



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS DE PALMAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CÍCERO MATHEUS DA SILVA LACERDA

**PROJETO E CARACTERIZAÇÃO DE ARRANJOS DE
RECTENNAS OTIMIZADAS COM ALGORITMOS
GENÉTICOS PARA QUINTA GERAÇÃO DE TELEFONIA
MÓVEL CELULAR**

Palmas/TO

2019

CÍCERO MATHEUS DA SILVA LACERDA

**PROJETO E CARACTERIZAÇÃO DE ARRANJOS DE
RECTENNAS OTIMIZADAS COM ALGORITMOS
GENÉTICOS PARA QUINTA GERAÇÃO DE TELEFONIA
MÓVEL CELULAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à UFT –
Universidade Federal do Tocantins – Campus
Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Elétrica,
como requisito parcial para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Humberto Xavier de Araujo.

Palmas/TO

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

- L131p Lacerda, Cícero Matheus da Silva.
PROJETO E CARACTERIZAÇÃO DE ARRANJOS DE RECTENNAS
OTIMIZADAS COM ALGORITMOS GENÉTICOS PARA QUINTA
GERAÇÃO DE TELEFONIA MÓVEL CELULAR. / Cícero Matheus da Silva
Lacerda. – Palmas, TO, 2019.
118 f.

Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus
Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Elétrica, 2019.
Orientador: Humberto Xavier de Araujo

1. 5G. 2. Rectennas. 3. Algoritmos Genéticos. 4. Otimização. I. Título

CDD 621.3

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

CÍCERO MATHEUS DA SILVA LACERDA

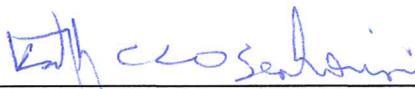
**PROJETO E CARACTERIZAÇÃO DE ARRANJOS DE
RECTENNAS OTIMIZADAS COM ALGORITMOS
GENÉTICOS PARA QUINTA GERAÇÃO DE TELEFONIA
MÓVEL CELULAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à UFT –
Universidade Federal do Tocantins – Campus
Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Elétrica,
como requisito parcial para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Humberto Xavier de Araujo.



Prof. Dr. Humberto Xavier de Araujo, UFT



Prof.ª Dra. Kathy Camila Cardozo Osinski Senhorini, UFT



Prof. Msc. Eliel Poggi dos Santos, UFT

Palmas/TO,

2019

Aos meus pais por todo apoio e incentivo na minha jornada.

Aos meus amigos por todos os momentos que passamos juntos.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para construção do meu conhecimento.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais José Aurivan Lacerda da Silva e Raimunda Nonata da Silva Lacerda pelos ensinamentos sobre como viver a vida, pelo investimento na minha educação e pelo companheirismo ao longo da minha jornada. Cito também aqui meu irmão José Aurivan Lacerda da Silva Filho pelos momentos de parceria, descontração e planejamento de novos empreendimentos.

Aos meus amigos, tanto dentro quanto fora do ambiente acadêmico, pelos inúmeros conselhos, vivências engraçadas e obstáculos vencidos através de um formidável trabalho em equipe. Não mencionarei nomes aqui para evitar que a preocupação com a brevidade desses agradecimentos me faça esquecer algum. Porém, aos que lerem, saberão que me refiro a vocês.

Ao meu orientador professor Dr. Humberto Xavier de Araujo por acreditar no meu potencial desde o meu segundo semestre na graduação, pelos conselhos de vida e investimento em minha formação acadêmica.

À tutora do PET Engenharia Elétrica Kathy Camila Cardozo Osinski Senhorini por minha aprendizagem e amadurecimento nesses mais de dois anos como petiano. O tempo passado no PET contribuiu imensamente para meu amadurecimento como acadêmico e como pessoa.

Ao técnico Nailson Martins Dantas Landim por ter disponibilizado seu computador como servidor para que eu pudesse fazer minhas simulações. Sem esse servidor eu não teria conseguido realizar todos os testes em tempo hábil, portanto, essa contribuição foi de suma importância para esse trabalho.

Aos demais profissionais envolvidos direta e indiretamente em minha formação acadêmica e aprendizagem, afinal, a humanidade só consegue evoluir porque o conhecimento é passado adiante ao longo das gerações.

Para todos vocês, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Com o advento de novos dispositivos móveis, bem como o aumento do número de dispositivos conectados, surgiu a necessidade de implementar a quinta geração de telefonia celular, a qual possui requisitos de baixíssima latência, menor que 1 ms, e alta taxa de transmissão, maior que 1 Gbps. A nível mundial, a provável faixa é de 26 GHz a 30 GHz. Nesse contexto, o presente trabalho apresenta a topologia de uma *rectenna* capaz de operar na banda supracitada. Para tal feito, foram usados algoritmos de otimização embutidos nos softwares de simulação para modelar os arranjos e o toco; além disso, foram dimensionadas células metamateriais SRR e ELC usando um algoritmo genético programado pelo próprio autor. O algoritmo genético foi feito em Python 3 e consegue otimizar células metamateriais para uma dada frequência fornecida pelo usuário. Ao final de todo o processo de otimização, os arranjos conseguiram uma largura de banda entre 1,5 e 2 GHz, enquanto a eficiência do pior caso foi de 89,13%. No contexto do retificador, a largura de banda de operação alcançada foi de 0,4 GHz. Com os resultados aqui exibidos, demonstra-se tanto que as alterações com metamateriais melhoram a antena e não acrescentam custos significativos quanto que as técnicas de otimização são ótimas ferramentas para o projeto de estruturas de alto desempenho.

PALAVRAS-CHAVE: 5G; *Rectenna*; Algoritmos Genéticos; Metamateriais; Otimização.

ABSTRACT

With the advent of new mobile devices, as well the increasing number of connected devices, emerged the necessity of implementing the fifth mobile generation, which has very low latency, less than 1 ms, and high transmission rate, above 1 Gbps, as requirements. At a global level, the likely band is from 26 GHz to 30 GHz. In this context, this work shows the topology of a rectenna able to operate in the band mentioned above. In order to do this, were used optimization algorithms embedded in the simulation softwares to calculate the antenna's dimensions and the parameters for the stub; besides that, SRR and ELC metamaterials unit cells were sized using a genetic algorithm created by the author. The genetic algorithm was programmed in Python 3, being able to optimize a metamaterial cell to a given frequency. At the end of the whole optimization process, the arrays got a bandwidth between 1,5 and 2 GHz, while the worst case's efficiency was 89,13%. At the level of the rectifier, the operation bandwidth achieved was 0,4 GHz. With the shown results, is demonstrated that the alterations with metamaterials improved the antenna with a low-cost procedure; it is also shown that the optimization techniques are powerful tools for the designer.

KEY-WORDS: 5G; Rectenna; Genetic Algorithm; Metamaterials; Optimization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Linha de Transmissão Terminada.....	27
Figura 2 - Linha <i>Microstrip</i>	28
Figura 3 - Esquema de Transmissão.....	29
Figura 4 - Regiões de Campo.	30
Figura 5 - Exemplo de Diagrama de Radiação.....	31
Figura 6 - Antena Planar com <i>Patch</i> Retangular.....	33
Figura 7 - Dimensionamento do <i>Patch</i> Retangular.	34
Figura 8 - Dimensionamento do <i>Patch</i> Circular.....	35
Figura 9 - Casamento de Impedância.	36
Figura 10 - Transformador de um Quarto de Comprimento de Onda.	36
Figura 11 - Arranjo de <i>Patches</i> Circulares 2x1.....	38
Figura 12 - Arranjo de <i>Patches</i> Circulares 4x1.....	38
Figura 13 - Arranjo de <i>Patches</i> Retangulares 4x1.....	39
Figura 14 - Parâmetros de Performance de um Enlace.	40
Figura 15 - Propriedades dos Materiais no Domínio dos Parâmetros Constitutivos.....	42
Figura 16 - Onda de Propagando em um Meio DPS e em outro DNG.	42
Figura 17 - <i>Split Ring Resonator</i>	43
Figura 18 - Electric-Field-Coupled.....	44
Figura 19 - Rede Genérica com N Portas.....	45
Figura 20 - Circuitos de Duas Portas em Cascata.	46
Figura 21 - Toco em Curto Circuito.	47
Figura 22 - Estrutura para Casamento de Impedâncias e Filtragem.....	48
Figura 23 - Curvas Características do Diodo Comum e Diodo <i>Schottky</i>	49
Figura 24 - Circuito Equivalente do Diodo <i>Schottky</i>	49
Figura 25 - Sinais nos Domínios do Tempo e Frequência para um Retificador.	51
Figura 26 - Topologia do Retificador.....	51
Figura 27 - Esquema de uma <i>Rectenna</i>	52
Figura 28 - Células Hexagonais.....	53
Figura 29 - Projeção para 2025 da Quantidade de Dispositivos Conectados à Redes Móveis.....	55
Figura 30 – Potenciais Aplicações da Tecnologia 5G.....	56
Figura 31 - Classificação de Aplicações Conforme Necessidade de Recursos.....	57
Figura 32 - Interferência da Capa de Plástico.....	58

Figura 33 - Campo Elétrico Dentro do Celular.	58
Figura 34 - Reflexão em Função do Ângulo de Incidência.	59
Figura 35 - Espaço de Buscas das Técnicas de Otimização.	60
Figura 36 - Mecanismo de Seleção Natural.	62
Figura 37 - Cromossomos e Sistema de Avaliação.	64
Figura 38 - Cromossomo com Gene que não Obedece às Restrições.	66
Figura 39 - Torneio para Descartar Indivíduos.	68
Figura 40 - Torneio para Crossover.	68
Figura 41 - Crossover Uniforme.	69
Figura 42 - Mutação por Perturbação.	70
Figura 43 - Fluxograma de um Algoritmo Genético.	73
Figura 44 - <i>Layout</i> do SRR.	77
Figura 45 - Perda Por Retorno do SRR.	78
Figura 46 - <i>Layout</i> do ELC.	79
Figura 47 - Perda por Retorno do ELC.	79
Figura 48 - <i>Layout</i> do <i>Patch</i> Retangular.	80
Figura 49 - Perda por Retorno da Antena com <i>Patch</i> Retangular.	81
Figura 50 - Ganho da Antena com <i>Patch</i> Retangular.	81
Figura 51 - Diretividade da Antena com <i>Patch</i> Retangular.	82
Figura 52 - <i>Layout</i> da Antena com <i>Patch</i> Circular.	83
Figura 53 - Perda por Retorno da Antena com <i>Patch</i> Circular.	83
Figura 54 - Ganho da Antena com <i>Patch</i> Circular.	84
Figura 55 - Diretividade da Antena com <i>Patch</i> Circular.	84
Figura 56 - <i>Layout</i> do Arranjo com <i>Patches</i> Retangulares.	85
Figura 57 - Perda por Retorno do Arranjo com <i>Patches</i> Retangulares.	86
Figura 58 - Ganho do Arranjo Retangular.	86
Figura 59 - Diretividade do Arranjo Retangular.	87
Figura 60 - <i>Layout</i> do Arranjo com <i>Patches</i> Circulares.	88
Figura 61 - Perda por Retorno do Arranjo com <i>Patches</i> Circulares.	88
Figura 62 - Ganho do Arranjo Circular.	89
Figura 63 - Diretividade do Arranjo Circular.	89
Figura 64 - <i>Layout</i> do Arranjo Circular com Células SRR.	92
Figura 65 - Perda por Retorno do Arranjo Circular com Células SRR.	93
Figura 66 - Ganho do Arranjo Circular com Células SRR.	93

Figura 67 - Diretividade do Arranjo Circular com Células SRR.	94
Figura 68 - Layout do Arranjo Circular com Células ELC	94
Figura 69 - Perda por Retorno do Arranjo Circular com Células ELC.	95
Figura 70 - Ganho do Arranjo Circular com Células ELC.....	95
Figura 71 - Diretividade do Arranjo Circular com Células ELC.	96
Figura 72 - Layout do Arranjo Retangular com Células SRR.....	97
Figura 73 - Perda por Retorno do Arranjo Retangular com Células SRR.....	97
Figura 74 - Ganho do Arranjo Retangular com Células SRR.	98
Figura 75 - Diretividade do Arranjo Retangular com Células SRR.....	98
Figura 76 - Layout do Arranjo Retangular com Células ELC.....	99
Figura 77 - Perda por Retorno do Arranjo Retangular com Células ELC.....	99
Figura 78 - Ganho do Arranjo Retangular com Células ELC.	100
Figura 79 - Diretividade do Arranjo Retangular com Células ELC.....	100
Figura 80 - Perda por Retorno dos Arranjos Circulares.	101
Figura 81 - Perda por Retorno dos Arranjos Retangulares.....	102
Figura 82 - Toco para Casamento de Impedâncias.....	105
Figura 83 - Topologia do Circuito Retificador.....	106
Figura 84 - Perda por Retorno do Toco com Retificador.....	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo entre as Células Metamateriais.....	90
Tabela 2 - Comparativo das Antenas pela Perda por Retorno.....	90
Tabela 3 - Comparativo das Antenas pelo Diagrama de Radiação.	91
Tabela 4 - Bandas de Sintonia dos Arranjos Circulares.....	101
Tabela 5 - Bandas de Sintonia dos Arranjos Retangulares.....	102
Tabela 6 - Análise de Todos os Arranjos.	103
Tabela 7 - Dimensões do Toco.....	105
Tabela 8 - Dados do Retificador.....	107

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

5G	Quinta Geração
AC	<i>Alternate Current</i> - Corrente Alternada
AG	Algoritmo Genético
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
API	<i>Application Programming Interface</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
COM	<i>Component Object Model</i>
dB	Decibel
DC	<i>Direct Current</i> - Corrente Contínua
DNG	<i>Double Negative</i> - Duplo Negativo
DPS	<i>Double Positive</i> - Duplo Positivo
ELC	<i>Electric-field Coupled</i>
Gbps	Gigabit por segundo
GHz	Gigahertz
IoT	<i>Internet of Things</i> - Internet das Coisas
m	Metro
mm	Milímetro
M-MIMO	<i>Massive Multiple-Input and Multiple-Output</i>
ms	Milissegundo
NP-Completo	Não Polinomial Completo

RL	<i>Return Loss</i> - Perda por Retorno
RX	Receptor
SBD	<i>Schottky Barrier Diode</i> - Diodo de Barreira <i>Schottky</i>
SRR	<i>Split Ring Resonator</i>
TE	Transverso Elétrico
TEM	Transverso Eletromagnético
TM	Transverso Magnético
TX	Transmissor
VSWR	<i>Voltage Standing Wave Ratio</i> - Razão de Tensão de Onda Estacionária

LISTA DE SÍMBOLOS

Y	Admitância
\vec{E}	Campo Elétrico Complexo
\vec{H}	Campo Magnético Complexo
C	Capacitância
Γ	Coefficiente de Reflexão
S_{11}	Coefficiente de Reflexão na Matriz S
ϵ''	Componente Imaginária da Permissividade Elétrica
ϵ'	Componente Real da Permissividade Elétrica
λ	Comprimento de Onda
λ_0	Comprimento de Onda no Vácuo
σ	Condutividade Elétrica
α	Constante de Atenuação
α_c	Constante de Atenuação no Condutor
α_d	Constante de Atenuação no Dielétrico
β	Constante de Fase
k	Constante de Propagação
γ	Constante de Propagação Complexa
\vec{J}	Densidade Superficial de Corrente Complexa
ξ	Eficiência da Antena
f	Frequência

ω	Frequência Angular
Z	Impedância
η	Impedância Intrínseca do Meio
L	Indutância
μ	Permeabilidade Magnética
μ_0	Permeabilidade Magnética do Vácuo
μ_r	Permeabilidade Magnética Relativa
ϵ	Permissividade Elétrica
ϵ_0	Permissividade Elétrica do Vácuo
ϵ_e	Permissividade Elétrica Equivalente
ϵ_r	Permissividade Elétrica Relativa
R	Resistência
R_s	Resistência de Superfície

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
1.1. Contextualização	20
1.2. Justificativa.....	22
1.3. Objetivos	22
1.3.1. Objetivo Geral.....	22
1.3.2. Objetivos Específicos.....	23
1.4. Metodologia	23
2. CONCEITOS DE ELETROMAGNETISMO	25
2.1. Ondas no Espaço Livre e Ondas Guiadas	25
2.1.1. Equações de Maxwell no Domínio da Frequência.....	25
2.1.2. Ondas no Espaço Livre	26
2.1.3. Ondas Guiadas	26
2.1.3.1. <i>Linhas de Transmissão</i>	27
2.1.3.2. <i>Linha Microstrip</i>	28
2.2. Antenas	29
2.2.1. Parâmetros Básicos	30
2.2.1.1. <i>Diagramas de Radiação</i>	30
2.2.1.2. <i>Diretividade, Ganho e Eficiência de uma Antena</i>	31
2.2.2. Antenas Planares	32
2.2.2.1. <i>Patch Retangular</i>	33
2.2.2.2. <i>Patch Circular</i>	34
2.2.2.3. <i>Casamento de Impedância</i>	35
2.2.3. Arranjo de Antenas	37
2.2.3.1. <i>Arranjo de Patches Circulares</i>	37

2.2.3.2.	<i>Arranjo de Patches Retangulares</i>	39
2.2.4.	Validação de Antenas.....	39
2.3.	Estruturas Especiais	41
2.3.1.	Metamateriais.....	41
2.3.1.1.	<i>SRR</i>	43
2.3.1.2.	<i>ELC</i>	44
3.	CIRCUITOS DE MICRO-ONDAS	45
3.1	Matrizes S e ABCD	45
3.2.	Filtros CA e Casamento de Impedância	47
3.3.	Diodo Schottky	48
3.4.	Retificadores.....	50
3.5	Rectennas.....	51
4	CONCEITOS DE TELEFONIA MÓVEL CELULAR	53
4.1	Células.....	53
4.2	Redes 5G.....	54
5	FUNDAMENTOS DE ALGORITMOS GENÉTICOS	60
5.1.	Teoria da Evolução	62
5.2.	Algoritmos Genéticos.....	63
5.2.1.	Sistema de Avaliação	65
5.2.2.	Sistema de Seleção	67
5.2.3.	Sistema de Crossover	69
5.2.4.	Sistema de Mutação	70
5.2.5.	Funcionamento de um Algoritmo Genético.....	71
5.2.5.1.	<i>Critério de Parada</i>	72
5.2.5.2.	<i>Taxa de Crossover e Taxa de Mutação</i>	73
5.3.	Implementação Do Algoritmo Genético.....	75
5.4.	Indivíduos	75

5.5.	Sistema de Avaliação	75
5.5.1.	Nota.....	75
5.5.2.	Penalizações	76
5.6.	Critério de Parada, Taxas e Tamanho da População.....	76
7	ESTRUTURAS BASE.....	77
7.1	Metamateriais.....	77
7.1.1	SRR.....	77
7.1.2	ELC.....	78
7.2	Antenas Planares.....	80
7.2.1	Patch Retangular	80
7.2.2	<i>Patch</i> Circular	82
7.3	Arranjos.....	85
7.3.1	Arranjo Retangular.....	85
7.3.2	Arranjo Circular	87
7.4	Comparação das Estruturas	90
8	ARRANJOS MODIFICADOS.....	92
8.1.	Arranjo Circular	92
8.1.1.	Modificação com SRR.....	92
8.1.2.	Modificação com ELC	94
8.2.	Arranjo Retangular	96
8.2.1.	Modificação com SRR.....	96
8.2.2.	Modificação com ELC	99
8.3.	Comparação das Estruturas	101
9.	RETIFICADOR.....	105
10.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	108
	REFERÊNCIAS.....	111
	ANEXO I – DIMENSIONAMENTO DA LINHA MICROSTRIP.....	115

ANEXO II – DIMENSIONAMENTO DE PATCH RETANGULAR	116
ANEXO III – DIMENSIONAMENTO DE PATCH CIRCULAR.....	117
ANEXO IV – CÁLCULO DA EFICIÊNCIA DE UMA ANTENA.....	118

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

Todos os anos, em virtude do natural aprimoramento da tecnologia em um contexto de constante competição entre empresas, surgem no mercado novas tecnologias que são rapidamente inseridas e aprovadas pela sociedade, sejam elas novos pacotes oferecidos pelas operadoras, novos dispositivos criados ou mesmo novos aplicativos. Como consequência, esses novos produtos e serviços exigem maior tráfego de dados nas redes *wireless*, demandando, portanto, que a telefonia celular tenha sua infraestrutura aprimorada periodicamente. Em particular, essa constante evolução incrementa o volume de tráfego e transações de forma exponencial (NOKIA SIEMENS NETWORK, 2011).

