



**FACULDADE DE TECNOLOGIA E CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS – FATECS
CURSO**

Davi Emanuel Silva Monteiro
Lucas Souza de Carvalho

**Análise de topologias na aplicação de circuitos eletromagnéticos para a
transmissão de energia elétrica sem fio**

BRASÍLIA
2022

Davi Emanuel Silva Monteiro
Lucas Souza de Carvalho

Análise de topologias na aplicação de circuitos eletromagnéticos para a transmissão de energia elétrica sem fio

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado como um dos requisitos para a conclusão do curso de Engenharia Elétrica do UniCEUB – Centro Universitário de Brasília.

Orientador: Dr. Tiago Leite Pereira.

BRASÍLIA
2022



Davi Emanuel Silva Monteiro
Lucas Souza

Análise de topologias na aplicação de circuitos eletromagnéticos para a transmissão de energia elétrica sem fio

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado como um dos requisitos para a conclusão do curso de Engenharia Elétrica do UniCEUB – Centro Universitário de Brasília.

Orientador: Dr. Tiago Leite Pereira.

Brasília,
2022.

BANCA EXAMINADORA

Nome e titulação.
Orientador (a)

Nome e titulação.
Examinador (a)

Nome e titulação.
Examinador (a)



Análise de topologias na aplicação de circuitos eletromagnéticos para a transmissão de energia elétrica sem fio

Analysis of topologies in the application of electromagnetic circuits for wireless transmission of electrical energy

Orientando: Davi Emanuel Silva Monteiro – CEUB; E-mail:

Orientando: Lucas Souza – CEUB; E-mail:

Orientador: Prof. Dr. Tiago Leite – CEUB; E-mail:

Examinador: Prof.^a Dr.^a Eugenia Cornils – CEUB; E-mail:

Examinador: Prof. Dr. Javier – CEUB; E-mail:

Resumo: A transferência de energia sem fio (*WPT - Wireless Power Transfer*) é uma tecnologia que está sendo estudada e aplicada em vários campos de conhecimento. Há uma crescente demanda no mercado para este tipo de circuito. Sistemas WPT possuem um circuito transmissor e um ou mais circuitos receptores. A disposição do capacitor em relação ao acoplamento magnético ressonante indica se o mesmo é um circuito Série ou Paralelo e a relação entre o tipo de circuito receptor e transmissor indica a topologia do sistema. Os Sistemas WPT possuem quatro principais topologias, sendo elas: Série-Série (SS); Série- Paralelo (SP); Paralelo-Série (PS) e Paralelo-Paralelo (PP). A eficiência de um circuito WPT está completamente associada ao tipo de topologia utilizada no circuito. Utilizando os softwares de simulação MatLab/Simulink este trabalho aborda questões de eficiência relacionadas às quatro topologias comumente associadas à circuitos WPT.

Palavras-chave: transmissão de energia sem fio; topologias de circuitos; eficiência energética; simulink.

Abstract: Wireless Power Transfer (WPT) is a technology that is being studied and applied in several fields of knowledge. There is a growing demand in the market for this type of circuit. WPT systems have a transmitter circuit and one or more receiver circuits. The arrangement of the capacitor in relation to the resonant magnetic coupling indicates whether it is a Series or Parallel circuit and the relationship between the type of receiver and transmitter circuit indicates the topology of the system. WPT systems have four main topologies, namely: Serial-Serial (SS); Series-Parallel (SP); Parallel-Series (PS) and Parallel-Parallel (PP). The efficiency of a WPT circuit is completely associated with the type of topology used in the circuit. Using MatLab/Simulink simulation software, this work addresses efficiency issues related to the four topologies commonly associated with WPT circuits.

Keywords: wireless power transfer; circuit topology; energy efficiency; simulink.

1. INTRODUÇÃO

As tecnologias sempre passaram por processos de evolução ao longo dos anos, propiciando inovação e facilidades para a vida humana. Em 1964, segundo Passos, Oliveira e Gomes(2019), quando James Clerk Maxwell formulou as equações do eletromagnetismo (chamadas de *Equações de Maxwell*), o mundo científico começou a mudar e perceber que fenômenos até então não compreendidos, como a indução eletromagnética, poderia ser explorada para diversos fatores. Dentre os fenômenos explorados, a transmissão de energia elétrica sem fio, sendo conhecida posteriormente como Lei de Faraday.

Em 1888, Nikola Tesla, engenheiro e físico Croácio, apresentou o modelo de corrente alternada (CA) aplicada em motores e transformadores ao mundo, resultando em diversas patentes americanas para mudar o cenário de transmissão de energia elétrica, e em 1898 patenteou o primeiro aparelho de transmissão e recepção sem fio, sendo um barco sob uma piscina, da qual controlava o barco à uma certa distância, sendo este o marco de seus estudos para a transmissão de energia elétrica e dados sem fio, pois acreditava que poderia interligar todo o mundo (NUNES, 2019) 2. Mediante isso, o mundo começou a perceber uma nova possibilidade

de tecnologia, onde se era capaz de transmitir energia e dados de forma alternativa, sem precisar de um cabeamento, como a forma tradicional.

Com estes estudos, novas tecnologias surgiram com a finalidade de transportar dados e energia elétrica sem fio. Esta forma de transportar a energia é denominada de *Wireless Power Transfer - WPT* (ZHU *et al.*, 2015). Ela consiste, de forma simples, no fenômeno de indução eletromagnética descrita pela Lei de Faraday, onde ao se oscilar o fluxo magnético dentro de uma espira, obtém-se uma diferença de potencial de sinal oposto ao movimento (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2019, p. 259-260).

