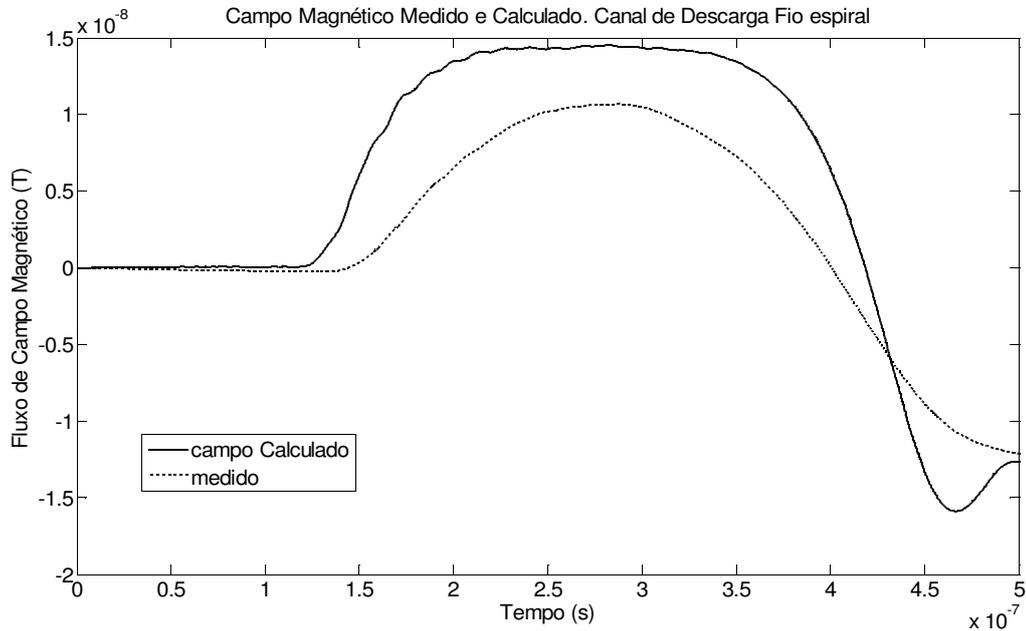


Figura 4.63: Comparação entre campo medido e calculado a 120cm do canal

As ondas medidas e calculadas possuem uma correlação, percebe-se o campo medido com atenuação na sua taxa de subida em relação ao sinal calculado, o que está correto devido à atenuação causada pela banda de passagem do sensor.

As Figuras 4.64 e 4.65 mostram os valores de campo medidos para as componentes de campo vertical e radial, respectivamente.

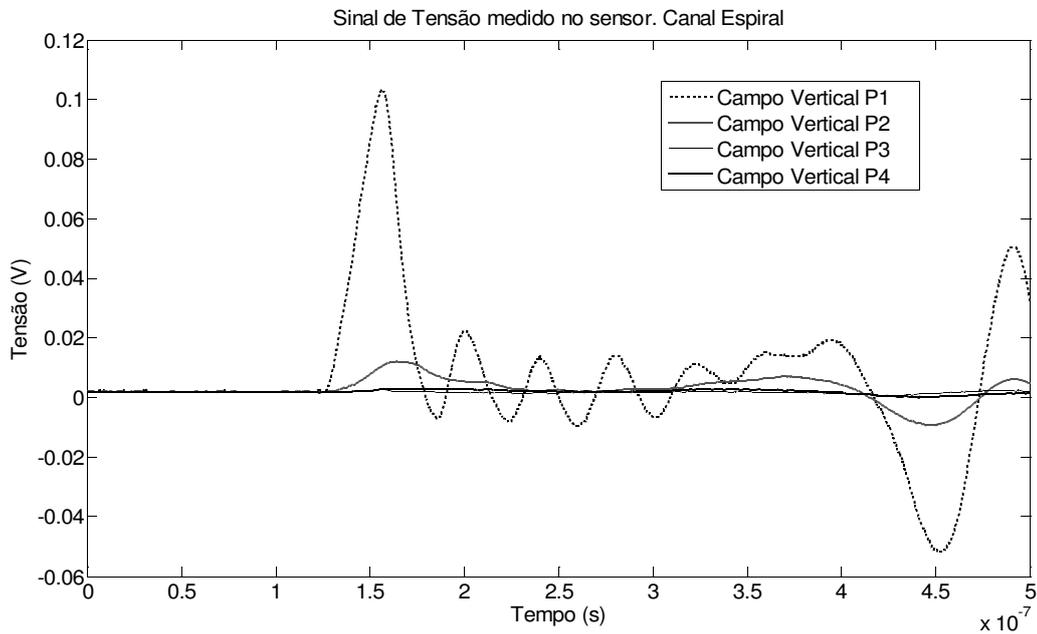


Figura 4.64: Valores de tensão medidos no sensor de campo magnético, direção vertical.

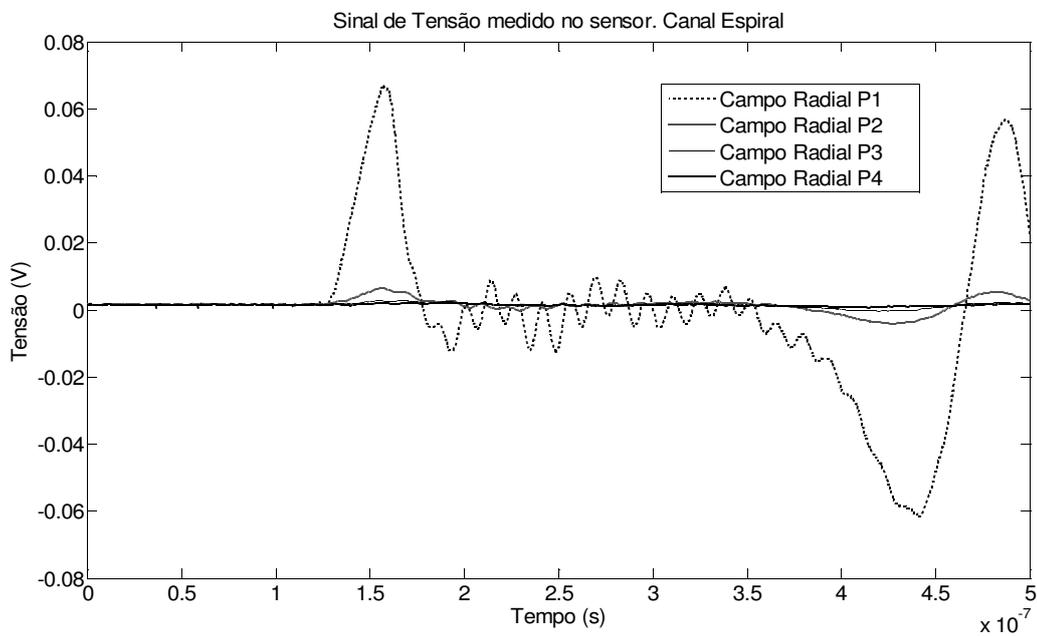


Figura 4.65: Valores de tensão medidos no sensor de campo magnético, direção radial.

Os valores de campo medido nas direções vertical e radial tem valores consideráveis quando comparados com os valores da componente tangencial, como

pode ser observado nas Figuras 4.64 e 4.65. Sendo nas proximidades do canal maiores que o sinal medido do campo tangencial, todavia caem rapidamente com a distância. Tem-se então que esses campos não podem ser desconsiderados quando se modela, em cálculos, o canal espiral por um fio condutor simples. Este é um resultado importante já que o canal espiral é utilizado em simulações analógicas em modelo reduzido para substituir o fio no qual a velocidade de propagação das ondas é próxima a da luz saindo da faixa de velocidade do fenômeno real. No fio condutor, esses campos tem valores desprezíveis (Figuras 4.48 e 4.49).

### 4.3.2 – Discussão dos Resultados

As Tabelas 4.5 e 4.6 resumem os resultados obtidos no item 4.3.1 com os valores de pico dos sinais para os dois tipos de canal de descarga utilizados, tanto para o campo elétrico quanto para o magnético. Com isso é realizada uma análise dos resultados obtidos a fim de observar a completa caracterização dos campos gerados pelos canais.

*Tabela 4.5: Valores de Campo Elétrico vertical para os três canais*

Distância (cm)	Campo Elétrico (V/m)	
	Fio de Cobre	Espiral
20	207,53	344,82
70	52,84	59,87
120	27,22	20,11
145	20,19	13,09
170	18,28	9,26

Como pode ser visto na tabela 4.5, o comportamento do campo elétrico para os dois canais é similar pois todos decrescem com a distância. As medições realizadas demonstram o comportamento dos sinais medidos, com a atenuação da taxa de subida com o aumento da distância e diminuição da amplitude, de acordo com as formas de ondas obtidas nas medições de cada canal. Não é possível uma comparação direta entre os canais devido às diferenças nas velocidades de

propagação e amplitudes das correntes.

Na Tabela 4.6, tem-se os valores de tensão medidos pelo sensor de campo magnético. Através desses dados, pode-se perceber que os valores de campos radial e vertical para o canal fio condutor são desprezíveis se comparados com os gerados pelo outro canal, 10 vezes menores. Para o campo magnético tangencial, o comportamento é similar entre o fio e o espiral. Já o campo vertical é bem percebido no canal espiral, no qual seu valor nos dois primeiros pontos supera o do campo tangencial.

*Tabela 4.6: Valores medidos pelo sensor de campo magnético para os três canais de descarga.*

Distância (cm)	Campo Magnético Tangencial		Campo Magnético Radial		Campo Magnético Vertical	
	Fio – Tensão Sensor (V)	Espiral Tensão Sensor (V)	Fio – Tensão Sensor (V)	Espiral Tensão Sensor (V)	Fio – Tensão Sensor (V)	Espiral Tensão Sensor (V)
20	0,3020	0,0402	0,0270	0,0672	0,0220	0,1032
70	0,0856	0,0070	0,0063	0,0066	0,0071	0,0122
120	0,0532	0,0034	0,0064	0,0030	0,0048	0,0026
170	0,0424	0,0024	0,0074	0,0022	0,0054	0,0028

Com base nas medições realizadas para os canais verticais, pode-se observar que o canal espiral gera campo magnético nas direções vertical e radial que não são previstos na teoria e estes campos caem rapidamente com a distância. Em estudos de tensões induzidas por descargas atmosféricas, nas quais são considerados apenas os campos magnético tangencial e elétrico vertical, faz-se necessária a observação desses campos e sua possível influência nos resultados.

As medições confirmam que o comportamento dos campos elétrico vertical e magnético tangencial do canal espiral é compatível com o previsto pela teoria (modelos de canal de descarga por Linha de Transmissão – L.T.) , portanto, este pode ser usado para representar a baixa velocidade de propagação da corrente de retorno do fenômeno real. Todavia existem componentes de campo em direções não contempladas nos cálculos que devem ser melhor avaliadas.

# Capítulo 5

## Conclusões e Propostas de Continuação

### 5.1 - Conclusões

Este trabalho consistiu de dois objetivos complementares. O primeiro foi a construção e calibração dos sensores para medição dos campos eletromagnéticos e o segundo foram as medições e análise para a caracterização dos campos eletromagnéticos gerados pelos canais de descarga estudados. Ambos os objetivos foram satisfatoriamente alcançados.

No que diz respeito ao primeiro objetivo, os sensores foram construídos, com materiais simples e seu funcionamento foi avaliado. Foram realizadas medições que demonstraram o correto funcionamento dos sensores bem como do método de calibração, para ambos os campos (elétrico e magnético). O método proposto de calibração para o sensor de campo magnético mostrou-se eficaz. Para o campo elétrico também foram encontrados resultados satisfatórios. Ficaram, então, os sensores e a calibração verificados, para frequências menores que 10MHz, restando algumas ressalvas quanto à relação entre as dimensões do modelo e dos sensores, principalmente nas medições de linha de transmissão (canal horizontal).

