



HAL
open science

INICIAÇÃO CIENTÍFICA - FAPESP - RELATÓRIO FINAL

Gustavo Domingues Carvalho, Viviane Cristine Silva

► **To cite this version:**

Gustavo Domingues Carvalho, Viviane Cristine Silva. INICIAÇÃO CIENTÍFICA - FAPESP - RELATÓRIO FINAL. [Research Report] Escola politécnica (São Paulo). 2018. ⟨hal-02190431⟩

HAL Id: hal-02190431

<https://hal.science/hal-02190431v1>

Submitted on 22 Jul 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

São Paulo, 31 de Outubro de 2018

INICIAÇÃO CIENTÍFICA - FAPESP

RELATÓRIO FINAL

PROCESSO 2017/15808-4

Gustavo Domingues Carvalho
(Bolsista)

Viviane Cristine Silva
(Orientadora - PEA/EPUSP)

Índice

1.	Plano inicial e etapas anteriores.....	2
1.1.	Resultados anteriores.....	2
1.1.1.	Perdas nas bobinas de fio de Litz.....	3
1.1.2.	Análise e modelagem do metamaterial - primeiros testes.....	5
2.	Atividades realizadas.....	9
2.1.	Metamaterial excitado por campo externo.....	9
2.1.1.	Descrição das simulações.....	9
2.1.2.	Resistência aparente em corrente alternada.....	10
2.1.3.	Correção no modelo simplificado.....	10
2.2.	Simulações tridimensionais com metamaterial.....	12
2.2.1.	Simulação do metamaterial sozinho.....	13
2.2.2.	Simulação do TET incluindo o metamaterial.....	13
3.	Conclusões.....	15
	Referências.....	17
	Anexo A: Artigo submetido no congresso MOMAG 2018.....	18
	Anexo B: Indicação para a Etapa Internacional do 26º SIICUSP.....	23

1. Plano inicial e etapas anteriores

Os condutores de *litz* são os mais adequados para a utilização em sistemas de transmissão de energia sem fio transcutâneo (TET), que são aqueles usados para o carregamento de dispositivos implantáveis no corpo humano, como órgãos artificiais. O seu emprego visa reduzir as perdas devido aos efeitos pelicular e de proximidade, presentes no funcionamento desses dispositivos. Como a bobina receptora do sistema TET deve ser implantada no corpo humano, a correta previsão dessas perdas é uma etapa crucial do seu projeto e análise. Para tanto, o Método dos Elementos Finitos será usado para avaliar o desempenho das configurações de TET mais utilizadas. Devido à dificuldade em se modelar os condutores de *litz* (que são formados por feixes de centenas de fios de cobre de diâmetro da ordem de *microns*) técnicas especiais de representação, como a homogeneização, serão investigadas e testadas.

1.1. Resultados anteriores

Utilizamos um modelo constituído por um conjunto de bobinas iguais confeccionadas em fio de *litz* de 44 AWG.

Este modelo já havia sido elaborado em um trabalho precedente, realizado no âmbito de um estágio de pesquisa de um estudante estrangeiro na EPUSP [1], cujo trabalho pretendeu analisar o desempenho de sistemas TET utilizando um metamaterial.

A partir desse modelo inicial, tentamos recalcular as perdas nas bobinas TET considerando os efeitos pelicular e de proximidade, utilizando recursos do software comercial de análise eletromagnética pelo MEF, Flux® [4], que, após uma atualização recente, já dispõe de formulação própria para esse fim, baseada na homogeneização [3], que era a meta inicial do trabalho.

A partir destas novas simulações, percebemos que as simulações efetuadas anteriormente em [1] precisariam ser refeitas, pois os efeitos pelicular e de proximidade não haviam sido contemplados corretamente na modelagem do metamaterial.

A partir de então começamos a estudar o impacto desse detalhe não considerado nos resultados obtidos e investigar uma representação equivalente do metamaterial considerando os efeitos pelicular e de proximidade.

1.1.1. Perdas nas bobinas de fio de Litz

A bobina estudada é um enrolamento em espiral e composta por fio de litz com 255 condutores de cobre 44 AWG em paralelo.

O modelo utilizado consiste em uma bobina transmissora externa ao corpo humano (circuito primário) e uma receptora, interna ao indivíduo (circuito secundário), como indicado na Figura 1. Cada bobina é composta por 16 espiras concêntricas ligadas em série, modelando o enrolamento em espiral. Ambas as bobinas possuem as mesmas dimensões: raio interno de 17 mm e externo de 41 mm.

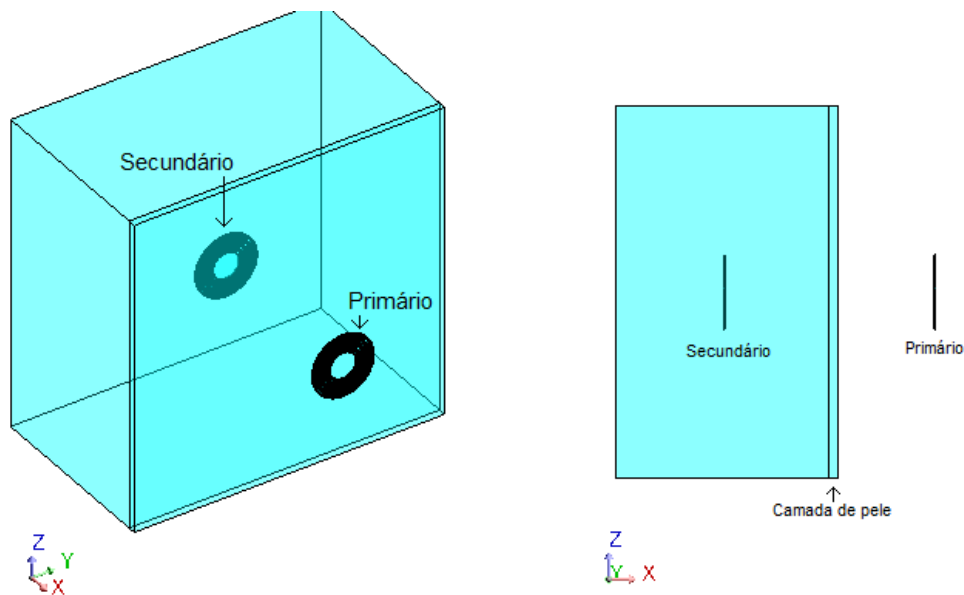


Figura 1: Geometria utilizada nas simulações em três dimensões.

A alimentação do sistema foi feita por uma fonte de tensão senoidal no primário, enquanto o secundário permanecia em curto circuito.

De modo a simular as perdas devido aos efeitos pelicular e de proximidade sem a necessidade de modelar cada condutor do fio de litz separadamente, foi utilizada uma técnica de homogeneização disponível no software de simulação eletromagnética utilizado (Altair Flux [4]). Tal técnica consiste em substituir um modelo completo, no qual seria necessário representar todos os condutores separadamente, por uma região composta por um material hipotético, com propriedades físicas equivalentes (permeabilidade magnética e condutividade elétrica complexas, dependentes da frequência) [3].

Realizadas as simulações, foi calculada a potência dissipada na bobina secundária de duas formas: considerando as perdas pelos efeitos pelicular e de proximidade (pelo cálculo de campos na região compreendida pelas espiras do enrolamento secundário) e sem considerar estes efeitos (perda Joule considerando a resistência da bobina em corrente contínua). A Figura 2 mostra o aumento da potência dissipada quando os efeitos pelicular e de proximidade são considerados.