É preciso mencionar que a demanda na era atual não só cresce exponencialmente como também tende a se diversificar ainda mais (RÜTSCHLIN, 2018), pois a sociedade está inserida em uma época de grande expansão de serviços de *streaming*, comunicação, *Cloud Computing*, jogos online e Internet das Coisas (LIMBERGER, 2017). A época atual também está dando início à veículos autônomos, realidade aumentada e realidade virtual (RÜTSCHLIN, 2018). Nesse contexto, a nova quinta geração deverá suprir todas essas necessidades oriundas de diversas fontes, o que implica em critérios de confiança e latências muito rigorosos, altas taxas de transmissão e redes flexíveis e escaláveis (MARCHETTI, 2017). Em termos numéricos, espera-se que as redes 5G trabalhem com latências menores que 1 ms e taxas de transmissão de dados maiores que 1 Gbps (RÜTSCHLIN, 2018).

No contexto da implementação, a previsão é que a quinta geração esteja sendo aplicada comercialmente em 2020 (LIMBERGER, 2017), tendo aplicações tanto abaixo de 6 GHz como em 28 GHz (RÜTSCHLIN, 2018). Embora façam parte da mesma rede, essas duas faixas exigem cuidados diferentes, pois, enquanto aquela é regida pelos parâmetros clássicos, como níveis de radiação, e tem como principal desafio a questão do espaço dentro do aparelho a ser embarcado, esta, em virtude da alta frequência, volta a atenção para a integração com o restante do dispositivo (RÜTSCHLIN, 2018).

No Brasil, a Agência Nacional de Telecomunicações – ANATEL – aprovou no dia 23 de maio de 2019 o uso das faixas de 2,3 a 2,4 GHz, representada pela frequência de 2,3 GHz, e 3,3 a 3,6 GHz, representada pela frequência de 3,5 GHz. para a implementação da quinta

geração de telefonia celular (ANATEL, 2019). Todavia, os arranjos no presente trabalho serão dimensionados para a frequência central de 28 GHz, em consonância com (RÜTSCHLIN, 2018), uma vez que essa faixa tende a ser adotada mundialmente e, além disso, a definição da banda no Brasil veio em uma data posterior à de início desse trabalho.

Existe ainda outra tecnologia que promete acompanhar o advento das novas redes de telefonia móvel: o carregamento sem fio de *gadgets*. De acordo com (NIOTAKI, *et al.*, 2014), o carregamento sem fio possibilita dispositivos com maior autonomia, ponto crucial para equipamentos e sensores da *IoT*. Nesse contexto, empresas já estão trabalhando para ofertar produtos que possibilitem carregar dispositivos sem usar fios e ainda prometem distâncias cada vez maiores. Um exemplo pode ser visto em um vídeo da empresa *Energous*, o qual exhibe o carregador sem fio *WattUp* (ENERGOUS, 2016). No portal do MIT há uma publicação sobre uma das possibilidades de transmissão *wireless* de energia em baixa potência: as *rectennas* (MIT, 2019).

Segundo (MATSUNAGA, NISHIYAMA e TOYODA, 2015), *rectenna* é uma antena capaz de receber ondas em radiofrequência e converter em energia para o dispositivo. Ainda segundo esses autores, elas tendem a se popularizar em dispositivos para micro-ondas. Porém, conforme publicado por (NGUYEN, *et al.*, 2015), *rectennas* possuem dificuldades tanto técnicas quanto financeiras no projeto e fabricação das mesmas. De acordo com os estudos de (LADAN e WU, 2013), uma *rectenna* pode ser decomposta em uma antena, cuja função é ser um transdutor para uma dada frequência, e um retificador projetado para a frequência a ser trabalhada. Essa abordagem, inclusive, será usada nesse trabalho.

No contexto da engenharia de micro-ondas, há ainda certos materiais capazes de melhorar a performance de dispositivos de alta frequência (GUELBER, 2014). Dentre esses materiais, destacam-se os metamateriais, os quais são estruturas cujo comportamento é modelado com valores negativos de permissividade elétrica e permeabilidade magnética (ARAUJO, 2012). Nesse trabalho, esses materiais foram dimensionados para que possam ser aplicados em dispositivos 5G com o intuito de melhorar sua performance.

Em posse dessas informações, o presente trabalho apresenta a topologia de uma *rectenna* para 5G com frequência central em 28 GHz. Para tal, a *rectenna* foi dividida em dois projetos menores: a primeira parte apresentar o *layout* de um arranjo de antenas modificado com metamateriais para obter alta performance na captação do sinal; o segundo projeto é o retificador configurado para a banda em questão.

Vale salientar que para este trabalho foram usados processos de otimização na obtenção das dimensões. Para dimensionar os metamateriais foi implementado um algoritmo genético, o qual consiste em uma técnica de busca otimizada (LINDEN, 2012). Para as demais otimizações foram usadas as próprias ferramentas disponíveis no software de simulação.

Portanto, o presente trabalho detalhar todo o procedimento para o projeto da *rectenna*, dessa forma, o mesmo, além de apresentar a topologia, poderá ser usado como referência metodológica para futuros trabalhos.

1.2. Justificativa

Conforme argumentado anteriormente, a necessidade de novas tecnologias nos meios de comunicação é algo periódico e com uma frequência cada vez maior. Um dos efeitos colaterais é o incremento no grau de complexidade das novas empreitadas, fazendo-se necessário investimentos cada vez maiores nas áreas de modelagem, simulação e prototipação, para assim evitar erros na etapa final de construção, a qual é muito cara.

Partindo da premissa supracitada e fazendo uso das especificações já estipuladas para as redes 5G, justifica-se o presente trabalho a partir de sua contribuição para as áreas de projeto, modelagem, simulação, otimização e prototipação de *rectennas*, pois o mesmo apresentará detalhadamente o projeto de uma topologia que pode ser usada para fabricar dispositivos operacionais na nova geração de telefonia celular, evidenciando assim o desenvolvimento de dispositivos e *hardwares* de alta velocidade e eficiência.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Geral

Apresentar a topologia de uma *rectenna* que opere nas redes 5G. Além disso, o procedimento é detalhado com o intuito de servir como referência metodológica para futuros projetos.

1.3.2. Objetivos Específicos

O foco abordado pode ser dividido em alguns objetivos menores e mais específicos, conforme lista-se abaixo:

- Compreender o processo de projeto, simulação, fabricação e medição de antenas planares;
- Programar um algoritmo genético para otimizar as dimensões das células metamateriais;
- Entender as etapas do processo de otimização de uma antena com métodos numéricos presentes nos softwares de simulação;
- Compreender o processo de otimização de um dispositivo de micro-ondas através da aplicação de metamateriais;
- Apresentar *layouts* de metamateriais e arranjos que possam ser empregados em aplicações para a frequência de 28 GHz;
- Aprender o processo de projetar um retificador para altas frequências;
- Compreender as etapas de casamento de impedância entre uma antena e um circuito ativo para que surja uma *rectenna* a partir dessa combinação;
- Reunir o procedimento de projeto em um único material e detalhá-lo para que possa ser usado em trabalhos futuros;
- Escrever *scripts* para automatizar o processo de calcular valores para as variáveis abordadas no projeto;
- Projetar uma *rectenna* capaz de funcionar em redes 5G.

1.4. Metodologia

O início do trabalho se dá através do levantamento bibliográfico. O primeiro ponto a ser abordado são os conceitos fundamentais de eletromagnetismo, propagação de ondas eletromagnéticas e ondas guiadas. A segunda etapa do levantamento é compreender os tópicos de projeto tanto de antenas planares como de arranjo de antenas. A terceira etapa consiste em compreender o funcionamento das *rectennas*, incluindo os retificadores, para que seja possível projetá-las para as frequência desejadas. Em seguida, no próximo passo, é feita uma revisão

bibliográfica acerca dos metamateriais, incluindo seus respectivos *layouts* e equações para dimensionamento.

A segunda parte do trabalho é composta pelas simulações eletromagnéticas e otimizações. Partindo de projetos iniciados com as fórmulas apresentadas na literatura, as dimensões das antenas foram otimizadas, através de algoritmos de otimização, para melhor atender as especificações. Nessa etapa também foram analisados os resultados das simulações conforme padrões já estabelecidos também na literatura e em publicações acerca do tema.

A última parte do trabalho consiste em separar as topologias com o melhor resultado nas simulações e fabricar o protótipo com o intuito de comparar a resposta e atestar se a *rectenna* testada de fato é capaz de operar em redes 5G e fornecer energia para o dispositivo.

2. CONCEITOS DE ELETROMAGNETISMO

2.1. Ondas no Espaço Livre e Ondas Guiadas

Os sistemas de comunicação envolvem tanto ondas guiadas como ondas no espaço livre, portanto, conhecer os comportamentos desses fenômenos é importante. Essa análise é feita no domínio da frequência (ou fasorial) em virtude da substituição de equações diferenciais por equações lineares. Além disso, em virtude do tema desse trabalho, a parte de ondas guiadas é focada na linha de transmissão *microstrip*.

2.1.1. Equações de Maxwell no Domínio da Frequência

Assumindo uma dependência de $e^{j\omega t}$ no tempo, as equações de Maxwell na forma fasorial são (POZAR, 2011):

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -j\omega \vec{B} \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = j\omega \vec{D} + \vec{J} \quad (2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho_v \quad (3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (4)$$

A Transformada de Fourier pode ser usada para converter a solução no domínio da frequência para o domínio do tempo (POZAR, 2011).

No domínio da frequência é possível computar as perdas em um dielétrico através de uma permissividade complexa e uma condutividade equivalente. A permissividade complexa é da forma:

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (5)$$

Onde a parte imaginária computa as perdas e deve ser negativa (ϵ'' deve ser positivo). Para representar completamente as perdas em um dielétrico, usa-se tanto a permissividade complexa como sua condutividade equivalente, combinando-as em uma grandeza chamada tangente de perdas (POZAR, 2011):

$$\tan \delta = \frac{\omega \epsilon'' + \sigma}{\omega \epsilon'} \quad (6)$$

2.1.2. Ondas no Espaço Livre

Assumindo um meio linear, homogêneo, isotrópico e sem fontes, tem-se que $\vec{J} = \vec{0}$, logo, aplicando-se rotacional em ambos os lados das equações (1) e (2), chega-se ao par de equações de *Helmholtz* (POZAR, 2011):

$$\begin{cases} \nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = \vec{0} \\ \nabla^2 \vec{H} + k^2 \vec{H} = \vec{0} \end{cases} \quad (7)$$

Onde $k = \omega\sqrt{\mu\varepsilon}$ é conhecido como constante de propagação. Uma das soluções para (7) é conhecido como solução de onda plana. Nessa solução, considera-se a onda viajando na direção z , com o campo elétrico em x e o magnético em y . Além disso, os campos não variam com as coordenadas x e y :

$$\begin{cases} E_x = E^+ e^{-jkz} + E^- e^{jkz} \\ H_y = \frac{1}{\eta} (E^+ e^{-jkz} - E^- e^{jkz}) \end{cases} \quad (8)$$

Onde $\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$ é conhecido como impedância intrínseca do meio, e os valores E^+ e E^- são constantes para as componentes viajando, respectivamente, na direção $+z$ e na direção $-z$.

As equações acima são para o caso sem perdas. Na situação de tratamento de perdas, é possível definir uma constante de propagação complexa (POZAR, 2011):

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (9)$$

Onde α é a constante de atenuação e β é a constante de fase. No caso particular de ser sem perdas, tem-se que $\alpha = 0$ e $\beta = k$.

2.1.3. Ondas Guiadas

A Teoria das Ondas Guiadas fundamenta a transmissão de potência em meios confinados em altas frequências. Para esses estudos, a estrutura que confina a onda força a propagação em uma direção específica, a qual geralmente é estipulada como sendo $+z$ (doravante, direção de propagação). Nesse caso, diz-se que os campos têm uma dependência $e^{-j\beta z}$ e podem ser reescritos da seguinte forma (POZAR, 2011):

$$\begin{cases} \vec{E} = [\vec{e}(x, y) + \hat{z}e_z(x, y)]e^{-j\beta z} \\ \vec{H} = [\vec{h}(x, y) + \hat{z}h_z(x, y)]e^{-j\beta z} \end{cases} \quad (10)$$

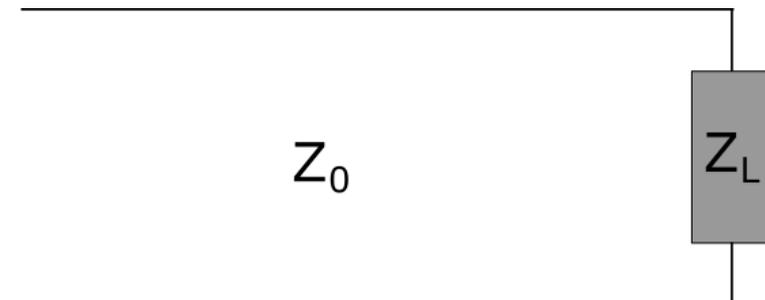
Onde os vetores \vec{e} e \vec{h} englobam as componentes transversais do campo (\hat{x} e \hat{y}) e e_z e h_z representam as componentes longitudinais na direção de propagação.

As ondas guiadas podem se dividir em três grandes modos de propagação: TEM, TM e TE, sendo, respectivamente, Transverso Eletromagnético, Transverso Magnético e Transverso Elétrico. Para este trabalho será usado apenas o TEM, caracterizado por $e_z = h_z = 0$.

2.1.3.1. Linhas de Transmissão

Uma linha de transmissão terminada, isto é, com uma carga Z_L no final, pode ser vista na imagem abaixo:

Figura 1 - Linha de Transmissão Terminada.



Fonte: Adaptado de Pozar, 2011.

Nesse tipo de linha, quando a impedância da carga é diferente da impedância característica da linha, denominada Z_0 , parte da potência não é entregue à carga, sendo refletida de volta para a fonte. A fração de tensão refletida é dada por (POZAR, 2011):

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (11)$$

O parâmetro de reflexão é comumente informado de outra forma, através da perda por retorno, dada por (SILVA NETO, 2016):

$$RL = -20 \log |\Gamma| \quad (12)$$

Vale salientar ainda que essas reflexões, ao se somarem com as ondas em sentido normal, criam ondas estacionárias na linha de transmissão ou guia de onda. A razão, ou coeficiente, de ondas

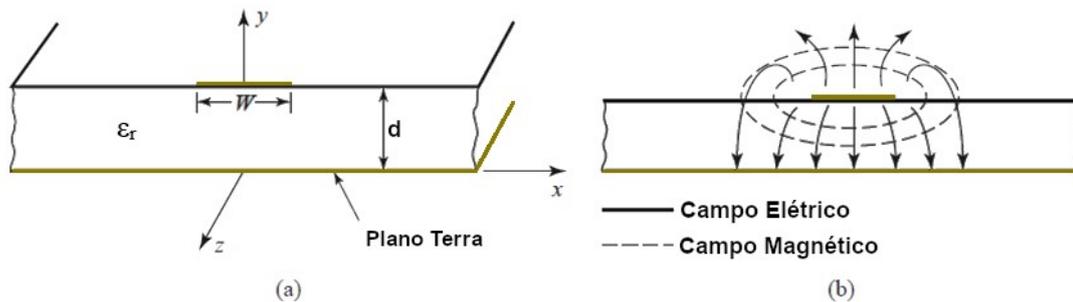
estacionárias é determinada através da divisão entre os valores máximos e mínimos de tensão (POZAR, 2011) (SILVA NETO, 2016):

$$VSWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (13)$$

2.1.3.2. Linha Microstrip

As linhas *microstrip* funcionam com modos híbridos TE e TM, porém, para as aplicações neste trabalho, uma vez que a espessura d é muito menor que o comprimento de onda, pode-se considerar um modo *quasi-TEM*, permitindo, portanto, realizar algumas aproximações e simplificações a luz das equações mostradas em 2.1.3 (POZAR, 2011). A Figura 2 mostra uma linha *microstrip*:

Figura 2 - Linha *Microstrip*.