A medição dos campos gerados por canais de descarga artificiais foi feita por meio dos sensores construídos e a análise dos resultados levou à caracterização dos campos, que é uma importante contribuição deste trabalho, já que há pouca literatura específica no assunto. O estudo focou-se na intensidade e nas direções dos campos observando seu decaimento com a distância. As direções foram fixadas pelo sensor que captava apenas os campos nas direções de interesse ao estudo, a intensidade foi avaliada através de comparações entre os canais e o decaimento observado para cada canal.

Um passo inicial para o melhor entendimento dos campos gerados pelo canal de descarga espiral foi dado. Seu comportamento foi analisado e, como pôde ser visto, o canal espiral gera campos elétrico vertical e magnético tangencial de acordo

com o previsto pela teoria (modelos de canal de descarga por Linha de Transmissão). Portanto pode ser usado para representar a baixa velocidade de propagação da corrente de retorno do fenômeno real.

Foi possível observar também que o canal espiral gera campos magnéticos nas direções radial e vertical não levados em conta na teoria, com valores bem intensos, mas que, de acordo com o estudado, caem muito rapidamente com a distância. Esta informação é importante pois pode-se dizer que este é um motivo pelo qual o canal espiral pode ser usado e seus campos importantes nos estudos serem iguais aos do fio, já que o decaimento, com a distância, dos campos em outras direções é muito rápido.

## **5.2 - Propostas de Continuação**

A continuação deste trabalho fazer-se-á com o implementação do modelo e estudo dos campos gerados pelos canais de descarga, em solo real. Também poderia ser utilizado, o canal espiral, agora com seus campos bem caracterizados, no estudo de tensões induzidas em solo real. Os sensores se mostraram eficazes; todavia, pode-se ainda implementar melhorias, estudando variações de dimensões e materiais. A construção de um sensor para campos elétrico horizontais ainda se faz necessária.

Uma melhor análise do comportamento das medições em frequências maiores que 10MHz também é proposto como continuação deste trabalho.

A implementação de um canal com perdas, similar ao mostrado no Anexo B, e a avaliação do campos gerados por ele, também é uma proposta de continuação deste trabalho.

## Referências Bibliográficas

- [1] Transmission Line Reference Book – 345kV and Above, EPRI – Electric Power Research Institute, 2 ed, 1982.
- [2] ASSIS, Sandro de Castro, Cálculo de Tensão Induzida por Descargas Atmosféricas em Linhas Aéreas Polifásicas e Multiaterradas :Implementação no PSCAD®/EMTDC, Dissertação (Mestrado) UFMG, 2007
- [3] UMAN, M.A., Natural Lightning, IEEE Trans. on Ind. Applications, vol. 30, May/Jun1994
- [4] UMAN, M.A., KRIDER, E.P., A Review of Natural Lightning: Experimental Data and Modeling,IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, vol. EMC-24, May1982
- [5] BOAVENTURA, W. C., Estudo da Tensão Induzida em Linhas Aéreas por Descargas Atmosféricas Utilizando Técnicas de Modelo Reduzido,Dissertação (Mestrado) UFMG, 1990
- [6] MASTER, M.J., UMAN, M.A., Lighting Induced Voltages on Power Lines: Experiment,IEEE Trans. on Power App. and Systems, Vol. PAS-103, September1984
- [7] SCHONE, J., UMAN, M.A., RAKOV, V.A., JERUALD, J., et al., Experimental Study of Lightning-Induced Currents in a Buried Loop Conductor and a Grounded Vertical Conductor, IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, vol. 50, February2008
- [8] YOKOYAMA, S. ; YAMAMOTO, K.; KINOSHITA, H., Analogue simulation of lightning induced voltages and its application for analysis of overhead-ground-wire effects, IEE Proceedings, Vol. 132, Pt. C.,p. 208-216, July 1985
- [9] FONSECA, A. F. L, Cálculo de Campo Eletromagnético e análise do mecanismo da tensão induzida em linhas aéreas devido a descargas atmosféricas,Dissertação (Mestrado), 1990

- [10] SANTOS, M. L. G. V., Estudo e Construção de uma Antena para Gerar Campos Eletromagnéticos similares aos Campos criados por uma descarga atmosférica, Tese (Doutorado), 2000
- [11] KRAUS, J. D.; CARVER, K. R., Eletromagnetismo, Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1978
- [12] PAULINO, J.O.S., Uma contribuição ao estudo da proteção de redes elétricas contra tensões induzidas por Descarga Atmosférica, Tese (Doutorado), UNICAMP, Campinas, 1994
- [13] FISHER, F. A.; ANDERSON, U. G.; HAGENGUTH, J. H., Determination of Lightning Response of Transmission Line by Means of Geometrical Models, Trans. Amer. Inst. Elect. Engrs, p. 1725-1735, February 1960
- [14] ISHII, M.; MICHISHITA, K.; HONGO, Y., Experimental study of Lightning-induced voltage on an overhead wire over lossy ground, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 41, February 1999
- [15] AGRAWAL, A. K.; PRICE, H. J.; GURBAXIANI, S. H. , Transient response os multiconductor transmission lines excited by a nonuniform electromagnetic field, IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 22,,p. 119-129, May 1980
- [16] LOPES, I. J. S., Estudo do Camporamento de um condutor Multi-Aterrado frente a tensões induzidas por descargas atmosféricas, III Encontro sobre Proteção Elétrica, Brasília, 22-24 de Outubro de 1991
- [17] RIBEIRO, E. J., Uma Contribuição ao Estudo dos Campos Eletromagnéticos Gerados por Descargas Atmosféricas, Tese (Doutorado), 2005
- [18] ZAGO, F., Desenvolvimento de um Programa Computacional Visando o Estudo das Tensões Induzidas por Descargas Atmosféricas, Dissertação (Mestrado), UNICAMP, Campinas 2004

- [19] PIANTINI, A.; JANISZEWSKI, J. M.; BORGHETTI, A.; NUCCI, C. A.; PAOLONE, M., A scale Model for the study of the LEMP response of Complex Power Distribution Networks, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22.,p. 710-720, January 2007
- [20] XYZs of Oscilloscopes, Tektronix, 2001
- [21] ABCs of Probes - Primer, Tektronix, 2005
- [22] BOAVENTURA, W.C., COELHO, F.G.F., Experimental study of lightning protection systems: Currente distribution, effect of discharge channel presence and induced voltages, In 10° International Symposium on High Voltage Engeneering, pag. 141-144., Canada, August 1997
- [23] MATLAB R2006a, The language of technical computing, The MathWorks Inc., 2006
- [24] Instruction Manual, The P6205 FET Probe, Tektronix, 1991
- [25] SMITH, D. C., Current Probes, More Useful Than You Think, IEEE EMC Symposium, vol. 1.,p. 284-289, August 1998
- [26] SMITH, D. C., Signal and Noise Measurement Techniques Using Magnetic Field Probes, IEEE EMC Symposium, vol. 1.,p. 559-563, August 1999
- [27] DECARLO, R.A., LIN, P., Linear Circuit Analysis. Time Domain, Phasor and Laplace Transform Approches, Oxford University Press, ,2ª Ed. 2001
- [28] PSpice Student Version Release 9.1, Cadence Design Systems.
- [29] PAUL, Clayton R, Introduction to electromagnetic compatibility, Wiley-Interscience, 2ª Ed., 2006

[30] MOREIRA, R. K., Investigações Relativas às Linhas de Transmissão Horizontal e Vertical de perdas elevadas, Tese (Doutorado), UFMG, Belo Horizonte, 2004

[31] FONSECA, A. F. L; PAULINO, J.O.S., Cálculo de Campo Eletromagnético e análise do mecanismo da tensão induzida em linhas aéreas devido a descargas atmosféricas, III Encontro sobre Proteção Elétrica, Brasília, 22-24 de Outubro de 1991

[32] GREWOOD, A., Electrical Transients in Power Systems, John Wiley & Sons Inc., 2ª Ed., Nova York , 1991

## Anexo A: Cálculo do Campo eletromagnético do Canal Vertical

O método utilizado para os cálculos do campo eletromagnético foi proposto por Fonseca [9] em sua dissertação de mestrado e será descrita neste anexo.

O cálculo do campo eletromagnético é realizado a partir das equações de Maxwell sob condições de variação no tempo e com a utilização dos potenciais vetor e escalar. A corrente foi considerada um degrau se propagando sem amortecimento, distorção ou atraso ao longo da linha. Os resultados de campo encontrado para a corrente degrau foram estendido para qualquer outra forma de onda baseado no princípio da superposição e utilizando as integrais de Duhamel [31].

### 1. O método de cálculo

Todo o cálculo é baseado nas equações de Maxwell

$$\vec{\nabla}_x \vec{E} = -\frac{\partial \mu \vec{H}}{\partial t} \quad (\text{A.1})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \epsilon \vec{E} = \rho \quad (\text{A.2})$$

$$\vec{\nabla}_x \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \epsilon \vec{E}}{\partial t} \quad (\text{A.3})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \mu \vec{H} = 0 \quad (\text{A.4})$$

Percebe-se que as fontes de campo eletromagnético são a densidade de carga  $\rho$  e a distribuição de corrente  $\vec{J}$ . Sob condições de variação no tempo essas grandezas não são independentes, se relacionando de acordo com a equação da continuidade

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (\text{A.5})$$

As equações de Maxwell são suficientes para o cálculo do campo eletromagnético todavia isto pode se tornar complexo. De acordo com Fonseca [9] o método usual é obter primeiramente os potenciais vetor  $\vec{A}$  e escalar  $\phi$  definidos a partir das equações de Maxwell e, posteriormente, o campo eletromagnético. Fica-se então com as seguintes equações

$$\vec{E} = -\nabla \phi + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (\text{A.6})$$

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A} \quad (\text{A.7})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{A.8})$$

$$\vec{\nabla}^2 \phi - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = \frac{-\rho}{\epsilon} \quad (\text{A.9})$$

$$\vec{\nabla}^2 \vec{A} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = -\mu \vec{J} \quad (\text{A.10})$$

Este conjunto de equações define um sistema de 11 equações independentes (uma para cada equação escalar e 3 para cada equação vetorial). Neste ponto através da especificação de  $\vec{J}$  poderia se fazer os cálculos de campo. Contudo é proposto um outro método para os cálculos substituindo as equações A.9 e A.10 pelos potenciais escalar (A.11) e vetor (A.12) escrito em função das distribuições de carga e corrente.

$$\phi(r, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_{V'} \frac{\rho(r', t - |\vec{r} - \vec{r}'|/v_0)}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dV' \quad (\text{A.11})$$

$$\vec{A}(r, t) = \frac{\mu}{4\pi\epsilon} \int_{V'} \frac{\vec{J}(r', t - |\vec{r} - \vec{r}'|/v_0)}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dV' \quad (\text{A.12})$$

onde  $\vec{r}$  e  $\vec{r}'$  se referem ao sistema de coordenadas da Figura 1A.