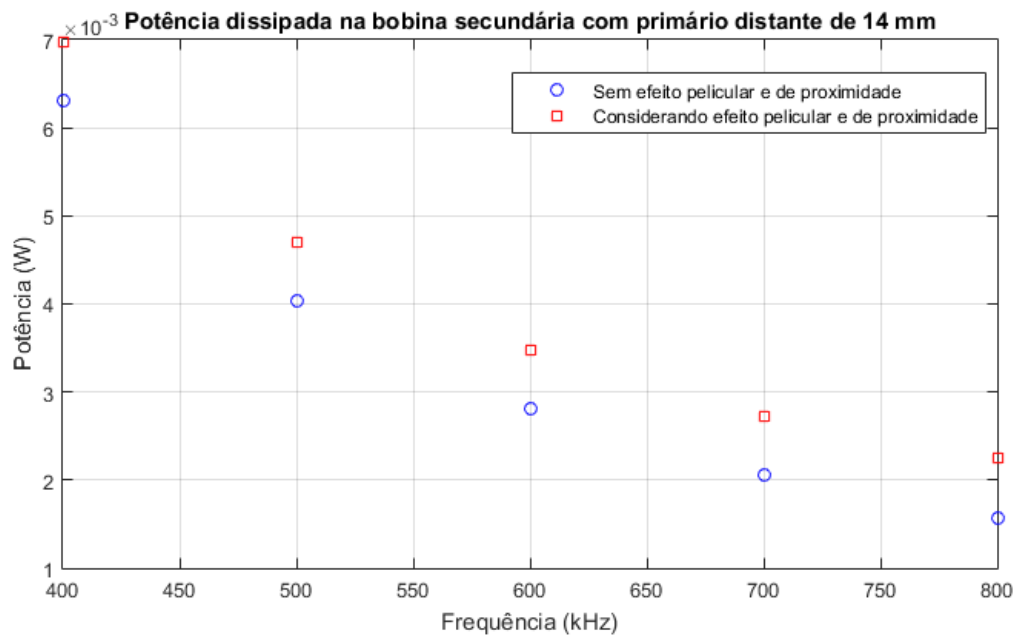


Figura 2: Potência consumida na bobina secundária.

A configuração apresentada possui um acoplamento indutivo muito baixo devido à presença da pele e gordura do paciente, o que prejudica a transferência de potência ativa ao dispositivo implantado. Existe, portanto, a necessidade de uma técnica para melhorar o acoplamento entre as bobinas.

1.1.2. Análise e modelagem do metamaterial - primeiros testes

No contexto deste projeto, foi investigado uma estratégia para se melhorar o acoplamento indutivo do TET através de um metamaterial [1]. Espera-se uma melhora no acoplamento do sistema através do metamaterial, que faz o papel de um circuito ressonante, composto por uma placa de circuito impresso com finas trilhas de cobre formando uma espiral quadrada, em série com um capacitor. Esse

metamaterial é inserido entre as duas bobinas, e externamente ao paciente, para compensar o efeito da pele do paciente, que age como uma barreira.

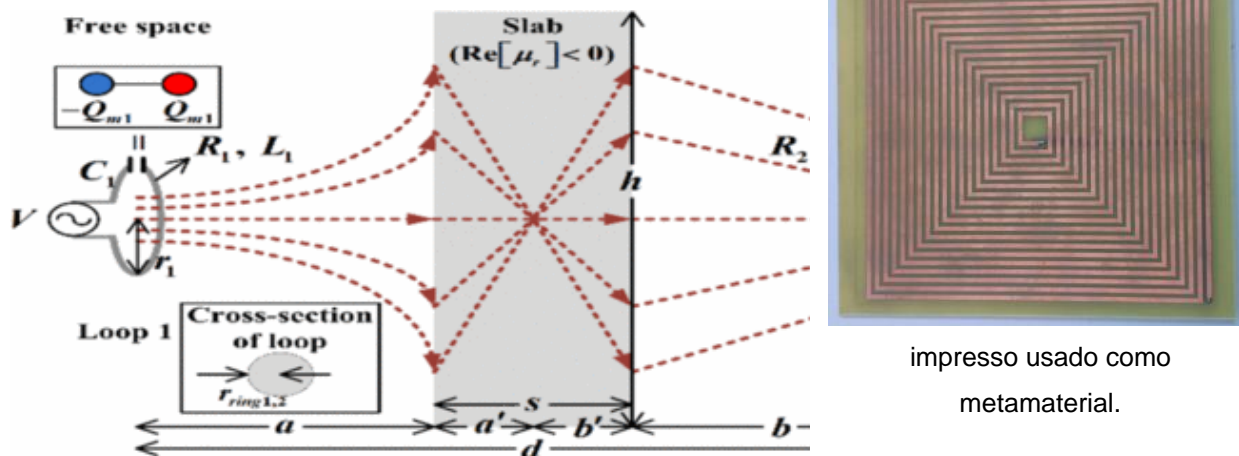


Figura 4: Linhas de campo de bobinas acopladas. O metamaterial faz o papel da placa de permeabilidade magnética negativa [1].

A presença do metamaterial faz o sistema perder sua simetria axissimétrica, sendo necessário simulações em três dimensões. Entretanto, a densidade da malha de elementos finitos em 3D necessária para considerar as características do metamaterial na frequência de interesse (adensamento de corrente devido aos efeitos pelicular e de proximidade, perdas) torna a simulação do TET computacionalmente impraticável.

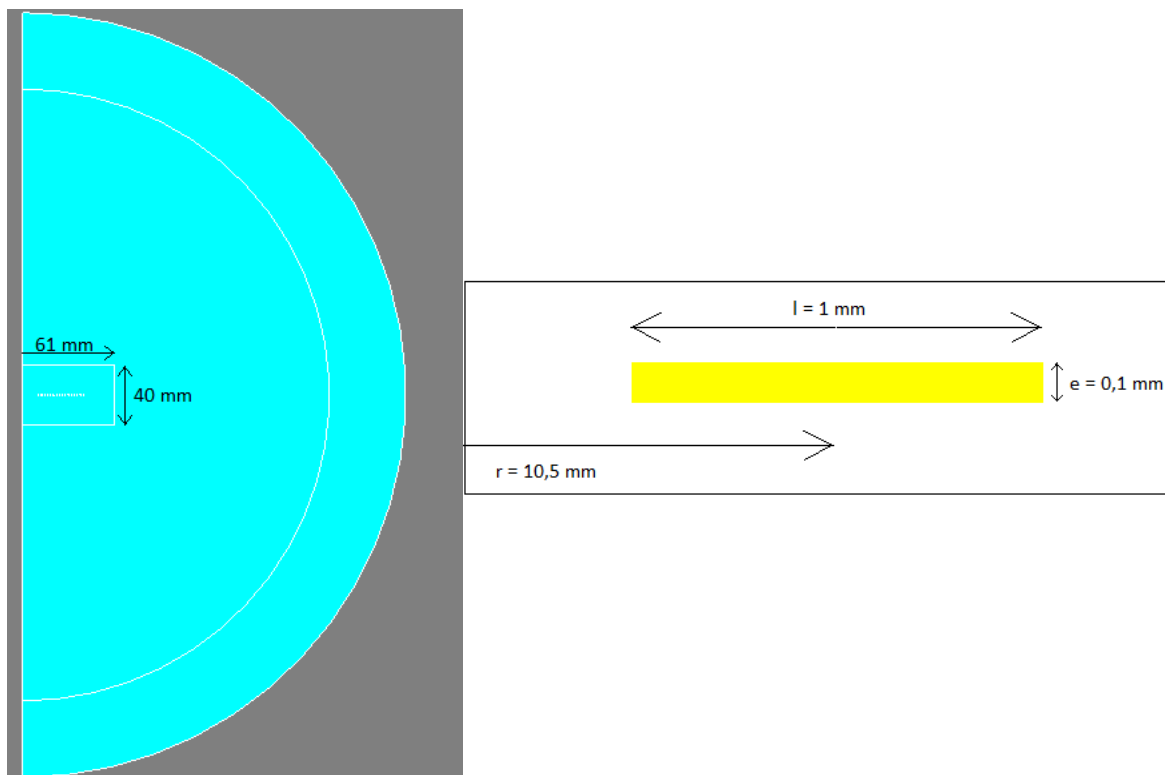
Assim, é necessário utilizar uma representação equivalente do metamaterial que permita inseri-lo na simulação do TET.

O modelo equivalente estudado consiste em uma representação filiforme das trilhas de cobre, similar ao feito em [2], permitindo diminuir a complexidade das simulações.

Para investigar se a aproximação filiforme é adequada no problema em questão, pretendia-se utilizar duas simulações 3D: a primeira, uma simulação de referência com o metamaterial sozinho com as trilhas de cobre representadas e discretizadas adequadamente; a segunda, um modelo reduzido no qual as trilhas de cobre são representadas por fios finos. O objetivo era calcular a indução magnética gerada por essas duas representações e compará-las. Entretanto, a representação completa das trilhas de cobre em 3D gera uma simulação computacionalmente impraticável, mesmo com o metamaterial sozinho. Dessa forma, fez-se necessário elaborar uma

representação bidimensional, adequadamente malhada, com o metamaterial representado por uma espiral circular (ao invés de quadrada), porém com dimensões equivalentes a da espiral quadrada (vide Figura 5).

Figura 5: Vista em corte da geometria utilizada nas simulações (à esquerda) e detalhe das dimensões das espiras (à direita).