Fonte: Adaptado de Pozar, 2011.

A Figura 2 (a) mostra a geometria da linha, composta por um plano terra condutor (*Ground Plane*), um substrato dielétrico de espessura d e permissividade relativa ϵ_r e uma linha condutora com largura W . A parte (b), por sua vez, mostra o comportamento das linhas de campo. Observe, portanto, que as linhas passam tanto pelo dielétrico como pelo ar, logo, define-se uma permissividade elétrica efetiva capaz de modelar o comportamento médio desses dois meios (POZAR, 2011):

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} * \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{d}{w}}} \quad (14)$$

Para uma dada impedância característica Z_0 e permissividade relativa ϵ_r , a razão $\frac{W}{d}$ pode ser determinada. Sejam as constantes A e B as seguintes (POZAR, 2011):

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0,23 + \frac{0,11}{\epsilon_r} \right) \quad (15)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (16)$$

Então, a proporção supracitada é dada por:

$$\frac{W}{d} = \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} \quad (17)$$

Caso o valor encontrado em (17) seja maior que 2, o seguinte cálculo deve ser realizado:

$$\frac{W}{d} = \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\epsilon_r} \right\} \right] \quad (18)$$

Os cálculos para atenuação no dielétrico e condutor são determinados conforme relações (19) e (20) (POZAR, 2011):

$$\alpha_d = \frac{k_0 \epsilon_r (\epsilon_e - 1) \tan \delta}{2\sqrt{\epsilon_e} (\epsilon_r - 1)} \quad (19)$$

$$\alpha_c = \frac{R_s}{Z_0 W} \quad (20)$$

Onde $k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ e $R_s = \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{2\sigma}}$. O dimensionamento da linha *microstrip* pode ser feito pelo script mostrado em ANEXO I – DIMENSIONAMENTO DA LINHA MICROSTRIP.

2.2. Antenas

Antenas são estruturas intermediárias entre o espaço livre e guias de onda (LIMBERGER, 2017). Sua função é irradiar ou receber potência na forma de ondas eletromagnéticas, sendo, portanto, chamada de transdutor (TELECOM HALL, 2011). A Figura 3 abaixo ilustra esse processo de transmissão envolvendo antenas:

Figura 3 - Esquema de Transmissão.



Fonte: Adaptado de Telecom Hall, 2011.

2.2.1. Parâmetros Básicos

2.2.1.1. Diagramas de Radiação

Antes de entender de fato os diagramas de radiação, é importante apresentar as regiões de campo. As regiões de campo descrevem o comportamento dos campos irradiados por uma antena, e se dividem em três (BALANIS, 2005):

- Região de Campo Próximo Reativo: essa região está localizada nos arredores da antena, sendo caracterizada por campos extremamente reativos;
- Região de Campo Próximo Irradiante (Fresnel): nessa região, embora os campos reativos não estejam presentes, o padrão de radiação ainda está em formação, logo, seu formato ainda depende da distância em que se encontra o ponto de análise em relação à antena;
- Região de Campo Distante (Fraunhofer): nessa região o padrão da radiação da antena é constante, ou seja, mantém o mesmo formato independentemente da distância. Além disso, nessa região já é possível considerar ondas planas, descritas pelas equações em 2.1.2. Por esse motivo, as análises de radiação de uma antena são feitas nessa região.

A Figura 4 mostra a localização dessas regiões:

Figura 4 - Regiões de Campo.



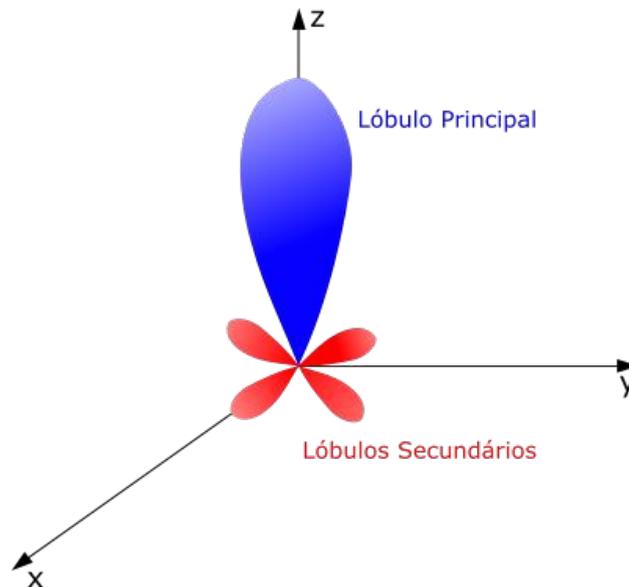
Fonte: Adaptado de Balanis, 2005.

O diagrama de radiação de uma antena, portanto, é uma representação gráfica em função das coordenadas espaciais que representa os padrões de radiação de uma antena na região de campo distante (BALANIS, 2005). Nos diagramas, geralmente a potência é normalizada em função de seu valor máximo e as grandezas são expressas em decibéis.

A Figura 5 mostra um exemplo de diagrama de radiação, onde comumente são usadas coordenadas esféricas. Embora sejam gráficos tridimensionais, a maioria das aplicações práticas usa gráficos em duas dimensões, bastando fixar alguns valores de ϕ e variar θ em seu domínio e depois fixar θ e variar ϕ em seu domínio (BALANIS, 2005).

A Figura 5 também permite identificar estruturas chamadas de lóbulos, que podem ser divididos em principal e secundários. O lóbulo principal é aquele que contém a maior radiação; já os secundários são quaisquer outros que não sejam o principal (SILVA NETO, 2016). Embora existam outras denominações, conforme pode ser visto em (BALANIS, 2005), para o presente trabalho é suficiente focar apenas nas duas citadas anteriormente.

Figura 5 - Exemplo de Diagrama de Radiação.



Fonte: Adaptado de Balanis, 2005.

2.2.1.2. Diretividade, Ganho e Eficiência de uma Antena

Uma grandeza importante definida na região de campo distante de uma antena é a intensidade de radiação, que informa a potência por unidade de ângulo sólido. Sua definição se

baseia na distribuição de potência em uma esfera imaginária de raio r cujo centro está na antena. Matematicamente:

$$U(\theta, \phi) = r^2 W_{rad} \quad (21)$$

Onde W_{rad} é a densidade de potência, em W/m^2 .

A partir da intensidade de radiação, é possível definir a diretividade, que informa como uma antena consegue concentrar radiação em uma dada direção (BALANIS, 2005):

$$D(\theta, \phi) = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{rad}} \quad (22)$$

Onde P_{rad} é a potência total irradiada pela antena.

Outra medida importante é o ganho, intimamente relacionado com a diretividade, porém, leva em conta a potência de entrada (BALANIS, 2005):

$$G(\theta, \phi) = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (23)$$

Onde P_{in} é a potência de entrada. Se ξ for a eficiência da antena definida da seguinte forma:

$$\xi = \frac{P_{rad}}{P_{in}} \quad (24)$$

Então, o ganho pode ser escrito como:

$$G = \xi D \quad (25)$$

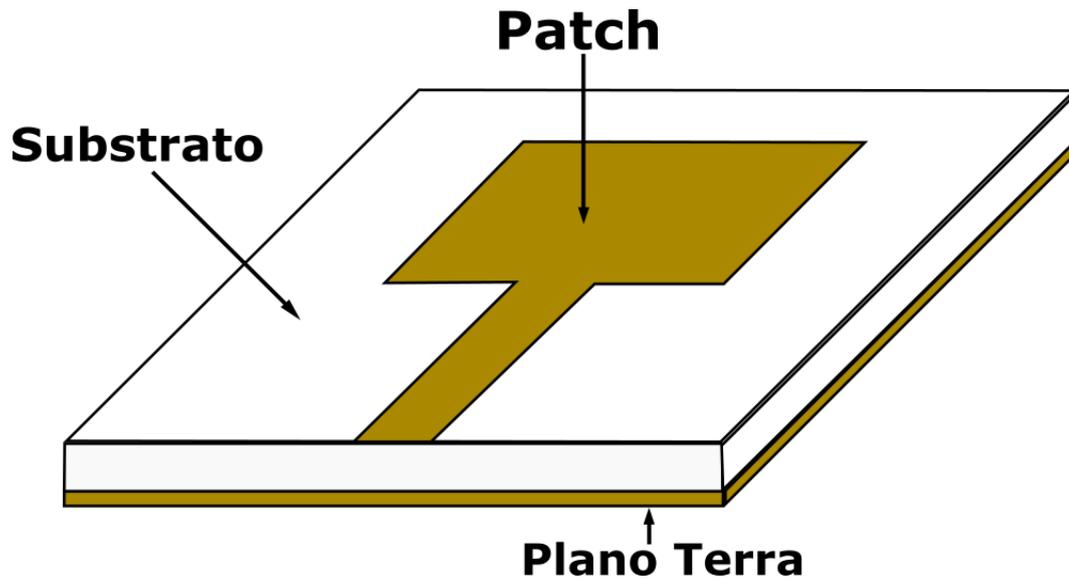
Por fim, tanto os valores de ganho como diretividade são comumente informados em decibéis (BALANIS, 2005).

2.2.2. Antenas Planares

As antenas planares possuem três componentes: *patch*, o elemento irradiante feito com material condutor; o substrato, um dielétrico de espessura d e permissividade relativa ϵ_r e o plano terra, também feito de material condutor (LIMBERGER, 2017).

Segundo (GUELBER, 2014), o *patch* pode ter diversos formatos, porém, os mais usados são o retangular, circular e dipolo devido à facilidade de fabricação e interpretação dos resultados. Além disso, para micro-ondas, é comum escolher substratos finos e com constante dielétrica (permissividade relativa) não maior que 5. A Figura 6 mostra uma típica antena planar com *patch* retangular.

Figura 6 - Antena Planar com *Patch* Retangular.



Fonte: Adaptado de Guelber, 2014.

Em comparação com outras antenas, as antenas planares possuem algumas vantagens: elas são baratas e fáceis de fabricar; são versáteis e podem ser integradas com componentes ativos, como diodos, transistores, Cis, etc (BALANIS, 2005). Todavia, suas principais desvantagens são: baixo ganho e potência, largura de banda estreita e difícil manipulação após instalação (LIMBERGER, 2017) (BALANIS, 2005).

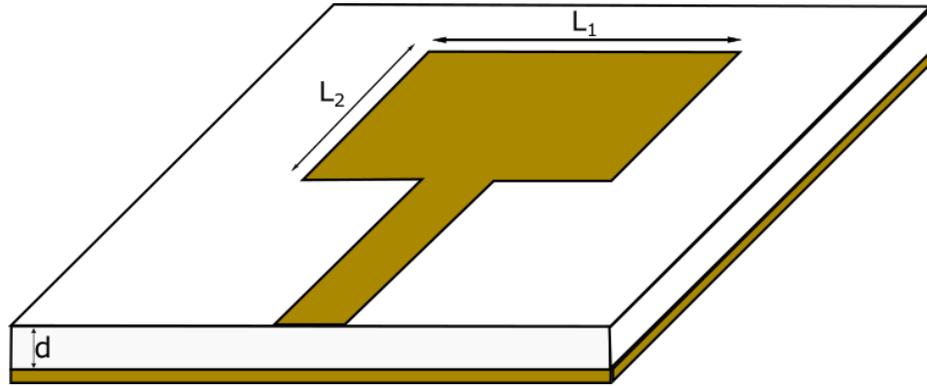
As desvantagens dessas antenas podem ser amenizadas com algumas técnicas. Segundo (GUELBER, 2014), é possível atenuar os pontos negativos modificando a geometria do *patch* e/ou plano terra, removendo pedaços ou adicionando estruturas de cobre no substrato.

O presente trabalho usará formulações presentes na literatura para patches circulares e retangulares.

2.2.2.1. *Patch* Retangular

A Figura 7 mostra as variáveis envolvendo o dimensionamento do *patch* retangular em antenas planares.

Figura 7 - Dimensionamento do *Patch* Retangular.



Fonte: Adaptado de Limberger, 2017.

Estabelecida a frequência de operação f_r e conhecidos os valores de d e ϵ_r , as seguintes relações permitem dimensionar o patch (LIMBERGER, 2017):

$$L_1 = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (26)$$

$$\frac{\Delta L}{d} = 0,442 \frac{(\epsilon_e + 0,3)}{(\epsilon_e - 0,258)} \frac{\left(\frac{W}{d} + 0,264\right)}{\left(\frac{W}{d} + 0,8\right)} \quad (27)$$

$$L_2 = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_e}} - 2\Delta L \quad (28)$$

Onde:

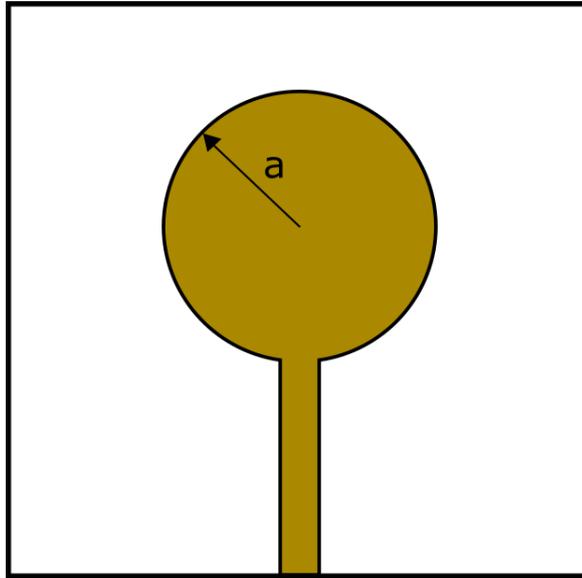
- c é a velocidade da luz, igual a 299.792.458 m/s;
- ϵ_e é dado em (14).

Por fim, salienta-se que o dimensionamento do *patch* retangular pode ser feito pelo script em ANEXO II – DIMENSIONAMENTO DE PATCH RETANGULAR.

2.2.2.2. *Patch* Circular

A Figura 8 mostra um *patch* circular com raio a . Conhecidos a permissividade relativa do substrato e espessura d e estabelecida a frequência de operação f_r , o raio do *patch* é determinado conforme as equações (29) e (30) (BALANIS, 2005).

Figura 8 - Dimensionamento do *Patch* Circular.



Fonte: Adaptado de Balanis, 2005.

$$F = \frac{8,791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (29)$$

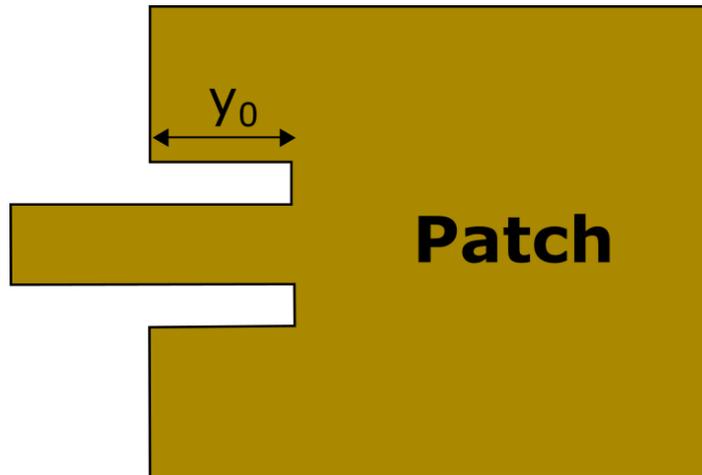
$$a = \frac{F}{\left\{1 + \frac{2d}{\pi \epsilon_r F} \left[\ln\left(\frac{\pi F}{2d}\right) + 1,7726 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (30)$$

Onde d deve estar em cm. Novamente, o script exposto em ANEXO III – DIMENSIONAMENTO DE PATCH CIRCULAR pode ser usado para calcular as dimensões.

2.2.2.3. Casamento de Impedância

Conforme explicado em 2.1.3.1, é necessário haver casamento de impedância entre a carga e a linha para que a máxima potência possível seja entregue à carga. Já foi demonstrado como calcular a largura da *microstrip*, porém, no caso de antenas de microfita, é necessário também calcular o comprimento da linha. Esse valor é obtido através do incremento y_0 , mostrado na Figura 9, cujo o valor é obtido através do script mostrado no ANEXO II – DIMENSIONAMENTO DE PATCH RETANGULAR.

Figura 9 - Casamento de Impedância.



Fonte: Adaptado de Balanis, 2005.

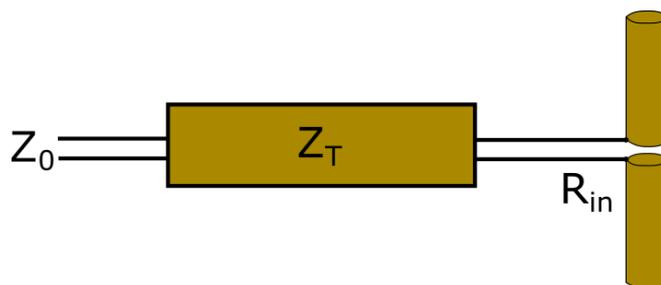
No caso do *patch* circular, será usado como estimativa inicial e mesmo valor que o script retornar para o patch retangular.

Outra forma de fazer o casamento de impedância, comumente usada em arranjos, é com transformadores de um quarto de comprimento de onda. Como as antenas aqui tratadas possuem impedância real, o transformador pode ser colocado na entrada da antena (BALANIS, 2005). Como o próprio nome sugere, o comprimento desse transformador é $\frac{\lambda_0}{4}$. Além disso, sua impedância deve ser (BALANIS, 2005):

$$Z_T = \sqrt{Z_0 R_{in}} \quad (31)$$

Onde Z_0 é a impedância característica da linha na entrada do transformador e R_{in} é a resistência ligada na saída. A Figura 10 mostra como é feita a ligação, lembrando que a largura do transformador deve ser calculada conforme visto na seção de *microstrips*, bastando apenas substituir Z_0 por Z_T nas equações citadas (BALANIS, 2005).

