

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL  
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E  
ENGENHARIAS**

**RAFAEL DA SILVA VARGAS DE LIMA**

**ANÁLISE DA TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA SEM FIO  
USANDO MICRO-ONDAS PARA REGIÃO DOS CAMPOS DE CIMA  
DA SERRA EM UMA ÁREA DE DIFÍCIL ACESSO**

**CAXIAS DO SUL**

**2024**

**RAFAEL DA SILVA VARGAS DE LIMA**

**ANÁLISE DA TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA SEM FIO  
USANDO MICRO-ONDAS PARA REGIÃO DOS CAMPOS DE CIMA  
DA SERRA EM UMA ÁREA DE DIFÍCIL ACESSO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica na Área do Conhecimento de Ciências Exatas e Engenharias da Universidade de Caxias do Sul.

Orientador: Prof. Dr. André Bernardes Michel

**CAXIAS DO SUL**

**2024**

**RAFAEL DA SILVA VARGAS DE LIMA**

**ANÁLISE DA TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA SEM FIO  
USANDO MICRO-ONDAS PARA REGIÃO DOS CAMPOS DE CIMA  
DA SERRA EM UMA ÁREA DE DIFÍCIL ACESSO**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como requisito parcial  
à obtenção do título de bacharel em  
Engenharia Elétrica na Área do Co-  
nhecimento de Ciências Exatas e  
Engenharias da Universidade de Caxias  
do Sul.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. André Bernardes Michel  
Universidade de Caxias do Sul - UCS

---

Prof. Dr. Alexandre Mesquita  
Universidade de Caxias do Sul - UCS

---

Prof. Dr. Tiago Cassol Severo  
Universidade de Caxias do Sul - UCS

*Dedico este trabalho a todas as pessoas que estiveram ao meu lado durante esta jornada acadêmica, com especial gratidão a meu pai Enio Vargas de Lima em memória, minha mãe Rosa Maria da Silva Lima. Seu apoio inabalável e palavras de incentivo foram essenciais para alcançar este marco em minha vida.*

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que tornaram possível a realização deste trabalho. Em primeiro lugar, sou profundamente grato ao meu orientador Prof. André Bernardes Michel, pela orientação cuidadosa, *insights* valiosos e apoio constante ao longo deste processo. Sua dedicação e expertise foram fundamentais para a condução deste estudo.

Agradeço também aos membros da banca examinadora, Prof. Alexandre Mesquita e Prof. André Bernardes Michel, por dedicarem seu tempo e expertise na análise crítica deste trabalho, fornecendo sugestões construtivas que contribuíram significativamente para sua melhoria.

À minha família e amigos, especialmente Enio Vargas de Lima, Rosa Maria da Silva Lima, Ana Paula da Silva Vargas de Lima e Beatriz dos Santos Pinheiro por seu apoio incondicional, paciência e encorajamento ao longo dos desafios enfrentados durante este caminho. Suas palavras de ânimo foram um suporte indispensável nos momentos de dúvida e cansaço.

Aos colegas de curso e colaboradores, pela troca de ideias, discussões estimulantes e apoio mútuo durante todo o processo de pesquisa e escrita. Suas contribuições foram inestimáveis para o desenvolvimento e aprimoramento deste trabalho.

Por fim, agradeço à instituição Universidade de Caxias do Sul (UCS) por proporcionar os recursos necessários para a realização deste estudo e por fomentar um ambiente propício ao aprendizado e à pesquisa.

Cada um de vocês desempenhou um papel fundamental nesta jornada acadêmica, e por isso, meu mais profundo reconhecimento e gratidão.

*“O futuro pertence aos que acreditam na beleza de seus sonhos.”*

***Nikola Tesla***

## RESUMO

Este trabalho analisa a viabilidade de um sistema de transmissão de energia elétrica sem fio na região rural de Vacaria, no Rio Grande do Sul, caracterizada pelo difícil acesso e pela carência de infraestrutura básica. A proposta utiliza uma antena parabólica Cassegrain e um gerador Magnetron para transmissão de energia por micro-ondas, oferecendo uma solução para atender comunidades remotas. A abordagem inclui análises teóricas e simulações detalhadas, avaliando parâmetros como ganho, diretividade e perdas de propagação. A antena Cassegrain demonstrou boa capacidade de concentração do feixe, controle de radiação e um ganho de 35 dBi no lóbulo principal, garantindo eficiência na transferência de energia, enquanto sua configuração apresentou atenuação significativa nos lóbulos secundários, reduzindo perdas e interferências. O gerador Magnetron, operando a 3 GHz, forneceu a estabilidade e a potência necessárias ao sistema. O resultado da simulação indicam que, para uma potência de transmissão de 10 kW, a potência recebida foi de aproximadamente 3 kW, refletindo a eficiência do sistema em condições reais, considerando fatores como absorção atmosférica, obstruções e perdas inerentes ao feixe de micro-ondas. A configuração mostrou-se funcional e eficaz para aplicações em áreas de difícil acesso, comprovando sua adequação às necessidades de comunidades isoladas.

**Palavras-chave:** Transmissão de energia sem fio, Micro-ondas, Antena Parabólica Cassegrain, Gerador Magnetron, Vacaria, Energia elétrica, Simulações, Diretividade, Controle de Radiação

## ABSTRACT

This work analyzes the feasibility of a wireless electric power transmission system in the rural area of *Vacaria, Rio Grande do Sul*, characterized by difficult access and a lack of basic infrastructure. The proposal employs a Cassegrain parabolic antenna and a Magnetron generator for microwave power transmission, offering a solution to serve remote communities. The approach includes theoretical analyses and detailed simulations, evaluating parameters such as gain, directivity, and propagation losses. The Cassegrain antenna demonstrated good beam concentration, radiation control, and a gain of 35 dBi in the main lobe, ensuring efficient energy transfer, while its configuration showed significant attenuation in the side lobes, reducing losses and interference. The Magnetron generator, operating at 3 GHz, provided the stability and power required for the system. Simulation results indicate that for a transmission power of 10 kW, the received power was approximately 3 kW, reflecting the system's efficiency under real conditions, considering factors such as atmospheric absorption, obstructions, and inherent microwave beam losses. The configuration proved functional and effective for applications in hard-to-reach areas, demonstrating its suitability for meeting the needs of isolated communities.

**Keywords:** Wireless power transmission, Microwaves, Cassegrain parabolic antenna, Magnetron generator, Vacaria, Electric power, Simulations, Directivity, Radiation control.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tendência de Crescimento Significativo na Pesquisa Transmissão de Energia Sem Fio ( <i>Wireless Power Transfer</i> ) (WPT) . . . . .	20
Figura 2 – Número Anual de Artigos de Pesquisa Acadêmica da WPT . . . . .	21
Figura 3 – Países e Áreas que Realizam Pesquisa em Tecnologia de WPT . . . . .	21
Figura 4 – Número Anual de Quedas de Energia. . . . .	22
Figura 5 – Número de Acidentes de Segurança Elétrica e Fatalidades na China de 2014 a 2020, e os Componentes desses Acidentes. . . . .	23
Figura 6 – Nikola Tesla e suas Invenções. . . . .	26
Figura 7 – Representação por Indução. . . . .	27
Figura 8 – Campo Magnético entre Bobinas. . . . .	27
Figura 9 – Acoplamento Ressonante Magnético. . . . .	29
Figura 10 – Transmissão de Energia Elétrica por Lasers. . . . .	30
Figura 11 – Transferência de Energia por Ondas Eletromagnéticas. . . . .	33
Figura 12 – Antena Parabólica. . . . .	37
Figura 13 – Configuração da Antena de <i>Cassegrain</i> . . . . .	38
Figura 14 – Antena <i>Phased Array</i> . . . . .	41
Figura 15 – Gerador Magnetron. . . . .	45
Figura 16 – Diagrama Klystron de duas Cavidades. . . . .	49
Figura 17 – Oscilador Maser. . . . .	51
Figura 18 – Arquitetura e Aplicação do Sistema Transmissão de Energia por Micro-ondas ( <i>Microwave Power Transmission</i> ) (MWPT) de Alta Potência de Longa Distância. . . . .	53
Figura 19 – Esboço Estrutural do novo <i>Magnetron</i> Ressonante Assimétrico de Alta Potência e seus Principais Componentes. . . . .	54
Figura 20 – Imagem do Local a ser Estudado para a Simulação . . . . .	57
Figura 21 – Fluxograma de Transmissão de Energia Elétrica sem Fio por Micro-ondas. . . . .	58
Figura 22 – Modelagem da Antena Refletora Cassegrain de 15 metros no <i>CADFEKO</i> . . . . .	60
Figura 23 – Montagem da Corneta Cônica . . . . .	61
Figura 24 – Modelo do <i>subrefletor</i> da Antena Parabólica Cassegrain . . . . .	61
Figura 25 – Imagem da Montagem da Antena de Cassegrain . . . . .	62
Figura 26 – Simulação das Micro-ondas na Antena de Cassegrain Receptora . . . . .	63
Figura 27 – Simulação das Micro-ondas na Antena de Cassegrain Transmissora . . . . .	63
Figura 28 – Modelagem da Antena de Cassegrain desenvolvida no <i>SolidWorks</i> . . . . .	64
Figura 29 – Modelo do Transmissor (ACME-MW10KW) . . . . .	70
Figura 30 – Gráfico do Campo Distante para a Antena Cassegrain Cônica Transmissora em 3 GHz. . . . .	74

Figura 31 – Gráfico Polar de Radiação . . . . .	75
Figura 32 – Gráfico do Coeficiente de Reflexão . . . . .	76
Figura 33 – Potência Total Irradiada . . . . .	76
Figura 34 – Gráfico do Ângulo de Disparo . . . . .	77
Figura 35 – Gráfico da Reflexão Máxima . . . . .	77
Figura 36 – Gráfico Coeficiente de Reflexão em dB . . . . .	78
Figura 37 – Gráfico da Perda por Incompatibilidade . . . . .	78
Figura 38 – Coeficiente de Reflexão e Campo Elétrico . . . . .	79
Figura 39 – Reflexão das Micro-ondas no Espaço Livre . . . . .	79
Figura 40 – Reflexão das Micro-ondas no Espaço Livre . . . . .	80
Figura 41 – Distribuição do Ganho em Função dos Ângulos $\theta$ e $\phi$ . . . . .	80
Figura 42 – Rotação de Polarização $Z + 45^\circ$ . . . . .	81
Figura 43 – Rotação de Polarização $Z - 45^\circ$ . . . . .	81
Figura 44 – Radiação Cruzada Utilizando o Método <i>Ludwig III (Cross)</i> . . . . .	82
Figura 45 – Distribuição do Ganho da Antena Cassegrain . . . . .	82
Figura 46 – Diagrama de Radiação Polar Receptor Cassegrain . . . . .	83
Figura 47 – Gráfico do Ganho Total da Antena . . . . .	84
Figura 48 – Carta de <i>Smith</i> do Receptor Cassegrain . . . . .	84
Figura 49 – Carta de <i>Smith</i> do Receptor Cassegrain . . . . .	85
Figura 50 – Gráfico da Atenuação do Ganho . . . . .	85
Figura 51 – Gráfico do Ganho Polarizado . . . . .	86
Figura 52 – Gráfico do Ganho em Função da Frequência . . . . .	86
Figura 53 – Gráfico da Perda por Desadaptamento. . . . .	87
Figura 54 – Gráfico Coeficiente de Reflexão Real . . . . .	87
Figura 55 – Gráfico do Ganho <i>Ludwig</i> . . . . .	88
Figura 56 – Gráfico do Ganho ao Longo do Espectro . . . . .	88
Figura 57 – Gráfico do Ganho Gradual . . . . .	89
Figura 58 – Coeficiente de Reflexão . . . . .	89
Figura 59 – Coeficiente de Reflexão Imaginário . . . . .	90
Figura 60 – Potência Total Irradiada no Campo Distante em Função da Frequência. . . . .	90
Figura 61 – Distribuição do Ganho Total da Antena Refletora. . . . .	91
Figura 62 – Ganho no Campo Distante da Antena Cassegrain . . . . .	91
Figura 63 – Ganho Co-polarizado ( <i>Ludwig III Co-polarization</i> ) . . . . .	92
Figura 64 – Ganho da Polarização Circular Esquerda ( <i>LHC - Left-Hand Circular</i> ) . . . . .	92
Figura 65 – Ganho em Campo Distante para $Z+45^\circ$ . . . . .	93
Figura 66 – Ganho em Campo Distante para $\Phi$ . . . . .	93
Figura 67 – Ganho para <i>Ludwig III (Cross)</i> . . . . .	94
Figura 68 – Ganho em Polarização Circular Direita (RHC). . . . .	94
Figura 69 – Ganho em Polarização Linear Inclinada ( $S-45^\circ$ ). . . . .	95

Figura 70 – Ganho Total no Plano UV. . . . .	95
Figura 71 – Ganho para Polarização Circular à Esquerda (LHC) . . . . .	96
Figura 72 – Ganho Total em Campo Distante . . . . .	96

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação de Transmissão de Energia sem Fio . . . . .	34
Tabela 2 – Comparação entre Diferentes Métodos de Transferência de Energia sem Fio	35
Tabela 3 – Desafios Enfrentados em Diversas Técnicas de Transferência de Energia sem Fio . . . . .	36
Tabela 4 – Especificações das Antenas para Transmissão de Energia sem Fio por Micro-ondas . . . . .	44
Tabela 5 – Comparação de Geradores de Micro-ondas . . . . .	52
Tabela 6 – Informações Básicas do Equipamento ACME-MW10KW . . . . .	71
Tabela 7 – Folha de Dados do Magnetron . . . . .	72
Tabela 8 – Definições da Interface da Fonte de Alimentação de Alta Frequência . . . . .	73

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>UCS</b>	Universidade de Caxias do Sul
<b>MIT</b>	Instituto de Tecnologia de Massachusetts ( <i>Massachusetts Institute of Technology</i> )
<b>MRC</b>	Acoplamento Ressonante Magnético ( <i>Magnetic Resonant Coupling</i> )
<b>WPT</b>	Transmissão de Energia Sem Fio ( <i>Wireless Power Transfer</i> )
<b>AC</b>	Corrente Alternada ( <i>Alternating Current</i> )
<b>DC</b>	Corrente Contínua ( <i>direct current</i> )
<b>RF</b>	Frequência de Rádio ( <i>Radio Frequency</i> )
<b>USTCE</b>	Universidade de Ciência e Tecnologia Eletrônica da China
<b>MW</b>	Micro-ondas ( <i>Microwaves</i> )
<b>EVs</b>	Veículos Elétricos ( <i>Electric Vehicles</i> )
<b>MWPT</b>	Transmissão de Energia por Micro-ondas ( <i>Microwave Power Transmission</i> )
<b>LHC</b>	Polarização Circular à Esquerda ( <i>Left-Hand Circular</i> )
<b>RHC</b>	Polarização Circular à Direita ( <i>Right-Hand Circular</i> )
<b>HPBW</b>	Largura de Feixe a Meio-Potência ( <i>Half-Power Beamwidth</i> )
<b>MoM</b>	Método dos Momentos ( <i>Method of Moments</i> )
<b>RL-GO</b>	Lançamento de Raios em Óptica Geométrica ( <i>Ray Launching Geometrical Optics</i> )

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$	Constante de Dispersão
$\beta$	Constante de Fase
$\gamma$	Fator de Reflexão
$\mu\text{rad}$	Microrradiano
$\text{Hz}$	Hertz
$\text{kHz}$	Quilohertz
$\text{GHz}$	Gigahertz
$\text{MHz}$	Megahertz
$\text{km}$	Quilômetro
$\text{m}$	Metro
$\text{cm}$	Centimetro
$\text{mm}$	Milímetros
$\text{W}$	Watts
$\text{mW}$	Miliwatts
$\text{kW}$	Quilowatts
$\text{Mw}$	Megawatts
$\%$	Por-cento
$V_t$	Velocidade Tangencial dos Elétrons
$V_p$	Velocidade de Fase da Onda Viajante
$\omega$	Frequência Angular da Ressonância
$r_{um}$	Raio da Superfície Interna do Ânodo
$n$	Número do Modo
$V$	Tensão de Operação
$V_{um}$	Tensão de Corte

$V_t$	Tensão Síncrona
$\sigma_A$	Dispersão do Erro de Medição de Fase no Ponto A
$\sigma_B$	Dispersão do Erro de Medição de Fase no Ponto B
$\sigma_n$	Dispersão do Erro de Fase da Saída de Micro-ondas
$\sigma$	Desvio Padrão da Fase de Saída de Todos os Elementos de Antena no Módulo do Painel
$F1$	Ponto Focal 1
$D$	Abertura
$F2$	Ponto Focal 2
$L$	Comprimento da Linha de Alimentação
$d$	Diâmetro do Chifre
$C$	Distância Focal
$F$	Distância Focal do Sub-refletor
$AB$	Ponto de A até B
$cd$	Candela
$dBi$	Decibéis
$\nabla \cdot$	Operador Divergente
$\nabla \times$	Operador Rotacional
$E$	Campo Elétrico
$B$	Campo Magnético
$\rho$	Densidade de Carga Elétrica
$\epsilon_0$	Permitividade do Vácuo
$\mu_0$	Permeabilidade do Vácuo
$J$	Densidade de Corrente Elétrica
$t$	Tempo
$A_e$	Área Efetiva da Antena

$\lambda$	Comprimento de Onda
$P_t$	Potência Transmitida
$G_t$	Ganho da Antena Transmissora
$G_r$	Ganho da antena Receptora
$L_p$	Perda de Propagação no Espaço Livre
$\eta$	Eficiência da Antena
$\log_{10}$	Logaritmo na Base 10
$\phi$	Ângulo Phi
$\theta$	Ângulo Theta



# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>18</b>
<b>1.1</b>	<b>Pesquisas e Tendências Sobre a WPT</b>	<b>19</b>
<b>1.2</b>	<b>Justificativa</b>	<b>21</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos</b>	<b>23</b>
<b>1.4</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>23</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>25</b>
<b>2.1</b>	<b>Princípio da Energia Elétrica Sem Fio</b>	<b>25</b>
2.1.1	Bobina de Tesla	25
<b>2.2</b>	<b>Funcionamento da Energia Elétrica Sem Fio</b>	<b>26</b>
2.2.1	Transferência de Energia Elétrica por Indução	26
2.2.2	Transferência de Energia por Acoplamento Ressonante Magnético	28
2.2.3	Transferência de Energia Elétrica por Laser	29
2.2.4	Transferência de Energia por Radiofrequência	31
2.2.5	Transferência de Energia por Meio de Micro-ondas	31
2.2.6	Parâmetros da Transferência de Energia sem Fio	34
<b>2.3</b>	<b>Transmissão de Energia Elétrica por Micro-ondas</b>	<b>36</b>
2.3.1	Tipos de Transmissão e Recepção das Antenas	36
2.3.1.1	Antenas Parabólicas	37
2.3.1.2	Antenas Phased Array	41
2.3.1.3	Antena Microfita	42
2.3.2	Parâmetros das Antenas	43
2.3.3	Geradores Para Micro-ondas	44
2.3.3.1	Gerador Magnetron	44
2.3.3.2	Gerador Klystron	48
2.3.3.3	Geradores de Estado Sólido	49
2.3.3.4	Geradores Masers	50
2.3.4	Parâmetros dos Geradores	51
<b>2.4</b>	<b>Energia Elétrica Sem Fio Através das Micro-ondas</b>	<b>52</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>56</b>
<b>3.1</b>	<b>Estudo de Caso</b>	<b>56</b>
<b>3.2</b>	<b>Software de Simulação</b>	<b>59</b>
3.2.1	CADFEKO	60
3.2.2	POSTFEKO	62
3.2.3	Modelagem da Antena no SolidWorks	63

3.2.4	AutoCAD no Projeto . . . . .	65
3.2.5	Parâmetros . . . . .	65
3.2.5.1	Cálculo do Comprimento de Onda . . . . .	66
3.2.5.2	Cálculo do Ganho da Antena . . . . .	66
3.2.5.3	Cálculo da Área Efetiva da Antena . . . . .	66
3.2.5.4	Cálculo da Diretividade . . . . .	67
3.2.5.5	Cálculo da Perda de Propagação no Espaço Livre . . . . .	67
3.2.5.6	Cálculo da Potência Recebida . . . . .	67
3.2.5.7	Raio da Abertura da Corneta . . . . .	68
3.2.5.8	Comprimento da Corneta . . . . .	68
3.2.5.9	Diâmetro Interno do Guia de Onda . . . . .	68
<b>3.3</b>	<b>Escolha do Gerador Magnetron . . . . .</b>	<b>69</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS . . . . .</b>	<b>74</b>
<b>4.1</b>	<b>Antena Transmissora . . . . .</b>	<b>74</b>
<b>4.2</b>	<b>Antena Receptora . . . . .</b>	<b>83</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>97</b>
<b>6</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS . . . . .</b>	<b>98</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>100</b>
<b>.1</b>	<b>Apêndice A . . . . .</b>	<b>105</b>
<b>.2</b>	<b>Apêndice B . . . . .</b>	<b>107</b>
<b>.3</b>	<b>Apêndice C . . . . .</b>	<b>109</b>
<b>.4</b>	<b>Apêndice D . . . . .</b>	<b>111</b>
<b>.5</b>	<b>Apêndice E . . . . .</b>	<b>113</b>
<b>.6</b>	<b>Apêndice F . . . . .</b>	<b>115</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A transmissão de energia elétrica sem fio WPT representa um avanço significativo no campo da engenharia elétrica, com aplicações promissoras em áreas como eletrônica, automação industrial e sistemas de transporte. A ideia de transmitir energia sem a necessidade de fios remonta aos experimentos de Nikola Tesla, que desenvolveu a Bobina de Tesla, um dispositivo pioneiro capaz de gerar e transmitir energia através de campos eletromagnéticos. A Bobina de Tesla abriu caminho para futuras pesquisas e inovações, demonstrando a viabilidade da transferência de energia sem fio (TESLA, 2007).

O funcionamento da transmissão de energia elétrica sem fio pode ser explicado através de diferentes métodos, cada um com suas próprias características e aplicações específicas. A transferência por indução envolve a criação de campos magnéticos entre bobinas próximas, como é observado em carregadores sem fio para dispositivos eletrônicos. Este método é eficaz em curtas distâncias e tem sido amplamente adotado devido à sua simplicidade e eficiência (SAMPLE; MEYER; SMITH, 2011). Outra técnica é a transferência por acoplamento ressonante magnético, que utiliza ressonadores acoplados para aumentar a eficiência e a distância de transferência. Este método permite a transferência de energia em distâncias maiores comparadas à indução simples (KARALIS; JOANNOPOULOS; SOLJAČIĆ, 2008).

Uma tecnologia emergente no campo da WPT é a transferência de energia por meio de lasers. Neste método, a energia elétrica é convertida em luz, que é então transmitida e convertida de volta em eletricidade pelo receptor. Esta abordagem tem potencial para aplicações em ambientes onde a linha de visão direta entre o transmissor e o receptor pode ser mantida, como em satélites ou *drones*. A transferência de energia por radiofrequência e micro-ondas também é uma área de pesquisa importante, especialmente para aplicações de longa distância e alta potência. Estes métodos utilizam ondas eletromagnéticas para transmitir energia, sendo adequados para cenários onde a eficiência de transmissão é crítica (BROWN, 1984), (SHINOHARA, 2014a).

A transmissão de energia elétrica por meio de ondas eletromagnéticas envolve o uso de antenas para a emissão e recepção de energia. Existem diversos tipos de antenas e geradores transmissores, cada um com vantagens e desvantagens específicas dependendo da aplicação. As antenas parabólicas *Cassegrain*, por exemplo, são utilizadas devido à sua alta eficiência e capacidade de focalizar a energia transmitida ou recebida, sendo ideais para transmissões de micro-ondas de alta potência (POZAR, 2012), (BALANIS, 2005b).

Os geradores de micro-ondas, como o *magnetron* e o *klystron*, desempenham um papel crucial na WPT. O *magnetron*, conhecido por sua alta potência de saída e eficiência razoável, é amplamente utilizado em fornos de micro-ondas e radares. Por outro lado, o *klystron* é capaz de operar em uma ampla faixa de frequências e é utilizado em aplicações que requerem alta potên-

cia e precisão, como em sistemas de comunicação por satélite (COLLIN, 2007). Os geradores de estado sólido, embora tenham uma potência de saída mais limitada, oferecem alta estabilidade e flexibilidade de frequências, tornando-os adequados para aplicações de baixa a média potência (POZAR, 2012).

Para a simulação da transmissão da energia elétrica sem fio será utilizado o software *FEKO*, ele é uma ferramenta de simulação eletromagnética que auxilia no design e análise de sistemas de antenas e propagação de ondas. Ele permite a modelagem precisa de componentes e a avaliação de seu desempenho em diferentes cenários, sendo essencial para o desenvolvimento e otimização de tecnologias de transmissão de energia sem fio (FEKO, 2023).

As pesquisas atuais em WPT focam na melhoria da eficiência, segurança e alcance das tecnologias de transferência de energia sem fio. Novas abordagens e materiais estão sendo investigados para otimizar o desempenho dos sistemas WPT e expandir suas aplicações, destacando-se como uma área dinâmica e em rápida evolução dentro da engenharia elétrica (SHINOHARA, 2014a), (LU *et al.*, 2016). A transmissão por micro-ondas, em particular, é vista como uma das técnicas mais promissoras para aplicações de longa distância e alta potência, sendo amplamente estudada para projetos de energia espacial e outras aplicações de alta demanda energética (BROWN, 1984), (SHINOHARA, 2014a).

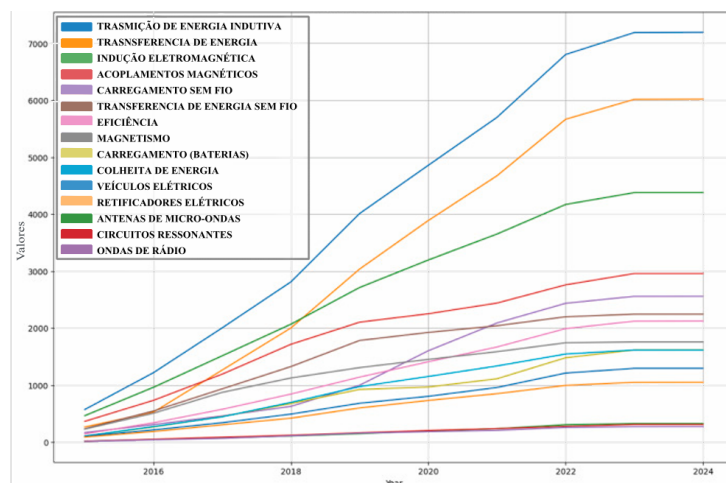
## 1.1 PESQUISAS E TENDÊNCIAS SOBRE A WPT

Recentemente, a Universidade de Ciência e Tecnologia Eletrônica da China (USTCE) tem se dedicado a diversas pesquisas relacionadas à WPT. Em particular, destacam-se os esforços em desenvolver fontes de Micro-ondas (*Microwaves*) (MW) de alta potência, retificadores de alta eficiência baseados em diodos e retificadores baseados em ondas *cíclotron*. Além disso, a universidade tem trabalhado em projetos envolvendo o desenvolvimento de novas antenas transmissoras e receptoras para ampliar ainda mais as capacidades nesse campo de estudo. (Zhao *et al.*, 2017).

A variedade de avanços em áreas como acoplamentos magnéticos, colheita de energia e tecnologias avançadas de carregamento destaca a resposta do campo às crescentes demandas por fontes de energia renováveis e soluções ecologicamente responsáveis. Essa evolução sugere um contínuo foco em inovação e desenvolvimento dentro do campo da WPT, impulsionado por avanços tecnológicos e pelo impulso global em direção à sustentabilidade, a figura 1, revela uma tendência de crescimento significativo na pesquisa WPT de 2015 a 2023. (OBAIDEEN *et al.*, 2024).

De 2015 a 2023, houve um aumento significativo na pesquisa sobre WPT, especialmente em áreas como transmissão de energia indutiva, eficiência energética, carregamento sem fio e sua aplicação em Veículos Elétricos (*Electric Vehicles*) (EVs). Esse crescimento reflete uma mudança global em direção a soluções energéticas mais sustentáveis e sem fio, abran-

Figura 1 – Tendência de Crescimento Significativo na Pesquisa WPT



Fonte: Adaptado de (OBAIDEEN *et al.*, 2024).

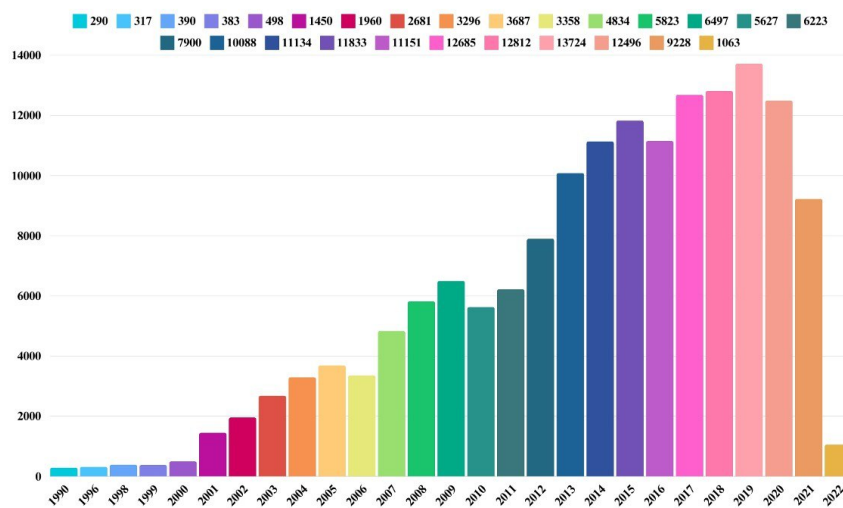
gendo diversos setores, desde eletrônicos de consumo até transporte ecologicamente consciente. O aumento no número de publicações, de 1887 em 2015 para 3083 em 2023, evidencia o crescente interesse e investimento em pesquisa nesse domínio. Aumento esse liderado pela produção acadêmica, refletindo a dinâmica em constante evolução do setor e seu papel vital na construção de estruturas energéticas futuras. Apesar de uma breve queda em 2020, possivelmente devido à pandemia global, a rápida recuperação pós-2020 demonstra a resiliência do campo e sua importância crítica na transição para soluções energéticas mais sustentáveis. Isso denota o compromisso contínuo da comunidade científica em avançar a tecnologia WPT, ressaltando seu potencial para transformar o acesso e a gestão de energia em um mundo focado em sustentabilidade e inovação tecnológica.(OBAIDEEN *et al.*, 2024).

Os dados mostram um crescimento generalizado e multifacetado em uma variedade de tecnologias relacionadas à WPT. À medida que a demanda por fontes de energia renováveis e soluções energéticas eficientes continua a aumentar, essa tendência representa uma resposta às necessidades e oportunidades emergentes. Como resultado, espera-se que pesquisadores, engenheiros e profissionais continuem a inovar e explorar no campo da WPT, impulsionando ainda mais a adoção de práticas sustentáveis em tecnologias sem fio.(Pinuela; Mitcheson; Lucyszyn, 2013).

A tecnologia de transferência de energia sem fio WPT tem um papel importante na criação de cidades inteligentes sem a necessidade de cabos. Ela também contribui para o uso de energias renováveis, o funcionamento de dispositivos inteligentes de grande escala, a transformação digital, o desenvolvimento sustentável das áreas urbanas e a construção de sistemas e infraestruturas energéticas para as cidades. Além disso, seu crescimento mundial é notável e acelerado. O gráfico da figura 2, mostra o número crescente de artigos acadêmicos publicados anualmente, os países ou regiões liderando as pesquisas em WPT e os marcos importantes na evolução desta tecnologia exibidos no gráfico da figura 3. A aplicação da WPT em dispositivos móveis, eletrodomésticos, transporte, robótica e em ambientes subaquáticos, além do espaço

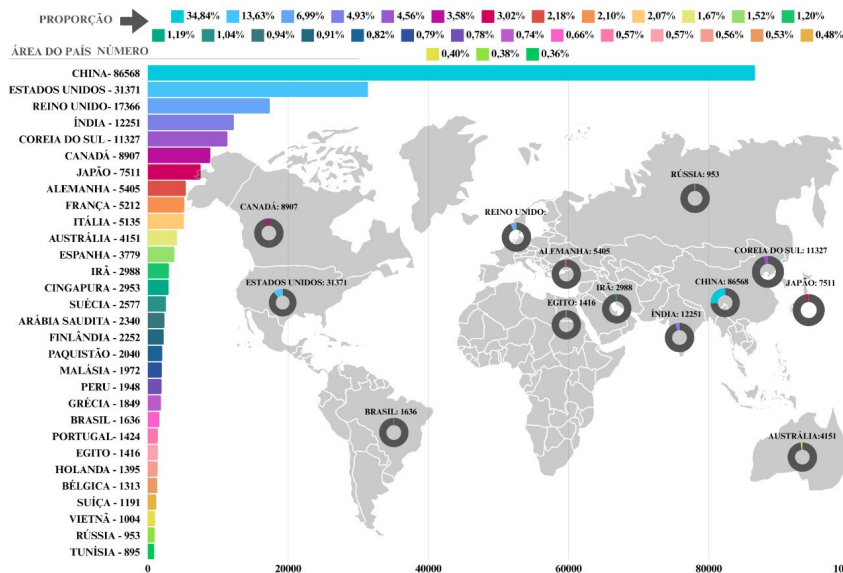
sideral, exemplifica sua presença difundida. As estações de carregamento fotovoltaico sem fio, as estradas equipadas com carregamento sem fio e o carregamento sem fio para veículos elétricos demonstram o imenso potencial da WPT para incentivar o uso de recursos energéticos renováveis e o desenvolvimento de infraestruturas urbanas. (XIE *et al.*, 2023).

Figura 2 – Número Anual de Artigos de Pesquisa Acadêmica da WPT



Fonte: Adaptado de (XIE *et al.*, 2023).

Figura 3 – Países e Áreas que Realizam Pesquisa em Tecnologia de WPT



Fonte: Adaptado de (XIE *et al.*, 2023).

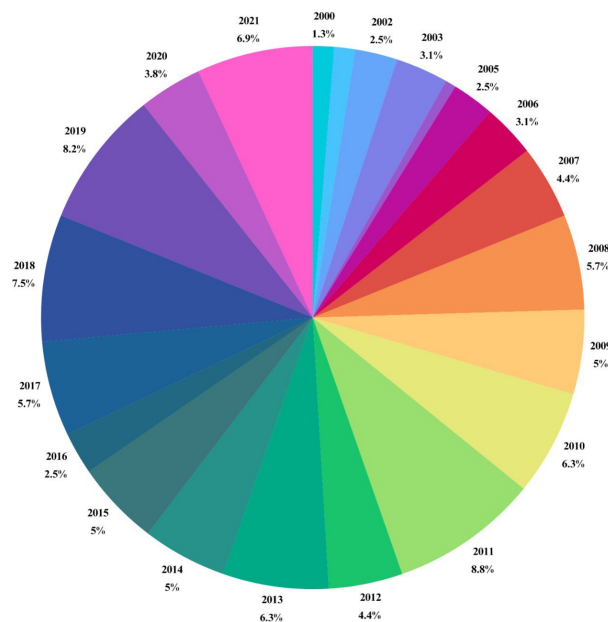
## 1.2 JUSTIFICATIVA

A constante modernização tecnológica tem intensificado a pesquisa sobre métodos de carregamento sem fio de dispositivos, refletindo o crescente interesse da sociedade por apare-

lhos mais avançados e tecnológicos. A tecnologia de transmissão de energia sem fio WPT está sendo reconhecida como uma solução sustentável, visto que diminui a necessidade de cabos e, conseqüentemente, a demanda por matérias-primas como plástico, cobre e outros componentes utilizados em redes convencionais. Essa redução não apenas minimiza os riscos de acidentes durante a manutenção de redes elétricas, como também diminui a incidência de danos provocados por descargas atmosféricas, contribuindo para a redução da poluição visual em áreas urbanas densamente povoadas, possibilitando o acesso à energia em locais de difícil acesso, onde a instalação de redes convencionais seria inviável (OBAIDEEN *et al.*, 2024; Pinuela; Mitcheson; Lucyszyn, 2013; D SILVA J, 2021).

A pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias de transmissão de energia sem fio, especialmente através de micro-ondas, apresentam-se como alternativas promissoras para superar os desafios enfrentados pelas infraestruturas elétricas tradicionais. O gráfico da figura 4, mostra nos últimos anos (de 2000 até 2021) um percentual anual dos números de quedas de energia com fios devido a uma série de ocasiões em equipamentos elétricos e linhas de transmissão, que são responsáveis por grande parte das interrupções significativas de energia elétrica, afetando milhões de pessoas e resultando em perdas financeiras substanciais. A segurança dos fios metálicos é um problema crítico, pois eles se deterioram ao longo do tempo e representam um risco considerável em condições extremas de temperatura, alta tensão ou consumo energético elevado (XIE *et al.*, 2023).

Figura 4 – Número Anual de Quedas de Energia.