Para que se elabore um circuito WPT, é necessário que haja 2 circuitos, sendo o primeiro uma fonte de alimentação alternada, uma resistência para que se obtenha uma corrente elétrica, um capacitor para conseguir reduzir a impedância do circuito e um indutor para a comunicação, já no segundo, outro indutor, outro resistor, outro capacitor e uma resistência genérica que será a carga a ser alimentada, porém, técnicas e testes são elaborados para que se obtenha a melhores resultados em questão de eficiência, como por exemplo, ajuste de frequência e a topologia do circuito em questão, pois como temos 2 partes do sistema geral, podemos ter 4 tipos de

topologias, sendo elas Série-Série (SS), Série-Paralelo (SP), Paralelo-Série (PS), Paralelo-Paralelo (PP) (SALLÁN *et al.*, 2009).

1.1 Objetivo Geral

Estudar os fenômenos básicos do carregamento wireless, realizando uma avaliação da transmissibilidade da energia elétrica em função da topologia escolhida analisando as respostas em níveis de tensão de sistemas numericamente iguais.

1.2 Objetivos Específicos

- Elaborar os 4 tipos de topologias dos circuitos graficamente, estabelecendo valores fixos iguais de tensão CA, capacitores, resistores, indutores e a indutância mútua do sistema;
- Simular no SimuLink do Matlab os 4 tipos de topologia, variando a frequência da fonte e pegando os valores de níveis de tensão que chegam à carga;
- Encontrar a frequência de ressonância dos sistemas;
- Registrar todos os valores obtidos nas 4 simulações em uma planilha e elaborar gráficos que representem o comportamento da tensão na carga em razão dos diferentes níveis de frequência de cada topologia;

- Comparar os gráficos e resultados obtidos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os conceitos básicos para a transmissão de energia elétrica sem fio derivam de estudos e fundamentos físicos conhecidos desde a época de Nikola Tesla, onde o mesmo estudou características físicas das bobinas para melhorar as técnicas de transmissão de energia WPT. (NUNES,2019).

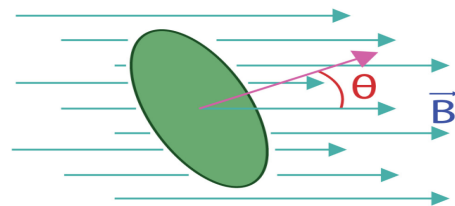
2.1 Indução Eletromagnética

A lei de Gauss para campos magnéticos, de acordo com HALLIDAY *et al.* (2019, p. 334), aborda que “[...] o fluxo magnético através de uma superfície gaussiana (que é uma superfície fechada) é zero”. A equação (1) foi descrita abaixo:

$$\Phi_B = \oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (1)$$

Esta equação também nos garante a inexistência de monopólios magnéticos. A figura 1 representa a ação de um fluxo magnético através de uma área.

Figura 1 - Fluxo magnético através de uma área.



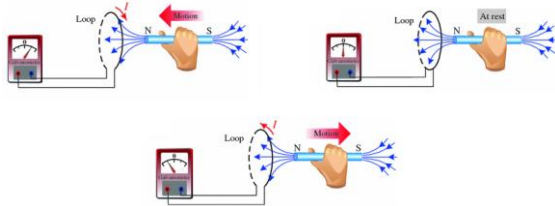
Fonte: Denis (2019).

Em 1831 Michael Faraday descobriu o funcionamento do fenômeno de indução

elétrica, onde percebeu que podia excitar o surgimento de uma corrente elétrica de um circuito secundário ao se variar a corrente do circuito primário. Ele também percebeu que caso a corrente ficasse constante no primeiro, não surgiria corrente no segundo, e que ao se aproximar um ímã, de alguma das bobinas, era induzida temporariamente uma corrente na mesma.

Com isso, Faraday concluiu que ao se variar um fluxo magnético em uma bobina, uma tensão induzida em sentido contrário ao movimento surge devido à força magnética forçando os elétrons a se movimentarem, resultando assim, uma corrente elétrica. A Figura 2 abaixo explica o fenômeno:

Figura 2 - Lei de Faraday.



Fonte: Lazaretti (2020).

A equação (2) ficou definida da seguinte forma:

$$\varepsilon = \frac{-d\phi}{dt} \quad (2)$$

Onde:

ε = Força eletromotriz induzida [V];

$d\Phi$ = Variação do fluxo magnético na espira [T.m² ou Wb];

dt = Variação do tempo [s].

O sinal negativo é utilizado para expressar o movimento contrário de oposição dos elétrons perante a força magnética (FARADAY, 1952).

2.2 - Topologias

No contexto de circuitos elétricos uma dada 'topologia' indica de que forma a rede de interconexões dos componentes elétricos estão dispostos em um dado circuito.

Um circuito paralelo apresenta uma ou mais derivações onde a corrente se divide e apenas parte dela flui ao percorrer das ramificações do circuito. Ao contrário da corrente, a diferença de potencial em cada ramificação do circuito paralelo permanece constante (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016, p. 381-383).

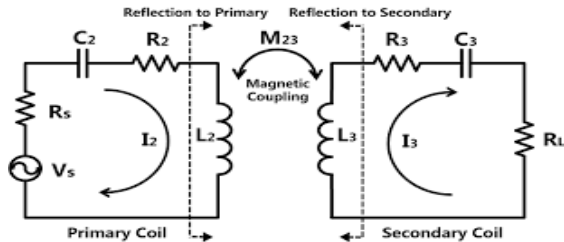
Já no circuito série pode-se pensar em um único caminho onde uma corrente de valor constante percorrerá os componentes elétricos dispostos no sistema (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016, p. 389-391).