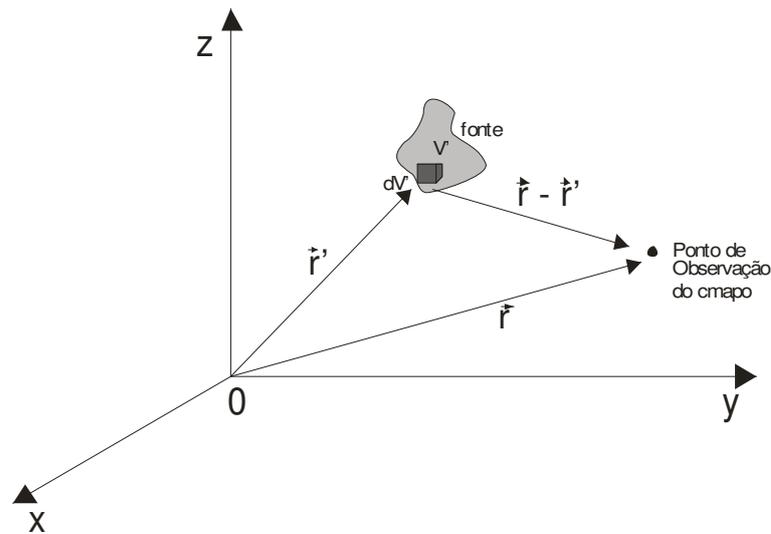


Figura 1A: Sistema de Coordenadas de referência para o potencial vetor e escalar

De posse desse sistema de equações A.6, A.7, A.8, A.11 e A.12 e sabendo que a equação de continuidade (A.5) é satisfeita neste conjunto pode-se calcular o campo seguindo os seguintes passos:

- Especificar a distribuição de corrente  $\vec{J}$  ;
- Obter a distribuição de carga  $\rho$  através de A.5;
- Calcular os potenciais vetor e escalar através de A.11 e A.12;
- Calcular o campo através das equações A.6, A.7 e A.8.

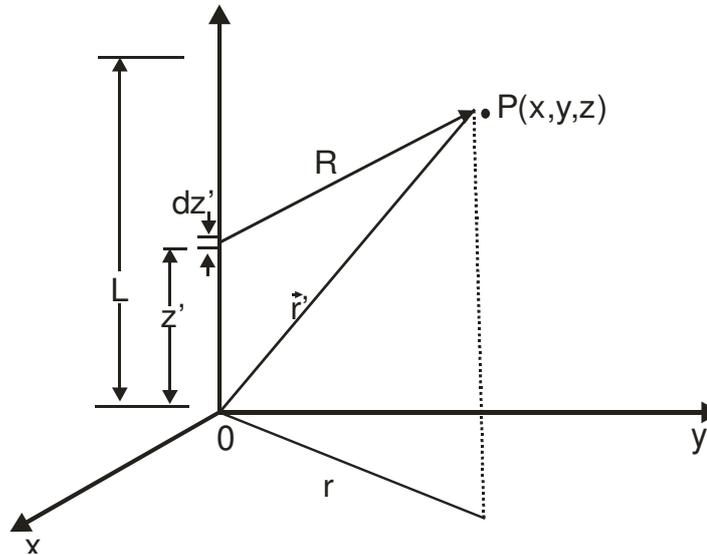


Figura A.2: Geometria da fonte e do ponto de observação do campo

Os cálculos são feitos considerando o solo condutor perfeito. A corrente foi considerada um degrau de amplitude  $I_0$ , se propagando sem amortecimento, distorção ou atraso ao longo de uma linha.

$$\vec{I}(z', t) = I_0 \cdot U(v, t - z') \vec{a}_z \quad \text{para o canal} \quad (\text{A.13})$$

$$\vec{I}(z', t) = I_0 \cdot U(v, t + z') \vec{a}_z \quad \text{para a imagem} \quad (\text{A.14})$$

A densidade linear de carga obtida a partir de A.5 e aplicando-se a relação para a corrente fica

$$\rho_l(z', t) = \frac{I_0}{v} \cdot U(v, t - z') \quad \text{para o canal} \quad (\text{A.15})$$

$$\rho_l(z', t) = -\frac{I_0}{v} \cdot U(v, t + z') \quad \text{para a imagem} \quad (\text{A.16})$$

A densidade de carga no canal é devido à propagação da corrente e correspondente a uma distribuição uniforme.

Para o cálculo do potencial vetor, a fonte de campo é linear confinada no eixo  $z'$ , portanto o potencial terá também apenas componente em  $z'$ . Aplicando a corrente

especificada em A.13 e A.14 em A.12 tem-se

$$A_z = \frac{\mu I_0}{4\pi} \cdot [f(z) + f(-z)] \quad (\text{A.17})$$

onde

$$f(z) = \ln[(\beta \cdot c \cdot t - z) + \sqrt{(\beta \cdot c \cdot t - z)^2 + (1 - \beta^2) \cdot r^2}] - \ln(1 - \beta) - \ln(\sqrt{r^2 + z^2}) \quad (\text{A.18})$$

sendo  $\beta = v/c$  a relação entre a velocidade de propagação da onda no canal e a velocidade da luz.

O potencial escalar também fica com componente apenas no eixo  $z'$ , substituindo a densidade de carga em A.11 fica

$$\phi = \frac{I_0}{4\pi\epsilon_0 v} \cdot [-g(z) + g(-z) + f(z) - f(-z)] \quad (\text{A.19})$$

onde  $f(z)$  é igual a equação A.18 e  $g(z)$  é

$$g(z) = \ln[\sqrt{r^2 + (L - z)^2} + L - z] - \ln(\sqrt{r^2 + z^2}) \quad (\text{A.20})$$

O campo eletromagnético pode ser calculado utilizando as equações A.6, A.7 e A.8 e os potenciais vetor (equação A.17) e escalar (equação A.19). O campo será calculado em  $z=0$ , junto ao solo, onde por condição de fronteira o campo elétrico é vertical. O campo magnético é tangencial já que o potencial vetor tem apenas componente na direção  $\vec{a}_z$ . Tem-se então:

$$r_1 = r$$

$$\vec{E} = \left[ -\frac{\partial \phi}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial t} \right] \vec{a}_z = (E_{zc} + E_{znc}) \vec{a}_z \quad (\text{A.21})$$

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial \vec{A}_z}{\partial y} \vec{a}_x - \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial \vec{A}_z}{\partial x} \vec{a}_y = H_x \vec{a}_x + H_y \vec{a}_y \quad (\text{A.22})$$

Substituindo as equações A.17 e A.19 em A.21 e A.22 obtém-se para  $z=0$

$$E_{zc} = \frac{I_0}{2\pi\epsilon v} \cdot \left[ \frac{1}{\sqrt{(\beta \cdot c \cdot t)^2 + (1-\beta^2) \cdot r^2}} - \frac{1}{r} \right] \quad (\text{A.23})$$

$$E_{znc} = \frac{I_0}{2\pi\epsilon v} \cdot \left[ \frac{-\beta^2}{\sqrt{(\beta \cdot c \cdot t)^2 + (1-\beta^2) \cdot r^2}} \right] \quad (\text{A.24})$$

$$H_x = \frac{I_0}{2\pi} \cdot \frac{y}{r} \cdot \left[ \frac{(1-\beta^2) \cdot r}{(\beta \cdot c \cdot t) \cdot k + k^2} - \frac{1}{r} \right] \quad (\text{A.25})$$

$$H_y = -\frac{I_0}{2\pi} \cdot \frac{x}{r} \cdot \left[ \frac{(1-\beta^2) \cdot r}{(\beta \cdot c \cdot t) \cdot k + k^2} - \frac{1}{r} \right] \quad (\text{A.26})$$

onde:  $k = \sqrt{(\beta \cdot c \cdot t)^2 + (1-\beta^2) \cdot r^2}$  .

$E_{zc}$  e  $E_{znc}$  são as componentes conservativa e não-conservativa do campo elétrico respectivamente. O intervalo de tempo de validade destas expressões é

$$r/c \leq L/v + \sqrt{L^2 + r^2}/c \quad .$$

O grupo de equações A.23 a A.26 permite o cálculo de campo elétrico e magnético de um canal de descarga percorrido por um degrau de corrente. Este resultado pode ser estendido para uma forma de onda arbitrária através do princípio da superposição e integrais de Duhamel.

## 2 – Extensão do resultado de campo para uma forma de onda qualquer

Em qualquer sistema linear uma entrada S1 produz uma resposta R1 e uma

entrada S2 produz uma resposta R2 . Se forem aplicado as entradas S1 e S2 juntas a resposta será R1+R2 e isso é válido não somente para sistemas no qual são aplicados apenas 2 entradas mas também para qualquer número finito de entradas.

A extensão da solução de cálculo de campo para uma forma de onda arbitrária pode ser obtida pelo princípio da superposição, já que a uma forma de onda de corrente arbitrária pode ser aproximada pela soma de sucessivos degraus de corrente, com mostra a Figura A.3, e a aproximação é tanto melhor quanto menor for o  $\Delta\tau$  .

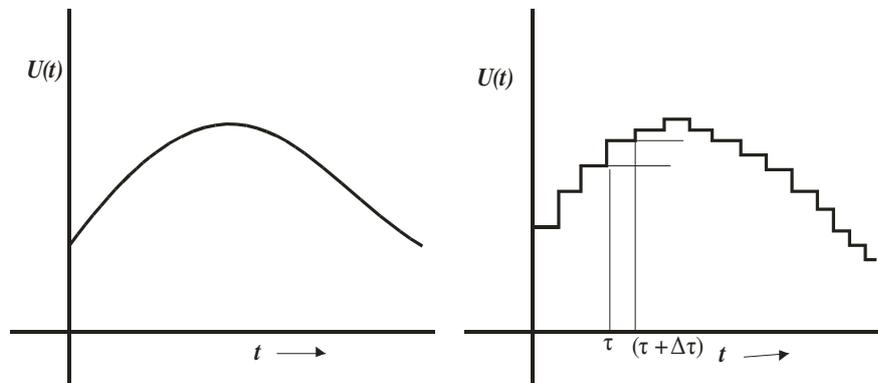


Figura A.3: Forma de onda arbitrária e sinal aproximado através da soma de sucessivos degraus

O campo será a soma apropriada dos resultados obtidos para cada degrau de corrente. De acordo com a Figura A.3 e o princípio da superposição a resposta a uma sucessão de degraus será

$$U(0)u_1(t) + \sum U'(\tau)u_1(t-\tau)\Delta\tau \quad (\text{A.27})$$

Considerando o  $\Delta\tau$  infinitesimal a resolução será realizada através das integrais de Duhamel

$$u(t) = U(0)u_1(t) + \int_0^t U'(\tau)u_1(t-\tau)d\tau \quad (\text{A.28})$$

onde  $u(t)$  é a resposta a forma de onda arbitrária;

$U(0)$  é o valor inicial da entrada;

$u_1(t)$  é a resposta ao degrau;

$U'(\tau)$  é a derivada do valor da entrada.

A equação A.28 é a integral de Duhamel. O campo para uma forma de corrente será realizado através da equação A.27, a qual soma as respostas ocasionadas por cada degrau de corrente utilizado na aproximação da forma de onda. Desta forma o campo eletromagnético para qualquer onda de corrente será os resultados obtidos nas equações A.23 a A.26 aplicados na equação A.27.

## **Anexo B – Medições realizadas com o canal resistivo de altas perdas.**

Neste anexo estão colocadas as medições realizadas com o fio resistivo de altas perdas apenas a título de ilustração uma vez que para o valor de resistividade deste canal ele perde as características de uma linha de transmissão.