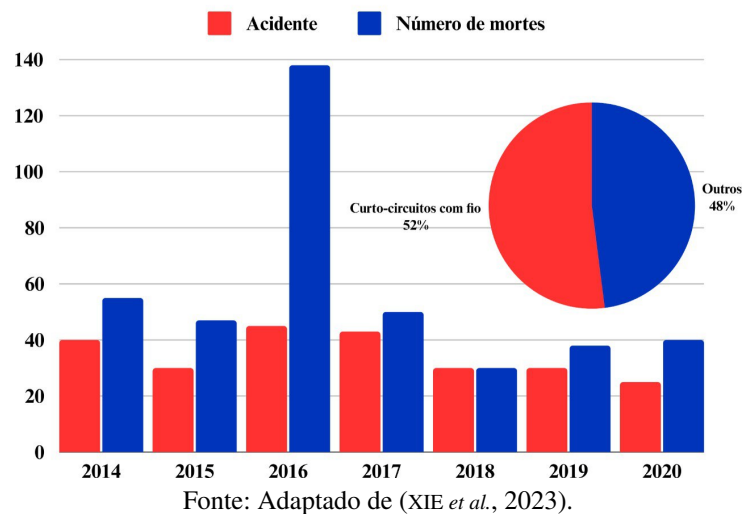


Fonte: Adaptado de (XIE *et al.*, 2023).

Diversos incidentes envolvendo geração de energia nos últimos anos, ocasionaram numerosas fatalidades e danos econômicos significativos. Calamidades naturais, equipamentos antigos e falhas de projeto foram as principais causas desses acidentes elétricos e incêndios. Os

estudos apontam que 52% dos incêndios na China em 2019 evidenciados no gráfico da figura 5, foram causados por curtos-circuitos em fios, ressaltando a necessidade urgente de melhorias nas infraestruturas de energia (XIE *et al.*, 2023; WILLIAMSON; FEYER, 1998). Além disso, a adaptação e a praticidade dos fios metálicos são limitadas, agravadas pelo uso de dispositivos de grande porte. As linhas de transmissão restringem severamente o alcance e a flexibilidade operacional, especialmente para robôs industriais e outras aplicações de alta demanda.

Figura 5 – Número de Acidentes de Segurança Elétrica e Fatalidades na China de 2014 a 2020, e os Componentes desses Acidentes.



Portanto, a exploração da transmissão de energia sem fio por micro-ondas oferece uma solução potencialmente revolucionária para os problemas atuais da distribuição de energia. Essa tecnologia pode promover a construção de cidades inteligentes e sustentáveis, integrando fontes de energia renováveis e equipamentos inteligentes em grande escala, transformando a infraestrutura urbana, reduzindo os riscos das redes elétricas e os impactos ambientais adversos.

### 1.3 OBJETIVOS

Este trabalho visa realizar uma análise detalhada da transmissão de energia sem fio utilizando micro-ondas, com o propósito de viabilizar sua aplicação em áreas de difícil acesso.

### 1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar os requisitos específicos para a implementação de sistemas de transmissão de energia sem fio em ambientes de difícil acesso;
- Avaliar o desempenho de antenas parabólicas *Cassegrain* e geradores *Magnetron* na transmissão de energia por micro-ondas;



- Explorar estratégias para mitigar interferências eletromagnéticas em sistemas de transmissão de energia sem fio, garantindo a confiabilidade e a segurança das operações;
- Validar os resultados teóricos através de simulações, visando a aplicação futura em cenários reais de difícil acesso.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ao longo da evolução da transmissão de energia sem fio, um dos principais desafios tem sido a eficiência limitada na transferência de potência em grandes distâncias entre o emissor e o receptor. No entanto, com os avanços recentes na eletrônica de potência e o aumento das pesquisas nessa área, a adoção da WPT está se tornando cada vez mais comum no mercado competitivo. Após muitos anos de investigação, foram desenvolvidos diversos métodos de transferência de energia sem fio, cada qual com suas próprias vantagens e desvantagens, que podem ser classificados em duas categorias principais: radiativos e não radiativos. Tanto a energia solar, capturada através da luz do sol, quanto o calor gerado por ela, são exemplos de formas de energia que podem ser transmitidas por radiação direta ou difusa, apresentado neste capítulo. (DALTIO L, 2019).

### 2.1 PRINCÍPIO DA ENERGIA ELÉTRICA SEM FIO

#### 2.1.1 Bobina de Tesla

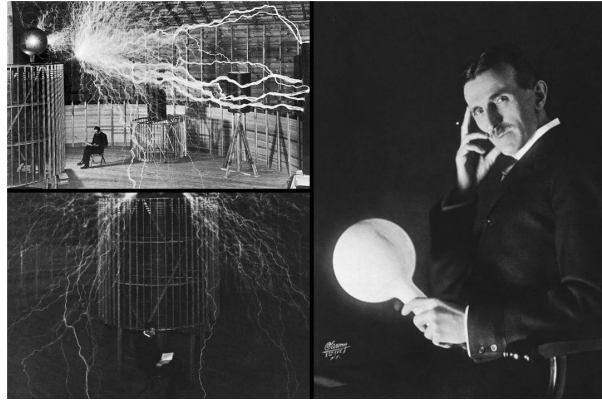
Ao abordar a transmissão de energia elétrica sem fio, é essencial mencionar as contribuições de Nikola Tesla, reconhecido por seu papel no desenvolvimento da eletricidade no século XX, particularmente com a invenção do sistema de Corrente Alternada (*Alternating Current*) (AC). Tesla também tinha como objetivo tornar possível a transmissão de energia elétrica sem fio para todo o mundo. Em 1891, aos 35 anos, ele concebeu e patenteou a "Bobina de Tesla", um dispositivo fundamental na história da tecnologia elétrica. (RAPHAEL, 2019).

Em um experimento, Tesla conseguiu acender uma lâmpada de vácuo desconectada com intensidade luminosa equivalente a 1.500 velas, utilizando correntes de alta frequência. Na época, *velas* era uma unidade de medida de intensidade luminosa, sendo substituída posteriormente pela unidade conhecida como candela cd. Essa demonstração foi tão notável que a fotografia da lâmpada acesa foi tirada pela própria luz emitida, com uma exposição de cerca de dois segundos. Outra experiência de Tesla envolveu a criação de um brilho de nitrogênio que preenchia a atmosfera ao redor de seu gerador. Uma foto tirada em 1899 mostra Tesla sentado em frente a este gerador, evidenciando o efeito dramático do experimento. Além disso, Tesla desenvolveu uma lâmpada sem fio revestida de fósforo e cheia de gás na década de 1890, que era capaz de funcionar sem a necessidade de conexão física a uma fonte de energia. Essa inovação foi documentada e publicada na capa da revista *Electrical Experimenter* em 1919, destacando sua visão pioneira e avançada para a época, bem antes da popularização das lâmpadas fluorescentes. (DALTIO L, 2019).

A Figura 6 ilustra algumas das contribuições de Tesla no campo da eletricidade e trans-

missão sem fio de energia. Suas descobertas e inovações proporcionaram o avanço da ciência e tecnologia da época, influenciando o desenvolvimento de sistemas de energia e comunicação modernos.

Figura 6 – Nikola Tesla e suas Invenções.



Fonte: Disponível em: (PHOTOS, 2023).

## 2.2 FUNCIONAMENTO DA ENERGIA ELÉTRICA SEM FIO

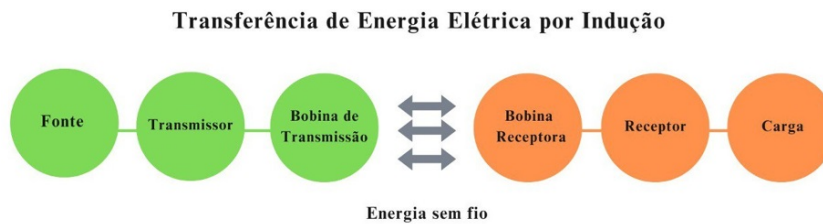
### 2.2.1 Transferência de Energia Elétrica por Indução

O sistema de transmissão de energia elétrica por meio da indução magnética em modos ressonantes opera de maneira simples, exigindo apenas bobinas emissoras e receptores de campo magnético. Esse método é fundamentado no princípio da indução eletromagnética, conforme descrito pela lei de Faraday. É de conhecimento que a corrente elétrica gerada pelo efeito da indução magnética é diretamente influenciada pela intensidade do campo magnético. Portanto, para aumentar a quantidade de energia transferida entre as bobinas, é necessário aumentar a intensidade desse campo magnético. (OBAIDEEN *et al.*, 2024).

Entretanto, devido à tendência do campo magnético de se dispersar em todas as direções quando transmitido pelo ar, transferir energia dessa forma seria ineficiente. Portanto, estratégias mais eficazes são requeridas. Esse sistema apresentado na Figura 7, demonstra como a transferência de energia sem fio pode ser usada para alimentar dispositivos eletrônicos sem a necessidade de conexões físicas, o que aumenta a conveniência e abre possibilidades para novas aplicações em inúmeras áreas.(EL-SHAHAT *et al.*, 2019).

A fonte de energia inicial alimenta o transmissor, que converte essa energia em ondas eletromagnéticas de alta frequência. A bobina de transmissão então gera um campo magnético a partir dessas ondas. Este campo magnético é capturado pela bobina receptora por meio de acoplamento magnético. A bobina receptora converte o campo magnético de volta em corrente elétrica. O receptor ajusta essa corrente elétrica para garantir que está adequada para a carga. Finalmente, a carga utiliza essa energia para funcionar.

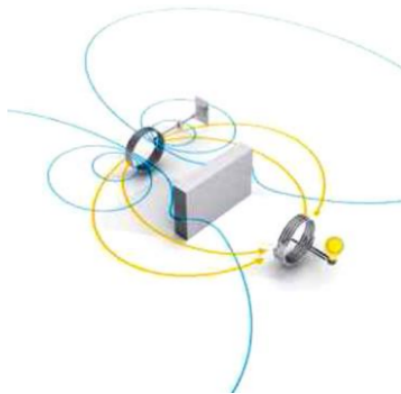
Figura 7 – Representação por Indução.



Fonte: Adaptado de (OBAIDEEN *et al.*, 2024).

A Figura 8 ilustra um exemplo desse sistema em ação. O dispositivo emissor está conectado à rede elétrica e emite ondas magnéticas, representadas em azul, que simbolizam o campo magnético gerado pela fonte de energia. Esse campo magnético é responsável por induzir a transferência de energia sem fio. As ondas magnéticas representadas em amarelas, por sua vez, representam o fluxo de energia transferida do emissor para a bobina receptora, que está conectada a algum aparelho. É interessante observar no diagrama como o campo magnético pode contornar obstáculos entre a fonte de energia e o dispositivo receptor, destacando a capacidade do sistema de transmitir energia mesmo em condições desafiadoras. (SATO, 2015).

Figura 8 – Campo Magnético entre Bobinas.



Fonte: Disponível em: (ÁVILA *et al.*, 2016).

Em novembro de 2006, uma equipe de pesquisadores do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (*Massachusetts Institute of Technology*) (MIT), liderada por Marin Soljačić, revelou que a ressonância eletromagnética poderia resolver o problema da dispersão do campo magnético. Isso efetua-se pois a indução pode ocorrer de maneira mais eficiente quando os campos eletromagnéticos ao redor das bobinas ressoam na mesma frequência, agindo como um sistema acoplado único. Dessa forma aumentando a eficácia da transferência de energia, pois quando a frequência do campo magnético variável é igual à frequência de ressonância do material, as perdas são minimizadas. (COSTA A, 2022).

O acoplamento indutivo oferece várias vantagens, o que contribui para sua ampla adoção. A operação sem contato permite a transferência de energia sem a necessidade de conectores

físicos, reduzindo a necessidade de manutenção. Além disso, o desalinhamento entre as bobinas é tolerado, proporcionando maior flexibilidade no carregamento e na conexão. Ademais, a segurança é outro ponto a ser salientado, já que a ausência de partes condutoras expostas torna o sistema mais adequado para ambientes úmidos ou agressivos. (JUNIOR, 2022).

Não obstante, este método apresenta suas limitações. A eficiência de transferência pode ser menor do que os métodos condutivos, especialmente em casos de desalinhamento significativo ou distância entre as bobinas. Além disso, a interferência de outros dispositivos eletrônicos ou objetos metálicos pode prejudicar o desempenho do sistema. (OBAIDEEN *et al.*, 2024)

### **2.2.2 Transferência de Energia por Acoplamento Ressonante Magnético**

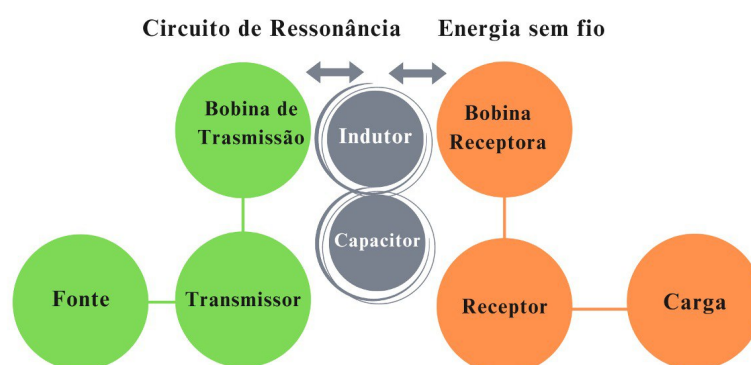
Os princípios fundamentais do Acoplamento Ressonante Magnético (*Magnetic Resonant Coupling*) (MRC), utiliza de circuitos ressonantes para estabelecer um forte acoplamento entre a fonte e o receptor, facilitando assim a transferência eficiente de energia a distâncias consideráveis. Tanto as bobinas transmissoras quanto as receptoras são conectadas em paralelo a capacitores, formando circuitos ressonantes ajustados para ressoar na mesma frequência. Esta ressonância possibilita a transferência de energia com eficiência, reduzindo as perdas. (KAMARUDIN *et al.*, 2023).

Na Figura 9, o sistema de WPT começa com uma fonte que fornece energia elétrica, que pode originar-se de várias fontes, como baterias, tomadas AC ou painéis solares. O transmissor converte essa energia em ondas eletromagnéticas de alta frequência, usando uma bobina de transmissão e um circuito ressonante composto por um indutor e um capacitor ajustados para ressoar na mesma frequência. A bobina receptora, alinhada corretamente com a bobina de transmissão, captura o campo magnético e o converte em corrente elétrica. O receptor processa essa corrente para uso, incluindo retificação, filtragem e regulação da tensão, antes de alimentar a carga, que é o dispositivo que utiliza a energia transmitida. (Pinuela; Mitcheson; Lucyszyn, 2013)

Conseqüentemente as vantagens do acoplamento ressonante são diversas. Ele proporciona uma transferência de energia com maior energia, especialmente em distâncias intermediárias, e não requer um alinhamento preciso durante o carregamento, aumentando a flexibilidade e a conveniência para os usuários. Além disso, a ressonância reduz a interferência com outros dispositivos eletrônicos próximos. No entanto, o acoplamento ressonante também apresenta desafios. Seu projeto complexo exige uma sintonia cuidadosa e uma correspondência precisa dos circuitos ressonantes, o que pode tornar sua implementação mais cara. Além disso, ele pode ser sensível a mudanças ambientais, como variações de temperatura, exigindo monitoramento e ajustes regulares. (FISHER *et al.*, 2014).

Apesar das limitações, os avanços na tecnologia de materiais e no design de bobinas têm melhorado significativamente a eficiência e o alcance dos sistemas de acoplamento ressonante. Esta tecnologia emergiu como uma ferramenta crucial em diversas áreas, desde eletrônicos de

Figura 9 – Acoplamento Ressonante Magnético.



Fonte: Adaptado de (OBAIDEEN *et al.*, 2024).

consumo até aplicações médicas. Embora enfrente desafios, sua contínua pesquisa e inovação prometem integrá-la ainda mais na vida cotidiana, contribuindo para a sustentabilidade e adaptabilidade, alinhando-se às demandas da sociedade contemporânea. À medida que sua exploração avança, é possível que o acoplamento ressonante eventualmente torne os cabos de alimentação obsoletos.(HUANG *et al.*, 2022).

### 2.2.3 Transferência de Energia Elétrica por Laser

O laser desempenha um papel irrefutável na transmissão de energia sem fio, pois é responsável pela conversão da energia elétrica em energia luminosa, que é então utilizada na transmissão. Sua eficiência e parâmetros têm um impacto direto na eficácia geral do processo de transmissão. Quanto maior a conversão de energia elétrica em luz, maior será a eficiência do laser e, conseqüentemente, mais energia poderá ser transmitida e recebida em longas distâncias. Isso permite que uma quantidade maior de energia óptica seja utilizada na conversão fotoelétrica. A escolha do laser é determinante para otimizar a eficiência da conversão eletro-óptica na transmissão de energia sem fio. Optar por um laser com alta taxa de conversão pode significativamente melhorar essa eficiência. Atualmente, os lasers mais eficientes são os semicondutores e de estado sólido, com uma eficiência média em torno de 60% e 40%, respectivamente. Ao selecionar um laser, é essencial considerar fatores como volume, peso e custo, levando em conta as necessidades de integração do sistema. Essa abordagem garante não apenas a eficiência da transmissão, mas também a viabilidade e praticidade do sistema como um todo. (XIAN-LONG *et al.*, 2022).

No exemplo da figura 10, o sistema consiste em duas torres. Uma dessas torres é ligada a uma fonte de energia, como uma tomada, e gera um feixe de laser ultravioleta, que é invisível ao olho humano. Na extremidade oposta, há um receptor que funciona de maneira semelhante

a um painel solar, mas que é sensível apenas à frequência do laser. Esse receptor converte a luz em Corrente Contínua (DC). Os cientistas conectaram a saída do receptor a um inversor, que transformou a corrente contínua em corrente alternada AC.(Negócios Disruptivos, 2024).

Figura 10 – Transmissão de Energia Elétrica por Lasers.



Fonte: Disponível em: (Negócios Disruptivos, 2024).

O laser exibe uma distribuição intensa de luz central, diminuindo a intensidade em direção às bordas, resultando em uma propagação direcional mais focalizada em comparação com as ondas esféricas. Ao contrário das ondas esféricas que se dispersam uniformemente, o laser com distribuição gaussiana se limita a um ângulo de propagação específico. Essa característica confere ao laser uma direcionalidade excepcional, concentrando a energia no centro do feixe. Em transmissões de longa distância, a redução do ângulo de divergência do laser é imprescindível para aumentar a distância de propagação e minimizar a perda de energia. Um método comum para melhorar a eficiência de propagação é através da colimação e expansão do laser usando um expensor de feixe, o que aumenta o tamanho do ponto de saída e reduz o erro angular. No entanto, é crucial evitar que o tamanho do ponto após a transmissão seja excessivamente pequeno, pois isso pode resultar em superaquecimento das células fotovoltaicas na região central do feixe ou em uma diferença de tensão entre as células fotovoltaicas adjacentes.(XIAN-LONG *et al.*, 2022).

Durante a transmissão de energia sem fio via laser, a energia do laser tende a diminuir significativamente ao longo de distâncias maiores. Isso ocorre devido a diversos fatores, sendo a absorção e a dispersão da luz pelo meio de transmissão os principais contribuintes para essa atenuação. A absorção ocorre quando a luz encontra partículas absorventes durante a transmissão, resultando na conversão da energia luminosa em outras formas de energia. Nos meios comumente utilizados na transmissão via laser, como o ar e a água, encontramos partículas como poeira, fumaça, minerais e outras moléculas. Durante a transmissão do laser pelo ar, parte da energia é absorvida por essas partículas, enquanto outra parte é dispersa em direções não desejadas. Visto que na água, devido à presença de diversos minerais, a atenuação da energia é ainda mais significativa em comparação com o ar. Embora o ângulo de divergência do laser seja

o mesmo em ambos os meios, a atenuação da energia na transmissão através da água é mais acentuada devido às características específicas desse meio. (MOHSAN *et al.*, 2022).

#### **2.2.4 Transferência de Energia por Radiofrequência**

Recentes avanços nas técnicas de Frequência de Rádio (*Radio Frequency*) (RF) têm demonstrado um caminho promissor à frente. Com o desenvolvimento de técnicas avançadas de formação de feixe e antenas *phased array*, tornou-se possível uma transmissão de RF mais precisa e direcionada. Isso não apenas aumenta a eficiência da transmissão, mas também reduz a interferência significativamente. Além disso, há um interesse crescente na colheita de energia, que envolve a captura da energia de RF ambiental proveniente de fontes existentes, como torres de TV ou de celular, para alimentar dispositivos de baixa energia. Sendo assim, a prática contribui para a sustentabilidade ao aproveitar recursos já disponíveis. (HUDA; ARAFAT; MOH, 2022)

A transmissão de energia elétrica sem fio baseada em RF utiliza ondas de rádio, tipicamente na faixa de 3 kHz a 300 GHz, para transmitir energia sem demanda de fios. Essa tecnologia capitaliza o potencial das ondas de rádio para transferir energia por distâncias consideráveis, abrindo portas para uma infinidade de aplicações inovadoras. (FISHER *et al.*, 2014)

As principais vantagens da transmissão de energia baseada em radiofrequência residem em sua excelente capacidade de alcançar longas distâncias. Ao contrário das abordagens de acoplamento indutivo ou ressonante, a tecnologia de radiofrequência tem o potencial de transmitir energia através de distâncias consideráveis, dependendo da frequência utilizada. Isso proporciona uma flexibilidade incomparável, uma vez que as ondas de radiofrequência podem atravessar obstáculos, permitindo uma colocação e alinhamento mais flexíveis dos dispositivos. (JUNIOR, 2022).

Todavia, é importante notar que a eficiência da transmissão tende a ser menor em comparação com outras técnicas, especialmente ao lidar com longas distâncias ou obstáculos significativos. Além disso, a conformidade com diversas normas regulatórias relacionadas ao uso de frequência, exposição humana e interferência com outros dispositivos é um aspecto crítico que requer cuidadosa consideração ao implementar sistemas de transmissão de energia por radiofrequência. (D SILVA J, 2021).

#### **2.2.5 Transferência de Energia por Meio de Micro-ondas**

Micro-ondas são ondas eletromagnéticas caracterizadas por frequências elevadas. Assim como outras ondas eletromagnéticas, as micro-ondas não necessitam de um meio material para se propagar. A característica de não depender de um meio material para a propagação é fundamental para a transmissão de energia elétrica sem fio, pois permite que as micro-ondas se propaguem através do vácuo e em diversas condições ambientais. A compreensão dessas propri-



idades, junto com as equações de Maxwell, é essencial para o desenvolvimento de tecnologias que utilizam a transmissão sem fio, como sistemas de energia e comunicação. De acordo com as leis de Maxwell, que são um conjunto de quatro equações fundamentais da eletromagnetismo, a oscilação do campo elétrico produz um campo magnético correspondente, e vice-versa, resultando na formação de ondas eletromagnéticas. Essas equações, que descrevem como os campos elétrico e magnético interagem e se propagam, são fundamentais para entender a natureza das ondas eletromagnéticas. (DALTIOL, 2019).

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad - \text{(Lei de Gauss para o campo elétrico)} \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad - \text{(Lei de Gauss para o magnetismo)} \quad (2.2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad - \text{(Lei de Faraday da indução)} \quad (2.3)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad - \text{(Lei de Ampère-Maxwell)} \quad (2.4)$$

Onde:

- $\nabla \cdot$  : Operador divergente, que mede a intensidade da fonte de um campo vetorial;
- $\nabla \times$  : Operador rotacional, que mede a tendência de um campo vetorial a rotacionar ao redor de um ponto.
- $\mathbf{E}$  : Campo elétrico (em volts por metro, V/m).
- $\mathbf{B}$  : Campo magnético (em teslas, T).
- $\rho$  : Densidade de carga elétrica (em coulombs por metro cúbico, C/m<sup>3</sup>).
- $\varepsilon_0$  : Permitividade do vácuo (aproximadamente  $8.85 \times 10^{-12}$  F/m).
- $\mu_0$  : Permeabilidade do vácuo (aproximadamente  $4\pi \times 10^{-7}$  H/m).
- $\mathbf{J}$  : Densidade de corrente elétrica (em amperes por metro quadrado, A/m<sup>2</sup>).
- $t$  : Tempo (em segundos, s).

A transmissão de energia elétrica sem fio por meio de micro-ondas representa uma tecnologia inovadora que opera em uma faixa de frequência ampla, variando de 300 MHz a 300 GHz. Essa abordagem tem o potencial de transformar fundamentalmente a maneira como enxergamos a transmissão de energia, apresentando oportunidades, obstáculos e aplicações singulares que a distinguem de outras técnicas de transferência de energia sem fio. (LU *et al.*, 2015).

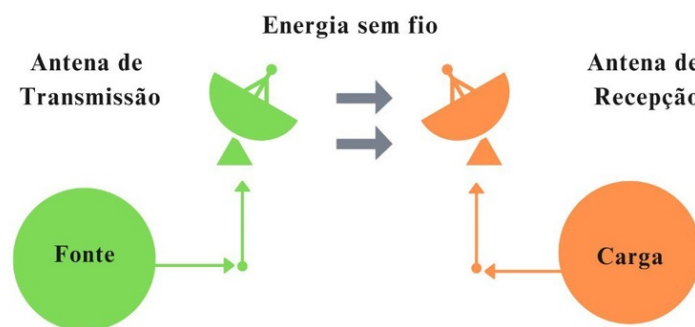
As possibilidades oferecidas pelas aplicações baseadas em micro-ondas são vastas e adaptáveis a uma variedade de contextos. Um exemplo promissor reside nos sistemas espaciais de energia solar, onde painéis solares posicionados em órbita têm a capacidade de coletar

energia e transmiti-la para a terra por meio de micro-ondas, oferecendo uma fonte de energia renovável. No setor de transporte, as técnicas de micro-ondas abrem portas para o recarregamento sem fio de veículos elétricos, proporcionando maior flexibilidade e facilidade em comparação com métodos tradicionais de carregamento. Além disso, em ambientes industriais ou locais remotos, a transmissão de energia sem fio baseada em micro-ondas pode garantir o fornecimento contínuo de energia a equipamentos e sensores, mesmo em áreas de difícil acesso.(OBAIDEEN *et al.*, 2024).

As micro-ondas são uma forma de radiação eletromagnética, com um comprimento de onda variando de 1 mm a 300 mm e frequências que vão de 109 Hz a 1011 Hz, as micro-ondas têm a capacidade de transportar uma quantidade significativa de informações. Uma das principais vantagens das micro-ondas sobre as ondas de rádio é sua capacidade de carregar mais informações devido às suas frequências mais altas. Tal condição ocorre pois a quantidade de informações que podem ser transmitidas está diretamente relacionada à frequência da onda utilizada. (DALTIOL, 2019)

Conforme ilustrado na Figura 11, empregam antenas de transmissão e recepção em vez das tradicionais bobinas. Para garantir um funcionamento adequado, essas antenas devem estar cuidadosamente alinhadas, estando dentro do campo de visão uma da outra. A fonte de energia elétrica alimenta o sistema de transferência de energia sem fio WPT, podendo ser uma bateria, tomada AC ou painéis solares. A antena de transmissão converte essa energia em ondas eletromagnéticas de alta frequência e transmitida sem fio para a antena receptora. Esta última captura as ondas eletromagnéticas e o converte de volta em corrente elétrica, direcionando-a para o dispositivo que utiliza a energia, como um telefone celular ou eletrodoméstico. O receptor processa a corrente conforme necessário, como convertendo de AC para DC, filtrando e regulando a tensão, antes de alimentar a carga para o funcionamento adequado do dispositivo. (OBAIDEEN *et al.*, 2024)

Figura 11 – Transferência de Energia por Ondas Eletromagnéticas.



Fonte: Adaptado de (OBAIDEEN *et al.*, 2024).

O tamanho e o tipo das antenas desempenham um papel crucial na eficácia e na direção da transmissão. Adicionalmente, um receptor é utilizado, composto por uma antena responsável

por capturar o sinal e transmiti-lo, juntamente com um retificador para converter a energia eletromagnética em energia elétrica contínua ou alternada, conforme necessário. Essa abordagem oferece uma alternativa viável e eficiente para a transmissão de energia sem fio, utilizando os princípios das ondas eletromagnéticas. (OBAIDEEN *et al.*, 2024).

## 2.2.6 Parâmetros da Transferência de Energia sem Fio

Os métodos de transmissão de energia elétrica sem fio variam significativamente em termos de princípio de funcionamento, alcance e eficiência, a tabela 1 mostra estes métodos de funcionamento.

A indução magnética é amplamente utilizada para aplicações de curto alcance, como carregadores de *smartphones*, em virtude de sua alta eficiência (80 – 90%). No entanto, sua aplicação é limitada a distâncias muito curtas, geralmente na ordem de milímetros a centímetros. A ressonância magnética oferece uma solução para distâncias um pouco maiores, de centímetros a metros, mantendo uma boa eficiência de (80 – 90%). Esse método é útil para aplicações onde a flexibilidade do posicionamento do dispositivo receptor é importante, como em carregadores sem fio para veículos elétricos. A transmissão por micro-ondas permite cobrir distâncias maiores, variando de metros a quilômetros. No entanto, a eficiência deste método é deveras variável ficando entre (15 – 30%) e dependendo de fatores como a precisão da mira e as condições ambientais, o que o torna mais adequado para aplicações especializadas, como satélites e *drones*. Os lasers também permitem a transmissão de energia a longas distâncias, com uma eficiência relativa que varia entre (10 – 25%). Eles são adequados para aplicações onde a linha de visão direta pode ser mantida, como em sistemas de energia espacial ou em comunicação óptica. Por fim, o método de acoplamento magnético é semelhante à indução magnética em termos de alcance, sendo adequado para distâncias curtas (milímetros a centímetros), com uma eficiência moderada (60 – 90%). Este método é utilizado em algumas aplicações industriais e médicas onde a precisão e a segurança são indispensáveis.

Tabela 1 – Classificação de Transmissão de Energia sem Fio

Abordagens Técnicas	Indução Eletromagnética	Ressonância Magnética	Acoplamento Magnético	Lasers	Micro-ondas
Nível de Potência	W - kW	W - 10 <sup>2</sup> kW	W - kW	W- MW	W - GW
Eficiência	80 - 90%	80 - 90%	60 - 90%	10 - 25%	15 - 30%
Distância	mm - cm	cm - m	mm - cm	m-10 <sup>3</sup> km	m - 10 <sup>2</sup> km
Frequência	85 kHz	kHz - MHz	kHz - MHz	10 <sup>14</sup> Hz	1-50 GHz

Fonte: (OBAIDEEN *et al.*, 2024)

Cada método possui seus próprios benefícios e desvantagens, e a escolha do método mais adequado depende das especificidades da aplicação, incluindo a necessidade de alcance, eficiência e as condições operacionais. A tabela 2 compara diferentes destes métodos de transferência de energia sem fio, destacando seus princípios de funcionamento, benefícios, limitações e tendências recentes. O método indutivo utiliza campos magnéticos entre bobinas acopladas, oferecendo simplicidade e alta eficiência a curto alcance. Ainda assim, suas limitações incluem um alcance curto e a necessidade de um alinhamento crítico entre as bobinas. Por outro lado, a ressonância magnética, que emprega circuitos ressonantes, apresenta maior eficiência e alcance, além de ser mais flexível. Entretanto, sua complexidade e sensibilidade a mudanças são desafios a serem considerados. A abordagem eletromagnética, que se baseia em ondas eletromagnéticas, é conhecida por seu longo alcance, alta eficiência e capacidade direcional. Apesar disso, sua eficiência pode diminuir em distâncias longas, e a conformidade com regulamentações é uma consideração importante. As tendências recentes para este método incluem o desenvolvimento de técnicas como *beamforming*, colheita de energia e integração com tecnologias 5G/6G.

Tabela 2 – Comparação entre Diferentes Métodos de Transferência de Energia sem Fio

<b>Técnica</b>	<b>Princípio</b>	<b>Benefícios</b>	<b>Limitações</b>	<b>Tendências Recentes</b>
<b>Indutivo</b>	Campos magnéticos entre bobinas acopladas	Simples, alta eficiência a curto alcance	Alcance curto, alinhamento crítico	Integração com dispositivos inteligentes
<b>Ressonância Magnética</b>	Circuitos ressonantes	Maior eficiência e alcance, flexível	Complexo, sensível a mudanças	Sistemas adaptativos, materiais avançados
<b>Eletromagnética</b>	Ondas eletromagnéticas	Longo alcance, alta eficiência, direcional	Baixa eficiência a longa distância, regulamentações	Formação de Feixe, colheita de energia, integração com 5G/6G

Fonte: (ZHENG *et al.*, 2024)

A tabela 3 resume os desafios enfrentados em várias técnicas de transferência de energia sem fio. No método de acoplamento indutivo, o alto custo de fabricação para alcançar maior transferência de energia é um desafio financeiro, enquanto a eficiência que diminui com a distância é um desafio técnico. Em contrapartida, no acoplamento ressonante, os circuitos complexos e a necessidade de ajuste preciso representam desafios econômicos e técnicos, respectivamente. As técnicas baseadas em RF enfrentam obstáculos de interferência eletromagnética e perdas de energia, enquanto as técnicas baseadas em micro-ondas exigem mecanismos complexos de formação de feixe e segurança. Além disso, aspectos ambientais, sociais, políticos, regulatórios

e administrativos também são considerações importantes em todas as técnicas.

Tabela 3 – Desafios Enfrentados em Diversas Técnicas de Transferência de Energia sem Fio

<b>Desafio</b>	<b>Acoplamento Indutivo</b>	<b>Acoplamento Ressonante</b>	<b>Técnicas RF</b>	<b>Técnicas de Micro-ondas</b>
<b>Aspectos Financeiros</b>	Alto custo de produção para melhor transferência de energia	Mais dispendioso devido a circuitos complexos e ajustes finos	Perdas de energia podem aumentar os custos operacionais	Necessidade de equipamento especializado encarece
<b>Desafios Técnicos</b>	Eficiência diminui com a distância	Requer ajuste preciso para ressonância	Suscetibilidade à interferência eletromagnética e perdas de energia	Complexidade na formação de feixes e segurança
<b>Ambientais e Sociais</b>	Baixo impacto ambiental, exposição humana mínima	Geralmente seguro, mas gera resíduos de infraestrutura	Possíveis preocupações ambientais e com a saúde	Riscos para saúde e segurança devido à radiação eletromagnética
<b>Políticas e Regulamentações</b>	Padrões de segurança estabelecidos, regulamentação mais acessível	Normas relativamente maduras e consolidadas	Regulamentação mais rigorosa devido a riscos à saúde	Pesquisa extensiva para garantir implementação segura
<b>Aspectos Administrativos e Institucionais</b>	Bem compreendido com protocolos estabelecidos	Desafios de coordenação e escala	Colaboração para desenvolvimento de protocolos de segurança e implementação	Amplas colaborações entre partes interessadas

Fonte: (OBAIDEEN *et al.*, 2024)

## 2.3 TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR MICRO-ONDAS

### 2.3.1 Tipos de Transmissão e Recepção das Antenas

As antenas são dispositivos essenciais no sistema de transmissão de energia por micro-ondas, responsáveis tanto pela emissão quanto pela recepção das ondas eletromagnéticas. Existem numerosos tipos de antenas utilizadas para este fim, incluindo antenas parabólicas, antenas *phased array*, antenas de microfita. Cada tipo de antena possui características específicas em termos de ganho, direcionalidade e largura de banda, que devem ser cuidadosamente selecionadas com base nos requisitos do projeto, como distância de transmissão e ambiente de operação. (KURS *et al.*, 2007).

### 2.3.1.1 Antenas Parabólicas

O design de uma antena parabólica é fundamental para seu desempenho. Na figura 12, a forma parabólica permite que as ondas eletromagnéticas incidentes sejam refletidas e focadas em um único ponto, denominado foco da parábola. Um receptor, frequentemente chamado de *feedhorn* ou "alimentador", é colocado precisamente nesse foco. Ao capturar os sinais refletidos de toda a superfície da antena e concentrá-los em um único ponto, as antenas parabólicas conseguem receber ou transmitir sinais com uma eficiência superior em comparação aos demais modelos de antenas.(MAGNETISM, 2024).

Figura 12 – Antena Parabólica.

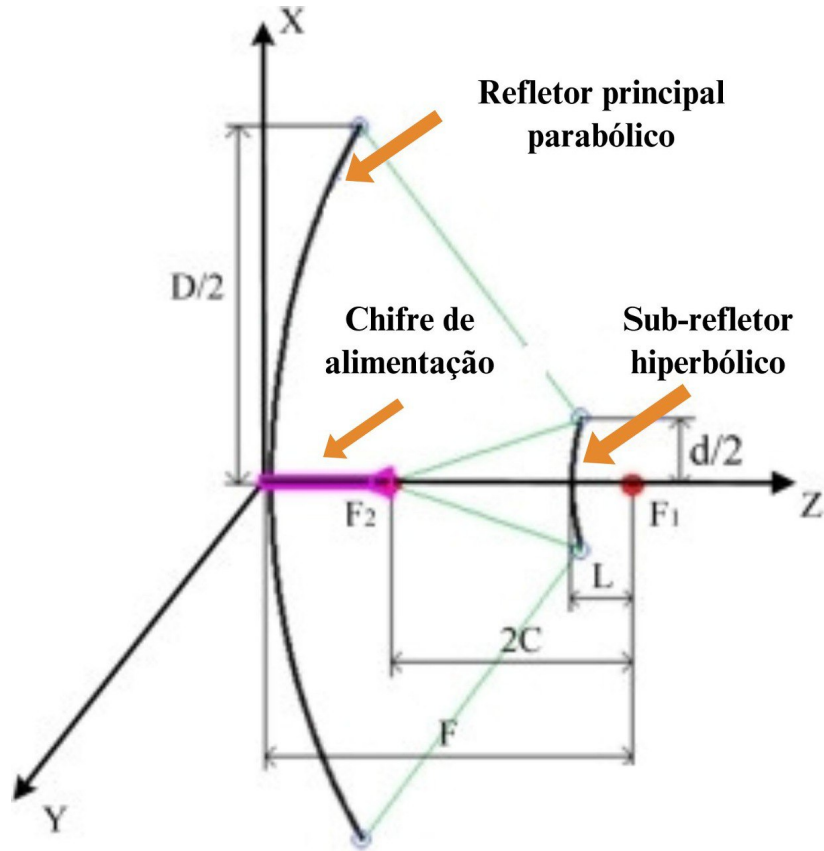


Fonte: (MAGNETISM, 2024).