Figura 10 - Transformador de um Quarto de Comprimento de Onda.



Fonte: Adaptado de Balanis, 2005.

2.2.3. Arranjo de Antenas

Em muitas ocasiões, exige-se antenas com padrões de radiação altamente diretivos (antenas de alto ganho). Para essas situações, pode-se usar um arranjo de antenas, que consiste em vários elementos organizados de tal forma a terem seus efeitos somados (BALANIS, 2005). No caso de atender a premissa de antenas diretivas, o arranjo deve ser feito de forma que os campos de cada elemento individual se somem nas direções desejadas e se cancelem nas demais (BALANIS, 2005).

Em um arranjo composto pelo mesmo tipo de elemento, existem pelo menos cinco pontos que controlam o diagrama de radiação da antena resultante (BALANIS, 2005):

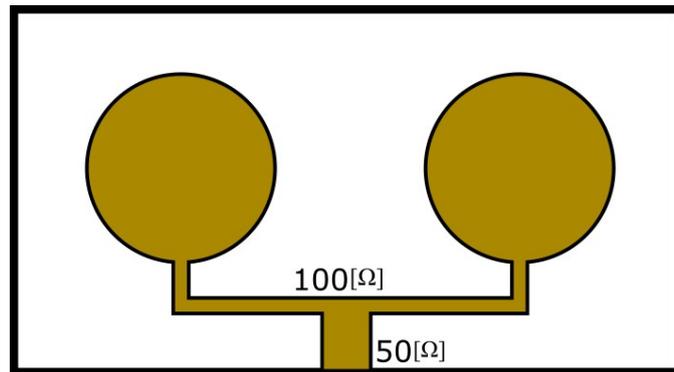
- A configuração geométrica do arranjo;
- O espaçamento relativo entre elementos;
- A amplitude de excitação de cada elemento individual;
- A fase de excitação de cada elemento individual;
- O comportamento relativo de cada elemento do arranjo.

No presente trabalho serão apresentados dois tipos de arranjos de antenas de microfita: arranjo com *patch* circular e com *patch* retangular. Os critérios para dimensionamento serão mencionados a seguir. Caso alguma dimensão em particular não seja abordada, quer dizer que a mesma será ajustada com base em um processo de otimização ou sucessivas tentativas.

2.2.3.1. Arranjo de Patches Circulares

A Figura 11 mostra um arranjo de *patches* circulares 2x1, isto é, uma linha e duas colunas. Observe que cada *patch* está conectado a uma linha de 100Ω , as quais, por estarem em paralelo, resultam em uma impedância equivalente de 50Ω . Como a impedância equivalente das linhas é 50Ω , o arranjo como um todo é alimentado por uma linha de 50Ω .

Figura 11 - Arranjo de *Patches* Circulares 2x1.

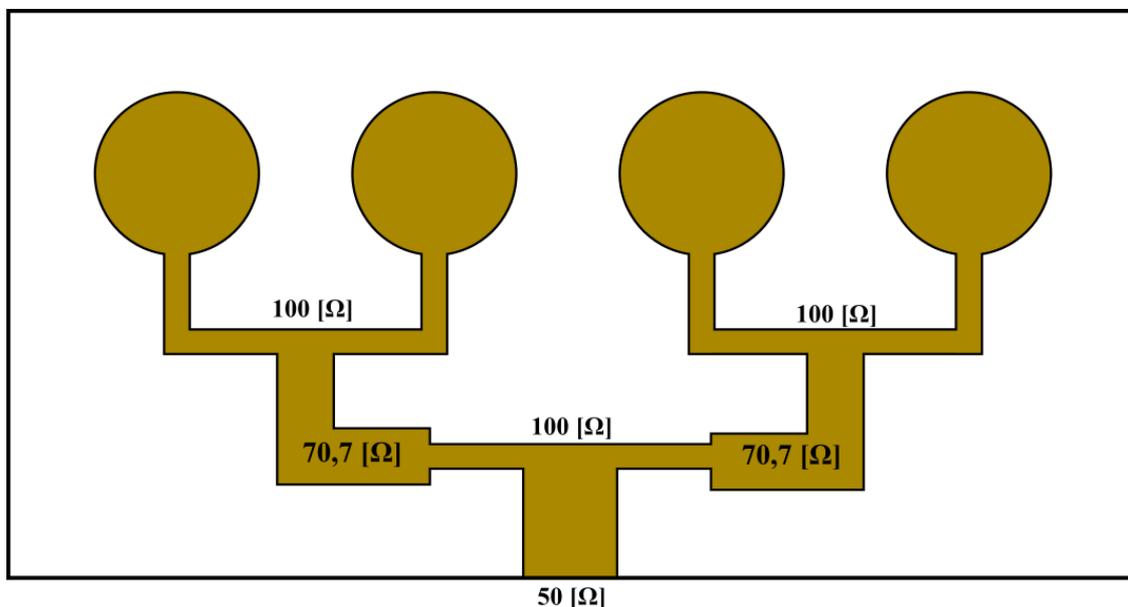


Fonte: Adaptado de Ayn; Rao; Rao, 2017.

Por fim, salienta-se que o espaçamento entre os *patches* é de 62,5 mm, conforme (AYN, RAO e RAO, 2017).

O arranjo mostrado na Figura 12 também foi proposto por (AYN, RAO e RAO, 2017), sendo a única diferença os transformadores de um quarto de comprimento de onda, de 70,7 Ω , inseridos entre uma linha equivalente de 50 Ω e outra de 100 Ω .

Figura 12 - Arranjo de *Patches* Circulares 4x1.



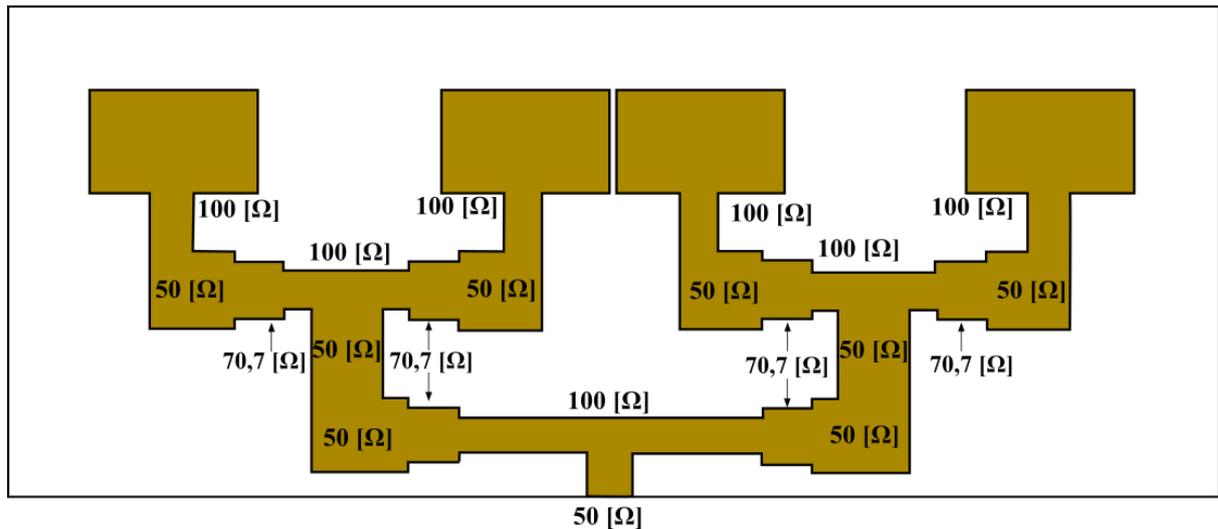
Fonte: Adaptado de Ayn; Rao; Rao, 2017.

No presente trabalho foi implementado o arranjo com 4 *patches*, porém, as dimensões das linhas de alimentação foram modificadas para possibilitar o casamento de impedâncias na frequência desejada.

2.2.3.2. Arranjo de Patches Retangulares

O modelo de arranjo exibido na Figura 13 é proposto por (ALSAGER, 2011) e apresenta o mesmo transformador de um quarto de comprimento de onda que o modelo anteriores.

Figura 13 - Arranjo de *Patches* Retangulares 4x1.



Fonte: Alsager, 2011.

O arranjo de *patches* retangulares será feito parecido com esse modelo, porém, algumas modificações nas linhas de alimentação serão apresentadas no *layout* da antena, pois, como as fórmulas são aproximativas, o arranjo passará por processos de ajustes das dimensões.

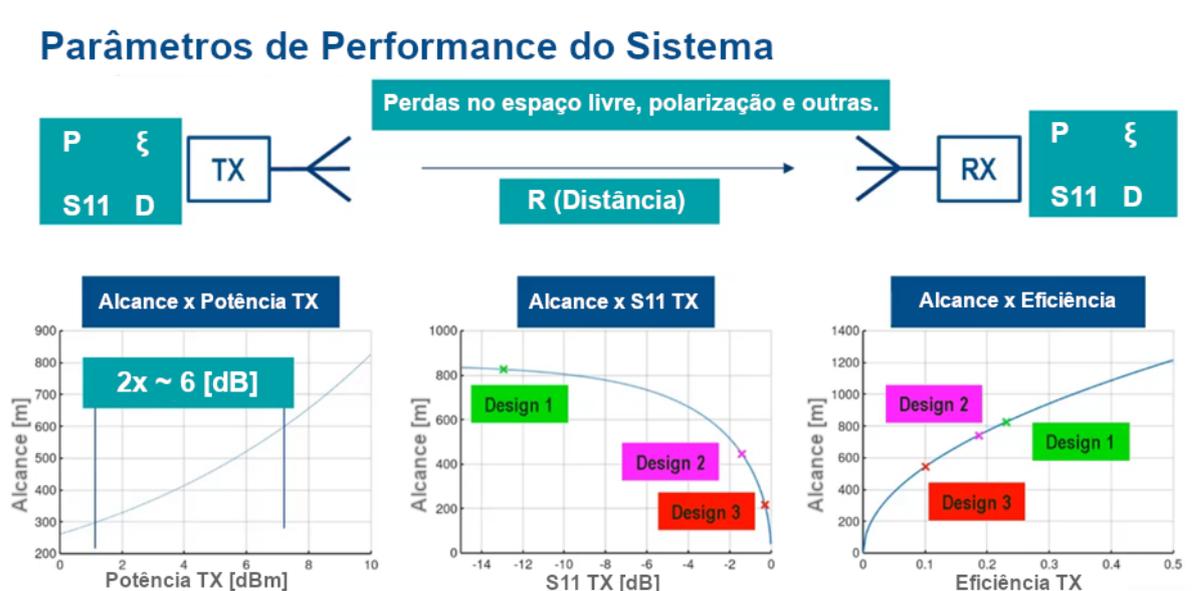
2.2.4. Validação de Antenas

Algumas antenas construída em placas de circuito impresso, empregadas em comunicações sem fio, *IoT* e telefone celulares, são chamadas de antenas eletricamente pequenas em virtude de serem muito menores que o comprimento de onda da frequência de operação dividido por quatro (EICHLER, 2018). Ainda segundo o autor, o processo de apenas dimensionar a antena resolve parcialmente o problema de ressonância, pois, o mesmo não leva em conta otimização da comunicação e tampouco considera o consumo da bateria.

A antena transmissora, também chamada de TX, tem seu alcance determinado pela potência de entrada P , da perda por retorno S_{11} , da diretividade D e da eficiência ξ . A Figura 14 mostra os parâmetros que afetam a performance de uma comunicação. Na parte inferior,

pode-se ver a forma da curva do efeito que algumas dessas variáveis têm no alcance. É possível observar, por exemplo, que quanto maior a potência, maior o alcance, porém, maior será o consumo da bateria. O padrão da perda por retorno, por sua vez, segue de maneira inversa, ou seja, quanto maior o valor do S11, menor será o alcance. Por fim, quanto maior a eficiência da antena, maior será o alcance em virtude de menos potência ser perdida.

Figura 14 - Parâmetros de Performance de um Enlace.



Saindo da antena transmissora, as variáveis que interferem no alcance são: perdas no espaço livre, descasamento de polarização e outras perdas em virtude do próprio ambiente, como estruturas urbanas e árvores. Por fim, os parâmetros presentes no receptor, chamado de RX, são: potência que chega à antena, diretividade, perda por retorno e eficiência da antena receptora (EICHLER, 2018).

No contexto dos valores para cada parâmetro, tem-se que, quando se trata de antenas eletricamente pequenas, dificilmente a eficiência será maior que 50% (EICHLER, 2018). Além disso, é dito que determinada antena opera em uma dada frequência se a perda por retorno, na frequência de análise, for menor que -10 dB (EICHLER, 2018). As demais variáveis, por serem particulares de cada aplicação, não possuem faixas de valores pré-estabelecidas.

Para gerar os resultados, foram usados códigos elaborados pelo autor. O primeiro deles, disponível em (LACERDA, 2019), foi usado para plotar o gráfico da perda por retorno e obter os valores da banda de sintonia e perda por retorno em 28 GHz. O ANEXO IV – CÁLCULO

DA EFICIÊNCIA DE UMA ANTENA, por sua vez, lê os valores de ganho e diretividade em dB e realiza os cálculos mostrados anteriormente para calcular a eficiência da antena.

2.3. Estruturas Especiais

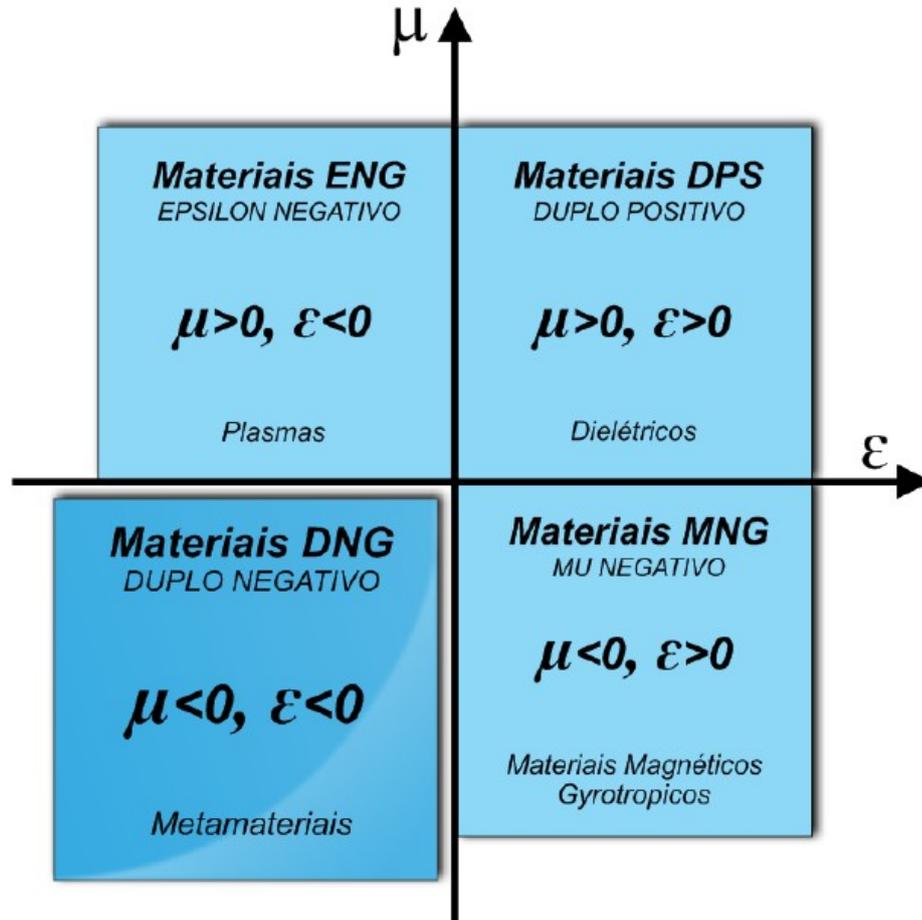
2.3.1. Metamateriais

Segundo (ARAÚJO, 2012), os metamateriais são estruturas macroscópicas, periódicas ou não, que possuem comportamento eletromagnético determinado por sua composição e geometria. Em termos eletromagnéticos, as estruturas macroscópicas são descritas através dos parâmetros constitutivos, ϵ e μ . Dessa forma, a Figura 15 localiza os metamateriais no tocante a esses termos, fixando-os no quadrante DNG.

Os primeiros estudos envolvendo a propagação de ondas monocromáticas em meios DNG foram feitos por Victor G. Veselago (VESELAGO, 1968). Conforme (VESELAGO, 1968), enquanto os materiais comuns (DPS) possuem vetores cujos sentidos podem ser representados pela mão direita, os materiais DNG formam a contraparte representada pela mão esquerda. Em termos práticos, essa característica implica dizer que a densidade de potência da onda se propaga na direção contrária à própria onda, conforme ilustrado na Figura 16, sendo \vec{S} o vetor de Poynting, o qual aponta na direção de propagação de potência. Na Figura 16, o meio 1 é DPS. Se o meio 2 também for DPS, a onda se comportará como mostrado na situação A. Porém, se o meio 2 for DNG, a onda se propagará conforme mostrado na situação B.