### **B.1 - Fio Resistivo como Linha de transmissão**

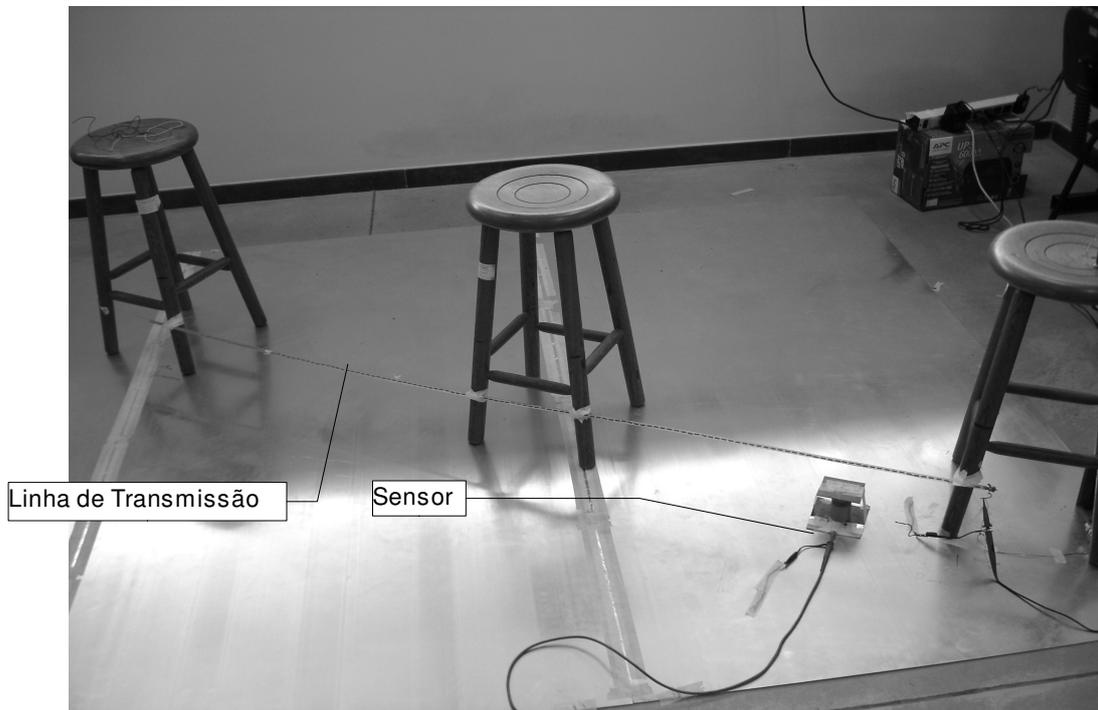
Neste item tem-se os resultados dos campos elétrico e magnético medidos abaixo da linha de transmissão representada como um canal composto de resistências conectadas em série na horizontal. O modelo utilizado apresentou as seguintes características:

- Plano condutor de alumínio com 2mm de espessura e dimensões de 3m x 2m;
- Altura da linha ao plano de 14cm;
- Linha modelada com canal resistivo;
- Linha com terminação aberta;

Sistema de medição:

- Ponta de prova de corrente utilizada P6022;
- Cabos coaxiais de 3m para conectar o sensor de campo magnético ao osciloscópio;
- Ponta de prova de tensão P6205 FET para medição de tensão no sensor de campo elétrico;
- Gerador de pulso PG502.

A Figura B.1 mostra a configuração física do modelo implementado no laboratório. Como ocorrido com a linha de transmissão espiral a altura foi de 14cm devido a alta impedância do canal.



*Figura B.1: Montagem física da linha de transmissão fio resistivo no laboratório*

### **a) Medições de Campo Elétrico**

Neste item repetiu-se as medições realizadas em 4.2.1.1, substituindo o fio de cobre pelo canal fio resistivo. Frequências variando entre 500kHz e 30MHz e degrau de tensão.

As Figuras B.2 e B.3 mostram a tensão aplicada na linha de transmissão e a corrente que flui por ela, respectivamente. Pode-se perceber que a corrente tem seu valor diminuído rapidamente, Figura B.3. Isso é devido ao alto valor de resistência da linha, da ordem de  $20\Omega/\text{cm}$ , ocasionando altas perdas. Desta maneira a linha não estava se comportando como uma linha de transmissão. As medições foram realizadas mesmo assim, a fim de avaliar-se os campos gerados. Em trabalhos futuros serão realizadas medições com um canal com perdas menores.

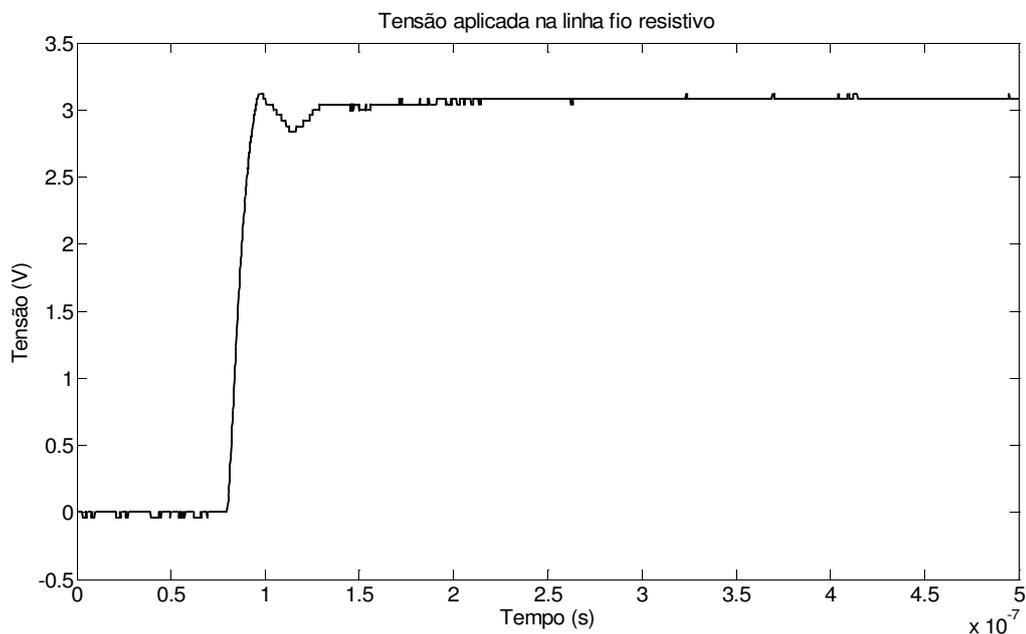


Figura B.2: Degrau de tensão aplicado na linha de transmissão fio resistivo

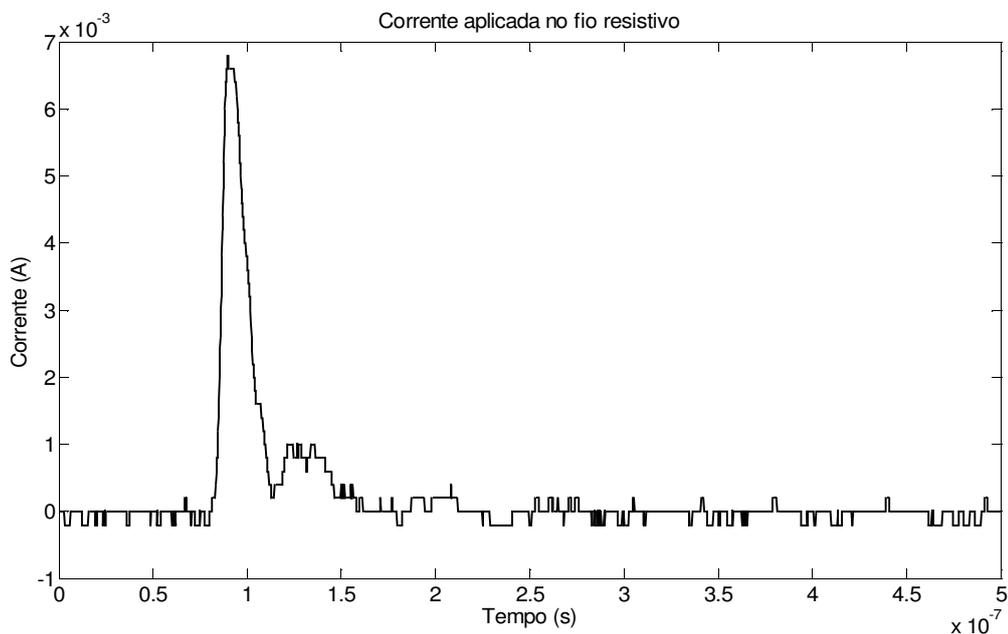


Figura B3: Corrente aplicada. Canal de altas perdas.

Nas Figuras B.4 a B.5 se tem uma avaliação do campo elétrico gerado pela montagem com a linha de alta resistividade. Pode-se observar que o valor de campo

medido próximo ao início da linha tem seus valores e forma de onda mais aproximado do valor de campo calculado. O comportamento geral da linha resistiva deve ser melhor analisado em trabalhos futuros.