No sistema de transmissão de energia sem fio MWPT em longas distâncias terrestres, tanto as antenas receptoras quanto as transmissoras são idênticas. Para simplificar e viabilizar o sistema, são utilizadas antenas *Cassegrain* tanto para recepção quanto para transmissão. Na configuração de alta potência e longa distância do sistema MWPT, a geometria da antena *Cassegrain* é mostrada na Figura 13, compreendendo um chifre de alimentação, um sub-refletor hiperbólico e um refletor principal parabólico simétrico rotacional.(CHIBA; KONISHI, 2011).

No refletor parabólico simétrico rotacional, ponto focal 1 (F1) representa o ponto focal e altura (D). No sub-refletor hiperbólico, F1 e ponto focal 2 (F2) são seus pontos focais. Ambos os refletores compartilham o mesmo ponto focal e eixo, e a alimentação do chifre está

Figura 13 – Configuração da Antena de *Cassegrain*.



Fonte: Adaptado de (HU *et al.*, 2021).

localizada no ponto virtual do sub-refletor  $F_2$ , respectivamente. Com base nas características geométricas do sistema de antena *Cassegrain*, no sistema transmissor, os feixes de micro-ondas da alimentação iluminam o sub-refletor, que os reflete de volta para o refletor principal, e então são refletidos para frente para formar o feixe de energia. Todos esses feixes são projetados para propagar o comprimento de caminho igual e chegar à abertura em fase. Devido à reciprocidade eletromagnética, a antena *Cassegrain* também pode ser utilizada no sistema receptor. Com base na polarização cruzada, no comprimento da linha de alimentação e na estrutura mecânica, os parâmetros, incluindo altura ( $D$ ), diâmetro do chifre ( $d$ ), distancia focal ( $C$ ), comprimento da linha de alimentação ( $L$ ) e distancia focal do sub-refletor ( $F$ ), devem ser fixados. Algumas antenas *Cassegrain*, se concentram principalmente na transmissão de sinal.(CHIBA; KONISHI, 2011).

O ganho  $G$  de uma antena parabólica é uma medida de sua capacidade de concentrar energia em uma direção específica, conforme apresentado na equação (2.5). A equação considera a eficiência  $\eta$  da antena, o diâmetro do refletor  $D$  e o comprimento de onda  $\lambda$ . (RIBEIRO, 2012).

$$G = \eta \left( \frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \quad (2.5)$$

Onde:

- $\eta$ : Eficiência da antena (adimensional).
- $D$ : Diâmetro do refletor (em metros).
- $\lambda$ : Comprimento de onda da radiação (em metros).

A área efetiva  $A_e$  representa a porção da área física do refletor que efetivamente contribui para a recepção ou transmissão de energia, dada pela equação (2.6). Como exibido na equação (2.6), essa área é dependente da eficiência  $\eta$  e do diâmetro  $D$ . (RIBEIRO, 2012).

$$A_e = \eta \frac{\pi D^2}{4} \quad (2.6)$$

Onde os parâmetros são os mesmos da equação anterior.

A diretividade  $D$  quantifica a capacidade de uma antena em concentrar a radiação em uma direção preferencial, considerando a área efetiva. Essa relação é descrita na equação (2.7), onde a diretividade é proporcional à área efetiva  $A_e$  e inversamente proporcional ao quadrado do comprimento de onda  $\lambda$ . (RIBEIRO, 2012).

$$D = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (2.7)$$

Onde:

- $A_e$ : Área efetiva da antena.
- $\lambda$ : Comprimento de onda (em metros).

A perda de propagação no espaço livre  $L_p$  descreve a atenuação sofrida pela onda eletromagnética ao se propagar entre o transmissor e o receptor. Esta é dada pela equação (2.8). Como indicado na equação (2.8), a perda depende da distância  $d$  entre as antenas, da frequência de operação  $f$  e da velocidade da luz  $c$ . (RIBEIRO, 2012).

$$L_p = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi}{c} \right) \quad (2.8)$$

Onde:

- $d$ : Distância entre transmissor e receptor (em metros).
- $f$ : Frequência de operação (em Hz).
- $c$ : Velocidade da luz no vácuo ( $3 \times 10^8$  m/s).



A potência recebida  $P_r$  pode ser calculada usando a equação de Friis, que relaciona a potência transmitida, os ganhos das antenas e as perdas de propagação, como apresentado na equação (2.9). A potência recebida depende da potência transmitida  $P_t$ , dos ganhos das antenas transmissora ( $G_t$ ) e receptora ( $G_r$ ), e da perda de propagação  $L_p$ . (RIBEIRO, 2012).

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_p \quad (2.9)$$

Onde:

- $P_t$ : Potência transmitida (em dB).
- $G_t$ : Ganho da antena transmissora (em dB).
- $G_r$ : Ganho da antena receptora (em dB).
- $L_p$ : Perda de propagação no espaço livre (em dB).

O raio da abertura da corneta circular, dado pela equação 2.10, deve ser no mínimo o dobro do comprimento de onda ( $\lambda$ ) para garantir uma propagação eficiente. Aumentar o raio pode melhorar a correspondência entre a corneta e o refletor, otimizando a eficiência do sistema. (POZAR, 2012).

$$a \geq 2\lambda \quad (2.10)$$

Onde:

- $a$ : Raio da abertura da corneta (em metros).
- $\lambda$ : Comprimento de onda do sinal (em metros).

A equação 2.11, define o comprimento necessário para a corneta em função da abertura ( $a$ ) e do ângulo de flare ( $\theta$ ). Um ângulo maior resulta em uma corneta mais curta, enquanto um ângulo menor aumenta o comprimento. (POZAR, 2012).

$$L \approx \frac{a}{\tan(\theta)} \quad (2.11)$$

Onde:

- $L$ : Comprimento da corneta (em metros).
- $a$ : Raio da abertura da corneta (em metros).
- $\theta$ : Ângulo de flare da corneta (em graus ou radianos).

A equação 2.12, garante que o guia de onda seja dimensionado corretamente para operar na frequência desejada sem introduzir perdas excessivas. O diâmetro deve ser grande o suficiente para suportar o modo fundamental ( $TE_{10}$ ) de propagação. (POZAR, 2012).

$$d \geq \frac{1,706 \cdot c}{f_c} \quad (2.12)$$

Onde:

- $d$ : Diâmetro interno do guia de onda (em metros).
- $c$ : Velocidade da luz no vácuo ( $3 \times 10^8$  m/s).
- $f_c$ : Frequência de corte do guia de onda (em hertz).

### 2.3.1.2 Antenas Phased Array

Uma antena *phased array*, conforme exibido na figura 14, possibilita a formação de feixes ajustando a diferença de fase entre os sinais de condução enviados a cada emissor do *array*. Permitindo assim, controlar e direcionar o padrão de radiação para um alvo específico sem necessidade de movimentar fisicamente a antena. Desta maneira, a formação do feixe em uma direção específica resulta da interferência entre emissores omnidirecionais. O número de emissores pode variar desde poucos até milhares. O principal objetivo de usar uma antena *phased array* é controlar a direção do feixe emitido, utilizando a interferência construtiva entre múltiplos sinais irradiados, um processo conhecido como "*beamforming*".(CADENCE, 2021).

Figura 14 – Antena *Phased Array*.



Fonte: (CADENCE, 2021).

Quando os sinais emitidos por cada elemento de um *phased array* estão perfeitamente sincronizados em fase, ocorre uma interferência construtiva que resulta em uma radiação intensa

direcionada em uma direção específica. Essa direção é controlada ajustando-se o deslocamento de fase entre os sinais enviados aos diferentes emissores. Sendo alcançado através da aplicação de pequenos atrasos de tempo nos sinais dos emissores sucessivos no *array*. Fora da direção principal do feixe, a intensidade diminui, mas surgem lobos laterais devido à periodicidade dos sinais. No entanto, um feixe muito forte é produzido na direção desejada.(MAILLOUX; MCILVENNA; KERNWEIS, 1981).

Segundo (BALANIS, 2005a), as antenas Phased Array são amplamente utilizadas em aplicações que requerem direcionamento eletrônico do feixe de radiação. A distância de transmissão ( $d$ ) de uma antena Phased Array pode ser aproximada usando o modelo de perda de espaço livre descrito na equação (2.13):

$$P_r = \frac{P_t \cdot G_t}{\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2} \quad (2.13)$$

Onde:

- $P_r$ : Potência recebida pela antena receptora;
- $P_t$ : Potência transmitida pela antena transmissora;
- $G_t$ : Ganho da antena transmissora;
- $\lambda$ : Comprimento de onda da frequência operacional.

A eficiência ( $\eta$ ) da antena pode ser calculada como a razão entre a potência radiada na direção desejada e a potência total fornecida à antena (BALANIS, 2005a). Conforme equação (2.14):

$$\eta = \frac{P_{radiada}}{P_{total}} \quad (2.14)$$

Onde:

- $P_{radiada}$ : é a potência efetivamente radiada;
- $P_{total}$ : é a potência total fornecida à antena, levando em conta todas as perdas no sistema.

### 2.3.1.3 Antena Microfita

As antenas de *microfita*, também conhecidas como antenas *patch*, são um tipo popular de antena plana que consiste em um condutor metálico, chamado de *patch*, montado sobre um substrato dielétrico que, por sua vez, é colocado sobre uma superfície condutora chamada plano de terra. O *patch* pode ter inúmeras formas, como retangular, circular, triangular, entre outras,

sendo a forma retangular a mais comum devido à sua simplicidade de análise e fabricação.(SUL, 2010).

O *patch* metálico da antena de *microfita* irradia sinais eletromagnéticos quando alimentado por um sinal de RF. A alimentação pode ser realizada de várias maneiras, como alimentação por linha de *microfita*, alimentação por coaxial, ou acoplamento por fenda. A ressonância ocorre quando o comprimento do *patch* é aproximadamente metade do comprimento de onda do sinal de operação, resultando em uma eficiente emissão de radiação.(EDUCAÇÃO, 2010).

A eficiência de uma antena de microfita da equação (2.15), pode ser calculada como o produto da eficiência de radiação ( $\eta_r$ ) e da eficiência de transmissão ( $\eta_t$ ). Para determinar  $\eta_r$  e  $\eta_t$ , são necessárias simulações ou medições experimentais específicas para o design da antena de microfita. (POZAR, 2004).

$$\eta = \eta_r \cdot \eta_t \quad (2.15)$$

Onde:

- $\eta_r$ : Eficiência de radiação, que leva em conta perdas no metal do patch, no substrato e outras perdas dielétricas;
- $\eta_t$ : Eficiência de transmissão, que considera perdas na linha de transmissão e na adaptação de impedância.

### 2.3.2 Parâmetros das Antenas

A tabela 4, apresenta três tipos principais de antenas utilizadas nessa tecnologia. A antena parabólica é destacada por sua capacidade de transmitir em longas distâncias (de 100 metros a quilômetros) com alta potência (de 10 watts a 1 quilowatt) na faixa de frequência de 2,4 GHz a 5,8 GHz, oferecendo alta direcionalidade e eficiência, porém seu grande tamanho e necessidade de alinhamento preciso são desafios significativos. O *phased array* é adequado para distâncias curtas a médias (de 10 metros a 500 metros), com potência variando de média a alta (de 10 watts a 500 watts) na mesma faixa de frequência, oferecendo direção ajustável e alta precisão, mas com custo elevado e complexidade operacional. Visto que, a antena *microfita* é projetada para distâncias curtas (até 10 metros), com potência variando de baixa a média (de 1 watt a 10 watts), sendo de baixo custo e fácil fabricação, porém com ganho e eficiência limitados. Essas especificações destacam a diversidade de características entre os tipos de antenas, adequando-se às necessidades específicas de diferentes aplicações de transmissão de energia sem fio por micro-ondas. (PINHO, 2020; CADENCE, 2021)

Tabela 4 – Especificações das Antenas para Transmissão de Energia sem Fio por Micro-ondas

<b>Tipo de Antena</b>	<b>Distância de Transmissão</b>	<b>Potência Fornecida</b>	<b>Frequência de Operação</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<b>Parabólica</b>	Longa (100m-km)	Alta (10W-1kW)	2,4GHz-5,8GHz	Alta direcionalidade, alta eficiência	Grande tamanho, difícil de alinhar
<b>Phased Array</b>	Curta a média (10m-500m)	Média a alta (10W-500W)	2,4GHz-5,8GHz	Direção ajustável, alta precisão	Custo elevado, complexo
<b>Microfita</b>	Curta (até 10m)	Baixa a média (1W-10W)	2,4GHz-5,8GHz	Baixo custo, fácil de fabricar	Baixo ganho, eficiência limitada

Fonte: (PINHO, 2020; CADENCE, 2021)

### 2.3.3 Geradores Para Micro-ondas

A transmissão de energia elétrica sem fio por micro-ondas WPT abrange a conversão de energia elétrica em energia de micro-ondas, a transmissão dessas ondas e, finalmente, a reconversão em energia elétrica. A escolha do gerador de micro-ondas é determinante para a eficiência do sistema. Existem diversos tipos de geradores de micro-ondas utilizados para esta finalidade, cada um com suas características específicas.(SHINOHARA, 2014b).

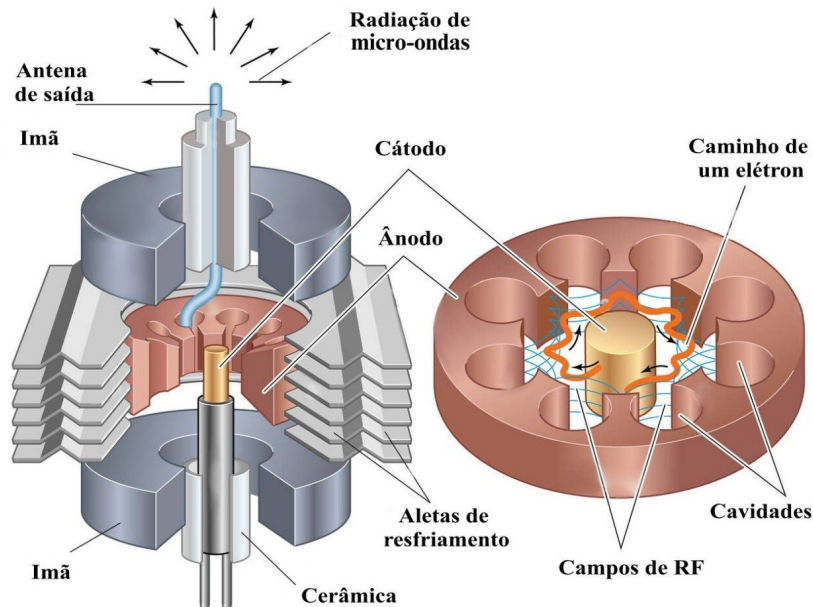
#### 2.3.3.1 Gerador Magnetron

Os geradores *magnetrons* são dispositivos amplamente utilizados na geração de micro-ondas, conhecidos por sua alta eficiência e capacidade de produzir potência elevada. Eles têm diversas aplicações, que vão desde fornos de micro-ondas domésticos até sistemas de radar, tanto em ambientes industriais quanto militares. A principal função do magnetron é converter energia elétrica em micro-ondas, por meio da interação entre um campo magnético e um fluxo de elétrons em movimento. Essa conversão ocorre nas cavidades ressonantes localizadas no ânodo do magnetron, o que resulta na emissão de micro-ondas para a aplicação desejada (U.S. Navy, 1998).

O magnetron, conforme ilustrado na Figura 15, é composto por um ânodo cilíndrico que contém várias cavidades ressonantes, e um cátodo central. Quando uma alta tensão é aplicada ao magnetron, os elétrons emitidos pelo cátodo interagem com o campo magnético externo, o que faz com que os elétrons sigam trajetórias espirais ao redor do cátodo e atravessem as cavidades ressonantes do ânodo. A interação dos elétrons com o campo magnético e as cavidades ressonantes do ânodo resulta na geração de radiação de micro-ondas. Esta radiação é então

direcionada para fora do magnetron, com a frequência e potência desejadas (LIU *et al.*, 2018).

Figura 15 – Gerador Magnetron.



Fonte: (Encyclopaedia Britannica, 2023).

A operação contínua e estável deste gerador depende da sincronização entre a velocidade tangencial dos elétrons e a velocidade de fase das ondas viajantes geradas nas cavidades ressonantes. Essa condição de sincronização é descrita pela equação 2.16, que é essencial para garantir que a oscilação do magnetron se mantenha eficiente e estável. A interação dos elétrons com o campo magnético os faz descrever trajetórias espirais ao redor do cátodo, e à medida que os elétrons passam pelas cavidades ressonantes, eles geram ondas eletromagnéticas. Para que as ondas sejam geradas de forma eficaz, a velocidade tangencial dos elétrons deve estar em fase com a onda viajante. A equação 2.16 descreve esta condição, e a sua validade é crucial para o funcionamento do magnetron (WANG; WU, 2017).

$$V_t = V_p = \omega n r_{um} \quad (2.16)$$

Onde:

- $V_t$ : Velocidade tangencial dos elétrons;
- $V_p$ : Velocidade de fase da onda viajante;
- $\omega$ : Frequência angular da ressonância;
- $r_{um}$ : Raio da superfície interna do ânodo;

- $n$ : Número do modo.

A eficiência e a potência de saída pode ser aumentadas por modificações estruturais, como o uso de cavidades ressonantes assimétricas, tiras quebradas e circuitos de acoplamento do tipo *loop*. Estas modificações têm como objetivo intensificar o campo de acoplamento de energia e reduzir os campos indesejados na zona de interação. As tiras quebradas, por exemplo, são empregadas para uniformizar o campo elétrico e suprimir modos de ressonância indesejados (HU *et al.*, 2021).

Além disso, a operação eficiente do magnetron depende do cumprimento de condições específicas de tensão. A tensão aplicada  $V$  deve ser maior que a tensão de corte  $V_{um}$  (que é a menor tensão necessária para iniciar a operação do magnetron), mas menor que a tensão síncrona  $V_t$ , que é a tensão necessária para que os elétrons se sincronizem com a onda viajante. Estas condições de tensão são descritas pelas equações 2.17 e 2.18, e são fundamentais para o funcionamento estável do dispositivo (HU *et al.*, 2021).

$$V_{um} = \frac{e}{8m} \frac{r_{um}^2}{\left(1 - \frac{r_c^2}{r_{um}^2}\right)^2} B^2 \quad (2.17)$$

$$V_t = \frac{r_{um}^2}{2\left(1 - \frac{r_c^2}{r_{um}^2}\right)} \omega n B - \frac{r_{um}^2}{2(\omega n)^2} m e \quad (2.18)$$

Onde:

- $V_t$ : Tensão síncrona;
- $V_{um}$ : Tensão de corte;
- $r_{um}$ : Raio interno do ânodo;
- $r_c$ : Raio do cátodo;
- $\omega$ : Frequência angular;
- $B$ : Campo magnético;
- $e$ : Carga do elétron;
- $m$ : Massa do elétron.

Um fator crucial para a operação do magnetron é o seu sistema de resfriamento, que previne o superaquecimento do dispositivo durante sua operação. O resfriamento é geralmente feito por meio de um sistema de circulação de água que dissipa o calor gerado pela alta potência de

saída sem afetar o desempenho do dispositivo. Este sistema de resfriamento opera independentemente do sistema elétrico, garantindo que o magnetron funcione de maneira estável durante longos períodos de operação (CASPER *et al.*, 2010).

A potência de saída do magnetron pode ser calculada pela seguinte equação:

$$P_{out} = \eta \cdot P_{in}$$

Onde:

- $P_{out}$ : Potência de saída gerada pelo magnetron;
- $P_{in}$ : Potência de entrada fornecida ao dispositivo;
- $\eta$ : Eficiência do magnetron, que normalmente varia entre 60% e 80% em aplicações industriais.

Segundo (POZAR, 2012), na equação (2.19), a eficiência de um gerador pode ser calculada pela razão entre a potência de saída ( $P_{out}$ ) e a potência de entrada ( $P_{in}$ ):

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (2.19)$$

onde:

- $\eta$ : é a eficiência em porcentagem (%);
- $P_{out}$ : é a potência de saída em watts (W);
- $P_{in}$ : é a potência de entrada em watts (W).

O ganho de potência da equação (2.20), é dado pela razão entre a potência de saída ( $P_{out}$ ) e a potência de entrada ( $P_{in}$ ) expressa em decibéis (dB), (COLLIN, 2007):

$$G = 10 \log \left( \frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \quad (2.20)$$

onde:

- $G$ : é o ganho em decibéis (dB);
- $P_{out}$ : é a potência de saída em watts (W);
- $P_{in}$ : é a potência de entrada em watts (W).



A potência de saída pode ser determinada pela corrente do feixe eletrônico ( $I$ ) e a tensão de aceleração ( $V$ ), (BROWN, 1984; BALANIS, 2005b), segue equação (2.21):

$$P_{\text{out}} = I \cdot V \cdot \eta \quad (2.21)$$

onde:

- $P_{\text{out}}$ : é a potência de saída em watts (W);
- $I$ : é a corrente do feixe eletrônico em amperes (A);
- $V$ : é a tensão de aceleração em volts (V);
- $\eta$ : é a eficiência do *Klystron* (fração, não porcentagem).

A frequência de operação ( $f$ ) e o comprimento de onda ( $\lambda$ ) da equação (2.22) estão relacionados pela velocidade da luz ( $c$ ): (SHINOHARA, 2014a)

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.22)$$

onde:

- $\lambda$ : é o comprimento de onda em metros (m);
- $c$ : é a velocidade da luz ( $3 \times 10^8$  m/s);
- $f$ : é a frequência de operação em hertz (Hz).

### 2.3.3.2 Gerador Klystron

Os *klystrons* são dispositivos amplificadores de micro-ondas que desempenham um papel fundamental em uma variedade de aplicações de comunicação e pesquisa, esses dispositivos transformaram significativamente o manuseio de sinais de alta frequência. O funcionamento dos *klystrons* se baseia na interação entre um feixe de elétrons e cavidades ressonantes. Essas cavidades, quando devidamente ajustadas, conseguem amplificar ou gerar micro-ondas de maneira eficiente. São dispositivos projetados para intensificar a potência de sinais de RF utilizando a energia contida em um feixe de elétrons. Os mesmos transformam a energia cinética dos elétrons em ondas eletromagnéticas amplificadas, resultando na geração de sinais RF mais potentes.(TERYAEV *et al.*, 2015). Em um *klystron* apresentado na figura 16, um feixe de elétrons é emitido por um cátodo e acelerado por uma diferença de potencial. Esse feixe atravessa uma ou mais cavidades ressonantes antes de ser coletado por um ânodo. A primeira cavidade, chamada "*buncher*", tem a tarefa de agrupar os elétrons do feixe em "pacotes" ou "grupos". A

interação subsequente desses grupos com outras cavidades resulta na amplificação do sinal de micro-ondas.(FOURIKIS, 2000).

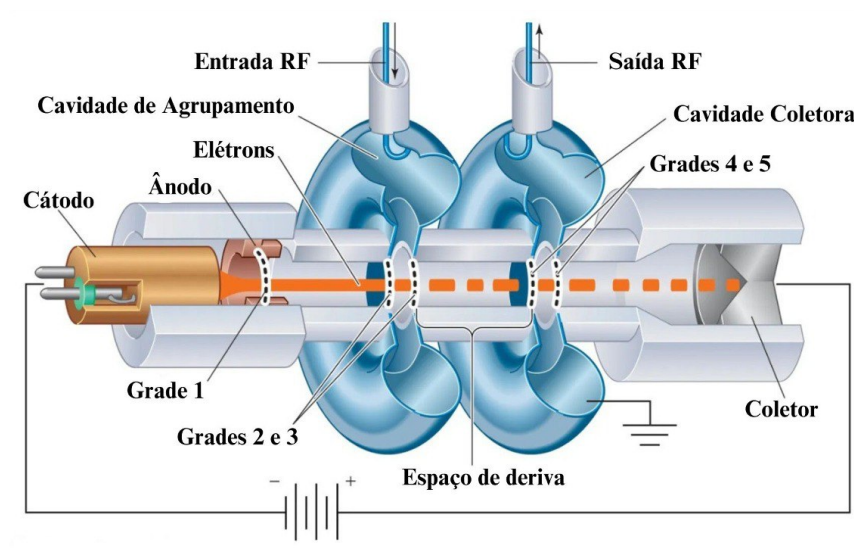
Conforme (LIN; ZHANG; WANG, 2022), há tres tipos de klystrons:

- *Klystron* de duas cavidades: É a forma mais simples, composta por uma cavidade *buncher* e uma cavidade *catcher*. Devido à sua simplicidade e facilidade de operação, é frequentemente usado em contextos educacionais.

- *Klystron* reflexivo: Neste tipo, os elétrons são refletidos de volta através da cavidade ressonante, proporcionando amplificação adicional. Também é conhecido como “*klystron* de onda contínua” por sua capacidade de gerar uma saída contínua.

- *Klystron* multi-cavidade: Inclui várias cavidades ressonantes entre o *buncher* e o *catcher*, permitindo uma amplificação mais robusta. Este tipo é amplamente utilizado em transmissores de TV e sistemas de radar.

Figura 16 – Diagrama Klystron de duas Cavidades.



Fonte: (Encyclopaedia Britannica, 2023).

### 2.3.3.3 Geradores de Estado Sólido

Geradores de Estado Sólido (*Solid State Microwave Generators*) são dispositivos avançados que empregam semicondutores de alta potência, como transistores *Laterally Diffused Metal Oxide Semiconductor* (LDMOS) e *Gallium Nitride* (GaN), para gerar micro-ondas. Em contraste com os antigos tubos de vácuo, como *magnetrons* e *klystrons*, esses geradores aproveitam os avanços na tecnologia de semicondutores para oferecer maior eficiência energética, ocupação de menor espaço e maior confiabilidade. Transistores LDMOS e GaN operam em frequências mais altas, tornando-os ideais para aplicações que demandam micro-ondas potentes e precisas. Esses geradores são particularmente valorizados em setores como comunicações

via satélite, radar, aquecimento industrial por micro-ondas e aplicações médicas avançadas. Sua capacidade de oferecer controle refinado na geração de micro-ondas, aliada à facilidade de integração em sistemas digitais e de comunicação, contribui para sua crescente adoção.(Encyclopaedia Britannica, 2023)

Para o cálculo da eficiência e ganho de potência do gerador de estado sólido são utilizadas as equações (2.19), (2.20) do gerador *klystron*.

#### 2.3.3.4 Geradores Masers

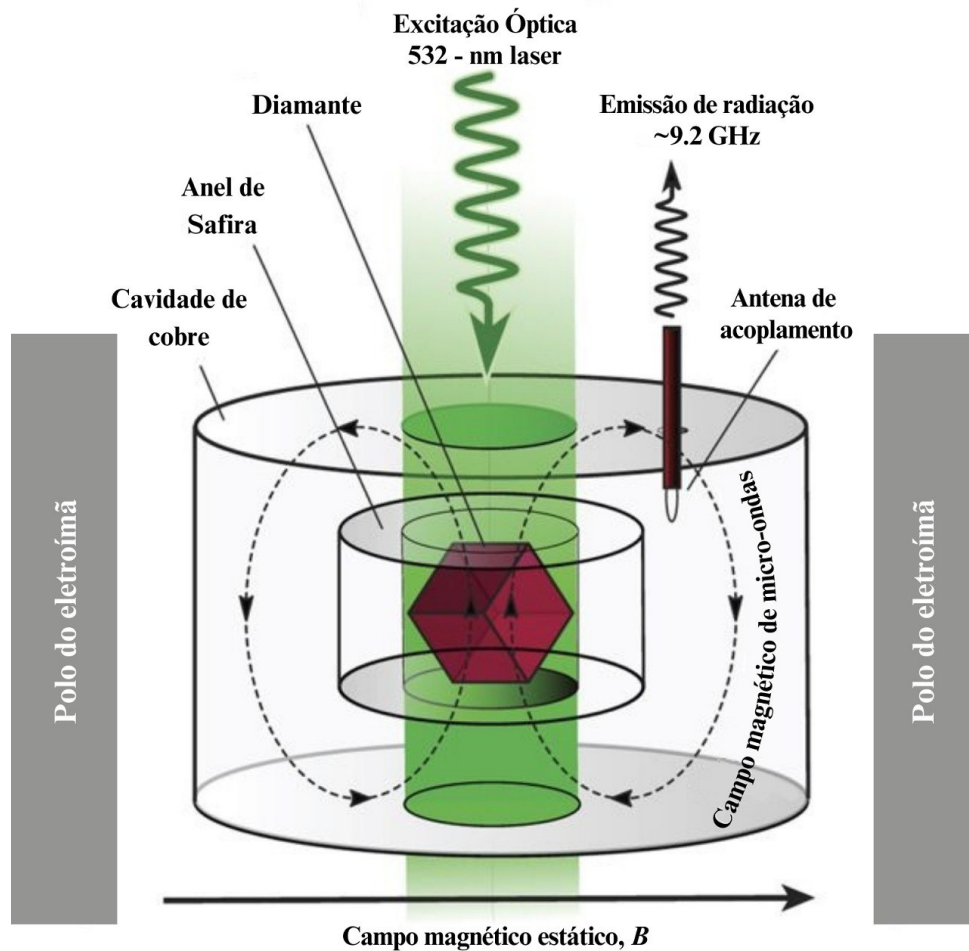
Um *maser* é um dispositivo que gera e amplifica radiação eletromagnética na faixa de micro-ondas do espectro, o termo *maser* é um acrônimo para amplificação de micro-ondas por emissão estimulada de radiação. A radiação produzida por um *maser* possui um comprimento de onda extremamente constante e reproduzível, permitindo que seja utilizada para controlar relógios com uma precisão que resulta em uma variação de não mais de um segundo ao longo de centenas de anos. Os *masers* têm sido empregados na amplificação de sinais fracos provenientes de radares e satélites de comunicação, o *maser* também é reconhecido como um precursor fundamental do laser.(Encyclopaedia Britannica, 2024).

Para operar, um oscilador *maser* necessita de uma fonte de átomos ou moléculas excitadas e um ressonador para armazenar a radiação emitida. A excitação deve induzir uma maior quantidade de átomos ou moléculas no estado de energia mais alto do que no mais baixo, garantindo que a amplificação por emissão estimulada prevaleça sobre a absorção. Para comprimentos de onda de alguns milímetros ou mais, o ressonador pode ser uma cavidade metálica com dimensões ajustadas de modo que apenas um dos seus modos de oscilação coincida com a frequência emitida pelos átomos. Esta cavidade é ressonante na frequência específica, similar a um tambor que ressoa em uma frequência de áudio específica. As perdas em tal ressonador podem ser mínimas, permitindo que a radiação seja armazenada por um tempo suficiente para estimular a emissão de átomos subsequentes à medida que são excitados. Por conseguinte, todos os átomos são induzidos a emitir de modo a amplificar a onda armazenada. A saída é obtida permitindo que uma parte da radiação escape por um pequeno orifício no ressonador.(JIAN-FEI *et al.*, 2023).

Os lasers são tradicionalmente operados no espectro que vai do ultravioleta ao infravermelho. No entanto, a tecnologia de lasers pode ser estendida além desse intervalo no espectro eletromagnético. De fato, já foram projetados e demonstrados lasers que funcionam no espectro de micro-ondas. Assim como em outras regiões do espectro, a operação de lasers em micro-ondas requer um meio de ganho e um ressonador para que o processo de emissão estimulada ocorra. Para alcançar o processo fundamental pelo qual os lasers funcionam, permitindo a produção de luz coerente e de alta intensidade em uma única direção, chamado de *Lasing*, é necessária uma diferença de energia na ordem de GHz. Os centros de nitrogênio-vacância (NV) em diamantes possuem essas lacunas de energia na região de micro-ondas, que podem ser

controladas para produzir *lasing*. A figura 17 é de um *maser*, que é um laser de micro-ondas, utiliza esses centros NV de diamante como o meio de ganho, e o sistema é embutido em um ressonador de cavidade cilíndrica. (FindLight, 2023).

Figura 17 – Oscilador Maser.



Fonte: (FindLight, 2023).

### 2.3.4 Parâmetros dos Geradores

A tabela 5 compara quatro tipos de geradores de micro-ondas: *Magnetron*, *Klystron*, *Gerador de Estado Sólido* e *Maser*.

O *magnetron* é eficiente e de baixo custo, mas oferece baixa flexibilidade e estabilidade de frequência. *Klystron* é altamente flexível e pode operar em uma ampla faixa de frequências, porém é dispendioso e complexo. Geradores de Estado Sólido são estáveis e flexíveis, com um custo médio a alto, entretanto têm potência limitada. *Masers* são extremamente precisos e de baixo ruído, contudo possuem baixa potência e custo elevado. (JAIN, 2020; COLLIN, 2007; POZAR, 2012). Essa comparação destaca as características principais e as limitações de cada tecnologia, ajudando na escolha conforme a aplicação específica.

Tabela 5 – Comparação de Geradores de Micro-ondas

Parâmetros	Magnetron	Klystron	Gerador de Estado Sólido	Maser
<b>Eficiência</b>	50-85%	40-70%	20-60%	30-50%
<b>Custo e Flexibilidade</b>	Baixo custo, baixa flexibilidade	Alto custo, alta flexibilidade	Médio a alto custo, alta flexibilidade	Alto custo, baixa flexibilidade
<b>Taxa de Frequência</b>	0.9-30 GHz	0.5-400 GHz	1-100 GHz	10-100 GHz
<b>Potência Saída</b>	Até 1 MW	Até 1 GW	Até 1 kW	Vários mW
<b>Vantagens</b>	Alta potência de saída, eficiência razoável	Alta potência de saída, ampla faixa de frequências	Alta estabilidade, boa flexibilidade de frequências	Alta precisão, baixo ruído
<b>Desvantagens</b>	Frequência fixa, estabilidade de frequência baixa	Alto custo, complexo	Potência limitada, eficiência menor	Baixa potência de saída, alto custo

Fonte: (JAIN, 2020; COLLIN, 2007; POZAR, 2012)

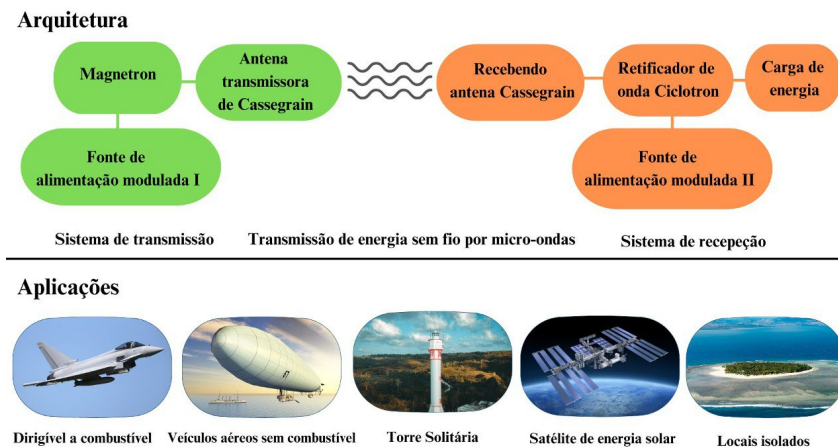
## 2.4 ENERGIA ELÉTRICA SEM FIO ATRAVÉS DAS MICRO-ONDAS

A configuração do sistema de transferência de energia sem fio de micro-ondas de alta potência e longa distância é apresentada na Figura 18, compreendendo elementos de geração e retificação de micro-ondas, bem como antenas transmissoras e receptoras. A precisão no controle do feixe das antenas é primordial, e questões relacionadas à medição e calibração são efetivamente relevantes em qualquer projeto sério nessa área. (HU *et al.*, 2021).

Após análise de (HU *et al.*, 2021), realizou-se a escolha pela antena *Cassegrain* para a transmissão e recepção de alta potência de micro-ondas. Ajustando os dois paraboloides refletivos nesta antena, é possível otimizar a distribuição do campo de interface e a eficiência de utilização. Um sistema de antena *Cassegrain* transceptor, com sua estrutura simples, alta eficiência de conversão e capacidade de potência, pode alcançar uma eficiência integral de transmissão de energia de 2,6% a uma distância de 10 km.

Os retificadores baseados em diodo e os geradores de energia de micro-ondas, empregados em sistemas de transmissão de energia sem fio, são mais adequados para distâncias que variam de curtas a médias. Conquanto, para alcançar transmissões em longas distâncias, é preciso selecionar a faixa de frequência adequada. Nesse sentido, a banda de frequência em torno

Figura 18 – Arquitetura e Aplicação do Sistema MWPT de Alta Potência de Longa Distância.



Fonte: Adaptado de (HU *et al.*, 2021).

de 2,45 GHz é comumente escolhida, pois corresponde às chamadas "janelas de micro-ondas" da atmosfera. Ademais, essa faixa de frequência oferece abundantes fontes de micro-ondas práticas e de baixo custo, juntamente com retificadores altamente eficientes, garantindo um exímio desempenho para esses sistemas de transmissão. (SUH; CHANG, 2002).