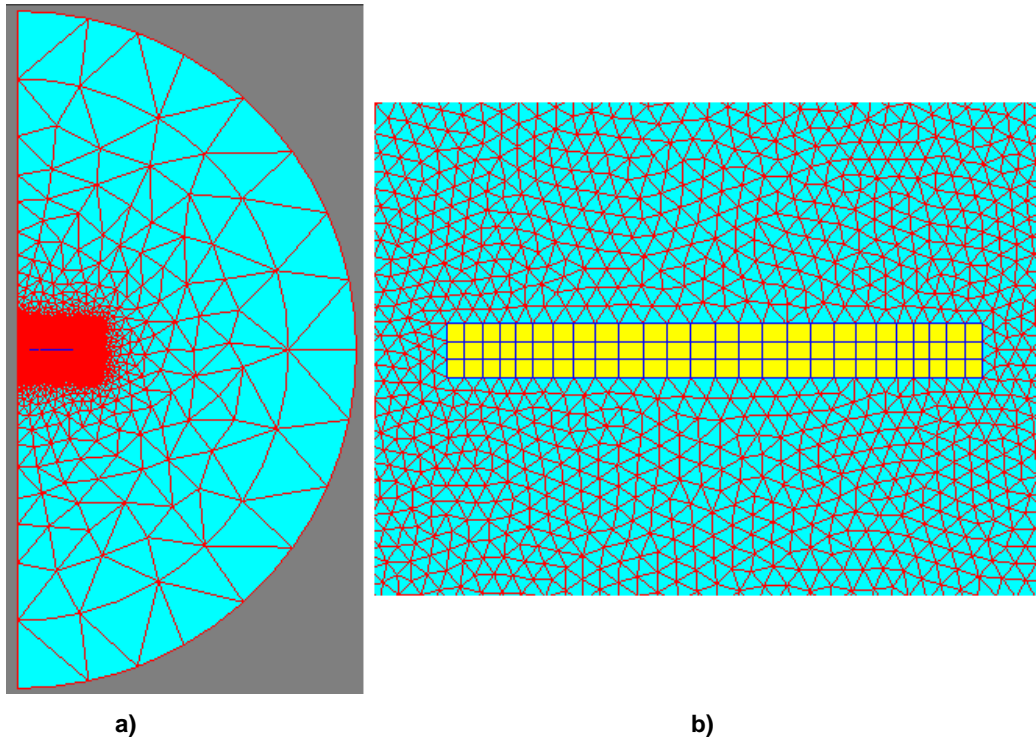


Figura 6: Malha de elementos finitos. **a)** Domínio completo. **b)** Detalhe da espira de cobre.

A espiral de cobre foi alimentada, em todas as simulações realizadas, por uma fonte de corrente de 1 A eficaz. Cada espira foi representada individualmente por um condutor sólido (cilindros no circuito da Figura 7) e ligadas em série. A Figura 7 mostra a situação em que 16 espiras são utilizadas. Para simulações com um número menor de espiras, foram retiradas aquelas mais externas (ou seja, de maior raio médio).

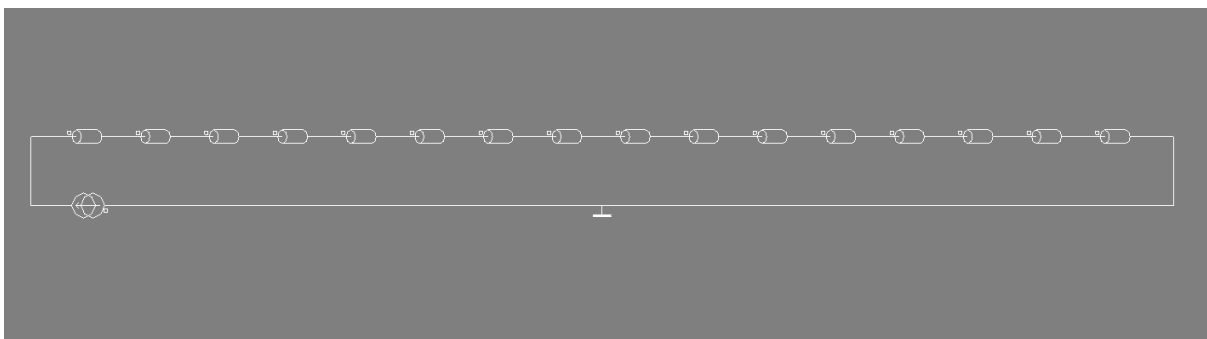


Figura 7: Alimentação do sistema por fonte de corrente.

A análise do campo das espiras foi feita de modo semelhante a [2]. O valor teórico da indução (calculado analiticamente) e o erro quadrático relativo da simulação em relação a esse valor teórico (ϵ) foram calculados como em [2] em todos os testes.

O comportamento do campo foi verificado em linhas horizontais distanciadas de 2,5 mm e 12,5 mm do plano das espiras. As Tabelas I, II, e III mostram uma síntese desses resultados.

Tabela I

Cálculo da indução magnética de uma espiral em circuito impresso a diferentes distâncias da espiral – Comparação entre simulação por elementos finitos a 800 kHz e valor teórico considerando a espira filiforme - Erro percentual

ϵ (%)	Simulação 2,5 mm				Simulação 12,5 mm			
	2 espiras	4 espiras	8 espiras	16 espiras	2 espiras	4 espiras	8 espiras	16 espiras
	1,9240	2,2032	2,0296	1,7046	0,6200	0,7939	0,8638	0,7744

Tabela II

Cálculo da indução magnética de uma espira em circuito impresso a diferentes distâncias da espira – Comparação entre simulação por elementos finitos e valor teórico considerando a espira filiforme - Erro percentual

ϵ (%)	Simulação 2,5 mm				Simulação 12,5 mm			
	80 kHz	300 kHz	800 kHz	1 MHz	80 kHz	300 kHz	800 kHz	1 MHz
	0,8025	1,0675	1,3134	1,3530	0,1701	0,3322	0,4323	0,4463

Tabela III

Cálculo da indução magnética de dezesseis espiras em circuito impresso a diferentes distâncias da espiral – Comparação entre simulação por elementos finitos e valor teórico considerando as espiras filiformes - Erro percentual

ϵ (%)	Simulação 2,5 mm				Simulação 12,5 mm			
	80 kHz	300 kHz	800 kHz	1 MHz	80 kHz	300 kHz	800 kHz	1 MHz
	0,2626	1,1458	1,7046	1,7813	0,1155	0,5178	0,7744	0,8098

Os erros obtidos permaneceram baixos nas configurações testadas, indicando que há possibilidade de utilizar o modelo simplificado na representação do metamaterial com boa aproximação.

Os resultados do presente sub-item foram apresentados pelo bolsista no MOMAG 2018, e publicados nos anais desse congresso [5]. O artigo publicado está anexo a este relatório (Anexo A).

2. Atividades realizadas

Após a validação do modelo filiforme para a espiral excitada diretamente com uma fonte de corrente, foi necessário verificar a adequação desse em uma situação mais próxima da real.

O metamaterial utilizado no TET não será alimentado por uma fonte de corrente, ou seja, a corrente não é imposta diretamente, mas sim induzida pelo primário. Por este motivo, é preciso avaliar se a representação filiforme é adequada para uma espiral com corrente induzida por campo magnético externo. Para tanto, foi realizada nova simulação 2D incluindo uma bobina externa para excitar o metamaterial.

Através da nova simulação, foi verificado que a distribuição da densidade de corrente nas trilhas de cobre gera diferença considerável na resistência equivalente da espiral quando a frequência é elevada, como já esperado pela presença do efeito pelicular. A partir de tal distribuição, o modelo filiforme foi corrigido para que pudessem ser considerados os efeitos do aumento da frequência.

Finalmente, o modelo foi inserido na simulação 3D das bobinas do TET e os resultados comparados aos obtidos em [1].

2.1. Metamaterial excitado por campo externo

2.1.1. Descrição das simulações

O domínio bidimensional utilizado permaneceu o mesmo das simulações com metamaterial excitado por fonte de corrente, porém foi adicionada uma bobina de excitação com mesmas dimensões (raio interno e raio externo) que as bobinas do TET a uma distância de 2,5 mm do metamaterial. Tal bobina foi alimentada por fonte de tensão e o metamaterial foi colocado em série com um capacitor calculado para ressonância em cada frequência simulada.