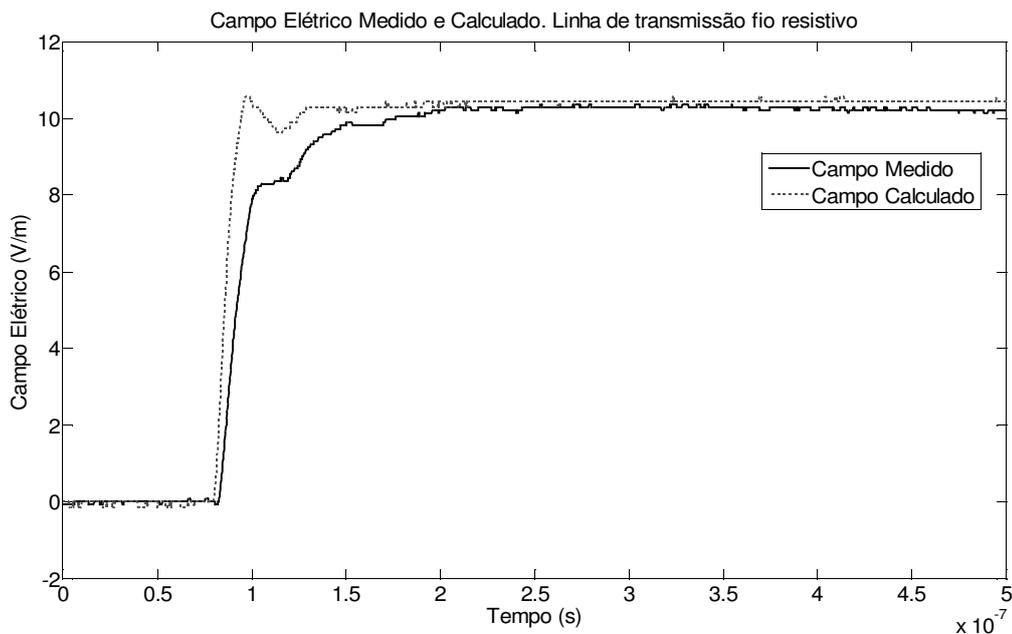


Figura B.4: Relação entre campo elétrico medido no início da linha e calculado

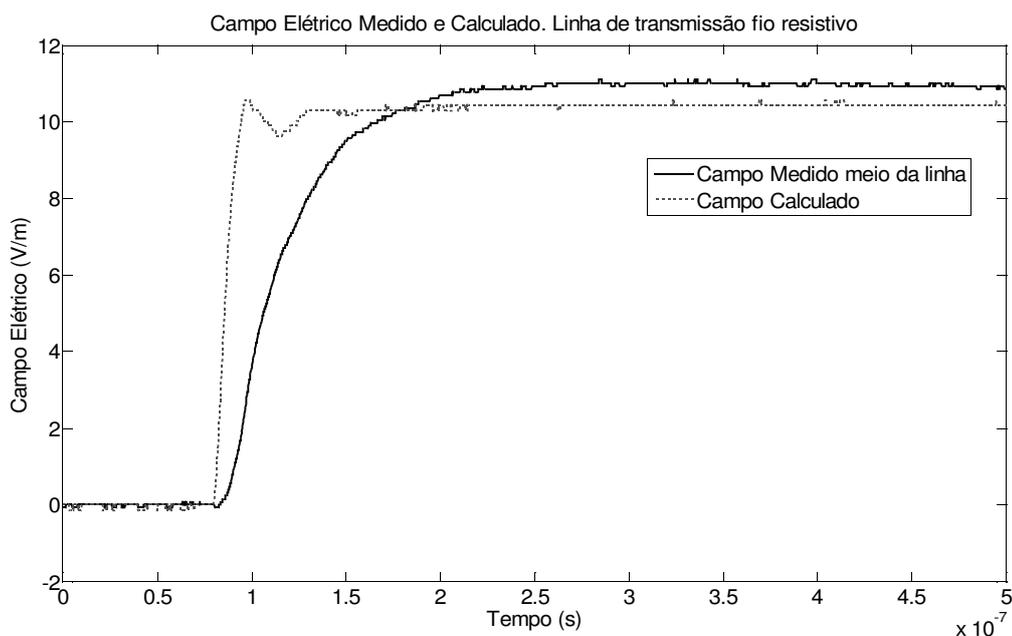


Figura B.5: Relação entre campo elétrico medido no meio da linha e calculado

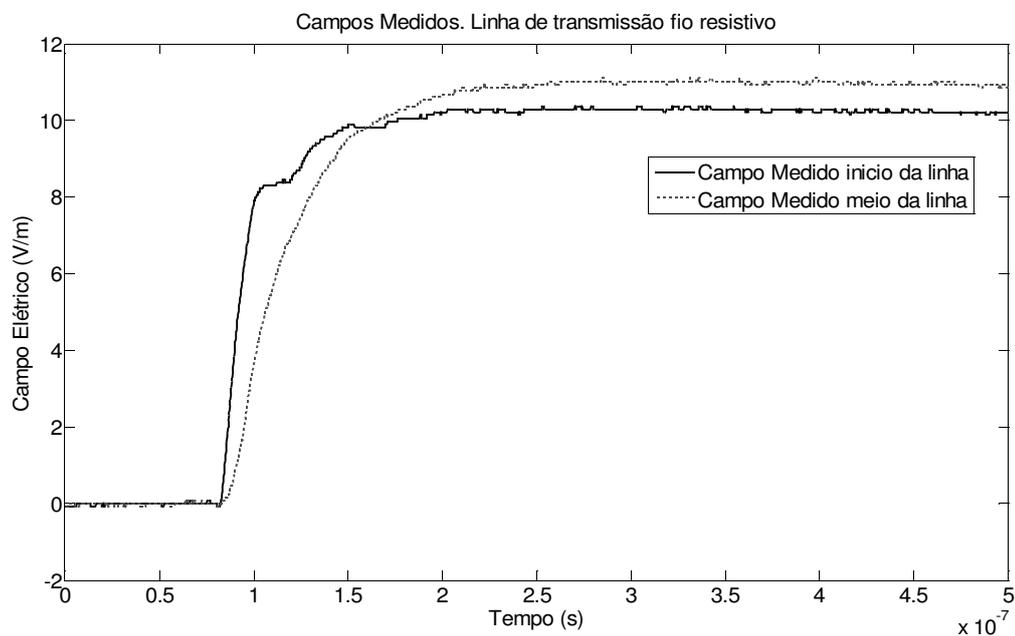


Figura B.6: Campo Elétrico medido no início e no meio da linha de transmissão fio resistivo

Já a Figura B.6 mostra a tensão senoidal aplicada à linha resistiva. Os valores de campo elétrico medidos estão mostrados na Figura B.7 e são comparados com os valores calculados, para uma frequência de 5MHz (Figura B.8). Observa-se valores menores de campo medido comparados com os valores de campo calculado.

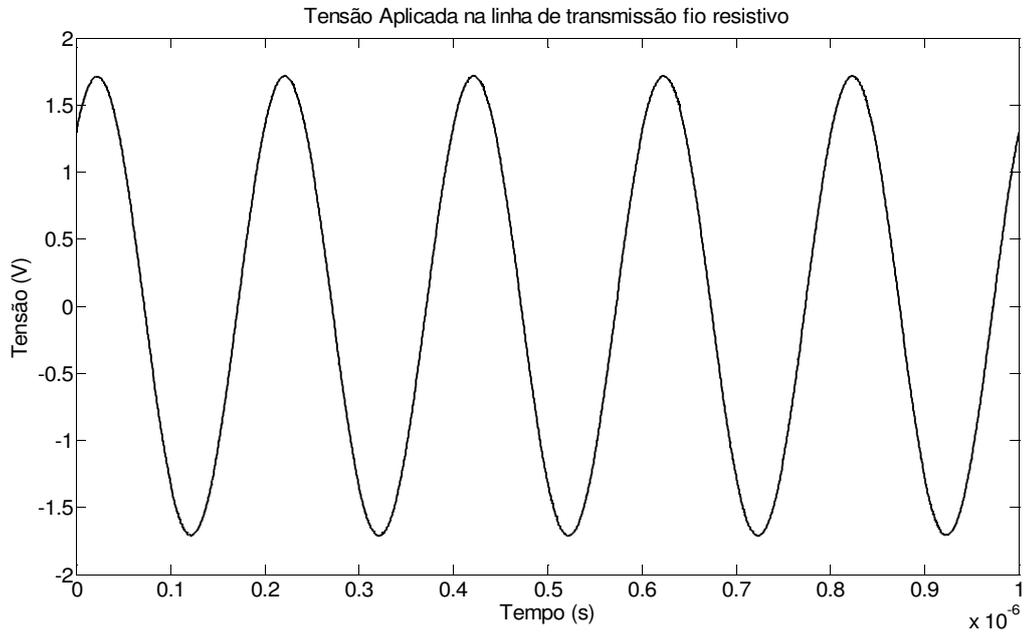


Figura B.7: Tensão aplicada na linha de transmissão fio resistivo, 5MHz

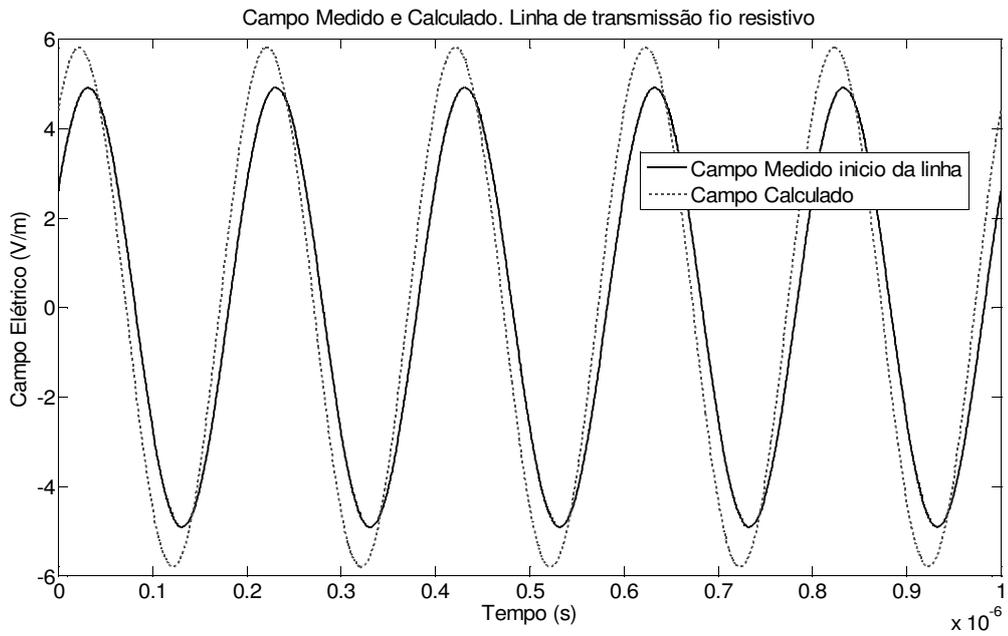


Figura B.8: Relação entre campo medido e calculado, fio resistivo, 5MHz

*Tabela B.1: Comportamento do campo elétrico para as diversas frequências. Fio resistivo como linha de transmissão.*

Frequência (MHz)	Tensão Aplicada na linha (V)	Campo Elétrico Calculado (V/m)	Campo Elétrico Medido no início da linha (V/m)	Erro relativo (%)
0,5	1,265	4,288	4,246	0,99
0,6	1,236	4,190	4,142	1,17
0,9	1,287	4,360	4,304	1,31
1	1,261	4,273	4,187	2,05
3	1,235	4,186	3,827	9,39
5	1,241	4,205	3,565	17,96
7	1,291	4,375	3,411	28,25
10	1,298	4,398	3,295	33,46
12	1,290	4,371	3,071	42,34
14	1,311	4,442	2,947	50,7
16	1,312	4,446	2,847	56,17
18	1,170	3,964	2,769	43,12
20	1,151	3,900	2,619	48,92
24	1,039	3,520	2,266	55,38
27	1,042	3,531	2,103	67,89
30	0,937	3,177	1,856	71,13

A tabela B.1 demonstra que há uma queda no valor de campo medido com a frequência o que era esperado pois a atenuação causada pelo canal de altas perdas para sinais harmônicos no tempo é diretamente dependente da frequência, entre outros parâmetros, segundo Moreira [32]. Por isso, também ocorre a divergência quanto os valores de campo calculados já que, nos cálculos, não consideram-se perdas. Além disso o alta valor de resistividade da linha lhe retira as características de linha de transmissão.

### **b) Medições de Campo Magnético**

Este item apresenta medições realizadas em frequências entre 500kHz a 30MHz, dos campos magnéticos tangencial e longitudinal. É avaliado o comportamento dos campos nesta faixa de frequência. Todas as medições foram realizadas no início da linha de transmissão.

Na Figura B.9 mostra-se a corrente que flui na linha resistiva com frequência

de 1MHz. As Figuras B.10 e B.11 mostram os valores de campo magnético medidos nas direções tangencial e longitudinal, sendo feita uma comparação da componente tangencial medida com o valor obtido através dos cálculos. Observa-se que o valor medido se mantém menor que o calculado.

