



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIAS E SAÚDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA E SUSTENTABILIDADE

Rogers Romancini Feltrin

**ANÁLISE E SIMULAÇÃO DE ARQUITETURA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA A PARTIR DO CAMPO MAGNÉTICO DE ONDAS
ELETROMAGNÉTICAS**

Araranguá/SC

2025

Rogers Romancini Feltrin

**ANÁLISE E SIMULAÇÃO DE ARQUITETURA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA A PARTIR DO CAMPO MAGNÉTICO DE ONDAS
ELETROMAGNÉTICAS**

Trabalho submetido ao Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Energia e Sustentabilidade.

Orientador: Prof. Leonardo Elizeire Bremermann,
Dr.

Araranguá/SC

2025

Feltrin, Rogers Romancini
ANÁLISE E SIMULAÇÃO DE ARQUITETURA PARA GERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO CAMPO MAGNÉTICO DE ONDAS
ELETROMAGNÉTICAS / Rogers Romancini Feltrin ; orientador,
Leonardo Elizeire Bremermann, 2025.
93 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Campus Araranguá, Programa de Pós-Graduação em
Energia e Sustentabilidade, Araranguá, 2025.

Inclui referências.

1. Energia e Sustentabilidade. 2. Ondas
Eletromagnéticas. 3. Conversão de Energia. 4. Energia
Elétrica. 5. Colheita. I. Bremermann, Leonardo Elizeire.
II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós
Graduação em Energia e Sustentabilidade. III. Título.

Rogers Romancini Feltrin

**ANÁLISE E SIMULAÇÃO DE ARQUITETURA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
A PARTIR DO CAMPO MAGNÉTICO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS**

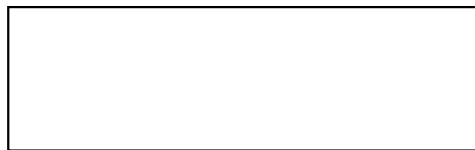
O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 31 de outubro de 2025, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Leonardo Elzeire Bremermann, Dr.
Instituição Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Giuliano Arns Rampinelli, Dr.
Instituição Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Gabriel Santos Bolacell, Dr.
Instituição Universidade do Vale do Itajaí

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Energia e Sustentabilidade.



Coordenação do Programa de Pós-Graduação



Prof. Leonardo Elzeire Bremermann, Dr.
Orientador

Araranguá, 2025.

AGRADECIMENTOS

A Deus, o Senhor supremo que rege a perfeição universal, guia, protege e orienta a vida de todos os seres, incluindo a minha, por sempre ouvir e atender-me.

A Jesus Cristo.

À Maria, mãe de Jesus Cristo.

À minha família. Especialmente a filha, por compreender os momentos de dedicação necessários ao programa de pós-graduação.

À Universidade Federal de Santa Catarina, por permitir cursar o programa de pós-graduação na instituição e disponibilizar seus recursos humanos, físicos e virtuais.

Ao professor-orientador Dr. Leonardo Elizeire Bremmerman, pela orientação, disponibilidade e atenção dedicada. E pela paciência ao ouvir e discutir ideias.

Aos membros da banca, por aceitarem participar e dispenderem seu tempo em atenção a dissertação apresentada.

“Esperança e fé são a energia da vida. A alegria, o caminho.”
(FELTRIN, 2004, p. 2)

RESUMO

Este trabalho aborda análise e simulação de uma proposta de arquitetura para geração de energia elétrica a partir do campo magnético de ondas eletromagnéticas. Busca-se uma revisão de arquitetura dos dispositivos empregados na geração de energia a partir dessas ondas e análise da sua capacidade de uso; abrindo espaço para novas aplicações tecnológicas. Este trabalho apresenta um panorama teórico que inclui tecnologias relacionadas ao tema, considera a modelagem matemática para a realização de experimentos em ambiente computacional e o desenvolvimento de conceitos de prova para a avaliação em ambiente experimental. No campo das simulações são modeladas e analisadas arquiteturas para transdução da energia do campo magnético em energia elétrica. A abordagem explora o uso simultâneo de múltiplas ondas eletromagnéticas pretendendo atingir uma maior potência de saída. A arquitetura proposta tem por objetivo se beneficiar da captura de ondas eletromagnéticas do meio sem a utilização de filtros ou pontes retificadoras para a geração de energia elétrica. Adicionalmente, desenvolve-se um circuito elétrico para uso conjunto à estrutura para transformação da tensão. As grandezas elétricas deste circuito são monitoradas para avaliar o comportamento do sistema. No âmbito experimental uma espira de material condutor elétrico é submetida a uma determinada onda eletromagnética e observa-se o surgimento de tensão elétrica no circuito elétrico em que está inserida. Os resultados das simulações computacionais validam a arquitetura proposta como captora e transdutora de energia magnética em elétrica com utilização de espectro de ondas eletromagnéticas simultâneas. O circuito elétrico modelado exprime sua usabilidade ao fornecer elevação de tensão a partir de fontes elétricas alternadas com diferentes frequências. E apresenta correspondência entre as formas de ondas teórica e mensurada. Em bancada conseguiu-se mostrar que o conceito de interação da espira elétrica com campo magnético de onda eletromagnética é válido. Embasado pela revisão teórica, as simulações computacionais e o experimento, o trabalho encaminha-se para as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Palavras-chave: ondas eletromagnéticas; conversão de energia; energia elétrica; colheita; eletromagnetismo.

ABSTRACT

This study approach analysis and simulation of an architectural model proposed for the generation of electrical energy from the magnetic component of electromagnetic waves. The objective is to review existing energy-harvesting device architectures, analyze their applicability, and thereby foster new technological developments. The work presents a theoretical overview encompassing technologies pertinent to the topic, mathematical modeling for simulation in computational environments, and the formulation of test concepts for subsequent experimental validation. In the simulation phase, architectures capable of transducing the magnetic field energy into electrical energy are modeled and analyzed. The approach exploits the simultaneous use of multiple electromagnetic waves to achieve higher power output. The proposed architecture is designed to capture ambient electromagnetic waves without reliance on filters or rectifier bridges. Furthermore, an electrical circuit is developed to operate in conjunction with the system, enabling voltage transformation. Electrical parameters of the circuit are monitored to assess the system's dynamic behavior. Experimentally, a coil composed of electrically conductive material is exposed to a targeted electromagnetic wave, and the induction of voltage within the circuit is observed. Results from computational simulations confirm the viability of the proposed architecture as both a capturer and transducer of magnetic field energy into electrical energy, utilizing a spectrum of simultaneous electromagnetic waves. The designed electrical circuit demonstrates its applicability by enabling voltage amplification from alternating electrical sources of varying frequencies, showing consistency between theoretical predictions and empirical waveforms. Experimental findings corroborate the concept of interaction between the coil and the magnetic field of an electromagnetic wave. Based on the literature review, simulation outcomes, and experimental evidence, the study ending with conclusions and directions for future research.

Keywords: electromagnetic waves; energy conversion; electrical energy; harvest; electromagnetism.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sala com fonte emissora (Tx) e conjuntos receptores (Rx) duais	27
Figura 2 - Distribuição do campo elétrico na antena <i>Bow-Tie</i> a 167 THz, excitada por uma onda plana. Na lateral a escala do campo elétrico, de 0 a 205 V/m.....	27
Figura 3 - Desempenho de produção de energia elétrica de grafeno bicamada com nanoporos circulares. Radiação EM aplicada de 0 a 180 s.....	29
Figura 4 - Sistema de coleta e conversão da energia baseado na teoria do efeito Casimir	30
Figura 5 - Estrutura de coleta de energia com cavidades ressonantes e antena re-estilizada. (a) Célula unitária MTM, onde $a=10$ mm, $b=10$ mm, $d_1=9$ mm, $d_2=6,34$ mm, $w_1=0,8$ mm, $g=0,26$ mm, $\text{via}=0,6 \text{ } \varnothing$; (b) Distribuição do campo elétrico em uma única célula unitária em 6,75 GHz para ângulo de incidência normal.....	31
Figura 6 - Fluxo magnético transpassando uma área A.....	37
Figura 7 - Agrupamento de espiras quadradas paralelas, em formato de pirâmide ..	38
Figura 8 - Semiciclos 1, 2 e 3 de uma onda eletromagnética dentro de uma espira A, representando quantidade ímpar de fases no interior	38
Figura 9 - Ondas senoidais com diferentes períodos. E a resultante da soma delas, exibida em (F)	39
Figura 10 - Deslocamento de onda resultante. Ilustrado de 0 a $\pi/4$	40
Figura 11 - Circuito elétrico para fornecimento de energia elétrica	41
Figura 12 - Fase do campo magnético cruzando espira elétrica e semiciclo do campo elétrico no mesmo plano dessa	42
Figura 13 - Espira elétrica única.....	48
Figura 14 - Pirâmides de espiras quadradas. (A) Concepção da pirâmide de espiras quadradas. (B) Estrutura elaborada, com destaque para algumas de suas partes, para correlação de imagem com (A). (C) Estrutura elaborada	49
Figura 15 - Placas interligando espiras em cada lado de sua fenda	49
Figura 16 - Pirâmide completa de espiras elétricas quadradas paralelas	50
Figura 17 - Pirâmide com 24 espiras elétricas quadradas paralelas	50
Figura 18 - Pirâmide de espiras quadradas conectadas eletricamente em série	51
Figura 19 – Espiral plano	52
Figura 20 - Circuito elétrico associando fontes elétricas alternadas com frequências diferentes entre si.....	53

Figura 21 - Circuito elétrico elaborado no ambiente de simulação computacional, contendo dispositivos e equipamentos de medição	53
Figura 22 - Curva de tensão elétrica para frequência de 2,499 GHz e espira elétrica única. <i>Port 1</i> é nome do ponto de medição. <i>pw</i> é indicação de Port wave	55
Figura 23 - Curva de corrente elétrica para frequência de 2,499 GHz e espira elétrica única. <i>Port 1</i> é nome do ponto de medição. <i>pw</i> é indicação de Port wave	55
Figura 24 - Curva de tensão elétrica para frequência de 4,997 GHz e espira elétrica única. <i>Port 1</i> é nome do ponto de medição. <i>pw</i> é indicação de Port wave	56
Figura 25 - Curva de corrente elétrica para frequência de 4,997 GHz e espira elétrica única. <i>Port 1</i> é nome do ponto de medição. <i>pw</i> é indicação de Port wave	56
Figura 26 - Curva de tensão elétrica para frequências de 2,0 a 3,0 GHz e pirâmide de 24 espiras quadradas paralelas. <i>Port 1</i> é nome do ponto de medição. <i>pw</i> é indicação de Port wave	57
Figura 27 - Pico da curva de tensão elétrica para frequências de 2,0 a 3,0 GHz e pirâmide de 24 espiras quadradas paralelas. <i>Port 1</i> é nome do ponto de medição. <i>pw</i> é indicação de Port wave	57
Figura 28 - Curva de corrente elétrica para frequências de 2,0 a 3,0 GHz e pirâmide de 24 espiras quadradas paralelas. <i>Port 1</i> é nome do ponto de medição. <i>pw</i> é indicação de Port wave	58
Figura 29 - Pico da curva de corrente elétrica para frequências de 2,0 a 3,0 GHz e pirâmide de 24 espiras quadradas paralelas. <i>Port 1</i> é nome do ponto de medição. <i>pw</i> é indicação de Port wave	58
Figura 30 - Curva de tensão elétrica para frequências de 2,0 a 5,4 GHz e pirâmide de 24 espiras quadradas paralelas. <i>Port 1</i> é nome do ponto de medição. <i>pw</i> é indicação de Port wave	59
Figura 31 - Pico da curva de tensão elétrica para frequências de 2,0 a 5,4 GHz e pirâmide de 24 espiras quadradas paralelas. <i>Port 1</i> é nome do ponto de medição. <i>pw</i> é indicação de Port wave	59
Figura 32 - Curva de corrente elétrica para frequências de 2,0 a 5,4 GHz e pirâmide de 24 espiras quadradas paralelas. <i>Port 1</i> é nome do ponto de medição. <i>pw</i> é indicação de Port wave	59
Figura 33 - Pico da curva de corrente elétrica para frequências de 2,0 a 5,4 GHz e pirâmide de 24 espiras quadradas paralelas. <i>Port 1</i> é nome do ponto de medição. <i>pw</i> é indicação de Port wave	60

Figura 34 - Curva de tensão elétrica para frequências de 2,0 a 3,0 GHz e pirâmide de espiras quadradas conectadas eletricamente em série. <i>Port 1</i> é nome do ponto de medição. <i>pw</i> é indicação de Port wave	61
Figura 35 - Pico da curva de tensão elétrica para frequências de 2,0 a 3,0 GHz e pirâmide de espiras quadradas conectadas eletricamente em série. <i>Port 1</i> é nome do ponto de medição. <i>pw</i> é indicação de Port wave	61
Figura 36 - Curva de corrente elétrica para frequências de 2,0 a 3,0 GHz e pirâmide de espiras quadradas conectadas eletricamente em série. <i>Port 1</i> é nome do ponto de medição. <i>pw</i> é indicação de Port wave	61
Figura 37 - Pico da curva de corrente elétrica para frequências de 2,0 a 3,0 GHz e pirâmide de espiras quadradas conectadas eletricamente em série. <i>Port 1</i> é nome do ponto de medição. <i>pw</i> é indicação de Port wave	62
Figura 38 - Curva de tensão elétrica para frequências de 2,0 a 5,4 GHz e pirâmide de espiras quadradas conectadas eletricamente em série. <i>Port 1</i> é nome do ponto de medição. <i>pw</i> é indicação de Port wave	62
Figura 39 - Pico da curva de tensão elétrica para frequências de 2,0 a 5,4 GHz e pirâmide de espiras quadradas conectadas eletricamente em série. <i>Port 1</i> é nome do ponto de medição. <i>pw</i> é indicação de Port wave	63
Figura 40 - Curva de corrente elétrica para frequências de 2,0 a 5,4 GHz e pirâmide de espiras quadradas conectadas eletricamente em série. <i>Port 1</i> é nome do ponto de medição. <i>pw</i> é indicação de Port wave	63
Figura 41 - Pico da curva de corrente elétrica para frequências de 2,0 a 5,4 GHz e pirâmide de espiras quadradas conectadas eletricamente em série. <i>Port 1</i> é nome do ponto de medição. <i>pw</i> é indicação de Port wave	63
Figura 42 - Curva de tensão elétrica para frequências de 2,0 a 3,0 GHz e espiral plano. <i>Port 1</i> é nome do ponto de medição. <i>pw</i> é indicação de Port wave	64
Figura 43 - Pico da curva de tensão elétrica para frequências de 2,0 a 3,0 GHz e espiral plano. <i>Port 1</i> é nome do ponto de medição. <i>pw</i> é indicação de Port wave....	65
Figura 44 - Curva de corrente elétrica para frequências de 2,0 a 3,0 GHz e espiral plano. <i>Port 1</i> é nome do ponto de medição. <i>pw</i> é indicação de Port wave	65
Figura 45 - Pico da curva de corrente elétrica para frequências de 2,0 a 3,0 GHz e espiral plano. <i>Port 1</i> é nome do ponto de medição. <i>pw</i> é indicação de Port wave....	65
Figura 46 - Curva de tensão elétrica para frequências de 2,0 a 5,4 GHz e espiral plano. <i>Port 1</i> é nome do ponto de medição. <i>pw</i> é indicação de Port wave	66

Figura 47 - Pico da curva de tensão elétrica para frequências de 2,0 a 5,4 GHz e espiral plano. <i>Port 1</i> é nome do ponto de medição. <i>pw</i> é indicação de Port wave....	66
Figura 48 - Curva de corrente elétrica para frequências de 2,0 a 5,4 GHz e espiral plano. <i>Port 1</i> é nome do ponto de medição. <i>pw</i> é indicação de Port wave	66
Figura 49 - Pico da curva de corrente elétrica para frequências de 2,0 a 5,4 GHz e espiral plano. <i>Port 1</i> é nome do ponto de medição. <i>pw</i> é indicação de Port wave....	67
Figura 50 - Curva de tensão elétrica para frequências de 2,0 a 3,0 GHz e pirâmide completa de espiras quadradas paralelas. <i>Port 1</i> é nome do ponto de medição. <i>pw</i> é indicação de Port wave	68
Figura 51 - Pico da curva de tensão elétrica para frequências de 2,0 a 3,0 GHz e pirâmide completa de espiras quadradas paralelas. <i>Port 1</i> é nome do ponto de medição. <i>pw</i> é indicação de Port wave	68
Figura 52 - Curva de corrente elétrica para frequências de 2,0 a 3,0 GHz e pirâmide completa de espiras quadradas paralelas. <i>Port 1</i> é nome do ponto de medição. <i>pw</i> é indicação de Port wave	68
Figura 53 - Pico da curva de corrente elétrica para frequências de 2,0 a 3,0 GHz e pirâmide completa de espiras quadradas paralelas. <i>Port 1</i> é nome do ponto de medição. <i>pw</i> é indicação de Port wave	69
Figura 54 - Curva de tensão elétrica para frequências de 2,0 a 5,4 GHz e pirâmide completa de espiras quadradas paralelas. <i>Port 1</i> é nome do ponto de medição. <i>pw</i> é indicação de Port wave	69
Figura 55 - Pico da curva de tensão elétrica para frequências de 2,0 a 5,4 GHz e pirâmide completa de espiras quadradas paralelas. <i>Port 1</i> é nome do ponto de medição. <i>pw</i> é indicação de Port wave	69
Figura 56 - Curva de corrente elétrica para frequências de 2,0 a 5,4 GHz e pirâmide completa de espiras quadradas paralelas. <i>Port 1</i> é nome do ponto de medição. <i>pw</i> é indicação de Port wave	70
Figura 57 - Pico da curva de corrente elétrica para frequências de 2,0 a 5,4 GHz e pirâmide completa de espiras quadradas paralelas. <i>Port 1</i> é nome do ponto de medição. <i>pw</i> é indicação de Port wave	70
Figura 58 - Tensão elétrica resultante da interação entre fontes de alimentação com frequências diferentes, obtida antes do transformador	71
Figura 59 - Tensão elétrica obtida após amplificação por transformador de energia elétrica.....	72

Figura 60 - Tensões elétricas suavizadas por ajuste no capacitor	72
Figura 61 - Curva de tensão elétrica para frequências de 2,0 a 5,4 GHz e pirâmide completa de espiras quadradas paralelas com carga RLC. <i>Element1</i> é nome do ponto de medição. <i>pw</i> é indicação de Port wave	73
Figura 62 - Pico da curva de tensão elétrica para frequências de 2,0 a 5,4 GHz e pirâmide completa de espiras quadradas paralelas com carga RLC. <i>Element1</i> é nome do ponto de medição. <i>pw</i> é indicação de Port wave	74
Figura 63 - Curva de corrente elétrica para frequências de 2,0 a 5,4 GHz e pirâmide completa de espiras quadradas paralelas com carga RLC. <i>Element1</i> é nome do ponto de medição. <i>pw</i> é indicação de Port wave	74
Figura 64 - Pico da curva de corrente elétrica para frequências de 2,0 a 5,4 GHz e pirâmide completa de espiras quadradas paralelas com carga RLC. <i>Element1</i> é nome do ponto de medição. <i>pw</i> é indicação de Port wave	74
Figura 65 - Estrutura de testes em bancada	75
Figura 66 - Osciloscópio exibindo sinal de ruído	77
Figura 67 - Osciloscópio mostrando sinal de tensão elétrica gerado a partir da espira elétrica da estrutura de teste em bancada	77

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resultados de consultas em bases de dados	35
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tensões e correntes elétricas da pirâmide de espiras quadradas paralelas, sob espectro de 2,0 a 3,0 GHz.....	86
Tabela 2 - Tensões e correntes elétricas da pirâmide de espiras quadradas paralelas, sob espectro de 2,0 a 5,4 GHz.....	87
Tabela 3 - Tensões e correntes elétricas da pirâmide de espiras quadradas conectadas eletricamente em série, sob espectro de 2,0 a 3,0 GHz	88
Tabela 4 - Tensões e correntes elétricas da pirâmide de espiras quadradas conectadas eletricamente em série, sob espectro de 2,0 a 5,4 GHz	88
Tabela 5 - Tensões e correntes elétricas do espiral plano, sob espectro de 2,0 a 3,0 GHz.....	89
Tabela 6 - Tensões e correntes elétricas do espiral plano, sob espectro de 2,0 a 5,4 GHz.....	90
Tabela 7 - Tensões e correntes elétricas da pirâmide completa de espiras quadradas paralelas, sob espectro de 2,0 a 3,0 GHz	91
Tabela 8 - Tensões e correntes elétricas da pirâmide completa de espiras quadradas paralelas, sob espectro de 2,0 a 5,4 GHz	92

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Ampère
c	Velocidade da luz no vácuo
CC	Corrente contínua
DC	<i>Direct Current</i>
EM	Eletromagnético(a)
F	Faraday
H	Henry
IoT	<i>Internet of Thing</i>
m	Metro
MTM	Metamaterial
OEM	Onda eletromagnética
PTFE	Politetrafluoretileno
pw	<i>Port wave</i>
RF	Radiofrequência
RLC	<i>Resistor, Inductor and Capacitor</i>
RO3003	Compostos de PTFE preenchidos com cerâmica, destinados ao uso em aplicações comerciais de micro-ondas e RF
s	Segundo
SC	Santa Catarina
T	Tesla
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
V	Volt
W	Watt
Wb	Weber

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	MOTIVAÇÕES E JUSTIFICATIVAS	20
1.2	OBJETIVOS	20
1.2.1	Objetivo geral	21
1.2.2	Objetivos específicos	21
2	ESTADO DA ARTE	22
2.1	GERAÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA ALTERNATIVAS PARA APLICAÇÃO EM DISPOSITIVOS DE BAIXA POTÊNCIA.....	22
2.1.1	Eletrostática	22
2.1.2	Magnetoelétrica	22
2.1.3	Piezoelétrica	23
2.1.4	Termoelétrica	24
2.1.5	Triboelétrica	24
2.1.6	Ressonante	24
2.1.7	Radiofrequência	25
2.2	GERAÇÕES DE ENERGIA ALTERNATIVAS RELACIONADAS COM ONDAS ELETROMAGNÉTICAS	26
2.2.1	Radiofrequência	26
2.2.2	Conversão de energia por efeito Seebeck	28
2.2.3	Radiofrequência e ressonância	29
2.3	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	32
3	METODOLOGIA	34
3.1	PROTOCOLO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	34
3.2	ARQUITETURAS CAPTORAS E TRANSDUTORAS DA ENERGIA DE CAMPOS MAGNÉTICOS DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS EM ELÉTRICA	36
3.2.1	Quantificação de potência	41
3.3	DEFINIÇÕES PARA SIMULAÇÕES NO SOFTWARE CST STUDIO SUITE	43
3.4	DEFINIÇÕES PARA SIMULAÇÕES NO SIMULINK.....	44
3.5	MONTAGEM DE PROTÓTIPO E TESTES EM BANCADA	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47

4.1	MODELAGEM DAS ARQUITETURAS DO SISTEMA	47
4.1.1	Modelagem das espiras e arquiteturas	47
4.1.2	Modelagem dos circuitos elétricos	52
4.1.3	Modelagem do sistema.....	54
4.2	SIMULAÇÕES NO <i>SOFTWARE</i> CST STUDIO SUITE 2024	54
4.2.1	Espira elétrica única	54
4.2.2	Pirâmide de espiras quadradas paralelas.....	56
4.2.3	Pirâmide de espiras quadradas conectadas eletricamente em série... 	60
4.2.4	Espiral plano.....	64
4.2.5	Pirâmide completa de espiras quadradas paralelas	67
4.3	SIMULAÇÕES NA APLICAÇÃO SIMULINK DO <i>SOFTWARE</i> MATLAB R2024B	71
4.4	SIMULAÇÕES DO SISTEMA	73
4.5	RESULTADO DO PROTÓTIPO E TESTES EM BANCADA.....	75
4.6	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	78
5	CONCLUSÃO	80
	REFERÊNCIAS	82
	APÊNDICE A – TABELAS DE TENSÕES E CORRENTES ELÉTRICAS OBTIDAS DAS SIMULAÇÕES DE ARQUITETURAS NO <i>SOFTWARE</i> CST STUDIO SUITE	86

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é amplamente requisitada para suprir as necessidades da civilização atual, desde dispositivos eletrônicos portáteis, como *smartphones* e fones de ouvido sem fio, até grandes indústrias e cidades; podendo encontrar neste último uma vasta rede de iluminação pública, tração elétrica em transportes de passageiros e cargas, residências com condicionadores elétricos de ar e chuveiros elétricos. Nesse contexto, tem-se verificado uma rápida evolução na quantidade e diversidade de dispositivos eletrônicos portáteis, eletrodomésticos inteligentes, robôs industriais e veículos elétricos, conforme XIE *et al.* (2023).

No campo dos dispositivos portáteis, a Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT) se destaca, pois “os dispositivos de IoT, que variam de sistemas domésticos inteligentes a sensores industriais, requerem energia contínua para funcionar” (JEAN *et al.*, 2024, tradução nossa). E considerando as afirmações de que “devido a uma variedade cada vez maior de dispositivos eletrônicos, o consumo mundial de energia está aumentando rapidamente” (JEAN *et al.*, 2024, tradução nossa), “a quantidade total de energia consumida anualmente pelo vasto número de sensores em todo o mundo ainda é enorme” (LUO *et al.*, 2024, tradução nossa) e “o progresso da internet das coisas (IoT) não pode ser separado dos sensores” (LUO *et al.*, 2024, tradução nossa), pode-se deduzir que a larga escala de dispositivos de IoT implica num grande consumo de energia mundial.

Adicionalmente, uma busca por fontes de energias limpas e renováveis em substituição às chamadas não-renováveis desafia a flexibilização da matriz energética elétrica. Tem-se principalmente ampliado o uso de energia fotovoltaica e eólica. Existem ainda outras alternativas limpas que podem ser utilizadas, além destas fontes. Também é possível reduzir a demanda da matriz elétrica, aumentando a utilização de equipamentos autoalimentados e autônomos dessa matriz. Estes sistemas ou equipamentos levam a pesquisas e usos de nanogeradores e coletores de energia, nas gamas tecnológicas de piezoelétricos, magnetoelétricos, triboelétricos, termelétricos, eletrostáticos, ressonantes e por radiofrequência, para atender pequenas demandas de energias ecológicas, o crescimento da tecnologia de IoT, o sensoriamento e redes de sensores, dispositivos médicos e vestíveis. Exemplos de abordagens nessas áreas podem ser verificados nas publicações de JEAN *et al.*

(2024), HEDHILI *et al.* (2023), LIAO *et al.* (2024), LUO *et al.* (2024), RODRIGUES-MARINHO *et al.* (2023), TENG *et al.* (2023), WANG *et al.* (2019) e WANG *et al.* (2024).

A geração de energia elétrica por fontes tradicionais utiliza campos eletromagnéticos. Ondas eletromagnéticas são compostas por campos elétricos e magnéticos. Isso gera um questionamento inicial: como gerar energia elétrica útil a partir de ondas eletromagnéticas do meio? E segundo: como extrair potência suficiente para energizar sistemas e cargas? A abordagem de temáticas e aplicações envolvendo o campo elétrico de ondas eletromagnéticas é usual, mas o seu campo magnético não recebe a mesma atenção. Essa lacuna merece atenção, pois ali há uma quantidade de energia ignorada.

As formas inicialmente consideradas possíveis para obtenção de energia elétrica diretamente de ondas eletromagnéticas são: a agitação de partículas, por vibração ou aquecimento; extração por métodos de radiofrequência, valendo-se de antenas; e por excitação de espiras constituídas de materiais condutores elétricos.

Neste trabalho será utilizado o método de excitação de espiras elétricas. Nele se propõe uma arquitetura para geração de energia elétrica a partir do campo magnético de ondas eletromagnéticas. Essa arquitetura deve aceitar um amplo espectro de frequências e fontes emissoras para dar maiores versatilidade e capacidade de conversão da energia. Para o desenvolvimento são consideradas ondas eletromagnéticas puras ou naturais, sem sinais ou ruídos modulados, entendendo que qualquer sinal adicionado nas ondas poderia tirar o caráter generalista da arquitetura proposta, assim como requereria um controle das fontes emissoras.

A estrutura do trabalho inicia com o capítulo 1, onde apresentam-se a introdução, as motivações e justificativas, os objetivos geral e específicos. O capítulo 2 apresenta o estado da arte. O capítulo 3 discorre sobre a revisão bibliográfica, proposições e definições para as simulações e teste em bancada. No capítulo 4 abordam-se os resultados e discussões, englobando as modelagens, simulações e teste de bancada. E o capítulo 5 exibe a conclusão.

1.1 MOTIVAÇÕES E JUSTIFICATIVAS

A contemporânea busca por fontes de energia elétricas limpas e renováveis, concomitantemente com a expansão de novos dispositivos elétricos, aponta para análises de novas alternativas. Essas novas fontes podem ser ligadas na matriz elétrica principal ou não. Caso uma parte dos equipamentos seja autoalimentada, isso lhes fornece autonomia e reduz-se essa demanda da matriz elétrica principal. RODRIGUES-MARINO *et al.* (2023) descreve esse cenário:

O estilo de vida moderno implica uma demanda crescente por energia elétrica. Assim, a implementação do uso de energia renovável, sistemas de armazenamento de energia e recuperação de energia desperdiçada do meio ambiente está experimentando um forte crescimento, com muitos países já sendo abastecidos por energia limpa por várias semanas do ano, principalmente por energia hidrelétrica e fotovoltaica [11]. Fortes esforços científicos e tecnológicos também foram realizados para alcançar dispositivos de baixa potência para dispositivos eletrônicos móveis e vestíveis de uso diário, que podem ser alimentados por baterias ou por energia coletada do meio ambiente [...]. Neste escopo, micro ou nanogeradores (Fig. 1) podem fornecer energia para substituir baterias em dispositivos atuais [13,14] e desenvolver sensores autoalimentados, entre outros. De fato, a atenção atual no desenvolvimento de um fornecimento de energia sustentável para sensores e pequenos dispositivos eletrônicos se deve ao crescimento exponencial no uso de dispositivos eletrônicos vestíveis [15], sensores e atuadores, relacionados à digitalização da sociedade, no escopo da Internet das Coisas e da Indústria 4.0 [16]. (RODRIGUES-MARINHO *et al.*, 2023, p. 2, tradução nossa).

