

TRANSMISSÃO DE POTÊNCIA WIRELESS

[\[ver artigo online\]](#)

Kaio Carvalho Thomaz¹
Diego Assereuy Lobão²
Raphael Fracalossi³

RESUMO

Este trabalho visa demonstrar teoricamente e por meio de simulações computacionais o método de transmissão de energia sem fio (wireless) utilizando acoplamento por modo ressonante. Para fundamentar os resultados obtidos, é apresentado um resumo teórico das principais formas de modelagem adotadas à medida que são apresentadas equações que norteiam as análises. No decorrer do texto são abordados assuntos como: um breve histórico da transmissão de energia sem fios, os possíveis efeitos da tecnologia em relação à saúde humana, vantagens sobre o método tradicional de indução e exemplos de aplicação no dia a dia. Por fim, a proposta do artigo é de apresentar os resultados obtidos através de simulações computacionais, além de motivar aplicações em diversos segmentos incluindo o uso residencial, comercial, médico, automobilístico, entre outros.

Palavras-chave: Transmissão de energia, sem fio, modos ressonantes, eficiência

WIRELESS POWER TRANSMISSION

ABSTRACT

This paper aims at demonstrating theoretically and by means of computational simulations the method of wireless transmission of energy using the resonant mode coupling. In order to support the results, a theoretical summary of the main ways of modeling adopted as the equations that guide the analyzes are presented.

Throughout the text, a brief history of wireless energy transmission, the possible results of the technology in relation to human health, advantages over the traditional induction method and examples of day-to-day application are discussed.

Finally, the proposal of the article is to present the results obtained through computational simulations and to motivate applications in several segments from residential, commercial, medical, automotive, etc.

Key words: Power transmission, wireless, resonant modes, efficiency.

1. Bacharel em Engenharia Elétrica da Faculdade Brasileira – Multivix; kaiothomaz25@gmail.com

2. Bacharel em Engenharia Elétrica da Faculdade Brasileira – Multivix; diego.lobao@gmail.com

3. Mestre em Física, docente da Faculdade Brasileira – Multivix; rfracalossi@gmail.com

SEMANA ACADÊMICA

INTRODUÇÃO

Os estudos sobre a transferência de energia elétrica sem fio iniciaram-se no final do século XIX com Nikola Tesla quando, em 1892, ele conseguiu demonstrar com seus experimentos o acendimento de lâmpadas incandescentes sem o uso de fios conectados à rede elétrica. O trabalho iniciado por Tesla motivou vários físicos e engenheiros a pesquisarem mais sobre o assunto, até que em 2007 um grupo de pesquisadores do Massachusetts Institute of Technology - MIT realizou experimentos com modos eletromagnéticos ressonantes para transferência de energia sem fio não irradiante. Os pesquisadores conseguiram acender uma lâmpada de 60W num alcance de 2m com 40% de eficiência utilizando 2 bobinas de cobre sem conexão física entre elas com raio de 30cm cada. É evidente que essa tecnologia, ainda pouco explorada, possui alta aplicabilidade nos dias atuais e abre portas para importantes avanços no desenvolvimento de sistemas de transmissão de energia *wireless* que podem ser utilizados para alimentar eletricamente uma diversa gama de equipamentos, desde dispositivos eletrônicos portáteis até sistemas da ordem de dezenas de quilowatts.

Uma questão recorrente ao redor do tema é sobre a eficiência de um sistema de transmissão de potência *wireless*. Sabe-se que sistemas puramente indutivos não atendem critérios de transmissão em média distância devido à dispersão do fluxo magnético. O modo ressonante surge como uma alternativa ao método indutivo, principalmente se associado a ajuste de frequência ou a redes de casamento de impedância para otimização da eficiência. Mas, qual a real influência desses métodos no cálculo da eficiência global de um sistema de transmissão de potência? E, em que casos práticos essa tecnologia seria aplicável em detrimento de um sistema de alimentação convencional (com fios)?

A motivação inicial dessa pesquisa reside na necessidade crescente de autonomia dos dispositivos eletroeletrônicos móveis, uma vez que essa autonomia é prejudicada à medida que a complexidade das tarefas executadas por tais dispositivos aumenta e, portanto, aumenta o consumo de energia e a conseqüente necessidade de carregamento, fazendo com que o dispositivo perca, ainda que momentaneamente, a característica de ser móvel. A transmissão de energia elétrica sem a utilização de fios também é desejável em sistemas de potência mais robustos, uma vez que as possíveis dificuldades encontradas ao transpor barreiras físicas para

a instalação de linhas de transmissão convencionais poderiam ser superadas por um sistema sem fios, desde que a eficiência nesse modo de transmissão seja viável para a aplicação.

O sucesso da investigação dos métodos de otimização de transmissão de potência sem fios certamente possibilitará a aplicação da tecnologia à mais variada gama de dispositivos móveis, dentre os quais estão inclusive aparelhos largamente utilizados na medicina como o marca-passos e afins. A determinação dos limites mínimos de eficiência que tornariam viável a substituição da transmissão de energia com fios pela transmissão *wireless* também contribuirá para a modernização de diversos sistemas e a popularização desses sistemas *wireless* culminará em uma maior autonomia para os dispositivos e equipamentos móveis. Um exemplo é o automóvel elétrico que poderá ser carregado durante o tempo que estiver estacionado nos estabelecimentos frequentados ao longo do dia pelo usuário, desde que haja disponível uma estação de carregamento *wireless* nos locais (popularização da tecnologia).

2. EFEITOS SOBRE A SAÚDE HUMANA

A transmissão de energia sem fios pode despertar em muitos a curiosidade sobre possíveis riscos de exposição para o ser humano. Abreu (2012) descreve detalhadamente os riscos da energia irradiada, frisando o fato de que a transmissão por modos ressonantes (escopo deste trabalho) se trata de uma forma não-irradiante de transmissão, embora haja diversos meios de transmitir energia de forma irradiante.

O nível de irradiação de uma antena pode ser modelado pela resistência de radiação R_r , que é dada por:

$$R_r = 20\pi^2 \left(\frac{C}{\lambda}\right)^4 N^2 \quad (1)$$

Onde C é o comprimento da circunferência da espira, λ é o comprimento de onda do sinal e N é o número de espiras.

É possível observar que os valores da resistência de radiação são extremamente baixos para as aplicações de transmissão de energia *wireless* por modos ressonantes, mesmo em

sistemas da ordem de dezenas de quilowatts, de tal forma que não é dificultada a adequação de protótipos às normas que regulamentam a exposição humana à energia irradiante.