2.1.2. Resistência aparente em corrente alternada

Através da simulação descrita, foram calculadas a potência dissipada e a corrente eficaz que atravessa o metamaterial nas frequências de 80 kHz, 300 kHz, 800 kHz e 1 MHz. De posse desses valores, foi calculada a resistência aparente da associação de trilhas de cobre em corrente alternada:

$$R_{AC} = \frac{P_{dissipada}}{|I_{eficaz}|^2}$$

O adensamento da corrente próximo das extremidades do condutor em frequência elevada provoca aumento dessa resistência, como mostra a Figura 8.

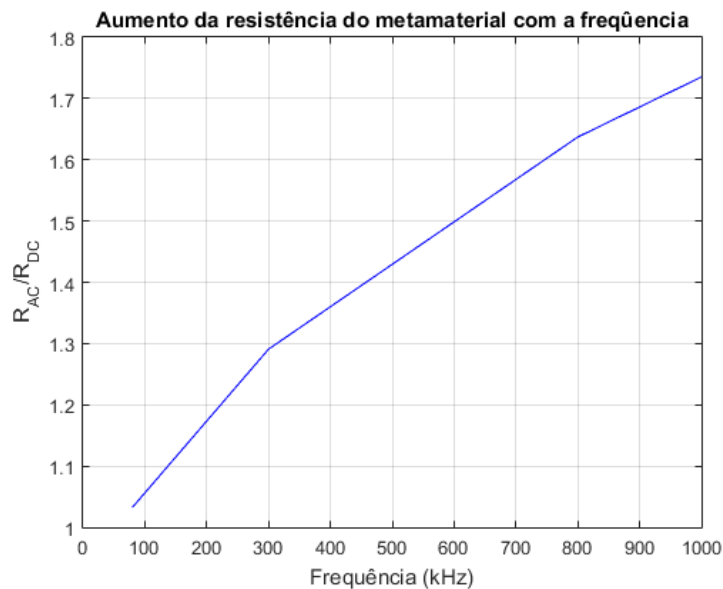


Figura 8: Resistência equivalente do metamaterial em função da frequência.

Tal aumento não é considerado no modelo simplificado (condutores filiformes) das trilhas de cobre, sendo necessária uma correção no modelo adotado.

2.1.3. Correção no modelo simplificado

A distribuição de correntes não é idêntica em cada espira do metamaterial (vide Figura 9), sendo necessária uma correção diferente para a resistência de cada trilha. Além disso, a corrente se concentra nas extremidades (interna e externa) de cada espira, porém com intensidades diferentes. Assim, foi necessário modificar o modelo filiforme de modo a levar em conta tais aspectos do metamaterial.

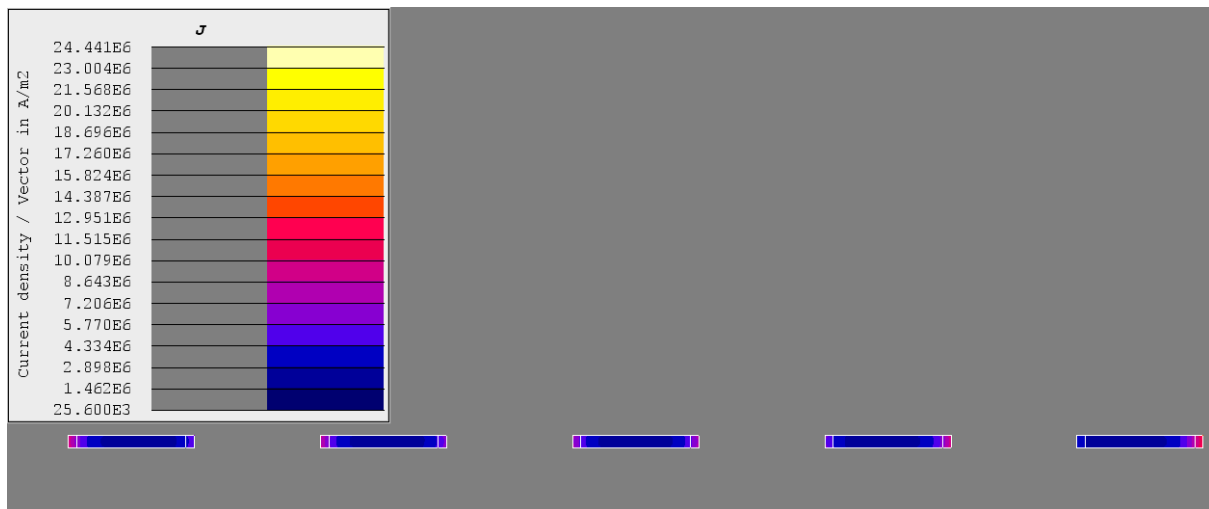


Figura 9: Distribuição de correntes para o metamaterial excitado por campo externo.

Para tanto, a densidade de corrente foi integrada em cada metade de cada espira: uma metade esquerda da trilha (denominada aqui “interna”) e outra metade direita (denominada aqui “externa”), com o objetivo de obter a contribuição de cada parte na corrente total que atravessa cada trilha. O mesmo foi feito para a densidade de potência.

Imaginando, agora, cada espira como dois condutores em paralelo, foi possível calcular a resistência de cada metade utilizando a corrente e potência correspondentes.

O modelo modificado consiste em aproximar cada espira do metamaterial por dois condutores finos em paralelo: um representando o adensamento de correntes na extremidade interna e outro na extremidade externa. Tais condutores foram associados a materiais fictícios, com resistividade equivalente, de modo que a resistência dos fios fosse igual à resistência da região correspondente na trilha de cobre (interna ou externa de cada espira) para que a distribuição de corrente no modelo simplificado se aproximasse da melhor forma o modelo completo.

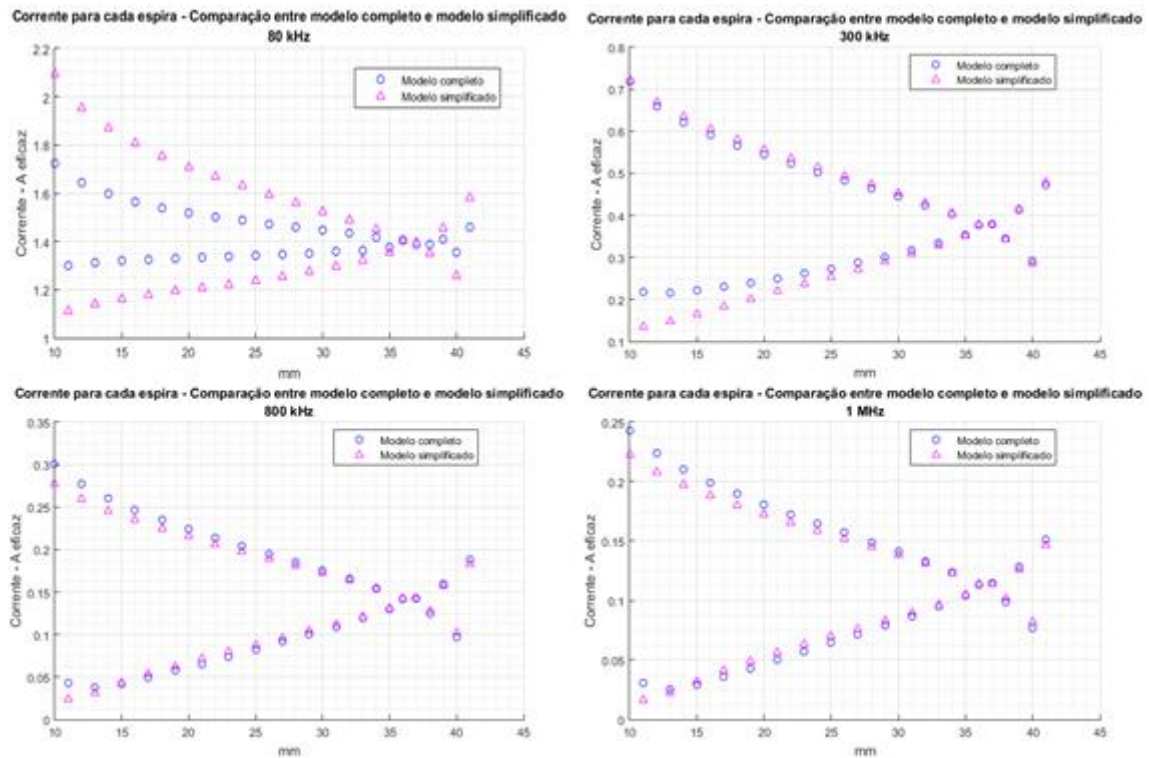


Figura 10: Distribuição de correntes para diferentes frequências. O eixo horizontal dos gráficos corresponde à posição de cada extremidade das espiras.