Os dispositivos de IoT e redes de sensores são exemplos que ilustram uma crescente quantidade de cargas que poderiam ser autoalimentadas.

Nas fontes de energia elétricas pesquisadas e em desenvolvimento, no que tange ondas eletromagnéticas o foco tem sido o uso do seu campo elétrico e ressonância, destacando-se avanços com o uso de metamateriais. Ao pesquisar a usabilidade do seu campo magnético busca-se analisar uma nova alternativa a ser explorada. Essa nova parcela de energia poderá inclusive ser associada à gerada por métodos do campo elétrico ou ressonância, almejando adquirir mais energia da onda eletromagnética.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos estão divididos em objetivo geral e objetivos específicos.

1.2.1 Objetivo geral

Como objetivo geral, este trabalho busca analisar e simular uma arquitetura de dispositivo captor e transdutor para obtenção de energia elétrica a partir do campo magnético de ondas eletromagnéticas com amplo espectro de frequências e agregação de suas potências.

1.2.2 Objetivos específicos

A busca do objetivo geral é construída por meio dos seguintes objetivos específicos:

- A. Implementar modelo de arquitetura para geração de energia elétrica a partir de ondas eletromagnéticas para simulações no *software* CST Studio Suite 2024.
- B. Simular emissão de ondas eletromagnéticas num espectro de frequências e verificações da tensão e corrente elétricas produzidas na estrutura modelo, decorrentes das interações com essas ondas eletromagnéticas.
- C. Propor um circuito elétrico para uso em conjunto com a arquitetura básica de geração de energia elétrica a partir do campo magnético de ondas eletromagnéticas. Objetivando fornecer ponto de entrega da energia para “uso final”. E simulação deste circuito elétrico na estrutura Simulink do *software* Matlab R2024b.
- D. Confeccionar um sistema para prova de conceito elementar e implementação em laboratório. Este conceito é a interação do campo magnético de uma onda eletromagnética com uma espira elétrica de dimensões correspondentes à frequência emitida.

2 ESTADO DA ARTE

Esta seção apresenta tipos alternativos de gerações de energias elétricas para baixas potências. E dentre elas as relacionadas com ondas eletromagnéticas.

2.1 GERAÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA ALTERNATIVAS PARA APLICAÇÃO EM DISPOSITIVOS DE BAIXA POTÊNCIA

As gerações de energia elétrica alternativas para dispositivos de baixa potência são nominadas nanogerações. Seus tipos mais comuns são: eletrostática, magnetoelétrica, piezoelétrica, termelétrica, triboelétrica, ressonante e por radiofrequência, e serão abordados nesta seção.

2.1.1 Eletrostática

A geração eletrostática ocorre a partir do deslocamento de cargas elétricas positivas e negativas nos materiais, por meio de indução eletrostática. Essa indução faz com que ocorra maior acúmulo de cargas positivas em uma região e as negativas em outra. Depois essa localização é invertida; onde estava mais positivo passa a ficar mais negativo e vice-versa. Esses deslocamentos cíclicos das cargas produzem tensão elétrica alternada.

Esse efeito é apontado na obra de TENG *et al.* (2023), onde ao analisar um experimento afirma-se que “com base na indução eletrostática, o eletreto carregado induz cargas opostas nos eletrodos formando uma diferença de potencial elétrico”. E em sua conclusão traz sobre esse experimento: “o gerador eletrostático pode efetivamente coletar energia cinética ambiental em baixa frequência” e “o gerador eletroestático tem uma estrutura simples e uma tensão de saída de circuito aberto relativamente alta, que pode gerar energia semelhante a um pulso”.

2.1.2 Magnetoelétrica

Essa geração elétrica emprega ímãs como elementos fornecedores de campo magnético, ou que, ao contrário, efetuam reação a um campo deste tipo, em

equipamentos que utilizam a variação de fluxo magnético para produção de energia elétrica.

Esse tipo de gerador é semelhante aos geradores eletromagnéticos que contém ímãs permanentes. O princípio da geração de energia elétrica por meio dos geradores eletromagnéticos é descrito por LUO *et al.* (2024, p. 4, tradução nossa):

O princípio de geração de energia do gerador eletromagnético é o seguinte: quando uma parte do condutor do circuito fechado faz o corte da linha de indução magnética, o fenômeno da corrente será gerado no condutor. Este fenômeno também é chamado de indução eletromagnética, e a corrente gerada é chamada de corrente induzida.

A magnetoelétrica é uma tecnologia robusta e com emprego disseminado. Pode-se citar o uso em dínamos, que foram populares em faróis de bicicletas em décadas passadas, para exemplificar sua disseminação.

2.1.3 Piezoelétrica

O gerador piezoelétrico é um elemento que produz sinais elétricos ao receber energia mecânica. Essa energia pode vir de vibrações, pulsos de pressão, etc. Seu material é piezoelétrico e seu formato pode ser variado. HIDALGO-LEON *et al.* (2022, p. 2, tradução nossa) descreve a tecnologia para uma peça em formato de folha, ao comentar sobre formatos:

Um dos mais populares é uma folha piezoelétrica colada ou aderida a um substrato metálico exposto a forças de deflexão ou compressão devido ao efeito de um fluido. Essas forças ou vibrações induzidas pelo fluido dobram o material piezoelétrico convertendo esta tensão mecânica em energia.

Na geração piezoelétrica há um fato interessante, que é a capacidade de detectar a intensidade da energia mecânica que está agindo sobre o material piezoelétrico, utilizando o próprio elemento como um sensor de grandeza mecânica.

2.1.4 Termoelétrica

Na nanogeração termelétrica o gerador utiliza diferença de temperatura para produzir tensão elétrica. HIDALGO-LEON *et al.* (2024, p. 5, tradução nossa) sintetizou bem o conceito ao escrever:

Este gerador é o transdutor que converte um diferencial de temperatura em energia elétrica (efeito Seebeck). Para isso, o dispositivo tem dois lados: um frio e um quente, que são expostos a baixas e altas temperaturas, respectivamente. Quanto maior o diferencial de temperatura entre esses lados, maior é a tensão de saída.

Então, a tensão elétrica é gerada pela diferença de agitações dos átomos em dois lados de um material: em um bastante agitado e no outro não. Havendo um caminho entre ambos, a busca de equilíbrio produzirá corrente elétrica.

2.1.5 Triboelétrica

Utiliza a energia mecânica do atrito para criar um tipo de energia estática, com cargas positivas e negativas acumuladas separadamente. Em decorrência das eletronegatividades diferentes dos materiais. Quando essas cargas encontram um caminho para fluir, que pode ocorrer pelo dobramento do material, “a diferença de potencial elétrico impulsiona a transferência de carga e gera corrente alternada” (LUO *et al.*, 2024, p. 2, tradução nossa).

2.1.6 Ressonante

Esse tipo de produção de energia elétrica pode ser dividido em dois métodos, quanto a fonte de origem: energia mecânica e onda eletromagnética.

Na utilização de energia mecânica o sistema se assemelha a um alto-falante. Mas ao invés da membrana vibrar para produzir som, ela é a receptora das vibrações. E a oscilação de deslocamento gerada no conjunto eletromagnético produz sinal elétrico. CHAITANYA *et al.* (2024) denomina essa técnica de método do diafragma, afirma que é eficiente e o descreve a seguir.

Outro método usado para converter energia sonora de forma eficiente é o método do diafragma. O diafragma é um material fino e duro que é colocado entre um ímã permanente e conectando uma bobina de indução a ele, seja no alto-falante ou no microfone. A geração de eletricidade começa quando vibrações acústicas atingem o diafragma, provocando sua oscilação. Conforme o diafragma vibra, ele coloca a bobina anexada em movimento. O movimento da bobina em proximidade a um ímã estacionário cria um campo magnético variável. Essa variação do campo magnético induz uma corrente alternada (CHAITANYA *et al.*, 2024, p. 557, tradução nossa).

Para a onda eletromagnética como fonte de energia, o fenômeno da ressonância inicia com a incidência da onda em cavidades ressonantes. Os ressoares dessas cavidades produzem novas ondas, que ao interagirem geram uma onda eletromagnética resultante. A onda final é captada por uma antena e se obtém a energia elétrica.

2.1.7 Radiofrequência

A fonte alternativa de geração de energia elétrica deste tipo “é um método usado para obter energia a partir de sinais de radiofrequência. Os sinais de radiofrequência na forma de ondas eletromagnéticas são convertidos em tensão CC” (HASANUDDIN, 2022, p. 1, tradução nossa). Esses sistemas empregam antenas para captar os sinais e fornecer energia elétrica. Geralmente são associados retificadores às antenas, resultando nas chamadas retenas. A “Antena é usada para receber sinais de RF e retificadores são usados para converter em tensão DC” (HASANUDDIN, 2022, p. 1, tradução nossa).

Na sociedade atual, uma diversificada gama de sinais de radiofrequência está disponível nos ambientes, conforme TAN; BAUTISTA (2017, p. 1, tradução nossa):

A energia de RF hoje em dia está disponível gratuitamente na atmosfera em grande quantidade, transmitida por bilhões de transmissores de rádio em todo o mundo, incluindo rádios portáteis, telefones celulares, dispositivos eletrônicos, estações internas, estações base móveis e estações de transmissão de televisão/rádio. O número destas fontes potenciais continua a aumentar.

Por consequência essa é uma tecnologia bastante visada para a geração de energia elétrica.

2.2 GERAÇÕES DE ENERGIA ALTERNATIVAS RELACIONADAS COM ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

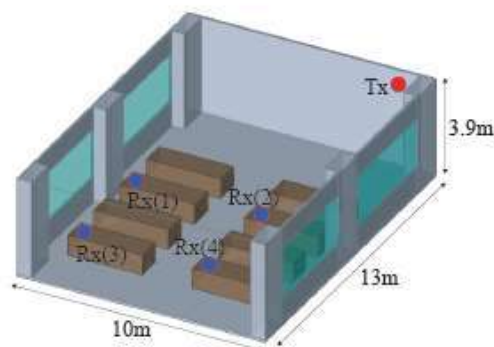
Dentre as gerações de energia elétrica alternativas mencionadas em 2.1 *GERAÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA ALTERNATIVAS*, uma delas está diretamente relacionada com ondas eletromagnéticas (OEM): radiofrequência. E outras duas podem, ou não, utilizar OEM. São elas: termoelétrica e ressonante. Na primeira a onda eletromagnética pode ser aplicada para aquecimento do material. E na segunda para vibrar cavidades ressonantes. Uma quarta pode ter vínculo de uso, mas carece de mais pesquisas: eletrostática. Ainda é possível a combinação de métodos, com a utilização de radiofrequência e ressonância.

2.2.1 Radiofrequência

Dois publicações que ilustram o cenário da coleta de energia de ondas eletromagnéticas por radiofrequência serão mencionadas a seguir: TAKEMURA *et al.* (2017) e KHOSHDEL; SHOKOOH-SAREMI (2014).

No trabalho de TAKEMURA *et al.* (2017) são analisadas recepções de sinais elétricos através de antenas posicionadas em diferentes pontos dentro de uma sala de aula. Também são ensaiadas distintas configurações angulares em antenas sigma-delta utilizadas, com passo angular de 10° . Com isso se percebeu que para um conjunto dual de antenas direcionais híbridas sigma-delta o melhor ângulo entre elas foi de 180° (TAKEMURA *et al.*, 2017), na obtenção de ondas eletromagnéticas de 2,45 GHz emitidas a partir de um dos cantos dessa sala. O ambiente simulado em questão é exibido na Figura 1, tendo formato retangular de 10 x 13 m.

Figura 1 - Sala com fonte emissora (Tx) e conjuntos receptores (Rx) duais



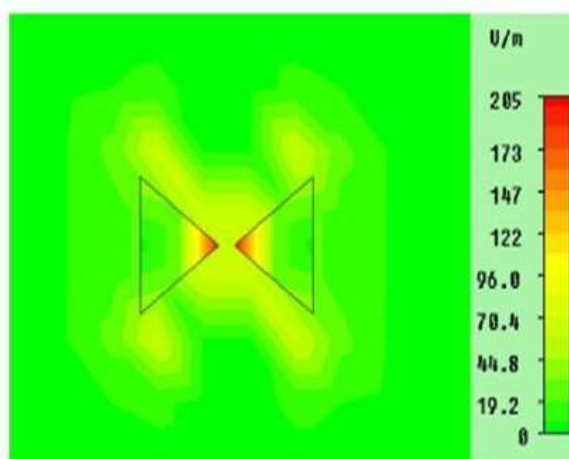
Fonte: TAKEMURA *et al.*, 2017.

A análise dessa publicação foi sobre melhorar a coleta de energia nos pontos receptores. Sua conclusão apontou que a utilização de antenas direcionais duplas incrementaram as recepções.

Nessa área das radiofrequências, uma proposta interessante de melhoria é na abordagem do formato de antenas para circuitos que extraem energia por antenas sem ressonadores. O formato da antena tem grande efeito no campo elétrico obtido, conforme se verifica na publicação de ELTRESY *et al.* (2016).

Uma nanoantena em formato de *Bow-Tie* (gravata borboleta) foi simulada por Khoshdel e Shokooh-Saremi (2014) para obtenção de campo elétrico na sua parte central. As simulações foram efetuadas em diferentes frequências, sendo que 167 THz apresentou o maior valor: 328 V/m. A Figura 2 apresenta a distribuição do campo elétrico na nanoantena proposta em Khoshdel e Shokooh-Saremi (2014).

Figura 2 - Distribuição do campo elétrico na antena *Bow-Tie* a 167 THz, excitada por uma onda plana. Na lateral a escala do campo elétrico, de 0 a 205 V/m



Fonte: KHOSHDEL; SHOKOOH-SAREMI, 2014.

Para distância de 20 nm entre as pontas centrais do par de triângulos, supõe-se a tensão de 6,56 μV na fenda. A largura total da *Bow-Tie* foi de 270 nm, portanto há possibilidade do uso de várias unidades em uma pequena área.

A partir da análise de diversos estudos, apresentado quantitativamente em 3.1 *PROTOCOLO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA*, verifica-se que os autores chegam a conclusão de que a tensão elétrica obtida diretamente das ondas eletromagnéticas é baixa, sendo normalmente menor que a queda de tensão em uma junção de semicondutor de silício. Mas, segundo Tan e Bautista (2017), aplicando-se multiplicadores de tensões é possível obter tensão DC utilizável. E, ainda que sua publicação analise frequências de 700 MHz, 850 MHz, 900 MHz, 1800 MHz e 2100 MHz, típicas para aparelhos de telefonia celular, podemos expandir esse entendimento para outras frequências. Na obra de Tan e Bautista (2017), a maior tensão obtida é de 2,181 V e, não são expressas diretamente a corrente elétrica ou a potência nessa tensão.

Um outro artigo, NAKASHIMA *et al.* (2020), observou a implementação de circuitos multiplicadores de tensões dos tipos *cascade* e *cascode*, nas frequências de 920 MHz e 2,4 GHz, tendo com o último multiplicador atingido a tensão de saída de 9,5 V. Contudo, segundo NAKASHIMA *et al.* (2020) e HASANUDDIN *et al.* (2022), tensões de 2,0 V e 3,3 V seriam suficientes para acionar dispositivos como sensores e de IoT. Porém existe outra vantagem pressuposta na utilização dos multiplicadores de tensões: em dispositivos de baixos consumos, poder-se-iam substituir baterias por supercapacitores (HASANUDDIN *et al.*, 2022), que apresentam ciclos de vidas mais longos.

Portanto a captura de energia eletromagnética do ambiente para alimentar diretamente pequenos dispositivos auxiliaria na implementação da IoT, conforme CHUVALDIN *et al.* (2019). E mesmo em equipamentos maiores podem ser aplicáveis, como proposto em Deng *et al.* (2022), com carregamento de carro elétrico ou híbrido.

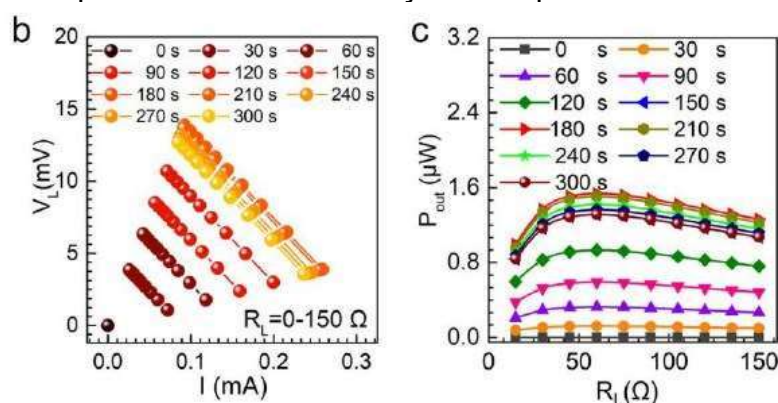
2.2.2 Conversão de energia por efeito Seebeck

Estando duas partes de um material com temperaturas distintas, entre elas é percebido potencial em tensão contínua. Esse fenômeno decorre das diferenças nas

agitações das partículas em cada um dos pontos. Esse efeito conhecido como Seebeck está relacionado com a capacidade de equilíbrio térmico no material, pois quanto mais lento for, maior pode ser a disparidade de temperaturas nele.

Para converter energia eletromagnética em calor e depois este em energia elétrica com corrente contínua (EM-calor-CC), pelo efeito Seebeck, um estudo de LV *et al.* (2023) elaborou grafeno com estrutura nanoporosa escalonada. Isso alterou as propriedades eletrônicas e fonônicas do grafeno, cujas anomalias levaram à eficiente absorção e conversão de ondas eletromagnéticas em calor, segundo LV *et al.* (2023). E, por conseguinte, a diferença térmica em eletricidade contínua (DC – *Direct Current*). Além da obtenção de eletricidade, outra importante característica desse material é a redução da poluição eletromagnética existente no ambiente, por sua capacidade de absorção.

Figura 3 - Desempenho de produção de energia elétrica de grafeno bicamada com nanoporos circulares. Radiação EM aplicada de 0 a 180 s



Fonte: LV *et al.*, 2023.

As informações exibidas na Figura 3 foram obtidas por conjunto de seis tiras de grafeno modificado, tendo cada tira o comprimento de 25 mm e largura de 5 mm (espessura de $\approx 10,0 \pm 0,8 \mu\text{m}$), com radiação EM aplicada de 0 a 180 s. É reportado “que a potência de saída do dispositivo pode ser incrementada aumentando a espessura e o número das tiras porosas de grafeno” (LV *et al.*, 2023, p. 6, tradução nossa).

2.2.3 Radiofrequência e ressonância

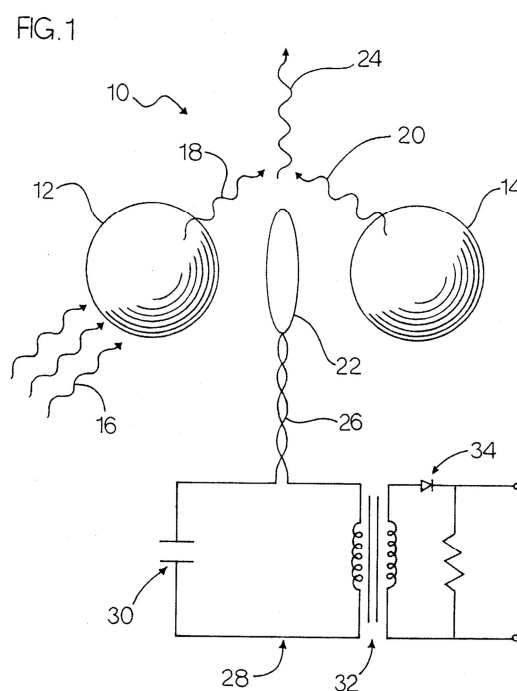
Em 1971 essa teoria já era abordada (LUKOSZ, 1971), e em 1996 existia ao menos uma patente (MEAD JR. *et al.*, 1996) tratando dela.

Os trabalhos baseados no efeito do ponto zero utilizam estruturas para captações de ondas por radiofrequência em cavidades (planas ou não), onde por efeito da pressão exercida pela onda no material de cada uma das cavidades faz ressoar ondas secundárias com frequências menores que a original. A associação dessas resultantes é captada por sistema de antena e extrai-se tensão elétrica contínua com uso de retificadores. Conforme Mead Jr. *et al.* (1996), quanto menor for a estrutura desse tipo de sistema, maior será a energia obtida. Todavia existe limitação tecnológica para miniaturização.

A Figura 4 ilustra um sistema de coleta e conversão da energia baseada na teoria do efeito Casimir, ou ponto zero. Onde os números representam: 16 - Onda incidente, na frequência original, ou primária; 18 e 20 - Ondas secundárias, com frequência menor que 16, geradas por ressoamento das “cavidades” coletoras; 24 - Onda resultante da associação de 18 e 20; 12 e 14 - “Cavidades” ressonantes; 22 e 26 - Estrutura de antena coletora do sinal 24; 28, 30, 32 e 34 - Elementos de circuito eletrônico para tratamento e disponibilização do sinal (24) recebido.

Figura 4 - Sistema de coleta e conversão da energia baseado na teoria do efeito Casimir

U.S. Patent Dec. 31, 1996 Sheet 1 of 8 5,590,031



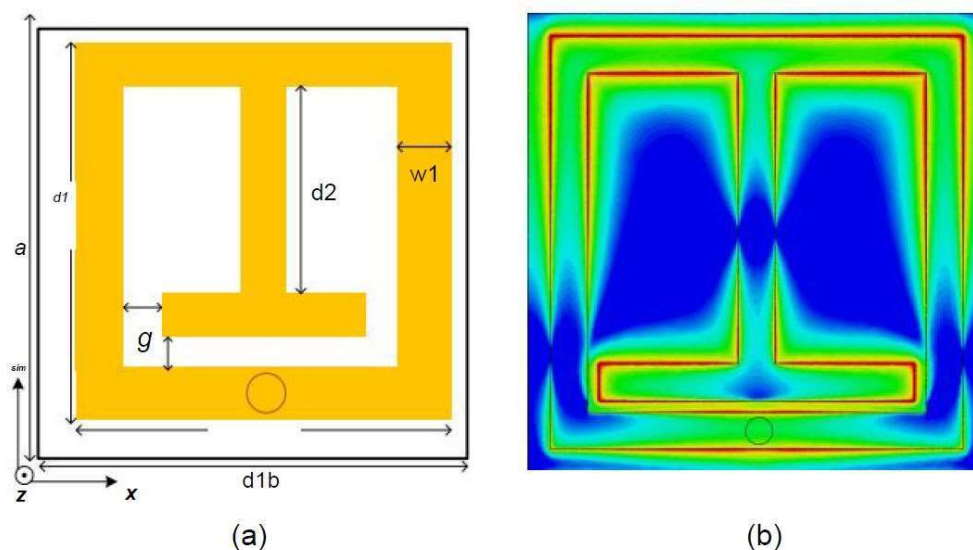
Fonte: MEAD JR. *et al.*, 1996.

A evolução para conseguir mais energia em uma tecnologia, mantendo uma mesma teoria de embasamento, pode estar na melhoria dos elementos que constituem os sistemas, como o seu *design*, leiaute e materiais.

Artigos foram elaborados tratando de melhorias construtivas no conjunto de cavidades ressonantes e antenas, realizando testes dessa teoria e utilizando novos materiais. Seus resultados mostraram que é possível obter energia elétrica a partir de ondas eletromagnéticas. Nessas publicações geralmente se escolheram frequências específicas, ou grupo dessas, e valeram-se de sinais modulados gerados por equipamentos cotidianos.

O trabalho de Khan e Eibert (2018) exibe uma modernização na estrutura de coleta de energia com cavidades ressonantes e antena. Usando metamaterial (MTM) – Rogers RO3003 –, apresentou elevada eficiência com captura de 92,2 % da potência incidente e disponibilização de 78,3 % para a carga, representando eficiência total de 72,2 % (KHAN; EIBERT, 2018). Além dos resultados elétricos, a proposta conseguiu unir as cavidades e a antena num único dispositivo plano, que é exibido na Figura 5.

Figura 5 - Estrutura de coleta de energia com cavidades ressonantes e antena re-estilizada. (a) Célula unitária MTM, onde $a=10$ mm, $b=10$ mm, $d1=9$ mm, $d2=6,34$ mm, $w1=0,8$ mm, $g=0,26$ mm, $\text{via}=0,6$ Ø; (b) Distribuição do campo elétrico em uma única célula unitária em 6,75 GHz para ângulo de incidência normal



Fonte: KHAN; EIBERT, 2018.

Nesse projeto, uma célula unitária MTM conseguiu disponibilizar 361 mW para a carga, a partir de uma onda incidente de 500 mW.

Em publicações recentes o emprego de metamateriais tem sido recorrente, destacando-se o uso para melhorias das eficiências. E normalmente com abordagens em torno da radiofrequência e antenas.

2.3 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

O estado da arte mostra buscas por fontes alternativas de energia elétrica, incluindo as chamadas nanogerações. As pequenas fontes são especialmente pesquisadas para suprir energia a dispositivos autoalimentados. As publicações analisadas apresentam uma diversidade de métodos nanogeradores, mas são baseadas principalmente nos métodos piezoelétrico e triboelétrico.

As ondas eletromagnéticas aparecem como fontes promissoras devido a quantidade crescente de equipamentos que as geram e utilizam-nas em seus funcionamentos cotidianos.

Especificamente na geração de energia elétrica a partir de ondas eletromagnéticas, encontrou-se predominância de publicações baseadas na teoria do ponto zero, ou efeito Casimir, e coleta por antenas. A revisão da literatura localizou apenas duas publicações em outras direções, sendo uma abordando o efeito Seebeck (LV *et al.*, 2023) e outra a tensão em junções de semicondutores (BLAKESLEE; MITCHELL, 1981). Ambas utilizando a agitação de partículas. Nenhuma obra foi identificada utilizando fluxo magnético em espiras elétricas.

A busca por fontes de energia elétrica tem aumentado com as demandas das civilizações atuais. Estas são cada vez mais adeptas aos equipamentos tecnológicos, cujas inovações surgem continuamente, ao passo que também requerem desconexões das fontes de energias elétricas tradicionais, seja por mobilidade ou alegando necessidade do uso de fontes de energias renováveis.

Pesquisas na área de nanogeradores contribuem com a ciência para viabilizar novas fontes de energia. A energia elétrica gerada a partir de ondas eletromagnéticas poderá ser utilizada em dispositivos IoT e outros aparelhos autoalimentados, proporcionando-lhes maior mobilidade e autonomia de energia. Inicialmente são previstos baixos consumos de potências em cada equipamento IoT, portanto pequenas fontes de energia sem fios podem suprir o consumo e dar mobilidade a esses dispositivos. Isso é útil, pois na IoT requer-se alimentação constante,

representando significativo consumo de energia quando implantada em larga escala e, também porque os equipamentos podem demandar independência de cabos elétricos para conexões com as fontes de alimentação, decorrente da diversidade de dispositivos e aplicações IoT.

Portanto o estado da arte estabelece o interesse na pesquisa científica por novas fontes de energia elétrica, pensando em geração distribuída e independente da matriz energética. Expande o uso de metamateriais, por suas características diferenciadas, e considera o crescente número de pequenos dispositivos elétricos da civilização atual.

3 METODOLOGIA

Esta seção apresenta a metodologia científica aplicada para o desenvolvimento deste estudo.

3.1 PROTOCOLO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Foram consultadas as bases de dados IEEE Xplore, Science Direct, Scopus, Web Of Science e Google Patent, na busca de materiais científicos relacionados com o tema deste trabalho. A seguir apresentam-se detalhes dessas pesquisas e o Quadro 1 exibe a síntese dos resultados. Para otimizar esforço e tempo, aplicou-se a abordagem das três passagens, publicada por Keshav (2007).

A pesquisa no IEEE Xplore retornou 249 resultados, sendo 23 considerados relevantes para avaliação. Dentre esses, descartou-se um por abordar o mesmo estudo que outra publicação; restando 22 artigos científicos. As consultas foram realizadas em 06/03/2024 e 23/01/2025 (dia/mês/ano), com a estrutura: ("*All Metadata:Converting*") AND ("*All Metadata:Electromagnetic wave*") AND ("*All Metadata:Electric energy*").

Em Science Direct foram encontradas 308 respostas à pesquisa, com 17 considerados como relevantes para análise. As consultas foram efetuadas em 06/03/2024 e 23/01/2025 (dia/mês/ano), com a estrutura: "*Converting*" AND "*Electromagnetic wave*" AND "*Electric energy*" -*absorption*. A palavra absorção foi removida porque estando incluída *absorption* eram 1.319 resultados e muitas das publicações eram na área química e sem relação com o estudo.

A base de dados Scopus exibiu 51 resultados, sendo interpretado que 06 mereciam análise. As consultas foram feitas nos dias 06/03/2024 e 28/01/2025 (dia/mês/ano), com a estrutura: "*Converting*" AND "*Electromagnetic wave*" AND "*Electric energy*".

Na base Web Of Science foi encontrado apenas um resultado para buscas por: ((*ALL*="*Converting*") AND *ALL*="*Electromagnetic wave*") AND *ALL*="*Electric energy*"). Mas esse não foi utilizado. As datas de pesquisa nesta base foram: 06/03/2023, 13/03/2024, 28/01/2025 e 17/02/2025 (dia/mês/ano).

No portal Google Patent foram localizados um trabalho científico e quatro patentes. As datas das buscas foram 02/03/2024 e 23/01/2025 (dia/mês/ano). Os termos pesquisados foram: "Converting", "Electromagnetic wave", "Electric energy"; "System For Converting Electromagnetic Radiation Energy To Electrical Energy"; "Casimir Effect" e "zero point".

A partir dos artigos científicos encontrados nas bases supracitadas e suas referências, foram localizados mais cinco trabalhos considerados relevantes. Por estarem relacionados com ondas eletromagnéticas e geração de energia.

Portanto, foram encontradas 47 publicações relacionadas à área de interesse. Dessas, 23 tem relação indireta, restando 24 com maior contribuição, ao permear o assunto de estudo.