Kesler (2017), engenheiro chefe da ©WiTricity Corporation, explica que com o projeto apropriado é possível manter os campos elétricos e magnéticos abaixo dos níveis que estabelecem potenciais prejuízos à saúde humana, a exemplo do que ocorre com os demais dispositivos eletromagnéticos como celulares, roteadores *wireless*, fones *bluetooths*, rádios transmissores, entre outros.

O Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) e a Comissão Internacional de Proteção contra Radiações Não-Ionizantes (ICNIRP) estabeleceram algumas diretrizes de segurança para os limites de exposição. Para o público geral, é admitida uma Taxa de Absorção Específica (SAR) medida sobre o corpo inteiro de 0,08 W/kg e um limite localizado de 2 W/kg medido sobre 10g de tecido humano. Acima de 100 kHz essas diretrizes fornecem as restrições fundamentais para os campos eletromagnéticos em termos da SAR no corpo a fim de evitar o estresse térmico e aquecimento do tecido humano.

Um estudo realizado por membros da IEEE (CHRIST et al., 2013) executou testes em plataformas de simulação utilizando 4 modelos anatômicos humanos diferentes (2 adultos e 2 crianças) para verificar a incidência do campo eletromagnético no corpo humano sob efeito de acoplamentos ressonantes de 8 MHz. Para cada modelo, foram analisadas as orientações coronal, axial e sagital da bobina a uma distância de 10mm entre a bobina e o tecido.

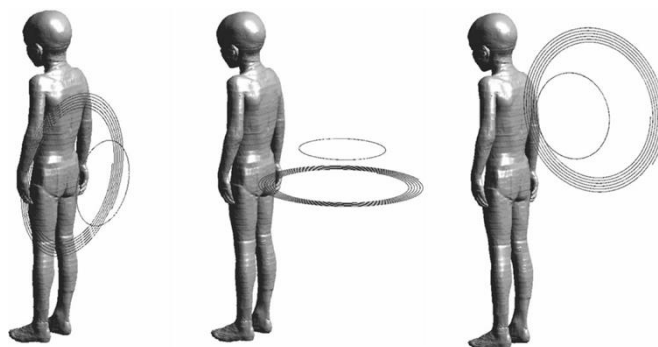


Figura 1 - Orientações coronal, axial e sagital (CHRIST et al., 2013)

Conforme a Figura 1, a posição coronal é a que confere maior exposição do tecido humano ao campo eletromagnético em relação às outras orientações geométricas, atingindo limites de exposição em correntes de $0,5 A_{RMS}$ a $1,2 A_{RMS}$ (45W a 280W de potência transmitida, respectivamente), dependendo do modelo do corpo humano utilizado.

Utilizando uma potência nominal de 10W, um estudo Sul-Coreano (MUN et al., 2012) analisou o efeito sobre a saúde humana de um dispositivo *wireless* para carregamento de celulares operando em uma frequência de 6.74 MHz. As simulações levaram em conta o campo elétrico, SAR localizada e SAR de corpo inteiro que o protótipo do corpo humano estaria submetido e os resultados foram comparados tanto com as diretrizes Sul-Coreanas como com a ICNIRP 2010, obtendo máxima potência de entrada permitida de 470W no primeiro caso e 1042 W no segundo. Ainda segundo os autores, é importante ressaltar que os valores de máxima potência permitida informados no artigo são referentes especificamente aos protótipos testados, uma vez que um projeto para uso comercial pode alterar sensivelmente as características do dispositivo e, portanto, os valores de potência e taxa de absorção calculados.

Shi et al. (2015) e Koohestani et al. (2016), por sua vez, procederam testes com 1 W de potência de entrada, sendo que o primeiro trabalho aborda essencialmente os limites de SAR referentes a dispositivos biomédicos alimentados por transmissão de potência *wireless* e implantados sob a pele do paciente, enquanto o segundo trabalho levantou dados relevantes quanto à máxima potência de entrada permitida para transferência de potência *wireless* em atendimento às restrições básicas da ICNIRP 1998.

Em um recente estudo (WEN; HUANG, 2017), um cenário mais específico foi analisado. Examinou-se a influência do campo eletromagnético, gerado a partir de duas estações de carregamento *wireless* de veículos elétricos, na saúde humana. As simulações consideraram as duas estações operando simultaneamente sob condições distintas e o impacto nos vários órgãos do corpo humano, frente aos limites de exposição supracitados. Nesse caso, a potência máxima admitida no sistema é de 55.5 kW.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

A técnica por trás do atual estado da arte da transmissão de energia sem fios reside no modo de transmissão ressonante (ou modo magneticamente acoplado). Uma base teórica para o equacionamento do sistema pode ser obtida a partir de duas teorias, a saber: teoria de circuitos (parâmetros S) e teoria de modo acoplado. A primeira, mais intuitiva, é utilizada na maioria dos artigos acadêmicos sobre o tema, enquanto a segunda, mais complexa, foi utilizada no equacionamento dos experimentos realizados em 2007 por uma equipe do Massachusetts Institute of Technology (MIT), liderada pelo professor Marin Soljacic'.

Antes de uma visão geral sobre ambas as teorias, se faz necessária uma distinção entre as diversas formas de transmissão de ondas eletromagnéticas pelo ar. As tecnologias atuais podem ser divididas basicamente em dois grandes grupos: campo próximo e campo distante. Dentre as aplicações baseadas em campo distante temos, por exemplo, a transmissão de sinais de telecomunicação por meio de antenas e a transmissão de potência via lasers. Como exemplos de aplicações que utilizam o campo próximo podem ser citadas a transmissão de potência por indução (utilizada em transformadores com núcleo de ar) e a transmissão de dados em curta distância (NFC, Bluetooth, etc.). A transmissão de potência *wireless* por modos ressonantes tem por objetivo otimizar a eficiência de uma transmissão puramente indutiva, permitindo uma distância maior entre o dispositivo transmissor e receptor, além de uma maior liberdade de orientação espacial entre eles.

É claro que os diversos estudos na área fornecem diferentes topologias de circuitos, uma vez que até mesmo a geometria das bobinas tem um papel importante nos parâmetros do circuito e, em última instância, na eficiência do sistema.

A essa altura, é importante compreender a ideia intuitiva de que um circuito ressonante ligado a uma fonte primária é capaz de alimentar, eficientemente, um circuito secundário igualmente ressonante ligado a uma carga. O circuito transmissor – ligado à fonte – e o circuito receptor – ligado à carga – são circuitos do tipo RLC, isolados eletricamente, operando em uma frequência de ressonância ω que é facilmente calculada igualando-se os módulos das reatâncias capacitiva e indutiva. Ao contrário de um sistema puramente indutivo, a transmissão de potência por modos ressonantes tem mostrado bons resultados em aplicações de médias distâncias, como será visto a seguir.