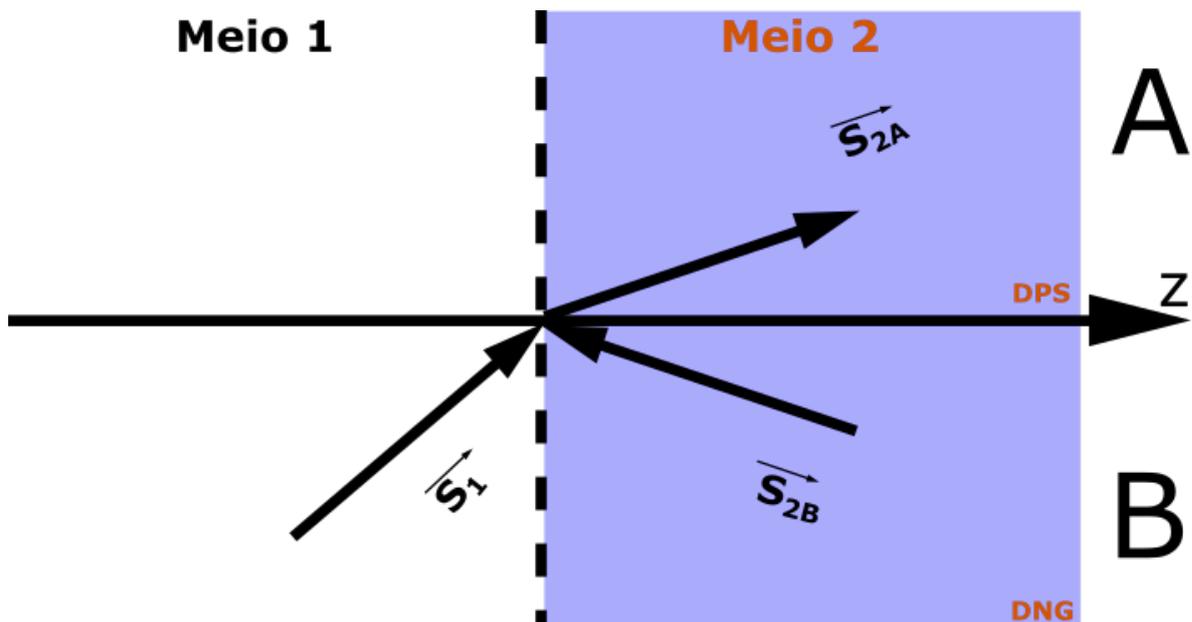
A aplicação dos metamateriais em antenas planares pode ser feita de diversas maneiras. Entre elas, pode-se inserir elementos no substrato, remover partes dos componentes condutores (*patch* e plano terra) e, ainda, pode-se inserir metamateriais entre o substrato (LIMBERGER, 2017). Embora possuam uma geometria definida, as dimensões dos metamateriais variam com a frequência de aplicação e apresentam efeitos inovadores na engenharia elétrica (LIMBERGER, 2017). O presente trabalho apresenta duas estruturas, as quais são discutidas a seguir: SRR e ELC.

Figura 15 - Propriedades dos Materiais no Domínio dos Parâmetros Constitutivos.



Fonte: Limberger, 2017.

Figura 16 - Onda de Propagando em um Meio DPS e em outro DNG.



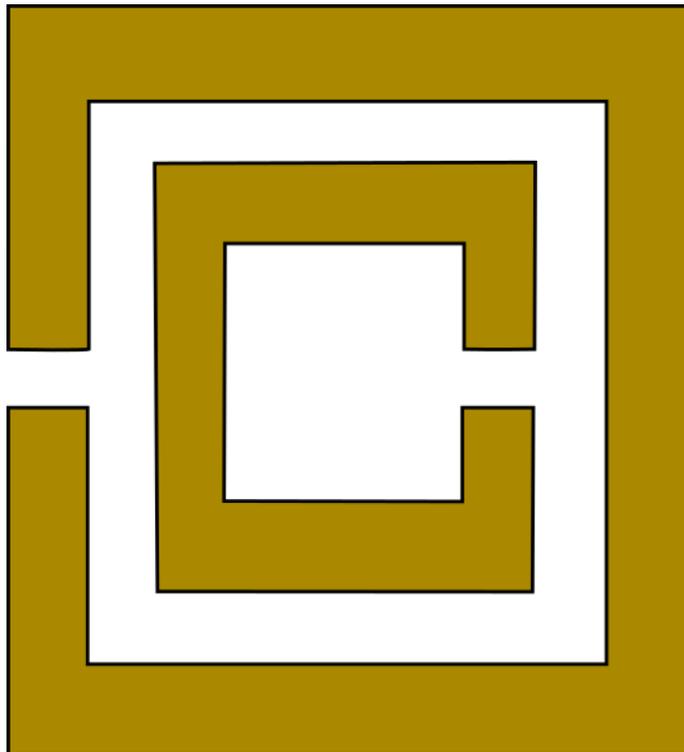
Fonte: Adaptado de Guelber, 2014.

2.3.1.1. SRR

O *Split Ring Resonator* (SRR) possui características de metamateriais e foi proposto por Pendry et al (TIRKEY, *et al.*, 2016). Conforme (SAHU, MISHRA e PALAI, 2016), para essa célula, o efeito de metamaterial depende mais do formato da estrutura do que da composição dela. A Figura 17 mostra a geometria do SRR.

O SRR é composto normalmente por um elemento condutor, onde sua indutância é balanceada com a capacitância entre os anéis (SAHU, MISHRA e PALAI, 2016). Ainda conforme os autores, um campo magnético variante no tempo perpendicular aos anéis induz correntes que, por sua vez, geram campos circulares que podem se somar ou se opor ao campo inicialmente aplicado, resultando em uma permeabilidade efetiva positiva ou negativa de acordo com o dimensionamento.

Figura 17 - *Split Ring Resonator*.

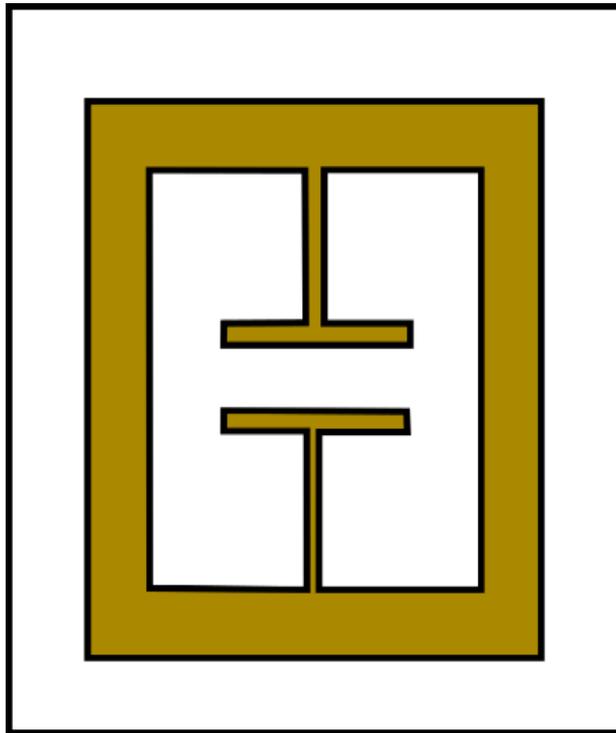


Fonte: Adaptado de Marwaha; Marwaha, 2016.

2.3.1.2. ELC

O *Electric-Field-Coupled* (ELC) é um ressonador indutivo-capacitivo proposto por Schurig (PUSHKAR e GUPTA, 2015). A Figura 18 mostra a geometria do ELC. Além disso, o dimensionamento para 5G do mesmo foi feito através de sucessivas tentativas e otimizações, tendo como base o que foi proposto por (PUSHKAR e GUPTA, 2015).

Figura 18 - Electric-Field-Coupled.



Fonte: Adaptado de Pushkar; Gupta, 2015.

Conforme (SAYUYIGBE, *et al.*, 2009), uma célula ELC é composta por uma combinação de múltiplos ressonadores LC. A principal característica dessas células, ainda conforme os mesmos autores, é a capacidade de o ajuste em suas dimensões proporcionar o controle da resposta elétrica em todas as direções.

A geometria exibida na Figura 18 foi proposta por (SCHURIG, MOCK e SMITH, 2006), onde é explicado que a estrutura que se assemelha a um capacitor no meio de dois *loops* causa um efeito de ressonância LC, permitindo polarização em diferentes frequências.

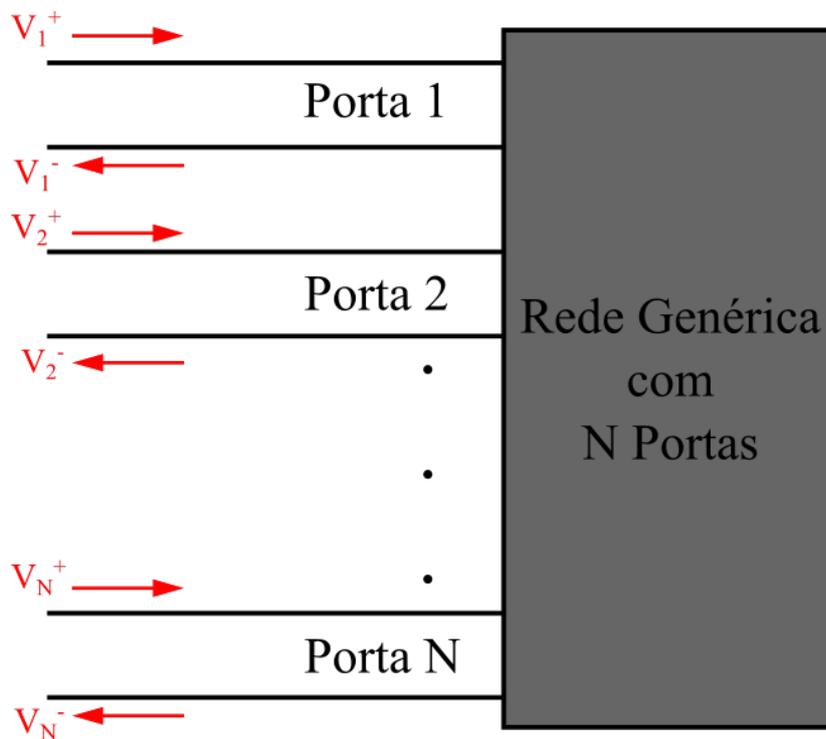
3. CIRCUITOS DE MICRO-ONDAS

A análise em circuitos (ou redes) de alta frequência, também chamados de circuitos de micro-ondas, apresenta algumas diferenças em relação à teoria de circuitos elétricos em virtude do pequeno comprimento de onda das ondas milimétricas. Segundo (POZAR, 2011), esse comprimento de onda reduzido faz com que não haja tensões e correntes fixas nos pontos do circuito, demandando adaptações que serão abordadas a seguir.

3.1 Matrizes S e ABCD

Segundo (CHATURVEDI, 2018), devido à impossibilidade de medir tensão, corrente e impedância em circuitos de alta frequência, os mesmos são analisados com base nas magnitudes de ondas incidentes e refletidas. A Figura 19 mostra uma rede genérica com N portas.

Figura 19 - Rede Genérica com N Portas



Fonte: Adaptado de Pozar, 2011.

A Figura 19 mostra uma rede genérica com N portas. Para a t -ésima porta, tem-se os valores de V_t^+ e V_t^- representando, respectivamente, as ondas de tensão incidente e refletida na

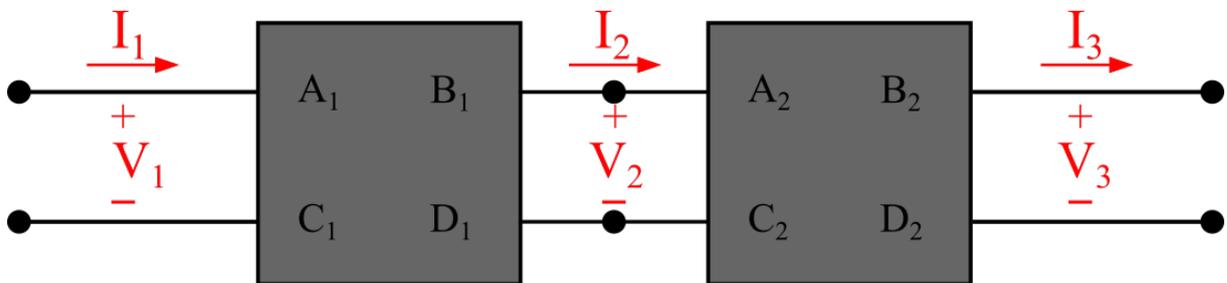
porta t . Esses valores de tensão são relacionados através de uma matriz chamada de matriz espalhamento, ou matriz S , cujo emprego é mostrado abaixo:

$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ \vdots \\ V_N^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{N1} & \cdots & S_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^+ \\ \vdots \\ V_N^+ \end{bmatrix} \quad (32)$$

Acerca desse tópico, vale acrescentar algumas ponderações: o elemento S_{ii} é o coeficiente de reflexão da porta i (CHATURVEDI, 2018), já o elemento S_{ij} é o coeficiente de transmissão da porta j para a porta i (POZAR, 2011). Por fim, salienta-se que uma antena é interpretada como se tivesse apenas uma porta, a porta 1, logo, a perda por retorno é dada pelo elemento S_{11} da matriz espalhamento da antena, justificando assim a denominação apresentada anteriormente.

Além da matriz S , (POZAR, 2011) apresenta a matriz ABCD, também chamada de matriz transmissão. Segundo o autor, essa matriz é utilizada porque muitas aplicações de redes de micro-ondas podem ser vistas como pequenos circuitos de duas portas conectados em cascata. A Figura 20 ilustra esse processo.

Figura 20 - Circuitos de Duas Portas em Cascata.



Fonte: Adaptado de Pozar, 2011.

As tensões e corrente em cada estágio podem ser dadas através das equações abaixo.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$\begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_3 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (34)$$

Onde as tensões totais na porta i é dada por V_i e a corrente que na porta i , com o sentido indicado na Figura 20, é denotada de I_i .

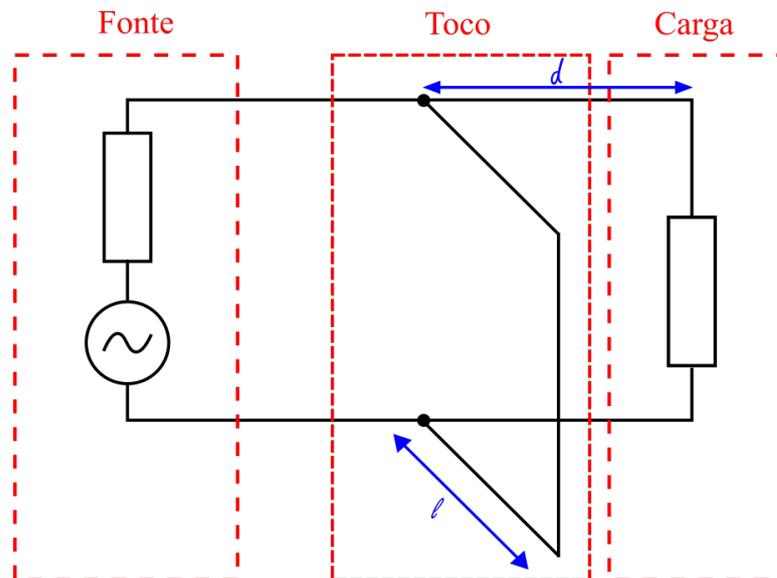
Segundo (POZAR, 2011), a matriz ABCD de uma cascata é o produto das matrizes ABCD que representam cada estágio da cascata, na ordem em que aparecem. Para o exemplo da Figura 20, a relação entre os valores de entrada e saída da cascata pode ser dada por:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_3 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (35)$$

3.2. Filtros CA e Casamento de Impedância

Segundo (CHATURVEDI, 2018), é possível colocar pedaços de linha transmissão, em curto circuito ou circuito aberto, com comprimento l , a uma distância d da carga para realizar o casamento de impedâncias. A Figura 21 ilustra a situação para um pedaço de linha, ou toco, em curto circuito.

Figura 21 - Toco em Curto Circuito.

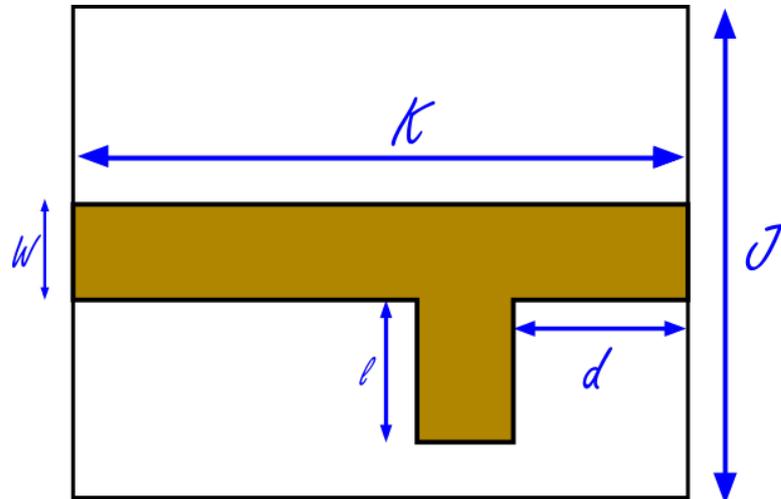


Fonte: Adaptado de Chaturvedi, 2018.

Além disso, (POZAR, 2011) afirma que o processo de filtragem e casamento de impedância pode ser feito de forma conjunta. Segundo o autor, casar as impedâncias para reduzir a perda por retorno para uma faixa de frequência, na prática, já filtra o sinal também. Dessa forma, uma estrutura com tocos, conforme exibido na Figura 22, pode atuar tanto como filtro como uma etapa de casamento de impedância. Por fim, salienta-se que o equacionamento

não será abordado em virtude de o dimensionamento dessa estrutura ser feito através de otimizações dos valores das variáveis.

Figura 22 - Estrutura para Casamento de Impedâncias e Filtragem.



Fonte: Adaptado de Pozar, 2011.