Quadro 1 - Resultados de consultas em bases de dados

Consultas em bases de dados				
Base de dados	Resultados das consultas	Resultados relevantes	Resultados descartados	Resultados utilizados
IEEE Xplore	249	23	1 ¹	18
Science Direct	308	17	0	15
Scopus	51	6	0	4
Web Of Science	1	0	0	0
Google Patent	5 ²	5	0	5
Referências de artigos	5	5	0	5
Total	619	56	1	47 ³
¹ Mesmo estudo exibido em duas publicações. ² Quatro patentes e um trabalho científico. ³ Vinte e três obras com relações indiretas e vinte e quatro com maiores contribuições.				

Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

No Quadro 1, os resultados relevantes se referem às publicações selecionadas para avaliação, dentre as totalidades. Os trabalhos que possuem relações indiretas são aqueles que agregam conhecimentos auxiliares na área de pesquisa. E as publicações com maiores contribuições têm capacidade de fornecer algum suporte ao estudo.

3.2 ARQUITETURAS CAPTORAS E TRANSDUTORAS DA ENERGIA DE CAMPOS MAGNÉTICOS DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS EM ELÉTRICA

A energia de ondas eletromagnéticas pode ser utilizada em circuitos elétricos por meio de dispositivos apropriados.

Nesta seção é proposta arquitetura de captação e transdução da energia dos campos magnéticos de ondas eletromagnéticas em energia elétrica. Também é sugerido um circuito elétrico para usar conjuntamente.

Quanto a arquitetura, visando flexibilizar as ondas eletromagnéticas utilizáveis e obter maior conversão de potência, sugere-se o uso de estrutura que atenda um ou mais espectros de frequências e que converta a energia de várias ondas simultaneamente. A proposição trabalha com conversão de energia através da excitação eletromagnética de espiras elétricas. As várias espiras são conectadas eletricamente em paralelo, disponibilizando energia em conjunto. Sendo que para cada comprimento de onda se aplica uma dimensão correspondente de espira. E, para um maior fluxo magnético transpassar as espiras, mantendo dimensão compacta, o formato delas é quadrado; pois um quadrado com a mesma largura que o diâmetro de um círculo possui mais área que este círculo. Isso se relaciona com a equação do fluxo magnético, exibida na Equação 1, na qual a área é elemento integrante.

$$\Phi_m = N \cdot B \cdot A \cdot \cos(\theta) \quad (1)$$

Onde:

Φ_m =Fluxo magnético, em Weber (Wb);

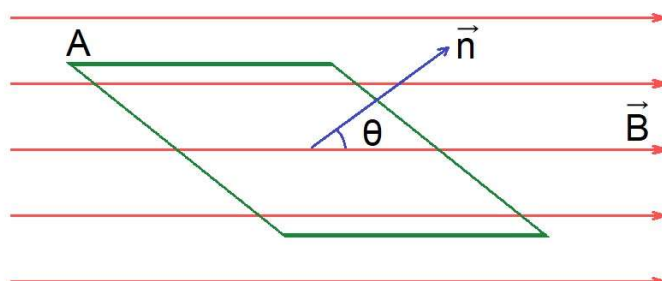
N =Número de espiras elétricas;

B =Intensidade do campo magnético num meio, em Tesla (T);

A =Área da espira atravessada pelo campo magnético, em metros quadrados (m²);

θ = Ângulo entre o vetor normal à superfície da espira elétrica e a direção do campo magnético, em graus ($^{\circ}$).

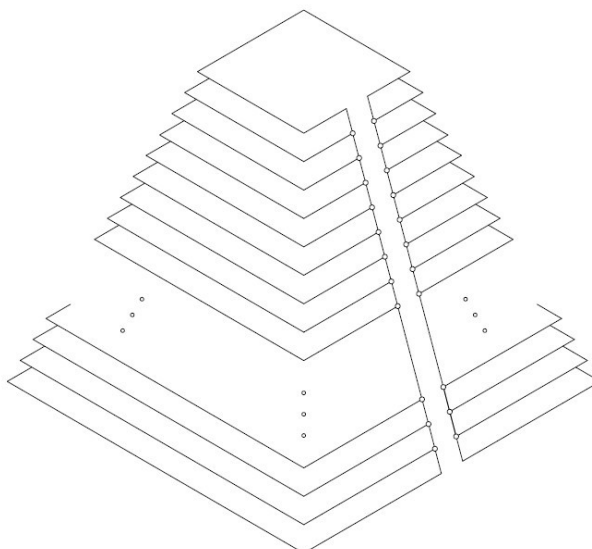
Figura 6 - Fluxo magnético transpassando uma área A



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

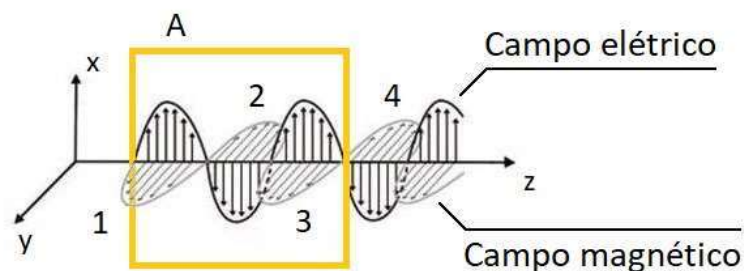
Sabe-se que as interações entre ondas podem ser construtivas ou destrutivas. Como o objetivo é a agregação de potências, é necessário casar as fases de cada onda. Seja no semiciclo positivo ou negativo. Dessa forma, é necessário considerar um momento em que todas as fases estejam alinhadas entre si. Para isso as espiras são alinhadas a partir dos seus centros, em formato piramidal, conforme ilustração na Figura 7. Também é necessário que um ciclo não se autoanule na espira. Portanto a quantidade de semiciclos dentro da largura de cada espira deve ser ímpar, para as contribuições serem construtivas. A Figura 8 exemplifica este conceito, mostrando uma quantidade ímpar de fases do campo magnético de uma onda eletromagnética transpassando uma espira elétrica.

Figura 7 - Agrupamento de espiras quadradas paralelas, em formato de pirâmide



Fonte: elaborado pelo autor, 2024.

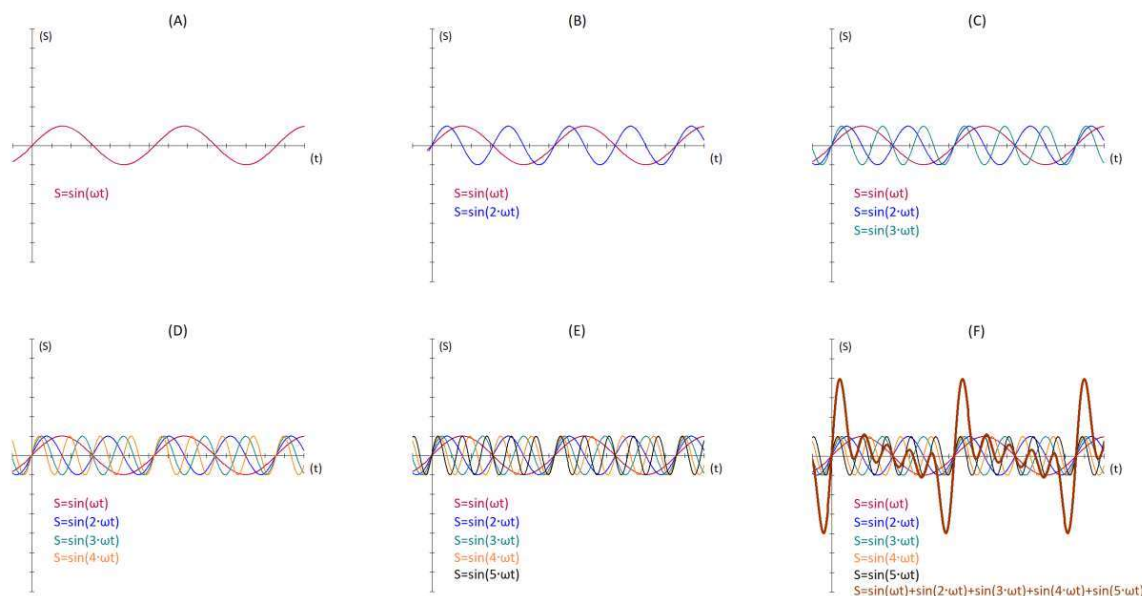
Figura 8 - Semiciclos 1, 2 e 3 de uma onda eletromagnética dentro de uma espira A, representando quantidade ímpar de fases no interior



Fonte: LOCH; BURKARTER, 2007, p. 173. Editado pelo autor.

Um conjunto ilustrativo de ondas senoidais com diferentes períodos é exibido na Figura 9. Nessa imagem também é ilustrada a soma delas, que apresenta comportamento alternado, cruzando o eixo das abscissas. Percebe-se que a resultante não é nula.

Figura 9 - Ondas senoidais com diferentes períodos. E a resultante da soma delas, exibida em (F)



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Esta imagem é importante porque ilustra a interação entre ondas de diferentes comprimentos ao incidir num mesmo ponto, ou no caso deste trabalho, na mesma arquitetura proposta. Matematicamente pode-se obter a área sob a curva resultante pela Equação 2. A representação com expansão para o infinito é dada pela Equação 3.

$$\text{Área}_S = \sum_{n=1}^5 N_n \cdot \int_0^{2\pi} \sin(x_n) \cdot \cos(x_n) dx \quad (2)$$

$$\text{Área}_S = \sum_{n=0}^{\infty} N_n \cdot \int_0^{2\pi} \sin(x_n) \cdot \cos(x_n) dx \quad (3)$$

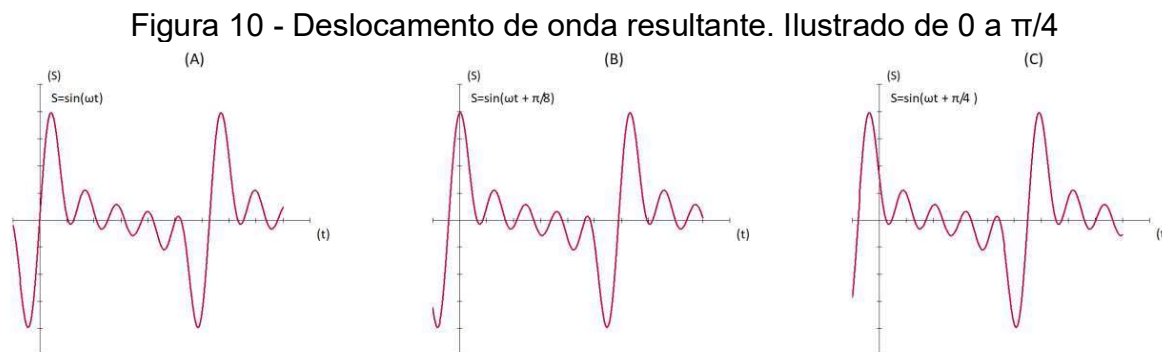
Onde:

N =Quantidade de ondas que possuem a mesma frequência;

n =Número para identificar cada onda de frequência diferente.

Percebe-se na Figura 9, em (F), que a onda resultante tende a tornar-se dois picos. Um no início do período ($\omega=0$) e outro no final ($\omega=2\pi$). Como as fases das ondas

não são estáticas, esse pico oscilará longitudinalmente no eixo t , conforme exibido na Figura 10.



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

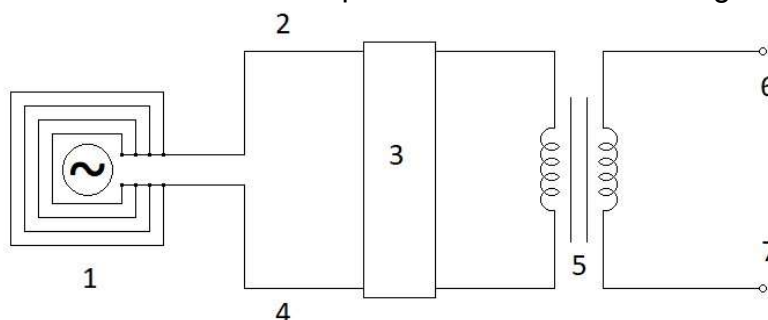
A Figura 10 exibe três diferentes momentos sequenciais (ω a $\omega + f \cdot \pi/4$) da onda resultante obtida na Figura 9 (F), ilustrando seu deslocamento no tempo. Assim, demonstra-se que o seu comportamento é alternado e que existe variação na magnitude do sinal.

Uma dificuldade identificada na conversão de energia das ondas eletromagnéticas em elétrica é a baixa tensão gerada. Como a onda resultante apresentada anteriormente tem comportamento alternado em relação ao eixo t , pode-se aplicá-la diretamente em transformador elevador de tensão elétrica. E então, caso seja apropriado, retificar o sinal em tensão maior.

Para aproveitar eletricamente a energia dessas ondas, é conveniente aplicar um bloco de transferência (ou ajuste) no circuito elétrico em que forem utilizadas, de maneira que o sinal S seja melhor distribuído em cada semiciclo.

A Figura 11 apresenta uma sugestão de circuito elétrico para disponibilizar a energia obtida pela arquitetura proposta para geração de energia elétrica a partir do campo magnético de ondas eletromagnéticas.

Figura 11 - Circuito elétrico para fornecimento de energia elétrica



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

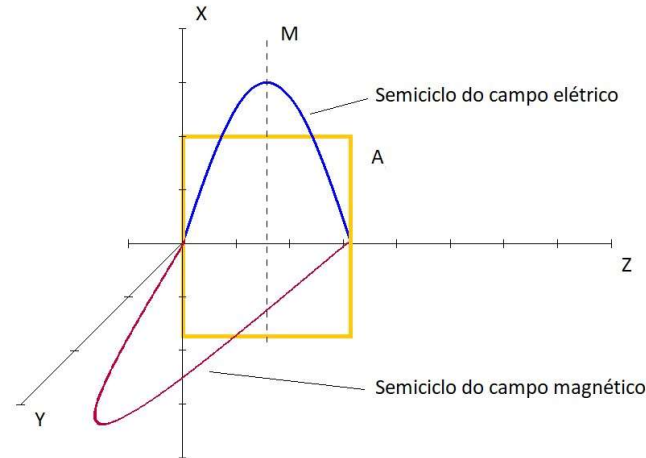
No circuito da Figura 11, o ponto 1 é uma fonte de energia elétrica alternada, gerada a partir do campo magnético de ondas eletromagnéticas. Esse ponto pode ser a associação de vários conjuntos conectados eletricamente em paralelo; 3 é um bloco de transferência (ou ajuste) para correção da forma de onda; 5 é um transformador elétrico; 6 e 7 são os terminais de disponibilização da energia elétrica.

3.2.1 Quantificação de potência

A quantidade de energia que incidirá na arquitetura proposta está relacionada com suas dimensões construtivas, a quantidade de espiras e o ângulo de incidência das ondas eletromagnéticas.

Na Figura 12 é mostrada uma espira elétrica A . Passando por ela, uma fase de campo magnético, e no mesmo plano dela (eixo X) uma fase do campo elétrico. Como o semicírculo do campo elétrico é simétrico em relação ao meio da espira (M), a diferença de tensão e contribuição elétrica provocada por ele serão nulas. Nesse momento representado, apenas a energia do campo magnético afetará eletricamente a espira. Generalizando, estando o campo elétrico no mesmo plano (eixo X) da(s) espira(s), esse não interferiria na energia convertida do campo magnético.

Figura 12 - Fase do campo magnético cruzando espira elétrica e semiciclo do campo elétrico no mesmo plano dessa



Fonte: elaborado pelo autor, 2024.

Assim, a energia disponível para geração de energia elétrica considerada neste trabalho será aquela atrelada ao campo magnético das ondas eletromagnéticas.

Para uma onda eletromagnética, a densidade de energia do campo magnético (u_B) é dada pela Equação 4:

$$u_B = \frac{1}{2 \cdot \mu_0} \cdot B^2 \quad (4)$$

Onde:

$\mu_0 = 1,25663706144 \cdot 10^{-6}$ H/m; e

B = Intensidade do campo magnético, em Tesla (T).

O fluxo magnético é representado pela Equação 1, que relaciona a quantidade de espiras, a área transpassada e a intensidade do campo magnético.

Para a pirâmide de espiras quadradas paralelas proposta, a equação é reformulada para a Equação 5, pois as áreas variam conforme a altura da estrutura. E também pode haver mais de uma espira com a mesma área, portanto é adicionado um elemento N correspondente à quantidade de espiras com áreas idênticas.

$$\Phi_m = B \cdot \cos(\theta) \cdot \sum_{n=1}^i N_n \cdot A_n \quad (5)$$

Onde:

Φ_m =Fluxo magnético, em Weber (Wb);

N =Quantidade de espiras elétricas que possuem a mesma área;

B =Intensidade do campo magnético num meio, em Tesla (T);

A =Área da espira atravessada pelo campo magnético, em metros quadrados (m²);

θ =Ângulo entre o vetor normal à superfície da espira elétrica e a direção do campo magnético, em graus (°);

n =Número para identificar cada área de espira diferente;

i =Quantidade total de diferentes áreas nas espiras elétricas.

Assim, as Equações 4 e 5 conseguem indicar a energia elétrica produzível a partir do fluxo magnético incidente na arquitetura em formato de pirâmide com espiras elétricas quadradas paralelas.

3.3 DEFINIÇÕES PARA SIMULAÇÕES NO SOFTWARE CST STUDIO SUITE

As pirâmides de espiras quadradas precisam ter suas estruturas modeladas no *software* CST Studio Suite 2024 para as simulações.

Define-se que o material condutor das arquiteturas de captação e transdução a serem ensaiadas é o cobre puro. Para isolante e meio ambiente emprega-se o ar.

As simulações abrangem quatro tipos de arquiteturas com espiras elétricas: 1. espira elétrica única, 2. pirâmide de espiras quadradas paralelas, 3. pirâmide de espiras quadradas conectadas eletricamente em série e 4. espiral plano. Essas devem ser submetidas a espectros de ondas eletromagnéticas planas por $1 \cdot 10^{-9}$ segundos (máximo permitido na versão do *software*). E terem grandezas elétricas de tensão e corrente obtidas através de impedância de $1,0 \Omega$, situada entre os pontos de entrega da energia elétrica de cada arquitetura de transdução analisada. Uma resistência para cada arquitetura.

O campo elétrico da onda plana é definido como $1 \cdot 10^{-3}$ V/m, oscilante no eixo x . A propagação da onda ocorre no eixo z , em seu sentido positivo. Então, o campo magnético alterna no eixo y . Este último eixo também é onde varia a altura da pirâmide; estando as espiras elétricas paralelas ao plano formado pelos eixos x e z .

Na dinâmica as estruturas são submetidas a ondas eletromagnéticas planas com frequências únicas ou simultâneas, conforme as arquiteturas e análises. Para a espira única são ensaios com frequências individuais de 2,499 GHz e 4,997 GHz. Quando ensaiadas as demais arquiteturas de captação e transdução, aplicam-se espectros com frequências simultâneas. Avaliam-se um espectro de 2,0 a 3,0 GHz e outro de 2,0 a 5,4 GHz. Assim, durante o período de emissão das ondas ($1 \cdot 10^{-9}$ s) é possível que dois ciclos do maior comprimento de onda (2,0 GHz) sejam irradiados, para garantir uma resposta à incidência de ondas cíclicas. O valor de 3,0 GHz surge como espelhamento de frequência, pois a primeira espira elétrica terá dimensões correspondentes à frequência de 2,5 GHz; logo 2,0 GHz está 0,5 GHz abaixo e 3,0 GHz é 0,5 GHz acima. Quanto a 5,4 GHz, é um valor arbitrado por não ser múltiplo inteiro das frequências anteriores e estar entre o dobro de 2,5 GHz e 3,0 GHz, levando à condição de generalidade das ondas incidentes na arquitetura durante a simulação.

Ao término de cada simulação computacional são obtidas as curvas de tensão e corrente elétricas na impedância ($1,0 \Omega$) de verificação.

3.4 DEFINIÇÕES PARA SIMULAÇÕES NO SIMULINK

A estrutura Simulink do *software* Matlab R2024b será usada na simulação de circuito elétrico. A Figura 11 apresentou uma sugestão de circuito elétrico para uso conjunto às arquiteturas transdutoras.

Representando a arquitetura de captação e transformação da energia do campo magnético de OEM em elétrica, utilizam-se cinco fontes de alimentação alternadas, com as seguintes frequências: 1,0 GHz, 2,0 GHz, 3,0 GHz, 4,0 GHz e 5,0 GHz. Suas magnitudes de tensão são iguais: $1,0 \cdot 10^{-3}$ V. Valor arbitrado considerando que a energia de cada onda eletromagnética é pequena.

Para o bloco de ajuste 3 da Figura 11 aplica-se um capacitor. Sua capacitância tem valor de $1,0 \cdot 10^{-6}$ F ($1,0 \mu\text{F}$) para uma primeira simulação e $1,0 \cdot 10^{-14}$ F na segunda.

O sinal elétrico após o capacitor deve ser elevado por um transformador, cuja relação de elevação é 1:20, para observar a funcionalidade do dispositivo sob as frequências impostas. Essa relação é estipulada para facilitar a observação das curvas de tensão elétrica nos lados primário e secundário num mesmo gráfico, destacando o sinal de saída, mas considerando a proporção construtiva desse transformador.

Utiliza-se osciloscópios para mensurar as curvas de tensões elétricas em três pontos do circuito elétrico: sobre uma das fontes de alimentação e nos lados primário e secundário do transformador elétrico.

A duração de cada simulação computacional é $2,5 \cdot 10^{-9}$ segundos. Isso corresponde a 2,5 ciclos do maior comprimento de onda dentre as fontes de alimentação alternadas envolvidas. E, por consequência, do sinal resultante.

Após o encerramento de cada execução de simulação, obtém-se os gráficos das tensões elétricas relativas aos pontos de interesse.

3.5 MONTAGEM DE PROTÓTIPO E TESTES EM BANCADA

O teste em bancada consiste em um sistema para prova do conceito elementar da interação entre o campo magnético de onda eletromagnética e espira de material elétrico.

No protótipo básico, uma espira quadrada feita com fio de cobre é conectada ao enrolamento primário de um transformador elétrico elevador de tensão. Uma antena emite onda eletromagnética que atinge esse conjunto. Essa antena não possui conexão elétrica com a espira e o transformador.

A antena é conectada em equipamento gerador de sinal elétrico senoidal. E um osciloscópio é ligado no secundário do transformador. A espira elétrica do protótipo deve estar afastada da antena e cabos elétricos dos equipamentos, para evitar que haja interação com campo magnético próximo.

Inicialmente se analisa o sinal no osciloscópio sem irradiação da antena. Depois observa-se com a antena emitindo ondas eletromagnéticas.

Um ensaio é efetuado com equipamento gerador de sinais produzindo frequência com comprimento de onda igual ao dobro da medida do lado interno da espira elétrica, ou seja, uma das fases dessa onda tem o mesmo tamanho que a largura interna da espira quadrada.

Posteriormente testa-se com frequência que tenha o comprimento de onda igual a medida do lado interno da espira. Logo, dois semiciclos cabem dentro da espira elétrica no segundo ensaio.

O objetivo dos testes de bancada é verificar a existência ou não de interação entre o campo magnético da onda eletromagnética e uma espira elétrica no ambiente

real. Pois a funcionalidade da arquitetura é baseada na existência desta interação. O surgimento de tensão elétrica no circuito de testes durante a irradiação de onda eletromagnética pela antena valida a influência.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta e discute as modelagens, simulações e testes em bancada.

4.1 MODELAGEM DAS ARQUITETURAS DO SISTEMA

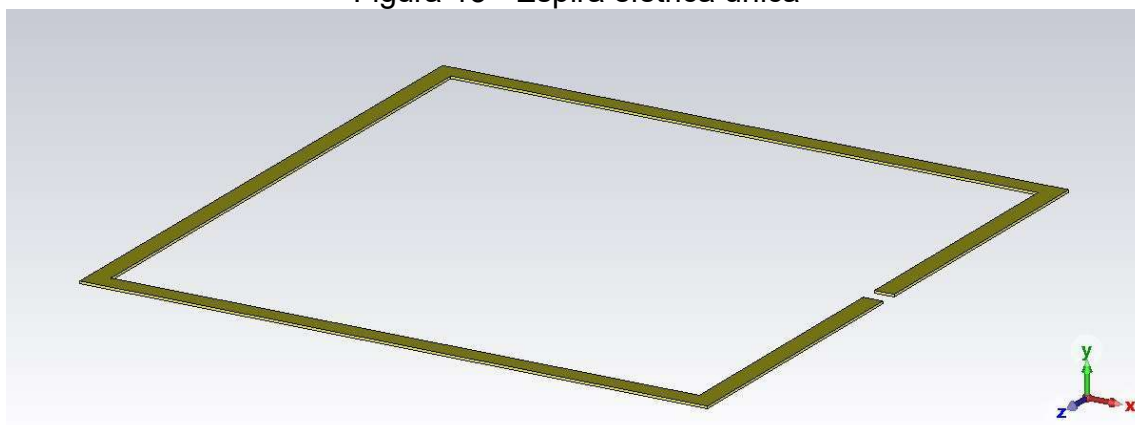
4.1.1 Modelagem das espiras e arquiteturas

Foram modeladas em *software* quatro modelos de arquiteturas com espiras elétricas: 1. espira elétrica única, 2. pirâmide de espiras quadradas paralelas, 3. pirâmide de espiras quadradas conectadas eletricamente em série e 4. espiral plano.

A. Espira elétrica única

Iniciou-se pela modelagem da espira elétrica única, inserindo uma placa de cobre, quadrada e plana, com lados medindo $6,4 \cdot 10^{-2}$ metros, centralizada na origem dos eixos x e y . Sua espessura estava no eixo z ; iniciando em 0 e atingindo $2,5 \cdot 10^{-4}$ metros. Nela foi recortado um quadrado interno com lados de $6,0 \cdot 10^{-2}$ metros. Resultando numa espira quadrada com $2,0 \cdot 10^{-3}$ metros de largura condutora. Seu lado externo ficou com comprimento de $6,4 \cdot 10^{-2}$ metros e o interno $6,0 \cdot 10^{-2}$ metros. A área interna será chamada de janela. Uma fenda de $2,0 \cdot 10^{-3}$ metros foi efetuada no meio de um dos lados da espira quadrada, entre os lados externo e interno. Desta forma obteve-se a espira elétrica ilustrada na Figura 13.

Figura 13 - Espira elétrica única



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

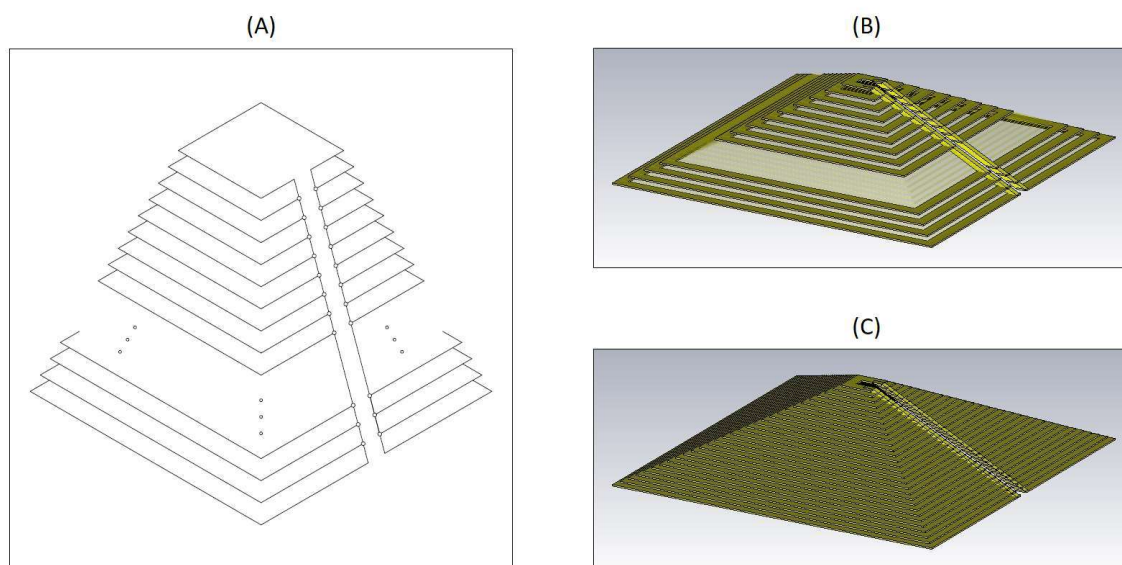
O ar foi o ambiente onde se situou a espira de cobre. E também foi utilizado como preenchimento de sua janela e fenda.

A maior dimensão da espira elétrica única também foi a aplicada nas outras arquiteturas. Portanto esse valor foi arbitrado de maneira que fosse possível conciliar as modelagens das estruturas e os espectros de frequências a serem simulados, perante as limitações impostas pela versão do *software* de simulação computacional.

B. Pirâmide de espiras quadradas paralelas

O procedimento para confecção das espiras utilizadas na pirâmide foi similar ao descrito em A. *Espira elétrica única*. Porém os lados de cada espira subsequente foram modelados $2,0 \cdot 10^{-3}$ metros menores. E elas foram empilhadas em formato piramidal, espaçadas verticalmente em $2,5 \cdot 10^{-4}$ metros; equivalente à altura de uma espira. Essa sobreposição começou no plano xz e seguiu no sentido positivo de y. A Figura 14 apresenta a pirâmide conceitual da Figura 7 e a sua modelagem no *software*.