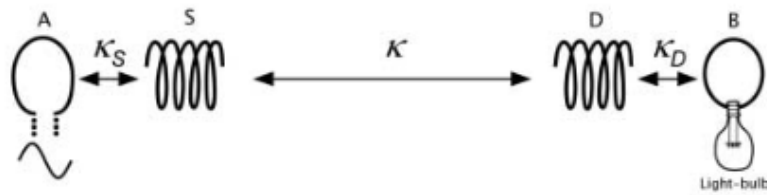


Figura 2 – Diagrama esquemático de transmissão wireless (KURS, 2007).

A Figura 2 mostra o diagrama esquemático do sistema utilizado pela equipe do MIT em seus experimentos. As bobinas transmissora, S, e receptora, D, possuem um fator de acoplamento k , que varia de 0 a 1 ao passo que a distância, geometria ou posição relativa entre as bobinas é alterada. De modo que o acoplamento é máximo ($k=1$) quando as bobinas S e D estão perfeitamente acopladas magneticamente, ou seja, quando o efeito da indutância mútua exercido por S em D (e vice-versa) é máximo. Analogamente, quando posicionadas de tal maneira que S não possui influência em D (e vice-versa), temos k nulo e, por conseguinte, a indutância mútua entre as bobinas é igualmente nula. As espiras (*loops*) A e B estão eletricamente conectadas, respectivamente, à fonte e à carga e magneticamente acopladas às bobinas S e D, segundo os fatores de acoplamento k_S e k_D , como é indicado na Figura 2.

3.1 Teoria de Modo Acoplado

A teoria de modo acoplado (do inglês, *Coupled Mode Theory – CMT*) fornece uma visão mais genérica do sistema ao analisar a interação que ocorre entre dois objetos ressonantes do ponto de vista físico. Como alguns artigos analisam o sistema por meio dessa teoria, faz-se aqui uma síntese da modelagem matemática e das ideias utilizadas, sendo que um aprofundamento maior e a demonstração das equações fogem ao escopo deste trabalho.

Seja $a_m(t)$ a amplitude complexa do m -ésimo ressonador, então:

$$\frac{d}{dt} a_m(t) = -(i\omega_n - i\Gamma_m) a_m(t) - \sum_{n \neq m} ik_{mn} a_n(t) + F_m(t) \quad (2)$$

A variável $a_m(t)$ é definida tal que a energia contida no objeto m é dada por $|a_m(t)|^2$, ω_n é a frequência de ressonância do objeto isoladamente, Γ_m é a taxa de decaimento intrínseco

(devido a perdas ôhmicas, radiação, etc.), k_{mn} são os valores dos coeficientes de acoplamento entre os objetos m e n (é possível demonstrar que $k_{mn} = k_{nm}$) e $F_m(t)$ é o termo que representa a fonte externa que alimenta o conjunto de objetos ressonantes.

A equação diferencial (2) pode ser resolvida para o caso particular de dois objetos ressonantes idênticos, fornecendo as seguintes frequências naturais para o sistema:

$$\omega_{1,2} = \omega_0 \pm \sqrt{k^2 - \Gamma^2} \quad (3)$$

O fenômeno de separação de frequência (do inglês, *frequency splitting*) pode ser calculado a partir da diferença entre ω_1 e ω_2 , obtidos por meio da equação (3) para $k > \Gamma$. O valor de k é, portanto, calculado utilizando o valor de separação de frequência e o valor de Γ , determinado experimentalmente.

Uma das vantagens apresentadas pela teoria de circuito acoplado é a determinação da eficiência em termos do fator de acoplamento e de taxas de decaimento intrínseco do sistema:

$$\eta = \frac{\frac{\Gamma_W k^2}{\Gamma_D^2 \Gamma_S}}{\left(1 + \frac{\Gamma_W}{\Gamma_D}\right) \frac{k^2}{\Gamma_S \Gamma_D} + \left(1 + \frac{\Gamma_W}{\Gamma_D}\right)^2} \quad (4)$$

Os subíndices D, S e W utilizados na equação (4) são referentes à bobina receptora, bobina transmissora e carga, respectivamente. É possível ainda demonstrar que a eficiência é otimizada quando $\Gamma_W/\Gamma_D = \sqrt{1 + k^2/(\Gamma_S \Gamma_D)}$. Sendo assim, é possível escrever a eficiência η como uma função apenas de $k/\sqrt{\Gamma_S \Gamma_D}$, que representa uma figura de mérito do sistema, aqui definida pela letra U. Abaixo está o gráfico da eficiência, η , em função da figura de mérito, U:

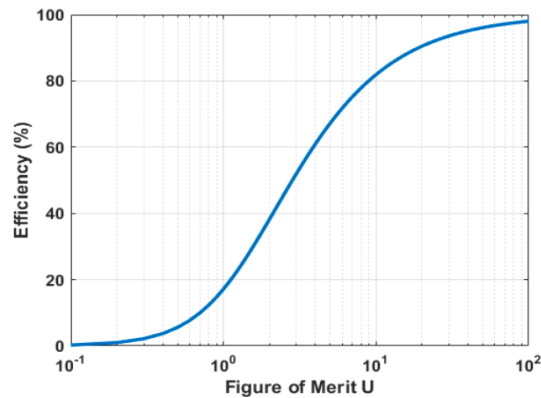


Figura 3 – Eficiência em função da figura de mérito U (KESLER, 2017).

É importante salientar que a figura de mérito do sistema representa a razão da taxa de transferência de potência pela taxa de dissipação de potência. Kurs (2007) explica que: o coeficiente k é uma medida de quão rápido dois objetos trocam energia e $\sqrt{\Gamma_S \Gamma_D}$ é essencialmente a taxa na qual as bobinas transmissora e receptora dissipam energia; portanto, se $k > \sqrt{\Gamma_S \Gamma_D}$, isto é $U > 1$, então a energia é transferida da bobina transmissora à bobina receptora antes que a maior parte dela seja dissipada. Esse regime é chamado de fortemente acoplado (do inglês, *strongly coupled regime*).

Tal modelagem se aplica de uma maneira geral para todos os sistemas físicos de objetos ressonantes acoplados. O próximo tópico trará uma abordagem mais específica, do ponto de vista de circuitos elétricos propriamente.