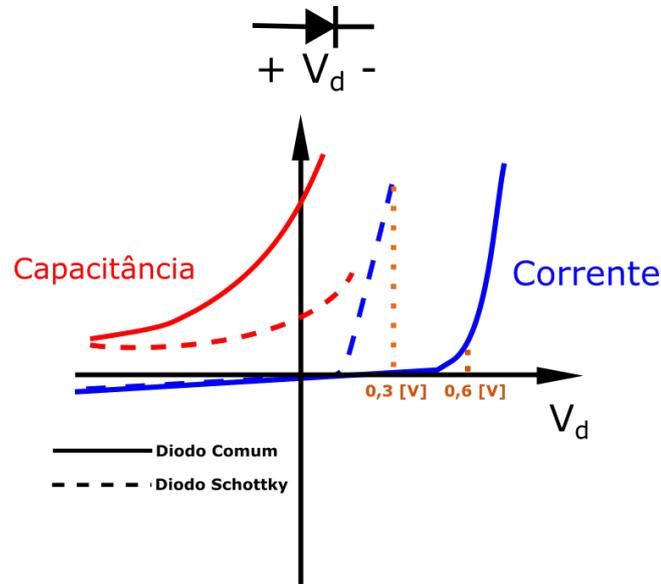
3.3. Diodo Schottky

O diodo de barreira *Schottky* (SBD), ou simplesmente diodo *Schottky*, é feito através de junção de um metal com um semicondutor do tipo N, onde a junção resultante funciona como um diodo (conduz corrente em um sentido e atua como circuito aberto no sentido oposto) (SEDRA e SMITH, 2009). Ainda segundo (SEDRA e SMITH, 2009), o diodo Schottky é diferente do diodo comum em virtude das seguintes características:

- A queda de tensão em sentido direto de um diodo *Schottky* é menor quando comparada à queda de um diodo de junção PN (diodo comum);
- No SBD, os portadores de carga majoritários (elétrons) são os que conduzem a corrente, logo, esse componente não exhibe os efeitos dos portadores minoritários (lacunas) quando está conduzindo no sentido direto. De forma mais prática, isso implica dizer que o diodo Schottky muda do estado ligado para o estado desligado, ou vice-versa, de forma muito mais rápida que o diodo comum. Nesse tópico, (MASUD, 2013) acrescenta que o tempo de existência dos portadores minoritários é menor que 100 ps.

A Figura 23 mostra as curvas características tanto de diodo comum como do diodo Schottky, de modo a ficar mais evidente as diferenças de performance.

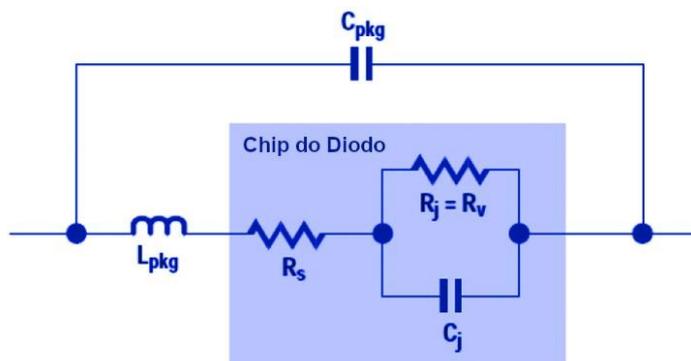
Figura 23 - Curvas Características do Diodo Comum e Diodo *Schottky*.



Fonte: Adaptado de Masud, 2013.

Um circuito equivalente para o diodo *Schottky* é proposto por (MASUD, 2013) na Figura 24, onde C_J é a capacitância parasita da junção e R_s é a resistência série do próprio chip do diodo. L_{pkg} e C_{pkg} representam, respectivamente, a indutância e capacitância parasitas do pacote. Por fim, R_j é a resistência da junção, a qual representa a tensão CC de saída do diodo.

Figura 24 - Circuito Equivalente do Diodo *Schottky*.



Fonte: Adaptado de Masud, 2013.

Com base no circuito equivalente, apresentado, é possível apresentar a impedância do diodo, a qual, segundo (MASUD, 2013), é:

$$Z_D = Z_{d3} + j\omega L_{pkg} \quad (36)$$

Sendo:

$$Y_{d1} = \frac{1}{R_j} + j\omega C_j; Z_{d1} = \frac{1}{Y_{d1}} \quad (37)$$

$$Z_{d2} = Z_{d1} + R_s; Y_{d2} = \frac{1}{Z_{d2}} \quad (38)$$

$$Y_{d3} = Y_{d2} + j\omega C_{pkg}; Z_{d3} = \frac{1}{Y_{d3}} \quad (39)$$

De modo que $\omega = 2\pi f$, onde f é a frequência, em Hz, da senóide que passa pelo diodo.

Outro ponto a ser analisado no retificador é a perda por retorno. Se carga tiver uma impedância Z_L , então, a perda por retorno é dada por (MASUD, 2013):

$$RL = \frac{Z_d - Z_L}{Z_d + Z_L} \quad (40)$$

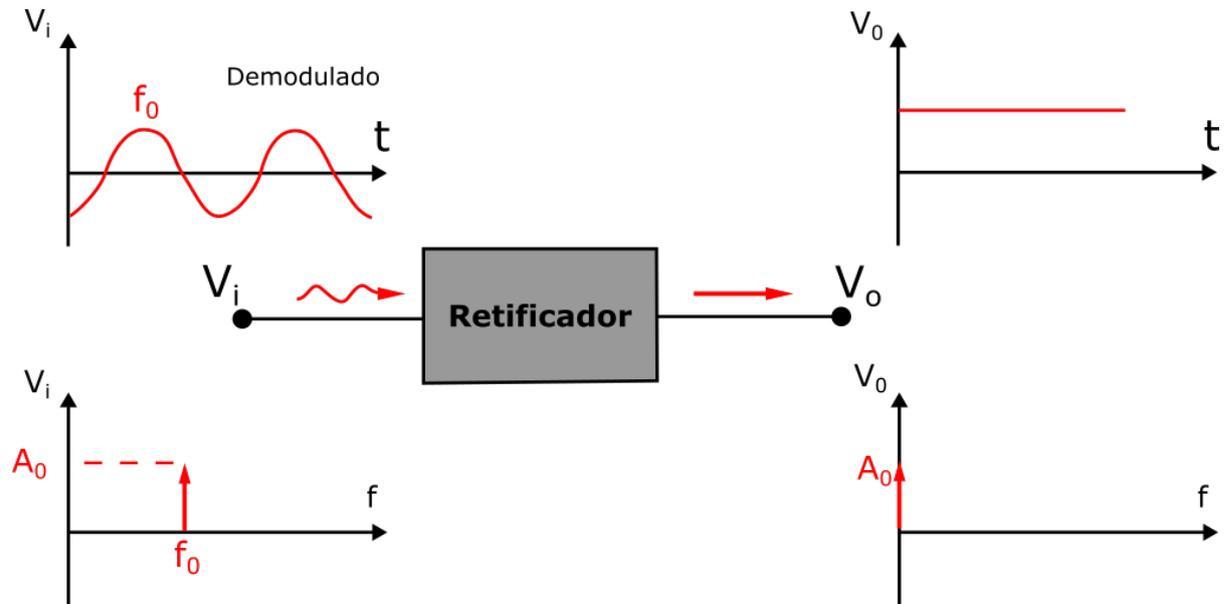
3.4. Retificadores

Uma das aplicações mais importantes dos diodos são os circuitos retificadores. Nesses circuitos, os diodos convertem uma entrada senoidal em uma saída unipolar pulsante. Essas, as quais não são adequadas para componentes CC, são reduzidas através de um filtro conectado à saída do retificador (SEDRA e SMITH, 2009).

Em se tratando de alta frequência, é importante observar algumas coisas adicionais: a perda por retorno do retificador e sensibilidade de tensão do diodo (MASUD, 2013). A Figura 25 mostra o processo de retificação em alta frequência, evidenciando os sinais no domínio do tempo e da frequência. Nela, é importante observar que a senóide na entrada do retificador é pura, isto é, demodulada e filtrada, ou seja, o sinal possui apenas uma frequência com amplitude relevante em seu espectro. Segundo (MASUD, 2013), uma maior quantidade de harmônicas reduz a eficiência do retificador.

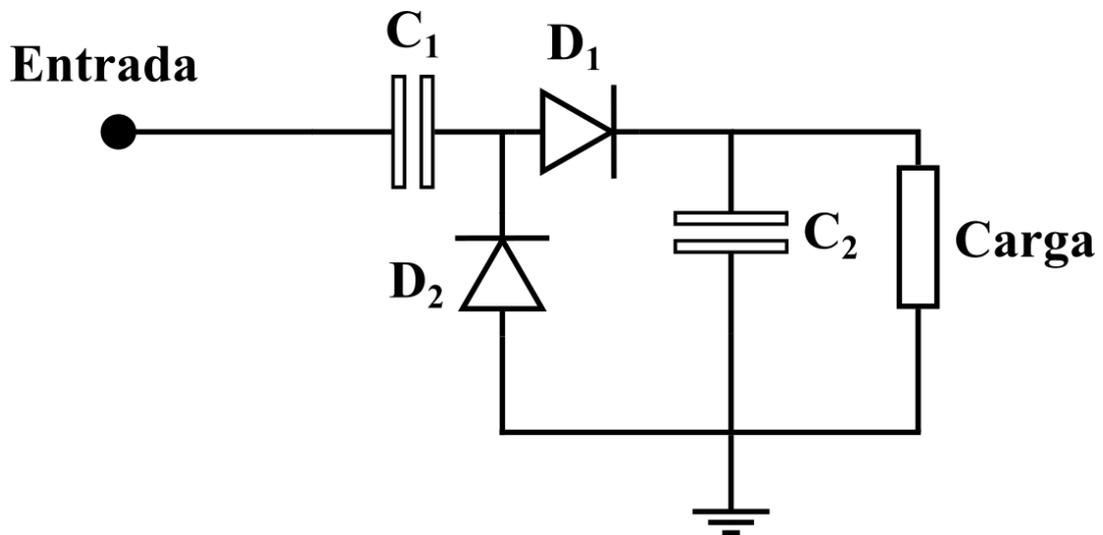
No tocante a topologia do retificador, será usado o circuito proposto por (ZHANG, *et al.*, 2015), o qual é exibido na Figura 26. De acordo com o explicado em (ZHANG, *et al.*, 2017), essa topologia apresenta, além da etapa de retificação, uma etapa de elevação de tensão, pois, o primeiro capacitor carrega durante o ciclo negativo e descarrega no positivo, aproximadamente duplicando a tensão na saída.

Figura 25 - Sinais nos Domínios do Tempo e Frequência para um Retificador.



Fonte: Adaptado de Masud, 2013.

Figura 26 - Topologia do Retificador

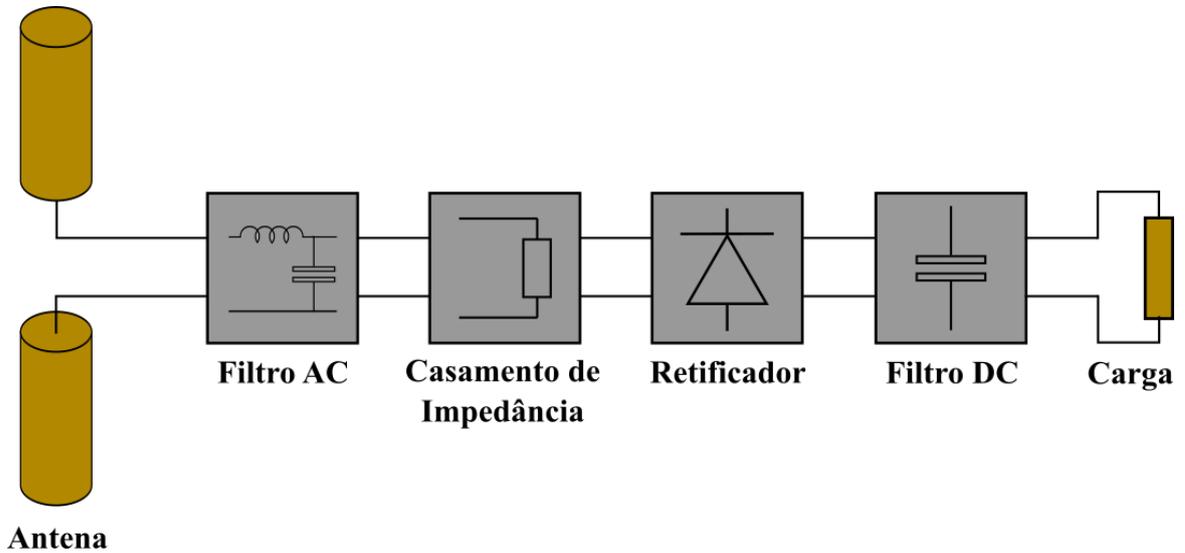


Fonte: Adaptado de Zhang; *et al*, 2015.

3.5 Rectennas

As *rectennas* são comumente chamadas de antenas retificadoras e, basicamente, combinam o funcionamento de uma antena com o de um filtro passa-baixa e um retificador para altas frequências (MASUD, 2013). A Figura 27 ilustra o esquema de uma *rectenna*.

Figura 27 - Esquema de uma *Rectenna*.



Fonte: Adaptado de Pang *et al.*, 2018.

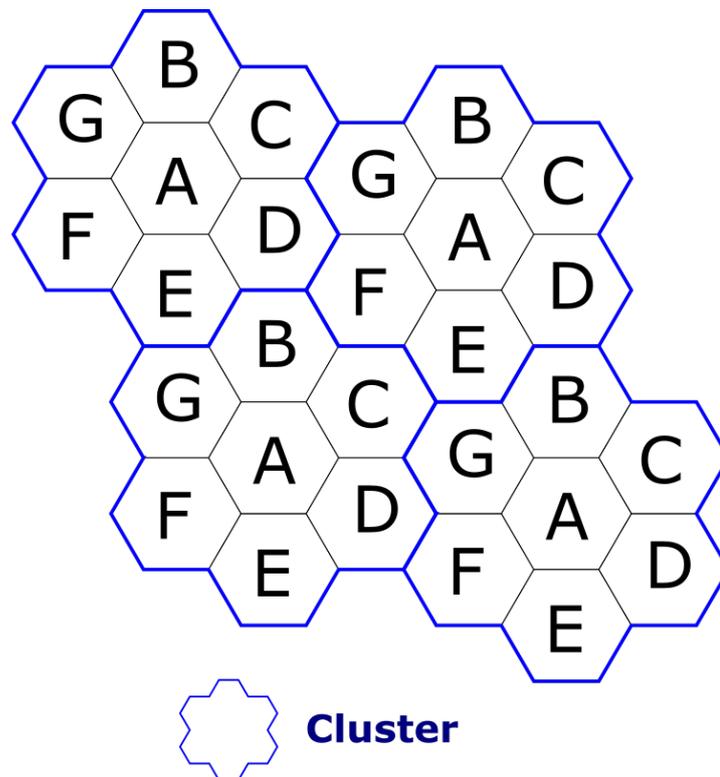
Após a antena, é inserido um filtro AC, que pode ser passa-baixa ou passa-faixa, para remover quaisquer harmônicas indesejadas (PANG, *et al.*, 2018). Em seguida, há o casamento de impedância a fim de minimizar a reflexão (ZHANG, *et al.*, 2015). O terceiro estágio é o próprio retificador e, por fim, há um filtro DC acoplado a carga modelada como um resistor. Segundo (ZHANG, *et al.*, 2015), o filtro DC se comporta como um curto-circuito para o terra nas componentes AC e um circuito aberto na componente DC. Vale salientar ainda que, de acordo com (PANG, *et al.*, 2018), a escolha do diodo e da rede de casamento de impedância são as partes mais importantes para o projeto do retificador de uma *rectenna*.

4 CONCEITOS DE TELEFONIA MÓVEL CELULAR

4.1 Células

A Figura 28 ilustra o esquema de telefonia celular, o qual terá seus principais fundamentos expostos a seguir.

Figura 28 - Células Hexagonais.



Fonte: Adaptado de Rappaport, 2009.

Cada um desses hexágonos representa uma célula e recebe uma parte do total de canais usados no sistema de comunicação celular. As células vizinhas, designadas por letras diferentes, recebem uma fração distinta desse total de canais, a fim de reduzir interferências. Observe também que grupos de células possuem letras repetidas, evidenciando o fato que, contanto que estejam separadas por uma distância mínima, células podem reutilizar frequências. Em verdade, espaçando sistematicamente as células, os canais disponíveis são distribuídos pela região geográfica e podem ser reutilizados quantas vezes forem necessárias, bastando apenas manter as interferências em níveis aceitáveis (RAPPAPORT, 2009).

As N células que utilizam um conjunto completo de canais são chamadas de cluster. Voltando à Figura 28, cada grupo de sete hexágonos é um *cluster*, os quais são replicados quando há necessidade de aumentar a cobertura do sinal (RAPPAPORT, 2009).

Esse modelo de comunicação possui algumas vantagens, conforme (RAPPAPORT, 2009). A primeira delas é a substituição de transmissores de alta potência por equipamentos de baixa potência; a segunda é o fato de ser possível comportar maior demanda aumentando o número de células (e, conseqüentemente, diminuindo a potência do transmissor). Essa abordagem de crescimento permite ampliar o sistema dentro do mesmo espectro.

Mais um ponto que precisa ser salientado é a transferência de uma célula para outra no caso de um celular em locomoção. Conforme (RAPPAPORT, 2009), as células possuem pelo menos um canal de controle, portanto, segundo (FORTUNA, KARLA SILVA e MENDES, 2009), quando um dispositivo móvel começa a sair da zona de sua célula, o canal de controle envia instruções ao aparelho para que o mesmo se conecte em outra célula com sinal mais forte. Vale dizer ainda que, de acordo com (RAPPAPORT, 2009), o dispositivo conectado na nova célula irá atuar dentro dos canais dela e o sistema deve garantir que, caso o dispositivo celular esteja com uma comunicação em andamento, a mesma também deve ser alocada dentro dos canais da nova célula. Esse processo de troca de célula durante uma comunicação é nomeado de *handoff* (FORTUNA, KARLA SILVA e MENDES, 2009).