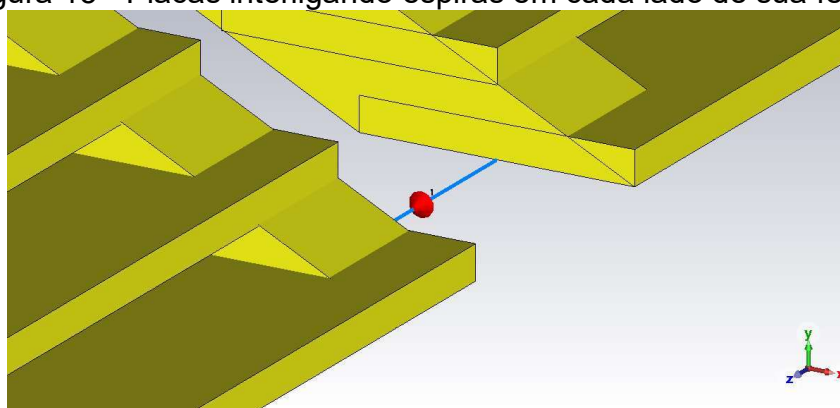
Figura 14 - Pirâmides de espiras quadradas. (A) Concepção da pirâmide de espiras quadradas. (B) Estrutura elaborada, com destaque para algumas de suas partes, para correlação de imagem com (A). (C) Estrutura elaborada



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Após o empilhamento, as espiras foram interligadas por duas placas de cobre nas extremidades laterais das fendas, que pode ser visualizado destacado na Figura 14 (B). Também são visíveis na Figura 15, que apresenta uma aproximação na região de fenda.

Figura 15 - Placas interligando espiras em cada lado de sua fenda

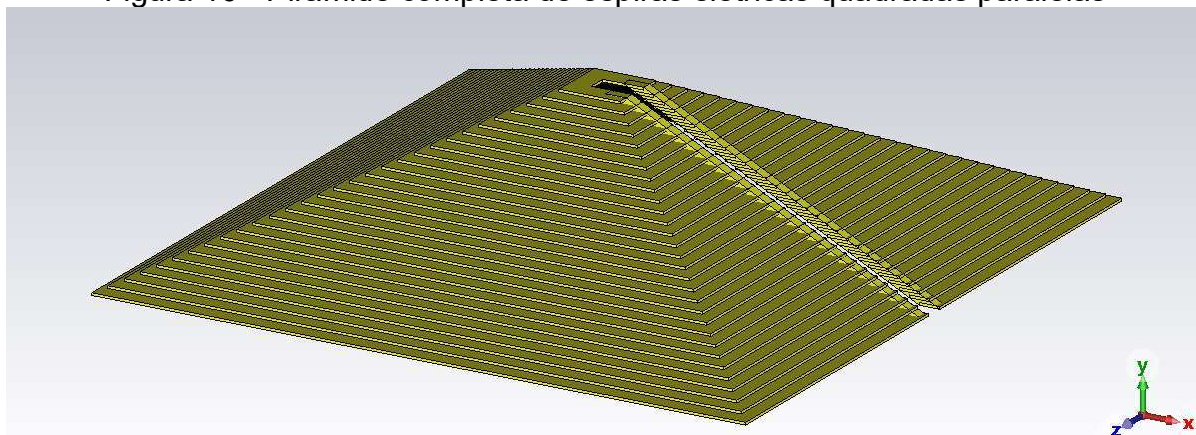


Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

A pirâmide de espiras paralelas foi modelada de dois tipos. Um contendo 30 espiras e outro com 24. Essa segunda modelagem ocorreu para permitir comparação com a próxima arquitetura, a de espiras conectadas eletricamente em série, cuja limitação na versão do *software* impediu de atingir a altura da pirâmide completa, de

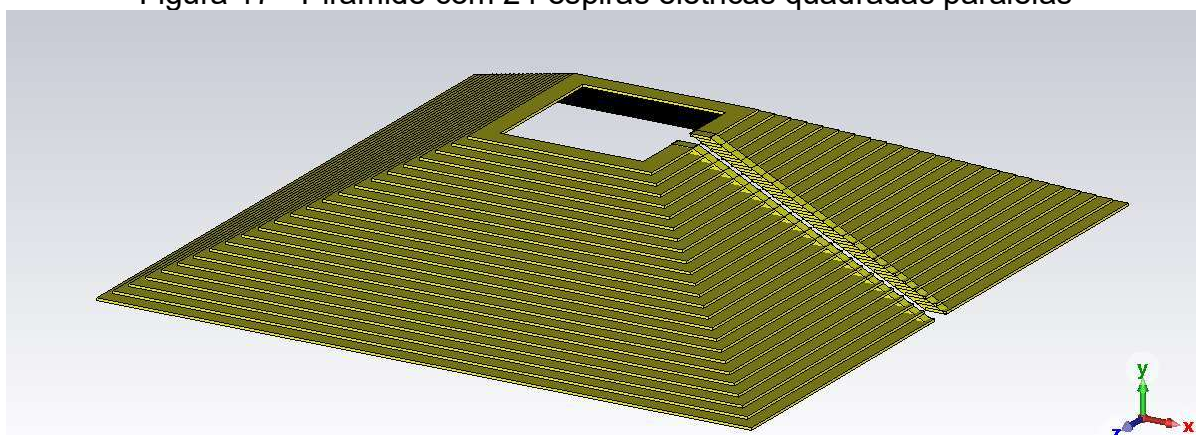
30 espiras elétricas. Portanto foram eliminadas as seis espiras mais próximas ao topo da estrutura. As pirâmides de espiras paralelas são exibidas nas Figuras 16 e 17.

Figura 16 - Pirâmide completa de espiras elétricas quadradas paralelas



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Figura 17 - Pirâmide com 24 espiras elétricas quadradas paralelas



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

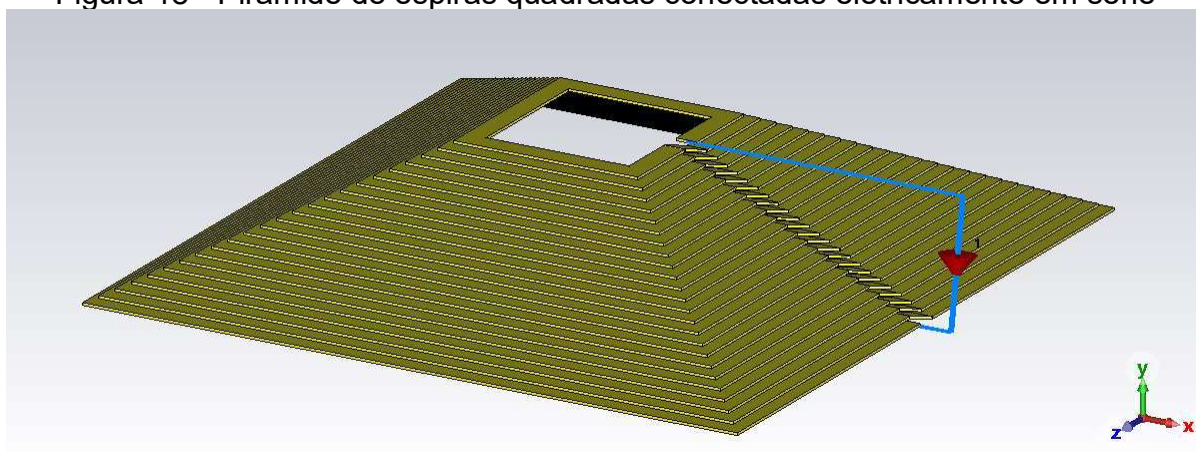
Para aproximar o ponto médio de altura da arquitetura modelada com a origem dos eixos cartesianos, sem que essa intersecção coincidissem com uma das espiras, toda a pirâmide foi deslocada $7,375 \cdot 10^{-1}$ m no sentido negativo do eixo y. Esse valor surgiu da quantidade do total inicial de 30 espiras. Então o centro da pirâmide completa ficou próximo da origem dos eixos x, y e z.

Conforme adiantado, a arquitetura transdutora seguinte é a pirâmide de espiras quadradas conectadas eletricamente em série.

C. Pirâmide de espiras quadradas conectadas eletricamente em série

A construção da pirâmide de espiras quadradas conectadas eletricamente em série foi semelhante à arquitetura de 24 espiras de *B. Pirâmide de espiras quadradas paralelas*. Sua principal diferença está nas conexões das espiras. Invés de estarem ligadas paralelamente, cada espira foi conectada em série com sua subsequente. Outra distinção está na conexão da impedância de medições elétricas e fechamento da espira resultante, pois um dos pontos de interligação é na base e outro no topo. Resultando na arquitetura exibida na Figura 18.

Figura 18 - Pirâmide de espiras quadradas conectadas eletricamente em série

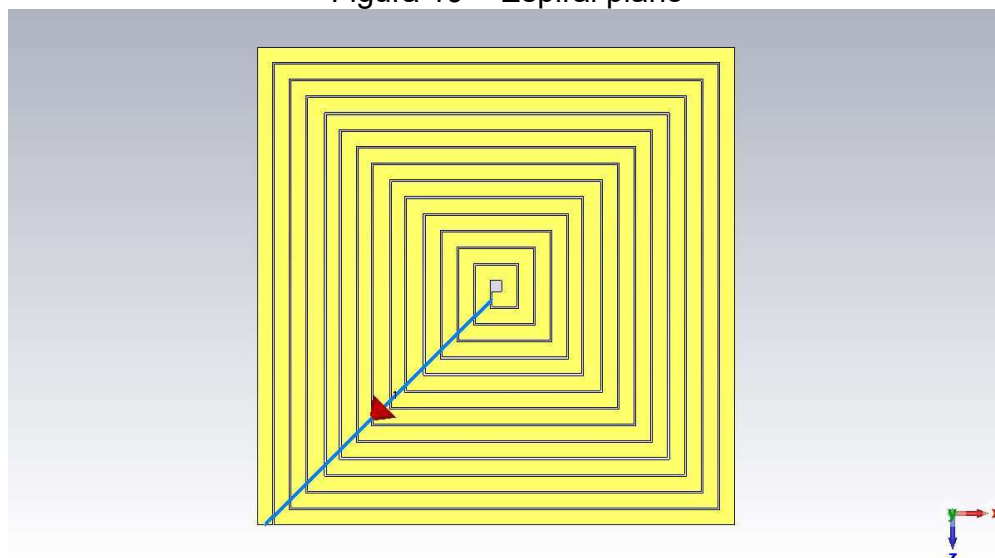


Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

D. Espiral plano

Um espiral plano e quadrado foi construído a partir de uma placa de cobre medindo $6,4 \cdot 10^{-2} \times 6,4 \cdot 10^{-2}$ m, com $2,5 \cdot 10^{-4}$ metros de espessura, paralela ao plano formado pelos eixos x e z . Nessa placa foi efetuado recorte em formato de trilha espiral ortogonal, medindo $2,5 \cdot 10^{-4}$ m de largura. Ficando o caminho condutor resultante com largura de $2,0 \cdot 10^{-4}$ m. Uma impedância foi inserida entre os terminais da espiral para medições elétricas e seu fechamento. A arquitetura resultante está ilustrada na Figura 19.

Figura 19 – Espiral plano



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

4.1.2 Modelagem dos circuitos elétricos

Um circuito elétrico foi proposto em 3.2 *Arquiteturas* e ilustrado na Figura 11, para uso em conjunto com a arquitetura de geração de energia elétrica. Para simulações desse circuito foi utilizada a estrutura Simulink do *software* Matlab R2024b.

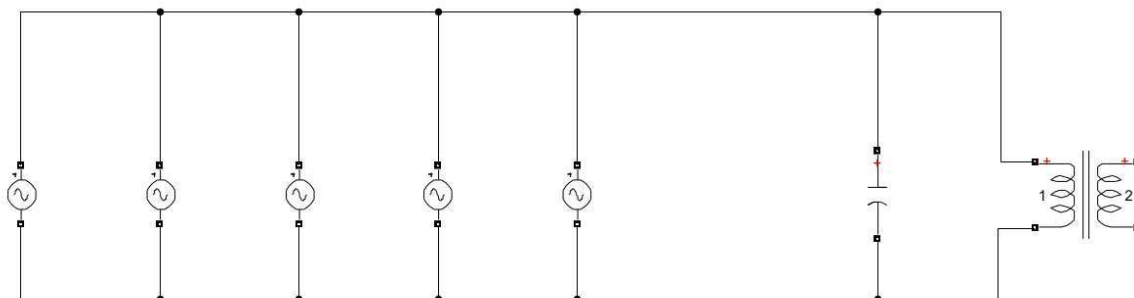
A modelagem inicial contou com cinco fontes de alimentações elétricas alternadas ligadas paralelamente. Cada fonte com uma frequência diferente das demais. Sendo elas: 1,0 GHz, 2,0 GHz, 3,0 GHz, 4,0 GHz e 5,0 GHz. Enquanto a magnitude de tensão foi $1,0 \cdot 10^{-3}$ V para todas. Isso para simular um pequeno espectro de frequências e observar a interação dos sinais.

Substituiu-se o elemento 3 da Figura 11 por um capacitor com capacitância arbitrada em $1,0 \mu\text{F}$.

O transformador elétrico conectado no circuito teve relação de transformação parametrizada como 1:20, permitindo elevar vinte vezes a tensão elétrica alternada de entrada.

Na Figura 20 é mostrado o circuito elétrico da modelagem inicial.

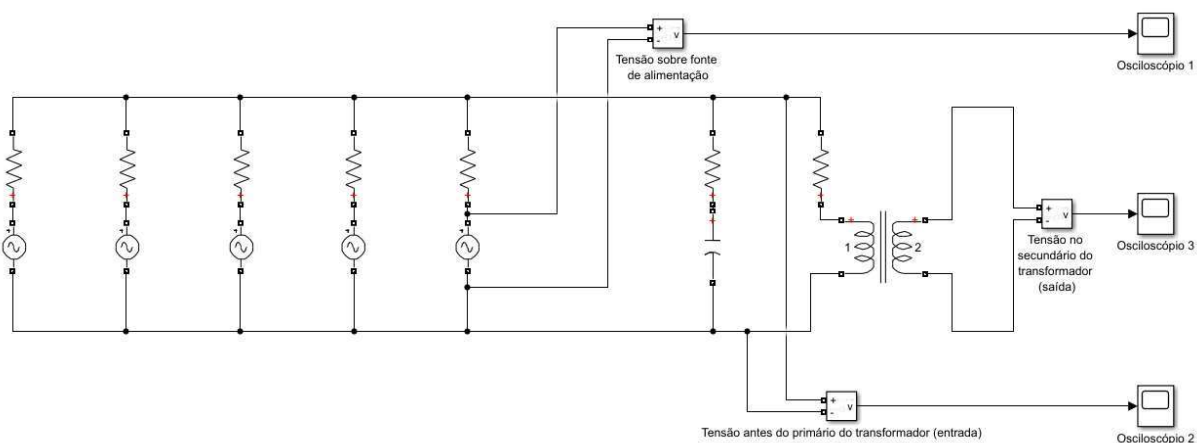
Figura 20 - Circuito elétrico associando fontes elétricas alternadas com frequências diferentes entre si



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Devido a restrições de simulação impostas pelo *software*, as fontes de alimentação não podem ser conectadas diretamente entre si, sem carga. Isso foi contornado colocando um resistor de $1,0 \Omega$ em série com cada fonte. Para manter a relação, cada ramo paralelo no lado primário do transformador também recebeu um resistor de $1,0 \Omega$, resultando no circuito elétrico mostrado na Figura 21. A saber, o valor de resistência foi arbitrado em $1,0 \Omega$ por ser (número) unitário.

Figura 21 - Circuito elétrico elaborado no ambiente de simulação computacional, contendo dispositivos e equipamentos de medição



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Os osciloscópios foram inseridos no ambiente de simulação para obtenção das curvas de tensões elétricas em pontos específicos do circuito. Para mostrar curvas distintas num mesmo gráfico, em determinados momentos foram utilizados mais de um canal nos osciloscópios que fariam as exibições simultâneas.

4.1.3 Modelagem do sistema

A união dos elementos em um sistema único foi modelada no *software* CST Studio Suite 2024. Para tal, um dispositivo denominado *Lumped Network Element*, representando associação paralela de resistor, capacitor e indutor foi inserido entre os terminais para fornecimento de energia da arquitetura piramidal com 30 espiras quadradas paralelas. Nesse dispositivo o indutor representa o enrolamento primário do transformador de energia elétrica. Sua indutância foi de $1,2732 \cdot 10^{-16}$ H. A resistência esteve parametrizada como $1,0 \Omega$. E o capacitor tinha capacitância de $1,0 \mu\text{F}$.

4.2 SIMULAÇÕES NO SOFTWARE CST STUDIO SUITE 2024

As simulações foram executadas conforme estipulado em 3.3 *DEFINIÇÕES PARA SIMULAÇÕES NO SOFTWARE CST STUDIO SUITE*, para as estruturas modeladas em 4.1.1 *Modelagens das espiras e arquiteturas*.

O elemento desse *software* que representou a impedância de $1,0 \Omega$, onde foram medidas as tensões e correntes elétricas, foi o *Discrete port*, que nos gráficos é representado por *Port wave*. Nas imagens ele parece um cone de cor avermelhada com terminais azuis e pode ser visto nas Figuras 15, 18 e 19.

4.2.1 Espira elétrica única

O *software* utiliza entradas de frequências mínima e máxima, que delimitam o espectro utilizado na simulação. Há nele uma definição do passo entre frequências; ou seja, o intervalo entre duas sucessivas. Esse passo pode ser automático ou definido pelo usuário.

As simulações computacionais da espira elétrica única deveriam ser com frequências específicas. Para isso se determinaram os espectros 2,499 a 2,4991 GHz e 4,997 a 4,9971 GHz, utilizados em simulações distintas. E com passos de frequências de $1,0 \cdot 10^9$ Hz. Dessa forma, apesar de determinado um espectro em cada ensaio, a espira foi submetida a apenas uma frequência, porque as próximas frequências ficaram além das frequências máximas.

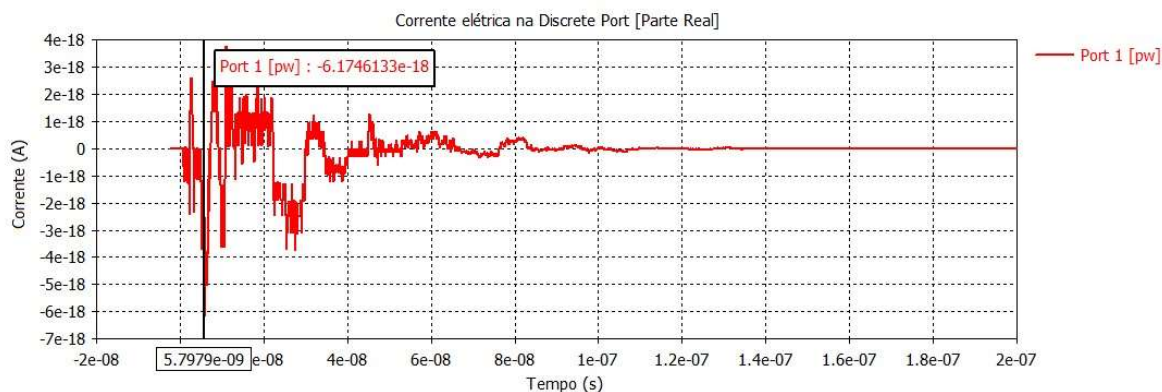
Para a circunstância em que apenas uma fase transpassa a espira, frequência de 2,499 GHz, foram obtidas as curvas de tensão e corrente elétricas exibidas nas Figuras 22 e 23, cujos respectivos picos foram de $6,17461 \cdot 10^{-18}$ V e $-6,17461 \cdot 10^{-18}$ A. Valores praticamente nulos, mas esperados, por se tratar de uma única onda e pela definição conservadora da magnitude de campo dessa onda ($1,0 \cdot 10^{-3}$ V/m¹). Sendo que o objetivo da simulação é a comparação com a segunda circunstância.

Figura 22 - Curva de tensão elétrica para frequência de 2,499 GHz e espira elétrica única. *Port 1* é nome do ponto de medição. *pw* é indicação de Port wave



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Figura 23 - Curva de corrente elétrica para frequência de 2,499 GHz e espira elétrica única. *Port 1* é nome do ponto de medição. *pw* é indicação de Port wave



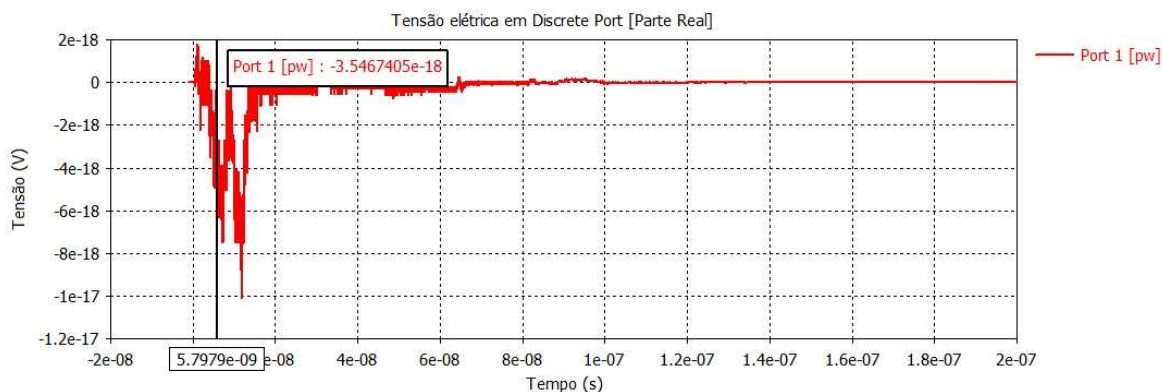
Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Na segunda situação, onde um semiciclo positivo e um negativo atravessam a espira, frequência de 4,997 GHz, obtiveram-se as curvas de tensão e corrente elétricas exibidas nas Figuras 24 e 25, cujos respectivos picos foram de

¹O software utiliza parametrização do campo elétrico da onda eletromagnética. Por isso o valor inserido foi em V/m.

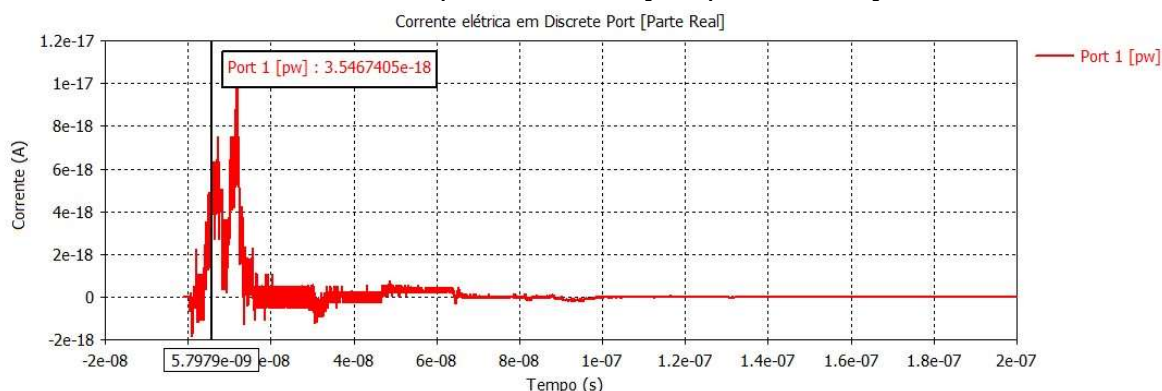
$-3,54674 \cdot 10^{-18}$ V e $3,54674 \cdot 10^{-18}$ A. Valores pouco acima da metade daqueles obtidos na primeira circunstância.

Figura 24 - Curva de tensão elétrica para frequência de 4,997 GHz e espira elétrica única. *Port 1* é nome do ponto de medição. *pw* é indicação de Port wave



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Figura 25 - Curva de corrente elétrica para frequência de 4,997 GHz e espira elétrica única. *Port 1* é nome do ponto de medição. *pw* é indicação de Port wave



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Prosseguindo nas análises, passou-se à abordagem dos modelos de arquiteturas propostos para utilização em espectros de frequências. Para essas simulações, os intervalos entre frequências foram estipulados automaticamente pelo *software*, dividindo cada espectro em 5001 amostras.

4.2.2 Pirâmide de espiras quadradas paralelas

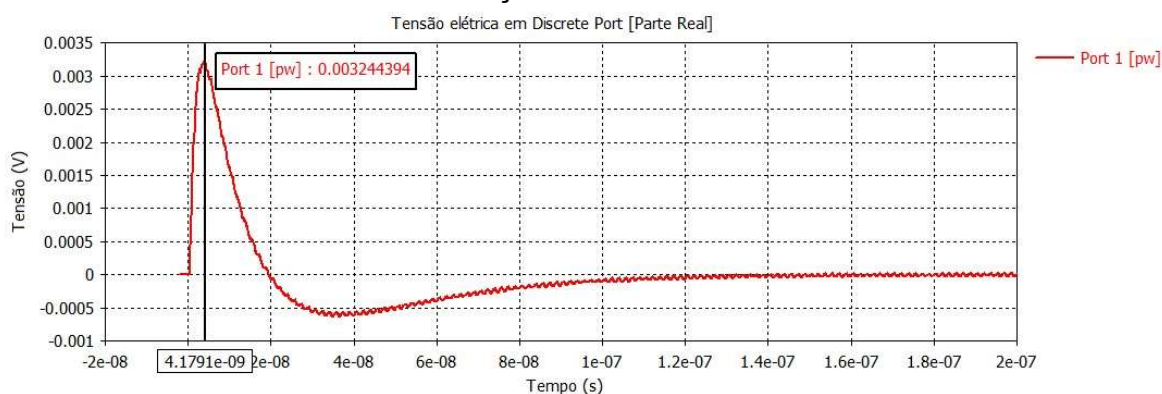
A Figura 17 mostrou a pirâmide de 24 espiras elétricas quadradas conectadas eletricamente em paralelo. O modelo concebido originalmente possuía 30 espiras, mas foi reduzido a 24, conforme explicado em 4.1.1 *Modelagem das espiras e*

arquiteturas, B. Pirâmides de espiras quadradas paralelas. Em momento posterior às outras estruturas, serão exibidos os resultados da arquitetura de transdução com as 30 espiras elétricas.

Para a arquitetura piramidal contendo 24 espiras, no espectro de frequências de 2,0 a 3,0 GHz, foram obtidos os picos de tensão e corrente de $3,24439 \cdot 10^{-3}$ V e $-3,24439 \cdot 10^{-3}$ A. Suas curvas constam nas Figuras 26 a 29.

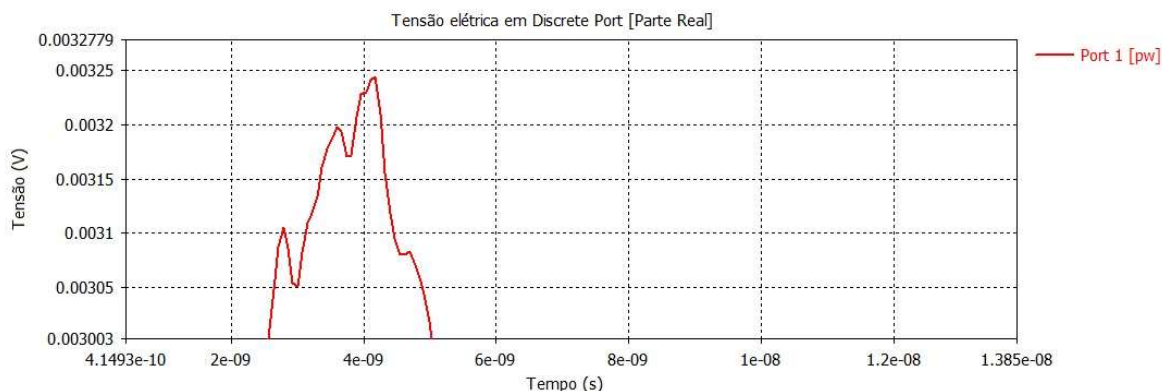
Nessa simulação a potência calculada foi de $1,00347 \cdot 10^{-5}$ W. Os dados utilizados constam na Tabela 1 do Apêndice A.