Um sistema WPT pode ser pensado em dois circuitos que interagem um com o outro. São eles o circuito transmissor e o circuito receptor. A ideia chave por trás de um sistema WPT é trocar energia de forma

eficiente entre o circuito transmissor e receptor. Para isso necessita-se de um forte acoplamento magnético entre os dois circuitos que são sintonizados para ressoar em uma mesma frequência (BARMAN *et al.*, 2015).

No contexto de sistemas WPT é interessante categorizar o circuito elétrico a partir da disposição do capacitor em relação ao acoplamento magnético ressonante. Essa categorização é feita com base na forma em que o capacitor e o indutor do acoplamento magnético estão dispostos nos circuitos transmissor e receptor.

Figura 3: Modelo Circuito Transmissor e Receptor em um sistema WPT.



Fonte: (WEI; XUEZHE; DAI, 2014).

Na figura 3 observa-se um sistema WPT onde ocorre ressonância entre o capacitor e o indutor do circuito transmissor e o capacitor e indutor do circuito receptor. Essa ressonância LC permite uma troca de potência entre as bobinas magneticamente acopladas.

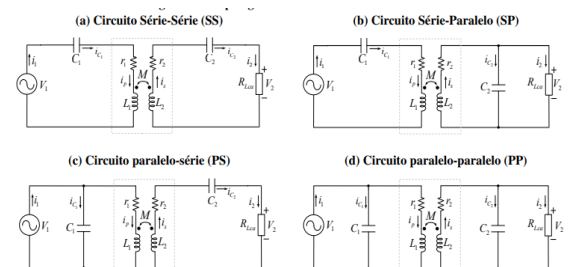
Se entre o capacitor e o acoplamento magnético não existir ramificações por onde a corrente possa se dividir. Então pode-se dizer que se trata de um circuito

Série. Se este mesmo circuito estiver transmitindo energia para um outro circuito receptor cujo respectivo capacitor também estiver em série com o acoplamento. Então sabe-se que se trata de um circuito WPT categorizado por uma topologia Série-Série

Com isso, pode-se criar outros 3 tipos de topologias. Se este mesmo circuito transmissor Série fosse, desta vez, acoplado a um outro circuito cujo respectivo capacitor agora estivesse em paralelo ao acoplamento. Então sabe-se que se trata de uma topologia Série-Paralelo.

A análise do sistema é feita analisando a topologia adotada. A figura 4 indica os modelos de topologias possíveis em circuitos

Figura 4: Modelos de topologias possíveis em circuitos WPT.



Fonte: (SCORTEGAGNA, 2022).

2.3 Acoplamento magnético

Um circuito RLC é composto por um resistor, indutor e capacitor, tanto em série como em paralelo. Quando a corrente que flui pelo circuito é alternada (CA), acontece o fenômeno chamado de impedância, que seria a capacidade de resistir ao fluxo de corrente de corpos afetados por frequências, como no caso, capacitores e indutores. No

caso de capacitores, a equação (3) que descreve sua impedância capacitiva é dada por:

$$X_c = \frac{-j}{\omega c} \quad (3)$$

Onde:

X_c = impedância capacitiva [ohms];

j = unidade imaginária;

ω = frequência angular [rad/s];

C = capacitor [F].

Já a equação (4) que descreve a impedância indutiva é descrita por:

$$X_l = j\omega L \quad (4)$$

Onde:

X_l = Impedância induiva [ohm];

j = unidade imaginária;

ω = frequência angular [rad/s];

indutor = [H].

Mediante isso, pode-se considerar os capacitores e indutores sendo peças resistivas, que de acordo com a frequência, assumem valores distintos. Modela-se matematicamente o valor da impedância total do circuito a soma da resistência real com a parte complexa do capacitor e indutor, que são descritas pela equação (5), caso o circuito esteja em série, sendo:

$$Z = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega c} \quad (5)$$

Da qual o módulo de z (6) é dado por:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (j\omega L - \frac{1}{j\omega c})^2} \quad (6)$$

Quando o circuito está em paralelo deve-se atribuir os valores de impedância substituindo nas equações (3) e (4) e utilizar técnicas de resolução de circuitos normalmente, como se fossem componentes puramente resistivos (ALBUQUERQUE, 1984, p. 63-64).

Analisando as equações (3) e (4), percebemos um fenômeno descrito como ressonância. Para HUI(2016), a ressonância é descrita como sendo o ponto de equilíbrio entre as oscilações do campo elétrico do capacitor e magnético do indutor, fazendo com que os valores de impedância se anulem. Uma vez que a as impedâncias se anulam, resultando apenas a parte puramente resistiva do circuito, podemos dizer que estamos operando na faixa de ressonância, que seria a faixa de operação da frequência onde os valores de $X_c = X_l$, sendo este o valor onde se terá a maior eficiência no circuito, pois a perda por parte das componentes será nula, resultando apenas na perda em cima das componentes puramente resistivas. Definindo

matematicamente para encontrar a zona de ressonância, temos que (3) e (4) são iguais, sendo expressas abaixo:

$$\frac{-j}{\omega C} = j\omega L$$

Da qual explicitando ω temos que:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

E sabendo que $\omega = 2\pi f$, tem-se que (7):

$$F_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (7)$$

Sendo F_s a frequência de ressonância do sistema (ALBUQUERQUE, 1984, p. 64-65).

2.4 Circuitos WPT

Um circuito WPT consiste de dois modelos de circuitos unificados, sendo definidos como o primário e secundário. O circuito primário consiste em uma topologia (série ou paralelo) alimentada por uma fonte de tensão CA, composta por um resistor, capacitor e indutor (neste caso, a bobina para se transferir a energia) com uma frequência, e no secundário, outra topologia (igual ou não a primeira) composta por um indutor, resistor, capacitor e uma carga a ser alimentada. Neste caso, para a

transferência de energia por indução, ocorre um fenômeno chamado indutância mútua.