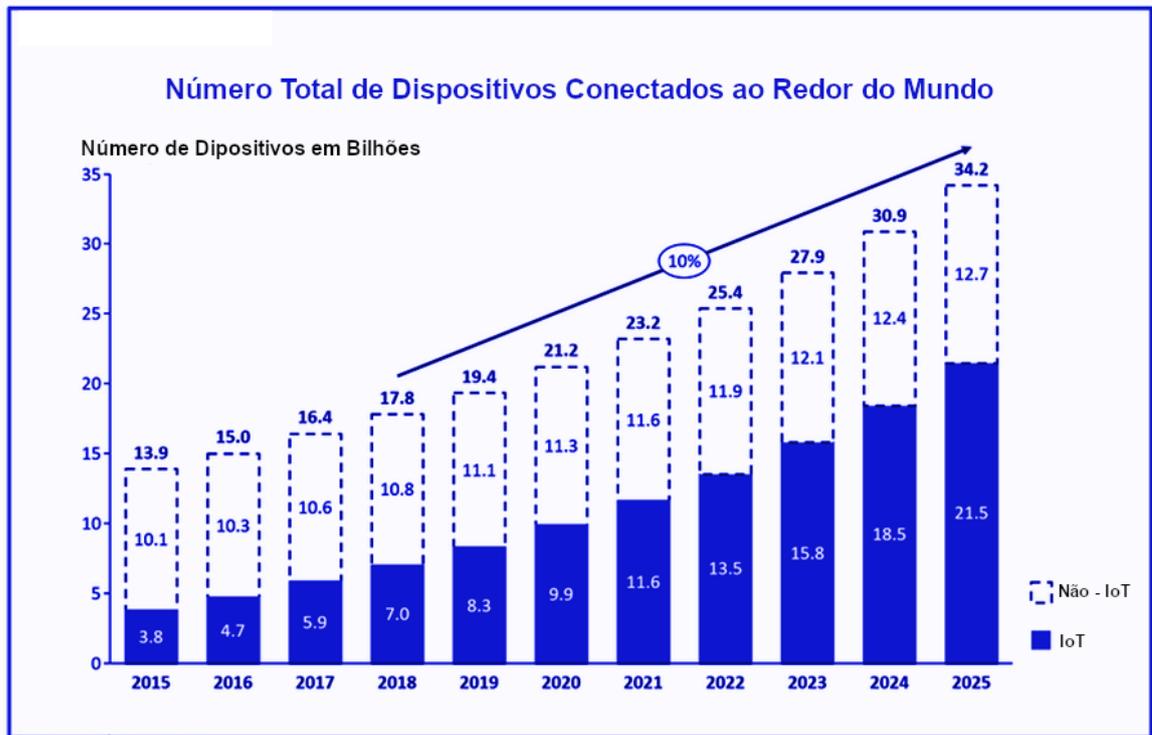
4.2 Redes 5G

Com a crescente quantidade de dispositivos conectados à internet, o volume de tráfego e transações cresce exponencialmente (NOKIA SIEMENS NETWORK, 2011). Esse crescimento não é causado apenas por um aumento numérico de dispositivos celulares, mas ocorre também em virtude do surgimento de vários novos serviços que também passarão a usar redes móveis. Esses novos serviços são, segundo (RÜTSCHLIN, 2018): *IoT*, *streaming*, realidade virtual, veículos autônomos, jogos e *cloud computing*. De acordo com (LIMBERGER, 2017), podem ser adicionados a essa lista serviços como educação e atendimentos médicos online e outras tecnologias para melhorar o desempenho nas questões de segurança, localização e comunicações críticas.

Para ilustrar o potencial crescimento da demanda por serviços de telefonia celular, a Figura 29 mostra uma projeção da quantidade de dispositivos no planeta para 2025, alcançando

34,5 bilhões contra 17,8 bilhões que tinha em 2018. É possível observar ainda que o maior crescimento é nos dispositivos de *IoT*, o qual já está em 7 bilhões.

Figura 29 - Projeção para 2025 da Quantidade de Dispositivos Conectados à Redes Móveis.



Adaptado de: <<https://iot-analytics.com/state-of-the-iot-update-q1-q2-2018-number-of-iot-devices-now-7b/>>.

Do ponto de vista das características de comunicação, espera-se que as redes 5G apresentem taxas de transmissão maiores que 1 Gbps e latências menores que 1 ms (RÜTSCHLIN, 2018). A Figura 30 contextualiza as potenciais aplicações. Nos parágrafos a seguir serão discutidos os desafios envolvendo a implementação de redes 5G para que se possa alcançar as características supracitadas.

De acordo com (AL-FALAHY e ALANI, 2017), em virtude da alta demanda, as redes 5G trabalharão com células bem menores que as atuais, o que é uma vantagem do ponto de vista de potência. Porém, segundo os autores, é natural esperar um aumento no número da taxa de *handoff*. Outro ponto a ser ressaltado é que células menores, se colocadas de maneira inapropriada, vão interferir nas vizinhas.

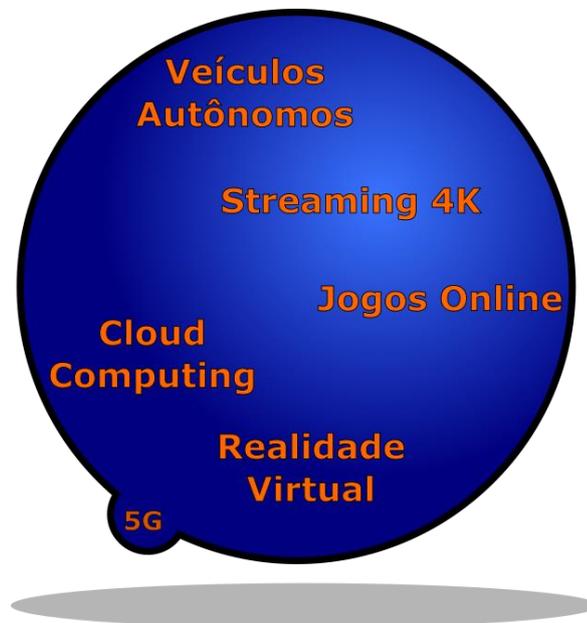
Outro desafio enfrentado está nas bandas usadas para redes 5G. De acordo com (RÜTSCHLIN, 2018), as redes 5G usarão bandas abaixo de 6 GHz e uma em 28 GHz. Em particular, segundo (LIMBERGER, 2017), a banda representada por 28 GHz pode compreender

de 26 a 30 GHz. O empecilho nessa questão, em consonância com (AL-FALAHY e ALANI, 2017), está no fato de altas frequências apresentarem perdas maiores ao se propagarem. Ainda de acordo com estes, a atenuação, em dB, no espaço livre pode ser calculada da seguinte forma:

$$L_{FS} = 32,4 + 20 * \log_{10} f + 20 * \log_{10} R \quad (41)$$

Onde f é a frequência de operação, em GHz, e R é a distância a ser percorrida, em m. Dentro dessa questão, já é de comum acordo usar células com coberturas menores que 100 m (LIMBERGER, 2017).

Figura 30 – Potenciais Aplicações da Tecnologia 5G.



Fonte: Adaptado de Rüttschlin, 2018.

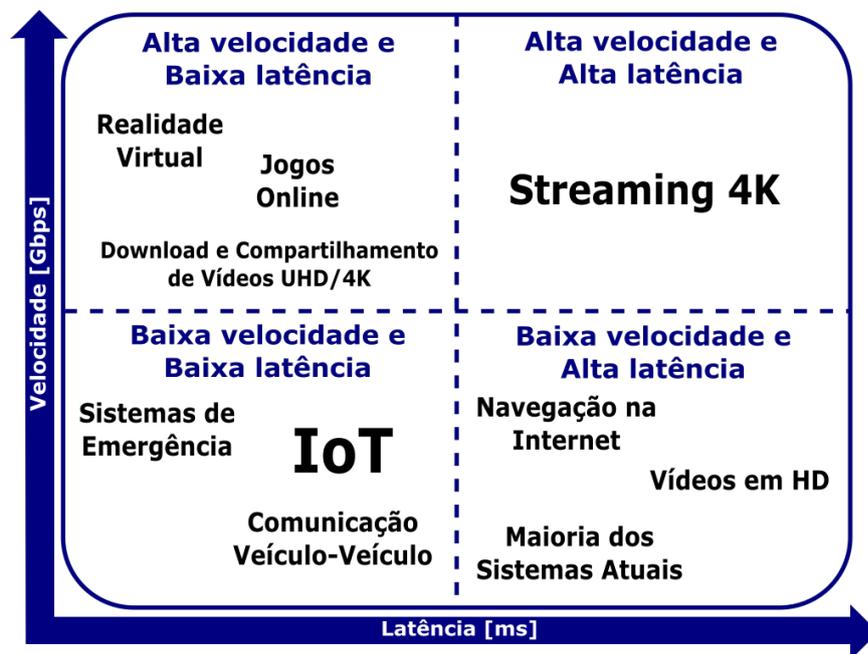
Ainda no contexto da banda de frequência, altas frequências implicam em alta absorção por eventuais obstáculos, logo, as redes 5G também sofrerão em maior proporção com as construções nas zonas urbanas (AL-FALAHY e ALANI, 2017).

Outra ponderação feita por (AL-FALAHY e ALANI, 2017) é acerca do M-MIMO e *Beamforming*. M-MIMO (*Massive Multiple-Input and Multiple-Output*) refere-se a células que possuem várias antenas, possibilitando que uma única célula lide com vários usuários simultaneamente. O conceito de *Beamforming* é usar antenas de alto ganho, ou seja, com padrões altamente diretivos. Segundo os autores, esses dois fatores exigem algoritmos ainda

mais complexos de multiplexação. Além disso, o M-MIMO requer estruturas físicas mais robustas.

Para finalizar a análise do ponto de vista das tecnologias envolvidas na comunicação, é preciso comentar que, embora as redes 5G prometam altas velocidades e baixas latências, não são todas as aplicações que vão necessitar disso, logo, (AL-FALAHY e ALANI, 2017) apresentam uma separação de aplicações onde valores inferiores de performance são tolerados, possibilitando assim concentrar recursos em áreas críticas. Essa separação pode ser vista na Figura 31.

Figura 31 - Classificação de Aplicações Conforme Necessidade de Recursos.

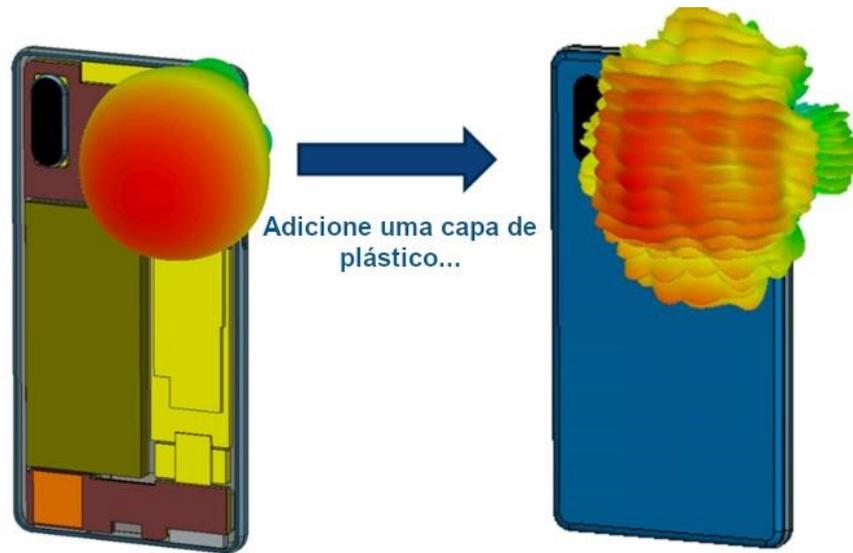


Fonte: Adaptado de Al-Falahy; Alani, 2017.

Além dos desafios mencionados, ainda existem novas demandas no contexto da fabricação de antenas para 5G. Embora use duas bandas, as frequências alocadas abaixo de 6 GHz ainda exigem as análises padrão de antenas (RÜTSCHLIN, 2018), logo, os tópicos mencionados a seguir se aplicam a 28 GHz.

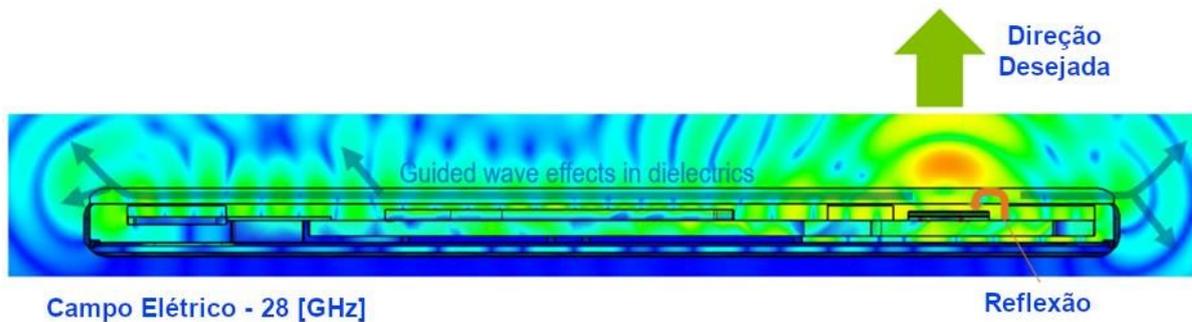
O primeiro ponto de análise é a reflexão na superfície que envolve a antena. Como exemplo, considere um dispositivo celular com uma capa traseira de plástico. A Figura 32 ilustra a distorção do diagrama de radiação por causa do material. Já a Figura 33 aborda a intensidade do campo elétrico dentro do celular em virtude da reflexão.

Figura 32 - Interferência da Capa de Plástico.



Fonte: Adaptado de Rütshlin, 2018.

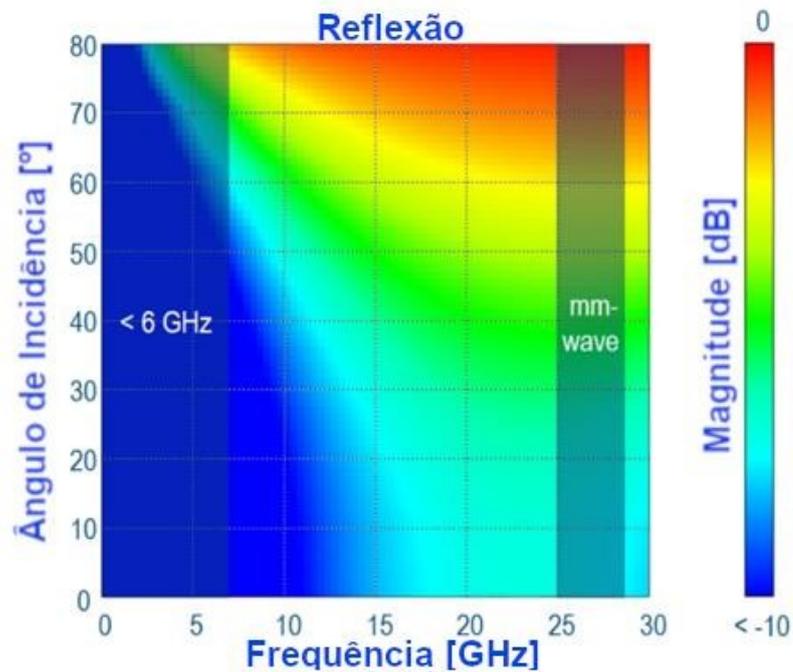
Figura 33 - Campo Elétrico Dentro do Celular.



Fonte: Adaptado de Rütshlin, 2018.

Ainda é mostrado por (RÜTSCHLIN, 2018) que, qualquer que seja o ângulo de incidência, a reflexão é maior para 28 GHz do que para 6 GHz. A Figura 34 ilustra essa comparação, ainda para o plástico. Portanto, para altas frequências, é importante conhecer os materiais em torno da antena, pois eles podem alterar os padrões de radiação da mesma de forma significativa.

Figura 34 - Reflexão em Função do Ângulo de Incidência.



Fonte: Rüttschlin, 2018.

Na Figura 34 é possível ver que, para frequências abaixo de 6 GHz, a reflexão é menor que -10 dB para qualquer ângulo de incidência. Porém, à medida que a frequência aumenta, a reflexão cresce em magnitude. Em particular, a partir da aproximadamente 10 GHz, quanto mais próximo de 90 ° for o ângulo de incidência, maior será a reflexão, podendo, inclusive, ter reflexão total, como é o caso da zona vermelha exibida. Dessa forma, a Figura 34 evidencia o quanto importante é considerar o material que envolve a antena quando se trata de transmissões em alta frequência.

Para finalizar as ponderações acerca de 5G em 28 GHz, (RÜTSCHLIN, 2018) afirma que, embora não seja necessário haver preocupação com a exposição humana à radiação em virtude do baixo comprimento de onda e baixa potência das redes 5G, os esforços devem ser canalizados em analisar os campos em torno do dispositivo, pois, nessa frequência, conforme já comentado por (AL-FALAHY e ALANI, 2017), as ondas são muito sensíveis a interações com o meio externo.

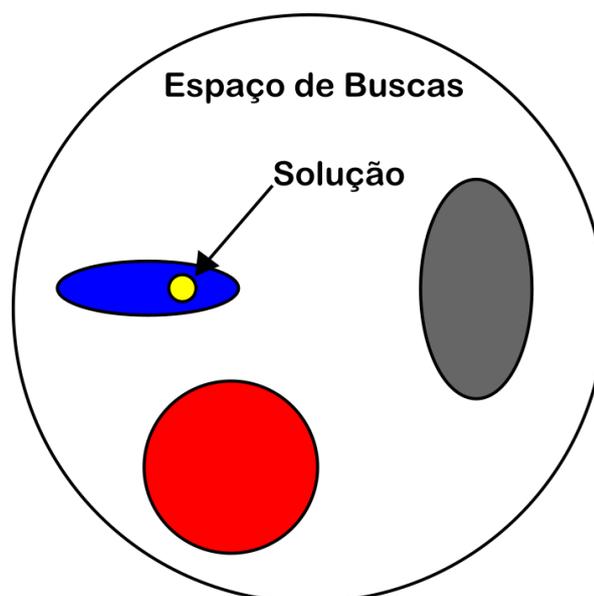
5 FUNDAMENTOS DE ALGORITMOS GENÉTICOS

Como foi dito na introdução, o algoritmo genético foi usado para dimensionar as células metamateriais. Para entender o contexto de aplicação dos algoritmos genéticos, é necessário antes abordar dois conceitos essenciais que sustentam a aplicabilidade das técnicas de otimização em problemas de buscas por uma resposta: tempo de execução e problemas de complexidade não polinomial. Antes de começar, é importante dizer que, para explicar alguns conceitos, será usado como exemplo contextualizado o problema de dimensionar uma célula SRR para uma dada frequência.

Segundo (LINDEN, 2012), aferir o tempo de execução de um algoritmo é estabelecer uma função que melhor relaciona o tempo gasto para encontrar uma resposta com a quantidade de entradas. Essa função de tempo de execução é classificada de acordo com o tipo de função, podendo ser de complexidade polinomial, fatorial, exponencial, logarítmica etc. O cerne das técnicas de otimização está nas funções não polinomiais, pois as mesmas crescem seu tempo de execução de forma acentuada, podendo, inclusive, inviabilizar a execução do algoritmo (LINDEN, 2012).