Figura 26 - Curva de tensão elétrica para frequências de 2,0 a 3,0 GHz e pirâmide de 24 espiras quadradas paralelas. *Port 1* é nome do ponto de medição. *pw* é indicação de Port wave



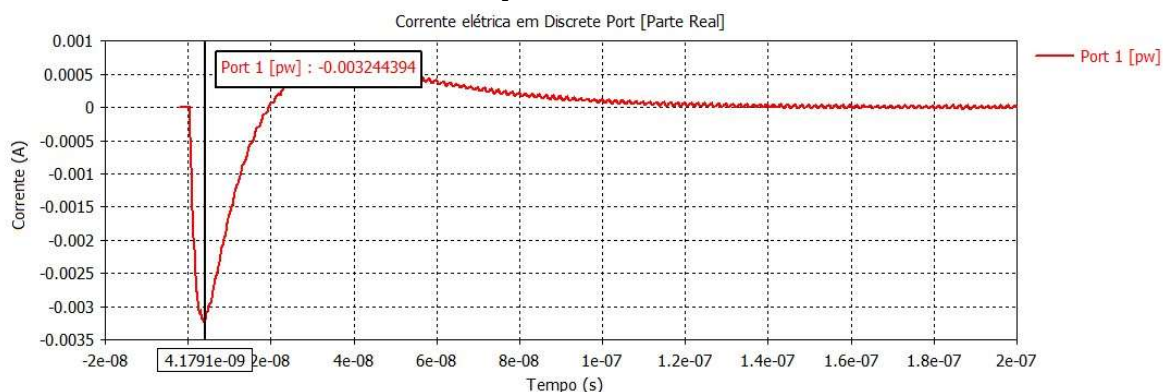
Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Figura 27 - Pico da curva de tensão elétrica para frequências de 2,0 a 3,0 GHz e pirâmide de 24 espiras quadradas paralelas. *Port 1* é nome do ponto de medição. *pw* é indicação de Port wave



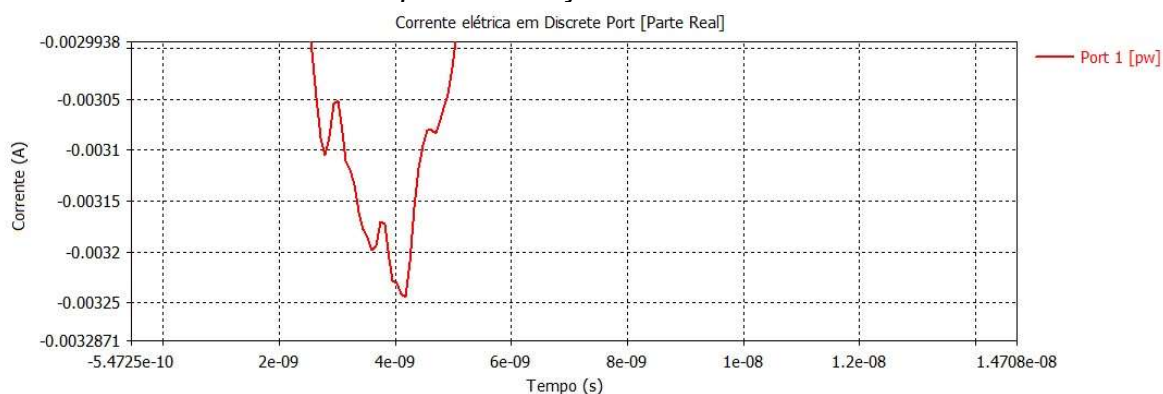
Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Figura 28 - Curva de corrente elétrica para frequências de 2,0 a 3,0 GHz e pirâmide de 24 espiras quadradas paralelas. *Port 1* é nome do ponto de medição. *pw* é indicação de Port wave



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Figura 29 - Pico da curva de corrente elétrica para frequências de 2,0 a 3,0 GHz e pirâmide de 24 espiras quadradas paralelas. *Port 1* é nome do ponto de medição. *pw* é indicação de Port wave

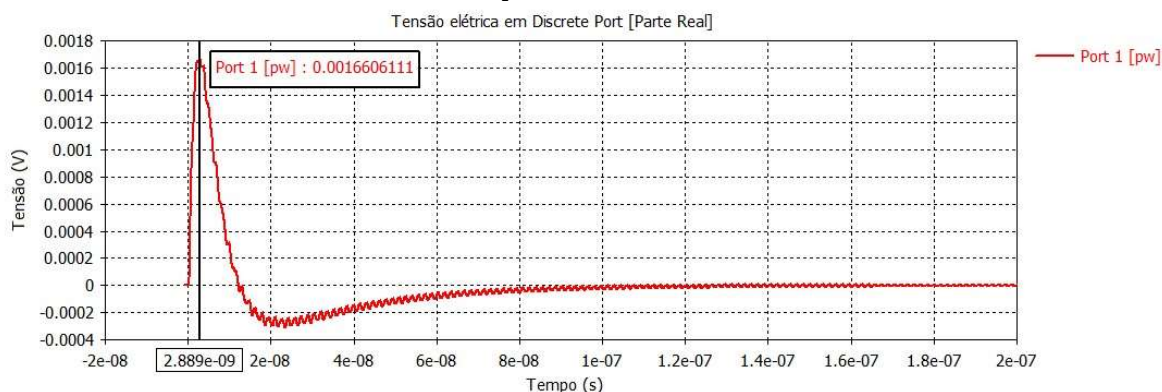


Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Ao submeter essa arquitetura ao espectro de frequências de 2,0 a 5,4 GHz, obtiveram-se os picos de tensão e corrente de $1,66061 \cdot 10^{-3}$ V e $-1,66061 \cdot 10^{-3}$ A. Suas curvas são mostradas nas Figuras 30 a 33.

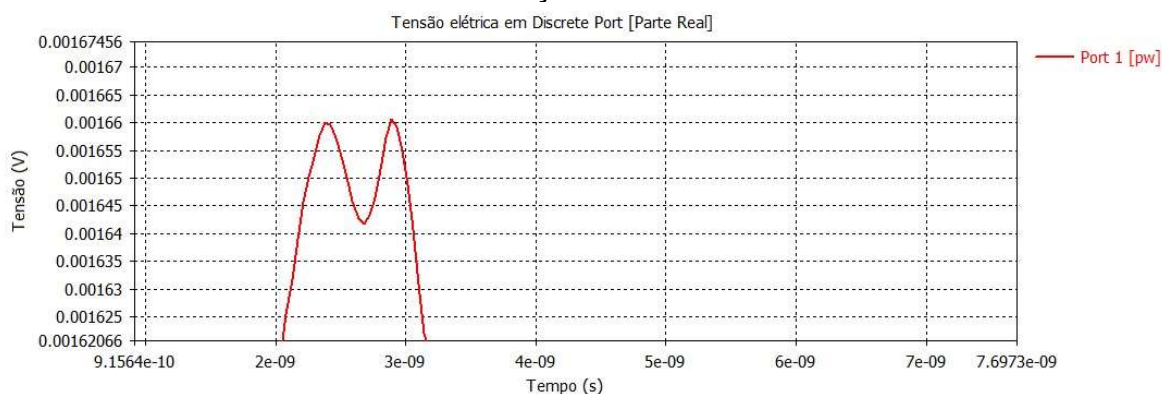
Para esse espectro, a potência calculada foi de $2,67587 \cdot 10^{-6}$ W. Os dados utilizados constam na Tabela 2 do Apêndice A.

Figura 30 - Curva de tensão elétrica para frequências de 2,0 a 5,4 GHz e pirâmide de 24 espiras quadradas paralelas. *Port 1* é nome do ponto de medição. *pw* é indicação de Port wave



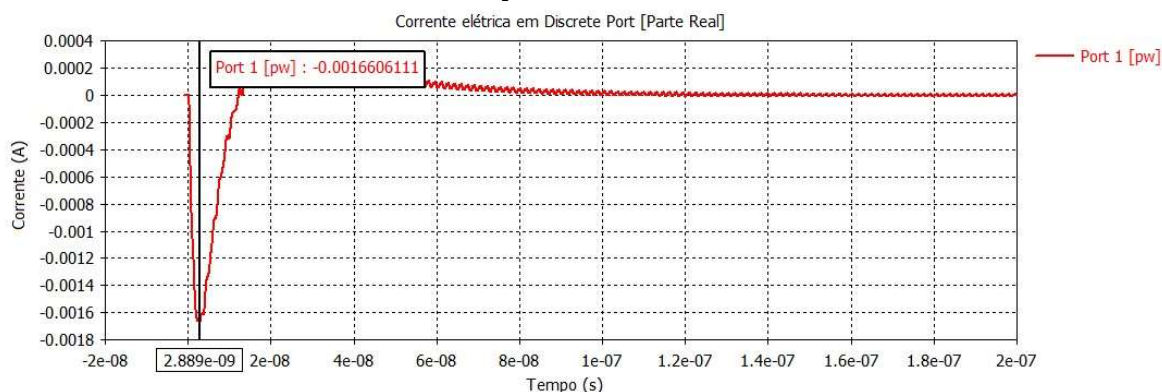
Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Figura 31 - Pico da curva de tensão elétrica para frequências de 2,0 a 5,4 GHz e pirâmide de 24 espiras quadradas paralelas. *Port 1* é nome do ponto de medição. *pw* é indicação de Port wave



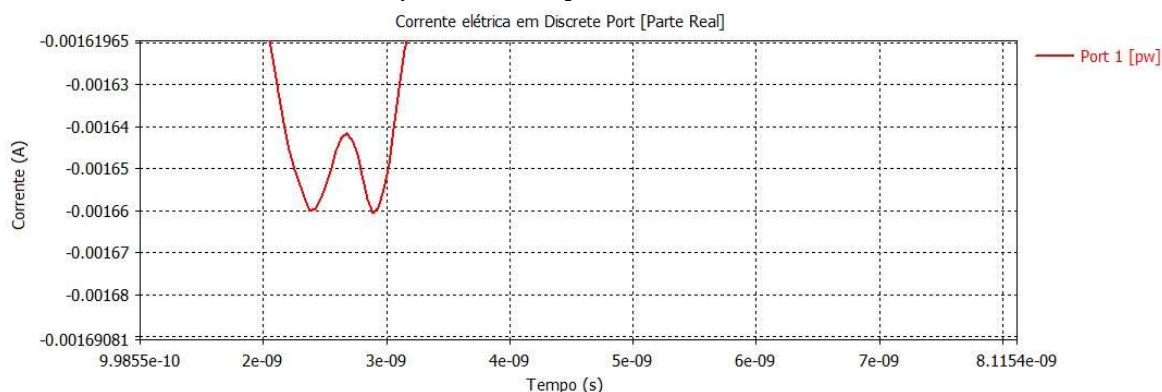
Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Figura 32 - Curva de corrente elétrica para frequências de 2,0 a 5,4 GHz e pirâmide de 24 espiras quadradas paralelas. *Port 1* é nome do ponto de medição. *pw* é indicação de Port wave



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Figura 33 - Pico da curva de corrente elétrica para frequências de 2,0 a 5,4 GHz e pirâmide de 24 espiras quadradas paralelas. *Port 1* é nome do ponto de medição. *pw* é indicação de Port wave



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Nota-se que os valores de tensões, e correspondentes de correntes, foram maiores para o espectro de 2,0 a 3,0 GHz que 2,0 a 5,4 GHz. Isso porque a primeira espira da base foi construída para o comprimento de onda de 2,5 GHz, fazendo com que o primeiro espectro oferecesse maior constância de cada semiciclo dessas ondas sobre a pirâmide de espiras; já que a menor frequência que tinha uma fase toda comportada dentro de uma das espiras estava no meio do espectro (2,0 a 3,0 GHz). Ou seja, as contribuições construtivas duravam mais.

4.2.3 Pirâmide de espiras quadradas conectadas eletricamente em série

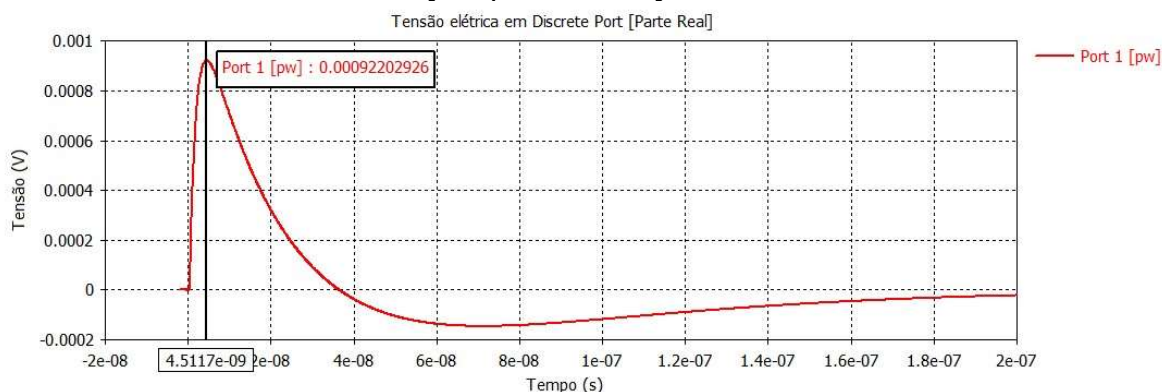
Percebeu-se através da regra da mão direita que os sentidos das correntes elétricas nas espiras da pirâmide eram iguais. Então foi simulada uma pirâmide de espiras quadradas ligadas eletricamente em série, onde cada espira foi conectada com sua subsequente.

A estrutura foi submetida aos espectros de 2,0 a 3,0 GHz e 2,0 a 5,4 GHz durante as simulações.

Para o primeiro grupo de frequências foram obtidos os picos de tensão e corrente de $9,22029 \cdot 10^{-4}$ V e $-9,22029 \cdot 10^{-4}$ A. As Figuras 34 a 37 exibem suas curvas.

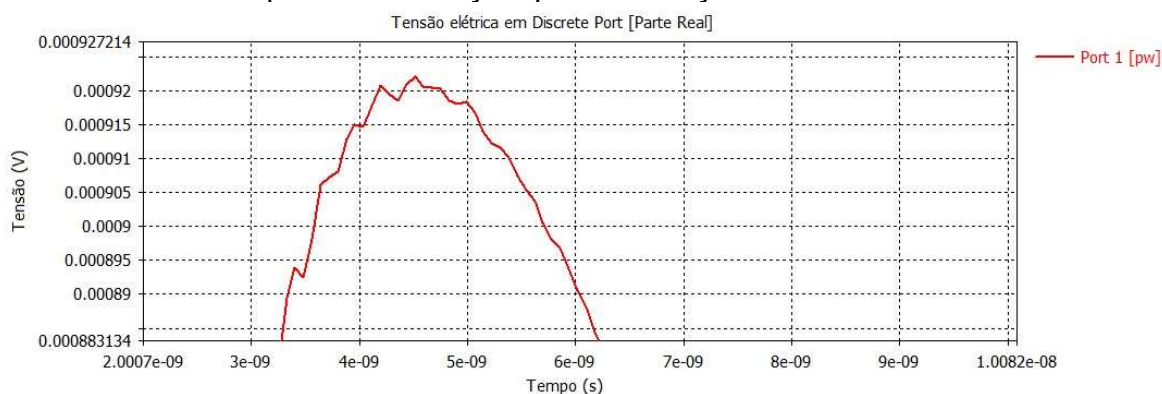
Nessa simulação a potência calculada foi de $8,46007 \cdot 10^{-7}$ W. Os dados utilizados constam na Tabela 3 do Apêndice A.

Figura 34 - Curva de tensão elétrica para frequências de 2,0 a 3,0 GHz e pirâmide de espiras quadradas conectadas eletricamente em série. *Port 1* é nome do ponto de medição. *pw* é indicação de Port wave



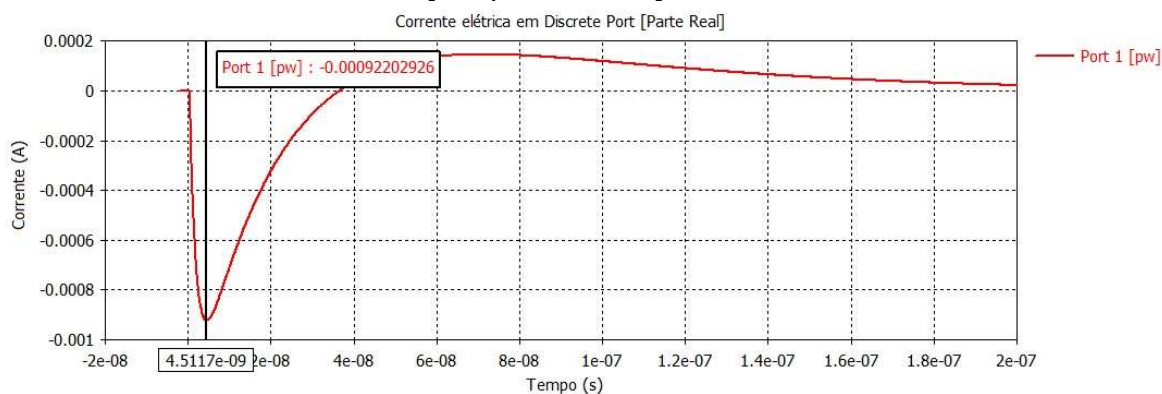
Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Figura 35 - Pico da curva de tensão elétrica para frequências de 2,0 a 3,0 GHz e pirâmide de espiras quadradas conectadas eletricamente em série. *Port 1* é nome do ponto de medição. *pw* é indicação de Port wave



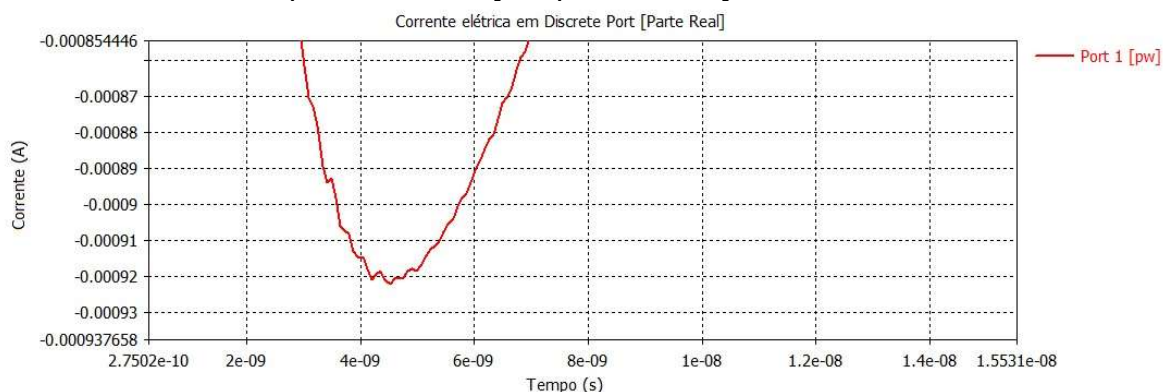
Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Figura 36 - Curva de corrente elétrica para frequências de 2,0 a 3,0 GHz e pirâmide de espiras quadradas conectadas eletricamente em série. *Port 1* é nome do ponto de medição. *pw* é indicação de Port wave



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Figura 37 - Pico da curva de corrente elétrica para frequências de 2,0 a 3,0 GHz e pirâmide de espiras quadradas conectadas eletricamente em série. *Port 1* é nome do ponto de medição. *pw* é indicação de Port wave

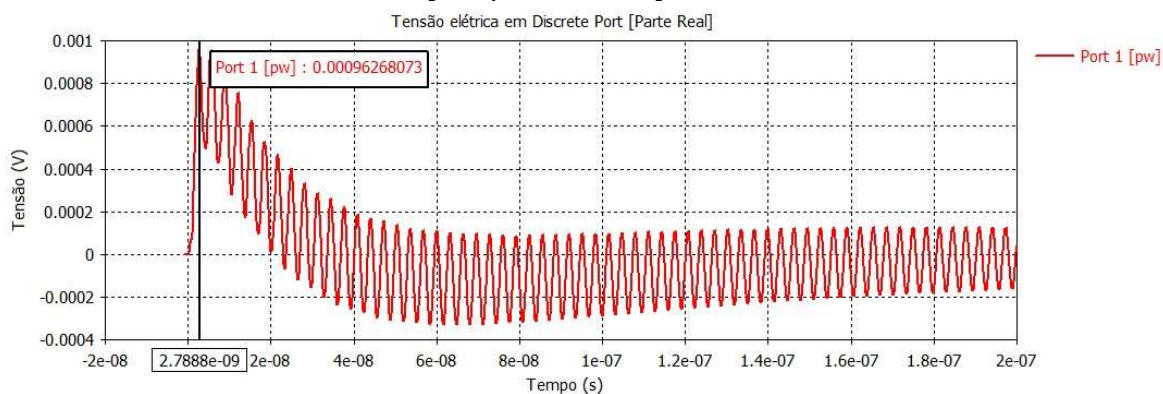


Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Uma segunda simulação foi efetuada, aplicando ondas planas com frequências no espectro de 2,0 a 5,4 GHz. Para esse ensaio a arquitetura transdutora forneceu as curvas de tensão e corrente elétricas mostradas nas Figuras 38 a 41, com picos de $9,62681 \cdot 10^{-4}$ V e $-9,62681 \cdot 10^{-4}$ A.

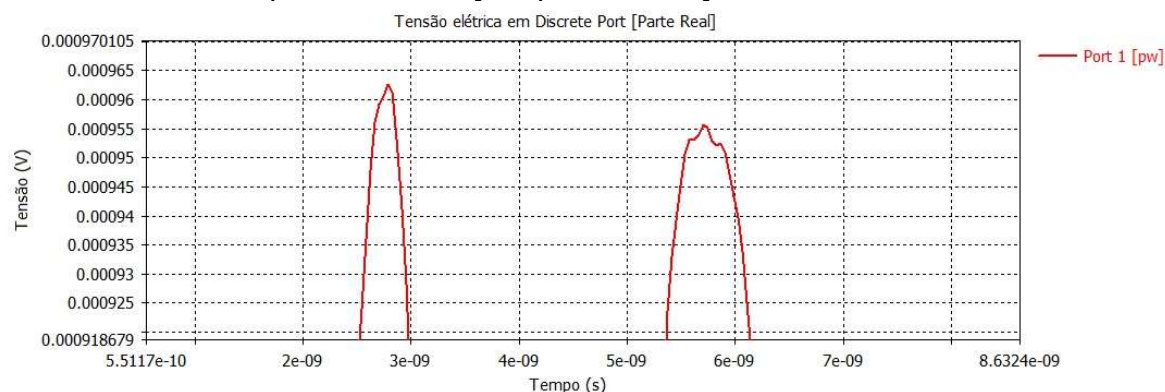
Para essa simulação a potência calculada foi de $7,99194 \cdot 10^{-7}$ W. Os dados utilizados constam na Tabela 4 do Apêndice A.

Figura 38 - Curva de tensão elétrica para frequências de 2,0 a 5,4 GHz e pirâmide de espiras quadradas conectadas eletricamente em série. *Port 1* é nome do ponto de medição. *pw* é indicação de Port wave



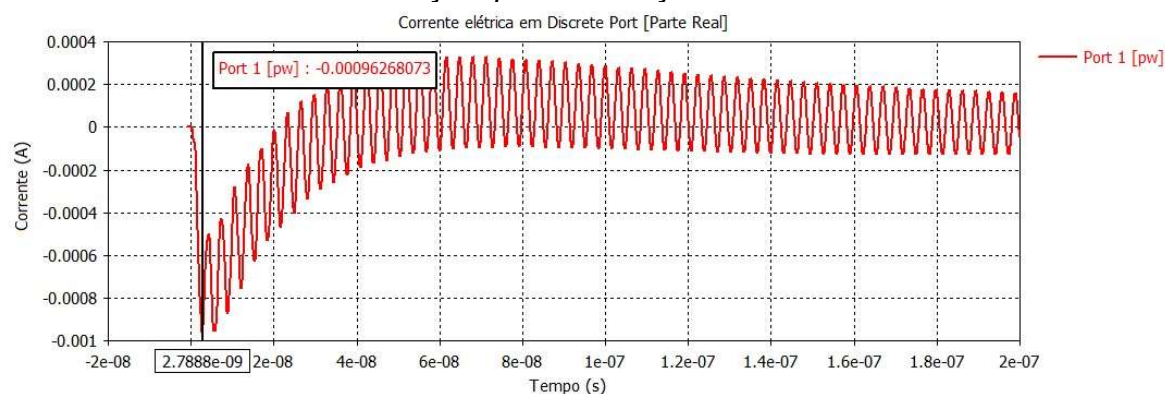
Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Figura 39 - Pico da curva de tensão elétrica para frequências de 2,0 a 5,4 GHz e pirâmide de espiras quadradas conectadas eletricamente em série. *Port 1* é nome do ponto de medição. *pw* é indicação de Port wave



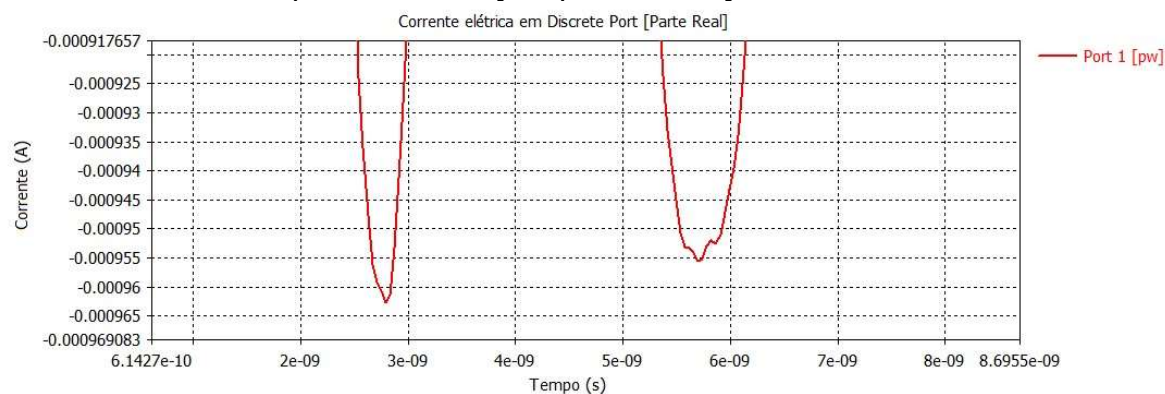
Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Figura 40 - Curva de corrente elétrica para frequências de 2,0 a 5,4 GHz e pirâmide de espiras quadradas conectadas eletricamente em série. *Port 1* é nome do ponto de medição. *pw* é indicação de Port wave



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Figura 41 - Pico da curva de corrente elétrica para frequências de 2,0 a 5,4 GHz e pirâmide de espiras quadradas conectadas eletricamente em série. *Port 1* é nome do ponto de medição. *pw* é indicação de Port wave



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Houve uma redução na tensão e corrente elétricas obtidas, em relação à pirâmide de espiras quadradas paralelas. Sugere-se que isso ocorreu por influência do campo elétrico, pois a sua interferência não se anula como ocorria nas espiras que estavam completamente em um mesmo plano. Enquanto parte do campo elétrico da onda eletromagnética está sobre uma espira, outra parcela interage com a espira subsequente e, apesar da arquitetura de transdução formar um elemento único, entre as duas extremidades ocorre diferença de intensidade e geração de tensão elétrica. A corrente produzida por essa tensão tenta impor corrente elétrica no sentido inverso daquela criada pelo campo magnético, resultando na redução da energia gerada por este último na arquitetura transdutora proposta.

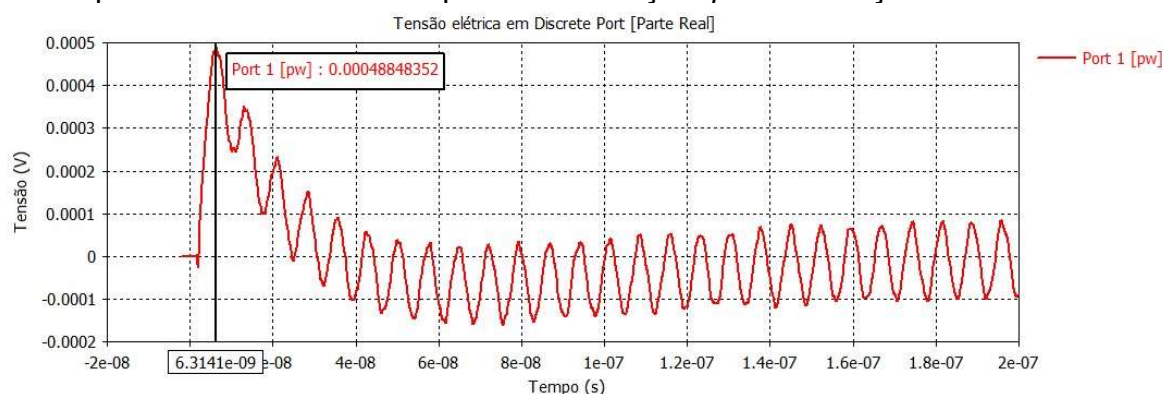
4.2.4 Espiral plano

Seguindo a observação de estruturas do tipo espiral quadrada contínua, realizaram-se simulações da estrutura denominada espiral plano.

Os resultados para essa arquitetura ficaram aquém das anteriores. Seus picos de tensão e corrente atingiram $4,88484 \cdot 10^{-4}$ V e $-4,88484 \cdot 10^{-4}$ A no espectro de 2,0 a 3,0 GHz. As curvas obtidas são mostradas nas Figuras 42 a 45.

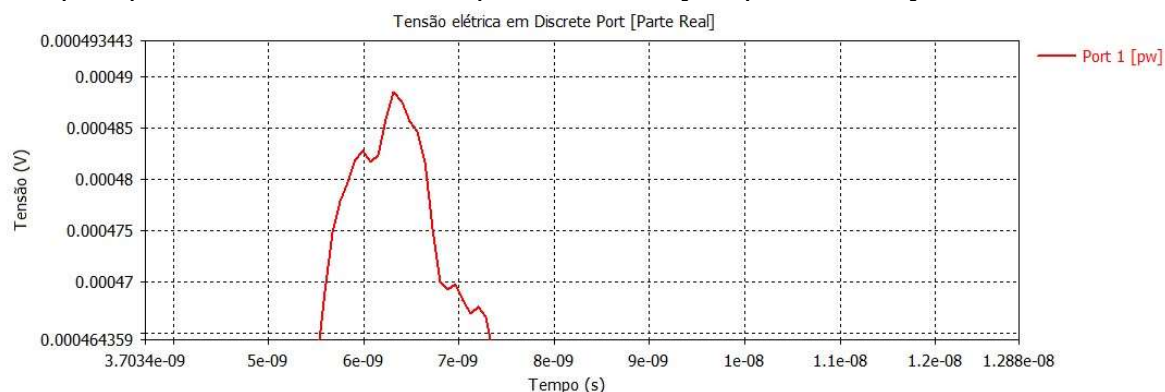
Para essa arquitetura e espectro de frequências a potência calculada foi de $2,31577 \cdot 10^{-7}$ W. Os dados utilizados constam na Tabela 5 do Apêndice A.