3.2 Teoria de Circuitos Elétricos

Um sistema que trata de objetos ressonantes, como o ilustrado na Figura 2 (com exceção dos *loops*, por simplicidade), pode ser modelado da seguinte maneira:

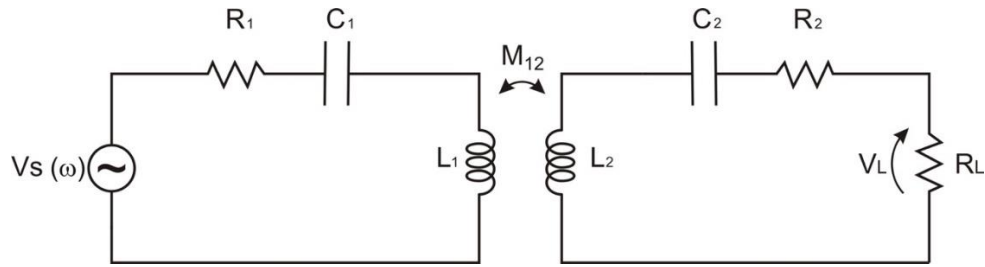


Figura 4 – Representação circuital de um sistema de transmissão wireless.

A Figura 4 é uma representação circuital de um sistema de transmissão de energia *wireless* composto por uma fonte que aplica uma tensão senoidal V_S ao circuito série formado pelo indutor L_1 e pelo capacitor C_1 . A resistência interna da fonte e a resistência inerente ao indutor estão resumidas em R_1 (representando também perdas ôhmicas, por radiação, etc.). Os indutores L_1 e L_2 estão magneticamente acoplados e esse acoplamento pode ser medido através da indutância mútua entre eles, comumente representada pela letra M e definida em termos do coeficiente de acoplamento k e das indutâncias próprias de cada indutor. Em síntese, o circuito transmissor é composto pela fonte e pelos elementos de subíndice 1 e o circuito receptor, por sua vez, pelos elementos de subíndice 2 e a carga R_L , submetida à tensão V_L . Por fim, a frequência da fonte é ajustada para uma frequência ω , de modo que o circuito seja posto em ressonância.

Definida a indutância mútua $M_{12} = k_{12}\sqrt{L_1L_2}$ e aplicando a Lei de Kirchhoff nas malhas, pode-se calcular, após a resolução do sistema linear resultante, a função de transferência do sistema:

$$\left| \frac{V_L}{V_S} \right| = \frac{\omega MR}{Z^2 + (\omega M)^2} \quad (5)$$

Onde $Z = R + j\omega L + 1/(j\omega C)$ é a impedância equivalente do ramo série e $M = kL$ é a indutância mútua, ambos os termos definidos sob a consideração de circuitos simétricos, ou seja $L_1 = L_2 = L$, $C_1 = C_2 = C$, $R_1 = R_2 + R_L = R$.

A frequência de ressonância ω_0 pode ser obtida igualando-se os módulos das reatâncias indutivas e capacitivas, de tal modo que $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$. Além disso, uma importante figura de

mérito dos ressonadores é o fator de qualidade Q (uma medida da capacidade de armazenamento de energia do ressonador). Neste caso, é desejável que as bobinas transmissoras e receptoras possuam um fator de qualidade tão alto quanto for possível. O valor de Q pode variar de acordo com a geometria e com o material das bobinas, podendo ser definido tanto em termos da teoria de modo acoplado como da teoria de circuitos pelas seguintes equações:

$$Q = \frac{\omega_0}{2\Gamma} = \frac{\omega_0 L}{R} \quad (6)$$

Portanto, mediante as considerações acima é possível reescrever a função de transferência da equação (5) para o modo ressonante ($\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$) em função apenas do coeficiente de acoplamento k e fator de qualidade Q , conforme pode ser visto a seguir:

$$\left| \frac{V_L}{V_S} \right| = \frac{kQ}{1+(kQ)^2} \quad (7)$$

Derivar a equação (7) e igualar o resultado a zero, permite encontrar o ponto de máximo da função de transferência que ocorre quando $k = k_{\text{crítico}} = 1/Q$. Nesse ponto dizemos que o circuito possui acoplamento crítico. Valores de k maiores que o $k_{\text{crítico}}$ definem uma região de operação do circuito onde é possível obter máxima transferência de energia (regime fortemente acoplado), desde que um método de ajuste da frequência de ressonância seja aplicado, como será demonstrado a seguir. Isso mostra intuitivamente que a máxima transferência de energia da fonte à carga está associada a um fator de acoplamento mínimo (crítico), que por sua vez corresponde à uma distância máxima (crítica), dependente apenas de Q . Em outras palavras, quanto maior for o fator de qualidade Q das bobinas, maior será a distância possível para transferência máxima de energia da fonte à carga.

Partindo do princípio que a frequência de ressonância do circuito é, em geral, da ordem dos MHz, por razões práticas a análise do circuito via parâmetros S é a mais adequada para fins de medir a transferência de potência num sistema *wireless*.

Desse modo, ao analisar o circuito como uma rede de duas portas (fonte na entrada e carga na saída) e uma vez conhecida a sua função de transferência, é possível calcular a

magnitude do parâmetro S_{21} , que é de especial interesse para o cálculo da máxima transferência de energia do sistema. Assim, conforme Sample et al. (2011), temos:

$$|S_{21}| = 2 \left| \frac{V_L}{V_S} \right| \quad (8)$$

Pode-se ainda demonstrar que o ganho de potência do transdutor (tratado em algumas literaturas como a eficiência da transmissão), correspondente à razão entre a potência na carga e a potência disponível na fonte (CHEN, 2007), é dado por:

$$G_T = |S_{21}|^2 \quad (9)$$

4. RESULTADOS: SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Como meio de consolidação da teoria abordada, foram realizadas simulações computacionais em diferentes softwares. De modo geral, foi possível manipular alguns parâmetros do sistema a fim de medir a magnitude de S_{21} à medida que são variados a frequência ω e o coeficiente de acoplamento k .

A seguir serão apresentadas telas com os resultados dessas simulações, bem como alguns comentários pertinentes.