De acordo com Nilsson *et al.* (2015, p. 205), “afirmamos que a indutância é o parâmetro que relaciona uma tensão a uma corrente que varia com o tempo no mesmo circuito; assim, uma denominação mais exata para indutância é autoindutância”.

Neste contexto, falando de circuitos envolvidos por um campo magnético (no caso os campos magnéticos gerados pelos indutores), também afirma que “[...] a tensão induzida no segundo circuito pode ser relacionada à corrente variável no tempo do primeiro circuito por um parâmetro conhecido como indutância mútua”.

Como a indutância mútua (definida por M) depende diretamente do campo magnético interseccionado pelas duas bobinas, qualquer variação em movimento relativo das bobinas (tanto axial quanto lateral) gerará uma variação de M .

A indutância mútua entre dois circuitos pode ser definida pela equação de Neumann (8) (SILVESTER, 1968; SOMA *et al.* 1987) :

$$m = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{C_1} \oint_{C_2} \frac{dl_1 dl_2}{R} \quad (8)$$

Onde:

μ_0 = Permeabilidade magnética do meio ($4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m no vácuo);

ds_1 e ds_2 = Partes infinitesimais de cada circuito;

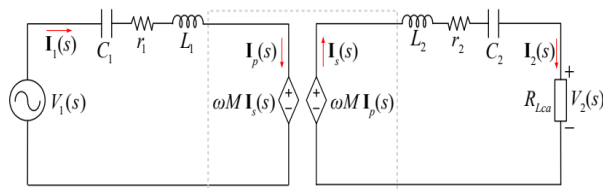
R_{ij} = Distância entre os dois segmentos.

Em casos em que M adquira o valor máximo (quando todas as linhas de campo magnético concatenam as bobinas), adquire-se o coeficiente de acoplamento (k), também conhecido como fator de acoplamento. Ele é diretamente influenciado pela indutância mútua do sistema e os fenômenos físicos que estão retidos nela, sendo definido pela equação (9) (MARINESCU; DUMBRAVA, 2016):

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (9)$$

Para calcular a tensão de saída na carga em circuitos WPT, primeiramente, deve-se escolher uma topologia e analisá-la conforme o método de análise clássico de circuitos CA, entretanto, considerando que após o indutor se terá uma fonte de tensão dependente. O circuito SS da figura 8 demonstra como o circuito se comporta assumindo o comportamento de uma fonte de tensão dependente.

Figura 4: Circuito WPT SS.



Fonte: (SCORTEGAGNA, 2022).

Analisando o circuito percebe-se que as impedâncias $Z1$ e $Z2$ são expressas da forma (10)

$$Z1 = (C_2 s)^{-1} + L1s + R1 \quad (10)$$

e (11)

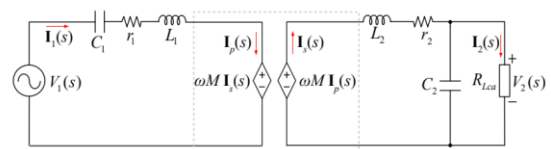
$$Z2 = L2s + r2 + (C_2 s)^{-1} + RLca. \quad (11)$$

Observando ainda a figura 8, percebe-se que para achar a tensão na carga, basta encontrar a corrente no secundário, que é definida sendo (12):

$$I_2(s) = I_s(s) = \frac{v_1(s)}{z_2 z_1 + \omega M} \quad (12)$$

Em circuitos Série-Paralelo atua-se da mesma forma da análise do circuito SS, representando o sistema de forma equivalente. A figura 9 demonstra o circuito equivalente SP com a fonte de tensão dependente.

Figura 5: Circuito WPT SP.



Fonte: (SCORTEGAGNA, 2022).

A diferença neste circuito está no paralelo do circuito 2, onde a impedância total será alterada, entretanto, $Z1$ permanece igual à equação (10). $Z2$ é expresso da seguinte forma (13):

$$Z_2 = L_2s + R_2 + ((C_2s)^{-1} \parallel R_{LCA}) \quad (13)$$

A corrente $I_2(s)$ é a mesma da equação (12), entretanto, a tensão na carga é diferente, uma vez que há um divisor de corrente na carga. Aplicando o divisor, encontramos que (14):

$$I_2(s) = I_s(s) = \frac{v_1(s)}{z_2z_1 + wM} \cdot \frac{(C_2s)^{-1}}{(C_2s)^{-1} + R_{LCA}} \quad (14)$$

Para as outras topologias tem-se a mesma regra, onde analisa-se a impedância resultante do circuito 1 e 2, e após, aplicar as técnicas de resolução de circuito normalmente, neste caso, apenas analisando se há necessidade de divisor de corrente ou não.

No caso do circuito Paralelo-Série impedância Z_2 é a mesma da equação (11) pois o circuito é o mesmo, porém, a impedância Z_1 é dada por (15):

$$Z_1 = ((C_1s)^{-1} \parallel L_1s) + R_1 \quad (15)$$

Como o circuito secundário está em série, ele possui as mesmas propriedades anteriormente já citadas, sendo a corrente definida pela equação (12), da qual apenas irá mudar o valor da impedância Z_1 .

Por fim, o circuito Paralelo-Paralelo apresenta a impedância Z_1 descrita pela equação (15) e Z_2 descrita pela equação (13). Considera-se a equação (12) e

substitui os valores de Z_1 e Z_2 pelos valores do circuito (SCORTEGAGNA, 2022).