Figura 42 - Curva de tensão elétrica para frequências de 2,0 a 3,0 GHz e espiral plano. *Port 1* é nome do ponto de medição. *pw* é indicação de Port wave



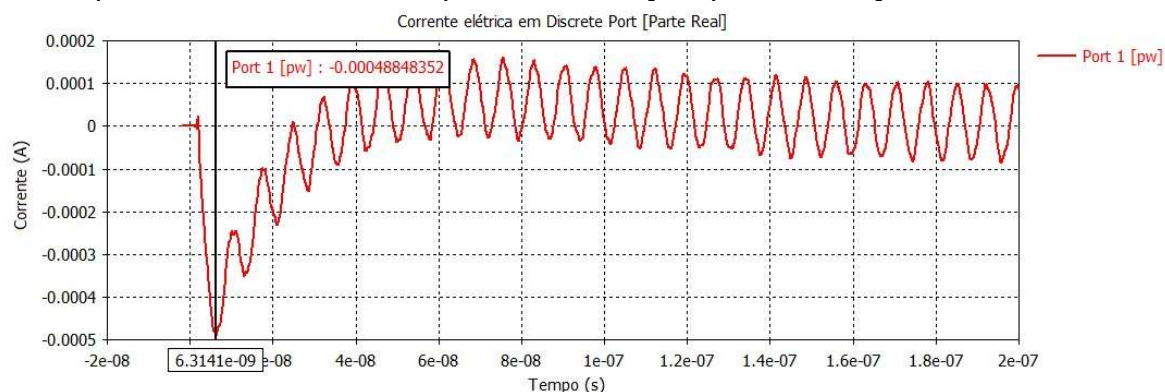
Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Figura 43 - Pico da curva de tensão elétrica para frequências de 2,0 a 3,0 GHz e espiral plano. *Port 1* é nome do ponto de medição. *pw* é indicação de Port wave



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Figura 44 - Curva de corrente elétrica para frequências de 2,0 a 3,0 GHz e espiral plano. *Port 1* é nome do ponto de medição. *pw* é indicação de Port wave



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Figura 45 - Pico da curva de corrente elétrica para frequências de 2,0 a 3,0 GHz e espiral plano. *Port 1* é nome do ponto de medição. *pw* é indicação de Port wave

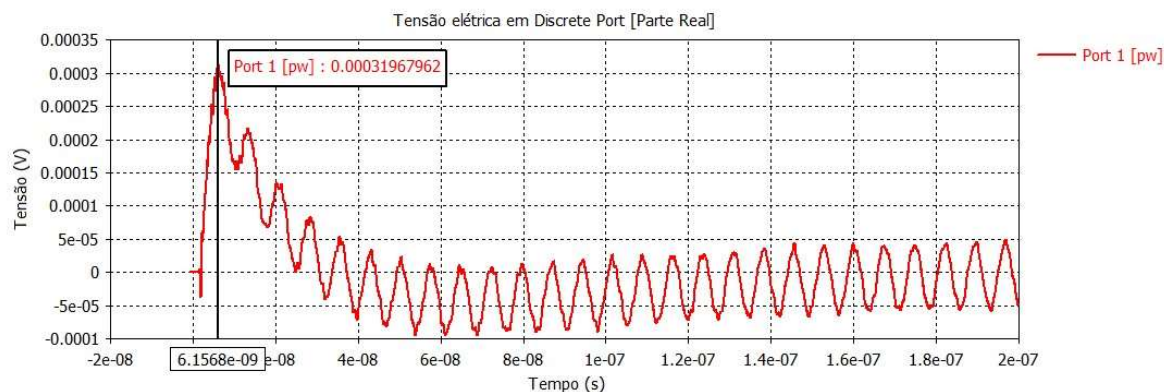


Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Também se executou ensaio para o espectro de 2,0 a 5,4 GHz. Neste a tensão elétrica de pico foi $3,19680 \cdot 10^{-4}$ V. A respectiva corrente atingiu $-3,19680 \cdot 10^{-4}$ A. As curvas dessas grandezas elétricas são apresentadas nas Figuras 46 a 49.

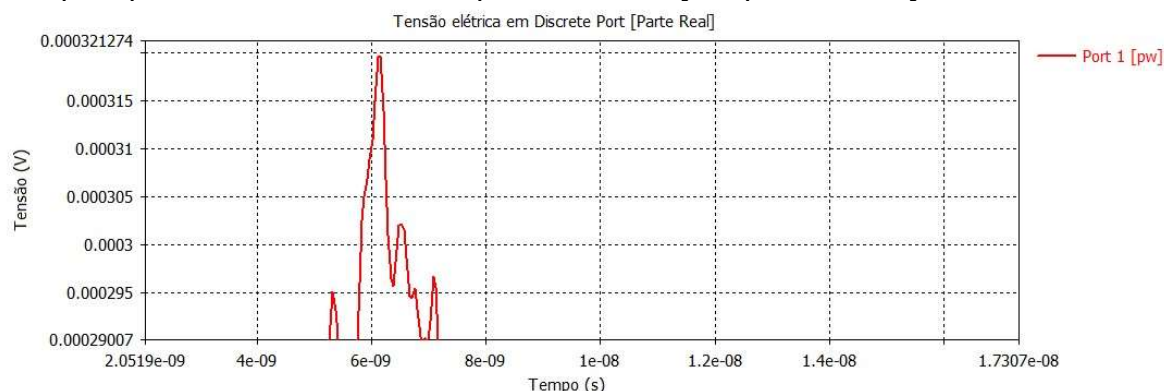
Nessa simulação a potência calculada foi de $9,10321 \cdot 10^{-8}$ W. Os dados utilizados constam na Tabela 6 do Apêndice A.

Figura 46 - Curva de tensão elétrica para frequências de 2,0 a 5,4 GHz e espiral plano. *Port 1* é nome do ponto de medição. *pw* é indicação de Port wave



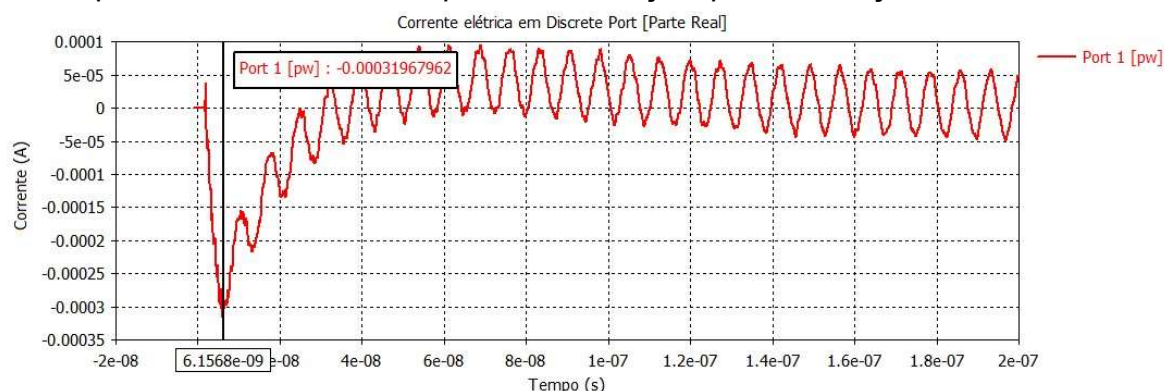
Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Figura 47 - Pico da curva de tensão elétrica para frequências de 2,0 a 5,4 GHz e espiral plano. *Port 1* é nome do ponto de medição. *pw* é indicação de Port wave



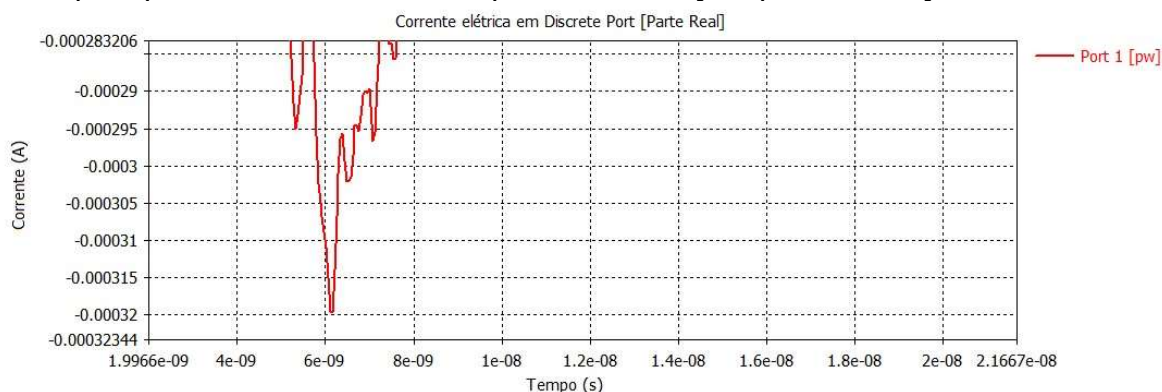
Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Figura 48 - Curva de corrente elétrica para frequências de 2,0 a 5,4 GHz e espiral plano. *Port 1* é nome do ponto de medição. *pw* é indicação de Port wave



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Figura 49 - Pico da curva de corrente elétrica para frequências de 2,0 a 5,4 GHz e espiral plano. *Port 1* é nome do ponto de medição. *pw* é indicação de Port wave



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

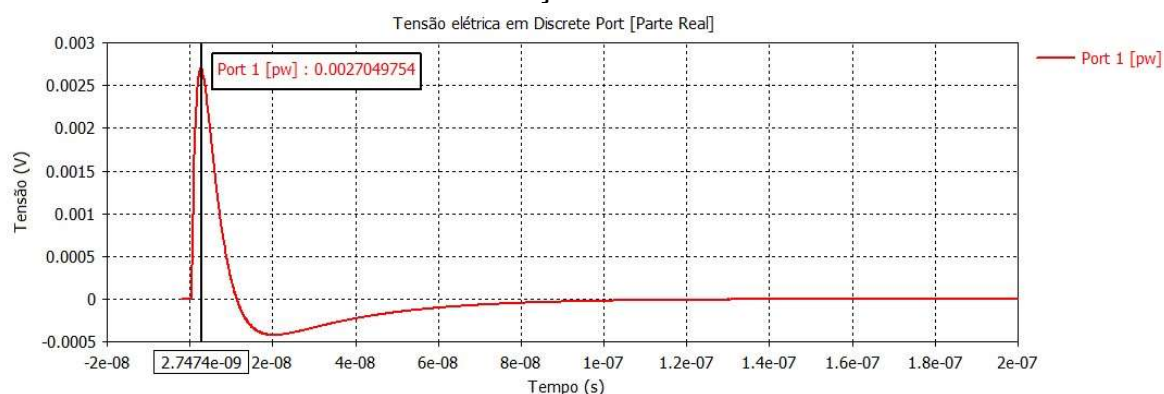
Dentre as três arquiteturas modeladas, a pirâmide de espiras quadradas paralelas obteve a maior tensão elétrica. Então uma vez conhecida a melhor estrutura, modelou-se uma pirâmide completa para que a captura de sinal fosse o maior possível, considerando a limitação física da arquitetura captora transdutora. A pirâmide de espiras quadradas paralelas completa foi apresentada na Figura 16. Ela teve 30 espiras.

4.2.5 Pirâmide completa de espiras quadradas paralelas

Para a arquitetura da Figura 16, efetuaram-se simulações com os espectros de frequências de 2,0 a 3,0 GHz e 2,0 a 5,4 GHz, onde foram obtidos os picos de tensão e corrente de $2,70498 \cdot 10^{-3}$ V e $-2,70498 \cdot 10^{-3}$ A, $2,97063 \cdot 10^{-3}$ V e $-2,97063 \cdot 10^{-3}$ A, respectivamente. Suas curvas constam nas Figuras 50 a 57.

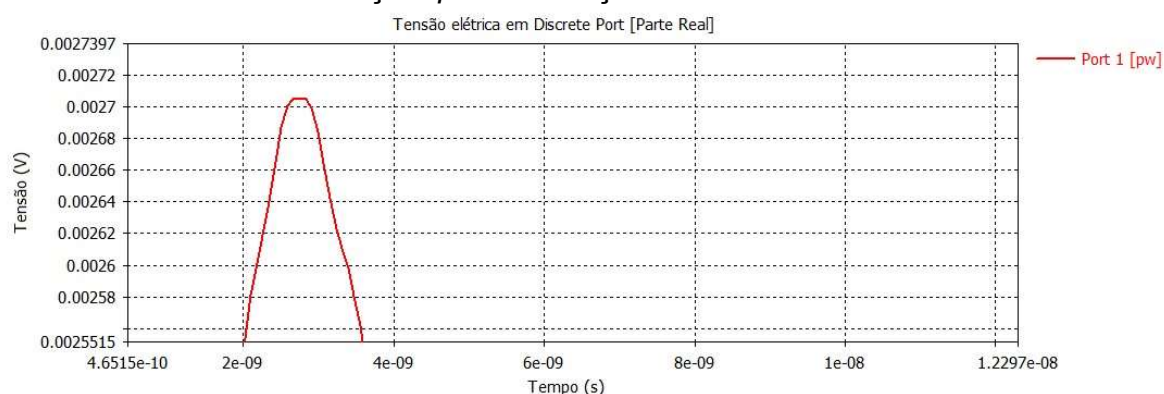
A partir dessas simulações calcularam-se as potências correspondentes de $7,11506 \cdot 10^{-6}$ W e $8,40272 \cdot 10^{-6}$ W. Os dados utilizados constam nas Tabelas 7 e 8 do Apêndice A.

Figura 50 - Curva de tensão elétrica para frequências de 2,0 a 3,0 GHz e pirâmide completa de espiras quadradas paralelas. *Port 1* é nome do ponto de medição. *pw* é indicação de Port wave



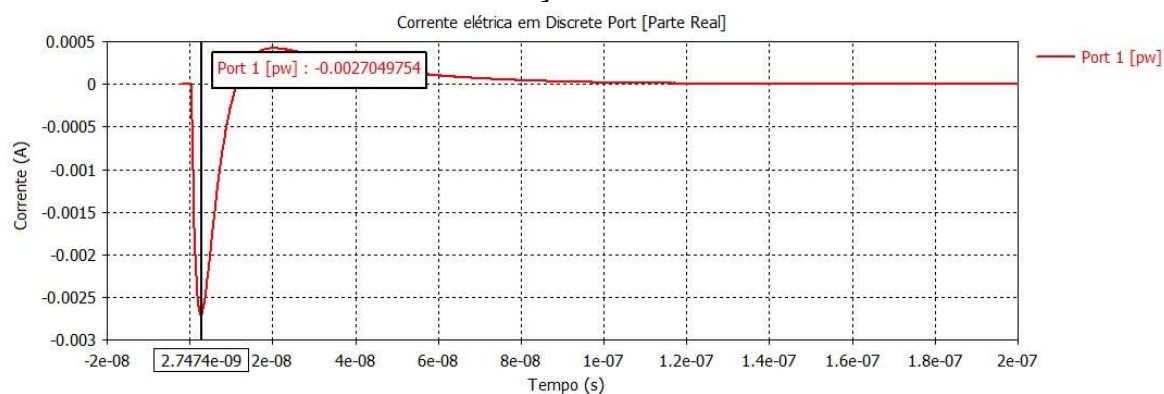
Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Figura 51 - Pico da curva de tensão elétrica para frequências de 2,0 a 3,0 GHz e pirâmide completa de espiras quadradas paralelas. *Port 1* é nome do ponto de medição. *pw* é indicação de Port wave



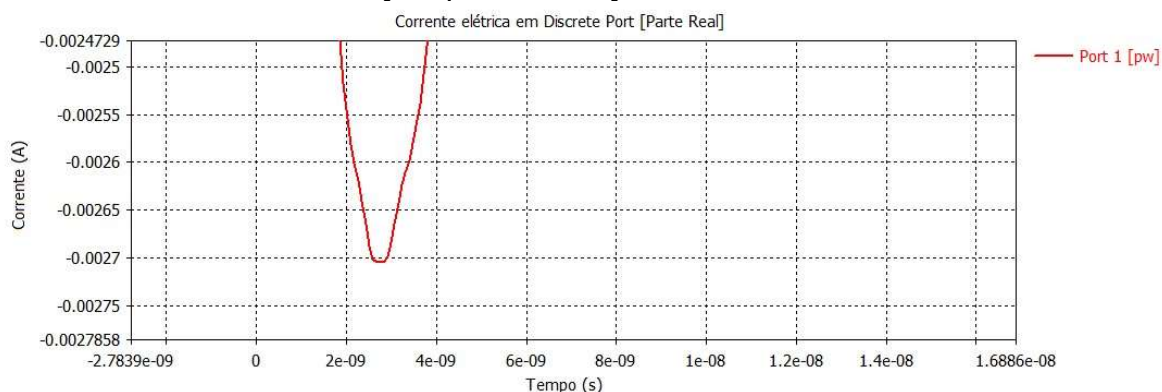
Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Figura 52 - Curva de corrente elétrica para frequências de 2,0 a 3,0 GHz e pirâmide completa de espiras quadradas paralelas. *Port 1* é nome do ponto de medição. *pw* é indicação de Port wave



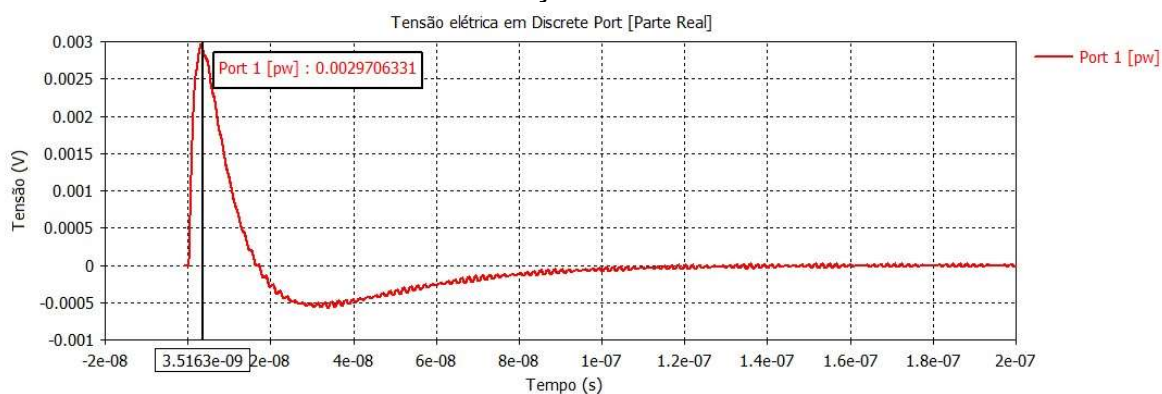
Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Figura 53 - Pico da curva de corrente elétrica para frequências de 2,0 a 3,0 GHz e pirâmide completa de espiras quadradas paralelas. *Port 1* é nome do ponto de medição. *pw* é indicação de Port wave



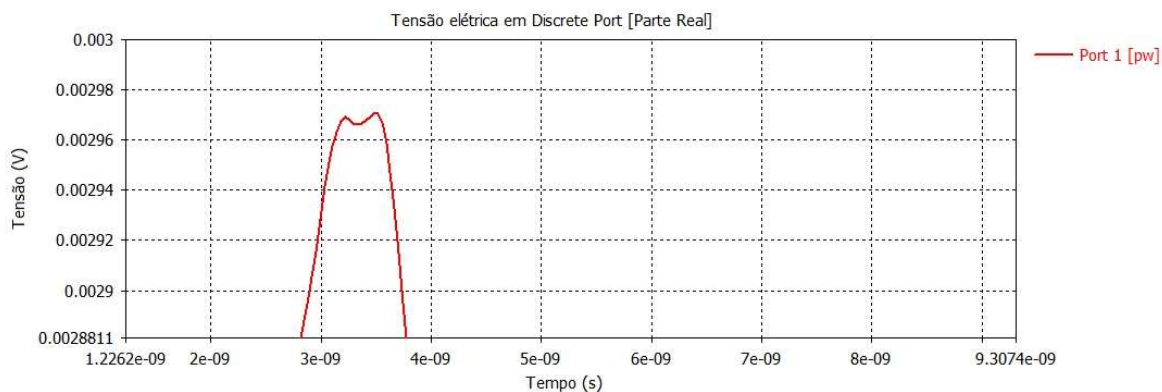
Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Figura 54 - Curva de tensão elétrica para frequências de 2,0 a 5,4 GHz e pirâmide completa de espiras quadradas paralelas. *Port 1* é nome do ponto de medição. *pw* é indicação de Port wave



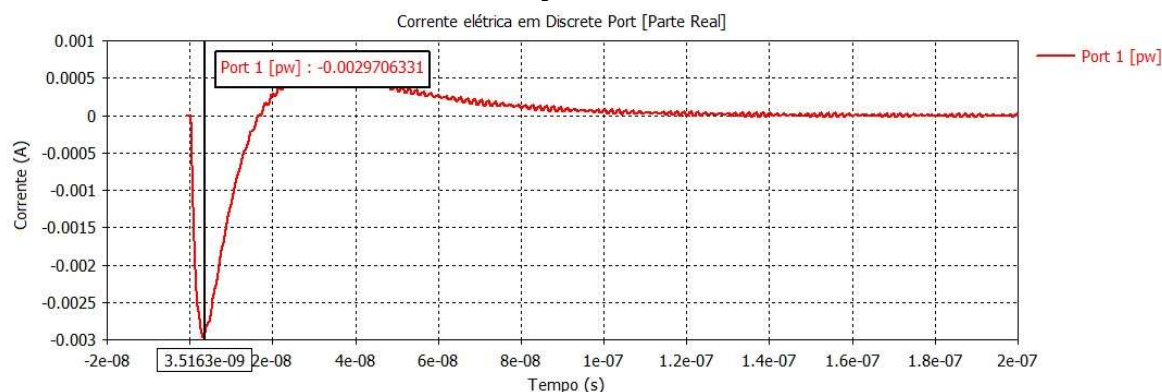
Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Figura 55 - Pico da curva de tensão elétrica para frequências de 2,0 a 5,4 GHz e pirâmide completa de espiras quadradas paralelas. *Port 1* é nome do ponto de medição. *pw* é indicação de Port wave



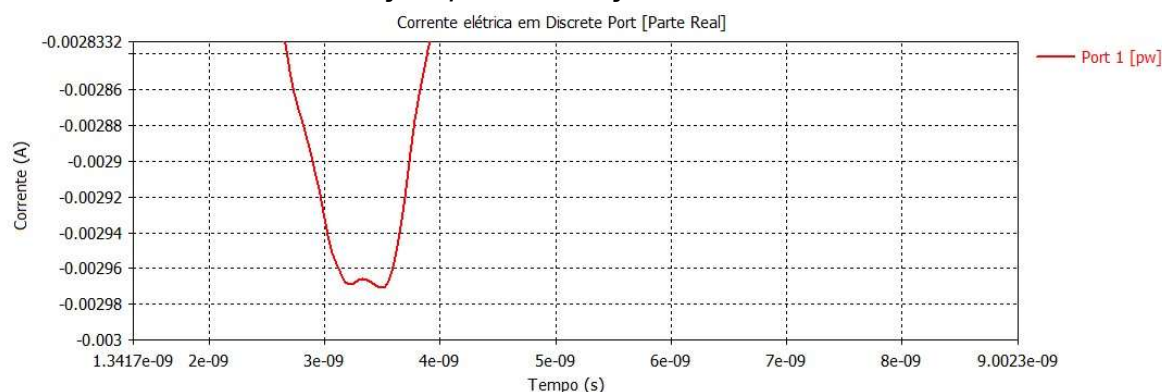
Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Figura 56 - Curva de corrente elétrica para frequências de 2,0 a 5,4 GHz e pirâmide completa de espiras quadradas paralelas. *Port 1* é nome do ponto de medição. *pw* é indicação de Port wave



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Figura 57 - Pico da curva de corrente elétrica para frequências de 2,0 a 5,4 GHz e pirâmide completa de espiras quadradas paralelas. *Port 1* é nome do ponto de medição. *pw* é indicação de Port wave



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Essa arquitetura transdutora apresentou valores de tensão e corrente elétricas menores que sua predecessora *4.2.2 Pirâmide de espiras quadradas paralelas*, para o mesmo espectro de frequências de 2,0 a 3,0 GHz. Em contrapartida, no espectro mais amplo, de 2,0 a 5,4 GHz, obteve tensão e corrente maiores. Isso demonstrou que agregar mais espiras elétricas na arquitetura de pirâmide proposta foi vantajoso para um espectro maior.

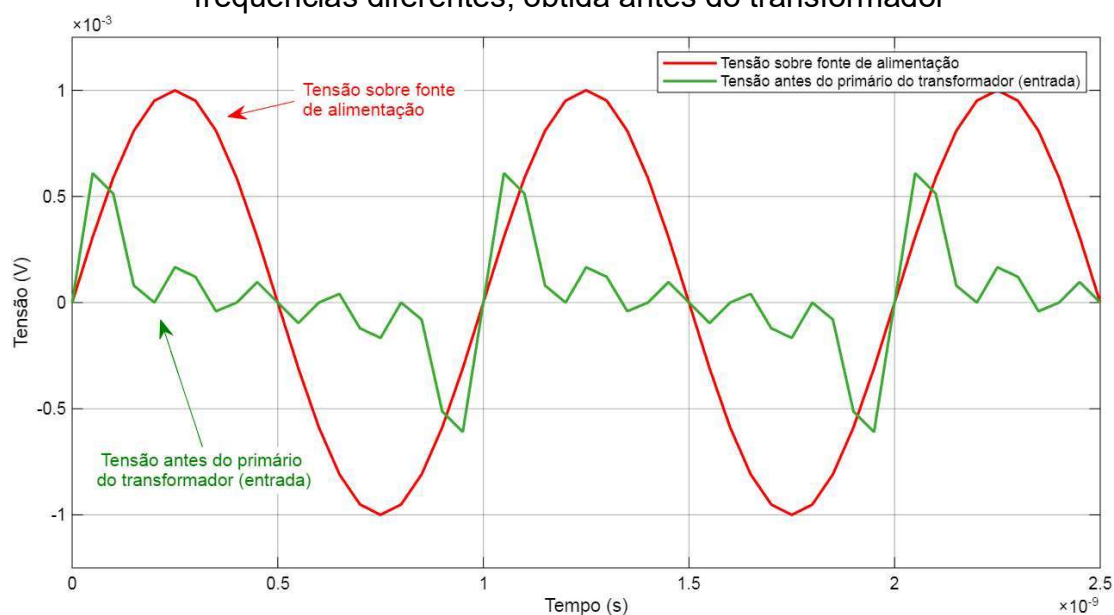
Na próxima seção será apresentado o sistema de circuito elétrico proposto para tornar possível a produção de energia elétrica útil.

4.3 SIMULAÇÕES NA APLICAÇÃO SIMULINK DO SOFTWARE MATLAB R2024B

Um circuito elétrico de teste comportamental foi modelado segundo 3.4 *DEFINIÇÕES PARA SIMULAÇÕES NO SIMULINK* e 4.1.2 *Modelagem dos circuitos elétricos*. A ilustração desse circuito consta na Figura 21.

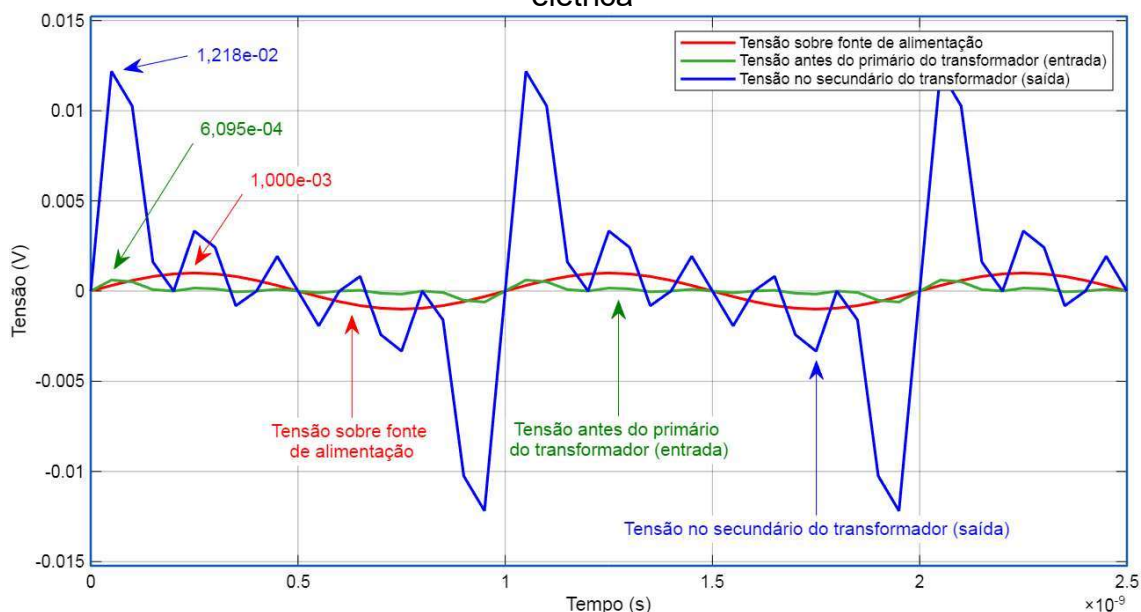
Realizaram-se simulações que indicaram a capacidade de interação entre as fontes de alimentação com frequências diferentes; visto na Figura 58. E foi observada a capacidade de elevação do sinal de tensão do primário para o secundário ao longo de todo o período da onda de entrada, mesmo com frequências de 1,0 a 5,0 GHz. Essa amplificação pode ser verificada na Figura 59.

Figura 58 - Tensão elétrica resultante da interação entre fontes de alimentação com frequências diferentes, obtida antes do transformador

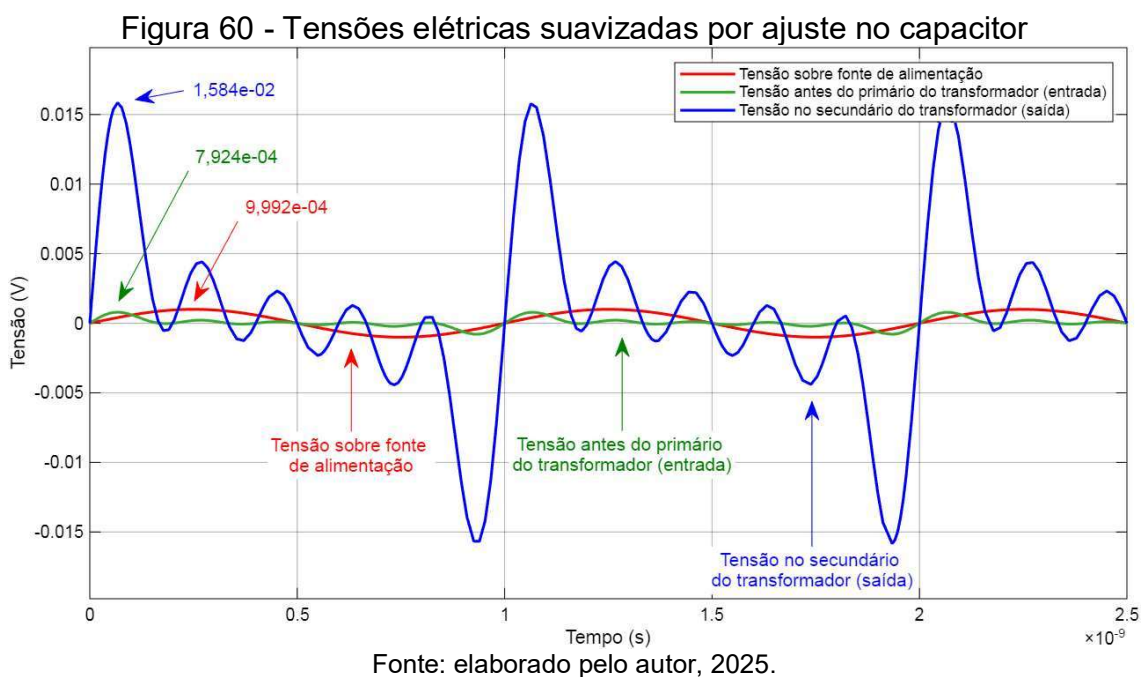


Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Figura 59 - Tensão elétrica obtida após amplificação por transformador de energia elétrica



Para suavizar as ondas elétricas do circuito foi reduzida a capacitância paralela às fontes de alimentação e ao enrolamento primário do transformador. As curvas suavizadas são expostas na Figura 60 e se assemelham à onda resultante mostrada na Figura 9 (F).