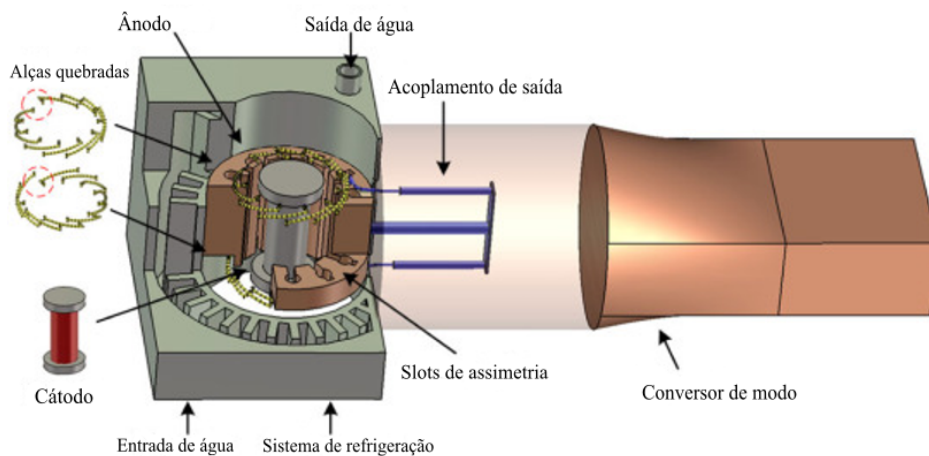
De acordo com (SASAKI; TANAKA, 2011), para uma transmissão de micro-ondas com frequência de 5.8 GHz de uma antena com área de 2 km<sup>2</sup> localizada na órbita geossíncrona para uma estação receptora com 3.5 km de diâmetro na Terra, é necessário um ângulo de feixe de 100 μrad, juntamente com uma precisão de apontamento de 10 μrad. Para alcançar essa precisão, utiliza-se a tecnologia retro-diretiva, que se baseia no uso de um sinal piloto enviado a partir do solo para controlar o feixe de micro-ondas de cada painel da antena, direcionando-o com precisão para a estação receptora. A tecnologia retro-diretiva é um método que permite que a antena ajuste automaticamente a direção do feixe de micro-ondas em resposta a um sinal piloto. Cada painel da antena recebe o sinal do solo e ajusta a fase de suas micro-ondas para garantir que o feixe resultante seja direcionado de forma precisa à estação receptora. Embora os painéis individuais sejam rígidos o suficiente para manter a forma do feixe, o movimento relativo entre os painéis em um grande conjunto de antenas pode causar desalinhamentos. Portanto, é necessário ajustar constantemente a fase das micro-ondas entre os painéis, o que requer o desenvolvimento de novas tecnologias capazes de garantir um feixe focado com extrema precisão na estação terrestre.

A energia de micro-ondas recebida no local é retificada para fornecer energia DC usando matrizes de antena retificadora (*rectenna*) com diodos *Schottky*. A eficiência de conversão de energia para uma *rectenna* simples excede 80% em uma faixa de potência acima de 50mW. Não obstante, maiores pesquisas são necessárias para melhorar a eficiência energética para entradas de classe de 1mW e para a matriz de *rectenna* como um todo. (SASAKI; TANAKA, 2011).

No que diz respeito ao retificador de micro-ondas, o sinal recebido é direcionado para um retificador de onda *cíclotron*, um dispositivo de vácuo elétrico especializado capaz de converter eficientemente a energia de micro-ondas em corrente contínua. Este retificador compacto, operando a 2,45 GHz e com uma potência de entrada de micro-ondas de 10 kW, pode alcançar uma eficiência de conversão impressionante de 85%. Além disso, ele é integrado à rede elétrica e possui proteção automática contra sobrecargas de energia de entrada e saída. (AWAIS *et al.*, 2018)

A figura 19, ilustra um *magnetron*, no centro, encontra-se o cátodo, de onde os elétrons são emitidos, circundado pelo ânodo que, em conjunto com um campo magnético, direciona esses elétrons em trajetórias circulares. Os laços quebrados e os *slots* de assimetria auxiliam na modulação e estabilização da frequência das micro-ondas. O acoplamento de saída coleta as micro-ondas geradas, que são então direcionadas pelo conversor de modo para sua aplicação final. O sistema de refrigeração, com entrada e saída de água, mantém a temperatura do *magnetron* controlada, prevenindo superaquecimento durante o funcionamento.

Figura 19 – Esboço Estrutural do novo *Magnetron* Ressonante Assimétrico de Alta Potência e seus Principais Componentes.



Fonte: Disponível em: (HU *et al.*, 2021).

No contexto do sistema de transferência de energia sem fio por micro-ondas MWPT de alta potência e longa distância, um novo *magnetron* ressonante assimétrico de 400 kW foi utilizado como gerador de micro-ondas transmissor. O bloco de ânodo do *magnetron* é composto por 12 cavidades ranhuradas do tipo *magnetron*, juntamente com duas tiras quebradas. Esses elementos não apenas determinam a frequência de operação do *magnetron*, mas também influenciam a distribuição do campo eletromagnético gerado (FLEMING *et al.*, 2012).

Neste caso, (HU *et al.*, 2021), utilizou um gerador de micro-ondas *magnetron* ressonante assimétrico compacto, capaz de gerar 400 kW com eficiência de conversão de 45%. Esse gerador alimenta uma antena altamente direcional responsável por transmitir a energia para o local desejado. Na estação receptora, outra antena é empregada para captar a energia das micro-ondas,

que é então canalizada para um retificador. Diversos tipos de antenas transmissoras e receptoras foram considerados, sendo a escolha dependente do tipo de gerador de micro-ondas e retificador selecionados, além de considerações de peso e custo. Para uma aplicação terrestre como essa, as antenas transmissoras e receptoras são semelhantes, permitindo o uso de um único tipo de antena.



### 3 METODOLOGIA

A transmissão de energia elétrica sem fio por micro-ondas é uma tecnologia emergente que visa fornecer energia elétrica de forma eficiente sem a necessidade de cabos físicos. Este processo envolve a conversão de energia elétrica em ondas eletromagnéticas de alta frequência, que são transmitidas através do ar e reconvertidas em energia elétrica no ponto de recepção. Neste capítulo, serão citados os componentes-chave deste sistema, que incluem, antenas, transmissores e receptores, todos trabalhando em conjunto para garantir a eficiência e a precisão da transmissão.

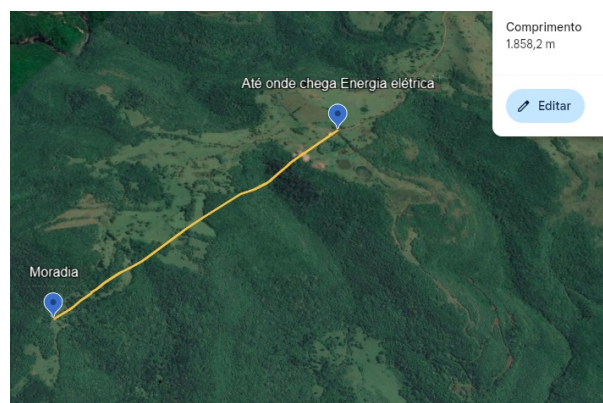
#### 3.1 ESTUDO DE CASO

A respectiva região da Capela do Rosário, situa-se no Refugiado, 5º Distrito do Município de Vacaria, Rio Grande do Sul, Brasil, cerca de 40 km do centro da cidade, sendo caracterizada por terreno acidentado, matas densas e peraus (escarpas íngremes). Para configurar uma simulação de transmissão de energia elétrica sem fio usando micro-ondas, será impreterível considerar parâmetros específicos da região, que podem influenciar a propagação do sinal. A topografia da região é composta por terreno acidentado com variações significativas de altitude e presença de matas densas e vegetação espessa. É apropriado salientar que a cobertura vegetal apresenta alta densidade de árvores e vegetação, o que pode causar atenuação significativa do sinal. O solo da região é composto por diferentes tipos de rocha e terra, com variações na condutividade elétrica, além do clima temperado com estações bem definidas, incluindo períodos de chuva que podem afetar a propagação do sinal.

A imagem da figura 20, retirada do *Google Earth*, mostra uma vista aérea do trecho de vegetação densa, com dois pontos marcados: "*Moradia*" e "*Até onde chega Energia elétrica*". A distância entre esses pontos é de aproximadamente 1.858,2 metros (cerca de 1,86 km). Este cenário mostra o local remoto onde a infraestrutura de energia elétrica tradicional termina, que necessita de uma solução para dar continuidade ao fornecimento de energia até a moradia. Para tal propósito, a transmissão de energia elétrica sem fio por meio de micro-ondas será explorada, utilizando a antena de *Cassegrain* e o gerador *Magnetron*.

Com base no fluxograma elaborado na figura 21, o *magnétron* é definido por sua capacidade de gerar micro-ondas de alta potência de forma eficiente. Este dispositivo é fundamental em profusas aplicações industriais e de pesquisa, devido à sua robustez e capacidade de operação em frequências específicas, como 2.45 GHz a 10 GHz, que é habitualmente utilizada para transmissão de micro-ondas. O *magnétron* opera com tensões entre 3 kV e 5 kV e pode fornecer uma potência de saída que varia de 1 kW a 100 kW, dependendo da aplicação, para manter a estabilidade e longevidade do *magnétron*.

Figura 20 – Imagem do Local a ser Estudado para a Simulação



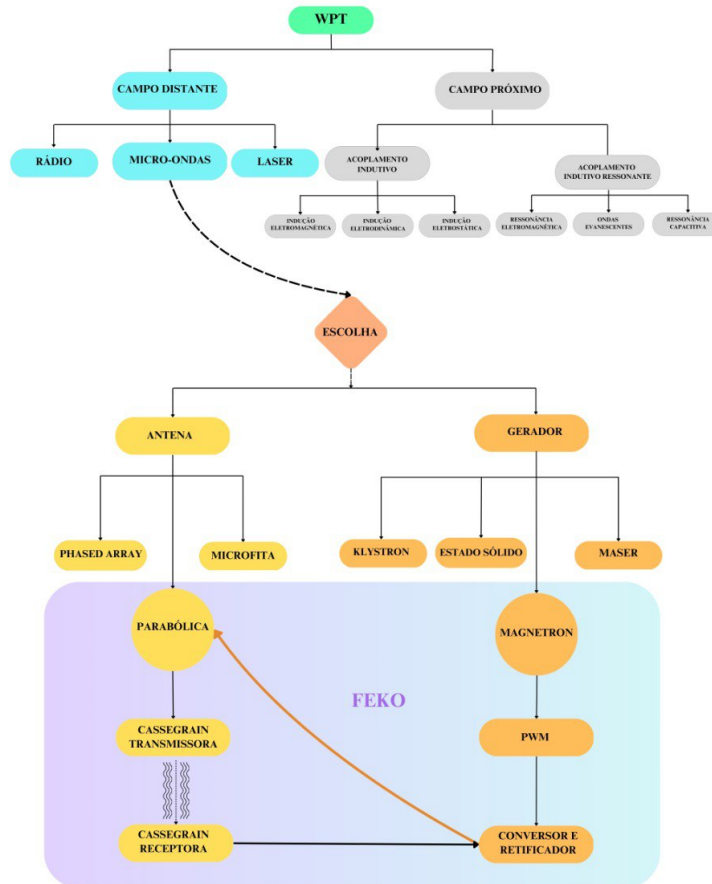
Após a geração das micro-ondas, é fulcral estabilizar e modular a frequência das mesmas. Isso será realizado utilizando técnicas de modulação, como a modulação por largura de pulso (PWM), garantindo uma precisão de frequência de  $\pm 0.1\%$ . A modulação correta é indispensável para manter a integridade do sinal durante a transmissão. Além disso, o acoplamento de saída, tipicamente um acoplador de guia de onda, será utilizado para minimizar as perdas de energia ao coletar e direcionar as micro-ondas geradas para o sistema de antena.

A conversão e direcionamento das micro-ondas são realizados por meio de um conversor de modo, que ajusta as micro-ondas para um formato adequado à transmissão. A antena parabólica *Cassegrain* será então utilizada para focalizar e direcionar as micro-ondas em um feixe estreito e altamente direcional. Esta antena será selecionada devido ao seu alto ganho, que pode variar de 30 a 50 dB, e sua eficiência em frequências de operação como 2.45 a 5,8 GHz. A antena parabólica *Cassegrain*, com um prato de 1 a 5 metros de diâmetro, garante que as micro-ondas sejam transmitidas com mínima dispersão, facilitando a propagação através do espaço livre.

A transmissão das micro-ondas ocorre pelo espaço livre, um meio eficiente e não invasivo que permite a cobertura de longas distâncias sem a necessidade de cabos físicos. As micro-ondas então captadas pela antena parabólica receptora serão ajustadas para captar sinais com perdas mínimas. A antena receptora é crítica para garantir que as micro-ondas recebidas sejam convertidas de forma eficiente em energia elétrica utilizável. Esta conversão final será realizada utilizando tecnologia de retificador de onda *ciclotron* a partir do trabalho de (HU *et al.*, 2021), posicionado no ponto de recepção, sintonizado para essas mesmas frequências de operação, capaz de lidar com a alta potência de entrada e converter eficientemente as micro-ondas recebidas em corrente contínua (DC). A eficiência de conversão ideal deve ser superior a 90% para minimizar as perdas energéticas. A tensão de saída do retificador deve ser estável e adequada para o sistema.

Para validar a simulação da transmissão de energia sem fio por micro-ondas a 1,86 km usando um gerador *magnetron* e uma antena *Cassegrain*, será comparado com estudos relevan-

Figura 21 – Fluxograma de Transmissão de Energia Elétrica sem Fio por Micro-ondas.



tes como o de (STRASSNER; CHANG, 2013), que discute a eficiência histórica de sistemas de micro-ondas em frequências de 2.45 GHz e 5.8 GHz com potências de 500 W a 10 kW em distâncias de até 1 Km, (WANG *et al.*, 2017), explora *magnétrons* ressonantes assimétricos em megawatts, focando em simulações eletromagnéticas, (CHIBA; KONISHI, 2011), detalha antenas refletoras terrestres operando em 4 GHz a 6 GHz com potências de 10 kW a 50 kW, usadas para comunicações espaciais em distâncias maiores e (HU *et al.*, 2021), estuda um sistema de transmissão de alta potência em 2.45 GHz e 5.8 GHz, com potências de 50 kW até 200 kW cobrindo até 1 km. contrapondo, com os determinados estudos, este TCC busca estender a transmissão a 1,86 km em aproximadamente 10 GHz com potências de 20 kW, alinhando-se bem com a literatura existente e focando na eficiência dessa tecnologia, a fim de contribuir para futuras distâncias substanciais.

## 3.2 SOFTWARE DE SIMULAÇÃO

O Sistema FEKO é um produto de software eletromagnético computacional desenvolvido pela empresa multinacional americana de tecnologia da informação Altair Engineering Inc. sediada em Troy, Michigan, criadora de software e serviços em nuvem para desenvolvimento de produtos, computação de alto desempenho, simulação, inteligência artificial e inteligência de dados. O Software FEKO é baseado na formulação integral do Método dos Momentos, das equações de Maxwell, sendo uma ferramenta de simulação eletromagnética de alta precisão, amplamente utilizada em departamentos de telecomunicações, defesa, setor aeroespacial, automotivo e eletrônica. Por conseguinte, o determinado software permite a modelagem de problemas envolvendo antenas, propagação de ondas, dispersão e circuitos de alta frequência. Sua capacidade avançada compreende diversos métodos de solução numérica, como o Método dos Momentos (*Method of Moments*) (MoM) mencionado anteriormente, bem como Óptica Física (PO), e o Lançamento de Raios em Óptica Geométrica (*Ray Launching Geometrical Optics*) (RL-GO), tornando-o uma escolha robusta para problemas de alta complexidade. Dentre seus principais benefícios destaca-se a sua habilidade de combinar diferentes técnicas em uma única simulação.

Um dos pontos culminantes do FEKO é sua interface gráfica amigável, que é dividida entre o CADFEKO, onde são modeladas as geometrias das antenas e estruturas, e o POST-FEKO, responsável pela análise e visualização dos resultados. No CADFEKO, os usuários podem importar modelos de CAD externos ou criar suas próprias geometrias complexas para simulação, o que é particularmente útil em aplicações como a análise de dispersão de aeronaves, o design de antenas automotivas, o projeto de sistemas de radar e a simulação de comunicações via satélite. Ademais, o software é amplamente compatível com outros programas de design e simulação, facilitando sua integração em diferentes fluxos de trabalho.

O software FEKO é extensivamente aplicado em estudos e projetos de larga relevância industrial e acadêmica. Um exemplo notável é seu uso em aplicações de satélites e sistemas de radar, onde a simulação precisa das características de antenas é crucial para garantir o desempenho ideal no espaço. Em projetos de telecomunicações 5G, o FEKO tem sido empregado para o design de antenas MIMO, oferecendo suporte na avaliação do desempenho de antenas em ambientes urbanos complexos, onde a interferência e a propagação das ondas podem ser desafiadoras. Referente ao setor de defesa, o FEKO é constantemente utilizado para simular a assinatura radar de veículos *stealth*, contribuindo para o desenvolvimento de tecnologias de invisibilidade radar.

No contexto deste referido trabalho, o software FEKO será utilizado para realizar uma simulação detalhada da transmissão de energia por micro-ondas na faixa de 10 GHz. A potência de transmissão, que estará na ordem de kilowatts, será gerada por um Magnetron, e a antena Cassegrain, com um ganho de pelo menos 30 dBi, será modelada no CADFEKO. A simulação considerará ainda os efeitos da propagação em um terreno de relevo acidentado e vegetação

densa, como o encontrado na região dos Campos de Cima da Serra. A modulação por largura de pulso (PWM) será usada como método de mitigação de perdas na transmissão. A simulação realizada através do FEKO permitirá uma análise detalhada da eficiência da transmissão de energia, levando em consideração fatores como obstrução e dispersão.

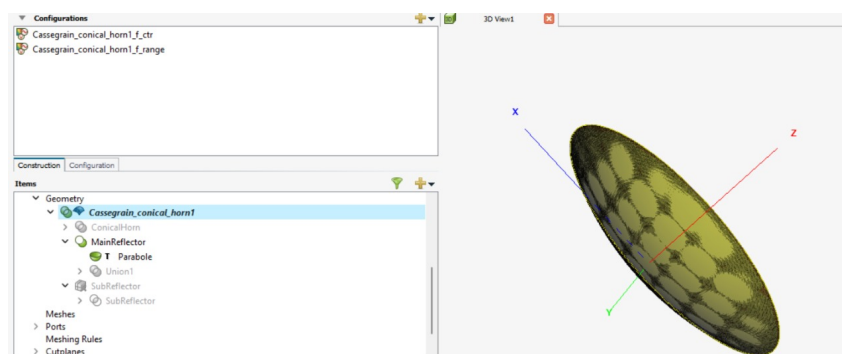
Ao modelar a geometria da antena Cassegrain e do gerador Magnetron, o software FEKO fornecerá uma visão detalhada de como a energia é propagada em condições reais, levando em consideração as características do terreno. A então capacidade de simular ambientes complexos com alta fidelidade permitirá a validação dos resultados experimentais e a otimização do sistema de transmissão. Com o uso do FEKO, será possível determinar a eficácia da transmissão de energia por micro-ondas em áreas remotas, tornando-o um componente essencial para a validação teórica e prática deste estudo.

A partir dos modelos desenvolvidos em (HU *et al.*, 2021), (CHIBA; KONISHI, 2011), (WANG *et al.*, 2017) e (STRASSNER; CHANG, 2013), a simulação visa avaliar a eficiência da conversão de energia elétrica em micro-ondas e sua reconversão no ponto de recepção, enquanto investiga o impacto do terreno e da vegetação na propagação do sinal. Será realizada uma comparação da potência recebida em diferentes pontos ao longo de 1,86 km para determinar a quantidade de energia captada pela antena receptora. O objetivo é alcançar resultados com perdas mínimas, de modo que a potência transmitida, por exemplo, de 20 kW, seja recebida o mais próximo possível desse valor na estação receptora.

### 3.2.1 CADFEKO

A *Figura 22* apresenta o refletor principal da antena parabólica Cassegrain. O refletor parabólico possui um diâmetro de 15 metros e é construído em alumínio, material escolhido por sua alta condutividade elétrica e baixa resistência, o que maximiza a eficiência na reflexão de ondas eletromagnéticas.

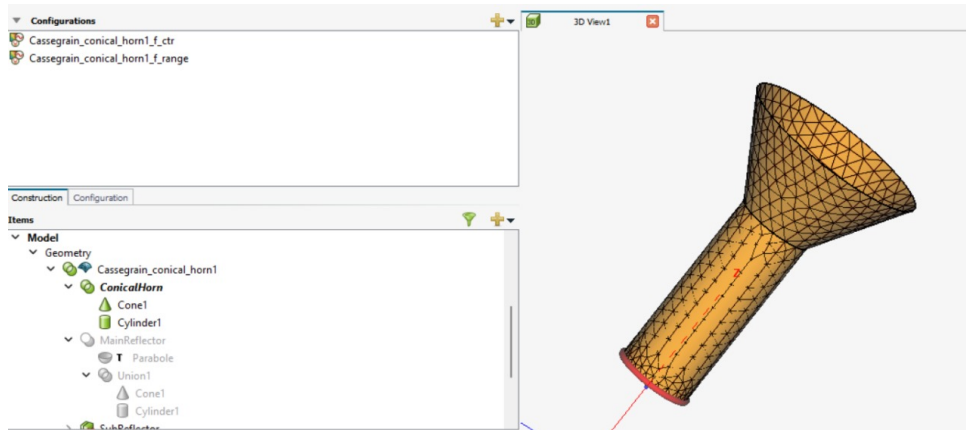
Figura 22 – Modelagem da Antena Refletora Cassegrain de 15 metros no *CADFEKO*



A corneta cônica, visto na *Figura 23* conforme modelada no *CADFEKO*, foi projetada para atuar como o elemento de alimentação da antena Cassegrain, responsável por guiar e direcionar as ondas eletromagnéticas para o subrefletor. A geometria cônica foi construída utilizando

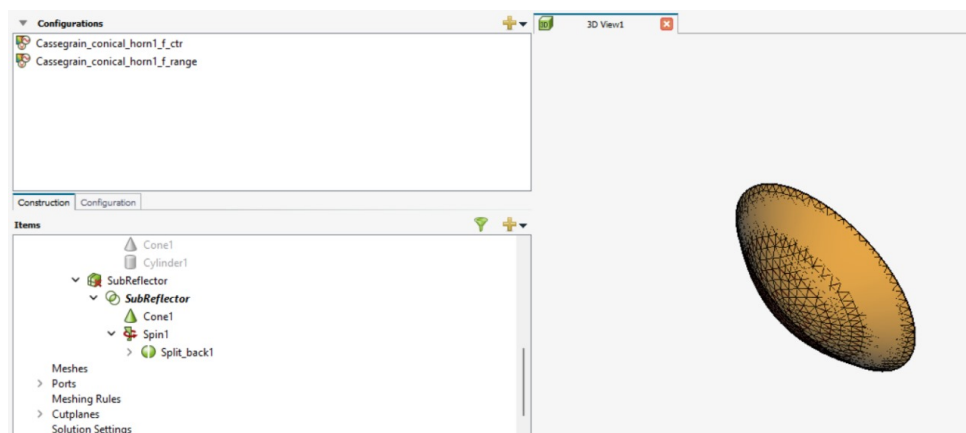
uma combinação de um cone e um cilindro para garantir uma transição suave entre o *waveguide* e o espaço livre, minimizando reflexões internas. A corneta foi integrada ao sistema refletor da antena, permitindo que as ondas refletidas pelo subrefletor e pelo refletor principal resultem em um feixe de micro-ondas altamente direcional, essencial para a transmissão eficiente de energia.

Figura 23 – Montagem da Corneta Cônica



A Figura 24 mostra o *subrefletor*, parte integrante da antena parabólica Cassegrain. Esse subrefletor tem a função de redirecionar e concentrar as ondas eletromagnéticas emitidas pelo *feed* principal para o refletor primário da antena. Ele é essencial para ajustar a fase e o direcionamento das ondas antes de serem refletidas pelo refletor principal, o que contribui para a formação de um feixe colimado e melhora o ganho direcional da antena.

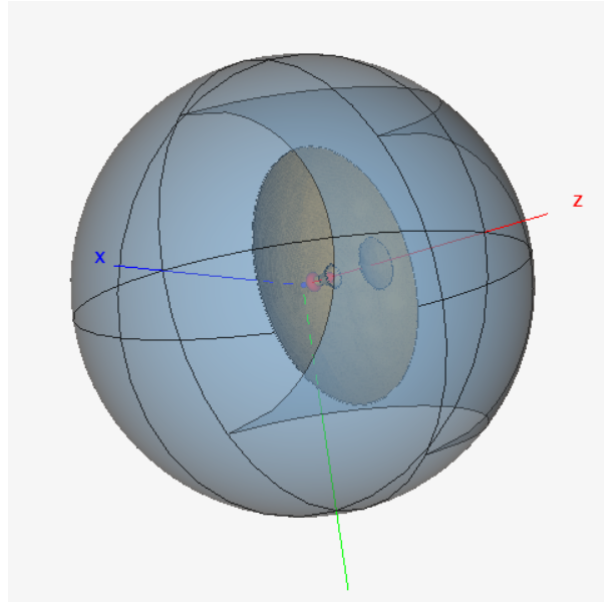
Figura 24 – Modelo do *subrefletor* da Antena Parabólica Cassegrain



Na visualização 3D da Figura 25, observa-se a geometria da antena refletora, com seu refletor principal discretizado por uma malha, característica da aplicação de métodos numéricos como o Método dos Momentos (MoM). Esta malha facilita a resolução dos campos eletromagnéticos irradiados. A orientação da antena no espaço é indicada pelos eixos cartesianos X, Y e Z, sendo que a antena está alinhada ao longo do eixo Z. A escolha do material da antena, neste caso o alumínio, é essencial devido à sua alta condutividade elétrica, leveza e resistência à corrosão, fatores que contribuem para a eficiência e durabilidade da antena. O alumínio, além

de ser um material acessível, também é frequentemente reforçado com aço ou outras ligas para garantir maior estabilidade estrutural sem comprometer o desempenho eletromagnético.

Figura 25 – Imagem da Montagem da Antena de Cassegrain



### 3.2.2 POSTFEKO

A modelagem da antena no POSTFEKO é um passo crucial na análise do desempenho da antena, especialmente no contexto da transmissão de micro-ondas. Após a montagem da antena no CADFEKO, que permite a definição da geometria e dos parâmetros físicos da antena, a simulação no POSTFEKO tem como objetivo avaliar com mais precisão os padrões de radiação, o ganho e a eficiência da antena para diferentes direções e frequências de operação. Para a simulação da antena de Cassegrain, como ilustrado nas figuras abaixo, são ajustados parâmetros como a potência de 10 kW e aproximadamente 3 kW e a frequência de operação de 3 GHz, além de configurar as condições de contorno e propriedades do meio ambiente.

Na figura 26, é possível observar a modelagem do sinal micro-ondas da antena de Cassegrain receptora, com os detalhes da geometria e configuração que são importantes para avaliar como ela interage com a radiação incidente. O ajuste dos parâmetros de entrada é essencial para garantir que a antena receba e concentre a energia de forma eficiente, o que é fundamental para a transmissão de micro-ondas.

Na figura 27, também é exibida a montagem deste sinal da antena de Cassegrain, porém transmissora, onde o foco está em garantir que o feixe de micro-ondas seja bem direcionado e tenha o máximo de eficiência de irradiação. A modelagem cuidadosa dessa antena transmissora é importante para garantir que o máximo de potência seja emitido na direção desejada, reduzindo perdas e dispersões.

Figura 26 – Simulação das Micro-ondas na Antena de Cassegrain Receptora

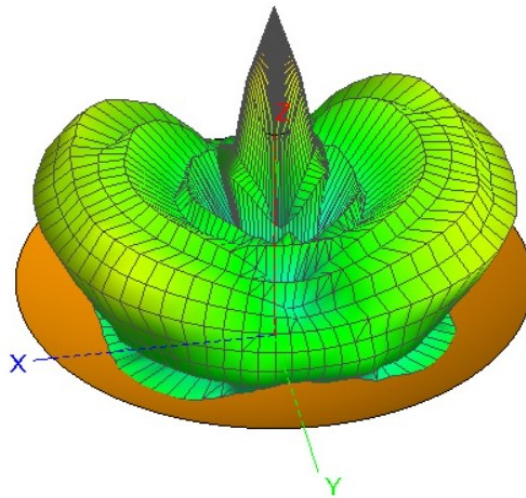
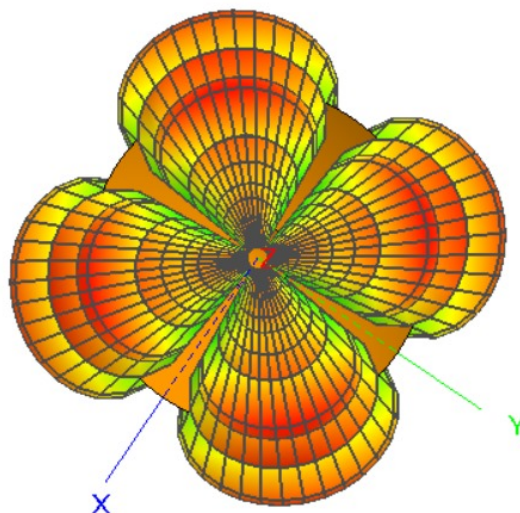


Figura 27 – Simulação das Micro-ondas na Antena de Cassegrain Transmissora



Essas etapas no POSTFEKO são essenciais para simular o comportamento da antena nas condições reais de operação, e os ajustes finos nos parâmetros garantem que a simulação seja precisa. A análise dos padrões de radiação e a visualização dos resultados ajudam a identificar as zonas de maior ganho e as características de foco da antena, o que é fundamental para a avaliação do desempenho na transmissão de energia por micro-ondas.

### 3.2.3 Modelagem da Antena no SolidWorks

O modelo apresentado foi desenvolvido utilizando o software *SolidWorks*, uma ferramenta amplamente utilizada para design e simulação 3D, para projetar e detalhar os componentes principais da antena receptora, incluindo a corneta, o guia de onda, o sub-refletor e o refletor principal.

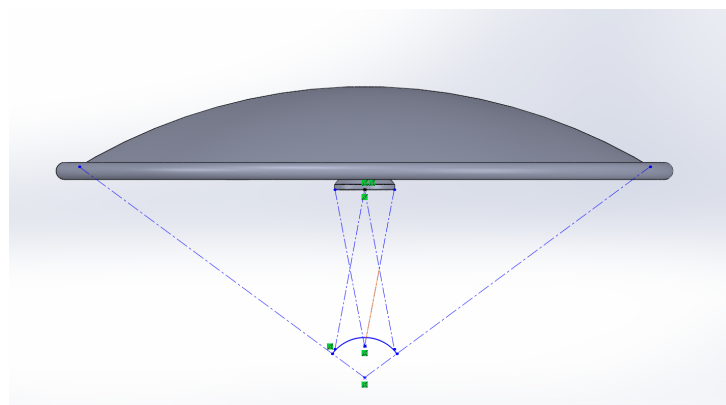


- Refletor Principal: Projetado com base nas dimensões específicas necessárias para alcançar o ganho desejado e garantir a eficiência da coleta das micro-ondas. Foi modelado como uma parábola com um diâmetro definido durante o dimensionamento teórico.
- Sub-refletor: Posicionado para redirecionar o feixe da corneta em direção ao refletor principal, otimizando a distribuição do campo eletromagnético.
- Corneta: A corneta foi modelada, considerando seu comprimento, raio maior e menor, para garantir a irradiação uniforme e focada em direção ao sub-refletor.
- Guia de Onda: Este elemento conecta a corneta ao guia, conduzindo eficientemente as micro-ondas. Foi projetado considerando o diâmetro e a frequência de operação 3 GHz.
- O material do refletor principal e do sub-refletor foi selecionado com base em sua alta condutividade elétrica e resistência mecânica. Comumente, metais como alumínio ou cobre são escolhidos para refletividade e leveza.
- Para a corneta e o guia de onda, materiais condutores foram escolhidos para minimizar as perdas de sinal.

A montagem completa no *SolidWorks* envolveu o alinhamento preciso de todos os componentes para garantir a funcionalidade da antena. A posição relativa do sub-refletor, refletor principal e corneta foi ajustada com base nos cálculos de foco e ângulos de reflexão. Linhas de construção e projeções geométricas, como mostrado na Figura 28, foram usadas para visualizar os trajetos das micro-ondas e confirmar que o design corresponde aos requisitos do projeto.

As dimensões dos componentes foram definidas com base nos cálculos teóricos, garantindo que a antena atingisse o ganho especificado. Propriedades como área efetiva, diretividade e eficiência foram consideradas durante o projeto.

Figura 28 – Modelagem da Antena de Cassegrain desenvolvida no *SolidWorks*



### 3.2.4 AutoCAD no Projeto

O software *AutoCAD* foi utilizado para o desenvolvimento dos diagramas unifilares e das plantas de localização e situação do projeto. Este software reconhecido pela precisão em desenhos técnicos e pela flexibilidade que oferece no planejamento e detalhamento de projetos elétricos. O uso do *AutoCAD* permitiu detalhar cada elemento de forma organizada, facilitando a análise e execução do projeto.

- Representação das conexões entre os principais componentes do sistema, como geradores, inversores, cargas e antenas.
- Identificação dos equipamentos elétricos e suas especificações técnicas, como potência e tensão.
- Definição dos condutores utilizados, incluindo as seções transversais e os comprimentos, conforme normas técnicas aplicáveis.
- Planta de Localização: Apresenta a disposição dos equipamentos dentro do local de instalação, como antenas, painéis de controle e outras infraestruturas.
- Planta de Situação: Indica a posição do projeto em relação ao entorno, incluindo vias de acesso, edificações próximas e outros elementos geográficos importantes.
- Precisão e Escalabilidade: O software permitiu criar representações detalhadas e escaláveis, essenciais para o planejamento e execução do projeto.
- Organização do Projeto: A utilização de camadas (*layers*) possibilitou categorizar os elementos do sistema, como componentes elétricos, estruturas físicas e informações textuais.

### 3.2.5 Parâmetros

Para determinar o alcance efetivo da antena, a uma distância de 1,86 km, e avaliar a intensidade do sinal recebido, a Equação da Transmissão de Friis (*Friis Transmission Equation*) foi aplicada. Ela permite estimar a potência recebida, considerando o ganho da antena, a frequência de operação e as atenuações potenciais causadas pelo meio de transmissão. Isso é fundamental para prever o comportamento da antena em condições reais, como interferências devido ao ar e à vegetação.

Os principais parâmetros utilizados na análise são descritos abaixo:

- Diâmetro da antena ( $D$ ): 15 m
- Eficiência da antena ( $\eta$ ): 0,6
- Distância entre as antenas ( $d$ ): 1800 m

- Potência transmitida ( $P_t$ ): 10 kW = 70 dBm
- Frequência ( $f$ ): 3 GHz
- Velocidade da luz ( $c$ ):  $3 \times 10^8$  m/s

### 3.2.5.1 Cálculo do Comprimento de Onda

O comprimento de onda da equação (2.22), é calculado a partir da velocidade da luz no vácuo ( $c = 3 \times 10^8$  m/s) e da frequência da onda.

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{3 \times 10^9} = 0,0999308 \text{ m}$$

Este valor é fundamental para os cálculos subsequentes de ganho e diretividade da antena, uma vez que o comprimento de onda influencia diretamente na eficiência de transmissão da antena.

### 3.2.5.2 Cálculo do Ganho da Antena

O ganho de uma antena parabólica é dado pela equação (2.5):

$$G = \eta \left( \frac{\pi D}{\lambda} \right)^2$$

Para  $D = 15$  m e  $\lambda = 0,0999308$  m:

$$G = 0,6 \left( \frac{\pi \times 15}{0,0999308} \right)^2$$

Portanto, o ganho da antena é  $G \approx 51,25$  dB.

### 3.2.5.3 Cálculo da Área Efetiva da Antena

A área efetiva da antena é dada pela equação (2.6):

$$A_e = \eta \frac{\pi D^2}{4}$$

$$A_e = 0,6 \times \frac{\pi \times 15^2}{4} = 106,028 \text{ m}^2$$

Portanto, a área efetiva da antena é  $A_e \approx 106,028$  m<sup>2</sup>.

### 3.2.5.4 Cálculo da Diretividade

A diretividade  $D$  de uma antena parabólica é dada pela equação (2.7):

$$D = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2}$$

Substituindo  $A_e = 106,028 \text{ m}^2$  e  $\lambda = 0,0999308 \text{ m}$ :

$$D = \frac{4\pi \times 106,028}{0,0999308^2}$$

Portanto, a diretividade é  $D \approx 51,25 \text{ dB}$ .

### 3.2.5.5 Cálculo da Perda de Propagação no Espaço Livre

A perda de propagação no espaço livre é dada pela equação (2.8):

$$L_p = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi}{c} \right)$$

onde:

- $d = 1800 \text{ m}$  é a distância entre as antenas,
- $f = 3 \text{ GHz} = 3 \times 10^9 \text{ Hz}$  é a frequência,
- $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$  é a velocidade da luz.