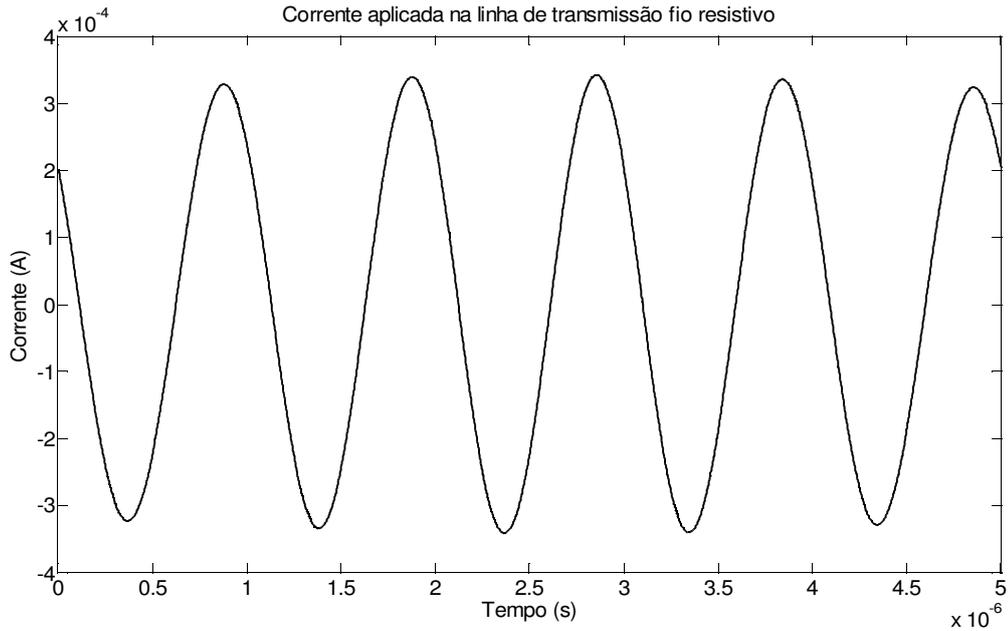


Figura B.9: Corrente aplicada na linha fio resistivo, 1MHz

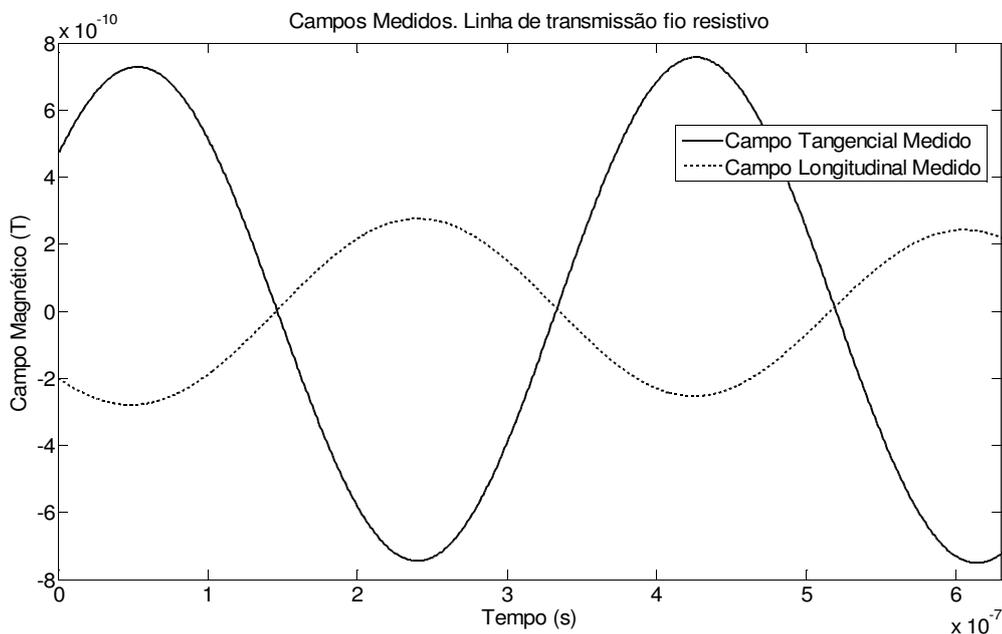


Figura B.10: Campos medidos nas duas direções, 1MHz

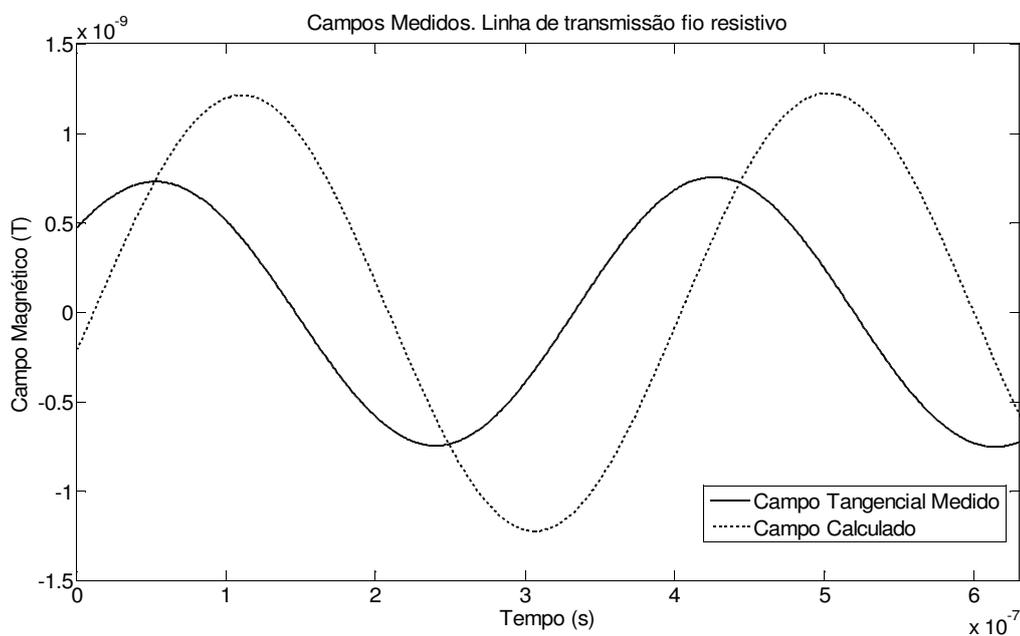


Figura B.11: Campo magnético medido tangencial e calculado, 1MHz

A mesma avaliação anterior foi feita para as outras frequências. Nas Figuras B.12 a B.14 observa-se a corrente aplicada na linha a uma frequência de 14MHz, e

a comparação entre o valor de campo medido e calculado. Observa-se que o comportamento do campo medido ser menor que o calculado continua. Na Tabela B.2 estão colocados os resultados para as outras frequências estudadas.

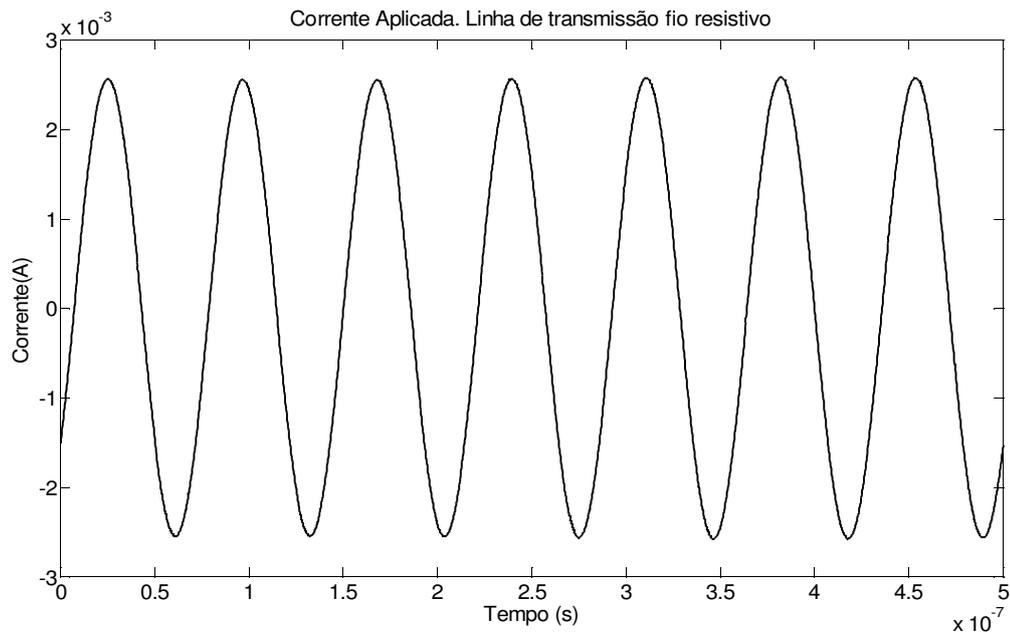


Figura B.12: Corrente aplicada na linha fio resistivo, 14MHz

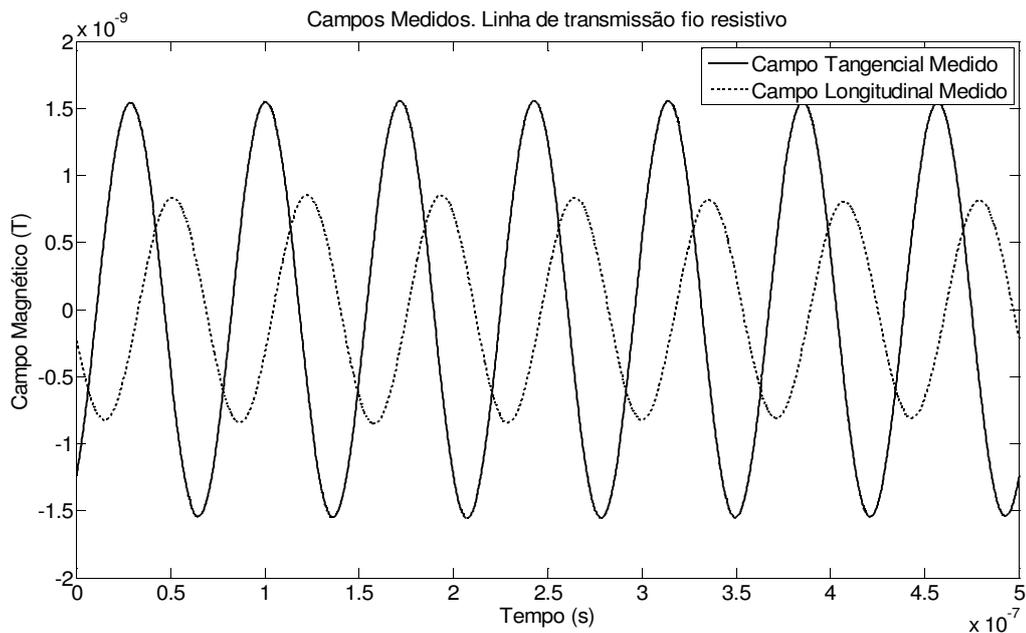


Figura B.13: Campo Magnético medido nas duas direções, 14MHz

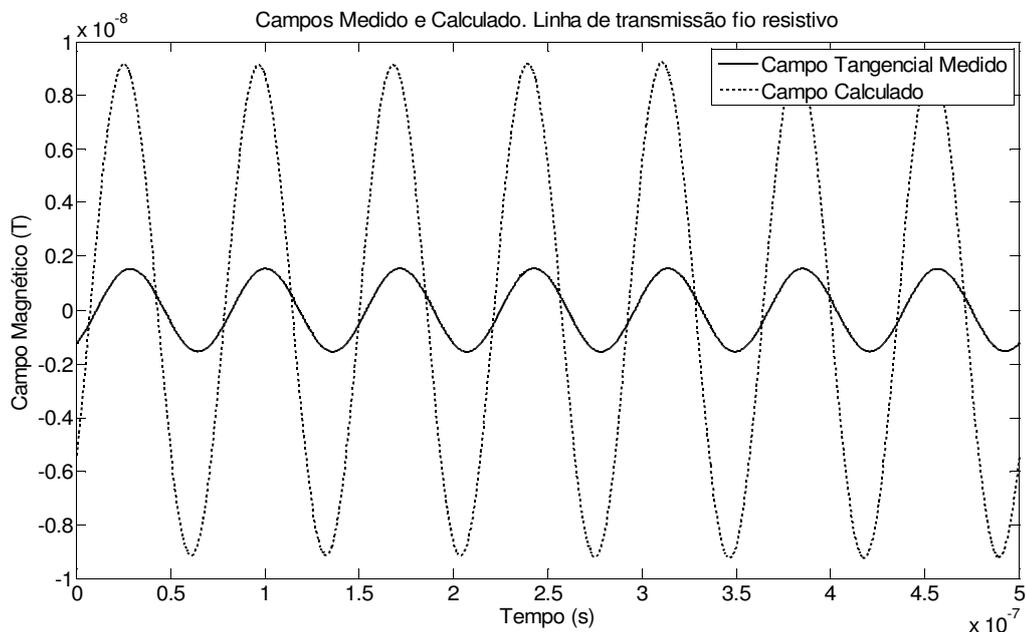


Figura B.14: Campo medido tangencial e calculado, 14MHz

Tabela B.2: Comportamento do campo magnético para as diversas frequências

Frequência (MHz)	Corrente Aplicada (A)	Campo Magnético Calculado Tangencial (T)	Campo Magnético Tangencial Medido (T)	Campo Magnético Longitudinal Medido (T)	Relação Campo tangencial calculado / medido	Relação Campos medidos tangencial / longitudinal
0,5	0,0001	4,43E-010	3,14E-010	9,10E-011	1,41	3,45
0,6	0,0001	5,08E-010	2,54E-010	1,12E-010	2	2,28
0,9	0,0002	8,37E-010	5,01E-010	1,61E-010	1,67	3,11
1	0,0002	8,45E-010	5,49E-010	1,95E-010	1,54	2,81
3	0,0006	2,33E-009	1,14E-009	3,00E-010	2,04	3,81
5	0,0009	3,25E-009	1,61E-009	4,32E-010	2,02	3,72
7	0,0011	4,13E-009	1,49E-009	4,75E-010	2,77	3,14
10	0,0013	4,79E-009	1,30E-009	4,41E-010	3,67	2,96
12	0,0015	5,39E-009	1,23E-009	5,73E-010	4,38	2,15
14	0,0019	6,80E-009	1,13E-009	5,85E-010	6	1,94
16	0,0017	6,14E-009	9,34E-010	4,37E-010	6,57	2,14
18	0,0014	5,15E-009	8,78E-010	4,11E-010	5,86	2,14
20	0,0017	6,19E-009	8,94E-010	4,69E-010	6,92	1,91
24	0,0016	5,86E-009	7,59E-010	4,62E-010	7,72	1,64
27	0,0020	7,29E-009	6,47E-010	4,23E-010	11,25	1,53
30	0,0021	7,50E-009	5,69E-010	3,52E-010	13,18	1,62

É importante observar na Tabela B.2 a relação em destaque entre os campos tangencial e longitudinal na qual percebe-se que, assim como o canal espiral, a componente longitudinal de campo magnético possui valores consideráveis, quando comparados com os sinais medidos da componente tangencial. Numa relação média aproximada de apenas 2 vezes menor. Ou seja, isto é um indicativo de que também no canal resistivo haverá outras componentes de campo que devem ser consideradas em cálculos.