Observa-se que em 80 kHz o modelo simplificado não foi capaz de prever o mesmo comportamento da corrente do modelo completo. De fato, em frequências baixas o efeito pelicular é menos acentuado e um modelo que considera toda a corrente adensada nas extremidades do condutor é menos preciso. Entretanto, as distribuições de correntes dos modelos simplificado e completo foram razoavelmente próximas em torno de 800 kHz, frequência para qual o TET foi projetado. Logo, o modelo será utilizado na simulação das bobinas de litz próximo desta frequência de operação.

2.2. Simulações tridimensionais com metamaterial

O modelo simplificado do metamaterial foi incluído na simulação 3D utilizando uma “Bobina não malhada”. Cada volta da espiral quadrada foi modelada como dois condutores filiformes em paralelo.

Inicialmente, o modelo simplificado do metamaterial foi simulado sozinho para calcular sua indutância e a correspondente capacitância que deve ser associada em série para ressonância em 800 kHz. Depois, o metamaterial foi incluído na simulação 3D das bobinas do TET para avaliar o desempenho do sistema.

2.2.1. Simulação do metamaterial sozinho

O domínio utilizado consistiu dos condutores filiformes que compõem a representação do metamaterial e o ar que os envolve. O metamaterial foi alimentado por fonte de tensão.

Através de tal simulação, a indutância do metamaterial foi calculada e obteve-se o correspondente valor de capacitância para ressonância em 800 kHz. Também foi calculada a resistência equivalente do modelo da espiral quadrada.

Tabela IV

Parâmetros do circuito ressonante

Resistência equivalente (Ω)	0,94
Indutância (μH)	14,13
Capacitância para ressonância em 800 kHz (nF)	2,80

2.2.2. Simulação do TET incluindo o metamaterial

O modelo simplificado do metamaterial foi incluído na simulação 3D das bobinas do TET. A espiral quadrada foi conectada a um capacitor em série, com o valor de capacitância calculado anteriormente, formando um circuito ressonante.

O sistema foi alimentado por fonte de tensão de 20 V eficazes no primário e o secundário conectado a uma carga de 50 Ω , conforme feito nas simulações de referência [1]. Os resultados para 800 kHz estão resumidos na Tabela V.

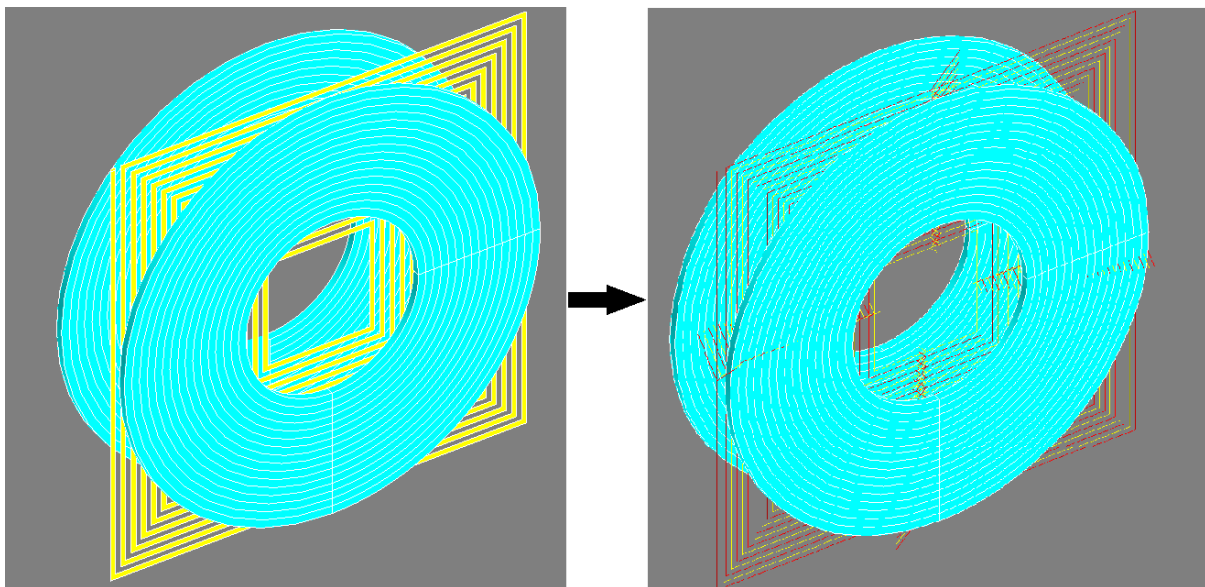


Figura 11: TET incluindo o metamaterial. Modelo completo [1] à esquerda e modelo simplificado [5] à direita.

Tabela V

Comparação do desempenho do sistema TET com metamaterial entre os dois modelos: “completo”[1] e “filiforme” [5]

Modelo	Filiforme	Completo
Potência fornecida pelo gerador de tensão - W	127,36x10 ⁻³	224,6
Potência dissipada no metamaterial - W	113,6x10 ⁻³	80,2
Demais perdas (pele, bobinas, ...) - W	0,16x10 ⁻³	16,2
Potência recebida pela carga - W	13,6x10 ⁻³	128,2
Eficiência - %	10,7	57,1

Nota-se que grande parte da potência é dissipada no metamaterial e a eficiência é muito baixa, resultado discrepante com relação a [1].

As simulações realizadas em [1] foram verificadas para encontrar o motivo de tal diferença. Notou-se, em especial, valores elevados da corrente no primário e no metamaterial e da tensão no secundário e no metamaterial.

Tabela VI

Tensões e correntes na simulação feita em [1]

	Tensão eficaz (V)	Corrente eficaz (A)
Primário	20,00	11,26
Metamaterial	633,61	11,37
Secundário	80,05	1,60

Os resultados das simulações 3D (atual de do caso original tomado como referência), apresentados nas tabelas V e VI, foram obtidos ao final do período de vigência. É evidente, a partir desses resultados, que essas simulações necessitam

de uma depuração maior. Inclusive, as simulações de base utilizadas [1] encontram-se sob juízo.

Tais simulações foram realizadas com as trilhas do metamaterial insuficientemente discretizadas devido a limitações de memória do computador utilizado na época. Dessa forma, não é possível avaliar com exatidão o efeito do metamaterial na eficiência do sistema sem, antes, verificar como mudam os resultados ao se refinar a malha de elementos finitos.

O trabalho então prossegue, com o intuito de retomar as simulações originais e tentar refinar as simulações em um hardware com maior memória RAM.

3. Conclusões

O método de homogeneização utilizado mostrou que os efeitos pelicular e de proximidade têm impacto considerável na potência dissipada pelos enrolamentos da bobina. Visto que tais efeitos estão também presentes no metamaterial estudado, uma modelagem adequada deste é necessária. Porém, a técnica de homogeneização disponível no programa não se presta à modelagem de um metamaterial, que possui características geométricas e físicas mais complexas, e bem diferentes daquelas dos fios de Litz.

O modelo filiforme proposto para modelar o metamaterial apresentou bons resultados para uma espiral circular simulada em duas dimensões. Entretanto, o uso deste para representar o metamaterial em uma simulação tridimensional gerou, até o momento, resultados bastante discrepantes dos obtidos com as simulações em [1]. Tais diferenças podem estar relacionadas à discretização insuficiente do metamaterial na solução usada como referência [1], devido a limitações de memória do computador utilizado. Pretende-se, em trabalho futuro, refazer as principais simulações de [1] com uma melhor discretização do metamaterial em uma máquina com maior memória, agora disponível no laboratório.

O trabalho aqui exposto foi apresentado pelo bolsista nos seguintes eventos:

- 1. MOMAG 2018 – Artigo completo no Anexo A**
- 2. 26º SIICUSP - Selecionado para etapa internacional, conforme Anexo B.**

Embora a vigência da bolsa de IC esteja finalizada, os testes de validação prosseguem, pois este trabalho faz parte de um projeto maior, com outros pesquisadores envolvidos, cujo objetivo é justamente tentar estudar o comportamento eletromagnético dos metamateriais em baixas frequências, para se

buscar uma modelagem numérica mais econômica e adequada, de modo a permitir o estudo do impacto de seu uso nos sistemas de transmissão de energia sem fio.