Substituindo os valores:

$$L_p = 20 \log_{10}(1800) + 20 \log_{10}(3 \times 10^9) + 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi}{3 \times 10^8} \right)$$

Portanto, a perda de propagação é  $L_p \approx 107,09 \text{ dB}$ .

### 3.2.5.6 Cálculo da Potência Recebida

A potência recebida é dada pela equação de Friis, (2.9):

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_p$$

onde:

- $P_t = 70 \text{ dBm}$  é a potência transmitida (10 kW),
- $G_t = G_r = 51,25 \text{ dB}$  são os ganhos das antenas transmissora e receptora,
- $L_p = 107,09 \text{ dB}$  é a perda de propagação.

Substituindo os valores:

$$P_r = 70 + 51,25 + 51,25 - 107,09 = 65,41 \text{ dBm}$$

Portanto, a potência recebida é  $P_r \approx 2.818,38 \text{ W} = 2,81 \text{ kW}$ .

### 3.2.5.7 Raio da Abertura da Corneta

O raio da abertura da corneta circular, dado pela equação 2.10

$$a \geq 2\lambda$$

$$a \geq 2 \times 0,1 = 0,2 \text{ m}$$

Onde:

- $a$ : Raio da abertura da corneta (em metros).
- $\lambda$ : Comprimento de onda do sinal (em metros).

### 3.2.5.8 Comprimento da Corneta

A equação 2.11, define o comprimento necessário para a corneta

$$L \approx \frac{a}{\tan(\theta)}$$

$$L \approx \frac{0,2}{\tan\left(\frac{\pi}{4}\right)} = \frac{0,2}{1} = 0,2 \text{ m}$$

Onde:

- $L$ : Comprimento da corneta (em metros).
- $a$ : Raio da abertura da corneta (em metros).
- $\theta$ : Ângulo de flare da corneta (em graus ou radianos).

### 3.2.5.9 Diâmetro Interno do Guia de Onda

A equação 2.12, garante que o guia de onda seja dimensionado

$$d \geq \frac{1,706 \cdot c}{f_c}$$

$$d \geq \frac{1,706 \cdot 3 \times 10^8}{3 \times 10^9} = 0.1706 \text{ m}$$

Onde:

- $d$ : Diâmetro interno do guia de onda (em metros).

- $c$ : Velocidade da luz no vácuo ( $3 \times 10^8$  m/s).
- $f_c$ : Frequência de corte do guia de onda (em hertz).

### 3.3 ESCOLHA DO GERADOR MAGNETRON

A escolha do modelo ACME-MW10KW para o desenvolvimento do TCC fundamenta-se em suas especificações técnicas avançadas e em sua capacidade de atender às exigências do projeto, focado na transmissão de energia elétrica sem fio por meio de micro-ondas. Este equipamento combina alta eficiência energética, segurança operacional e flexibilidade. Com uma potência de saída de 10 kW, o gerador de micro-ondas oferece capacidade ideal para transmissões de energia a longa distância. Essa potência é suficiente para alimentar cargas relevantes, assegurando um equilíbrio entre eficiência e viabilidade econômica, o que permite validar os princípios de conversão e transporte de energia. Além disso, a operação em uma frequência central de  $3 \text{ GHz} \pm 0,5 \text{ GHz}$  confere alta diretividade ao sistema e maior eficiência na transmissão, ao mesmo tempo que reduz interferências eletromagnéticas (EMI). A largura de espectro estreita é fundamental para minimizar perdas e proporcionar uma transmissão de energia mais estável e confiável. Esse é amplamente compatível com equipamentos como *magnetrons*, que convertem a energia elétrica em micro-ondas, e guias de onda, que direcionam essas ondas para as antenas transmissoras. Além disso, ele se acopla facilmente a circuitos de controle baseados em modulação por largura de pulso (*PWM*), garantindo a precisão no ajuste da potência irradiada. Essa combinação assegura que o sistema funcione de maneira integrada e eficiente, maximizando a conversão e a transferência de energia.

Outros componentes fundamentais dele são os acopladores de potência, utilizados para medir e ajustar o fluxo de energia ao longo do sistema, além de garantir que a potência irradiada esteja dentro dos limites planejados. Esses dispositivos, juntamente com os isoladores de micro-ondas, protegem os equipamentos contra reflexões prejudiciais e asseguram o desempenho ideal do sistema.

O equipamento opera com tensão de entrada de 380 V, padrão trifásico amplamente utilizado em redes industriais. Essa característica facilita sua integração em sistemas de fornecimento convencionais, reduzindo a complexidade da infraestrutura necessária e garantindo maior estabilidade durante a operação. Essa compatibilidade com tensões industriais assegura eficiência e confiabilidade, mesmo em contextos desafiadores.

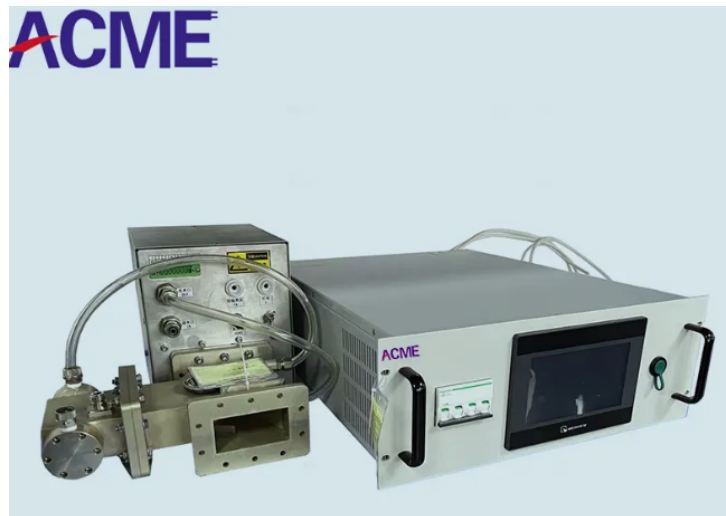
Outro diferencial do gerador é seu sistema de controle flexível, que permite operação tanto local quanto remota. A interface local é intuitiva, com uma tela sensível ao toque para ajustes diretos e rápidos. Já o controle remoto, via comunicação RS485/Modbus/RS232, possibilita monitoramento e ajustes em tempo real, ideal para integração em sistemas automatizados e especialmente útil em instalações remotas. O design modular do gerador também se destaca, pois facilita a manutenção e a substituição de componentes, reduzindo significativamente o

tempo de inatividade. Essa modularidade é particularmente relevante em projetos de transmissão de energia sem fio, onde a continuidade operacional é essencial, principalmente em regiões de difícil acesso.

O gerador ACME-MW10KW também inclui sistemas de proteção robustos, essenciais para garantir a segurança e durabilidade do equipamento. Entre as proteções, destacam-se os mecanismos contra superaquecimento, sobretensão e curto-circuito, além do monitoramento e ajuste automático do fluxo de água para resfriamento eficiente. O equipamento também oferece proteção contra faíscas e falhas de ignição, assegurando a integridade dos componentes críticos e a operação contínua mesmo em condições adversas. A operação em modo de ressonância paralela confere alta tolerância a variações de carga, garantindo maior estabilidade durante transmissões prolongadas.

Dessa forma, a escolha do ACME-MW10KW da figura 29 e suas características, como alta eficiência, estabilidade na operação e sistemas de proteção avançados, atendem plenamente aos desafios técnicos do projeto. A potência de 10 kW, combinada com a operação em alta frequência e a flexibilidade de controle.

Figura 29 – Modelo do Transmissor (ACME-MW10KW)



Fonte: Disponível em: (ACME, 2024).

As tabelas 6, 7, e 8 apresentam as folhas de dados e especificações técnicas extraídas do site do fabricante. Estas informações são fundamentais para garantir a correta escolha e integração dos componentes no sistema de transmissão de energia por micro-ondas. A tabela 6 detalha as características do gerador ACME-MW10KW, como potência, tensão de entrada e controle de modulação, essenciais para a operação eficiente do sistema. Já a tabela 7 fornece as especificações do magnetron, incluindo frequência de operação, potência de saída e eficiência, elementos chave para gerar a micro-onda que será transmitida. A tabela 8 apresenta a interface de controle da fonte de alta frequência, incluindo detalhes sobre a conexão, comunicação e protocolos utilizados para ajuste remoto e monitoramento do desempenho do sistema.

Tabela 6 – Informações Básicas do Equipamento ACME-MW10KW

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
<b>N° de Modelo</b>	ACME-MW10KW	<b>Potência de saída</b>	10 kW
<b>Tensão de entrada</b>	380V	<b>Modo de conexão</b>	Fonte de Alimentação de Comutação Paralela
<b>Modo de partida</b>	Fonte de Alimentação Auto-Excitado	<b>Tensão Modo Regulador</b>	Tipo de Modulação de Largura
<b>Sistema de fornecimento de energia</b>	Equipamento de Distribuição de Energia Terminal	<b>Transmissão de Energia</b>	Dois sentidos de transmissão
<b>Sistema de modulação</b>	PWM	<b>Certificação</b>	CE, ISO
<b>Marca</b>	ACME	<b>Entrada</b>	220V/380V
<b>Modo de entrada</b>	Fios monofásicos 2 / fios trifásicos 4	<b>Modo de controle</b>	PWM
		<b>Iniciar</b>	Arranque suave
<b>Frequência de saída</b>	3 GHz	<b>Taxa de alteração da carga</b>	0.5%
<b>Eficiência</b>	90%	<b>Ciclo de serviço</b>	0-50%
<b>Saída CC</b>	Saída DC pura	<b>Inversão automática</b>	Pode ser definido o tempo
<b>Controle externo</b>	RS485/Modbus/RS232	<b>Modo de trabalho</b>	CC, limite de potência
<b>Pacote de transporte</b>	Embalagem de madeira	<b>Especificação</b>	10 kW
<b>Marca Registrada</b>	ACME	<b>Origem</b>	Jinan
<b>Código HS</b>	8504401990	<b>Capacidade de Produção</b>	200 unid./mês

Fonte: (ACME, 2024)



Tabela 7 – Folha de Dados do Magnetron

<b>Item</b>	<b>Dados Técnicos</b>
<b>Tensão de entrada</b>	Trifásica, AC380V $\pm$ 10%, 60 Hz $\pm$ 2 Hz
<b>Potência do micro-ondas</b>	$\geq$ 10 kW
<b>Frequência de micro-ondas</b>	3 GHz $\pm$ 0,5 GHz
<b>Regulação da potência do micro-ondas</b>	10% 100% regulação contínua
<b>Porta de alimentação para micro-ondas</b>	BJ9
<b>Modo de controle</b>	Controle/comunicação local
<b>Tensão do ânodo</b>	DC-12,5 kV/2,8A
<b>Tensão do filamento</b>	AC12.6V $\pm$ 1,2V
<b>Corrente do filamento</b>	Pré-aqueça 115A, trabalho 96A
<b>Tensão do campo magnético</b>	DC120V $\pm$ 5V
<b>Corrente do campo magnético</b>	5A
<b>Proteções</b>	Subcorrente e sobrecorrente de filamento; sobretensão e sobrecorrente de ânodo; proteção contra incêndio; temperatura excessiva do magnetron; proteção do fluxo de água; proteção contra arco; proteção contra reflexo
<b>Volume</b>	Armário de fonte de alimentação de alta frequência (excluindo o cantilever): 600 mm x 800 mm x 1450 mm; Cabeça de micro-ondas (excluindo o toque): 750 mm x 510 mm x 850 mm
<b>Ambiente de uso</b>	Temperatura de trabalho: -10 40 °C; Temperatura de armazenamento: -20 50 °C; Umidade: 95% sem condensação; Altitude: Menos de 3000 m
<b>Modo de resfriamento</b>	Fonte de alimentação de alta frequência: Resfriamento a água; Cabeça de micro-ondas: Refrigeração a água e ar; Sistema de micro-ondas: Resfriamento a água

Fonte: (ACME, 2024)

Tabela 8 – Definições da Interface da Fonte de Alimentação de Alta Frequência

<b>Nome/Modelo</b>	<b>Definição</b>	<b>Características da Função</b>
<b>Tomada para aviação de 4 núcleos</b>	A, B, C, N	Fonte de alimentação
<b>Conector/assento para aviação de 7 núcleos</b>	L, N, 24 V	Alimentação da cabeça do micro-ondas
	Sinal da porta	Avaria na porta
	Sinal de fluxo de água	Falha no fluxo de água
	Sinal de temperatura da água	Falha de temperatura da água
	-	Reserva
<b>Conector de 5 núcleos para aviação/banco</b>	Campo magnético	-
	Campo magnético	-
	Filamento 1	-
	Filamento 2	-
<b>Supressão de alta tensão</b>	A	Saída de alta tensão do ânodo
<b>Terminal</b>	HGND	Ligação à terra de alta tensão
<b>Poste de ligação à terra</b>	PE	Ligação à terra segura
<b>Junta Pagoda</b>	Entrada de água	Entrada de água de refrigeração
<b>Junta Pagoda</b>	Saída de água	Saída de água de refrigeração

Fonte: (ACME, 2024)

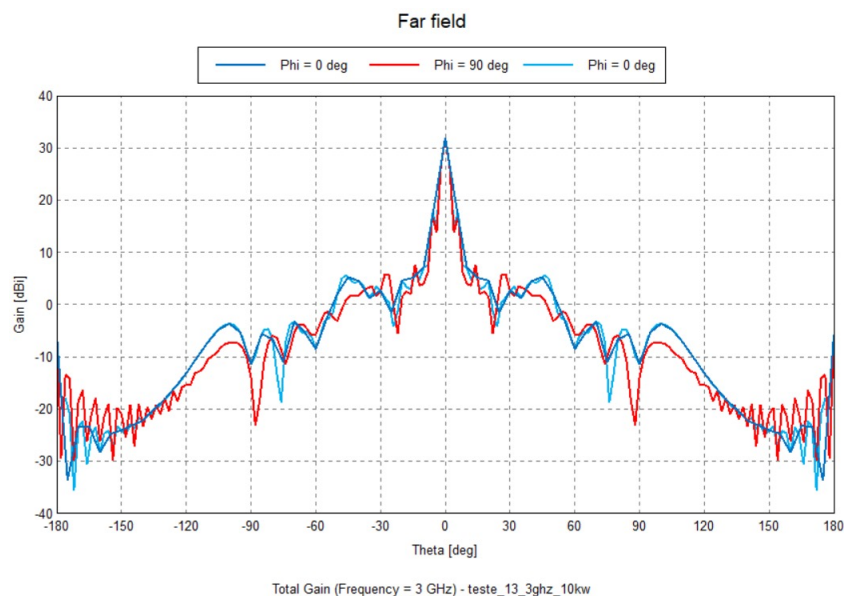
## 4 RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentadas as simulações realizadas no POSTFEKO relacionadas à análise de desempenho da antena Cassegrain para transmissão de energia por micro-ondas. Serão abordadas as simulações da antena transmissora e receptora, levando em consideração parâmetros como frequência, diâmetro do refletor, potência de transmissão, eficiência da antena e distância de transmissão. Essas simulações permitem calcular grandezas fundamentais, como o comprimento de onda, o ganho da antena, a diretividade, a área efetiva e a potência recebida na antena receptora. O objetivo é verificar a eficácia da transmissão de energia em longas distâncias, com base nas configurações simuladas no POSTFEKO.

### 4.1 ANTENA TRANSMISSORA

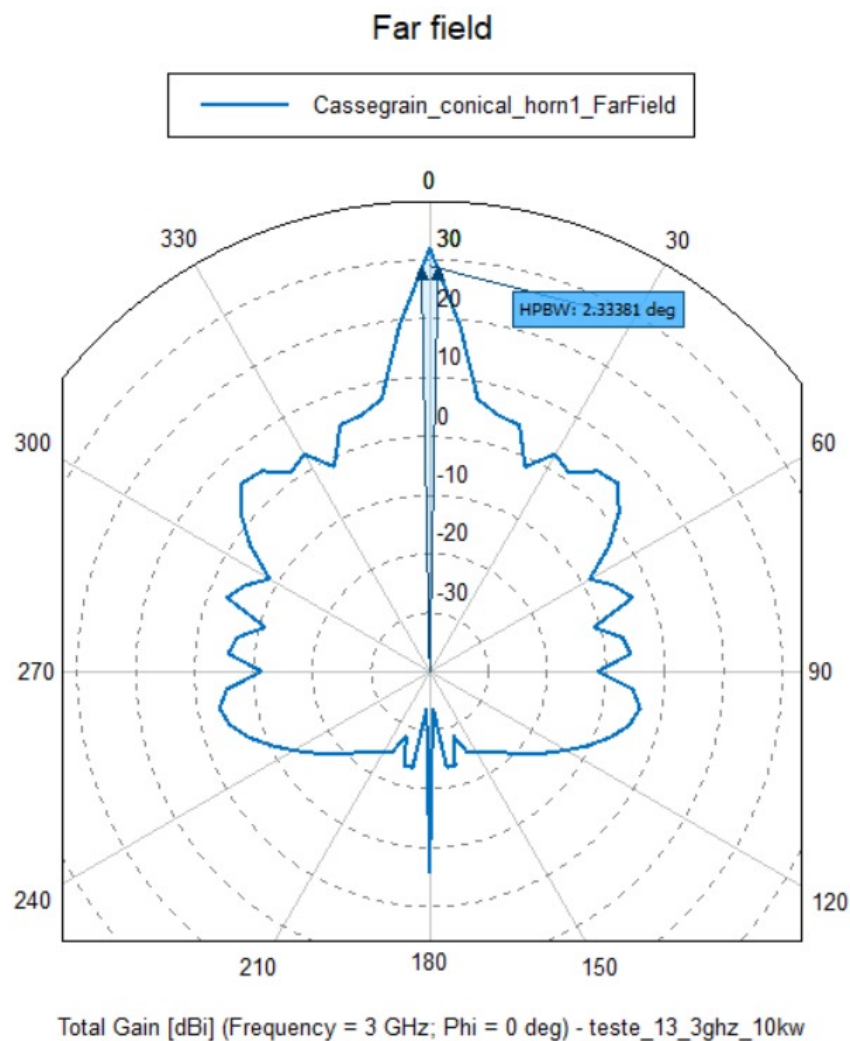
O gráfico da figura 30 apresenta o resultado do ganho em dBi de uma antena transmissora em função do ângulo  $\theta$  (em graus), analisado para diferentes valores de  $\phi$ :  $\phi = 0^\circ$  (azul claro),  $\phi = 90^\circ$  (vermelho), e novamente  $\phi = 0^\circ$  (azul forte). O lóbulo principal ocorre em  $\theta = 0^\circ$ , alcançando cerca de 35 dBi, enquanto os lóbulos secundários possuem ganhos inferiores a 10 dBi, indicando boa rejeição fora do eixo principal. A comparação entre as curvas azul e vermelha reflete mudanças no padrão de radiação devido à variação do plano  $\phi$ , sendo essas alterações indicativas da influência da geometria da antena e da configuração do feixe. Esses resultados reforçam a capacidade da antena em manter alto desempenho em sua faixa de operação.

Figura 30 – Gráfico do Campo Distante para a Antena Cassegrain Cônica Transmissora em 3 GHz.



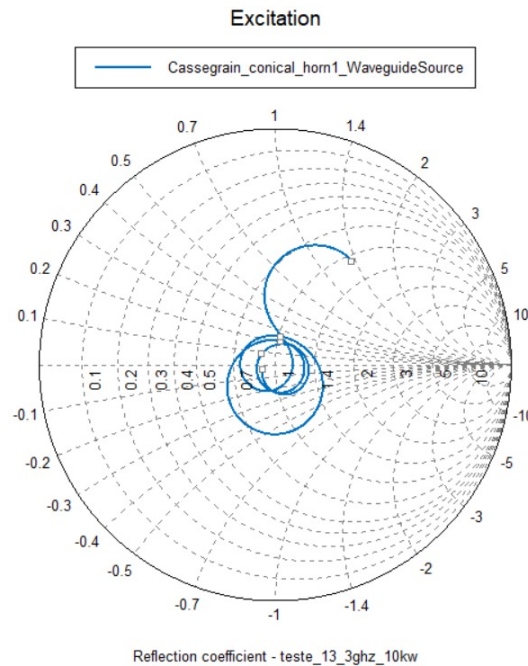
O gráfico polar da figura 31 mostra o padrão de radiação da antena Cassegrain com refletor cônico em 3 GHz, para  $\phi = 0^\circ$ . O lóbulo principal, centrado em  $0^\circ$ , possui um ganho máximo de 40 dBi e largura de feixe a meia potência Largura de Feixe a Meio-Potência (*Half-Power Beamwidth*) (HPBW) de aproximadamente  $2.33^\circ$ , confirmando a alta diretividade da antena. Os lóbulos secundários, com ganhos abaixo de  $-10$  dBi, evidenciam uma supressão de radiação indesejada. Pequenas irregularidades nos lóbulos secundários sugerem que efeitos estruturais podem impactar marginalmente a distribuição de radiação, indicando áreas para possíveis melhorias no design da antena.

Figura 31 – Gráfico Polar de Radiação



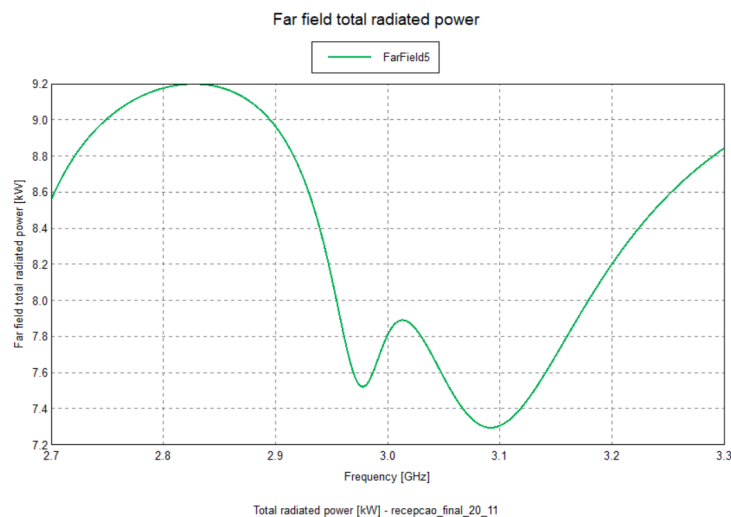
A figura 32 apresenta o coeficiente de reflexão da antena transmissora Cassegrain no domínio polar. O gráfico indica que a curva permanece próxima ao centro, refletindo um coeficiente de reflexão reduzido e um bom casamento de impedância. Pequenos desvios da curva em regiões específicas podem estar associados a descontinuidades estruturais, o que reforça a necessidade de ajustes no projeto para minimizar perdas por reflexão. O comportamento geral do sistema demonstra eficiência na transmissão de potência, reduzindo reflexões indesejadas

Figura 32 – Gráfico do Coeficiente de Reflexão



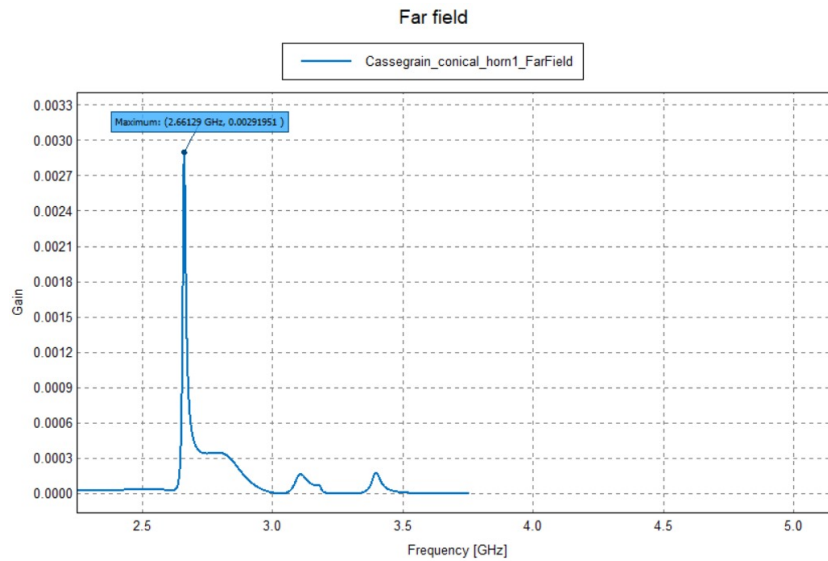
Este gráfico da figura 33, mostra a potência total irradiada no campo distante em função da frequência para a antena analisada, com valores medidos em kW. Observa-se que a potência irradiada apresenta variações ao longo da faixa de frequência, com picos e vales distintos. O ponto de máxima potência ocorre próximo a 2,8 GHz, atingindo cerca de 9,2 kW, enquanto a potência diminui significativamente em torno de 3,1 GHz, indicando uma queda de eficiência de radiação nessa faixa. Essa variação reflete o comportamento da antena em diferentes frequências, provavelmente devido à sua resposta ressonante e ao acoplamento com a fonte. Os picos de potência indicam frequências onde a antena está melhor ajustada para irradiar energia de forma eficiente, enquanto as quedas podem estar associadas a desajustes de impedância ou perda por reflexão, conforme observado nos gráficos anteriores.

Figura 33 – Potência Total Irradiada



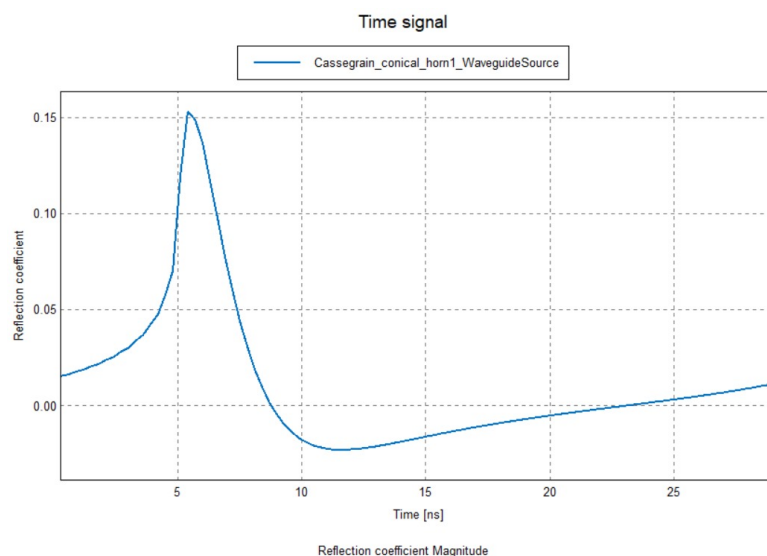
O gráfico da figura 34 destaca o ganho máximo de aproximadamente 0,0021951 na frequência 2,66129 GHz. A curva apresenta uma rápida queda fora dessa frequência, indicando uma faixa de operação estreita. Este comportamento é ideal para aplicações específicas em bandas estreitas, mas pode ser otimizado para maior flexibilidade de frequência. Oscilações em faixas superiores refletem possíveis perdas por reflexões ou limitações na geometria da antena.

Figura 34 – Gráfico do Ângulo de Disparo



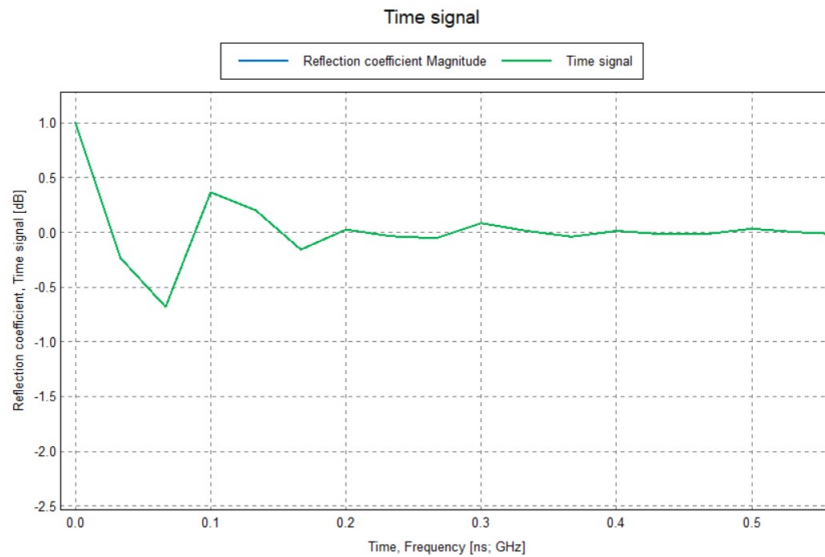
O comportamento do coeficiente de reflexão no tempo é mostrado na figura 35, com um pico próximo a 5 ns e decaimento acentuado até 10 ns. Após 20 ns, observa-se um leve aumento associado a reflexões secundárias ou ressonâncias estruturais. Esses resultados reforçam a necessidade de ajustes estruturais para minimizar reflexões residuais.

Figura 35 – Gráfico da Reflexão Máxima



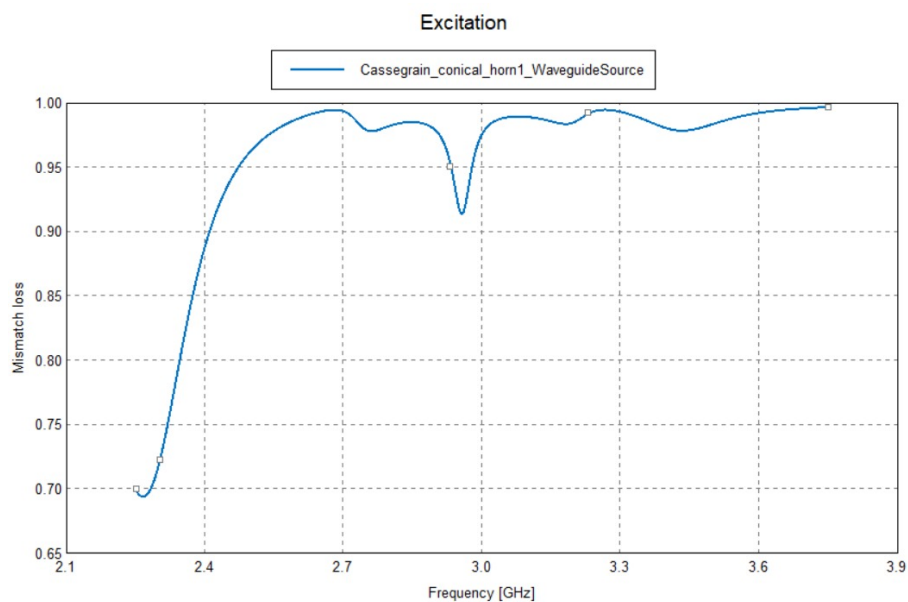
O gráfico na figura 36 analisa o coeficiente de reflexão em dB ao longo do tempo. Uma queda inicial significativa, seguida por estabilização em torno de 0.0 dB, demonstra controle efetivo das reflexões após os primeiros 0.2 ns. Pequenas oscilações indicam a presença de efeitos ressonantes, que podem ser atenuados com otimizações no sistema.

Figura 36 – Gráfico Coeficiente de Reflexão em dB



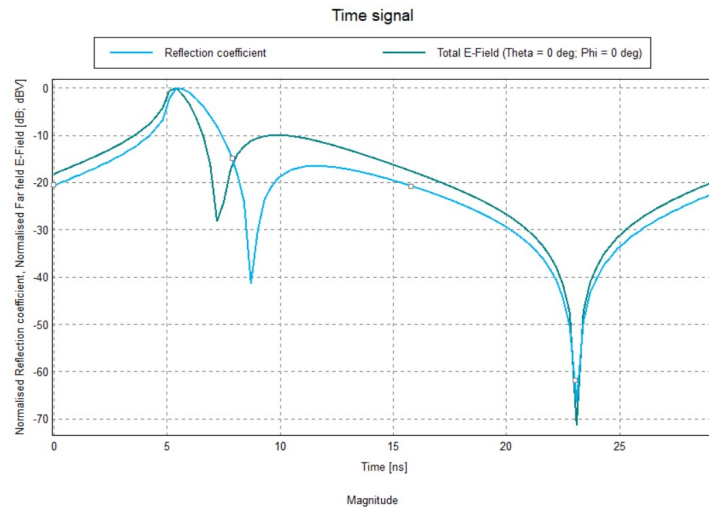
A figura 37 apresenta as perdas por incompatibilidade em função da frequência, variando entre 2,1 GHz e 3,9 GHz. A menor perda ocorre próximo a 3 GHz, evidenciando a frequência de operação ideal da antena. Perdas maiores em outras frequências indicam limitações no acoplamento de impedância, reforçando a necessidade de ajustes para aumentar a eficiência fora da faixa de ressonância.

Figura 37 – Gráfico da Perda por Incompatibilidade



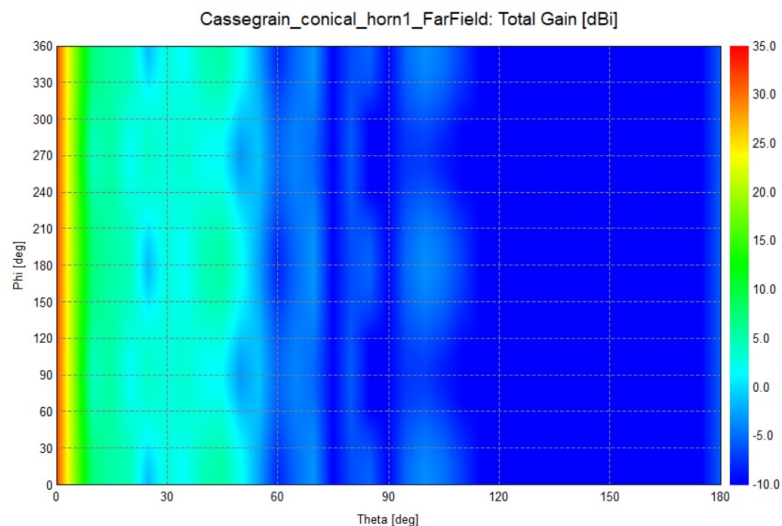
Na figura 38, as análises do coeficiente de reflexão e do campo elétrico total ao longo do tempo mostram uma queda significativa entre 5 e 10 ns, com o coeficiente atingindo -60 dB. Após estabilização, observa-se correlação entre ambos os parâmetros, indicando que otimizações na compatibilidade de impedância impactam diretamente a eficiência do sistema. Pequenas oscilações posteriores sugerem efeitos estruturais que podem ser aprimorados.

Figura 38 – Coeficiente de Reflexão e Campo Elétrico



O gráfico apresentado na Figura 39 ilustra a reflexão das micro-ondas no espaço livre, mostrando a distribuição do ganho em função dos ângulos  $\theta$  e  $\phi$ . A escala de cores varia de -10 dBi (azul escuro) a 35 dBi (vermelho), indicando a intensidade do ganho em diferentes direções. As regiões de maior ganho estão concentradas em ângulos próximos ao eixo principal da antena, com tons de verde a vermelho representando valores acima de 20 dBi. Já as áreas de menor ganho, com tons de azul, são predominantes fora da região central.

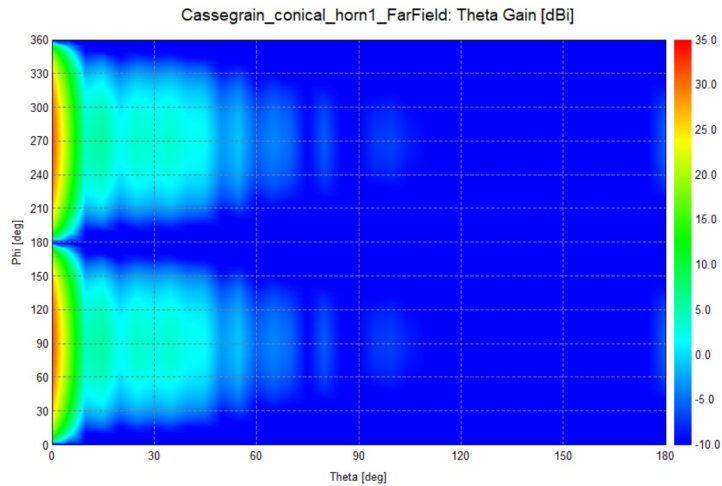
Figura 39 – Reflexão das Micro-ondas no Espaço Livre





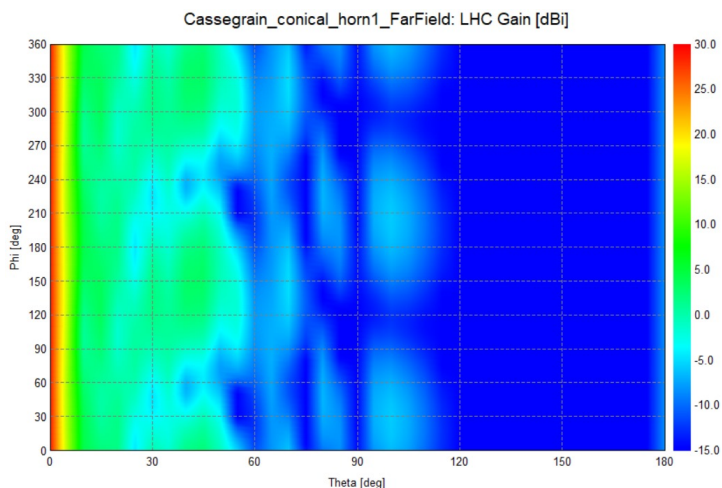
Na Figura 40, o padrão de radiação é similar, com as regiões de maior ganho concentradas nas extremidades em  $\phi$  próximo de  $0^\circ$  e  $360^\circ$ , evidenciando a capacidade direcional da antena. Essa característica reflete a eficiência do sistema em focar a potência irradiada em ângulos específicos, sendo ideal para aplicações de longo alcance. Notam-se lóbulos secundários menores, que estão dentro de níveis aceitáveis para evitar interferências.