3. RESULTADOS

O procedimento consistiu na utilização dos 4 tipos de topologias de forma simétrica a fim de se analisar a resposta da tensão na carga quando se variava o nível da frequência, resultando em uma análise em termos de eficiência. Com isso, assumiu-se os seguintes valores:

$$R_1 = R_2 = R_{load} = 10 \Omega;$$

$$C_1 = C_2 = 5 \mu F;$$

$$L_1 = L_2 = 2 \text{ mH};$$

$$L_m = 1 \text{ mH};$$

$$R_m = 0,01 \times m\Omega.$$

Sendo L_m a indutância mútua entre C_1 e C_2 , e R_m a parte resistiva (que assumiu um valor muito baixo para não interferir no resultado).

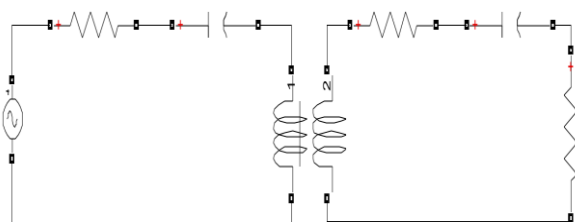
Uma vez que os valores foram definidos, pode-se calcular a frequência de ressonância dos circuitos, que será a mesma para todos, da qual encontra-se o valor aproximado de 1600 Hz.

Considerando apenas a modelagem topológica do circuito a ser analisada, varia-se os valores de frequência de 200 em 200 Hz, verificando os valores de tensão na resistência da carga do circuito.

- Série-Série (SS)

O circuito Série-Série foi o que apresentou o maior nível de tensão dentre todos, chegando a 30,641 V quando a frequência atingiu 1800 Hz. A figura 10 representa a modelagem gráfica do circuito SS.

Figura 6: Circuito SS no Simulink.

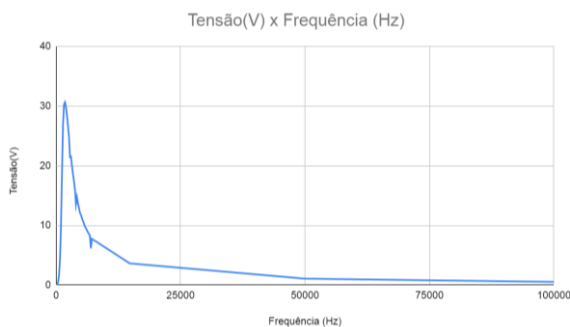


Fonte: Autores (2022).

De fato, o valor de pico atingiu um valor maior entre o intervalo de $1600 < x < 1700$, onde neste intervalo os valores assumem unidades muito próximas, indicando uma convergência do valor de ressonância, com um erro em relação a tensão de aproximadamente 1,24%.

O gráfico da Tensão (V) pela Frequência (Hz) foi expresso pela figura 11, onde se percebe o comportamento da tensão.

Figura 7: Tensão x Frequência em circuitos SS.



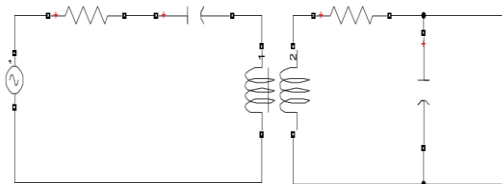
Fonte: Autores (2022).

Ao observar o gráfico, percebe-se pequenos pontos de variação, sendo estes, pontos onde possuem inconsistências em relação à linearidade do decaimento da tensão em função da frequência, onde em pontos específicos o valor da impedância resultante é tal que consegue modificar a linearidade do decaimento, assim, resultando em pontos de inflexão em intervalos bem pequenos.

- Série-Paralelo (SP)

O circuito Série-Paralelo apresentou um pico de aproximadamente 26,012 V quando a frequência atingiu 1800 Hz. Novamente, o valor de ressonância prático convergiu para o teórico, com um erro de 6,9% em nível de tensão. O circuito foi expresso pela figura 12, onde se pode observar a topologia.

Figura 8: Circuito SP no Simulink.

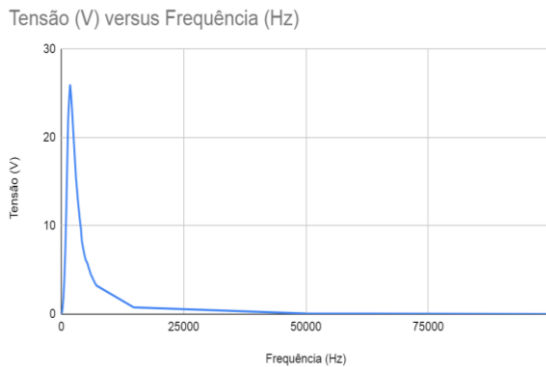


Fonte: Autores (2022).

O intervalo do valor de ressonância ficou entre $1600 < x < 1700$, possuindo um aumento e diminuição muito pequeno neste intervalo, de aproximadamente ± 3 casas decimais após a vírgula. O comportamento

da resposta da tensão em relação à frequência pode ser observado pela figura 13.

Figura 9: Tensão x Frequência em circuito SP.



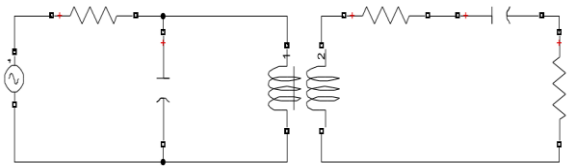
Fonte: Autores (2022).

Percebe-se também um constante decaimento do nível de tensão ao longo do aumento da frequência, que já era esperado uma vez que aumentaria-se a impedância resultante, diminuindo o rendimento do sistema.

- Paralelo-Série (PS)

O circuito Paralelo-Série apresentou um pico de tensão de aproximadamente 19,908 V quando foi aplicada uma frequência de 1800 Hz. O intervalo da zona de ressonância ficou entre $1600 < x < 1700$, onde a variação de valores neste intervalo é muito baixa, possuindo assim uma convergência ao valor de 1800 apresentado. A figura 14 demonstra a topologia utilizada para representar estes valores.