## **B.2 – Canal de Descarga: Fio Resistivo**

As medições realizadas em 4.3.1.2 foram repetidas para o canal resistivo. O canal foi erguido por fio de nylon e sua terminação também não foi casada, permaneceu aberta, pois este é um canal de perdas elevadas, praticamente não ocorre reflexão na terminação do canal. O método de cálculo de campo utilizado neste trabalho não contempla canais com perdas, contudo será mostrado o cálculo apenas para simples comparação.

A Figura B.15 mostra o valor de tensão aplicada no canal de descarga. Já a corrente que flui pelo canal está demonstrada na Figura B.16. Pode-se perceber nesta figura a queda rápida do valor da corrente ao fluir pelo canal. Isto ocorre devido ao alto valor de resistividade deste canal. A Figura B.17 mostra uma comparação entre o valor de corrente fluindo no fio condutor e a corrente que flui no fio resistivo.

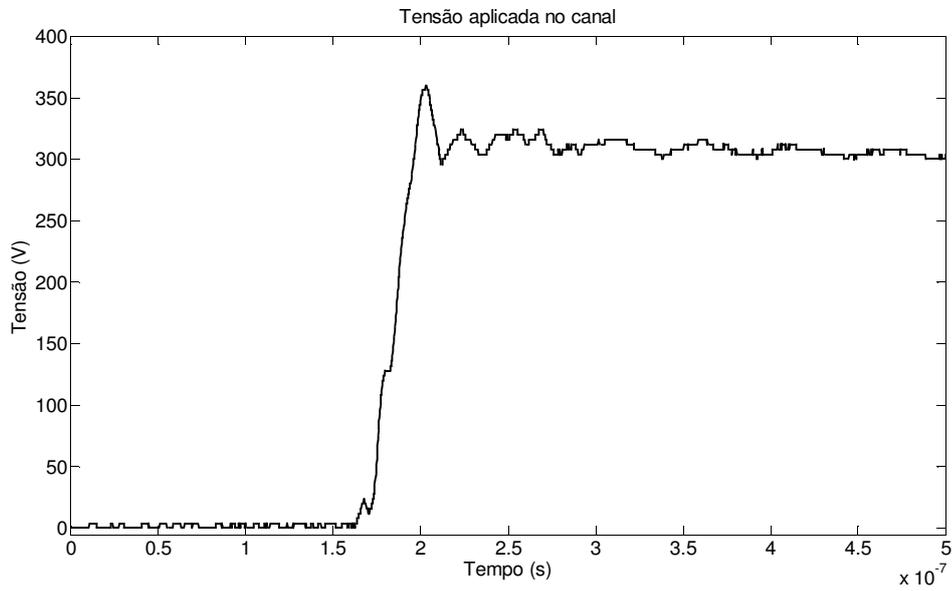


Figura B15: Tensão aplicada no canal resistivo

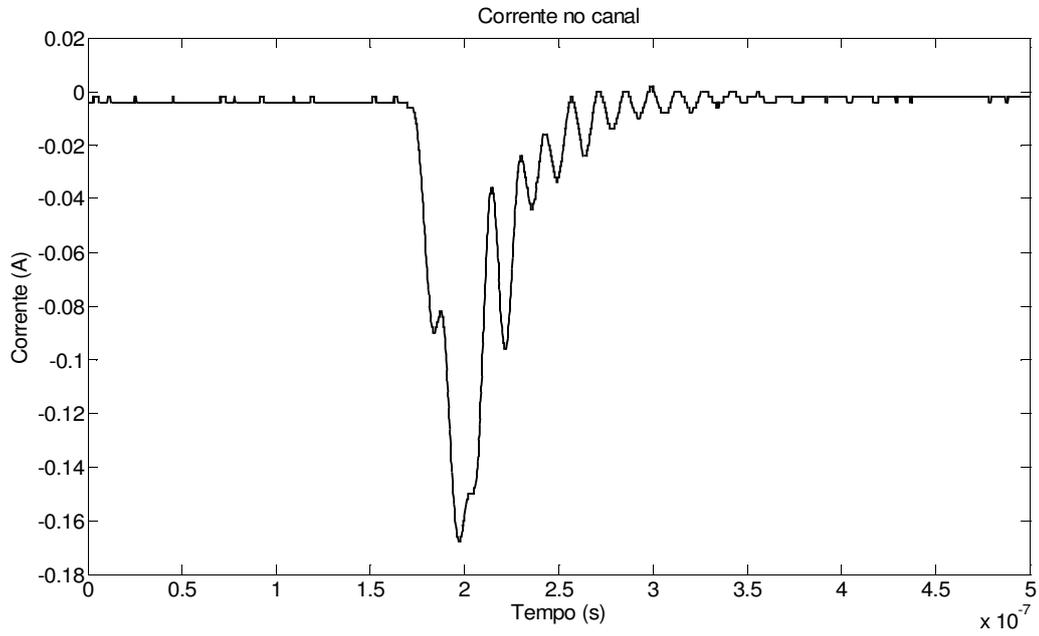


Figura B.17: Corrente que flui no canal resistivo

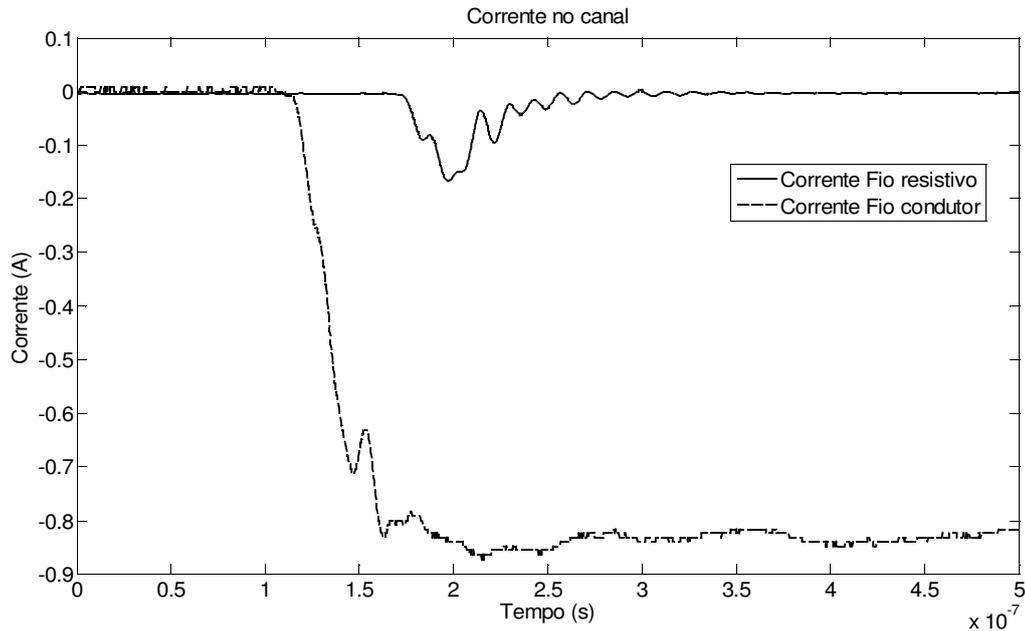


Figura B.18: Comparação entre a corrente que flui no fio condutor e no fio resistivo.

Assim como no canal espiral, o canal resistivo também possui uma impedância muito maior que o fio condutor simples, levando a amplitude de corrente no canal bem menor. Por ser um canal com perdas elevadas, percebe-se na Figura B.18 que a onda de corrente não tem cauda.

#### a) Medições de Campo Elétrico

As medições com o sensor de campo elétrico foram realizadas em cinco pontos (P1 a P5) com distâncias radiais em relação ao canal de descarga de 20, 70, 120, 145 e 170 cm. A Figura B.19 mostra os resultados para cada distância.

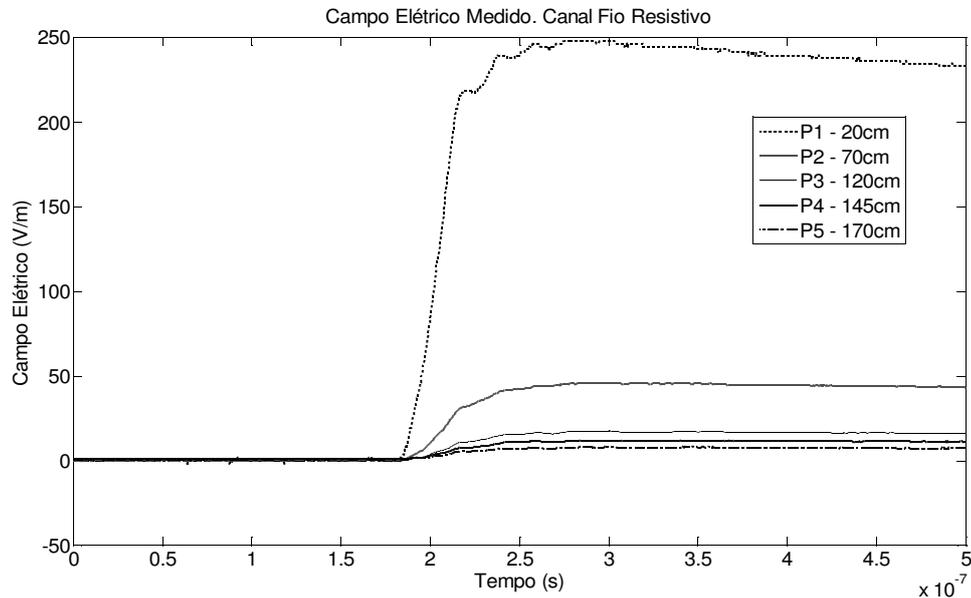


Figura B.19: Distribuição do campo ao redor do canal resistivo.

A Figura B.20 mostra a comparação entre os campos medido e calculado. A variável de ajuste do cálculo foi a velocidade de propagação da onda de corrente no canal. Considerando a dificuldade em se saber a velocidade de propagação da onda, o ajuste se baseou na amplitude do sinal de campo elétrico calculado o que resultou em uma velocidade de propagação de 15% da velocidade da luz. As divergências nos resultado são esperadas uma vez que o método de cálculo não contempla linhas com perdas.