Figura 40 – Reflexão das Micro-ondas no Espaço Livre



Os resultados apresentados na Figura 41 mostram a distribuição do ganho em função dos ângulos  $\theta$  e  $\phi$ , com valores variando de -15 dBi (azul escuro) a 30 dBi (vermelho). A concentração de ganho no eixo principal é mais evidente neste gráfico, confirmando a diretividade da antena Cassegrain. Por outro lado, observa-se uma redução significativa de ganho em ângulos afastados, representando a atenuação característica fora do feixe principal. Este comportamento é consistente com sistemas de alto desempenho, como a antena em questão, e permite avaliar a eficiência na contenção de interferências provenientes de lóbulos laterais.

Figura 41 – Distribuição do Ganho em Função dos Ângulos  $\theta$  e  $\phi$



Nas Figuras 42 e 43, é avaliada as rotações de polarização nos eixos  $Z + 45^\circ$  e  $Z - 45^\circ$ . Essa configuração implica em um giro de 45 graus do campo elétrico no plano perpendicular ao eixo principal da antena, o que permite estudar a resposta do sistema em cenários onde a polarização do sinal pode variar devido a reflexões ou outros efeitos ambientais. As regiões de maior ganho permanecem localizadas em ângulos próximos a  $\phi = 0^\circ$  e  $\phi = 360^\circ$ , confirmando a estabilidade direcional mesmo em condições de polarização rotacionada. As regiões de ganho reduzido, representadas em azul, indicam onde há maior dispersão fora do feixe principal, sendo fundamentais para identificar possíveis limitações na eficiência energética e no isolamento polarimétrico.

Figura 42 – Rotação de Polarização  $Z + 45^\circ$

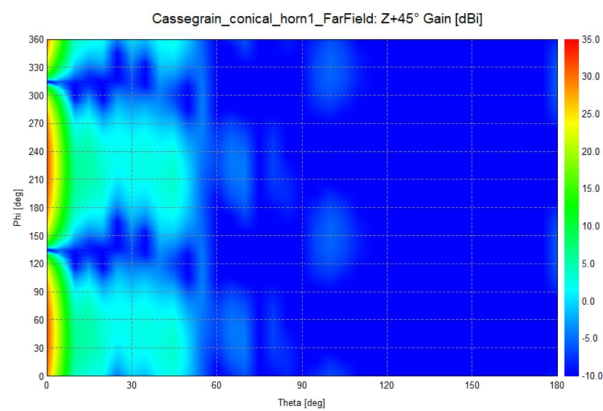
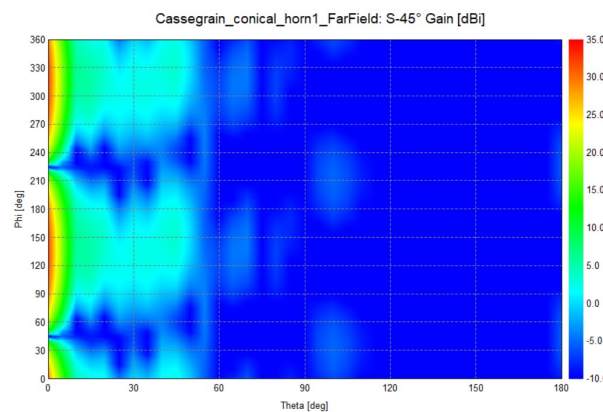


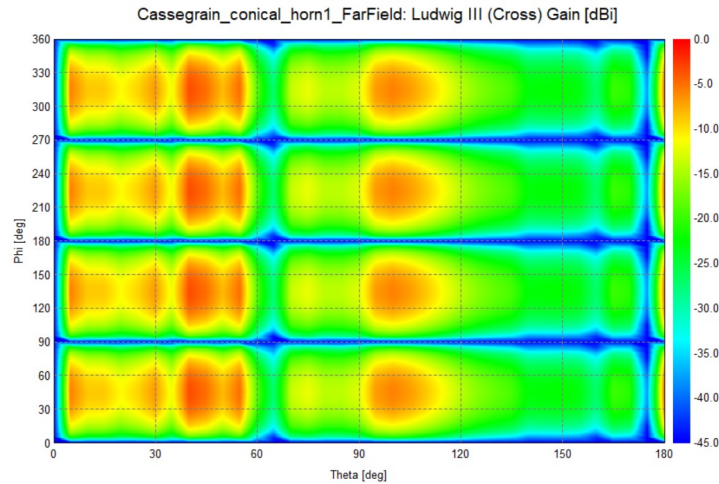
Figura 43 – Rotação de Polarização  $Z - 45^\circ$



Foi analisado o padrão de radiação cruzada utilizando o método *Ludwig III (Cross)* na figura 44. Este método é amplamente empregado para descrever a componente polarizada cruzada em sistemas de antenas. Os valores de ganho simulados variam entre -45 dBi (azul escuro) e 0 dBi (vermelho), representando as contribuições de polarização cruzada ao longo dos ângulos  $\theta$  e  $\phi$ . O *Ludwig III (Cross)* foi utilizado para caracterizar a projeção da componente do campo elétrico no plano ortogonal ao plano principal de propagação. Esta definição é essencial para avaliar a pureza de polarização de uma antena, possibilitando determinar o impacto da polarização cruzada no desempenho geral. Os resultados simulados mostram que os valores de

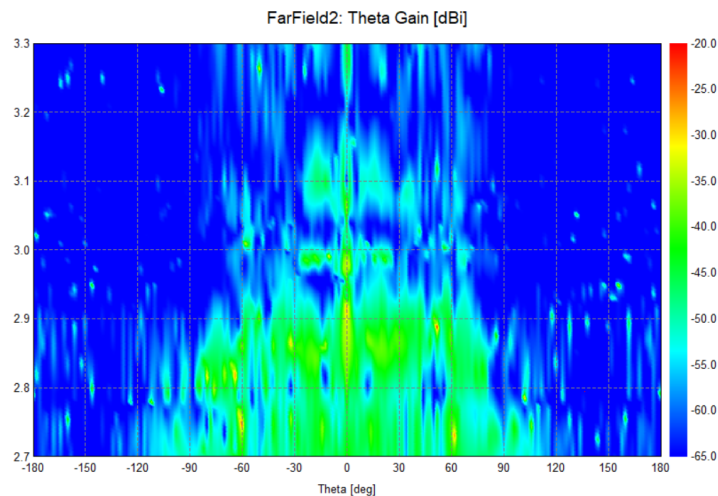
ganho cruzado são mais elevados nas regiões centrais do gráfico ( $\phi$  entre  $90^\circ$  e  $270^\circ$ , refletindo as limitações no isolamento entre as polarizações do sistema. Esses dados permitem verificar a necessidade de ajustes no projeto da antena, como melhorias no alinhamento ou no desenho do alimentador, caso seja necessário otimizar o desempenho polarimétrico.

Figura 44 – Radiação Cruzada Utilizando o Método *Ludwig III (Cross)*



O gráfico da Figura 45 apresenta o ganho total da antena Cassegrain em função do ângulo  $\theta$  (em graus), de como as micro-ondas se comportam no espaço livre. Observa-se um ganho máximo superior a 30 dBis na direção do lóbulo principal ( $\theta = 0^\circ$ ), com boa supressão de lóbulos laterais, cujos ganhos são inferiores a -20 dBis, como vistos na simulações anteriores, indicando alta diretividade e eficiência radiativa. Pequenas flutuações no ganho refletem possíveis interferências ou limitações na modelagem, mas não comprometem o desempenho.

Figura 45 – Distribuição do Ganho da Antena Cassegrain

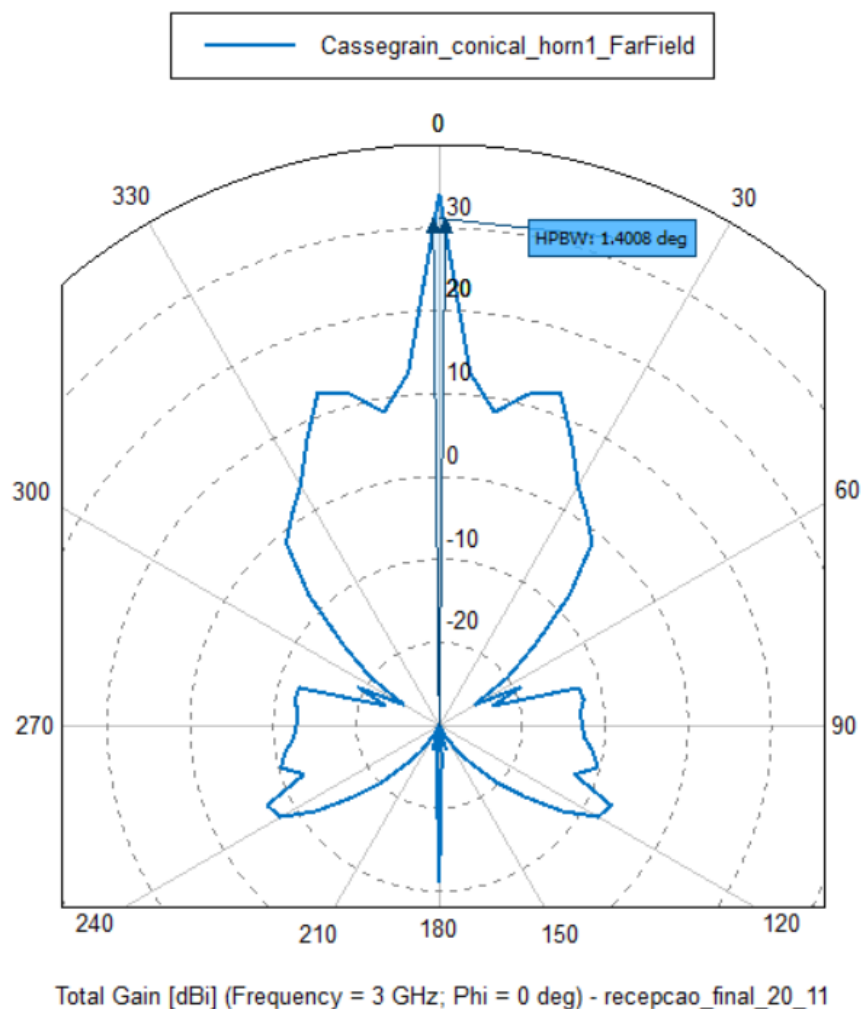


Por fim, foi confirmado que as contribuições de polarização cruzada permanecem significativamente abaixo do ganho do feixe principal, validando o bom desempenho da antena para a faixa de frequência analisada.

## 4.2 ANTENA RECEPTORA

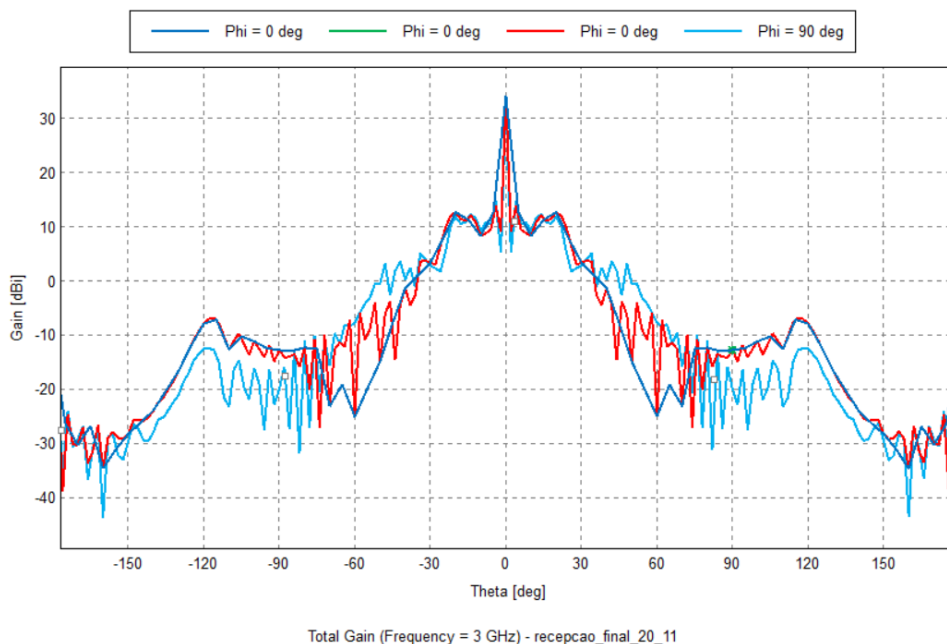
Na Figura 46, apresenta-se o diagrama de radiação polar da antena receptora Cassegrain para o plano  $\phi = 0^\circ$ , operando a 3 GHz. O ganho máximo, de aproximadamente 30 dBi, ocorre em  $\theta = 0^\circ$ , com uma HPBW de 1,4 graus, destacando a eficiência do feixe direcional. Além disso, os lóbulos laterais são reduzidos, com ganhos inferiores a -10 dBi, evidenciando a rejeição de sinais indesejados. Essa característica confirma o bom desempenho do sistema em evitar interferências externas e maximizar a eficiência de recepção

Figura 46 – Diagrama de Radiação Polar Receptor Cassegrain



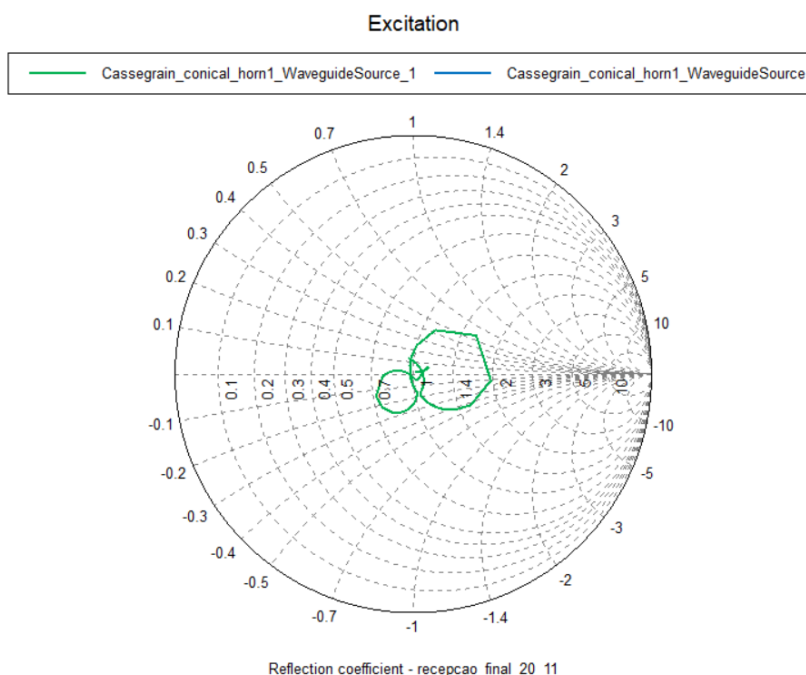
A Figura 47 apresenta o comportamento do ganho total da antena em função do ângulo  $\theta$  (em graus) para diferentes valores de  $\phi$ , operando na frequência de 3 GHz. O ganho máximo, em torno de 35 dBi, ocorre em  $\theta = 0^\circ$ , evidenciando a capacidade da antena de concentrar energia em uma direção específica. Além disso, a largura de feixe a meia potência HPBW é estreita, o que reforça a alta diretividade do sistema. Já os lóbulos laterais, com ganhos inferiores a -10 dBi, indicam uma supressão eficiente da radiação indesejada, assegurando uma boa performance direcional.

Figura 47 – Gráfico do Ganho Total da Antena



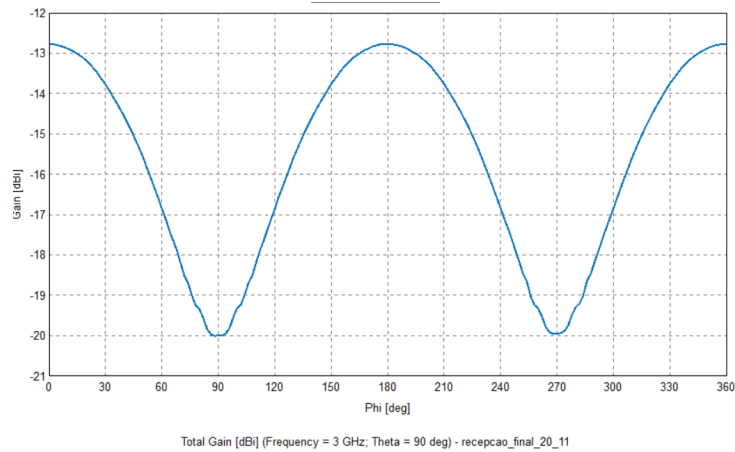
A Carta de *Smith*, mostrada na Figura 48, avalia o coeficiente de reflexão do sistema de excitação da antena receptora. A curva está concentrada próxima ao centro da carta, indicando baixa reflexão e uma boa adaptação de impedância. Isso significa que a maior parte da energia incidente é transferida para a antena, minimizando perdas por reflexão. Pequenas variações ao redor do centro podem ser atribuídas a irregularidades no sistema, mas permanecem dentro de limites aceitáveis, confirmando o projeto bem-sucedido para operação em alta frequência.

Figura 48 – Carta de *Smith* do Receptor Cassegrain



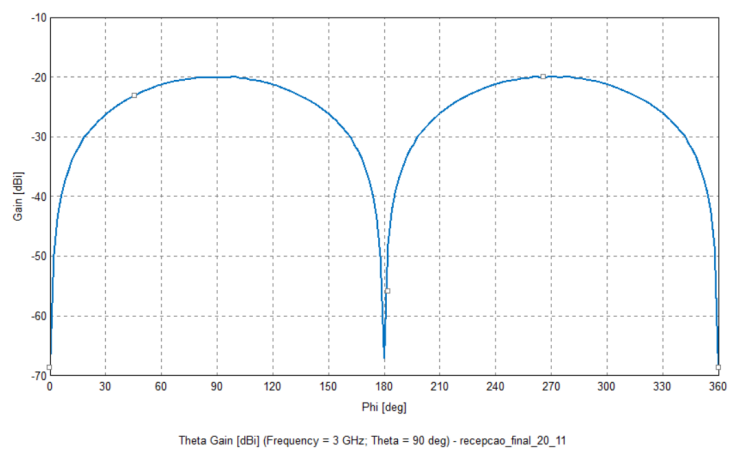
A Figura 49 apresenta o ganho da antena em função do ângulo  $\phi$  (em graus) para  $\theta = 90^\circ$ , operando a 3 GHz. A curva demonstra variações cíclicas, com picos de aproximadamente -13 dBi em  $\phi = 0^\circ$  e  $\phi = 180^\circ$ , e mínimos de cerca de -20 dBi em  $\phi = 90^\circ$  e  $\phi = 270^\circ$ . Essa oscilação reflete o padrão direcional da antena, caracterizado por lóbulos principais e nulos bem definidos, o que é essencial para validar a eficiência da configuração no plano analisado.

Figura 49 – Carta de Smith do Receptor Cassegrain



A variação do ganho ao longo do ângulo  $\phi$ , representada na Figura 50, evidencia uma forte atenuação em  $\phi = 180^\circ$ , com valores em torno de -70 dBi. Nas direções adjacentes, como  $\phi = 90^\circ$  e  $\phi = 270^\circ$ , o ganho se estabiliza em -20 dBi. Esse padrão é característico de um nulo profundo no diagrama de radiação, relacionado à geometria da antena e seu propósito específico. Essa análise reforça a adequação do sistema para aplicações direcionais, garantindo alta eficiência e redução de interferências em ângulos críticos.

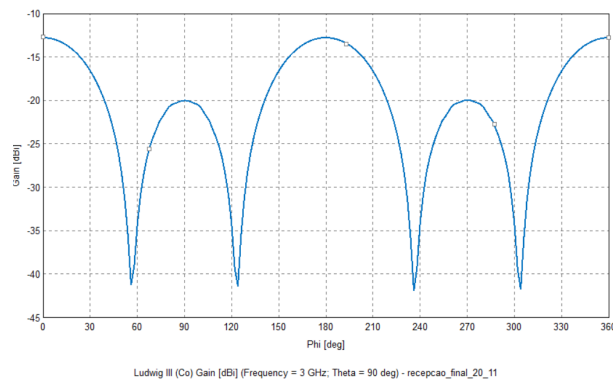
Figura 50 – Gráfico da Atenuação do Ganho



A Figura 51 é o ganho co-polarizado (*Ludwig III*) da antena no plano  $\theta = 90^\circ$ , para 3 GHz. Observa-se um padrão com picos de até -10 dBi e nulidades em torno de -40 dBi em ângulos como  $\phi = 90^\circ$ ,  $\phi = 180^\circ$  e  $\phi = 270^\circ$ . Esses valores refletem o desempenho

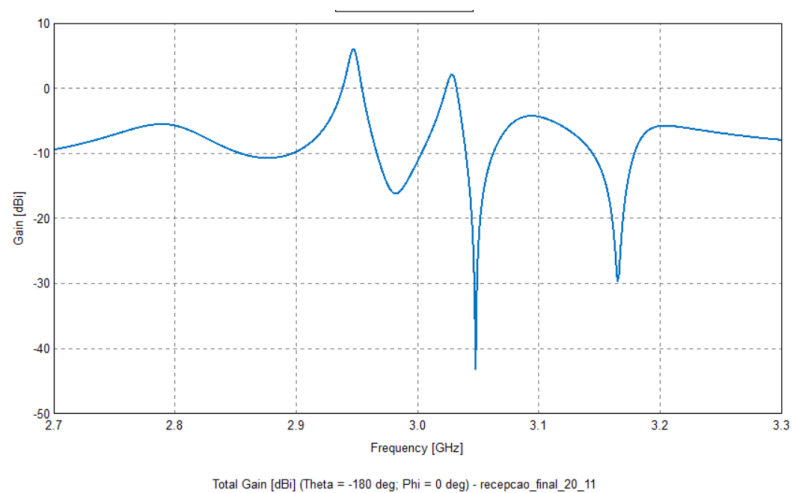
do sistema na transmissão de sinais alinhados com a polarização predominante. As nulidades indicam direções com baixa eficiência, associadas a interferências destrutivas ou à geometria da antena, mas reforçam o foco do sistema em aplicações que exigem alto controle do padrão polarizado.

Figura 51 – Gráfico do Ganho Polarizado



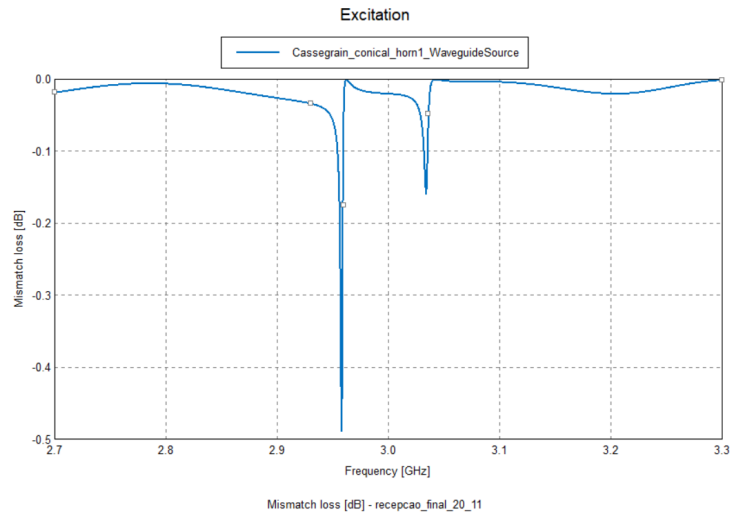
A Figura 52 mostra o ganho total (dBi) da antena em função da frequência (GHz), para  $\theta = -180^\circ$  e  $\phi = 0^\circ$ . Percebe-se uma oscilação significativa no ganho dentro do intervalo de 2.7 GHz a 3.3 GHz, com o valor mais baixo registrado em torno de 3.05 GHz, onde o ganho atinge aproximadamente  $-50$  dBi. Esses picos e quedas no gráfico indicam um desempenho variável da antena, com uma possível relação com ressonâncias mal ajustadas ou cancelamentos de ondas.

Figura 52 – Gráfico do Ganho em Função da Frequência



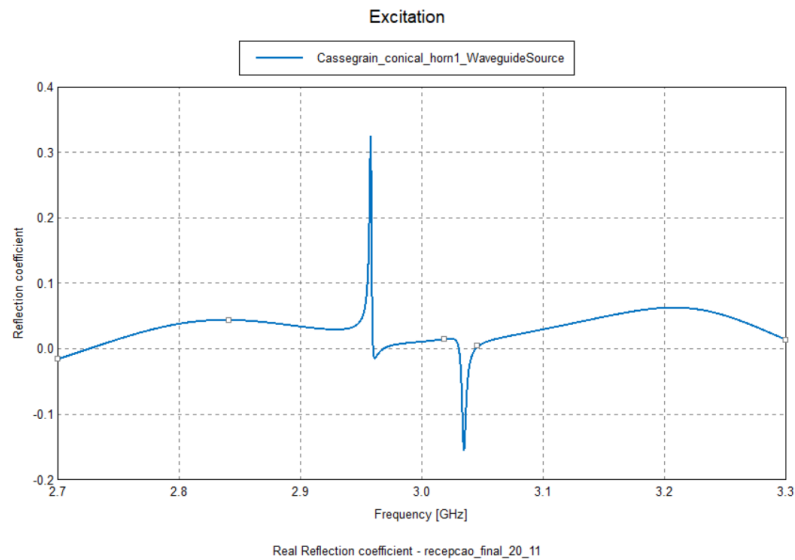
A perda por desadaptação (Mismatch Loss) em função da frequência está representada na Figura 53. A maior parte da faixa de frequências, entre 2.7 GHz e 3.3 GHz, exibe perdas mínimas, em torno de 0 dB, indicando uma boa adaptação. No entanto, alguns picos são visíveis, com um valor máximo de  $-0.5$  dB nas frequências de 3.0 GHz e 3.1 GHz, sugerindo uma leve desadaptação nessas regiões.

Figura 53 – Gráfico da Perda por Desadaptação.



O coeficiente de reflexão real, apresentado na Figura 54, mostra um comportamento geralmente baixo, com valores próximos de zero na maioria da faixa de frequências. Contudo, picos são observados em torno de 3.0 GHz, chegando a um valor máximo de 0.4, o que indica uma reflexão considerável em certas faixas. Esses picos podem ser causados por ressonâncias no sistema de guia de onda, que resultam em reflexões mais altas em determinadas frequências.

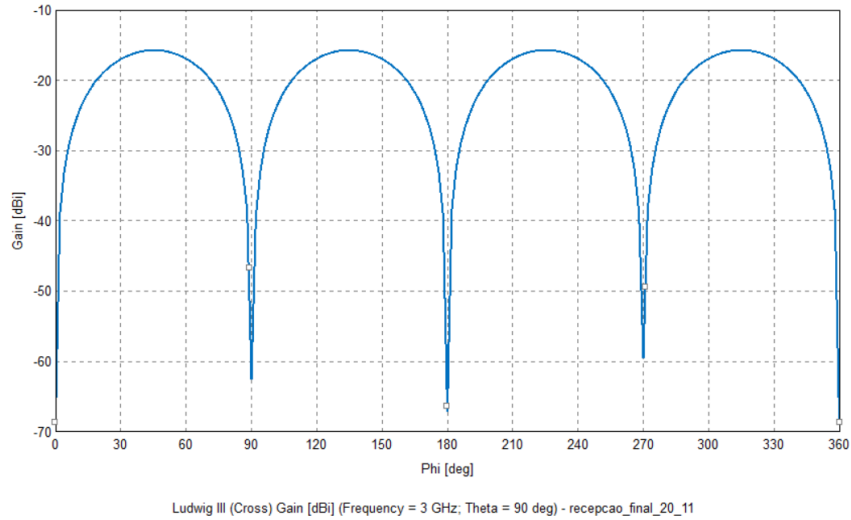
Figura 54 – Gráfico Coeficiente de Reflexão Real



Na Figura 55, o ganho *Ludwig III* (dBi) em função do ângulo azimutal ( $\phi$ ) é mostrado para a frequência de 3 GHz, com  $\theta = 90^\circ$ . O padrão de radiação revela picos e nulos a cada  $90^\circ$ , com valores de ganho que variam entre  $-10$  dBi e  $-70$  dBi, sugerindo uma boa diretividade e baixa polarização cruzada nas direções azimutais, especialmente importante para aplicações como comunicações via satélite e radar.

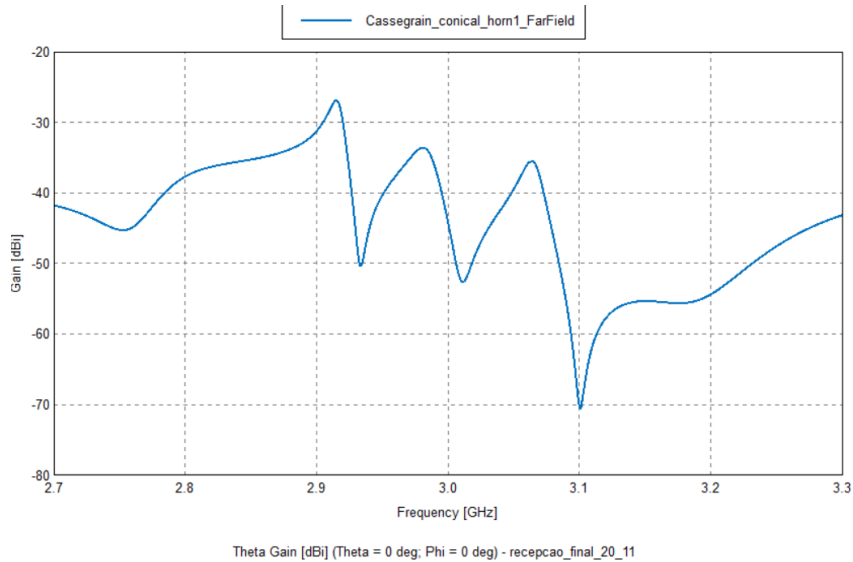


Figura 55 – Gráfico do Ganho *Ludwig*



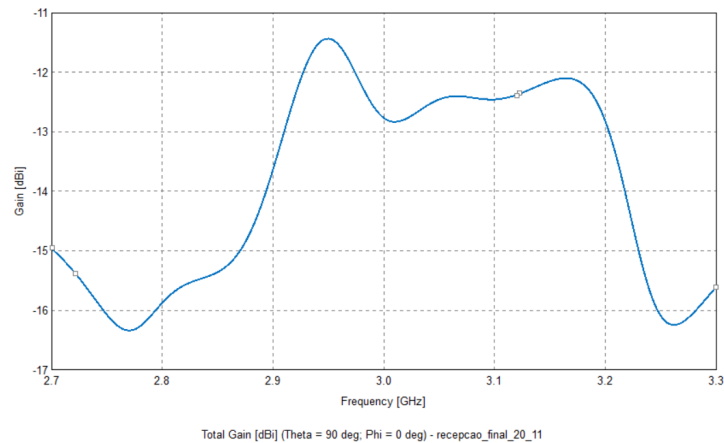
A distribuição do ganho da antena Cassegrain cônica, apresentada na Figura 56, ilustra como o ganho varia ao longo do espectro de frequências entre 2.7 GHz e 3.3 GHz. A curva revela picos em torno de 3.0 GHz, mas também uma sensibilidade a variações de frequência, com os valores de ganho próximos a  $-70$  dBi em outras regiões. Esse comportamento sugere que a antena possui uma largura de banda restrita e pode precisar de ajustes para otimizar o desempenho em toda a faixa de operação.

Figura 56 – Gráfico do Ganho ao Longo do Espectro



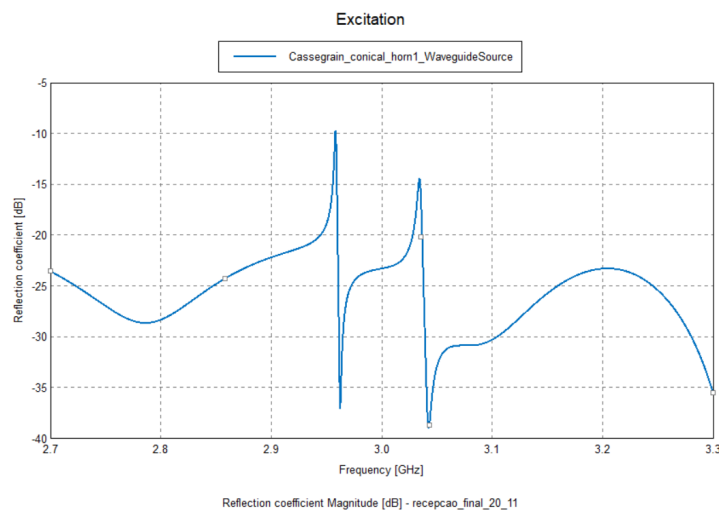
Na Figura 57, o ganho total da antena em função da frequência é exibido para  $\theta = 90^\circ$  e  $\phi = 0^\circ$ . A curva revela um padrão de variação gradual, com os valores de ganho oscilando entre  $-16$  dBi e  $-11$  dBi, indicando que a antena tem um desempenho melhor em frequências mais altas, principalmente perto de 3 GHz. Essa variação gradual é típica de antenas com características de radiação dependentes da frequência.

Figura 57 – Gráfico do Ganho Gradual



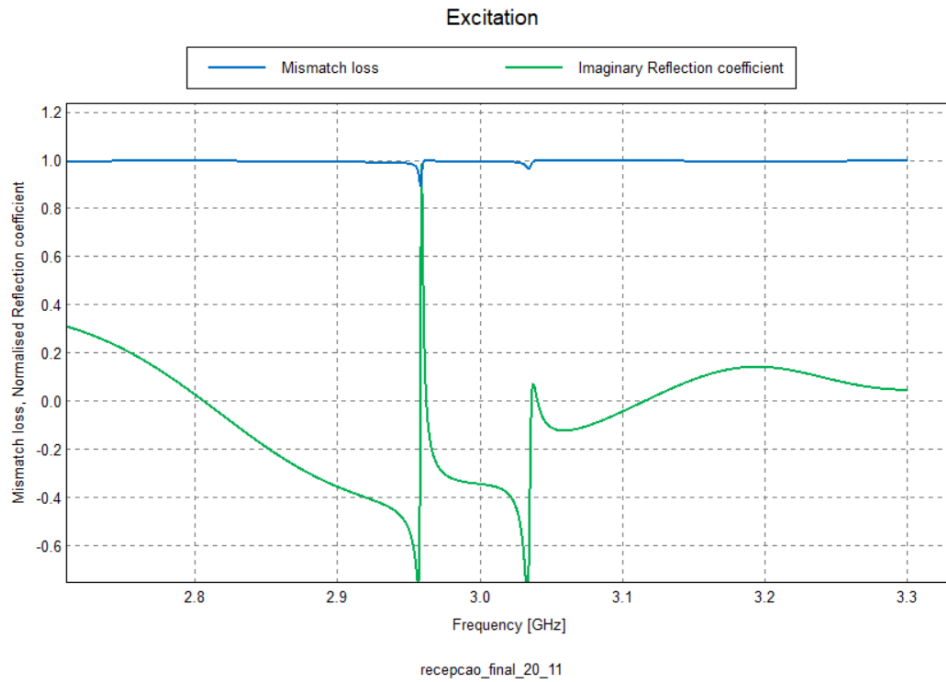
O coeficiente de reflexão em função da frequência, mostrado na Figura 58, indica que a antena mantém uma boa adaptação de impedância na maior parte da faixa de operação. Embora as reflexões sejam em geral baixas, com valores próximos a 0 dB, alguns picos locais são observados, sugerindo a presença de ressonâncias ou descontinuidade no sistema que podem afetar a eficiência global. Esses picos indicam a necessidade de ajustes adicionais para reduzir as perdas.

Figura 58 – Coeficiente de Reflexão



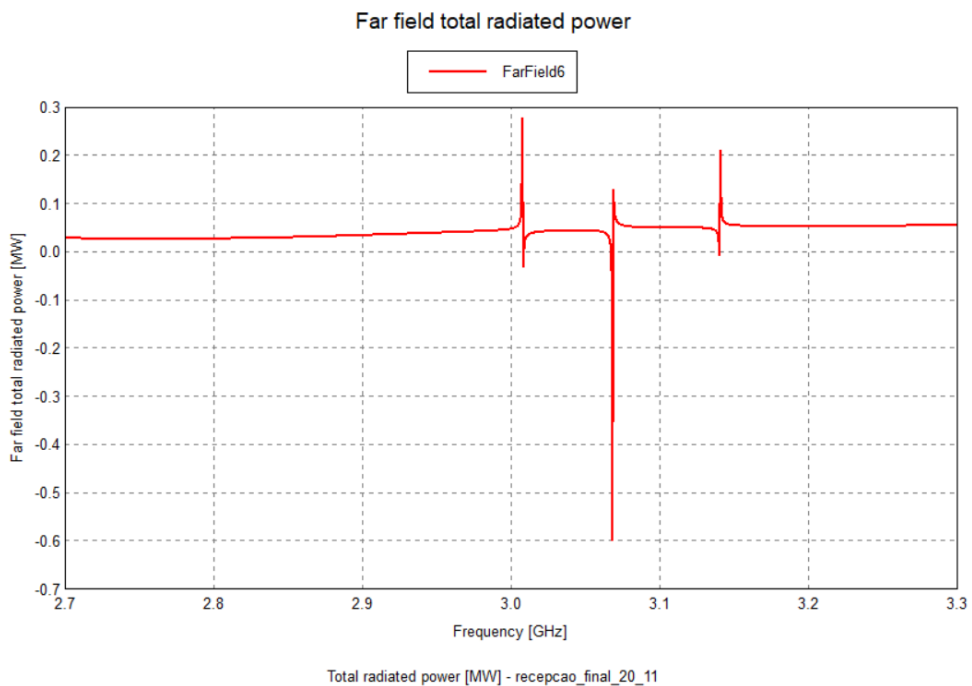
O gráfico da Figura 59 mostra a perda por desajuste (*Mismatch Loss*) e o coeficiente de reflexão imaginário em função da frequência. A perda por desajuste, representada pela linha azul, permanece próxima de 1 na maior parte da faixa de frequência, indicando alta eficiência, com pequenas variações negativas em torno de 3 GHz. O coeficiente de reflexão imaginário (linha verde) apresenta oscilações, refletindo mudanças na reatividade do sistema, associadas a componentes reativos como indutância e capacitância. Apesar da boa eficiência global, ajustes podem ser necessários para minimizar as oscilações e melhorar o desempenho em frequências críticas.