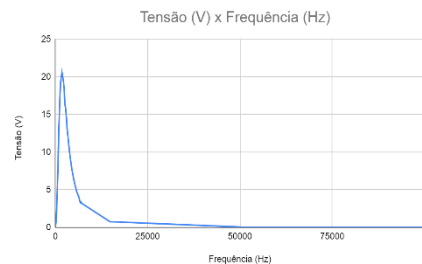
Figura 10: Circuito PS no Simulink.



Fonte: Autores (2022).

Com isso, tem-se um erro de aproximadamente 3,5% em nível de tensão. A figura 15 representa o comportamento da tensão ao longo da frequência no circuito PS.

Figura 11: Tensão x Frequência em circuito PS.



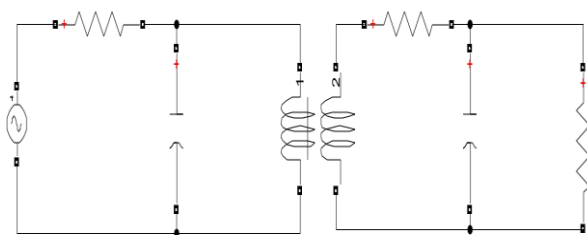
Fonte: Autores (2022).

Analisando o gráfico ainda percebemos o rápido decaimento em função da frequência do sistema, onde possui uma estreita faixa de eficiência considerável, ficando entre $1000 > x > 2000$ Hz.

- Paralelo-Paralelo (PP)

O circuito Paralelo-Paralelo apresentou um pico de tensão de 18,246 V quando a frequência atingiu o valor aproximado de 1400 Hz. A figura 16 representa a forma como o circuito foi elaborado.

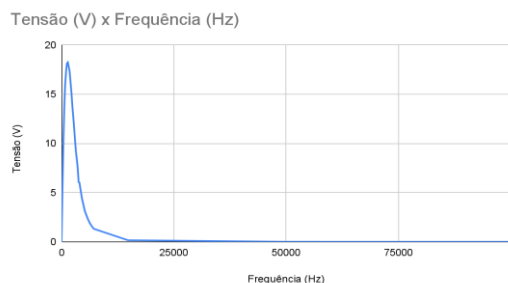
Figura 12: Circuito PP no Simulink.



Fonte: Autores (2022).

Neste caso, a ressonância mudou de intervalo, ficando entre $1400 < x < 1600$, onde novamente os valores nesta área variam de forma mínima, convergindo ao valor teórico, ficando com um erro de 2,55% em relação ao nível da tensão. A figura 17 representa o comportamento da tensão em relação à frequência no circuito PS.

Figura 13: Circuito PS no Simulink.



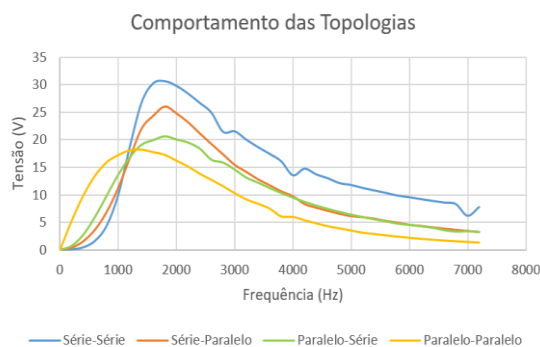
Fonte: Autores (2022).

Observa-se que os valores de tensão iniciais crescem de forma exponencial, e ao mesmo tempo, decaem da mesma forma, onde rapidamente o sistema começa a tender a 0 V depois de se aumentar a frequência.

- Comparações de topologias

Cada topologia apresentada possui características únicas, das quais se destacam em determinados pontos, possuindo prós e contras. O gráfico de comparação foi expresso abaixo, onde foram considerados os intervalos de frequência de 200 em 200 Hz, até um total de 7200 Hz, no qual, em todas começam o decaimento, pois é nesta faixa de intervalo que a resposta da tensão na frequência assume características distintas nos 4 modelos. A figura 18 representa a resposta do comportamento dos 4 tipos de topologia no intervalo de $0 < x < 7200$, antes do circuito saturar a 0.

Figura 14: Comparação das topologias.



Fonte: Autores (2022).

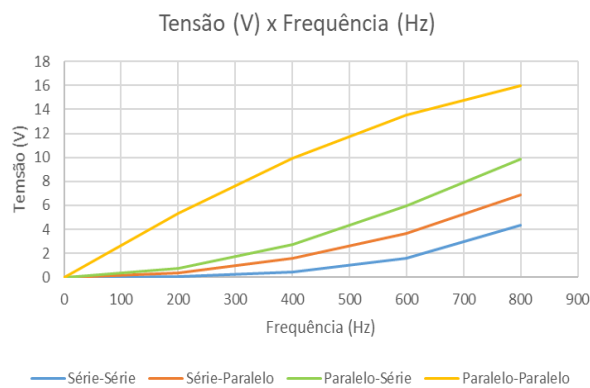
Com o gráfico apresentado pode-se tirar algumas informações relevantes para a análise posterior caso se elabore circuitos destes modelos.

Percebe-se que no intervalo aproximado de $0 < x < 800$ os valores da tensão no circuito PP são superiores aos demais, implicando que nesta faixa a sua eficiência. Embora não

tão elevada, ainda é superior aos demais, conseguindo entregar quase seu valor máximo com níveis relativamente baixos de frequência.

Entretanto, nesse circuito da mesma forma que apresenta uma elevação exponencial de frequência, também possui um decaimento muito rápido, da qual, dentro os modelos analisados, apresenta o maior amortecimento, resultando assim em uma largura de banda muito estreita para se trabalhar. A figura 19 representa o comportamento dos 4 tipos de topologias e a faixa de operação no intervalo de $0 < x < 800$ Hz.