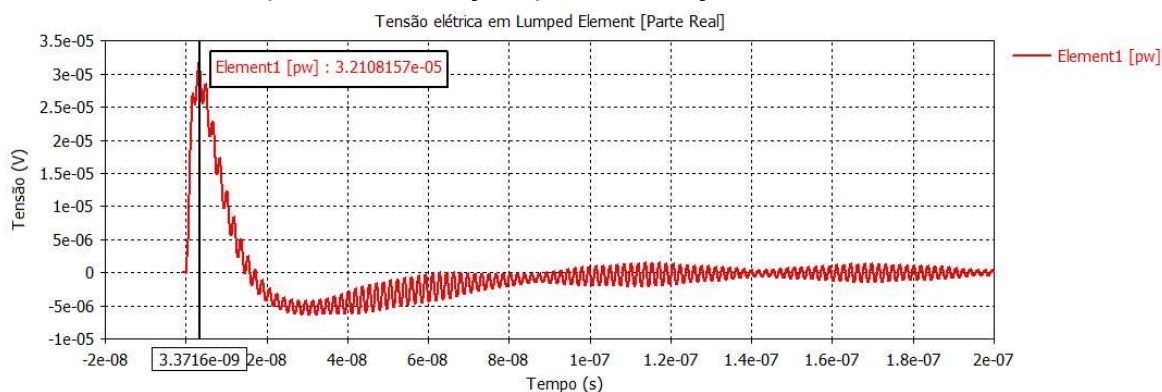


4.4 SIMULAÇÕES DO SISTEMA

A simulação do sistema como um todo ocorreu com a substituição do elemento *Discrete port*, da 4.2.5 *Pirâmide completa de espiras quadradas paralelas*, pelo *Lumped Network Element*. Esse novo item foi utilizado para representar uma carga RLC paralela, onde $R=1,0 \Omega$, $L=1,2732 \cdot 10^{-16} \text{ H}$ para se assemelhar com o enrolamento primário do transformador modelado no Simulink e $C=1,0 \cdot 10^{-6} \text{ F}$.

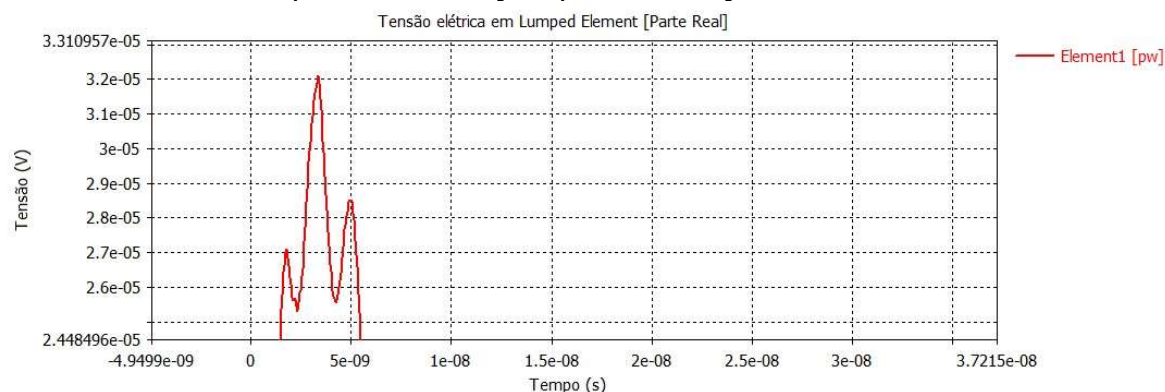
Sabendo-se que a arquitetura piramidal completa de espiras quadradas paralelas teve melhor desempenho no espectro de 2,0 a 5,4 GHz, ante 2,0 a 3,0 GHz, simulou-se o sistema com a carga RLC nesse espectro. As Figuras 61 a 64 apresentam as curvas de tensão e corrente sobre o conjunto paralelo RLC. Onde foram registrados valores máximos de $3,21082 \cdot 10^{-5} \text{ V}$ e $3,20407 \cdot 10^{-5} \text{ A}$.

Figura 61 - Curva de tensão elétrica para frequências de 2,0 a 5,4 GHz e pirâmide completa de espiras quadradas paralelas com carga RLC. *Element1* é nome do ponto de medição. *pw* é indicação de Port wave



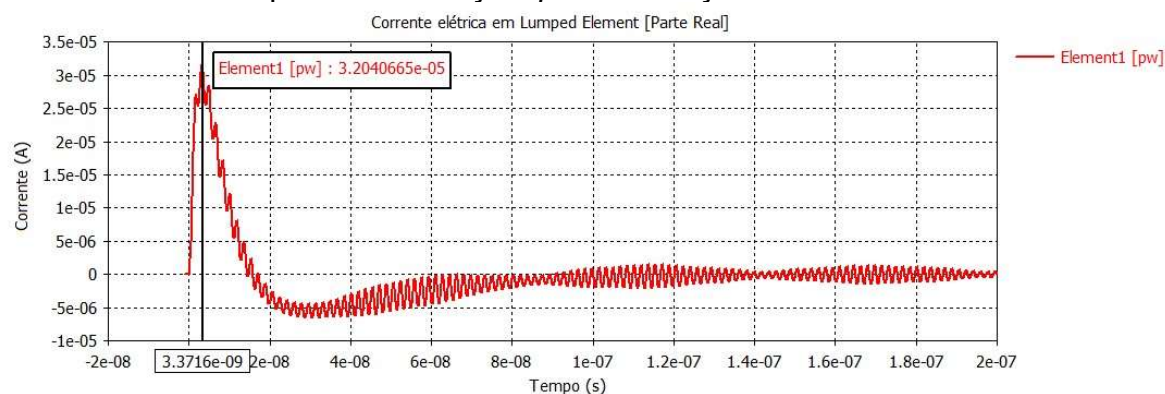
Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Figura 62 - Pico da curva de tensão elétrica para frequências de 2,0 a 5,4 GHz e pirâmide completa de espiras quadradas paralelas com carga RLC. *Element1* é nome do ponto de medição. *pw* é indicação de Port wave



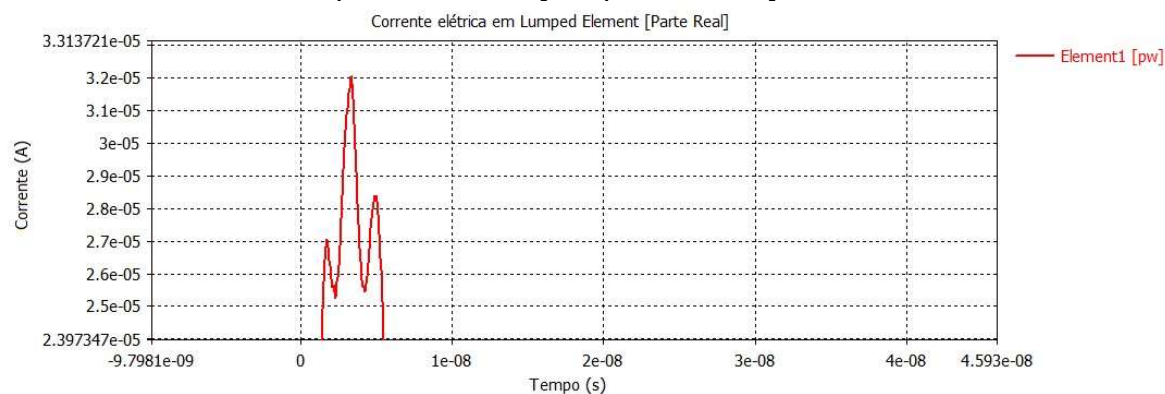
Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Figura 63 - Curva de corrente elétrica para frequências de 2,0 a 5,4 GHz e pirâmide completa de espiras quadradas paralelas com carga RLC. *Element1* é nome do ponto de medição. *pw* é indicação de Port wave



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Figura 64 - Pico da curva de corrente elétrica para frequências de 2,0 a 5,4 GHz e pirâmide completa de espiras quadradas paralelas com carga RLC. *Element1* é nome do ponto de medição. *pw* é indicação de Port wave



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Perceberam-se valores menores que na pirâmide de espiras quadradas paralelas em mesma frequência. Esse desempenho está atrelado ao acréscimo de carga representado pelas reatâncias capacitiva e indutiva no sistema.

4.5 RESULTADO DO PROTÓTIPO E TESTES EM BANCADA

Realizou-se teste em bancada para verificar a interação entre uma espira elétrica e o campo magnético de onda eletromagnética.

A estrutura foi composta por fonte emissora com antena, espira elétrica quadrada, transformador elevador de tensão elétrica, equipamentos gerador de sinais e osciloscópio, conectores e ponteiros de instrumentos. A Figura 65 apresenta essa estrutura.

Figura 65 - Estrutura de testes em bancada



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

A construção do circuito elétrico se deu com a ligação entre a espira quadrada e o enrolamento primário do transformador elevador de tensão elétrica, através de conectores elétricos. O secundário do transformador foi deixado aberto. Nele foram efetuadas medições com osciloscópio.

Uma antena omnidirecional conectada no gerador de sinais elétricos funcionou como fonte emissora de ondas eletromagnéticas.

Nos itens seguintes *A*, *B*, *C*, *D*, *E*, *F* e *G* são descritos os equipamentos e materiais utilizados no teste em bancada.

A. Espira elétrica: uma espira elétrica de cobre, no formato quadrado de $1,1 \cdot 10^{-1} \times 1,1 \cdot 10^{-1}$ metros, disposta paralelamente à mesa da bancada.

B. Transformador de energia elétrica: um transformado elétrico. Enrolamentos de cobre e núcleo ferromagnético. Tensão no primário de 12,0 + 12,0 V. Tensão no secundário de 220,0 V. Portanto, relação de transformação de 1:9,16667.

C. Antena: uma antena omnidirecional. Polarização linear vertical. Frequências 850, 900, 1800, 1900 e 2200 MHz. Impedância de 50,0 Ω . Conector SMA macho. Cabo com comprimento aproximado de três metros. Base magnética.

D. Conectores: dois conectores Wago 221 de três posições.

E. Ponteiras: duas ponteiras para instrumentos. Atenuação selecionável de 1x ou 10x. Uma extremidade com conector BNC e outra com garra e ponta de prova do tipo pinça.

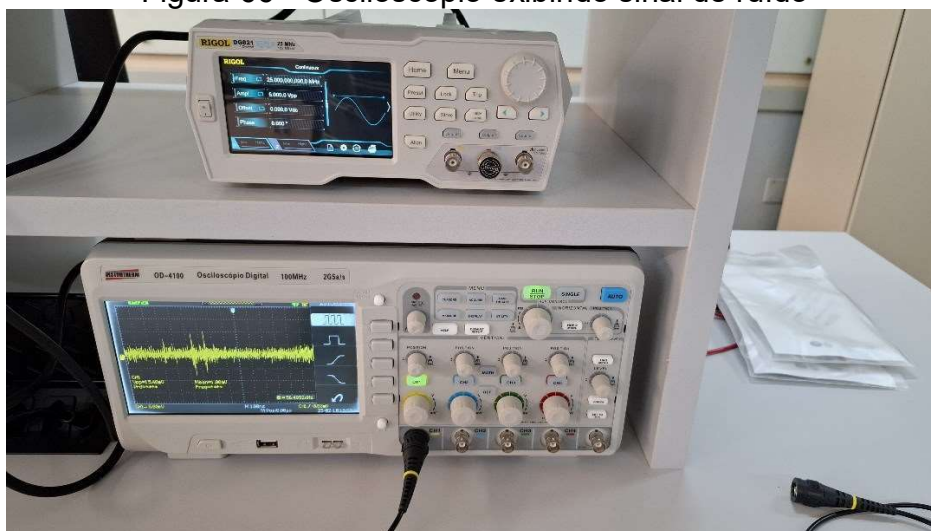
F. Gerador de sinais: um equipamento, digital, marca e modelo Rigol DG821. Frequência máxima de 25,0 MHz. Número de série DG8A213101449. Utilizada forma de onda sinal senoidal com 5,0 Vpp (Volts pico a pico) e frequência de 25,0 MHz. Conectado o canal 1 na antena omnidirecional informada em C. *Antena*, utilizando uma ponteira de instrumento descrita em E. *Ponteiras* com relação de 1x.

G. Osciloscópio: um equipamento, digital, marca e modelo Instrutherm OD-4100, frequência máxima de 100,0 MHz. Número/código de série NDS10IBD3R0147. Utilizadas as configurações detectadas automaticamente pelo instrumento. Sua ponteira de prova foi conectada no secundário do transformador elevador de tensão elétrica descrito em B. *Transformador de energia elétrica* com relação de 1x.

Sendo a tecnologia de transmissão sem fio classificada como baseada em campo próximo e campo distante (ZHANG; LIU; LU, 2023), utilizou-se a distância de $4,0 \cdot 10^{-1}$ m entre antena e espira elétrica, para utilização do campo distante.

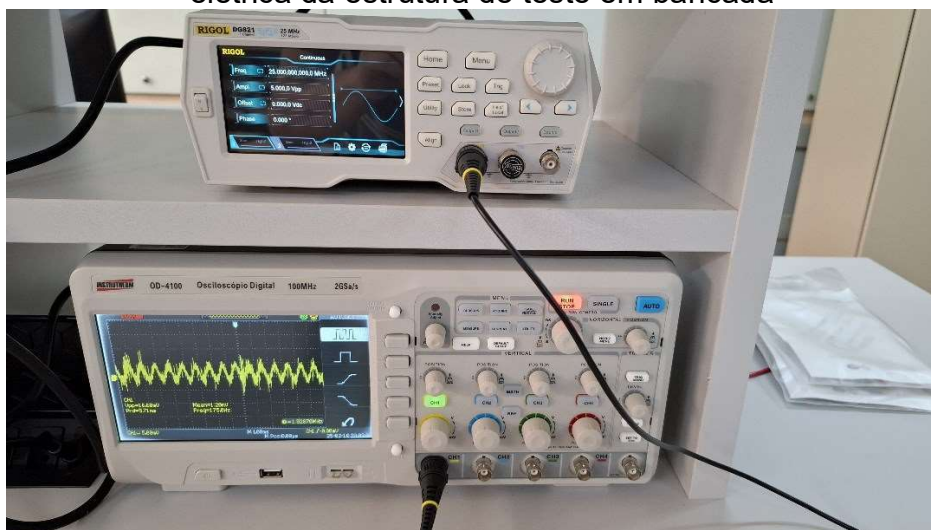
Verifica-se nas Figuras 66 e 67 a diferença entre o sinal fornecido pela espira elétrica e o ruído de quando a geração de energia elétrica pela espira está ausente.

Figura 66 - Osciloscópio exibindo sinal de ruído



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Figura 67 - Osciloscópio mostrando sinal de tensão elétrica gerado a partir da espira elétrica da estrutura de teste em bancada



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Observa-se que ao realizar o teste em bancada na frequência de 25,0 MHz, por limitação de frequência máxima no gerador de sinais, a antena não estava em um de seus pontos especificados de operação e a espira elétrica tinha dimensões menores que a metade do comprimento da onda emitida.

A relação entre frequência e comprimento de onda é dada pela Equação 6.

$$v = \lambda \cdot f \quad (6)$$

Onde:

v =Velocidade da onda, em metros por segundo (no vácuo $v=c=299.792.458$ m/s);

λ =Comprimento da onda, em metros (m);

f =Frequência da onda eletromagnética, em Hertz (Hz);

$c=299.792.458$ m/s (velocidade da luz no vácuo).

Considerando que a velocidade da onda eletromagnética no ar é 299.792.458 m/s, o comprimento de onda para a frequência de 25,0 MHz é 11,99170 metros. Logo, essa seria a largura interna da espira elétrica quadrada nessa frequência.

Portanto, nesse teste verificou-se que é possível gerar tensão elétrica a partir do campo magnético de ondas eletromagnéticas. Mesmo quando as dimensões da espira elétrica e o comprimento de onda da frequência emitida pela fonte não são diretamente correspondentes.

4.6 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

A partir das simulações com ondas eletromagnéticas e espiras quadradas em frequências específicas constatou-se a capacidade de gerar energia elétrica a partir de campos magnéticos de ondas eletromagnéticas. E ao analisar o somatório das contribuições dessas ondas como uma resultante, verificou-se que as interferências dessas ondas entre si são construtivas para a arquitetura transdutora piramidal proposta: pirâmide de espiras quadradas paralelas. O *design* dessa arquitetura torna ondas eletromagnéticas livres no ambiente como fontes contributivas positivas.

Ao realizar simulações da emissão de espectros de ondas eletromagnéticas para interações com estruturas que comportavam espiras elétricas de dimensões relacionadas distintamente com diferentes comprimentos de ondas, observou-se que se agrega potência elétrica ao utilizar simultaneamente várias ondas eletromagnéticas.

As tensões e correntes elétricas obtidas nas estruturas foram pequenas, requerendo o desenvolvimento de um sistema elétrico para torná-las utilizáveis.

Simulando e mensurando as grandezas de um circuito elétrico proposto para uso com a geração de energia elétrica a partir do campo magnético de ondas eletromagnéticas, verificou-se que é possível elevar a tensão com o uso de um transformador elétrico.

Para suavizar as formas de onda do circuito elétrico, mostrou-se útil o emprego de um capacitor.

Nos testes em bancada, confirmou-se a interação entre uma onda eletromagnética e uma espira elétrica quadrada. Constatando fora do âmbito das simulações que a geração de energia elétrica como proposto é viável.

Enfim, este trabalho demonstrou que é possível a utilização do campo magnético de ondas eletromagnéticas para geração de energia elétrica. Inicialmente percebe-se sua aplicabilidade no âmbito das pequenas potências, como em dispositivos sensores e emissores autoalimentados e IoT. Outra previsão de aplicação é no auxílio para que dispositivos de RF geradores de energia elétrica vençam a barreira potencial de junções semicondutoras em seus circuitos elétricos, evitando a necessidade de circuitos auxiliares multiplicadores de tensão para disponibilizar a energia.

5 CONCLUSÃO

Conforme a revisão bibliográfica, existe a possibilidade de utilizar ondas eletromagnéticas para geração de energia elétrica. Ao menos as teorias do ponto zero, do efeito Seebeck e da radiofrequência haviam conseguido esse feito. Dessas percebe-se que é necessário elevar os níveis de tensão gerados pelas conversões primárias e que as potências são baixas.

O uso dos campos magnéticos de ondas eletromagnéticas para geração de energia elétrica apresentou-se como uma alternativa a ser analisada. E com as modelagens e simulações mostrou-se que é uma fonte válida. A produção de energia elétrica útil é viabilizada por estrutura captora e transdutora interativa com espectros de frequências. O *design* desta estrutura permite que ondas eletromagnéticas livres no ambiente sejam utilizadas, mesmo que possuam diferentes comprimentos de onda.

A arquitetura de captação e transformação proposta (pirâmide de espiras quadradas paralelas) apresentou-se coerente. Para ela se concluiu que o emprego de maior quantidade de espiras elétricas resulta em tensões elétricas também maiores quando sob espectros de frequências mais amplos.

Formas de obter mais potência elétrica são: elevar a energia das ondas eletromagnéticas incidentes, ampliar o espectro de frequências e aumentar a quantidade de espiras elétricas da arquitetura. Estes são os meios de conseguir potência suficiente para energizar sistemas e cargas.

Aplicações em IoT são nichos que podem se beneficiar da geração de energia elétrica a partir dos campos magnéticos de ondas eletromagnéticas. Pesquisas já ocorrem sobre o uso da radiofrequência, coletando energia dos campos elétricos. Portanto a associação de ambos os campos, magnético e elétrico, eleva a quantidade de potência elétrica que se pode utilizar. Certamente uma fonte de energia interessante quando pensado em mobilidade e alimentação elétrica constante. Assim, além de IoT, também se pode considerar área de interesse os dispositivos vestíveis e implantáveis.

Os objetivos geral e específicos A, B e C foram atendidos. Enquanto o objetivo específico D foi parcialmente cumprido: mostrando a interação do campo magnético de uma onda eletromagnética com uma espira elétrica; porém essa espira carecia de

dimensões correspondentes à frequência emitida. Esse fato inviabilizou testes complementares. Todavia não impediu o alcance do objetivo principal.

Por fim, como conclusão geral, a arquitetura captora e transdutora e o sistema propostos atingiram o objetivo apresentado de fornecer energia elétrica a partir do campo magnético de ondas eletromagnéticas e, aplicável a espectros de frequências.

Para trabalhos futuros sugere-se abordar:

1. Diferentes materiais condutores e dielétricos para a pirâmide de espiras quadradas paralelas.
2. Arquitetura de captação e transdução com espiras circulares e estrutura em formato de cone.
3. Circuito elétrico com o bloco de transferência que permita fornecer um sinal próximo de uma onda senoidal no ponto de entrega.

REFERÊNCIAS

BLAKESLEE , A.Eugene; MITCHELL, Kim W. **Device for conversion of electromagnetic radiation into electrical current**. Depositante: United States Patent. Aplicação n. 133,702, Patente n. 4,278,474, Depósito: 25 mar. 1980, Concessão: 14 jul. 1981. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US4278474A/en?q=U.S.+Patent+4%2c278%2c474>. Acesso em: 02 mar. 2024.

CHAITANYA, Chavalam Lakshmi Prasanna *et al.* A COGNITIVE APPROACH TO GENERATE ELECTRICAL ENERGY FROM ACOUSTIC MEDIUM. **IEEE Xplore**. Delhi, Índia, 2024 IEEE Third International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), 2024. DOI: 10.1109/ICPEICES62430.2024.10719322. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10719322>. Acesso em: 23 jan. 2025.

CHUVALDIN, Nikita *et al.* Study of energy harvesting using high-frequency emitting for IoT. **IEEE Xplore**. [S.l.], 2019. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8798423>. Acesso em: 06 mar. 2024.

DENG, Shuai *et al.* Design and model of a car based on wireless charging. **IEEE Xplore**. [S.l.], 6th international conference on robotics and automation sciences, 2022. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9842104>. Acesso em: 13 mar. 2024.

ELTRESY, N. A. *et al.* Dual-polarized nanoantenna solar energy collector. **IEEE Xplore**. Aswan: Arab Academy for Science, Technology & Maritime Transport, 33rd national radio science conference, 2016. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7450864>. Acesso em: 06 mar. 2024.

FELTRIN, Rogers Romancini. Relatório de estágio. Curso técnico em eletrônica industrial. **Escola técnica “General Oswaldo Pinto da Veiga” SATC**. Criciúma, jul. 2004. 111 p.

HASANUDDIN, Muhammad Ogin *et al.* Design and Implementation of RF to DC converter for low power IoT device using RF energy harvesting. **IEEE Xplore**. [S.l.], 2022. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9980784>. Acesso em: 06 mar. 2024.

HEDHILI, Nesrine *et al.* 1800 MHz and 2.45 GHz Antennas for RF Energy Harvesting Applications. **IEEE Xplore**. Sousse, Tunísia, 22nd Mediterranean Microwave Symposium (MMS), 2023. DOI: 10.1109/MMS59938.2023.10420995. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10420995>. Acesso em: 23 jan. 2025.

HIDALGO-LEON, Ruben *et al.* A brief review of some energy harvesters including improvements in their power conversion systems: Roadways and road speed bumps. **IEEE Xplore**. IEEE ANDESCON, Barranquilla, Colômbia, 2022. DOI: 10.1109/ANDESCON56260.2022.9989552. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9989552&utm_source=scopus&getft_integrator=scopus&tag=1. Acesso em: 28 jan. 2025.

JEAN, Fandi *et al.* Harnessing ambient sound: Different approaches to acoustic energy harvesting using triboelectric nanogenerators. *Advanced Materials and Devices*. **Journal of Science**. [S.l.], 24 oct. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2024.100805>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468217924001369>. Acesso em: 23 jan. 2025.

KESHAV, Srinivasan. How to read a paper. **Computer Communication Review**. Waterloo, Canadá, v.37, p.83-84, jul. 2007. Disponível em: <http://ccr.sigcomm.org/online/files/p83-keshavA.pdf>. Obtido em: 22 fev. 2024.

KHAN, Safiullah; EIBERT, Thomas F. A highly efficient miniaturized microwave collector for wireless power transmission. **IEEE Xplore**. [S.l.], 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8364264>. Acesso em: 06 mar. 2024.

KHOSHDEL, Vahid; SHOKOOH-SAREMI, Mehrdad. Bow-tie infrared antennas for solar energy collection. **IEEE Xplore**. [S.l.], 7th international symposium on telecommunications, 2014. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7000695>. Acesso em: 06 mar. 2024.

LIAO, Yifan *et al.* Ambient nano RF-Energy driven self-powered wearable multimodal real-time health monitoring. **Nano Energy**. [S.l.], 24 jun. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2024.109915>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211285524006633>. Acesso em: 23 jan. 2025.

LOCH, Juliana; BURKARTER, Ezequiel. *In*: PARANÁ (Estado). Secretaria de Estado da Educação. **Física. Ensino médio**. 2. ed. Curitiba, PR: SEED-PR, 2007. 232 p. Disponível em: http://www.educadores.diaadia.pr.gov.br/arquivos/File/livro_didatico/fisica.pdf. Acesso em: 04/03/2025.

LUKOSZ, Walter. Electromagnetic zero-point energy and radiation pressure for a rectangular cavity. *Physica*. **North-Holland Publishing Co**. [S.l.], v.56, p.109-120, 24 mar. 1971. DOI: [https://doi.org/10.1016/0031-8914\(71\)90009-7](https://doi.org/10.1016/0031-8914(71)90009-7). Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0031-8914\(71\)90009-7](https://doi.org/10.1016/0031-8914(71)90009-7). Acesso em: 02 mar. 2024.

LUO, Hongchun *et al.* Environmental energy harvesting boosts self-powered sensing. **Materials Today Energy**. [S.l.], 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2024.101502>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468606924000145>. Acesso em: 23 jan. 2025.

LV, Hualiang *et al.* Staggered circular nanoporous graphene converts electromagnetic waves into electricity. **Nature Communications**. [S.l.], 08 abr. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37436-6>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/369900657_Staggered_circular_nanoporous_graphene_converts_electromagnetic_waves_into_electricity. Acesso em: 06 mar. 2024, 07 abr. 2024.

MEAD JR., Franklin B. *et al.* **System for converting electromagnetic radiation energy to electrical energy**. Depositante: United States Patent. Aplicação n. 281,271, Patente n. 5,590,031, Depósito: 27 jul. 1994, Concessão: 31 dez. 1996. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US5590031A/en>. Acesso em: 02 mar. 2024.

NAKASHIMA, Ataru *et al.* Development of micro energy harvest circuit using RF signal. **IEEE Xplore**. [S.l.], 2020. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9315008>. Acesso em: 06 mar. 2024.

RODRIGUES-MARINHO, Tiago *et al.* Printable lightweight polymer-based energy harvesting systems: materials, processes, and applications. **Materials Today Sustainability**. [S.l.], 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2022.100292>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589234722001841>. Acesso em: 23 jan. 2025.

TAKEMURA, Nobuyasu *et al.* A study of directional antenna for recycled energy improvement in electromagnetic wave energy harvesting. **IEEE Xplore**. [S.l.], 2017. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8072850>. Acesso em: 06 mar. 2024.

TAN, Gerhard P.; BAUTISTA, Jesse James P. Utilization of low cost RF harvester circuit in harnessing electrical energy from multiband RF signals. **IEEE Xplore**. [S.l.], 2017. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8168604>. Acesso em: 06 mar. 2024.

TENG, Junchi *et al.* Maintenance-free wireless multi-functional sensing enabled by electrostatic generator. **Nano Energy**. [S.l.], 07 ago. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2023.108772>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211285523006092>. Acesso em: 23 jan. 2025.

WANG, Chen *et al.* A low-frequency, broadband and tri-hybrid energy harvester with septuplestable nonlinearity-enhanced mechanical frequency up-conversion mechanism for powering portable electronics. **Nano Energy**. [S.l.], 30 jul. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.103943>. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211285519306500?getft_integrator=scopus&pes=vor&utm_source=scopus. Acesso em: 28 jan. 2025.

WANG, Tingyu *et al.* A real-time, self-powered wireless pressure sensing system with efficient coupling energy harvester, sensing, and communication modules. **Nano Energy**. [S.l.], 21 mar. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2024.109533>. Disponível em: <https://sciencedirect.com/science/article/pii/S2211285524002817>. Acesso em: 23 jan. 2025.

XIE, Haonan *et al.* Wireless energy: Paving the way for smart cities and a greener future. **Energy & Buildings**. [S.l.], 16 ago. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113469>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778823006990>. Acesso em: 23 jan. 2025.

ZHANG, Chao; LIU, Zhen-Guo; LU, Wei-Bing. A Multifunctional Antenna Array Applied in WPT System. **IEEE Xplore**. International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), Qingdao, China, 2023. DOI: 10.1109/ICMMT58241.2023.10277113. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10277113>. Acesso em: 23 jan. 2025.

APÊNDICE A – TABELAS DE TENSÕES E CORRENTES ELÉTRICAS OBTIDAS DAS SIMULAÇÕES DE ARQUITETURAS NO SOFTWARE CST STUDIO SUITE

As simulações das arquiteturas captoras e transdutoras forneceram informações de tensões e correntes elétricas. A partir delas se pode calcular as potências elétricas ativas correspondentes.

Nas Tabelas 1 a 8 são disponibilizados os valores de tensões e correntes de cada arquitetura e espectro simulados. A duração é de aproximadamente $1 \cdot 10^{-9}$ s, centralizada nos pontos de pico.