Referências

- [1] F. Haffner, V. C. Silva, C.A.F. Sartori, Transcutaneous Energy Transfer applied to Ventricular Assist Devices using Metamaterials, Internship Report, EPUSP 2017.
- [2] Zhao Li, Développement Multipolaire en harmonique espherique et propagation des incertitudes appliqués à la modélisation de source de rayonnement en Compatibilité Electromagnétiques, Tese Ecole Centrale de Lyon, 2017.
- [3] G. Meunier, V. Charmoille, C. Guerin, P. Labie and Y. Marechal, "Homogenization for Periodical Electromagnetic Structure: Which Formulation?," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 46, no. 8, pp. 3409-3412, Aug. 2010.
- [4] Flux® - *Low Frequency Electromagnetic Analysis for Electrical Engineering*, altairhyperworks.com/flux.
- [5] Gustavo D. Carvalho, Viviane Cristine Silva, Florent Haffner, Carlos A. F. Sartori, Laurent Krähenbühl, Luiz Lebensztajn, *[IC] Modeling of a metamaterial in the FEA of a contactless transcutaneous energy transfer device*, Anais do MOMAG 2018 - (18º SBMO – SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICRO-ONDAS E OPTOELETRÔNICA/ 13º CBMAG – CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETROMAGNETISMO), Santa Rita do Sapucaí – MG, 12-15 Agosto de 2018.

Anexo A: Artigo **apresentado no congresso MOMAG 2018**

[IC] Modeling of a metamaterial in the FEA of a contactless transcutaneous energy transfer device

Gustavo Domingues Carvalho, Viviane Cristine Silva,
Carlos A. F. Sartori, Luiz Lebensztajn
University of São Paulo, SP Brazil

Florent Haffner, Laurent Krähenbühl
Laboratoire Ampère – Ecole Centrale de Lyon, FR

Abstract— Metamaterials are difficult to deal with in computational electromagnetic modelling, e.g. finite element analysis. The reason is the prohibitive discretization refinement needed to account for their actual electromagnetic field distribution profile, within the frequency range used in contactless energy transfer devices. We propose an approach to simplify the modeling of a metamaterial in finite element simulations and present an analysis of its impact in the evaluation of the magnetic field distribution in the vicinity of the metamaterial.

Keywords—*metamaterial; computational electromagnetics; finite element analysis; transcutaneous energy transfer; contactless energy transmission*

I. INTRODUCTION

Metamaterials (MM) could be defined as artificial materials having physical properties not encountered in the nature. In the context of Electromagnetism, they are known as left-handed media, since, theoretically, they behave as homogeneous, hypothetical media with negative permittivity and/or negative permeability at given frequencies.

Metamaterials were first described theoretically by Veselago in 1967 [1]. In 1999 John Pendry was the first one to design a MM using split ring resonators [2]. These are copper circuits (thin trails) printed on a fiberglass slab.

One of the promising, recent applications of MMs [3] [4] is to enhance the inductive coupling of WPT (Wireless Power Transfer) systems, and hence improving its efficiency. In [4] the authors achieved about 400% voltage gain in the receiver by using a MM, in the frequency range of tens of MHz.

Placed between the transmitter and the receiver coils of a WPT system, which are usually located far apart each other, the MM acts as a bridge, improving the inductive coupling.

In this work, the interest in modeling the MM is to evaluate its effects in the performance of a Transcutaneous Energy Transfer (TET) system [5], aimed at transmitting energy to artificial organs implanted in humans, like ventricular assist devices (VAD) [6].

In this application, TET devices operate in the frequency range of hundreds of kHz. In this case, the MM is introduced to compensate, not the impact of the distance between the two coils, but the effect of both skin and fat, which act as a barrier.

This work is funded by FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) under grants 2017/15808-4 and 2013/24434-0. gustavo.carvalho@usp.br

FEA is used to computationally simulate the TET system, in order to evaluate its efficiency. Due to the presence of the MM, the TET system loses its 2D symmetry, and a 3D modeling is necessary. However, the mesh density in 3D, needed to account for all the MM features (large aspect ratio of copper track width and slab dimensions, skin and proximity effects, losses), yields an impracticable computational cost.

Therefore, we intend to use a thin wire model to represent the MM in the 3D domain. In the next sessions we investigate the suitability of this approach, regarding the impact of neglecting skin and proximity effects in the MM.

II. METAMATERIALS

The unusual properties of the MMs are due to their structures rather than chemical composition [4].

The MM is a periodic arrangement of scattered elements that can be synthesized and considered as homogeneous, if the unit cell dimension is smaller than the guided wavelengths. Fig. 1 shows examples of MMs tested in [3]. These are copper tracks printed on fiberglass with a specific geometry. Furthermore, for MMs formed by repeated motifs printed in a slab, and when the slab dimensions are large compared to the dimension of one motif (as in Fig. 1a), it is possible to analyze its properties by studying a single unit cell [4].

Capacitors are connected in series with these circuits in order to form a RLC circuit, which resonate at a given frequency. Those configurations are tested in [3] and [5], and that of Fig. 1b will be the one chosen for our preliminary analysis, due to its lower geometrical complexity. Nevertheless, our aim is to devise a more compact model to enable the simulation of the more complex set of Fig. 1a in the future.

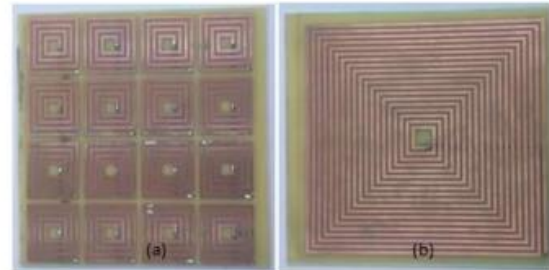


Fig. 1. Some configurations of printed circuit boards used as metamaterials [1]: (a) periodic structure with repeated patterns; (b) single square spiral.

III. 3D FINITE ELEMENT MODELING

A 3D model of a TET device with a MM, like the one in Fig. 1b, placed between the transmitter and the receiver coils of the system under test, is shown in Fig. 2. It is evident in this figure that the 2D model used in the FE simulations in [6] and [8] can no longer be used due the presence of the square-spiral MM, as it destroys the cylindrical symmetry of the TET system, even with no coil misalignment.

By using a “shell region” approach in the 3D FE model, the burden of domain discretization could be slightly alleviated, thanks to the flat geometry of the MM [5]. However, since the printed copper stripes are very slim and the operating frequencies are high, a strong skin effect, as well as proximity effect, arises in the MM.

The attempt to follow the recommended rule-of-thumb of employing at least 2 layers of second-order finite elements along the skin depth leads to an unfeasible number of mesh elements in the finite element domain of the MM, even with the shell element resource.

In order to make this 3D finite element modeling feasible, we need a more compact model for the MM. A convenient approach would be a thin wire representation for the copper strips.

In order to verify the thin wire approximation, in the next sessions we present an analysis of its impact on the solution, following a procedure similar as in [7], applied to a printed-circuit copper loop. In [7], the behavior of a printed circuit loop is studied both as the source of field and as a sensor. It is shown that in the frequency range of 20 kHz to 2 MHz (the scope of this work), a copper-loop printed circuit can be likened to a thin wire loop.

IV. THIN WIRE MODEL OF THE METAMATERIAL

To verify the validity of the thin wire approach, we tried to perform two reduced 3D FE simulations, both with the square-spiral MM alone: (i) in the first one, the copper stripes are finely meshed with the recommended mesh density along the skin depth to account for the skin effect; this would be our “reference”, complete solution; (ii) in the second, a “reduced model” are adopted, where the stripes are replaced by thin

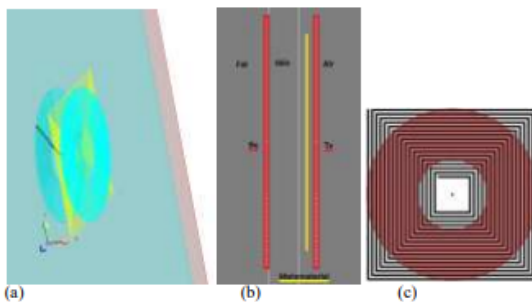


Fig. 2. 3D model (a) for the FE simulation of the TET system with the metamaterial placed between the TET coils and outside the human body, and its side view (b). Top view of TET coil and the square-spiral metamaterial (c).

wires

The aim was to compare the two solutions and evaluate the relative error in the magnetic field distribution in the vicinity of the MM, namely, along a conveniently chosen path. Unfortunately, despite the reduced 3D domain adopted, the first, “complete” model also gave rise to an unfeasible mesh size.