Figura 15: Tensão x Frequência no intervalo de 0 a 800 Hz dos 4 tipos de topologias.



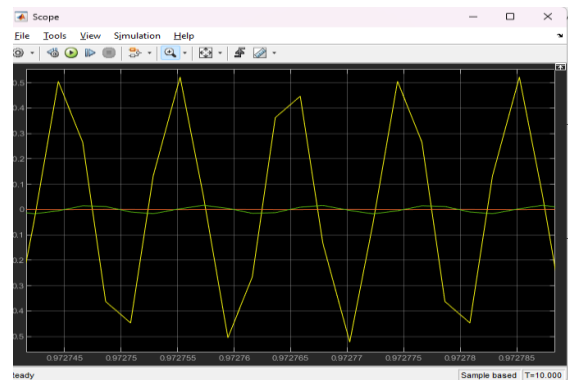
Fonte: Autores (2022).

Já no circuito SS percebe-se que no intervalo de $0 < x < 800$ o sistema apresenta o menor nível de tensão dentre os modelos, entretanto, após 800 Hz, nota-se um aumento abrupto do nível de tensão, onde rapidamente sobe para seu pico e ultrapassa todos os outros modelos.

Após o pico, o circuito decai lentamente quando comparado aos outros, conseguindo manter uma largura de banda de operação maior que os outros, uma vez que a tensão não cai de uma vez, ela oscila e decai aos poucos.

O decaimento é tão lento que ao colocar 100 KHz, o circuito ainda apresenta uma frequência de aproximadamente 0,5 V, onde os outros apresentam valores bem menores, na ordem de 1 décimo para menos. A comparação do decaimento foi expresso pela figura 20, onde percebe-se que apenas o circuito SS possui uma amplitude considerada em relação aos demais, que tendem a zero.

Figura 16: Comparação do decaimento do circuito SS em relação aos demais.



Fonte: Autores (2022).

No gráfico percebemos que no sistema SS mesmo com frequências elevadas a resposta à frequência da tensão consegue ficar muito mais elevada que dos outros modelos.

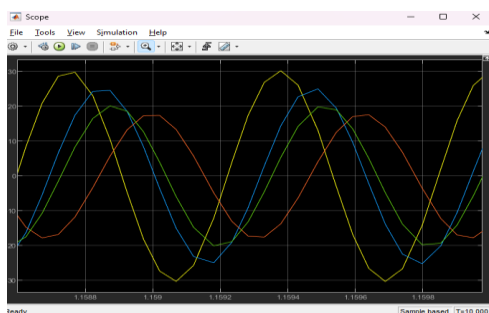
Nos circuitos PS e SP percebe-se que a partir de um certo ponto (aproximadamente

3600 Hz), o sistema converge para o mesmo valor. Como os circuitos, a partir de um intervalo segue um padrão com pouca variação, pegamos o intervalo anterior ($0 < x < 3600$) e observamos o comportamento dos dois para verificar suas características.

Observando o circuito PS no intervalo de $0 < x < 3600$ percebe-se que a taxa de crescimento $PS > SP$ até em aproximadamente 1200 Hz, onde os valores de PS e SP se encontram. Após eles se encontrarem, o circuito SP começa a ter uma taxa de ganho maior, possuindo um nível de tensão maior e um decaimento mais lento até o limite do intervalo que foi estabelecido para a análise.

Comparando apenas os valores na zona de ressonância teórica (1600 Hz) temos os seguintes valores, onde caso se opere nesta zona, conclui-se que o melhor sistema será o SS. A Figura 21 demonstra o comportamento de todos os circuitos na área de maior rendimento (ressonância).

Figura 17: Comportamento das topologias em relação a eficiência máxima.



Fonte: Autores (2022).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclui-se que duas dentre os 4 tipos de topologias operando em intervalos de funções diferentes se destacam, onde caso se utilize uma frequência de até 800 Hz, recomenda-se utilizar a topologia Paralelo-Paralelo, pois apresenta um crescimento exponencial para seu valor máximo, pois mesmo possuindo o menor valor de pico ela consegue entregar sua maior eficiência nesta banda de frequência.

O outro tipo de topologia que se destacou foi a Série-Série, pois podemos ver uma maior eficiência em relação à tensão de pico, e ainda, possui uma largura de banda maior quando comparada aos outros modelos, da qual possui um decaimento bem lento, conseguindo manter uma tensão mais elevada quando a frequência atinge valores muito altos.

Com isso, o estudo da escolha da topologia é de suma importância na hora de se projetar um circuito de indução eletromagnética, pois dependendo da faixa de operação da frequência aplicada, se obterá resultados mais eficientes.