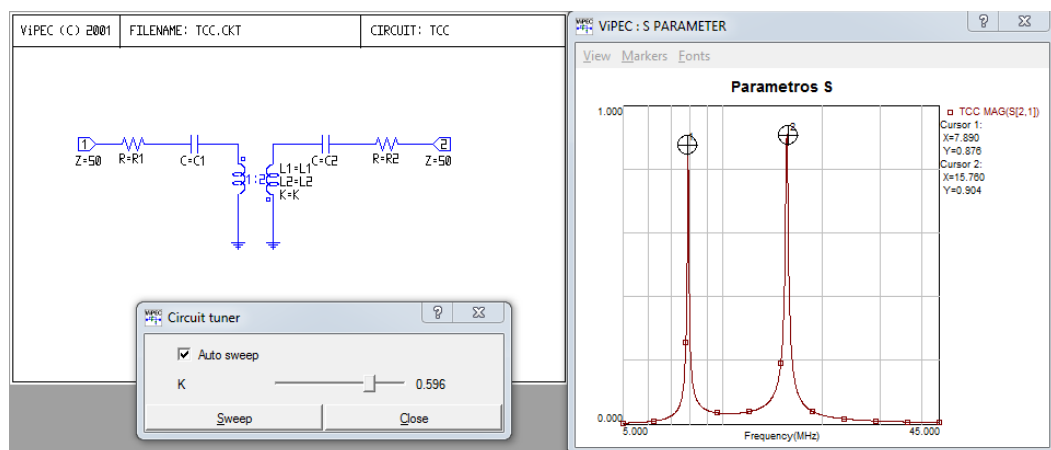


Figura 5 - Simulação realizada no software ©ViPEC

Na figura 5, o gráfico de S_{21} em função da frequência foi gerado a partir de um valor de k , considerando os seguintes valores de componentes do circuito: $L_1 = L_2 = 80\mu H$, $C_1 = C_2 = 3,2pF$, $R_1 = R_2 = 5\Omega$ e impedância típica da fonte e da carga em 50Ω . No gráfico da figura, é possível visualizar o fenômeno supracitado de separação de frequência (*frequency splitting*) em torno da frequência de ressonância, que é de aproximadamente $9,95\text{ MHz}$ para os valores utilizados.

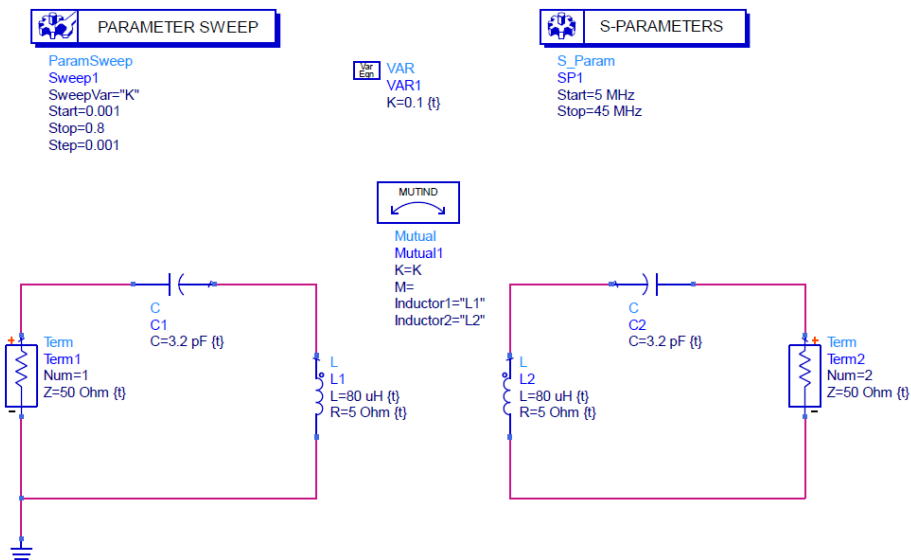


Figura 6 - Simulação realizada no software ©ADS (Keysight).

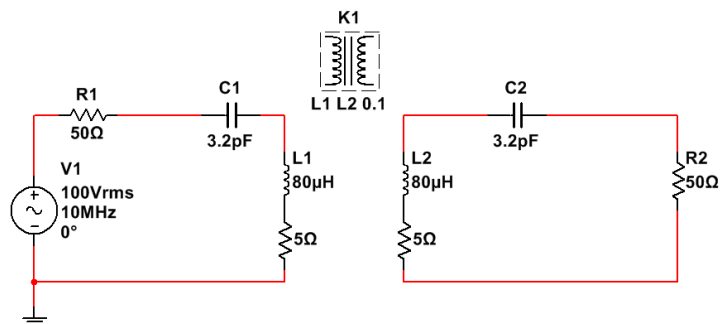


Figura 7 - Simulação realizada no software ©MultiSim.

Os mesmos valores de componentes foram utilizados na simulação com os softwares ADS e MultiSim, conforme pode ser visto nas Figuras 6 e 7. A ferramenta *parameter sweep* permite variar o coeficiente de acoplamento k em um intervalo predefinido, que para essas simulações foi de 0,001 à 0,8, de modo que os programas são capazes de gerar um gráfico de S_{21} para uma gama de valores de k . É importante salientar que no MultiSim, o cálculo de S_{21} foi efetuado manualmente através a equação (8), uma vez que, ao contrário dos demais softwares, o MultiSim não possui uma ferramenta específica para cálculo dos parâmetros S. Para fins de comparação, as Figuras 8, 9 e 10 apresentam os resultados das simulações nos softwares MultiSim, ViPec e ADS (Keysight), respectivamente:

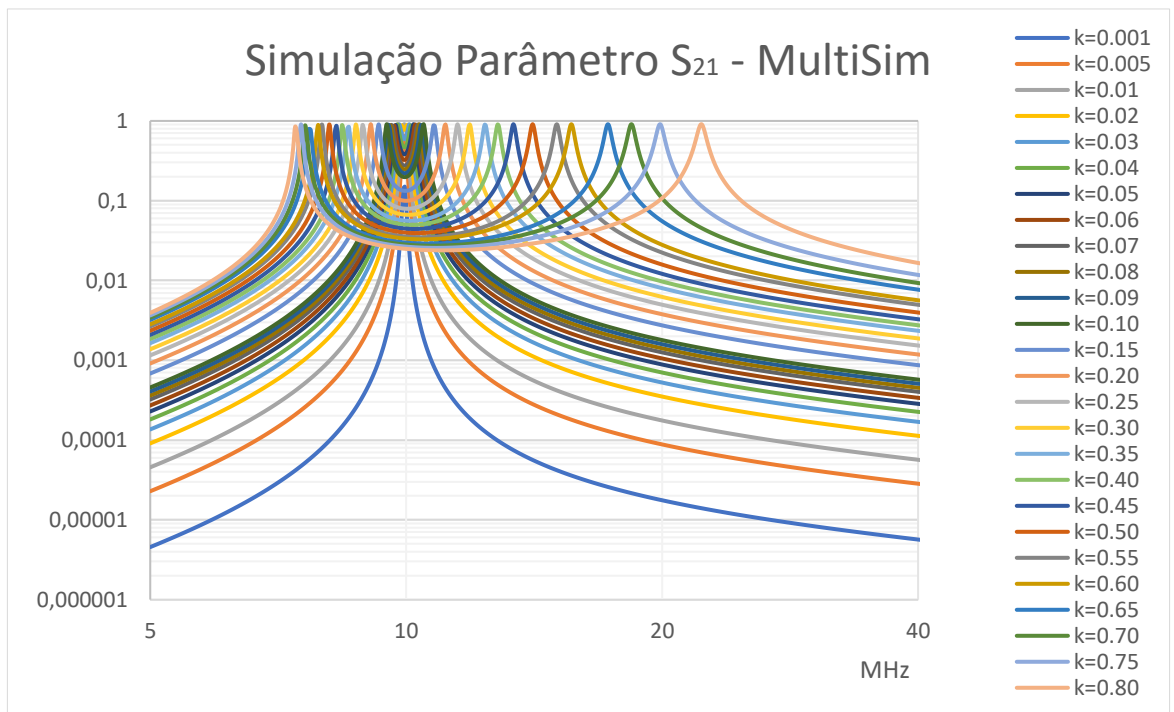


Figura 8 - Magnitude de S_{21} sobreposta para vários valores de k - MultiSim.