Therefore, the only alternative left is trying to validate the thin-wire approach by means of a 2D FEA, as in [7]. Nevertheless, the square-spiral MM of Fig. 2 does not exhibit any 2D symmetry (neither planar nor cylindrical).

We need to find an alternative configuration of MM which possesses axial symmetry, whereas keeping the main features of the square spiral.

Then, we chose, as a test MM, a pattern composed of a 16-turn circular spiral strip, with dimensions equivalent to the square-spiral MM of Fig. 2. The next session presents an outline of the numerical experiments devised to evaluate the thin-wire approximation.

A. Outline of the test cases for the 2D simulations

In order to analyze the impact of the thin wire approach, several 2D simulations were carried out. In all cases, the values of magnetic flux density are computed along a path in the close vicinity of the MM. These values are then compared with the theoretical thin wire values.

Two set of simulations were performed: (a) firstly, by changing the number of turns of the spiral, keeping the frequency fixed; (b) then, with a fixed number of turns, the frequency is varied. The Altair Flux ® commercial software was used in this work for the finite element simulations, with a mesh of second-order elements.

Fig. 3 shows the 2D axisymmetric FE model. The tiny rectangles represent the several turns of the circular MM. The spiral path was modeled by concentric copper loops spaced 1 mm and connected in series. Its finite element discretization is depicted in Fig. 4, where the number of elements in the skin

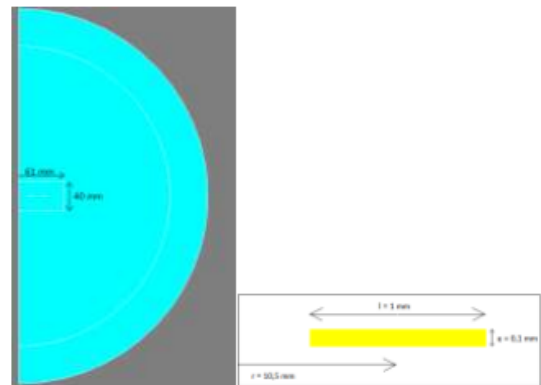


Fig. 3. Axisymmetric 2D FE model of the domain, representing the cross-sectional view of the circular copper loop (left) and detail of one stripe with dimensions (right).

depth was chosen for the highest frequency in the range of interest, 1 MHz.

For the FE magnetodynamic simulations, the spiral was fed by a current source of 1 A rms, with all turns connected in series.

V. SIMULATION RESULTS

A. Single copper loop at several frequencies

In order to verify the validity of the 1D model, we start with a domain composed of a single-turn (one loop) MM, the same configuration as in [7].

The aim is to compute the magnetic flux density, B , in a given path for this configuration, which was very finely meshed, so as to be taken as the reference solution. Then, a second simulation is performed with the copper stripe replaced by a 1D element, i.e., a point region in the 2D domain, placed in the middle of the stripe. Finally, the preceding numerical results are compared with the classical analytical solution of B produced by a magnetic dipole.

These simulations were carried out for a frequency range of 80 kHz to 1 MHz, values that are commonly used for TETs in VAD drives [8].

The results of the simulations are presented in Fig. 5, where the left picture illustrates the path along with the normal component of the magnetic flux density was computed.

Fig. 5b shows the flux density for all the aforementioned scenarios. These results confirm those obtained in [7], i. e., despite the strong skin effect observed in the copper loop, the thin-wire approach has very little effects the field distribution from a given distance from the MM.

Table I summarizes these computational results, showing the relative mean-square error in the magnetic flux density computed along the yellow path of Fig 5, as follows:

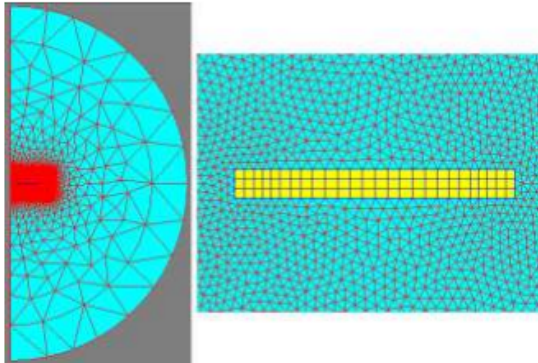


Fig. 5. Finite element mesh of domain in Fig. 3 (full domain at left; detail of one copper strip at right).

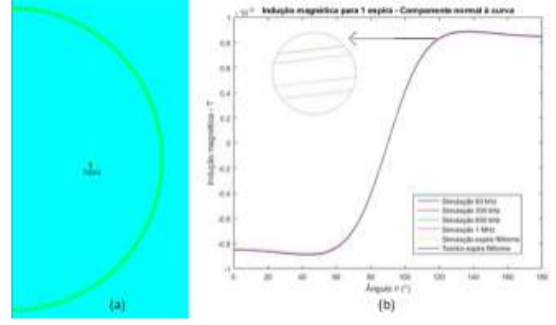


Fig. 4. (a) 2D FE model of the single-turn metamaterial showing the path (half circle) for field computation. (b) Plot of the magnitude of normal component of the magnetic flux density along the half circular path of (a). The detail shows an enlarged excerpt of the curves.

$$\epsilon = \sqrt{\frac{\sum (B_S - B_T)^2}{\sum B_T^2}}$$

where B_T is the theoretical value of the flux density and B_S is the simulated one. The errors observed in Table I, for the whole analyzed frequency range, are negligibly low. All of them are far below 1%, despite a slight increase as the frequency rises.

TABLE I.
RELATIVE MEAN-SQUARE ERROR (%) ON THE COMPUTATION OF THE NORMAL COMPONENT OF MAGNETIC-FLUX DENSITY FOR SEVERAL FREQUENCIES, ALONG THE PATH DEPICTED IN FIG. 6, FOR A PRINTED-CIRCUIT LOOP. COMPARISON OF 2D FINITE ELEMENT SIMULATIONS OF THE SINGLE-TURN COPPER STRIPE METAMATERIAL (BOTH COMPLETE AND 1D MODEL) WITH THE THEORETICAL THIN-WIRE RESULT

ϵ (%)	Thin wirel	Complete model			
		80 kHz	300 kHz	800 kHz	1 MHz
	0,0125	0,1530	0,3861	0,5209	0,5385

B. Effect of the number of turns

Besides the pronounced skin effect that arises in the copper stripes of the MM at high frequencies, a larger number of turns also affect its current distribution, due to the proximity effect. These phenomena can be clearly observed in the studied configurations, as shown in Fig. 6. Therefore, it is necessary to verify if the error committed by the thin-wire approximation remains acceptable, as in the single-turn case. The behavior of the field as the number of turns increased was verified in two parallel, straight paths, placed 2.5 mm and 12.5

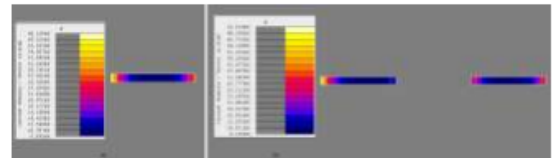


Fig. 6. Color shades of magnitude of the current density in the copper stripes at 800 kHz: (a) 1 turn (showing the skin effect); (b) 2 turns (both skin and proximity effects).

mm from the plane of the MM. Fig. 7 shows a comparison of the flux densities generated by 1 and 16 turns.

Once more, the computed field values were compared to the analytical calculation, in which each copper stripe was replaced by a thin wire. The mean-square error (ϵ) was calculated as previously. Table II shows the results obtained for 2, 4, 8 and 16 turns at the frequency of 800 kHz.

TABLE II. EFFECT OF NUMBER OF TURNS RELATIVE MEAN-SQUARE ERROR (%) ON THE COMPUTATION OF THE MAGNITUDE OF NORMAL MAGNETIC FLUX DENSITY, COMPUTED FOR SEVERAL NUMBER OF TURNS, ON PATHS PARALLEL TO THE METAMATERIAL (MM) AND PLACED AT DISTANCES 2.5 AND 12.5 MM. COMPARISON OF 2D FINITE ELEMENT SIMULATIONS AT 800 KHz OF THE SINGLE-TURN COPPER STRIPE METAMATERIAL (BOTH COMPLETE AND 1D MODEL) WITH THE THEORETICAL THIN-WIRE RESULT

d^a	2.5				12.5				
	turns	2	4	8	16	2	4	8	16
ϵ (%)		1,924	2,203	2,029	1,705	0,620	0,794	0,864	0,774

^a Distance (mm) from MM.