REFERÊNCIAS

- BAROI, Md. Saikot; ISLAM, Shahidul; BAROI, Shawon. Design and Simulation of a Wireless Charging System for Electric Vehicles. **2nd International Conference On Electrical & Electronic Engineering**, Rajshahi, Bangladesh, p. 1-4, dez. 2017. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8412915>. Acesso em: 17 nov. 2022.
- CARVALHO, Cristiano. A História da Indução Eletromagnética contada em livros DALTI, Murilo Leonardelli. **Sistema de Transmissão de Energia Sem Fio com Ajuste Automático da Frequência de Ressonância para Maximização da Potência Transferida**. 2019. 86 f. Monografia - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2019. Disponível em: https://ele.ufes.br/sites/engenhariaeletrica.ufes.br/files/field/anexo/projeto_de_graduacao_ii_-_murilo_leonardelli_daltio.pdf. Acesso em: 15 out. 2022.
- DIAS, Valéria Silva; MARTINS, Roberto de Andrade. Michael Faraday: o caminho da livraria à descoberta da indução eletromagnética. **Ciência & Educação** (Bauru), [S.L.], v. 10, n. 3, p. 517-530, dez. 2004. FapUNIFESP (SciELO). Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1516-73132004000300014>. Acesso em: 10 set. 2022.
- HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. Indução e Indutância. In: HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos da Física**. 10. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2019. Cap. 30. p. 259-295.
- MARINESCU, Andrei; DUMBRAVA, Ionel. Using VNA for IPT coupling factor measurement. 2016 IEEE International Power Electronics And Motion Control Conference (Pemc), [S.L.], p. 1026-1030, set. 2016. IEEE. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/epepemc.2016.7752135>. Acesso em: 11 set. 2022.
- MITRA, Ankit. Simulation of Wireless Power Transfer. **International Journal Of Science Technology & Engineering**, Durgapur, India, v. 7, n. 01, p. 1-5, jul. 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/354597636_Simulation_of_Wireless_Power_Transfer. Acesso em: 12 out. 2022.
- PAEZ, Dennys Ramos. Estudo e desenvolvimento de um sistema de transferência de energia sem fio pelo PAEZ, Dennys Ramos. Estudo e desenvolvimento de um sistema de transferência de energia sem fio pelo método indutivo, 2020. Trabalho de conclusão de curso (Curso Superior de Tecnologia em Microeletrônica) – Faculdade de Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2020.
- PICHORIM, Sérgio Francisco. Review, Study, and Research of Coils for Sensors and Telemetry. Curitiba, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.13140/2.1.3265.9200>. Acesso em: 11 set. 2022.
- PIMENTEL, Pedro Steinmüller et al.. História da ciência em sala de aula: estudos sobre a indução eletromagnética no século xvii. Anais VI ENID & IV ENFOPROF / UEPB... Campina Grande: Realize Editora, 2017. Disponível em: <https://www.editorarealize.com.br/index.php/artigo/visualizar/39232>. Acesso em: 11 out. 2022.
- RIGUETE DE CASTRO, W.; DA SILVA FIALHO, E.; VINICIUS CAVALHIERE, M.; RODRIGUES COELHO JUNIOR, I.; SILVA LOPES, P. H. Tecnologia de Transmissão de Energia Sem Fio (Wireless Power Transfer). **Revista Mythos**, v. 15, n. 1, p. 105-117, 30 jun. 2021.

SCORTEGAGNA, Renato Gregolon. Transferência de energia sem fio por indução eletromagnética - IPT: contribuições para a maximização do rendimento. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2022.

SHI, Bingkun; YANG, Fuyuan; WANG, Shidong; OUYANG, Minggao. Efficiency Improvement of Wireless Charging System Based on Active Power Source in Receiver. **Ieee Access**, [S.L.], v. 7, p. 98136-98143, 2019. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/access.2019.2928623>. Acesso em: 11 nov. 2022.

WANG, Jingchen; LEACH, Mark; LIM, Eng Gee; WANG, Zhao; HUANG, Yi. Investigation of magnetic resonance coupling circuit topologies for wireless power transmission. **Microwave And Optical Technology Letters**, [S.L.], v. 61, n. 7, p. 1755-1763, 27 fev. 2019. Wiley. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/mop.31803>. Acesso em: 11 out. 2022.

WEI, Xuezhe; WANG, Zhenshi; DAI, Haifeng. A Critical Review of Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances. **Energies**, [S.L.], v. 7, n. 7, p. 4316-4341, 7 jul. 2014. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/en7074316>. Acesso em: 11 set. 2022.

PASSOS, Marly Nascimento Salles; OLIVEIRA, Alexandre Maniçoba de; GOMES, Anna Karina Fontes. APLICAÇÕES DAS EQUAÇÕES DE MAXWELL. **Revista Acadêmica - Ensino de Ciências e Tecnologias**, Cubatão, v. 4, n. 4, p. 260-273, jul. 2019. Disponível em:

https://intranet.cbt.ifsp.edu.br/qualif/volume04/Engenharia/Artigo_E_06_260_273.pdf. Acesso em: 11 nov. 2022.

ZHU, B.; LI, J.; HU, W.; GAO, X. Review of Magnetic Coupling Resonance Wireless Energy Transmission. **International Journal of u- and e- Service, Science and Technology**. V. 8, n. 3, p.257-272, 2015.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. Indução e Indutância. In: HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos da Física**. 9. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2012.

SALLÁN, J. et al. Optimal design of ICPT systems applied to electric vehicle battery charge. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 56, n. 6, p. 2140–2149, 2009.

M. Faraday, in **Great Books of the Western World Vol. 45 (Encyclopædia Britannica Inc., Chicago, 1952)**.

Barman, S. D., Reza, A. W., Kumar, N., Karim, M. E., & Munir, A. B. (2015). *Wireless powering by magnetic resonant coupling: Recent trends in wireless power transfer system and its applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 1525–1552. p.4-5

BROSSEAU, Christian. Modelling and simulation of dielectric heterostructures: a physical survey from an historical perspective. **Journal Of Physics D: Applied Physics**, [S.L.], v. 39, n. 7, p. 1277-1294, 17 mar. 2006. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/39/7/s02>.

https://www.researchgate.net/profile/Sergio-Pichorim-2/publication/266475948_Review_Study_and_Research_of_Coils_for_Sensors_and_Telemetry/links/5432f7180cf20c6211be3daf/Review-Study-and-Research-of-Coils-for-Sensors-and-Telemetry.pdf

MARINESCU, A.; DUMBRAVA, I. Using VNA for IPT coupling factor measurement. In: 2016

IEEE International Power Electronics and Motion
Control Conference (PEMC). [S.l.]: IEEE, 2016. p.
1026–1030.