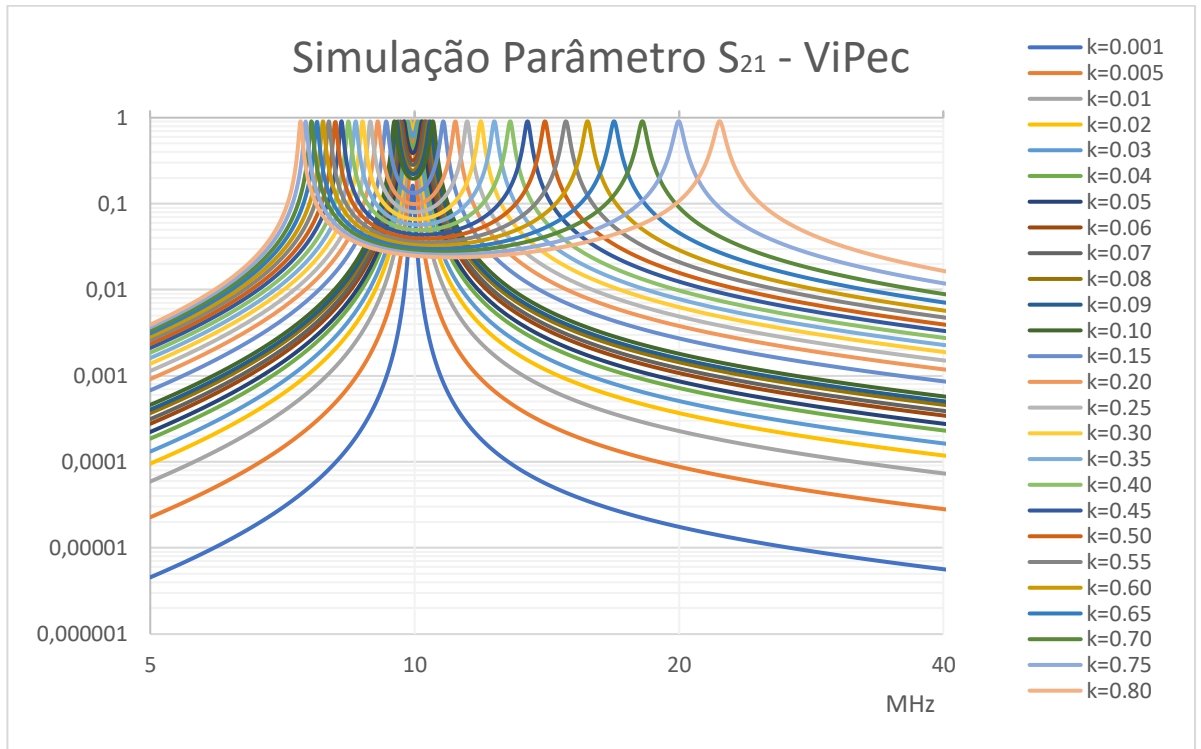


Figura 9 - Magnitude de S_{21} sobreposta para vários valores de k - ViPec.

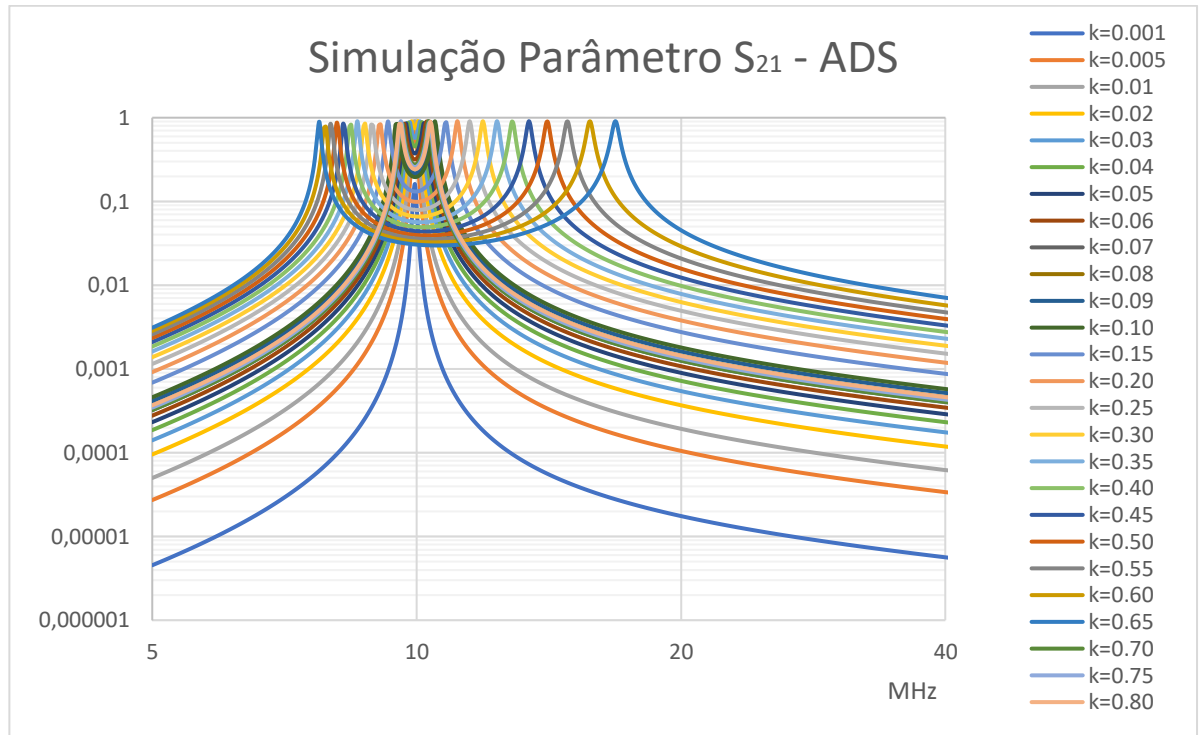


Figura 10 - Magnitude de S_{21} sobreposta para vários valores de k - ADS.