Figura 59 – Coeficiente de Reflexão Imaginário



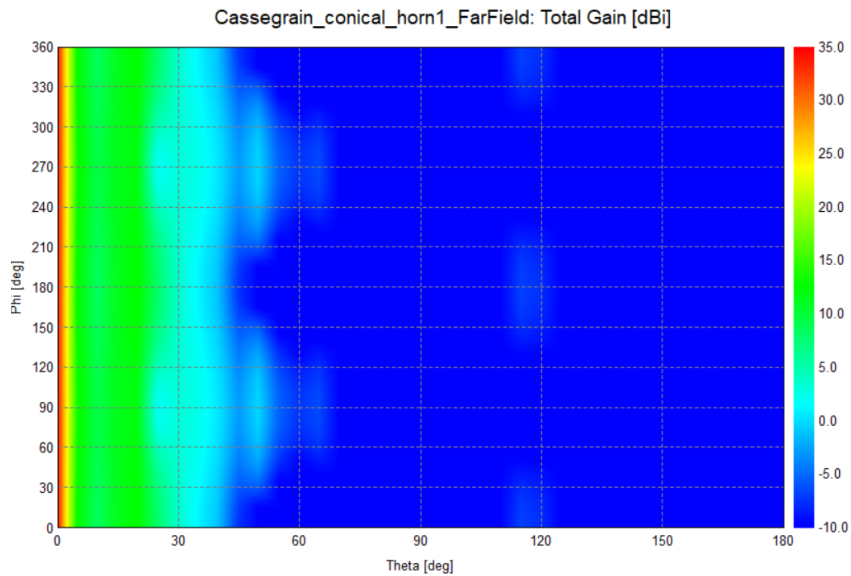
O gráfico da Figura 60, mostra a potência total irradiada pela antena no campo distante em função da frequência, variando de 2,7 GHz a 3,3 GHz. Observa-se estabilidade na maior parte da faixa analisada, com picos de potência irradiada próximos a 3,0 GHz e 3,1 GHz, indicando ressonâncias associadas à geometria da antena. Essas ressonâncias podem ser ajustadas para otimizar o desempenho na frequência desejada.

Figura 60 – Potência Total Irradiada no Campo Distante em Função da Frequência.



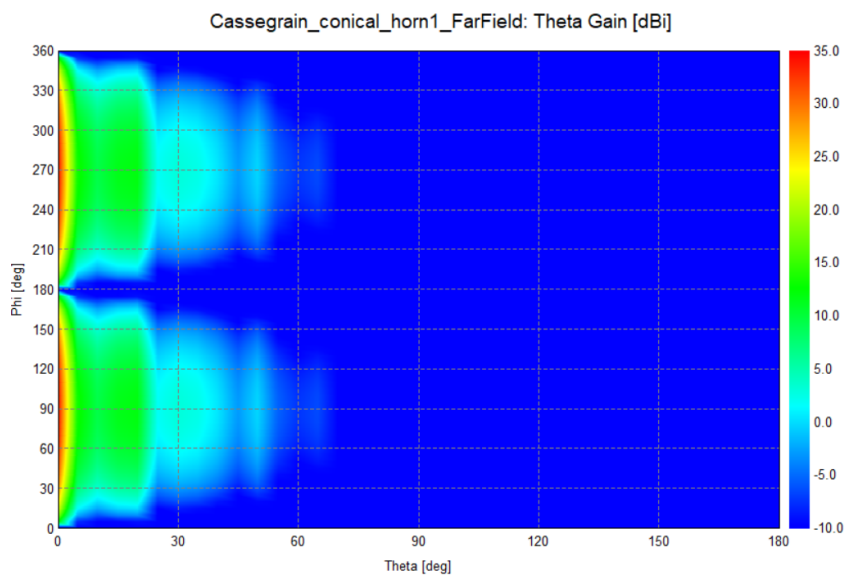
A Figura 61 apresenta o ganho total de uma antena Cassegrain cônica no campo distante, variando com os ângulos  $\theta$  e  $\phi$ . A distribuição de cores vai de -10 dBi (azul) a 35 dBi (vermelho), com maior intensidade de ganho em ângulos baixos próximos ao eixo principal da antena.

Figura 61 – Distribuição do Ganho Total da Antena Refletora.



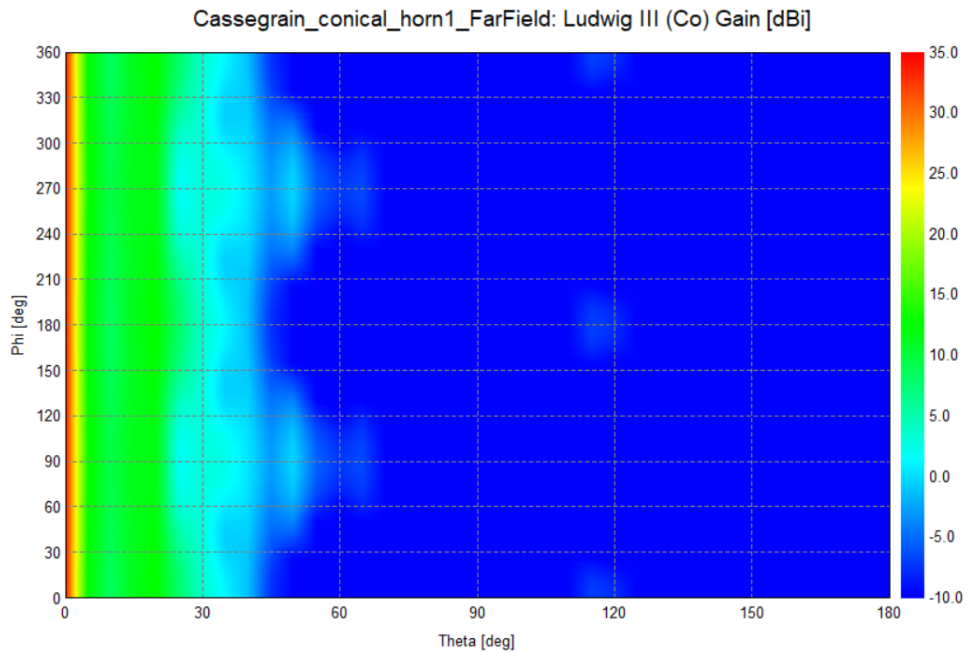
A Figura 62 exibe o ganho da antena Cassegrain em função de  $\phi$  e  $\theta$ , utilizando a métrica *Theta Gain* (dBi). O gráfico evidencia que a radiação é mais intensa em ângulos próximos ao eixo principal, com regiões de menor ganho em áreas distantes.

Figura 62 – Ganho no Campo Distante da Antena Cassegrain



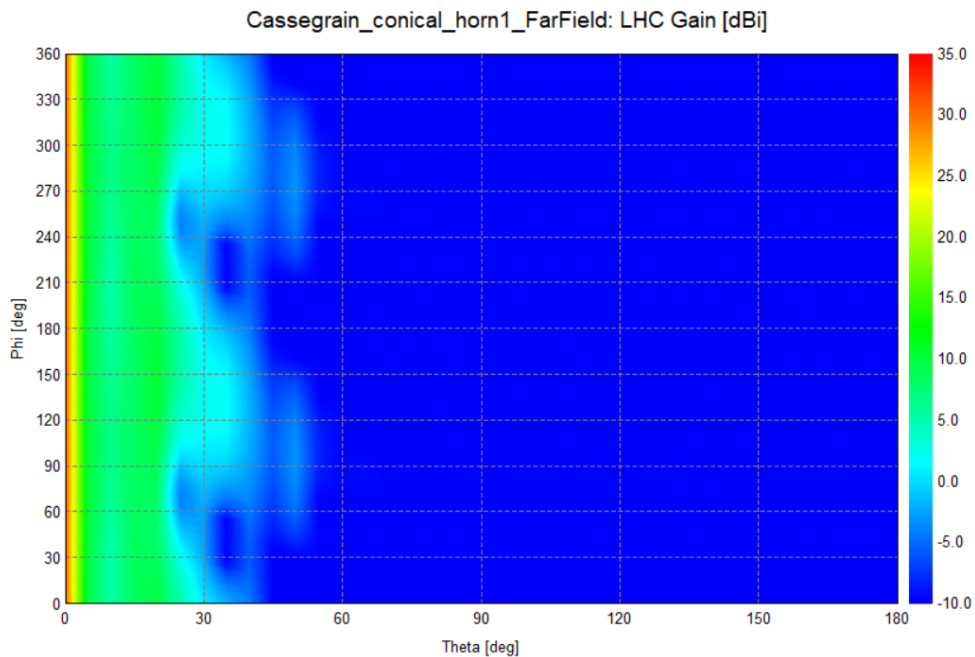
A Figura 63 apresenta o ganho co-polarizado da antena Cassegrain, com uma distribuição de -10 dBi (azul) a 35 dBi (vermelho), mostrando maior eficiência em ângulos baixos de  $\theta$  e  $\phi$  próximos de  $0^\circ$ .

Figura 63 – Ganho Co-polarizado (*Ludwig III Co-polarization*)



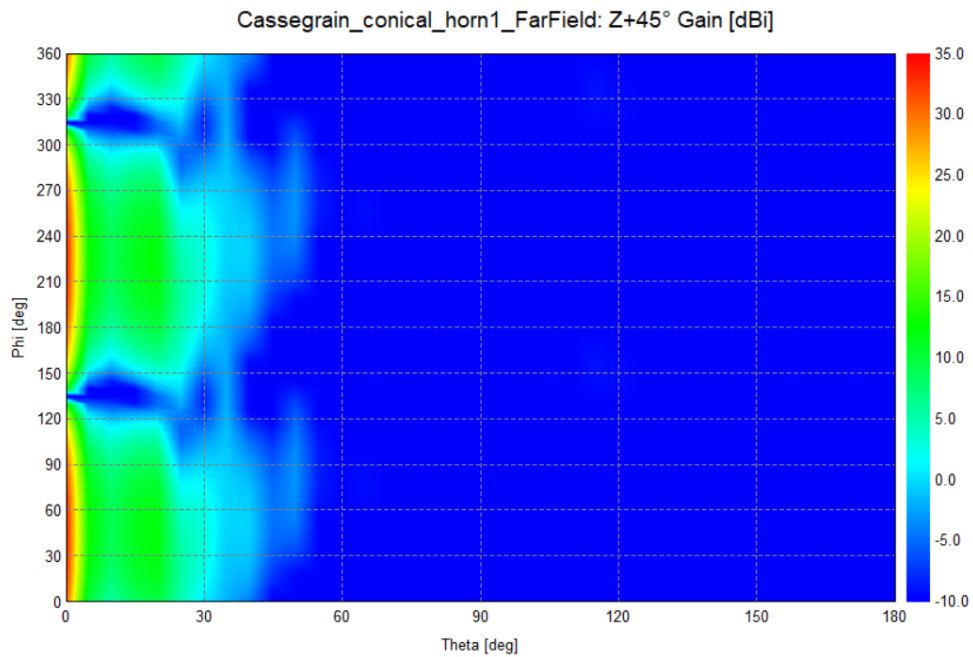
A Figura 64 mostra o ganho da Polarização Circular à Esquerda (*Left-Hand Circular*) (LHC), com valores variando de -10 dBi (azul) a 35 dBi (vermelho), destacando um alto ganho próximo a  $\phi = 0^\circ$  e ângulos baixos de  $\theta$ .

Figura 64 – Ganho da Polarização Circular Esquerda (*LHC - Left-Hand Circular*)



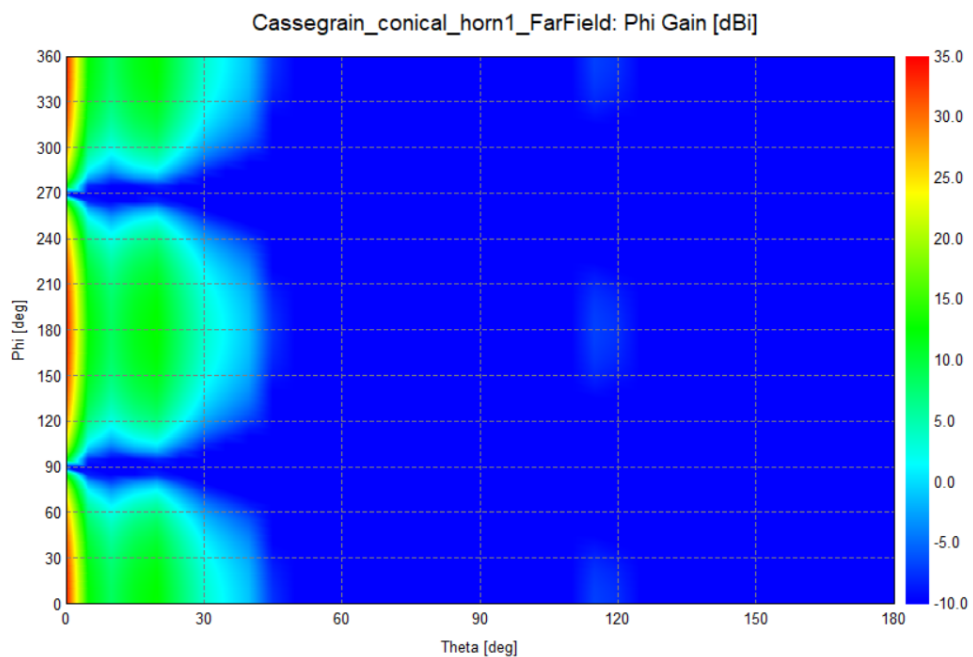
Na Figura 65, o ganho da antena Cassegrain com corneta cônica é ilustrado em campo distante, destacando as regiões de maior ganho em função de  $\phi$  e  $\theta$ . As áreas de maior intensidade estão localizadas no centro, enquanto as de menor ganho são distribuídas nas bordas.

Figura 65 – Ganho em Campo Distante para Z+45°



A Figura 66 mostra a variação do ganho da antena Cassegrain em função dos ângulos  $\phi$  e  $\theta$ , com uma distribuição que evidencia um ganho máximo em ângulos específicos, refletindo a diretividade do sistema.

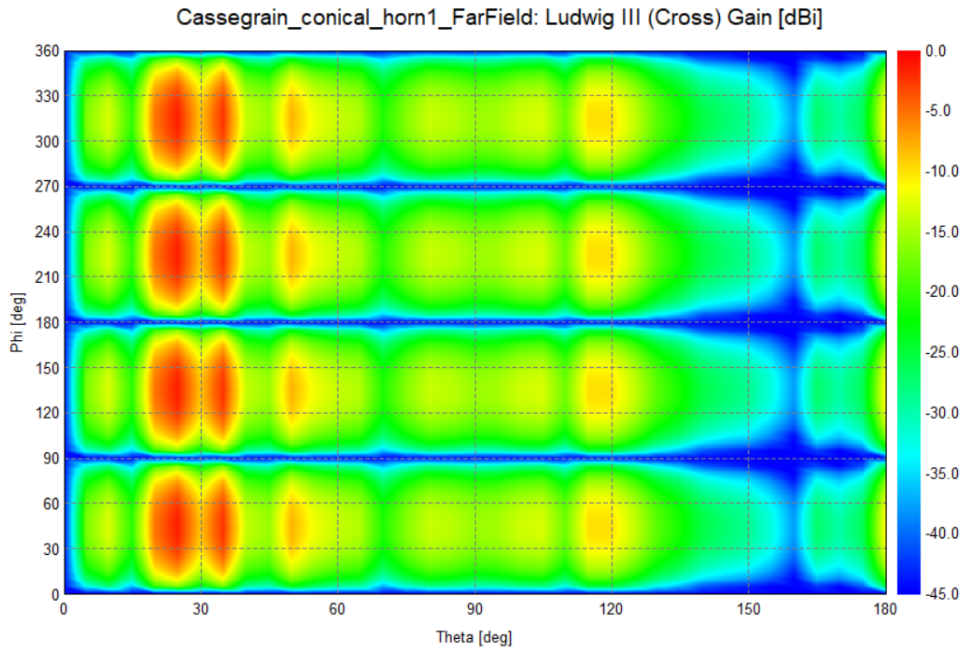
Figura 66 – Ganho em Campo Distante para Phi



A Figura 67 mostra a distribuição do ganho devido à polarização cruzada (*Ludwig III Cross-Polarization*), com uma faixa de -45 dBi a 0 dBi. As áreas de maior ganho indicam re-

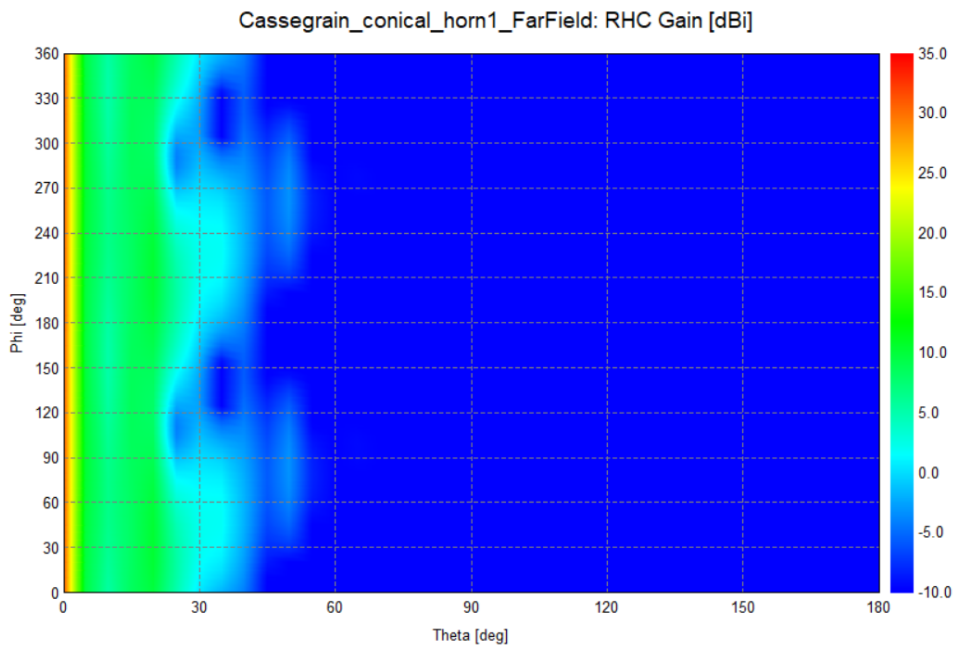
giões de interferência entre polarizações ortogonais, que podem ser minimizadas para melhorar a eficiência do sistema.

Figura 67 – Ganho para *Ludwig III (Cross)*



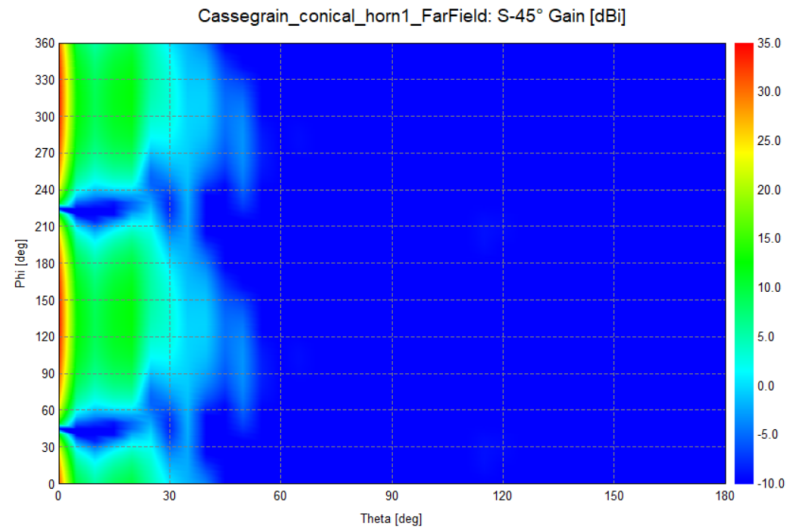
O gráfico apresenta na figura 68 o ganho de radiação em campo distante (dBi) para Polarização Circular à Direita (*Right-Hand Circular*) (RHC). Os valores máximos de ganho, em torno de 35 dBi, estão concentrados em uma faixa angular estreita, evidenciando um feixe altamente direcional, característico de antenas Cassegrain.

Figura 68 – Ganho em Polarização Circular Direita (RHC).



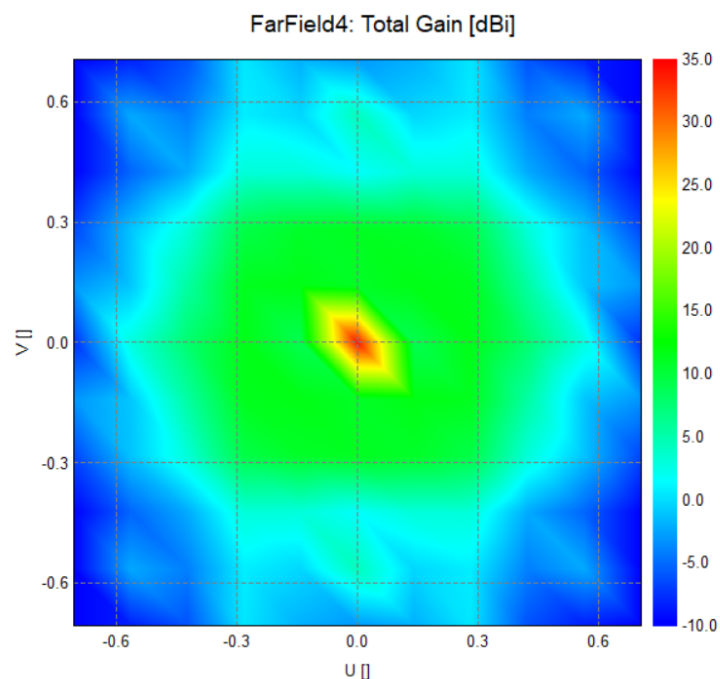
Este gráfico da figura 69 exibe o ganho de radiação em campo distante (dBi) para polarização linear inclinada a  $45^\circ$ . O ganho máximo de 35 dBi e os lóbulos laterais reduzidos indicam uma configuração eficiente para sinais direcionais, como mostrado na.

Figura 69 – Ganho em Polarização Linear Inclinada (S- $45^\circ$ ).



O gráfico apresenta o ganho total em campo distante (dBi) no plano UV, na Figura 70, destacando a concentração de energia na região central, com baixo nível de interferência de lóbulos secundários. Esse padrão evidencia a eficiência da antena em alinhar o feixe principal na direção desejada.

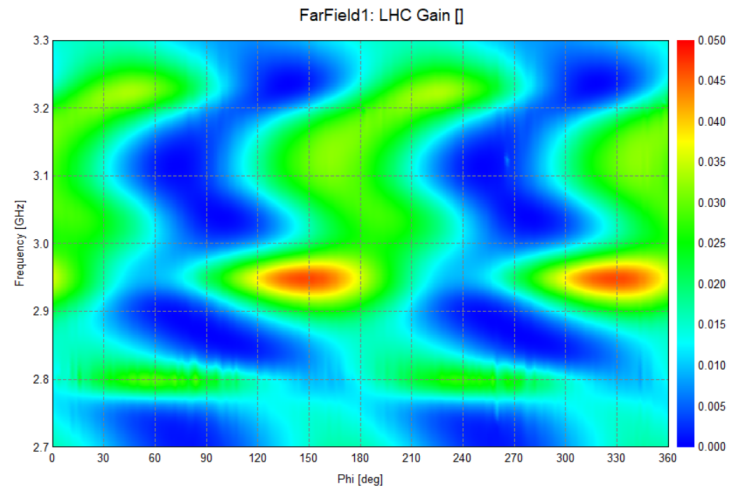
Figura 70 – Ganho Total no Plano UV.





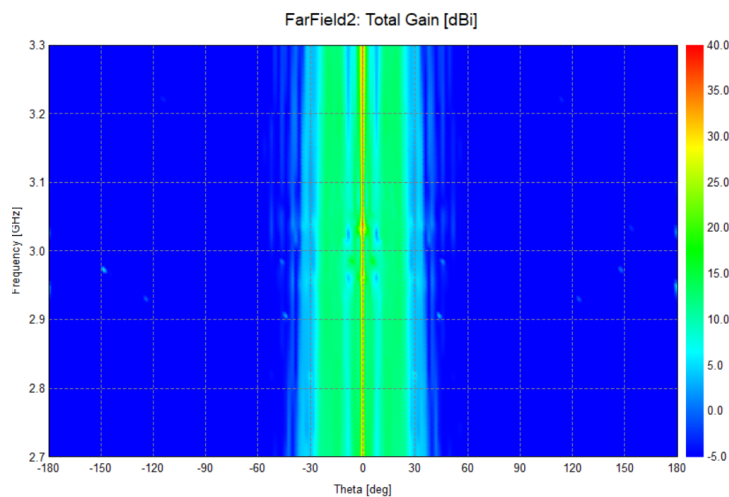
Para polarização circular à esquerda LHC na figura 71, variando com a frequência e o ângulo azimutal  $\phi$ . Os picos de ganho, destacados em vermelho, ocorrem próximos a 2,9 GHz e 3,2 GHz, evidenciando a diretividade da antena.

Figura 71 – Ganho para Polarização Circular à Esquerda (LHC)



A simulação da figura 72, apresenta o ganho total em dBi em campo distante em função da frequência e do ângulo  $\theta$ . O padrão diretivo, com ganho máximo concentrado em  $\theta = 0^\circ$  e frequências entre 2,9 GHz e 3,1 GHz, confirma o alinhamento eficaz da antena no eixo principal, ideal para transmissão de energia direcionada.

Figura 72 – Ganho Total em Campo Distante



## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho aborda a viabilidade da transmissão de energia elétrica sem fio por micro-ondas (Wireless Power Transfer - WPT) utilizando micro-ondas e explorando o uso de antenas Cassegrain como componente essencial do sistema. A análise teórica, aliada às simulações realizadas, evidencia o potencial dessa tecnologia para aplicações em ambientes desafiadores, como áreas remotas ou de difícil acesso, onde a infraestrutura convencional de distribuição de energia é inviável. Os resultados obtidos indicam que o sistema proposto é capaz de operar com elevada eficiência na faixa de 3 GHz, apresentando um ganho máximo de 35 dBi no lóbulo principal e uma significativa atenuação nos lóbulos secundários, características que asseguram uma alta diretividade e um bom controle de radiação.

As simulações realizadas explicitam uma baixa reflexão e uma boa adaptação de impedância, o que reforça a eficiência da antena Cassegrain na redução das perdas de energia durante a transmissão e recepção. Além disso, a análise do coeficiente de reflexão e do campo elétrico demonstra que o sistema proposto é capaz de operar com maior eficiência, desde que ajustes estruturais sejam realizados para corrigir reflexões secundárias e ressonâncias em determinadas frequências. A pesquisa também denota que, com uma configuração adequada e o correto alinhamento dos elementos da antena, é possível otimizar ainda mais o desempenho, garantindo maior compatibilidade de impedância e melhor isolamento polarimétrico.

Apesar do bom desenvolvimento das simulações, algumas limitações são identificadas, como oscilações e pequenas irregularidades nos padrões de radiação, que indicam a necessidade de melhorias no design da antena, principalmente no alinhamento do sub-refletor e na geometria do refletor principal. Adicionalmente, a simplificação das condições ambientais nas simulações pode não refletir completamente os desafios práticos encontrados em cenários reais, como os efeitos de terrenos acidentados, vegetação e interferências externas.

Conclui-se que a transmissão de energia elétrica sem fio por micro-ondas utilizando antenas Cassegrain é uma solução promissora para situações em que as tecnologias convencionais de fornecimento de energia são inviáveis. Com os ajustes e otimizações propostos, essa tecnologia apresenta potencial para ser implementada de forma eficaz em ambientes desafiadores, contribuindo para a expansão de sistemas de energia em locais remotos.

## 6 TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos e nas limitações identificadas, diversos caminhos de pesquisa podem ser explorados para aprimorar o sistema de transmissão de energia sem fio por micro-ondas. Primeiramente, recomenda-se a análise do desempenho da antena em diferentes condições ambientais, incluindo variações de temperatura, umidade, relevo e presença de obstáculos naturais, como vegetação. Essas análises são fundamentais para validar o desempenho teórico em cenários reais e garantir a robustez do sistema em aplicações práticas. Além disso, seria interessante explorar as possibilidades de integração com outras tecnologias de transmissão de energia, como sistemas de modulação e técnicas de controle dinâmico.

Entre as áreas de aprimoramento identificadas, destacam-se as seguintes:

- **Melhorias no Design da Antena:** Embora os lóbulos secundários da antena apresentem uma boa supressão, pequenas irregularidades sugerem que a geometria da antena pode ser otimizada para reduzir ainda mais essas flutuações. Estudos adicionais sobre o design do refletor e a configuração da corneta poderiam minimizar essas distorções e melhorar a eficiência geral do sistema.
- **Reflexões Estruturais:** O coeficiente de reflexão em alguns momentos mostra picos ou oscilações, especialmente nas frequências de ressonância. Isso pode ser minimizado com ajustes na impedância da antena e na adaptação do sistema.
- **Resposta do Sistema à Variação de Frequência:** A variação da potência irradiada ao longo da faixa de frequências sugere a necessidade de ajustes para uma operação mais eficiente em diferentes bandas. A implementação de filtros ou novos ajustes de impedância poderia garantir uma transmissão mais uniforme ao longo da faixa de operação desejada.
- **Estudo das Perdas por Incompatibilidade de Impedância:** Um estudo mais aprofundado das perdas por incompatibilidade e suas variações com a frequência poderia permitir a redução dessas perdas e otimizar a transmissão de energia.
- **Melhorias no Isolamento Polarimétrico:** O comportamento de polarização cruzada, evidenciado pelas oscilações no ganho cruzado, sugere que o isolamento entre as polarizações precisa ser ajustado. Melhorias no alinhamento da antena e do alimentador poderiam aumentar a eficiência do sistema, especialmente em cenários com variação na polarização devido a reflexões ou efeitos ambientais.
- **Simulações vs. Realidade:** Embora as simulações sejam essenciais para a compreensão do comportamento teórico do sistema, é necessário validar esses resultados com testes

práticos, especialmente considerando os efeitos ambientais, como vegetação e relevo acidentado, que podem impactar a transmissão da energia. A implementação de um protótipo real, com medições práticas da eficiência de transmissão e recepção, fornecerá dados mais precisos para aprimorar o modelo teórico.

- Testes em Campo: A realização de testes em campo permitirá identificar problemas não previstos nas simulações, como interferências externas e perda de energia devido a obstáculos. Além disso, os testes podem indicar quais ajustes na configuração do sistema de transmissão são necessários para maximizar o desempenho.

## REFERÊNCIAS

- ACME, J. P. **10kW Magnetron Power Supply**. 2024. <[https://pt.made-in-china.com/co\\_acmepower/product\\_10kw-Magnetron-Power-Supply\\_uoiirhggyy.html](https://pt.made-in-china.com/co_acmepower/product_10kw-Magnetron-Power-Supply_uoiirhggyy.html)>. Equipamento usado para transmissão de energia por micro-ondas. Possui controle local e comunicação RS485, com resfriamento por água e potência ajustável.
- AWAIS, Q. *et al.* A compact rectenna system with high conversion efficiency for wireless energy harvesting. **IEEE Access**, v. 6, p. 35857–35866, 2018.
- BALANIS, C. **Antenna Theory: Analysis and Design**. John Wiley & Sons, 2005. (Jeff borrow list). ISBN 9780471667827. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=jwjeAwAAQBAJ>>.
- BALANIS, C. A. **Antenna Theory: Analysis and Design**. 3rd. ed. [S.l.]: Wiley, 2005.
- BROWN, W. C. The history of power transmission by radio waves. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, v. 32, n. 9, p. 1230–1242, 1984.
- CADENCE. **Phased Array Antennas: Principles, Advantages, and Types**. 2021. Accessed: 2024-06-06. Disponível em: <<https://resources.system-analysis.cadence.com/blog/msa2021phased-array-antennas-principles-advantages-and-types>>.
- CASPERS, F. *et al.* **Design concepts for RF-DC conversion in particle accelerator systems**. [S.l.], 2010.
- CHIBA, I.; KONISHI, Y. Development of large earth-station reflector antennas in japan. **IEEE Antennas and Propagation Magazine**, IEEE, v. 53, n. 6, p. 245–257, 2011.
- COLLIN, R. E. **Foundations for Microwave Engineering**. 2nd. ed. Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press, 2007.
- COSTA A, S. **Transmissão de Energia Elétrica Sem Fio**. [S.l.]: INSPER, 2022.
- D SILVA J, S. M. B. **Análise da eficiência da transmissão de energia elétrica sem fio**. [S.l.]: Brazilian Journal of Development BJB, Curitiba, v.7, n.5, p. 53377-53399, 2021.
- DALTIO L, M. **SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA SEM FIO COM AJUSTE AUTOMÁTICO DA FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA PARA MAXIMIZAÇÃO DA POTÊNCIA TRANSFERIDA**. [S.l.]: UFES, 2019.
- EDUCAÇÃO, C. e. T. d. R. G. d. N. Instituto Federal de. **ANÁLISE E SÍNTESE DE ANTENAS PATCH DE MICROFITA**. 2010. Acesso em: 12 de junho de 2024. Disponível em: <<https://memoria.ifrn.edu.br/bitstream/handle/1044/1494/An%C3%A1lise%20e%20s%C3%ADntese%20de%20antenas%20patch%20de%20microfita.pdf?sequence=3>>.
- EL-SHAHAT, A. *et al.* Electric vehicles wireless power transfer state-of-the-art. **Energy Procedia**, v. 162, p. 24–37, 2019. ISSN 1876-6102. Emerging and Renewable Energy: Generation and Automation. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610219313633>>.

Encyclopaedia Britannica. **Common Tubes and Their Applications**. 2023. Accessed: 2024-06-17. Disponível em: <<https://www.britannica.com/technology/electron-tube/Common-tubes-and-their-applications>>.

\_\_\_\_\_. **Maser**. 2024. <<https://www.britannica.com/technology/maser>>. Accessed: 2024-06-16.

FEKO. **FEKO: Electromagnetic Simulation Software**. 2023. Disponível em: <<https://www.altair.com/feko>>.

FindLight. **Nitrogen Vacancy Centers as Sensors**. 2023. Accessed: 2024-06-17. Disponível em: <<https://www.findlight.net/blog/nitrogen-vacancy-centers-sensors/>>.

FISHER, T. M. *et al.* Electric vehicle wireless charging technology: a state-of-the-art review of magnetic coupling systems. **Wireless Power Transfer**, Cambridge University Press, v. 1, n. 2, p. 87–96, 2014.

FLEMING, T. P. *et al.* A high-efficiency megawatt-class nonrelativistic magnetron. **IEEE Transactions on Plasma Science**, v. 40, n. 9, p. 2112–2118, 2012.

FOURIKIS, N. 4 - transmit/receive modules. In: FOURIKIS, N. (Ed.). **Advanced Array Systems, Applications and RF Technologies**. London: Academic Press, 2000, (Signal Processing and its Applications). p. 283–324. ISBN 978-0-12-262942-6. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780122629426500068>>.

HU, B. *et al.* A long-distance high-power microwave wireless power transmission system based on asymmetrical resonant magnetron and cyclotron-wave rectifier. **Energy Reports**, v. 7, p. 1154–1161, 2021. ISSN 2352-4847. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484720317273>>.

HUANG, Z. *et al.* Maximum efficiency tracking design of wireless power transmission system based on machine learning. **Energy Reports**, v. 8, p. 447–455, 2022. ISSN 2352-4847. 2022 The 5th International Conference on Renewable Energy and Environment Engineering. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484722020753>>.

HUDA, S. A.; ARAFAT, M. Y.; MOH, S. Wireless power transfer in wirelessly powered sensor networks: A review of recent progress. **Sensors**, MDPI, v. 22, n. 8, p. 2952, 2022.

JAIN, R. K. Artigo ou livro sobre geradores de micro-ondas. **Journal of Microwave Engineering**, v. 15, n. 3, p. 123–130, 2020.

JIAN-FEI, T. *et al.* Electron cyclotron maser emission in solar radio bursts. **Chinese Astronomy and Astrophysics**, v. 47, n. 4, p. 722–759, 2023. ISSN 0275-1062. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S027510622300084X>>.

JUNIOR, M. e. **PRINCIPAIS TECNOLOGIAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA SEM FIO E SUAS APLICABILIDADES**. [S.l.]: Revista Ibero- Americana de Humanidades, Ciências e Educação- REASE, 2022.