The errors did not exceed 3% with increased number of turns. The maximum error for a distance of 2.5 mm was 2.2% with 4 turns. For a distance of 12.5 mm and 8 turns, the error was 0.86%.

C. Effect of increasing frequency

The increase in frequency affects the current distribution in the conductors. The current density is concentrated in the periphery of the stripes due to the skin effect and the field distribution is also modified, as shown in Fig. 7. Tables III-IV show the mean-square error at several frequencies for 1 and 16 turns, respectively.

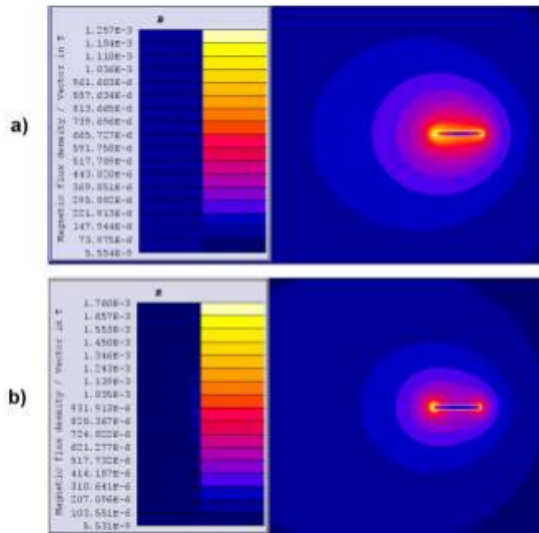


Fig. 7. Magnitude of magnetic flux density generated by a loop at frequencies (a) 80 kHz and (b) 1 MHz.

TABLE III. EFFECT OF FREQUENCY (SINGLE TURN) ROOT-MEAN-SQUARE ERROR IN MAGNETIC FLUX DENSITY OF A COPPER STRIPE LOOP AT DIFFERENT DISTANCES - COMPARISON BETWEEN FE SIMULATION AND THEORETICAL VALUE FOR THIN WIRE APPROACH.

d^b	2.5				12.5				
	kHz	80	300	800	1000	80	300	800	1000
ϵ (%)		0,803	1,068	1,313	1,353	0,170	0,332	0,433	0,443

^b Distance (mm) from MM.

TABLE IV. EFFECT OF FREQUENCY (16 TURNS) ROOT-MEAN-SQUARE ERROR MAGNETIC FLUX DENSITY AT DIFFERENT DISTANCES OF THE SPIRAL - COMPARISON BETWEEN FE SIMULATION AND THEORETICAL VALUE FOR THIN WIRE APPROACH.

d^c	2.5				12.5				
	kHz	80	300	800	1000	80	300	800	1000
ϵ (%)		0,263	1,146	1,705	1,781	0,116	0,518	0,774	0,810

^c Distance (mm) from MM.

In all situations the error of the thin wire approximation increases with frequency, but remains below 2% for the frequency band of interest.

CONCLUSION

In order to study the impact of using a metamaterial in the performance of a TET system, the FEA can be a valuable tool, but it must be carried out in 3D. However, with the available current computational resources, including a MM in the 3D domain with its actual dimensions is not feasible, and a reduced model must be devised. In this work, we try to show that a thin wire approach can be a viable alternative.

To evaluate the suitability of the thin wire approach we presented an analysis of the error of this approximation with respect to the complete, full model of the MM. This analysis is performed with the aid of 2D FE simulations, since a 3D mesh of the actual MM led to an impractical number of elements. We then chose a simplified model of the MM, namely, a round spiral, to enable a 2D simulation. In these first experiments the MM was simulated as active source of fields (inductor), and the impact of the number of turns, as well as operating frequency was verified.

In all test cases the error in replacing the copper stripe by a thin wire did not exceed 3% in a close vicinity of the MM, showing that this approach can be used in the finite element analysis. It is worth mentioning that we are assuming that the results obtained for a circular spiral can be extended to the case of the square spiral, but this hypothesis needs to be verified, what will be done in the extended version of this work. Moreover, additional validation experiments are in course, but not yet fully documented at the moment of the paper submission. These are: (i) testing the MM as a passive, induced circuit, although this analysis was already been reported in [7] as well, with no significant change in the errors; (ii) instead of a single, using two thin wires in parallel, placed at the two edges of the copper stripe; (iii) perform the 3D simulation with the thin wire approach, both single- and two wire, and for both circular- and square-spiral MMs.

REFERENCES

- [1] V.G. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ," SOVIET PHYSICS USPEKHI, vol. 10 (4), 1968.
- [2] J.B Pendry, A.J Holden, D.J Robbins, and W.J Stewart, "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena," IEEE Transactions on microwave theory and techniques, vol. 47, no. 11, pp. 2075–2084, Nov-1999.
- [3] 3. Nishimura, S. I., Enhancing the inductive coupling and efficiency of wireless power transmission system by using metamaterials, Research Report, Laboratoire Ampère, Ecole centrale de Lyon, France, 2014.
- [4] 4. Nishimura S. I, Almeida J. V., , Vollaire C., Sartori C. A. F., Breard A., Morel F., Krähenbühl L., Enhancing the inductive coupling and efficiency of wireless power transmission system by using metamaterials, Proceeding of MOMAG 2014, Curitiba, PR.
- [5] Haffner F., Transcutaneous Energy Transfer applied to Ventricular Assist Devices using Metamaterials, Research Internship Report (Advisors: V. C. Silva, C. A. F. Sartori), EPUSP, 2017.
- [6] D. W. Ferreira, "Topics in design and analysis of transcutaneous energy transfer to ventricular assist devices," PhD Thesis, EPUSP, 2013.
- [7] Zhao Li, Développement Multipolaire en harmonique spherique et propagation des incertitudes appliqués à la modélisation de source de rayonnement en Compatibilité Electromagnétiques, PhD Thesis, Ecole Centrale de Lyon, 2017.
- [8] O. Knecht, R. Brosshard, and J. W. Kolar, "High-Efficiency Transcutaneous Energy Transfer for Implantable Mechanical Heart Support Systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 11, pp. 6221–6236, Nov. 2015.



Gustavo Domingues Carvalho <gustavo.carvalho@usp.br>

[PRP Informa] Indicação para a Etapa Internacional do 26º SIICUSP

Eventos PRP USP <eventosprp@usp.br>
To: gustavo.carvalho@usp.br

Wed, Oct 31, 2018 at 10:19 AM

Prezado(a) Gustavo Domingues Carvalho

(Orientador: Viviane Cristine Silva)

É com grande satisfação que informamos que você foi indicado(a) para participar da Etapa Internacional do 26º SIICUSP, que acontecerá nos dias **22 e 23 de novembro de 2018**, no Centro de Difusão Internacional, bloco A (Av. Prof. Lúcio Martins Rodrigues 310, Cidade Universitária, São Paulo).

Cumprimentamos você por seu destaque na IC/IT e seu(sua) orientador(a) pela excelente orientação!

Você deverá trazer um **pôster em língua inglesa** com as informações sobre seu trabalho, conforme orientações contidas em <http://bit.ly/guidelines26SIICUSP>. Para escolha da data e horário de sua apresentação, pedimos que preencha esse formulário: <http://bit.ly/Inscricao26SIICUSP> até o dia **06/11/2018**. A Grande Área que seu trabalho estará localizada no evento pode ser conferida em http://bit.ly/26SIICUSP_Convocados, assim como os demais convocados(as). Você deverá permanecer ao lado do pôster durante toda a sessão, respondendo às perguntas dos avaliadores, que podem ser em inglês ou português. Pedimos que **chegue às 8h00** para retirar sua credencial, seu tíquete de almoço e a etiqueta com o número da inscrição para afixar no pôster.

O seu crachá deverá ser devolvido no final do dia e solicitado novamente no dia seguinte.

Você também está convidado(a) a participar como avaliador(a) júnior das sessões de pôsteres em que não estiverem apresentando seu próprio trabalho. Para participar como avaliador(a), solicite a ficha na recepção do evento antes da sessão. Será enviada declaração de participação aos que entregarem a ficha.

A programação completa preliminar do evento está disponível em <http://bit.ly/26SIICUSPprogramacao>. Você pode convidar quem desejar para participar do evento, pois ele é totalmente aberto ao público!

Atenciosamente,

Pró-Reitoria de Pesquisa

www.prp.usp.br

www.facebook.com/prp

www.siicusp.usp.br