É importante observar que à medida que o parâmetro k diminui, a diferença entre os picos de S_{21} diminui, convergindo para um único pico na frequência de ressonância ($\sim 9,95$ MHz). A partir daí pequenos decrementos no valor de k significarão decrementos cada vez mais acentuados na magnitude de S_{21} , indicando que os ressonadores não estão mais no regime fortemente acoplado, ou seja, a distância crítica foi extrapolada. Esse efeito pode ser melhor observado em um gráfico tridimensional que relacione a magnitude de S_{21} em função da frequência e do coeficiente de acoplamento. Um *script* foi implementado no ©Matlab e o resultado pode ser visualizado na Figura 11:

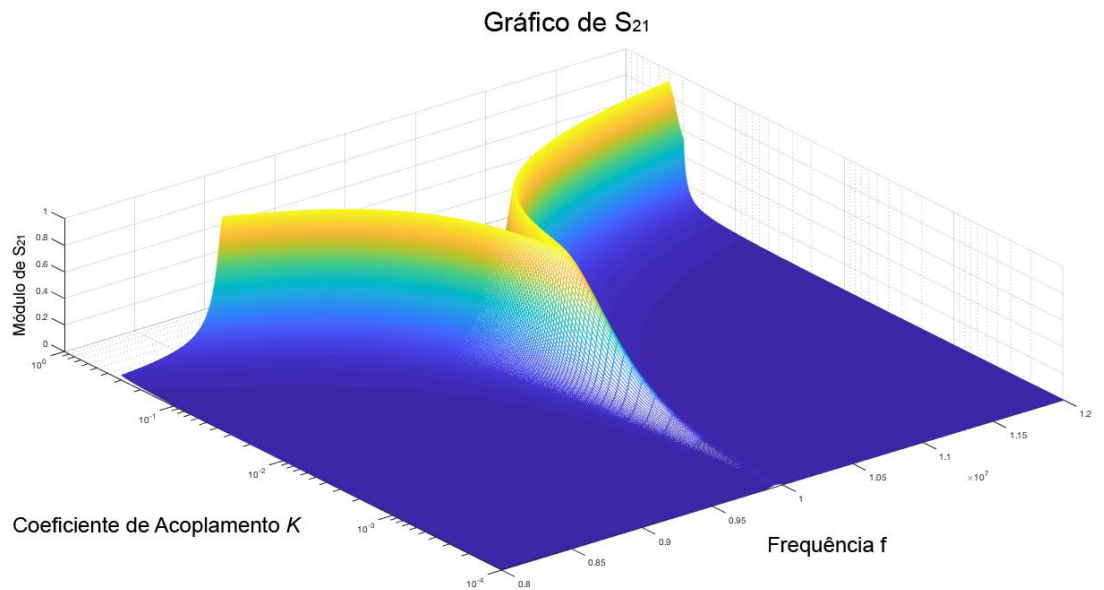


Figura 11 - Gráfico tridimensional gerado no MatLab.

Visando uma análise quantitativa mais precisa, três valores de coeficiente de acoplamento foram escolhidos aleatoriamente (a saber: $k=0.01$, $k=0.15$ e $k=0.75$) para que os resultados simulados pudessem ser comparados entre si utilizando o desvio padrão. Esses dados estão resumidos na Tabela 1:

Tabela 1 – Desvio padrão máximo dos valores simulados nos três softwares e a frequência em que ocorreu.

Valores de K	0.01	0.15	0.75
Desvio Padrão Máx.	0,524	0,520	0,518
Frequência do Desvio Padrão máximo	18,4 MHz	19,9 MHz	7,84 MHz

Para os mesmos coeficientes de acoplamento escolhidos anteriormente foram comparados os valores calculados e simulados referentes à frequência para a máxima transferência de potência (máximo S_{21}), conforme pode ser visto na Tabela 2. O modo de baixa frequência (pico mais à esquerda dos gráficos da Figura 12) e o modo de alta frequência (pico

mais à direita dos gráficos da Figura 12) são pontos de especial interesse para um sistema de potência, haja vista operar em um desses pontos é o que torna o sistema capaz de manter a máxima transferência de potência da fonte à carga no regime fortemente acoplado.

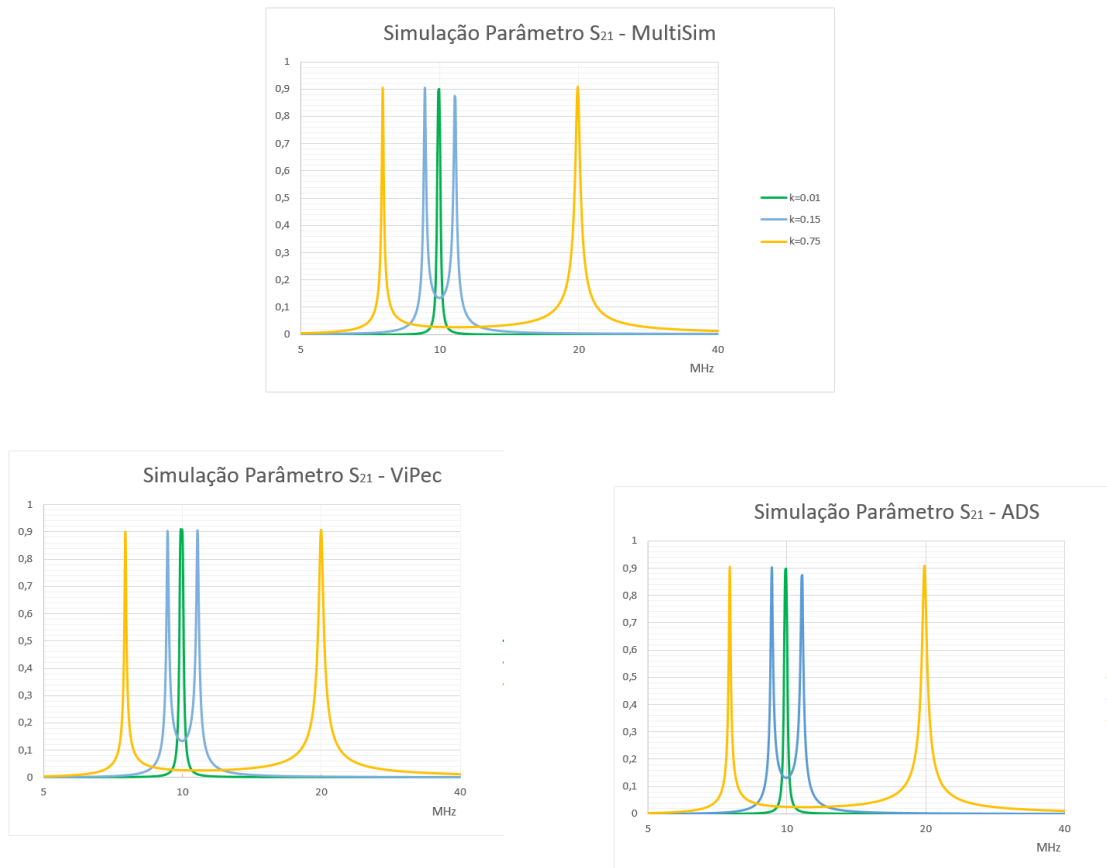


Figura 12 – Simulação de S_{21} em três valores distintos de k em cada software.