Tabela 1 – Tensões e correntes elétricas da pirâmide de espiras quadradas paralelas, sob espectro de 2,0 a 3,0 GHz

Tensões e correntes elétricas no tempo		
Tempo (s)	Tensão elétrica (V)	Corrente elétrica (A)
$3,6659193458632 \cdot 10^{-9}$	$3,1941058114171 \cdot 10^{-3}$	$-3,1941058114171 \cdot 10^{-3}$
$3,7392378082757 \cdot 10^{-9}$	$3,1701452098787 \cdot 10^{-3}$	$-3,1701452098787 \cdot 10^{-3}$
$3,8125560486435 \cdot 10^{-9}$	$3,1715997029096 \cdot 10^{-3}$	$-3,1715997029096 \cdot 10^{-3}$
$3,8858742890113 \cdot 10^{-9}$	$3,2061757519841 \cdot 10^{-3}$	$-3,2061757519841 \cdot 10^{-3}$
$3,9591929734684 \cdot 10^{-9}$	$3,2280914019793 \cdot 10^{-3}$	$-3,2280914019793 \cdot 10^{-3}$
$4,0325112138362 \cdot 10^{-9}$	$3,2301393803209 \cdot 10^{-3}$	$-3,2301393803209 \cdot 10^{-3}$
$4,105829454204 \cdot 10^{-9}$	$3,2405115198344 \cdot 10^{-3}$	$-3,2405115198344 \cdot 10^{-3}$
$4,179148138661 \cdot 10^{-9}$	$3,2443413510919 \cdot 10^{-3}$	$-3,2443413510919 \cdot 10^{-3}$
$4,2524663790289 \cdot 10^{-9}$	$3,2098449300975 \cdot 10^{-3}$	$-3,2098449300975 \cdot 10^{-3}$
$4,3257846193967 \cdot 10^{-9}$	$3,1560349743813 \cdot 10^{-3}$	$-3,1560349743813 \cdot 10^{-3}$
$4,3991033038537 \cdot 10^{-9}$	$3,1179892830551 \cdot 10^{-3}$	$-3,1179892830551 \cdot 10^{-3}$
$4,4724215442216 \cdot 10^{-9}$	$3,0950547661632 \cdot 10^{-3}$	$-3,0950547661632 \cdot 10^{-3}$
$4,5457397845894 \cdot 10^{-9}$	$3,0806057620794 \cdot 10^{-3}$	$-3,0806057620794 \cdot 10^{-3}$
$4,6190584690464 \cdot 10^{-9}$	$3,0803743284196 \cdot 10^{-3}$	$-3,0803743284196 \cdot 10^{-3}$
$4,6923767094142 \cdot 10^{-9}$	$3,0831263866276 \cdot 10^{-3}$	$-3,0831263866276 \cdot 10^{-3}$

Fonte: elaborado pelo autor [2025].

Tabela 2 - Tensões e correntes elétricas da pirâmide de espiras quadradas paralelas, sob espectro de 2,0 a 5,4 GHz

Tensões e correntes elétricas no tempo		
Tempo (s)	Tensão elétrica (V)	Corrente elétrica (A)
$1,8693362413558 \cdot 10^{-9}$	$1,5536338323727 \cdot 10^{-3}$	$-1,5536338323727 \cdot 10^{-3}$
$1,9118211458391 \cdot 10^{-9}$	$1,5729665756226 \cdot 10^{-3}$	$-1,5729665756226 \cdot 10^{-3}$
$1,9543060503224 \cdot 10^{-9}$	$1,5901350416243 \cdot 10^{-3}$	$-1,5901350416243 \cdot 10^{-3}$
$1,9967909548058 \cdot 10^{-9}$	$1,6058532055467 \cdot 10^{-3}$	$-1,6058532055467 \cdot 10^{-3}$
$2,0392758592891 \cdot 10^{-9}$	$1,6177709912881 \cdot 10^{-3}$	$-1,6177709912881 \cdot 10^{-3}$
$2,0817607637724 \cdot 10^{-9}$	$1,6254021320492 \cdot 10^{-3}$	$-1,6254021320492 \cdot 10^{-3}$
$2,1242456682558 \cdot 10^{-9}$	$1,6317976405844 \cdot 10^{-3}$	$-1,6317976405844 \cdot 10^{-3}$
$2,1667305727391 \cdot 10^{-9}$	$1,639025984332 \cdot 10^{-3}$	$-1,639025984332 \cdot 10^{-3}$
$2,2092154772224 \cdot 10^{-9}$	$1,6456521116197 \cdot 10^{-3}$	$-1,6456521116197 \cdot 10^{-3}$
$2,2517003817057 \cdot 10^{-9}$	$1,65016844403 \cdot 10^{-3}$	$-1,65016844403 \cdot 10^{-3}$
$2,2941852861891 \cdot 10^{-9}$	$1,6538089839742 \cdot 10^{-3}$	$-1,6538089839742 \cdot 10^{-3}$
$2,336670412717 \cdot 10^{-9}$	$1,6576308989897 \cdot 10^{-3}$	$-1,6576308989897 \cdot 10^{-3}$
$2,3791553172003 \cdot 10^{-9}$	$1,6600443050265 \cdot 10^{-3}$	$-1,6600443050265 \cdot 10^{-3}$
$2,4216402216837 \cdot 10^{-9}$	$1,6596321947873 \cdot 10^{-3}$	$-1,6596321947873 \cdot 10^{-3}$
$2,464125126167 \cdot 10^{-9}$	$1,6572360182181 \cdot 10^{-3}$	$-1,6572360182181 \cdot 10^{-3}$
$2,5066100306503 \cdot 10^{-9}$	$1,6539968783036 \cdot 10^{-3}$	$-1,6539968783036 \cdot 10^{-3}$
$2,5490949351337 \cdot 10^{-9}$	$1,6501089558005 \cdot 10^{-3}$	$-1,6501089558005 \cdot 10^{-3}$
$2,591579839617 \cdot 10^{-9}$	$1,6459127655253 \cdot 10^{-3}$	$-1,6459127655253 \cdot 10^{-3}$
$2,6340647441003 \cdot 10^{-9}$	$1,6426519723609 \cdot 10^{-3}$	$-1,6426519723609 \cdot 10^{-3}$
$2,6765496485837 \cdot 10^{-9}$	$1,6417148290202 \cdot 10^{-3}$	$-1,6417148290202 \cdot 10^{-3}$
$2,719034553067 \cdot 10^{-9}$	$1,6432532574981 \cdot 10^{-3}$	$-1,6432532574981 \cdot 10^{-3}$
$2,7615194575503 \cdot 10^{-9}$	$1,6465510707349 \cdot 10^{-3}$	$-1,6465510707349 \cdot 10^{-3}$
$2,8040043620337 \cdot 10^{-9}$	$1,6515284078196 \cdot 10^{-3}$	$-1,6515284078196 \cdot 10^{-3}$
$2,846489266517 \cdot 10^{-9}$	$1,6573028406128 \cdot 10^{-3}$	$-1,6573028406128 \cdot 10^{-3}$

Fonte: elaborado pelo autor [2025].

Tabela 3 - Tensões e correntes elétricas da pirâmide de espiras quadradas conectadas eletricamente em série, sob espectro de 2,0 a 3,0 GHz

Tensões e correntes elétricas no tempo		
Tempo (s)	Tensão elétrica (V)	Corrente elétrica (A)
$4,0397871714504 \cdot 10^{-9}$	$9,1538962442428 \cdot 10^{-4}$	$-9,1538962442428 \cdot 10^{-4}$
$4,1189984756329 \cdot 10^{-9}$	$9,186152019538 \cdot 10^{-4}$	$-9,186152019538 \cdot 10^{-4}$
$4,1982102239047 \cdot 10^{-9}$	$9,2147837858647 \cdot 10^{-4}$	$-9,2147837858647 \cdot 10^{-4}$
$4,2774215280872 \cdot 10^{-9}$	$9,2006224440411 \cdot 10^{-4}$	$-9,2006224440411 \cdot 10^{-4}$
$4,3566328322697 \cdot 10^{-9}$	$9,1932038776577 \cdot 10^{-4}$	$-9,1932038776577 \cdot 10^{-4}$
$4,4358445805415 \cdot 10^{-9}$	$9,2180079082027 \cdot 10^{-4}$	$-9,2180079082027 \cdot 10^{-4}$
$4,515055884724 \cdot 10^{-9}$	$9,226409601979 \cdot 10^{-4}$	$-9,226409601979 \cdot 10^{-4}$
$4,5942676329958 \cdot 10^{-9}$	$9,2122820205986 \cdot 10^{-4}$	$-9,2122820205986 \cdot 10^{-4}$
$4,6734789371783 \cdot 10^{-9}$	$9,2120881890878 \cdot 10^{-4}$	$-9,2120881890878 \cdot 10^{-4}$
$4,75269068545 \cdot 10^{-9}$	$9,2100619804114 \cdot 10^{-4}$	$-9,2100619804114 \cdot 10^{-4}$
$4,8319019896326 \cdot 10^{-9}$	$9,1921095736325 \cdot 10^{-4}$	$-9,1921095736325 \cdot 10^{-4}$
$4,9111137379043 \cdot 10^{-9}$	$9,1870344476774 \cdot 10^{-4}$	$-9,1870344476774 \cdot 10^{-4}$
$4,9903250420869 \cdot 10^{-9}$	$9,189749835059 \cdot 10^{-4}$	$-9,189749835059 \cdot 10^{-4}$
$5,0695367903586 \cdot 10^{-9}$	$9,1734185116366 \cdot 10^{-4}$	$-9,1734185116366 \cdot 10^{-4}$

Fonte: elaborado pelo autor [2025].

Tabela 4 - Tensões e correntes elétricas da pirâmide de espiras quadradas conectadas eletricamente em série, sob espectro de 2,0 a 5,4 GHz

(continua)

Tensões e correntes elétricas no tempo		
Tempo (s)	Tensão elétrica (V)	Corrente elétrica (A)
$2,2556629897252 \cdot 10^{-9}$	$8,1691233208403 \cdot 10^{-4}$	$-8,1691233208403 \cdot 10^{-4}$
$2,2966748502995 \cdot 10^{-9}$	$8,3328579785302 \cdot 10^{-4}$	$-8,3328579785302 \cdot 10^{-4}$
$2,3376869329184 \cdot 10^{-9}$	$8,4858277114108 \cdot 10^{-4}$	$-8,4858277114108 \cdot 10^{-4}$
$2,3786990155372 \cdot 10^{-9}$	$8,6016452405602 \cdot 10^{-4}$	$-8,6016452405602 \cdot 10^{-4}$
$2,4197110981561 \cdot 10^{-9}$	$8,7289488874376 \cdot 10^{-4}$	$-8,7289488874376 \cdot 10^{-4}$
$2,4607231807749 \cdot 10^{-9}$	$8,9060520986095 \cdot 10^{-4}$	$-8,9060520986095 \cdot 10^{-4}$
$2,5017352633938 \cdot 10^{-9}$	$9,0925983386114 \cdot 10^{-4}$	$-9,0925983386114 \cdot 10^{-4}$
$2,5427473460127 \cdot 10^{-9}$	$9,2394900275394 \cdot 10^{-4}$	$-9,2394900275394 \cdot 10^{-4}$
$2,5837594286315 \cdot 10^{-9}$	$9,360367548652 \cdot 10^{-4}$	$-9,360367548652 \cdot 10^{-4}$
$2,6247712892058 \cdot 10^{-9}$	$9,4771955627948 \cdot 10^{-4}$	$-9,4771955627948 \cdot 10^{-4}$

Tabela 4 - Tensões e correntes elétricas da pirâmide de espiras quadradas conectadas eletricamente em série, sob espectro de 2,0 a 5,4 GHz

(conclusão)

Tensões e correntes elétricas no tempo		
Tempo (s)	Tensão elétrica (V)	Corrente elétrica (A)
$2,6657833718247 \cdot 10^{-9}$	$9,5614057499915 \cdot 10^{-4}$	$-9,5614057499915 \cdot 10^{-4}$
$2,7067954544435 \cdot 10^{-9}$	$9,5918407896534 \cdot 10^{-4}$	$-9,5918407896534 \cdot 10^{-4}$
$2,7478075370624 \cdot 10^{-9}$	$9,6053548622876 \cdot 10^{-4}$	$-9,6053548622876 \cdot 10^{-4}$
$2,7888196196812 \cdot 10^{-9}$	$9,6268072957173 \cdot 10^{-4}$	$-9,6268072957173 \cdot 10^{-4}$
$2,8298317023001 \cdot 10^{-9}$	$9,6141279209405 \cdot 10^{-4}$	$-9,6141279209405 \cdot 10^{-4}$
$2,870843784919 \cdot 10^{-9}$	$9,5322029665112 \cdot 10^{-4}$	$-9,5322029665112 \cdot 10^{-4}$
$2,9118556454932 \cdot 10^{-9}$	$9,412431390956 \cdot 10^{-4}$	$-9,412431390956 \cdot 10^{-4}$
$2,9528677281121 \cdot 10^{-9}$	$9,283556137234 \cdot 10^{-4}$	$-9,283556137234 \cdot 10^{-4}$
$2,993879810731 \cdot 10^{-9}$	$9,1199786402285 \cdot 10^{-4}$	$-9,1199786402285 \cdot 10^{-4}$
$3,0348918933498 \cdot 10^{-9}$	$8,9121871860698 \cdot 10^{-4}$	$-8,9121871860698 \cdot 10^{-4}$
$3,0759039759687 \cdot 10^{-9}$	$8,7072810856625 \cdot 10^{-4}$	$-8,7072810856625 \cdot 10^{-4}$
$3,1169160585875 \cdot 10^{-9}$	$8,5295981261879 \cdot 10^{-4}$	$-8,5295981261879 \cdot 10^{-4}$
$3,1579281412064 \cdot 10^{-9}$	$8,3410507068038 \cdot 10^{-4}$	$-8,3410507068038 \cdot 10^{-4}$
$3,1989402238253 \cdot 10^{-9}$	$8,1199954729527 \cdot 10^{-4}$	$-8,1199954729527 \cdot 10^{-4}$
$3,2399520843995 \cdot 10^{-9}$	$7,8990345355123 \cdot 10^{-4}$	$-7,8990345355123 \cdot 10^{-4}$
$3,2809641670184 \cdot 10^{-9}$	$7,6965795597062 \cdot 10^{-4}$	$-7,6965795597062 \cdot 10^{-4}$

Fonte: elaborado pelo autor [2025].

Tabela 5 - Tensões e correntes elétricas do espiral plano, sob espectro de 2,0 a 3,0 GHz

(continua)

Tensões e correntes elétricas no tempo		
Tempo (s)	Tensão elétrica (V)	Corrente elétrica (A)
$5,8284110870943 \cdot 10^{-9}$	$4,7970900777727 \cdot 10^{-4}$	$-4,7970900777727 \cdot 10^{-4}$
$5,9093610005334 \cdot 10^{-9}$	$4,8193143447861 \cdot 10^{-4}$	$-4,8193143447861 \cdot 10^{-4}$
$5,9903113580617 \cdot 10^{-9}$	$4,8276750021614 \cdot 10^{-4}$	$-4,8276750021614 \cdot 10^{-4}$
$6,07126171559 \cdot 10^{-9}$	$4,8170020454563 \cdot 10^{-4}$	$-4,8170020454563 \cdot 10^{-4}$
$6,1522116290291 \cdot 10^{-9}$	$4,8226825310849 \cdot 10^{-4}$	$-4,8226825310849 \cdot 10^{-4}$
$6,2331619865574 \cdot 10^{-9}$	$4,8582800081931 \cdot 10^{-4}$	$-4,8582800081931 \cdot 10^{-4}$
$6,3141118999965 \cdot 10^{-9}$	$4,8848352162167 \cdot 10^{-4}$	$-4,8848352162167 \cdot 10^{-4}$

Tabela 5 - Tensões e correntes elétricas do espiral plano, sob espectro de 2,0 a 3,0 GHz

(conclusão)

Tensões e correntes elétricas no tempo		
Tempo (s)	Tensão elétrica (V)	Corrente elétrica (A)
$6,3950622575248 \cdot 10^{-9}$	$4,8755286843516 \cdot 10^{-4}$	$-4,8755286843516 \cdot 10^{-4}$
$6,4760121709639 \cdot 10^{-9}$	$4,8564825556241 \cdot 10^{-4}$	$-4,8564825556241 \cdot 10^{-4}$
$6,5569625284922 \cdot 10^{-9}$	$4,8467301530764 \cdot 10^{-4}$	$-4,8467301530764 \cdot 10^{-4}$
$6,6379124419313 \cdot 10^{-9}$	$4,8164630425163 \cdot 10^{-4}$	$-4,8164630425163 \cdot 10^{-4}$
$6,7188627994597 \cdot 10^{-9}$	$4,751957312692 \cdot 10^{-4}$	$-4,751957312692 \cdot 10^{-4}$
$6,7998127128988 \cdot 10^{-9}$	$4,6996094170026 \cdot 10^{-4}$	$-4,6996094170026 \cdot 10^{-4}$
$6,8807630704271 \cdot 10^{-9}$	$4,6929781092331 \cdot 10^{-4}$	$-4,6929781092331 \cdot 10^{-4}$

Fonte: elaborado pelo autor [2025].

Tabela 6 - Tensões e correntes elétricas do espiral plano, sob espectro de 2,0 a 5,4 GHz

(continua)

Tensões e correntes elétricas no tempo		
Tempo (s)	Tensão elétrica (V)	Corrente elétrica (A)
$5,6475926157873 \cdot 10^{-9}$	$2,7432688511908 \cdot 10^{-4}$	$-2,7432688511908 \cdot 10^{-4}$
$5,6938844750221 \cdot 10^{-9}$	$2,776995243039 \cdot 10^{-4}$	$-2,776995243039 \cdot 10^{-4}$
$5,7401763342568 \cdot 10^{-9}$	$2,8591009322554 \cdot 10^{-4}$	$-2,8591009322554 \cdot 10^{-4}$
$5,7864677494024 \cdot 10^{-9}$	$2,9601133428514 \cdot 10^{-4}$	$-2,9601133428514 \cdot 10^{-4}$
$5,8327596086372 \cdot 10^{-9}$	$3,0245183734223 \cdot 10^{-4}$	$-3,0245183734223 \cdot 10^{-4}$
$5,8790514678719 \cdot 10^{-9}$	$3,0496716499329 \cdot 10^{-4}$	$-3,0496716499329 \cdot 10^{-4}$
$5,9253428830175 \cdot 10^{-9}$	$3,0684817465954 \cdot 10^{-4}$	$-3,0684817465954 \cdot 10^{-4}$
$5,9716347422523 \cdot 10^{-9}$	$3,0887906905264 \cdot 10^{-4}$	$-3,0887906905264 \cdot 10^{-4}$
$6,017926601487 \cdot 10^{-9}$	$3,1097340979613 \cdot 10^{-4}$	$-3,1097340979613 \cdot 10^{-4}$
$6,0642184607218 \cdot 10^{-9}$	$3,1498441239819 \cdot 10^{-4}$	$-3,1498441239819 \cdot 10^{-4}$
$6,1105098758674 \cdot 10^{-9}$	$3,1960784690455 \cdot 10^{-4}$	$-3,1960784690455 \cdot 10^{-4}$
$6,1568017351021 \cdot 10^{-9}$	$3,1967961695045 \cdot 10^{-4}$	$-3,1967961695045 \cdot 10^{-4}$
$6,2030935943369 \cdot 10^{-9}$	$3,1398542341776 \cdot 10^{-4}$	$-3,1398542341776 \cdot 10^{-4}$
$6,2493854535717 \cdot 10^{-9}$	$3,0684925150126 \cdot 10^{-4}$	$-3,0684925150126 \cdot 10^{-4}$
$6,2956768687172 \cdot 10^{-9}$	$3,0103541212156 \cdot 10^{-4}$	$-3,0103541212156 \cdot 10^{-4}$
$6,341968727952 \cdot 10^{-9}$	$2,9645077302121 \cdot 10^{-4}$	$-2,9645077302121 \cdot 10^{-4}$

Tabela 6 - Tensões e correntes elétricas do espiral plano, sob espectro de 2,0 a 5,4 GHz

(conclusão)

Tensões e correntes elétricas no tempo		
Tempo (s)	Tensão elétrica (V)	Corrente elétrica (A)
$6,3882605871868 \cdot 10^{-9}$	$2,9564864234999 \cdot 10^{-4}$	$-2,9564864234999 \cdot 10^{-4}$
$6,4345524464215 \cdot 10^{-9}$	$2,9937419458292 \cdot 10^{-4}$	$-2,9937419458292 \cdot 10^{-4}$
$6,4808438615671 \cdot 10^{-9}$	$3,0208594398573 \cdot 10^{-4}$	$-3,0208594398573 \cdot 10^{-4}$
$6,5271357208019 \cdot 10^{-9}$	$3,0209531541914 \cdot 10^{-4}$	$-3,0209531541914 \cdot 10^{-4}$
$6,5734275800367 \cdot 10^{-9}$	$3,0156341381371 \cdot 10^{-4}$	$-3,0156341381371 \cdot 10^{-4}$
$6,6197194392714 \cdot 10^{-9}$	$2,9857517802157 \cdot 10^{-4}$	$-2,9857517802157 \cdot 10^{-4}$
$6,666010854417 \cdot 10^{-9}$	$2,9462407110259 \cdot 10^{-4}$	$-2,9462407110259 \cdot 10^{-4}$

Fonte: elaborado pelo autor [2025].

Tabela 7 - Tensões e correntes elétricas da pirâmide completa de espiras quadradas paralelas, sob espectro de 2,0 a 3,0 GHz

Tensões e correntes elétricas no tempo		
Tempo (s)	Tensão elétrica (V)	Corrente elétrica (A)
$2,1817401218982 \cdot 10^{-9}$	$2,6007567066699 \cdot 10^{-3}$	$-2,6007567066699 \cdot 10^{-3}$
$2,2625454842995 \cdot 10^{-9}$	$2,6186876930296 \cdot 10^{-3}$	$-2,6186876930296 \cdot 10^{-3}$
$2,3433506246562 \cdot 10^{-9}$	$2,6401747018099 \cdot 10^{-3}$	$-2,6401747018099 \cdot 10^{-3}$
$2,4241557650129 \cdot 10^{-9}$	$2,6648994535208 \cdot 10^{-3}$	$-2,6648994535208 \cdot 10^{-3}$
$2,5049609053696 \cdot 10^{-9}$	$2,6872644666582 \cdot 10^{-3}$	$-2,6872644666582 \cdot 10^{-3}$
$2,5857662677709 \cdot 10^{-9}$	$2,7006973978132 \cdot 10^{-3}$	$-2,7006973978132 \cdot 10^{-3}$
$2,6665714081275 \cdot 10^{-9}$	$2,7047381736338 \cdot 10^{-3}$	$-2,7047381736338 \cdot 10^{-3}$
$2,7473765484842 \cdot 10^{-9}$	$2,7049754280597 \cdot 10^{-3}$	$-2,7049754280597 \cdot 10^{-3}$
$2,8281816888409 \cdot 10^{-9}$	$2,7046846225858 \cdot 10^{-3}$	$-2,7046846225858 \cdot 10^{-3}$
$2,9089868291976 \cdot 10^{-9}$	$2,6991988997906 \cdot 10^{-3}$	$-2,6991988997906 \cdot 10^{-3}$
$2,9897921915989 \cdot 10^{-9}$	$2,6844865642488 \cdot 10^{-3}$	$-2,6844865642488 \cdot 10^{-3}$
$3,0705973319556 \cdot 10^{-9}$	$2,6642489247024 \cdot 10^{-3}$	$-2,6642489247024 \cdot 10^{-3}$
$3,1514024723123 \cdot 10^{-9}$	$2,6424385141581 \cdot 10^{-3}$	$-2,6424385141581 \cdot 10^{-3}$
$3,232207612669 \cdot 10^{-9}$	$2,6232285890728 \cdot 10^{-3}$	$-2,6232285890728 \cdot 10^{-3}$

Fonte: elaborado pelo autor [2025].

Tabela 8 - Tensões e correntes elétricas da pirâmide completa de espiras quadradas paralelas, sob espectro de 2,0 a 5,4 GHz

(continua)

Tensões e correntes elétricas no tempo		
Tempo (s)	Tensão elétrica (V)	Corrente elétrica (A)
$3,0300191244947 \cdot 10^{-9}$	$2,9415851458907 \cdot 10^{-3}$	$-2,9415851458907 \cdot 10^{-3}$
$3,0674267570419 \cdot 10^{-9}$	$2,95100803487 \cdot 10^{-3}$	$-2,95100803487 \cdot 10^{-3}$
$3,104834389589 \cdot 10^{-9}$	$2,9573363717645 \cdot 10^{-3}$	$-2,9573363717645 \cdot 10^{-3}$
$3,1422420221361 \cdot 10^{-9}$	$2,9630311764777 \cdot 10^{-3}$	$-2,9630311764777 \cdot 10^{-3}$
$3,1796496546832 \cdot 10^{-9}$	$2,9676253907382 \cdot 10^{-3}$	$-2,9676253907382 \cdot 10^{-3}$
$3,2170572872303 \cdot 10^{-9}$	$2,969155786559 \cdot 10^{-3}$	$-2,969155786559 \cdot 10^{-3}$
$3,2544649197774 \cdot 10^{-9}$	$2,9680579900742 \cdot 10^{-3}$	$-2,9680579900742 \cdot 10^{-3}$
$3,2918725523245 \cdot 10^{-9}$	$2,9665587935597 \cdot 10^{-3}$	$-2,9665587935597 \cdot 10^{-3}$
$3,3292804069163 \cdot 10^{-9}$	$2,9660288710147 \cdot 10^{-3}$	$-2,9660288710147 \cdot 10^{-3}$
$3,3666880394634 \cdot 10^{-9}$	$2,966605592519 \cdot 10^{-3}$	$-2,966605592519 \cdot 10^{-3}$
$3,4040956720105 \cdot 10^{-9}$	$2,9678593855351 \cdot 10^{-3}$	$-2,9678593855351 \cdot 10^{-3}$
$3,4415033045576 \cdot 10^{-9}$	$2,9693038668483 \cdot 10^{-3}$	$-2,9693038668483 \cdot 10^{-3}$
$3,4789109371047 \cdot 10^{-9}$	$2,9706063214689 \cdot 10^{-3}$	$-2,9706063214689 \cdot 10^{-3}$
$3,5163185696518 \cdot 10^{-9}$	$2,970633096993 \cdot 10^{-3}$	$-2,970633096993 \cdot 10^{-3}$
$3,553726202199 \cdot 10^{-9}$	$2,9670903459191 \cdot 10^{-3}$	$-2,9670903459191 \cdot 10^{-3}$
$3,5911338347461 \cdot 10^{-9}$	$2,9588949400932 \cdot 10^{-3}$	$-2,9588949400932 \cdot 10^{-3}$
$3,6285414672932 \cdot 10^{-9}$	$2,9472750611603 \cdot 10^{-3}$	$-2,9472750611603 \cdot 10^{-3}$
$3,6659490998403 \cdot 10^{-9}$	$2,9329417739064 \cdot 10^{-3}$	$-2,9329417739064 \cdot 10^{-3}$
$3,7033567323874 \cdot 10^{-9}$	$2,9150664340705 \cdot 10^{-3}$	$-2,9150664340705 \cdot 10^{-3}$
$3,7407645869791 \cdot 10^{-9}$	$2,8949084226042 \cdot 10^{-3}$	$-2,8949084226042 \cdot 10^{-3}$
$3,7781719974816 \cdot 10^{-9}$	$2,876696176827 \cdot 10^{-3}$	$-2,876696176827 \cdot 10^{-3}$
$3,8155798520734 \cdot 10^{-9}$	$2,8626313433051 \cdot 10^{-3}$	$-2,8626313433051 \cdot 10^{-3}$
$3,8529872625759 \cdot 10^{-9}$	$2,8504435904324 \cdot 10^{-3}$	$-2,8504435904324 \cdot 10^{-3}$
$3,8903951171676 \cdot 10^{-9}$	$2,8380884323269 \cdot 10^{-3}$	$-2,8380884323269 \cdot 10^{-3}$
$3,9278025276701 \cdot 10^{-9}$	$2,8274687938392 \cdot 10^{-3}$	$-2,8274687938392 \cdot 10^{-3}$
$3,9652103822618 \cdot 10^{-9}$	$2,8210435993969 \cdot 10^{-3}$	$-2,8210435993969 \cdot 10^{-3}$
$4,0026177927643 \cdot 10^{-9}$	$2,8176307678223 \cdot 10^{-3}$	$-2,8176307678223 \cdot 10^{-3}$
$4,0400256473561 \cdot 10^{-9}$	$2,8142922092229 \cdot 10^{-3}$	$-2,8142922092229 \cdot 10^{-3}$
$4,0774330578586 \cdot 10^{-9}$	$2,8101911302656 \cdot 10^{-3}$	$-2,8101911302656 \cdot 10^{-3}$

Tabela 8 - Tensões e correntes elétricas da pirâmide completa de espiras quadradas paralelas, sob espectro de 2,0 a 5,4 GHz

(conclusão)

Tensões e correntes elétricas no tempo		
Tempo (s)	Tensão elétrica (V)	Corrente elétrica (A)
$4,1148409124503 \cdot 10^{-9}$	$2,806231379509 \cdot 10^{-3}$	$-2,806231379509 \cdot 10^{-3}$
$4,1522483229528 \cdot 10^{-9}$	$2,8028476517648 \cdot 10^{-3}$	$-2,8028476517648 \cdot 10^{-3}$
$4,1896561775445 \cdot 10^{-9}$	$2,7999929152429 \cdot 10^{-3}$	$-2,7999929152429 \cdot 10^{-3}$
$4,227063588047 \cdot 10^{-9}$	$2,7976050041616 \cdot 10^{-3}$	$-2,7976050041616 \cdot 10^{-3}$
$4,2644714426388 \cdot 10^{-9}$	$2,7955104596913 \cdot 10^{-3}$	$-2,7955104596913 \cdot 10^{-3}$
$4,3018788531413 \cdot 10^{-9}$	$2,7941027656198 \cdot 10^{-3}$	$-2,7941027656198 \cdot 10^{-3}$

Fonte: elaborado pelo autor [2025].