KAMARUDIN, S. I. *et al.* 5g magnetic resonance coupling planar spiral coil wireless power transfer. **Trends in Sciences**, v. 20, n. 1, p. 3444–3444, 2023.

KARALIS, A.; JOANNOPOULOS, J. D.; SOLJAČIĆ, M. Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer. **Annals of Physics**, v. 323, n. 1, p. 34–48, 2008.

- KURS, A. *et al.* Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 317, n. 5834, p. 83–86, 2007.
- LIN, X.; ZHANG, R.; WANG, Y. Projeto de simulação de sistema de alta frequência de banda s multifeixe klystron. p. 1–2, 2022.
- LIU, Z. *et al.* Phase-shifterless power controlled combining based on 20-kw s-band magnetrons with an asymmetric injection. **IEEE Electron Device Letters**, v. 39, n. 9, p. 1425–1428, 2018.
- LU, X. *et al.* Resource allocation in wireless networks with rf energy harvesting and transfer. **IEEE Network**, IEEE, v. 29, n. 6, p. 68–75, 2015.
- \_\_\_\_\_. Wireless charging technologies: Fundamentals, standards, and network applications. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 18, n. 2, p. 1413–1452, 2016.
- MAGNETISM, E. **Antenas Parabólicas**. 2024. Acessado em: 2024-06-11. Disponível em: <<https://www.electricity-magnetism.org/pt-br/antenas-parabolicas-2/>>.
- MAILLOUX, R.; MCILVENNA, J.; KERNWEIS, N. Microstrip array technology. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 29, n. 1, p. 25–37, 1981.
- MOHSAN, S. A. H. *et al.* Enabling underwater wireless power transfer towards sixth generation (6g) wireless networks: Opportunities, recent advances, and technical challenges. **Journal of Marine Science and Engineering**, MDPI, v. 10, n. 9, p. 1282, 2022.
- Negócios Disruptivos. **Marinha dos EUA transmite energia elétrica usando lasers**. 2024. Disponível em: <<https://www.negociosdisruptivos.com/marinha-dos-eua-transmite-energia-eletrica-usando-lasers/>>.
- OBAIDEEN, K. *et al.* Wireless power transfer: Applications, challenges, barriers, and the role of ai in achieving sustainable development goals - a bibliometric analysis. **Energy Strategy Reviews**, v. 53, p. 101376, 2024. ISSN 2211-467X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X2400083X>>.
- PHOTOS, R. H. **Nikola Tesla: Rare Historical Photos**. 2023. Accessed: 2024-06-19. Disponível em: <<https://rarehistoricalphotos.com/nikola-tesla-old-photos/>>.
- PINHO, P. **Recent Wireless Power Transfer Technologies**. Rijeka: IntechOpen, 2020. ISBN 978-1-83880-222-6. Disponível em: <<https://doi.org/10.5772/intechopen.83291>>.
- Pinuela, M.; Mitcheson, P. D.; Lucyszyn, S. Ambient RF Energy Harvesting in Urban and Semi-Urban Environments. **IEEE Transactions on Microwave Theory Techniques**, v. 61, n. 7, p. 2715–2726, jul. 2013.
- POZAR, D. **Microwave Engineering**. Wiley, 2004. ISBN 9780471448785. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=4wzpQwAACAAJ>>.
- POZAR, D. M. **Microwave Engineering**. 4th. ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2012.
- RAPHAEL, M. e. **ESTUDO E ANÁLISE DA TRANSMISSÃO DE ENERGIA SEM FIO**. [S.l.]: FACULDADE DOCTUM, 2019.
- RIBEIRO, J. A. J. **Engenharia de Antenas - Fundamentos, Projetos e Aplicações**. Rio de Janeiro: Érica, 2012. 224 p. E-book. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788536521954/>>. Acesso em: 23 nov. 2024. ISBN 9788536521954.

SAMPLE, A. P.; MEYER, D. A.; SMITH, J. R. Analysis, experimental results, and range adaptation of magnetically coupled resonators for wireless power transfer. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 58, n. 2, p. 544–554, 2011.

SASAKI, S.; TANAKA, K. Wireless power transmission technologies for solar power satellite. In: **2011 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 3–6.

SATO, A. K. **PROTÓTIPO DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA SEM FIO EM BAIXA TENSÃO**. [S.l.]: UTFPR, 2015.

SHINOHARA, N. **Wireless Power Transfer via Radiowaves**. [S.l.]: Wiley, 2014.

\_\_\_\_\_. **Wireless Power Transfer via Radiowaves**. Wiley, 2014. (ISTE). ISBN 9781118862964. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=TwegAgAAQBAJ>>.

STRASSNER, B.; CHANG, K. Microwave power transmission: Historical milestones and system components. **Proceedings of the IEEE**, v. 101, n. 6, p. 1379–1396, 2013.

SUH, Y.-H.; CHANG, K. A novel dual frequency rectenna for high efficiency wireless power transmission at 2.45 and 5.8 ghz. In: **2002 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (Cat. No.02CH37278)**. [S.l.: s.n.], 2002. v. 2, p. 1297–1300 vol.2.

SUL, U. F. do Rio Grande do. **Otimização de Lagura de Banda de Antena de Microfita**. 2010. Acesso em: 12 de junho de 2024. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/34686/000791855.pdf>>.

TERYAEV, V. E. *et al.* **Compact, Low-Voltage, High-Power, Multi-Beam Klystron for ILC: Initial Test Results**. 2015. Presented at the 2015 Meeting of the Division of Particles and Fields of the American Physical Society, Ann Arbor, Michigan, August 4-8, 2015. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/1510.06065>>.

TESLA, N. **Experiments with Alternate Currents of High Potential and High Frequency**. Cosimo, 2007. (Cosimo classics science). ISBN 9781602060586. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=9oEef7GoEkwC>>.

U.S. Navy. **Navy Electricity and Electronics Training Series - Module 11 - Microwave Principles - NADTRA-14183**. [S.l.], 1998.

WANG, J. *et al.* Design of a high-isolation 35/94-ghz dual-frequency orthogonal-polarization cassegrain antenna. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, v. 16, p. 1297–1300, 2017.

WANG, Y. J. e. C. H. e. T. L. e. J. L. H.; WU, X. Electromagnetic and particle-in-cell simulation studies of megawatt asymmetrical resonant magnetron. **Journal of Electromagnetic Waves and Applications**, Taylor & Francis, v. 31, n. 17, p. 1826–1834, 2017.

WILLIAMSON, A.; FEYER, A.-M. The causes of electrical fatalities at work. **Journal of safety research**, Elsevier, v. 29, n. 3, p. 187–196, 1998.

XIAN-LONG, M. *et al.* Multi-field coupling characteristics of photovoltaic cell under non-uniform laser beam irradiance. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 52, p. 101963, 2022. ISSN 2213-1388. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138822000157>>.



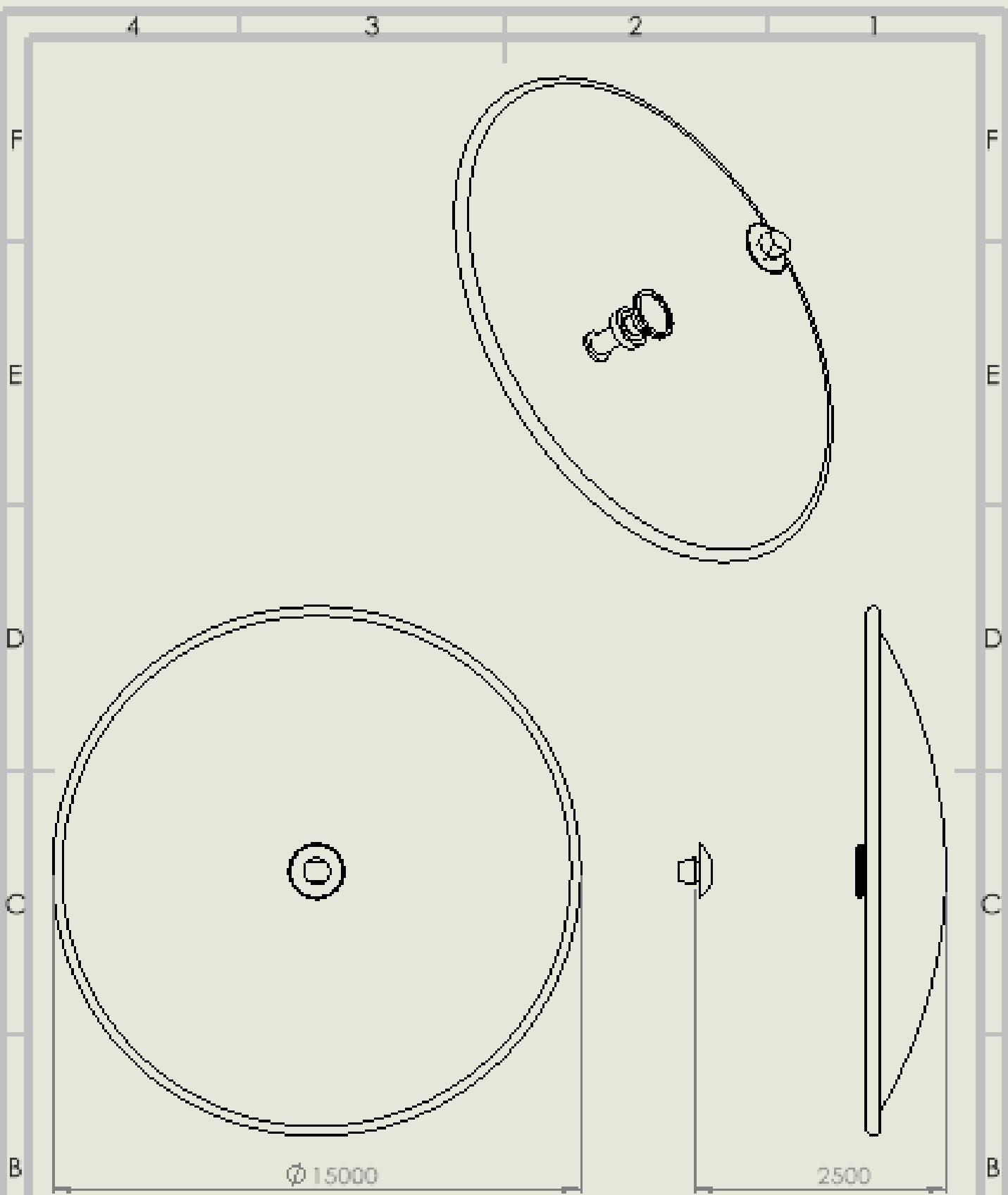
XIE, H. *et al.* Wireless power transfer: Paving the way for smart cities and a greener future. **Energy and Buildings**, Elsevier, October 15 2023.

ZHENG, Y. *et al.* Wireless laser power transmission: Recent progress and future challenges. **Space Solar Power and Wireless Transmission**, 2024. ISSN 2950-1040. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2950104023000020>>.

ÁVILA, O. S. P. P. de *et al.* Análise de campos magnéticos em transformadores. **Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência**, 2016. Accessed: 2024-06-19. Disponível em: <[https://peteletricaufu.com.br/static/ceel/doc/artigos/artigos2016/ceel2016\\_artigo008\\_r01.pdf](https://peteletricaufu.com.br/static/ceel/doc/artigos/artigos2016/ceel2016_artigo008_r01.pdf)>.

## .1 APÊNDICE A

O desenho representa uma antena Cassegrain modelada no *SolidWorks*, composta por um refletor primário parabólico de 15 metros de diâmetro, um refletor secundário menor posicionado no eixo central e um receptor alinhado próximo ao foco do sistema. A montagem é feita no ambiente de montagem do *SolidWorks*, onde as peças são criadas individualmente, como o refletor principal por revolução de um perfil parabólico, o refletor secundário por uma parabólica inversa e o receptor como um cilindro simples. No desenho técnico, são geradas vistas frontal, lateral e isométrica, com dimensões e proporções anotadas para representar o projeto.



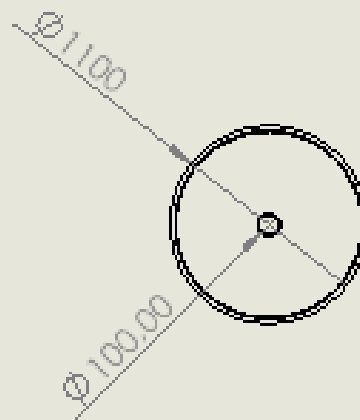
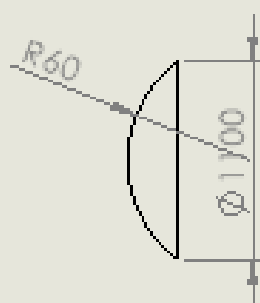
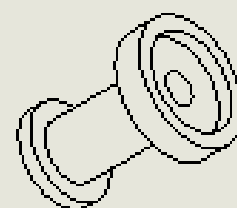
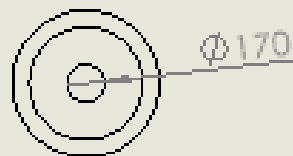
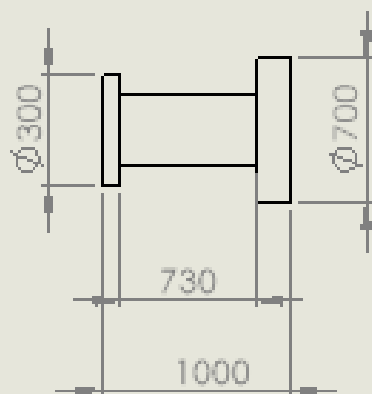
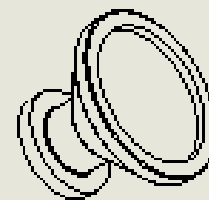
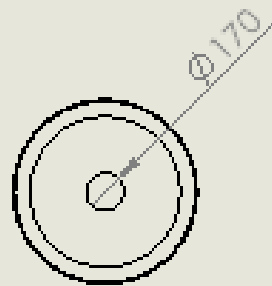
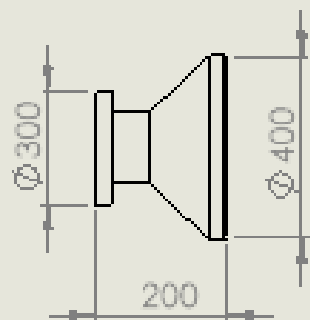
Título: **Antena Cassegrain**  
 Escala: 8000.0001  
 Folha: 1 de 2

NOBRE	ABRIGAMENTO	DATA
DESIGN.	ROBSON LINS	01/11/2008
VERIF.		
APROV.		
ELABOR.		
QUALIF.		

MATERIAL: Alumínio  
 PROJ:

## .2 APÊNDICE B

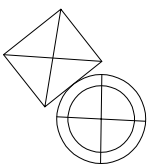
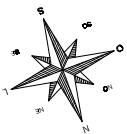
O desenho apresenta os componentes principais para a montagem de uma antena, incluindo um guia de onda, uma corneta cilíndrica e um sub-refletor, todos modelados no *SolidWorks*. O guia de onda é representado por uma peça cilíndrica de 1000 mm de comprimento com diâmetros de 300 mm e 700 mm, permitindo a propagação eficiente do sinal. A corneta cilíndrica tem um formato de transição com um cone divergente, com diâmetro menor de 170 mm para 400 mm, com 200 mm de comprimento, ideal para direcionar o sinal. O sub-refletor possui uma superfície curva, com um diâmetro de 1100 mm, projetado para redirecionar as ondas do refletor principal. Cada componente é detalhado individualmente no desenho técnico com vistas e dimensões específicas para garantir a montagem precisa no sistema.



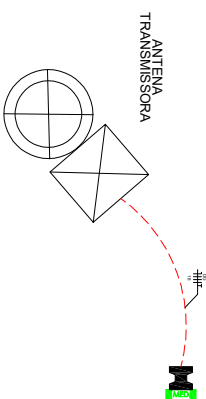
HOME			ASIGNATURA		FECHA		TITULO: Componentes	
DESDE: Polival Lima			FECHA: 15/11/2023		MATERIAL: Aluminio/Cobre		DEL Nº: 7000.0010	
VISE:			REVISOR:		ESCALA: 1:1000		FOLIA 0 DE 3	
APROV.:			DISEÑO:		ENCUADRE:		A4	
MANEJ.:			REVISOR:		ENCUADRE:		A4	
CALIDAD:			REVISOR:		ENCUADRE:		A4	

### .3 APÊNDICE C

Esta prancha, desenhada no AutoCAD, representa a planta de localização do local onde o projeto foi proposto. Nela, estão ilustradas a antena de transmissão juntamente com a casa de máquinas. Mais adiante, a uma distância de 1860 km, encontra-se a antena de recepção.



ANTENA  
RECEPTORA



ANTENA  
TRANSMISSORA

ESTRADA DO REFUGIADO

PROJETO	
TCC	
APROVACAO	DATA
DES.	04/11/2024
APPROV.	
ESC:	TAM. A3
FOLHA 1/4	REV. A0

TÍTULO:  
**PLANTA BAIXA DA LOCALIZAÇÃO**

PROPRIETÁRIO: Rafael Lima  
ENDEREÇO DA OBRA: Capela do Rosário - 5º Distrito - Vacaria  
ENGENHEIRO: Rafael da Silva Vargas de Lima  
CREA:

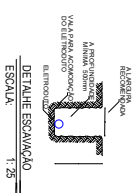
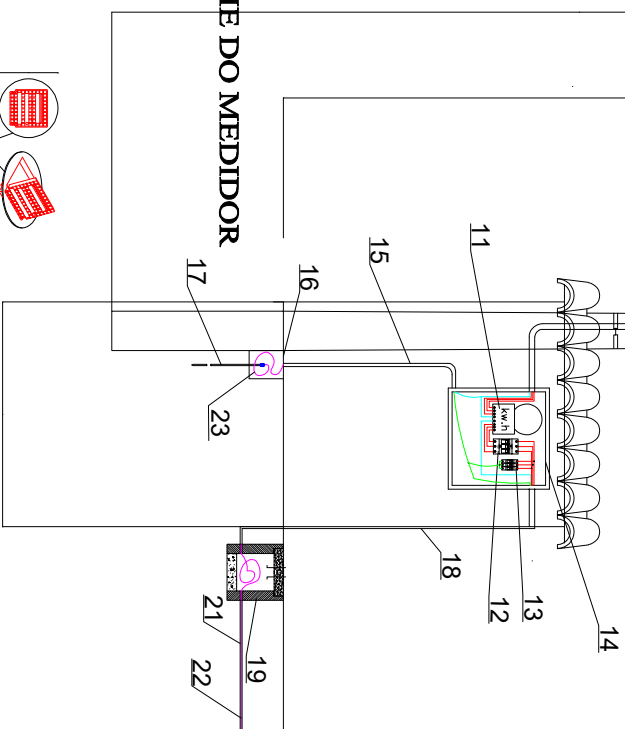
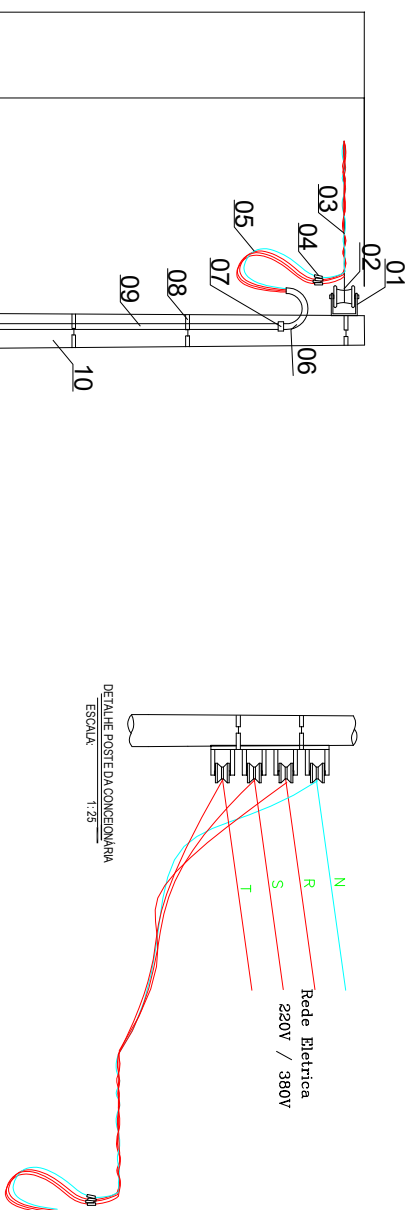
ASS. PROPRIETÁRIO:

ASS. ENGENHEIRO:

#### .4 APÊNDICE D

O padrão de ligação foi elaborado seguindo as diretrizes estabelecidas pela concessionária CPFL, conforme a norma GED13 da própria empresa. Como este projeto é de natureza particular, o ramal de entrada será projetado de acordo com o padrão, incluindo medidor de energia e os dispositivos de proteção necessários.



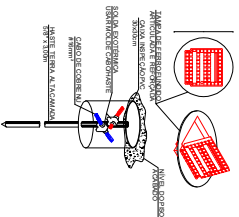


## LEGENDA

1	Armação vertical com estribo e isolador
2	Alça pré-formada
3	Cabo multiplex 16mm <sup>2</sup>
4	Conector paralelo
5	Cabo de cobre isolado (16mm <sup>2</sup> )
6	Cabecote
7	Luva de ferro galvanizada
8	Cinta metálica
9	Eletroduto rígido 40mm
10	Poste de concreto 200 dan
11	Medidor de energia
12	Disjuntor (3 x50A)
13	DPS (tipo II, 20KA)
14	Caixa padrão tipo III
15	Eletroduto para aterramento 20mm
16	Caixa redonda de aterramento (30X30)
17	Haste de aterramento (5/8" x 3m)
18	Eletroduto para saída subterrânea (PVC 3/4")
19	Caixa de passagem fundo brita com tampa
21	Eletroduto subterrâneo (PVC 3/4")
22	Condutor Elétrico (4 x 16mm <sup>2</sup> )
23	Cabo terra (16mm <sup>2</sup> )

### DETALHE DO MEDIDOR

escala: 1:50



HASTE DE ATERRAMENTO 5/8" Ø CAIXA DE INSPEÇÃO ARTICULADA REFOÇADA E CONEXÃO EXOTÉRMICA  
ESCALA:

PROJETO	
TCC	
APROVACAO	DATA
DES.	04/11/2024
APROV.	
ESC:	TAM. A3
FOLHA 2/4	REV. A0

TÍTULO:  
**DIAGRAMA, RAMAL DE LIGAÇÃO**

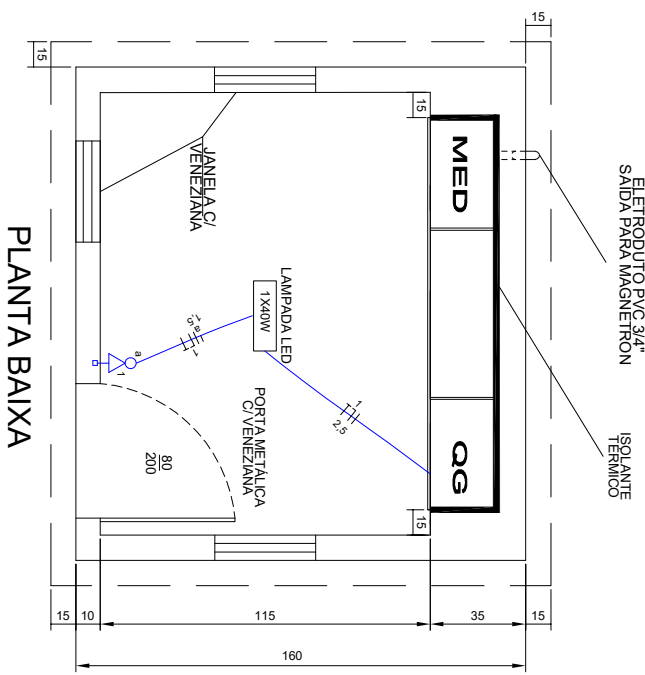
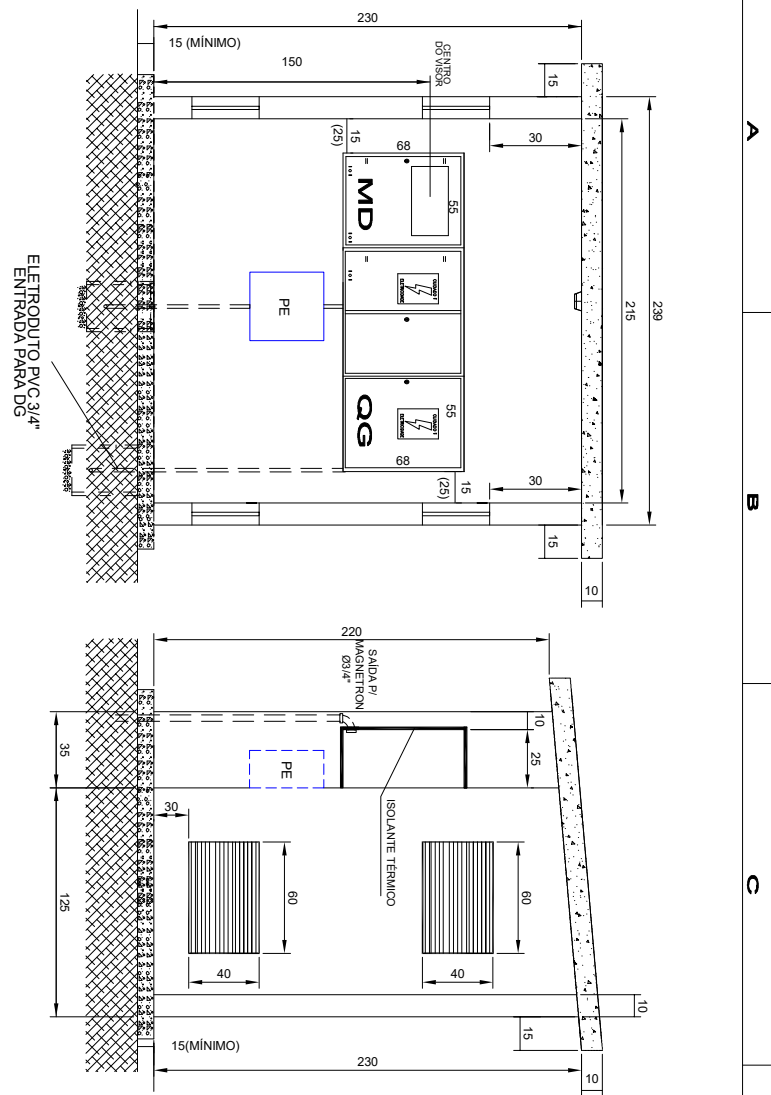
PROPRIETÁRIO: Rafael Lima  
ENDERECO DA OBRA: Capela do Rosário - 5º Distrito - Vacaria  
ENGENHEIRO: Rafael da Silva Vargas de Lima  
CREA:

ASS. PROPRIETÁRIO:  
ASS. ENGENHEIRO:

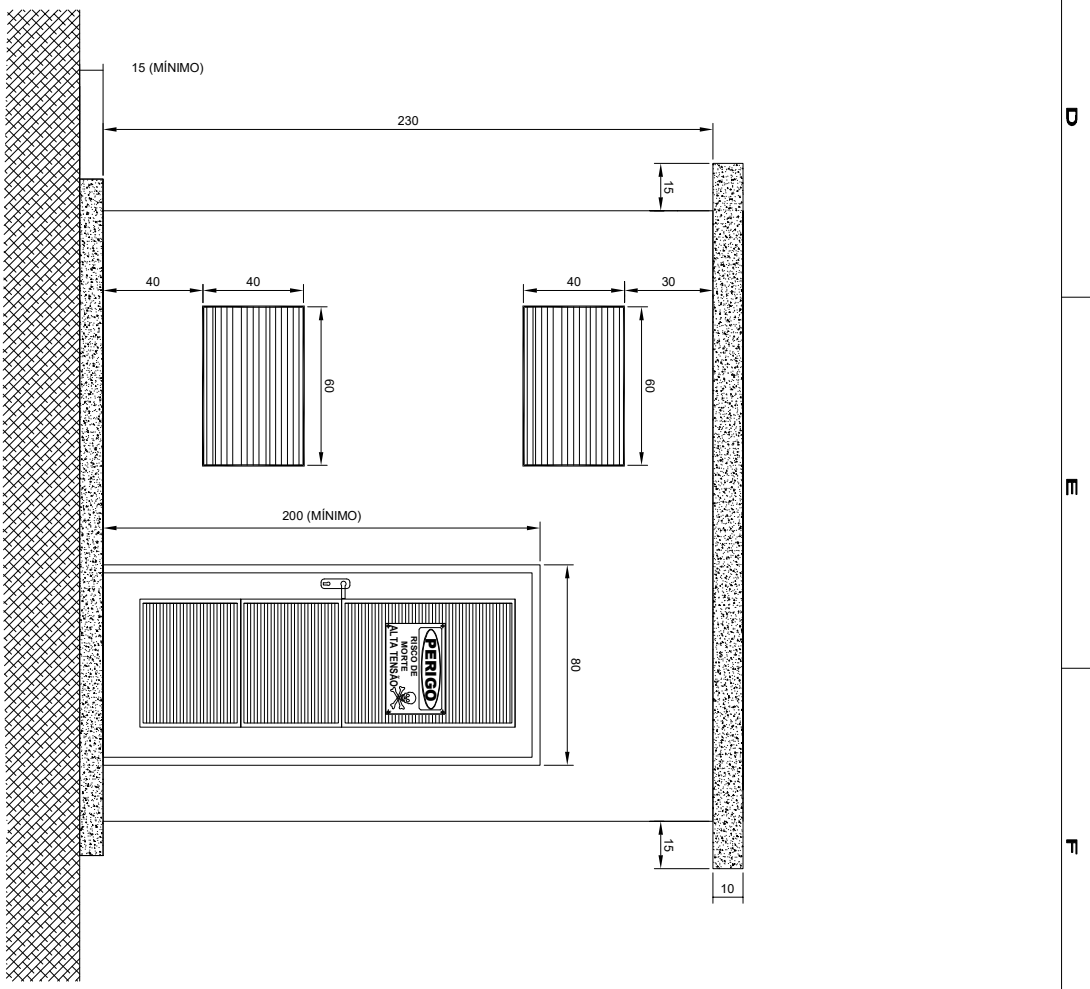
## .5 APÊNDICE E

Nesta prancha, que representa a planta da casa de máquinas, é possível observar sua localização na parte inferior, próxima à torre onde será instalada a antena. Essa casa de máquinas abrigará os sistemas de comando e acionamento da antena, bem como os circuitos de proteção e medição. Os equipamentos posicionados na parte superior da antena transmissora incluem o magnetron, o modulador PWM e o sistema de refrigeração, reduzindo assim as perdas na transmissão de micro-ondas.

Já na antena receptora, o arranjo é um pouco diferente: na parte superior ficam o retificador e o conversor/inversor, enquanto na casa de máquinas, localizada na parte inferior, estão os mesmos equipamentos utilizados na transmissão, além de um banco de baterias para armazenamento de energia e um inversor CC/CA para converter a energia recebida.



PLANTA BAIXA



<b>PROJETO</b>		<b>TITULO:</b>	
<b>TCC</b>		<b>PLANTA BAIXA DA CASA DE MAQUINAS</b>	
<b>APROVACAO</b>	<b>DATA</b>	PROPRIETARIO: Rafael Lima	
<b>DES.</b>	04/11/2024	ENDERECO DA OBRA: Capela do Rosario - 5° Distrito - Vacaria	
<b>APROV.</b>		ENGENHEIRO: Rafael da Silva Vargas de Lima	
<b>ESC:</b>	<b>TAM. A3</b>	CREA:	
<b>FOLHA 3/4</b>	<b>REV. A0</b>	ASS. PROPRIETARIO:	
		ASS. ENGENHEIRO:	

4

3

2

1

A

B

C

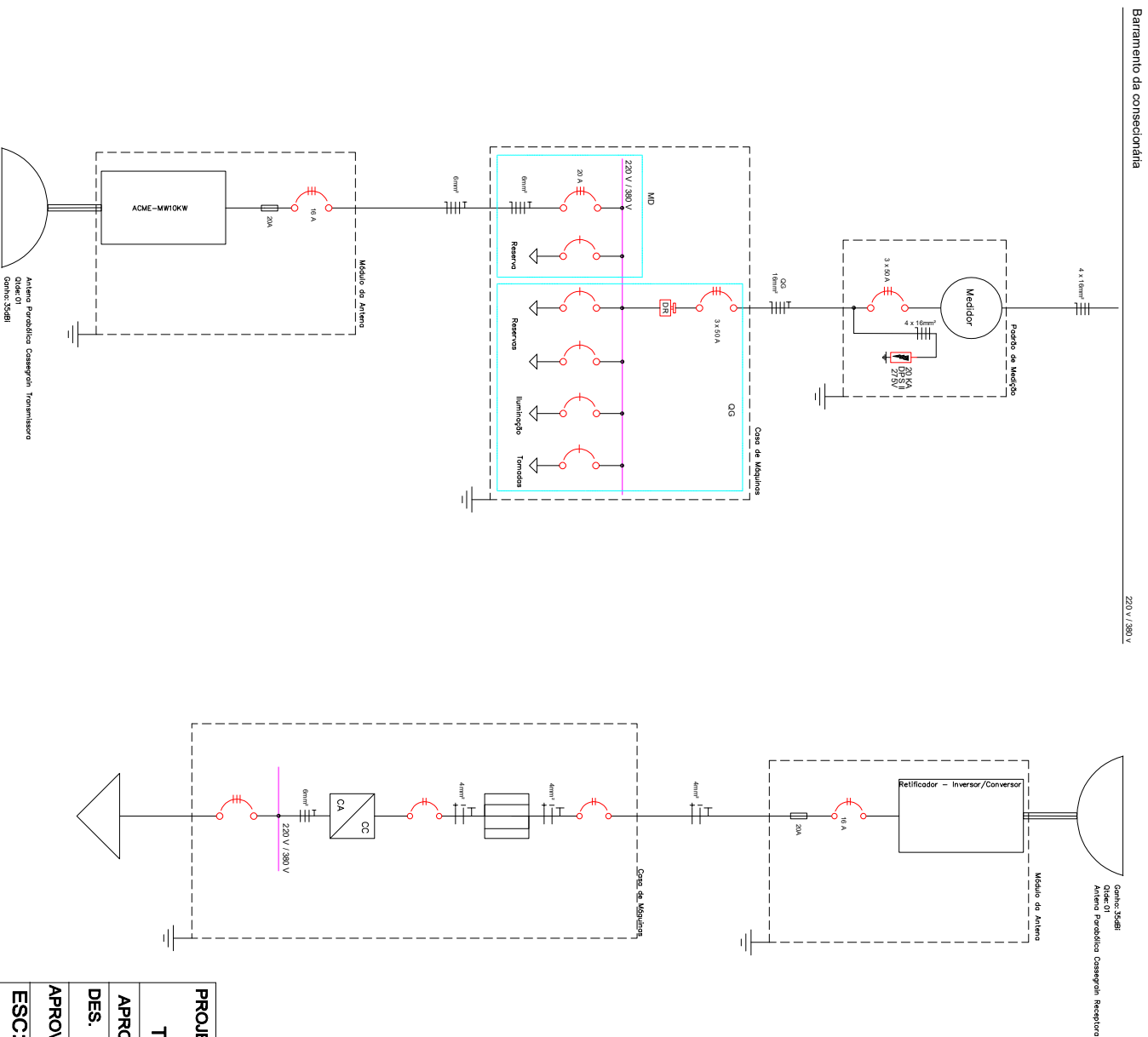
D

E

F

## .6 APÊNDICE F

Na prancha do diagrama unifilar, encontra-se representado o esquema de ligação elétrica, incluindo os componentes de proteção e os dispositivos eletrônicos. O dimensionamento dos cabos foi devidamente realizado e está detalhado na planta. A representação abrange tanto o sistema de transmissão quanto o de recepção, proporcionando uma visão abrangente do projeto.



LEGENDAS	
	Quadro Geral
	Quadro Distribuição
	Aterramento
	Barramento
	Condutores: Positivo, Negativo e Proteção
	Antena Transmissão - Recepção
	Disjuntor Bipolar
	Disjuntor Monopolar
	Disjuntor Tripolar
	Fusível
	Dispositivo de Proteção Contra Surto
	Inversor CA-CC
	Armazenzer de Energia - Banco de Baterias
	CENTRO DE MEDIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
	Dispositivo diferencial residual DR
	Poste de medição
	Tubulação embutida no piso - quando diâmetro não for informado, o mesmo é de 20mm (3/4") 1 - rede 2 - rede 3 - rede
	Condutores de Cobre
	Poste Concessionária com Transformador
	Poste Concessionária

<b>PROJETO</b>		<b>TÍTULO:</b>	
<b>TCC</b>	<b>DATA</b>	<b>DIAGRAMA UNIFILAR - TRANSMISSÃO E RECEPÇÃO</b>	
<b>APROVACAO</b>	<b>DES.</b>	PROPRIETÁRIO: Rafael Lima ENDEREÇO DA OBRA: Capela do Rosário - 5º Distrito - Vacaria ENGENHEIRO: Rafael da Silva Vargas de Lima CREA:	
<b>APPROV.</b>	04/11/2024	ASS. PROPRIETÁRIO:	
<b>ESC:</b>	<b>TAM. A3</b>	ASS. ENGENHEIRO:	
<b>FOLHA 4/4</b>	<b>REV. A0</b>		