Tabela 2 – Comparação entre valores simulados e calculados para a máxima transferência de potência

Valores de k	MultiSim			ViPec			ADS			Valores Calculados		
	0.01	0.15	0.75	0.01	0.15	0.75	0.01	0.15	0.75	0.01	0.15	0.75
Magnitude de S_{21} em Baixa Frequência	0.899	0.904	0.906	0.908	0.904	0.900	0.899	0.901	0.905	0.977	0.999	0.992
Magnitude de S_{21} em Alta Frequência	0.899	0.873	0.909	0.908	0.902	0.908	0.899	0.872	0.909	1.000	0.999	1.000
Modo de Baixa Frequência [MHz]	10.586	9.819	7.838	9.909	9.276	7.511	10.586	9.820	7.838	9.897	9.276	7.519
Modo de Alta Frequência [MHz]	10.586	11.486	21.757	9.909	10.773	19.987	10.586	11.532	21.757	9.997	10.789	19.894

5. CONCLUSÃO

Devido às inúmeras vantagens relacionadas ao método de transmissão por modos ressonantes, várias empresas e institutos de pesquisa estão conhecendo e aperfeiçoando cada vez mais as técnicas de transmissão de potência sem fios.

Essa tecnologia pode trazer grandes benefícios em diversos segmentos, desde o simples uso residencial para carregar dispositivos de uso diário como *smartphones*, *notebooks* e até mesmo em usos medicinais. Em muitos casos um paciente é submetido a um procedimento cirúrgico apenas para realizar a substituição da bateria de algum dispositivo eletrônico instalado em seu corpo, como um marca-passo ou outro dispositivo biomédico.

Os efeitos da tecnologia sobre a saúde humana têm se mostrado limitados à uma faixa segura, estabelecida por normas internacionais, mesmo em aplicações da ordem de dezenas de quilowatts.

Um dos maiores desafios concernentes ao aperfeiçoamento da técnica é manter elevada eficiência da transmissão mesmo quando a distância entre transmissor e receptor se altera. Entretanto, mediante os resultados das simulações verifica-se que é possível manter praticamente constante a magnitude de S_{21} – e, por conseguinte a eficiência da transmissão *wireless* –, mesmo com o aumento da distância entre as bobinas transmissora e receptora, desde que o sistema opere no regime fortemente acoplado. As simulações computacionais demonstraram total conformidade com a teoria exposta e os três softwares testados apresentaram valores bem próximos como resultados, conforme pode ser conferido nos gráficos

e tabelas da seção precedente, indicando que todos eles são adequados para a simulação de um protótipo real. Algumas perdas minoritárias como a causada pelo efeito pelicular e as que são afetadas pela tolerância dos componentes foram desprezadas no cálculo, entretanto como são consideradas nos *softwares* de simulação podem ser as responsáveis pelas pequenas diferenças observadas na comparação feita na Tabela 2.

Um sistema de casamento de impedância auto ajustável seria ideal para controlar a eficiência do circuito quando ocorresse variação da distância de separação entre transmissor e receptor, caso fosse necessário trabalhar em uma faixa mais estreita de frequência, uma vez que o método de controle da eficiência pelo ajuste de frequência pode acarretar inconvenientes como interferência em equipamentos que operam em bandas de frequência próximas. Outros métodos existentes são a implementação de sistemas de comunicação entre transmissor e receptor, e o uso de capacitores variáveis digitalmente interligados à uma malha de controle para identificar e efetuar a correção da frequência de sintonia.

Como sugestão para trabalhos futuros está a construção de um protótipo para a análise prática dos dados teóricos e simulados. Para experimentos envolvendo transmissão de potência sem fios em frequências da ordem dos MHz, um *set* de equipamentos de medição do sinal RF (radiofrequência) se faz necessário. Usualmente, alguns dos aparelhos necessários são: Amplificador RF, Analisador Vetorial de Rede (VNA), Osciloscópio e Gerador de Sinais capazes de operar na frequência de projeto. Caso uma maior potência seja requerida nos testes, um oscilador Colpitts também pode ser utilizado (MOFFATT, 2009).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, Reinaldo Lima. **Projeto e Desenvolvimento de Dispositivos para Transmissão de Energia Elétrica sem Fios por Modos Ressonantes**. Programa de Pós graduação - Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Outubro, 2012.
- CHEN, J. **Feedback Networks: theory and circuit application**, City: World Scientific Publishing Company, 2007.

CHRIST, A.; et al. **Evaluation of Wireless Resonant Power Transfer Systems with Human Electromagnetic Exposure Limits**, Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on, vol. 55, 2013.

KOOHESTANI, M., ZHADOBOV, M., ETTORRE, M. **Human Body Proximity to a Wireless Power Transfer System**, Journées scientifiques 15/16, 2016.

KURS, André. **Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances**, Science, ago. 2007. Disponível em:
<<http://science.sciencemag.org/content/317/5834/83.full>>. Acesso em: 24 fev. 2017.

MOFFATT, Robert Alexander. **Wireless Transfer of Electric Power**, MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 2009.

MUN, J.; et al. **Study on the Human Effect of a Wireless Power Transfer Device at Low Frequency**, Progress in Electromagnetics Research Symposium Proceedings, Moscow, Russia, 2012.

SAMPLE, A. P., MEYER, D. T., SMITH, J. R. **Analysis, Experimental Results, and Range Adaptation of Magnetically Coupled Resonators for Wireless Power Transfer**, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011.

SHI, X., WATERS, B. H., SMITH, J. R. **SAR Distribution for a Strongly Coupled Resonant Wireless Power Transfer System**, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015.

WEN, F., HUANG, X. **Human Exposure to Electromagnetic Fields from Parallel Wireless Power Transfer Systems**, International Journal of Environmental Research and Public Health, 2017.