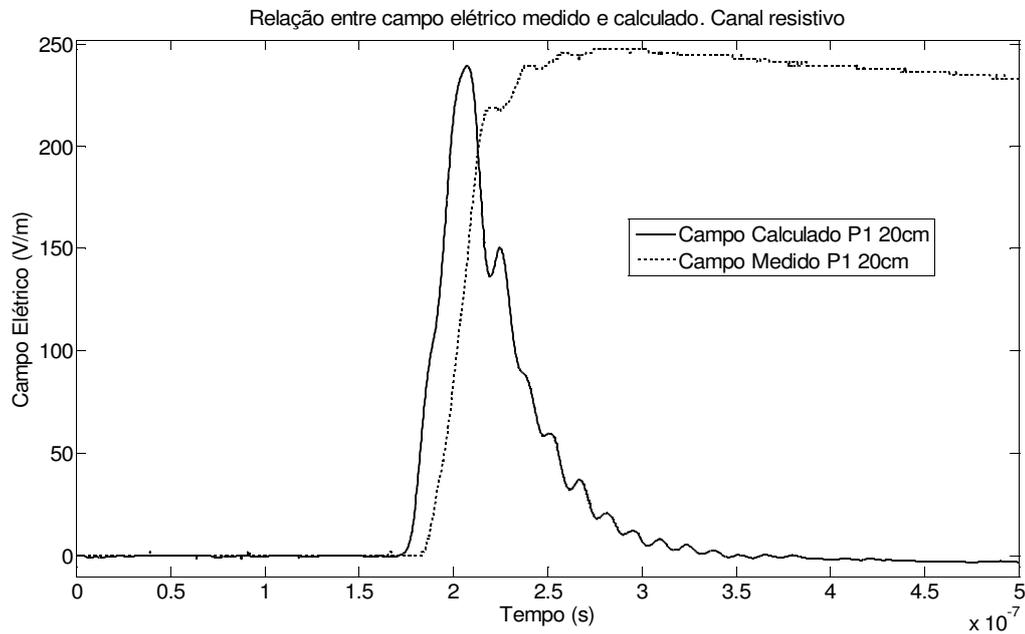


Figura B.20: Campo medido e calculado, canal resistivo

### b) Medições de Campo Magnético

As medições com o sensor de campo magnético foram realizadas em 4 pontos (P1 a P4) com distâncias radiais em relação ao canal de descarga de 20, 70, 120 e 170 cm. Os campos foram medidos em três direções: tangencial, vertical e radial. O sinal medido pelo sensor foi integrado, de acordo com a equação 30 (página 44).

As Figuras B.21 a B.24 mostram os resultados comparativos das medições realizadas para este canal.

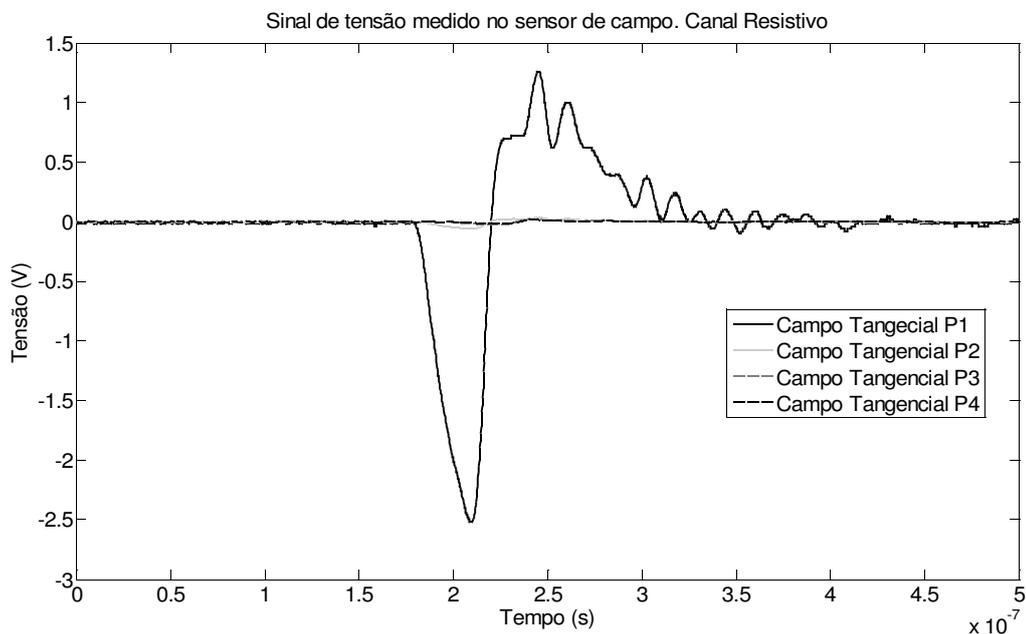


Figura B.21: Sinais medido pelo sensor de campo magnético. Canal Resistivo

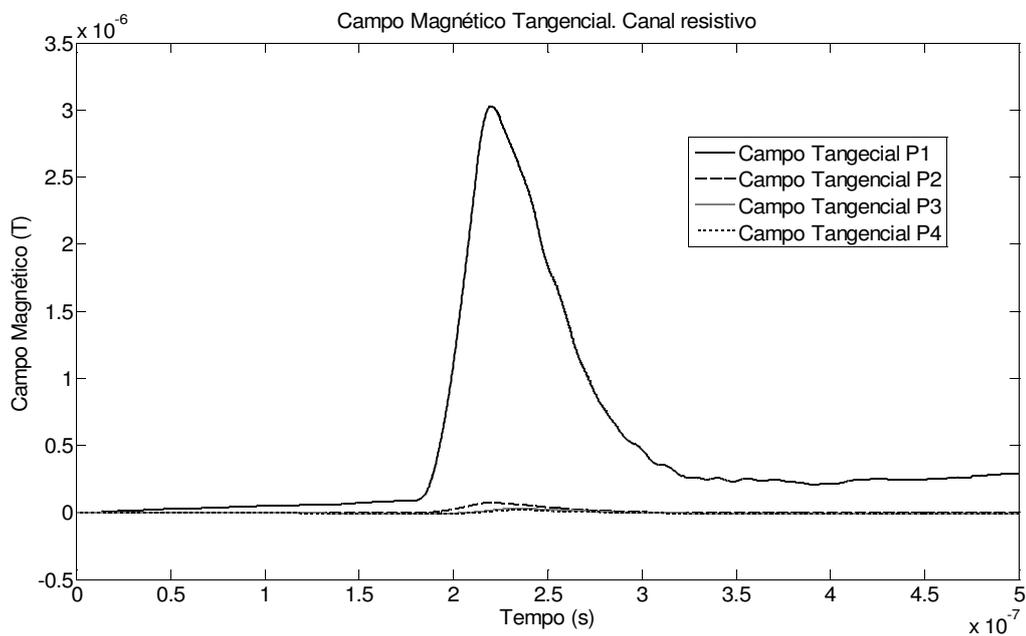


Figura B.22: Valores de Campo Medido, via integração do sinal. Canal Resistivo

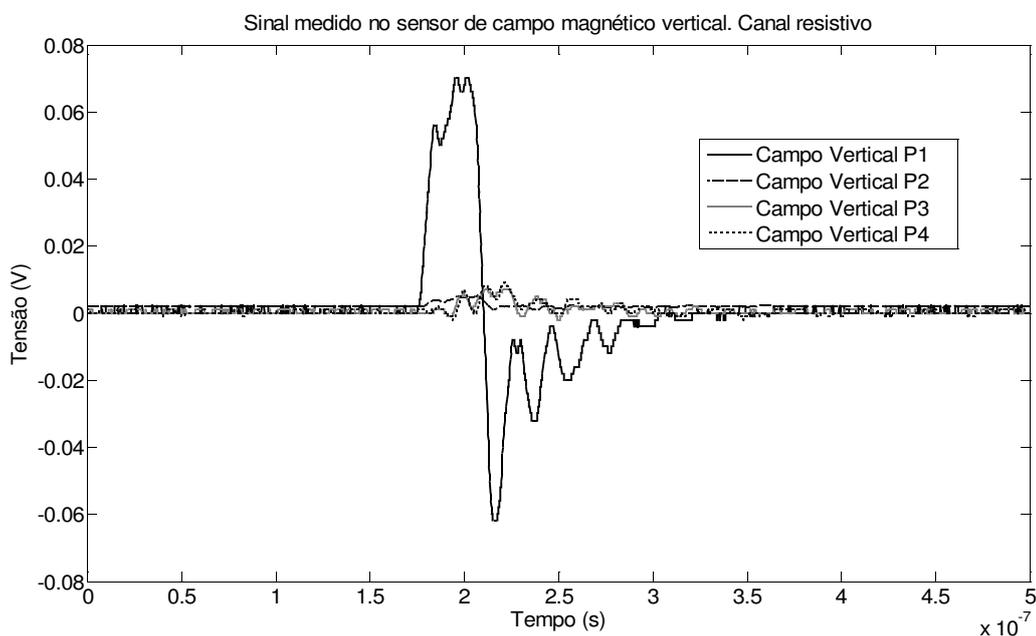


Figura B.23: Valores de tensão medidos no sensor de campo magnético, direção vertical.

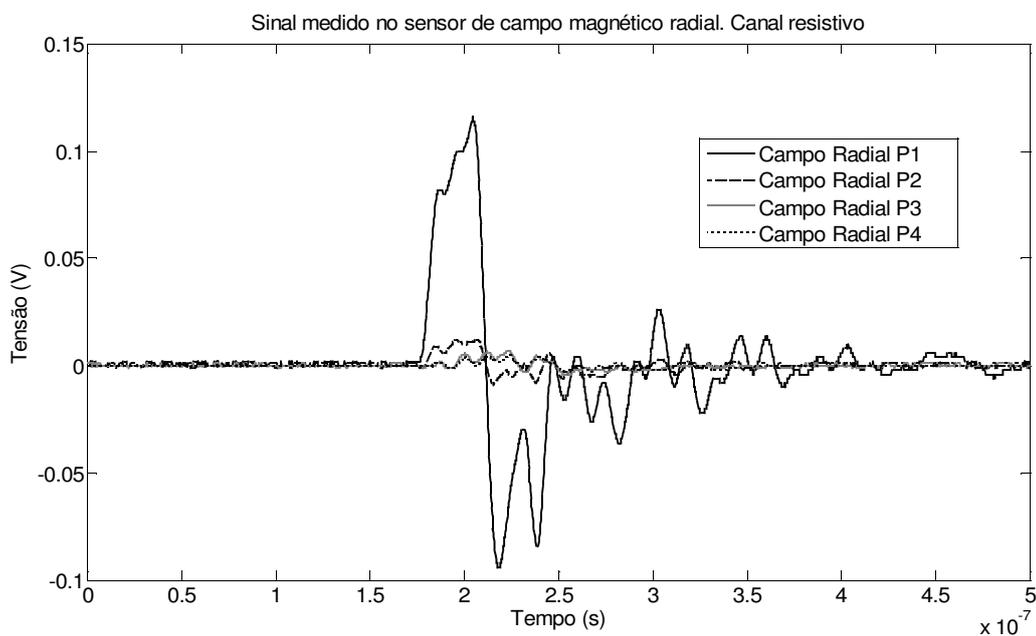


Figura B.24: Valores de tensão medidos no sensor de campo magnético, direção radial.

Como pode ser observado os sinais medidos nos sensores de campo magnético para o canal resistivo (Figuras B.22 e B.24) tem valores próximos aos

medidos para o canal espiral (Figuras 4.64 e 4.65).

Pode-se perceber que os resultados obtidos com as medições realizadas do canal resistivo são pouco conclusivos. Por isso, medições com um canal resistivo com menores perdas devem ser realizadas para uma melhor análise do comportamento deste tipo de canal.