Dessa forma, (LINDEN, 2012) diz que as técnicas de otimização surgiram para reduzir o espaço de buscas desses algoritmos de complexidade não polinomial. A figura abaixo mostra esse conceito.

Figura 35 - Espaço de Buscas das Técnicas de Otimização.



Fonte: Do Autor.

Quando um algoritmo de buscas deve percorrer todo o espaço de buscas, delimitado pelo círculo de fundo branco, trata-se de um algoritmo de busca por força bruta (LINDEN, 2012). No caso de algoritmos com complexidade não polinomial, o tempo para percorrer esse espaço de buscas através da força bruta pode inviabilizar a execução, logo, as técnicas de otimização surgem para diminuir esse espaço de buscas, fazendo o algoritmo procurar nos subconjuntos coloridos a solução marcada em amarelo. (LINDEN, 2012).

Dentro dos algoritmos não polinomiais existe uma classe especial, denominada algoritmos de complexidade não polinomial completos, doravante NP-Completo. Os algoritmos genéticos, ou simplesmente AGs, foram desenvolvidos para atuar nessa classe. Segundo (LINDEN, 2012), pode-se definir os NP-Completo com a seguinte proposição: são problemas em que o espaço de buscas, quando percorrido na força bruta, possui complexidade não polinomial, porém, para uma dada proposta de solução, a validação da mesma é checada em complexidade polinomial. Esse conceito é mais bem ilustrado com o exemplo contextualizado a seguir.

Para encontrar as dimensões de uma célula metamaterial para uma dada frequência existem várias variáveis associadas, tanto as de dimensionamento em si quanto as de posicionamento de alguma estrutura dentro da célula, como o gap dos anéis de um SRR. Pode-se ainda acrescentar outras variáveis como o tipo e espessura do substrato e formatos do plano terra. Note também que, ao adicionar novas variáveis, o espaço de busca aumenta em proporção ao número de combinações dessas variáveis, transformando o algoritmo de busca em não polinomial. Por outro lado, para uma célula específica (também chamada de proposta de solução), o tempo para verificar se essa combinação resolve o problema ou não é determinado pelo algoritmo de simulação. Em particular, o tempo para testar duas células é aproximadamente o dobro do tempo de simular uma célula, logo, embora percorrer o espaço de buscas seja complexidade não polinomial, validar uma proposta de solução é de complexidade polinomial, se enquadrando no conceito de problema NP-Completo.

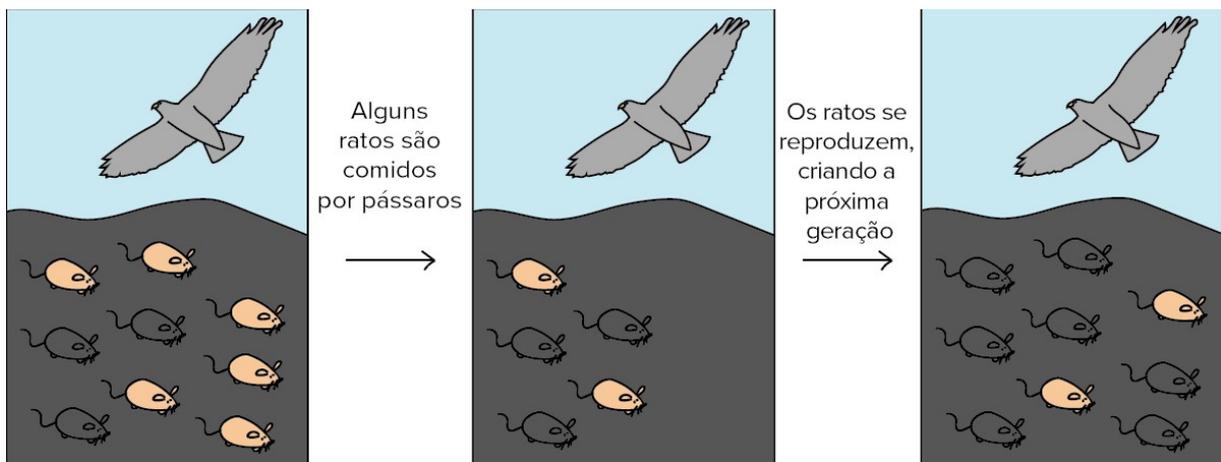
Entendido o contexto de aplicabilidade dos AGs, os próximos tópicos abordarão tanto as bases teóricas por trás da técnica quanto a metodologia aplicada na otimização das células no presente trabalho.

5.1. Teoria da Evolução

Os algoritmos genéticos são baseados na Teoria da Evolução, proposta em 1859, por Charles Darwin em seu livro *A Origem das Espécies* (LINDEN, 2012). De acordo com essa teoria, as espécies podem se modificar ao longo do tempo através de variações em seu genoma e seleção natural.

Segundo (NORIEGA), a prole, a qual possui certa variabilidade genética, precisa competir por espaço e recursos com os demais seres vivos. Além disso, essa prole também precisa sobreviver contra predadores. Ainda segundo a autora, essa variabilidade genética pode vir a facilitar a sobrevivência de alguns indivíduos, permitindo-os propagar seu genoma rumo a uma melhor adaptação da espécie. A Figura 36 exemplifica esse processo, o qual é chamado de seleção natural (LINDEN, 2012).

Figura 36 - Mecanismo de Seleção Natural.



Fonte: Adaptado de <<https://pt.khanacademy.org/science/biology/her/evolution-and-natural-selection/a/darwin-evolution-natural-selection>>.

Em uma dada prole de ratos, alguns indivíduos nasceram com pelagem clara, facilitando sua identificação por parte dos pássaros, os quais são os predadores nesse exemplo. Como os ratos claros são mais fáceis de encontrar, há mais chances de eles serem comidos, logo, haverá menos ratos claros para se reproduzir. Em contrapartida, os ratos com pelagem escura têm maiores chances de sobreviver, logo, a tendência é que essa espécie de ratos adquira pelagem escura no futuro. Para finalizar, no caso hipotético de todos os ratos ficarem escuros, a seleção natural agora atuará para selecionar o pássaro com melhor capacidade de encontrar ratos para se alimentar e conseguir se reproduzir.

Vale mencionar ainda que a Teoria da Evolução original não mencionava as causas da variação genética. Essa contribuição, segundo (NORIEGA), veio com as Leis de Mendel, as quais foram incorporadas na Teoria da Evolução, dando origem à sua versão atual intitulada Teoria Sintética da Evolução.

A informação do parágrafo anterior foi apresentada porque, segundo (LINDEN, 2012) e (HEATON, 2014), os algoritmos genéticos também usam conceitos expostos nas Leis de Mendel, como crossover e mutação. O crossover é a forma como genes dos pais são combinados e repassados para a prole e a mutação é o fator natural responsável pela alteração genética (NORIEGA).

É esse processo de variabilidade genética e seleção natural que faz com que as espécies evoluam (NORIEGA).

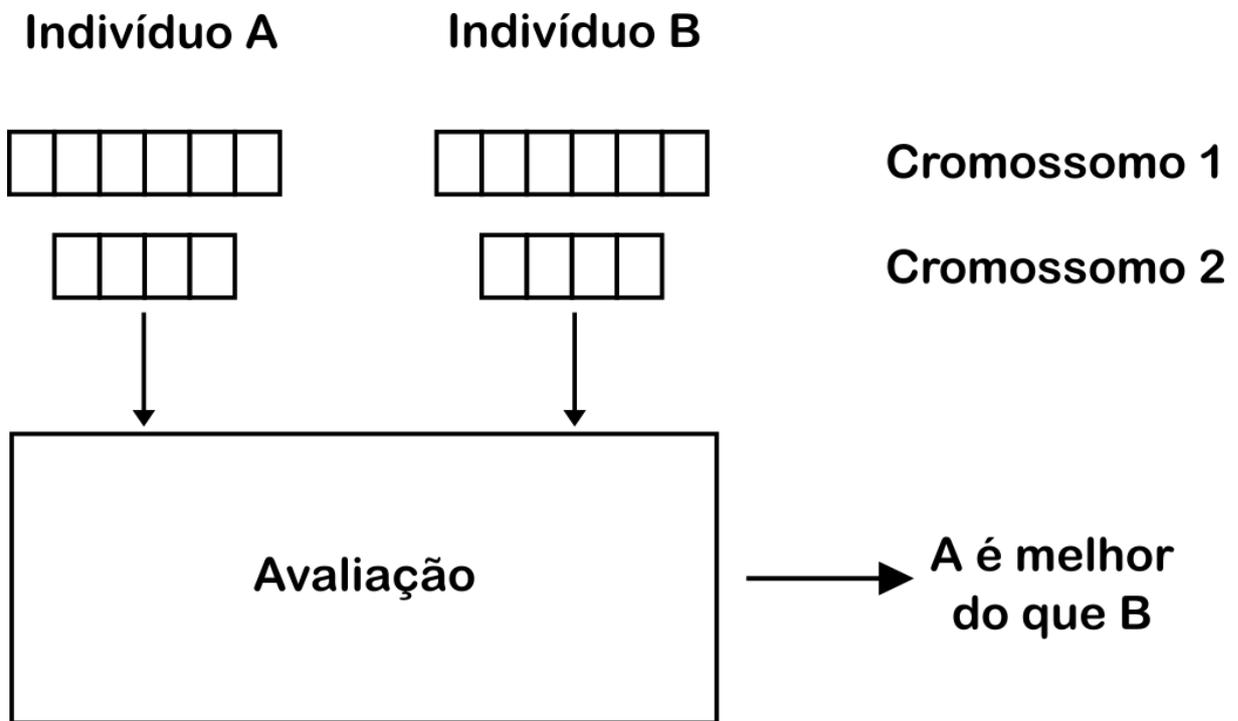
5.2. Algoritmos Genéticos

Os algoritmos genéticos compõem um grupo de heurísticas inspiradas na Teoria Sintética da Evolução (LINDEN, 2012). Segundo o autor, heurística é uma técnica de programação para resolver problemas, ou seja, não é um algoritmo específico, mas sim uma forma de programar um algoritmo para um dado propósito.

Segundo (HEATON, 2014), os AGs são baseados nos conceitos de população e avaliação. Por sua vez, (LINDEN, 2012) complementa que esse tipo de algoritmo ainda está sujeito aos chamados operadores genéticos: seleção, mutação e crossover (ou reprodução). De acordo com (LINDEN, 2012) e usando os jargões da programação orientada a objetos, uma população é formada por um conjunto de indivíduos, sendo que esses são objetos que possuem como atributos seus cromossomos e sua avaliação.

Os cromossomos, por sua vez, podem ser objetos de outras classes ou alguma estrutura de dados. O importante é, em consonância com (LINDEN, 2012), que cada cromossomo carregue valores para as variáveis de problema, de modo que cada indivíduo represente uma proposta de solução. Vale acrescentar ainda que, conforme (HEATON, 2014), a avaliação é uma métrica para determinar a adaptabilidade do indivíduo. Em outras palavras e retornando ao exemplo dos ratos com pelos claros e escuros, a avaliação seria um valor que representasse a dificuldade de um rato ser comido, logo, os ratos com pelagem escura receberiam uma avaliação melhor do que os ratos com pelagem clara. A Figura 37 mostra esses conceitos.

Figura 37 - Cromossomos e Sistema de Avaliação.



Fonte: Do Autor.

A Figura 37 mostra dois indivíduos, cada um com dois cromossomos. Os cromossomos são representados pelos retângulos maiores, enquanto os retângulos menores em cada cromossomo representam uma variável que codifica parte da proposta de solução, ou, em termos da biologia, cada retângulo dentro do cromossomo é um gene. O sistema de avaliação é usado para determinar, entre os dois indivíduos, qual é o melhor. O que esse sistema faz é ler cada cromossomo (com seus respectivos genes) e determinar qual indivíduo apresenta uma proposta de solução que mais se aproxima de resolver o problema. Nesse trabalho, os genes que codificam o mesmo tipo de grandeza são agrupados no mesmo cromossomo, ou seja, na imagem acima, o cromossomo 1 pode representar variáveis de dimensionamento do SRR e o cromossomos 2 pode representar as variáveis de posicionamento.

Os operadores genéticos, por sua vez, atuam nos indivíduos da população e são eles que agem de forma análoga à seleção natural (LINDEN, 2012). Como a explicação tanto do sistema de avaliação como de cada operador demanda maior detalhamento, cada um receberá um tópico separado.

5.2.1. Sistema de Avaliação

O sistema de avaliação é geralmente composto por uma nota e/ou um contador de penalizações. A nota é um valor numérico que representa o quão bom é aquele indivíduo e, conseqüentemente, a solução que ele carrega consigo (HEATON, 2014). Ainda segundo o mesmo autor, os AGs podem ser de maximização ou minimização, ou seja, se o algoritmo for de maximização, então indivíduos com notas maiores são melhores; se for de minimização, portanto, indivíduos com notas menores são melhores. Parafraseando (LINDEN, 2012), a escolha entre maximização e minimização depende da natureza do problema a ser resolvido pelo algoritmo genético.

Em verdade, (LINDEN, 2012) enfatiza que o sistema de avaliação é onde serão inseridas as peculiaridades de cada problema. Enquanto os demais conceitos envolvidos nos AGs possuem algoritmos pré-determinados ou pelo menos uma arquitetura já estabelecida, o sistema de avaliação tem como alicerce o conhecimento do programador acerca do contexto de aplicação do algoritmo genético. Dessa forma, as notas atribuídas serão tão fiéis quanto maior for o grau de compreensão do problema (LINDEN, 2012).

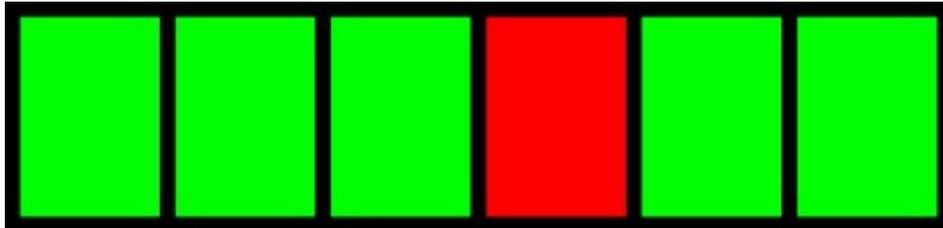
Por fim, é relevante destacar sobre as penalizações, explicado por (LINDEN, 2012). Segundo o autor, existem alguns problemas que determinados valores de variáveis não fazem parte da solução por não obedecerem a certas restrições. Apenas como exemplo, no problema de dimensionar células SRR, não é aceitável que os anéis sejam maiores que o próprio substrato. Para lidar com essas restrições, (LINDEN, 2012) propõe três possibilidades:

- Embutir a restrição dentro do problema: retornando ao exemplo, seria fixar o tamanho do substrato como sendo 1,2 vez maior que maior anel. Dessa forma, o anel jamais será maior que o substrato;
- Checar posteriormente e deletar o indivíduo: nesse caso, a nota do SRR seria calculada ignorando a restrição. Somente após esse processo é que seria verificada se a restrição foi atendida e, em caso negativo, o indivíduo é descartado;
- Checar posteriormente e penalizar o indivíduo: o mesmo que o caso anterior, porém, em vez de descartar o indivíduo, ele é penalizado.

No caso do último ponto, é importante detalhar a hierarquia usada nesse trabalho com outro exemplo: se o SRR A tiver uma nota melhor que o SRR B , porém A tiver sido penalizado e B não, o SRR B será considerado melhor do que o SRR A . Em termos sucintos, a penalização tem maior relevância em determinar o melhor indivíduo do que a nota (LINDEN, 2012).

É importante agora entender as vantagens e desvantagens de cada sistema de penalização. Para isso, considere a Figura 38, onde os genes verdes atendem à todas as restrições e o gene vermelho não atende.

Figura 38 - Cromossomo com Gene que não Obedece às Restrições.



Fonte: Do Autor.

Na primeira abordagem, esse indivíduo sequer seria gerado, pois as restrições estão embutidas no problema. A vantagem desse método está na velocidade de processamento, pois, uma vez que indivíduos inválidos não são gerados, o espaço de buscas é reduzido. Segundo (LINDEN, 2012), abordagens desse tipo apresentam como desvantagem o fato de perder em exploração do espaço de buscas. Retornando para o exemplo do anel do SRR, se ele for fixado de modo que o substrato seja 1,2 vez maior que ele, o AG não explorará as propostas de solução onde substrato é 1,1 vez maior, 1,3, 1,35 e assim por diante.

No segundo método, esse indivíduo chega a ser gerado, porém, o mesmo é descartado e, portanto, não há custo computacional com o processamento dele (LINDEN, 2012). Em contrapartida, há perda de variabilidade genética, pois, os genes verdes que sobraram poderiam seguir adiante e compor uma proposta de solução satisfatória. Conforme (LINDEN, 2012), esse método pode retardar a convergência para uma solução por eliminar indivíduos que podem carregar outros genes que são bons.

O terceiro método apresenta como desvantagem o gasto computacional com indivíduos que não obedecem às restrições. Em contrapartida, o fato de serem penalizados na avaliação não tira esses indivíduos da população, possibilitam que os mesmos tenham a chance de reproduzir e passar os genes verdes adiante, aumentando a exploração do espaço de buscas do algoritmo genético (LINDEN, 2012). No presente trabalho, como as simulações são demoradas, foram usadas um misto das três técnicas para tentar obter o máximo possível de todas as vantagens e mitigar o tempo de execução do AG.

No sistema de avaliação aqui empregado, o indivíduo terá uma nota e um contador de penalizações. Quanto maior o número desse contador, mais penalizado é o indivíduo.

5.2.2. Sistema de Seleção

A seleção é um operador genético intermediário, pois o mesmo não alterará a população, apenas selecionará indivíduos que sofrerão a aplicação dos demais operadores (HEATON, 2014). Embora existam várias técnicas de seleção, aqui são abordadas apenas as técnicas do torneio e seleção aleatória simples, pois foram as utilizadas nesse trabalho.

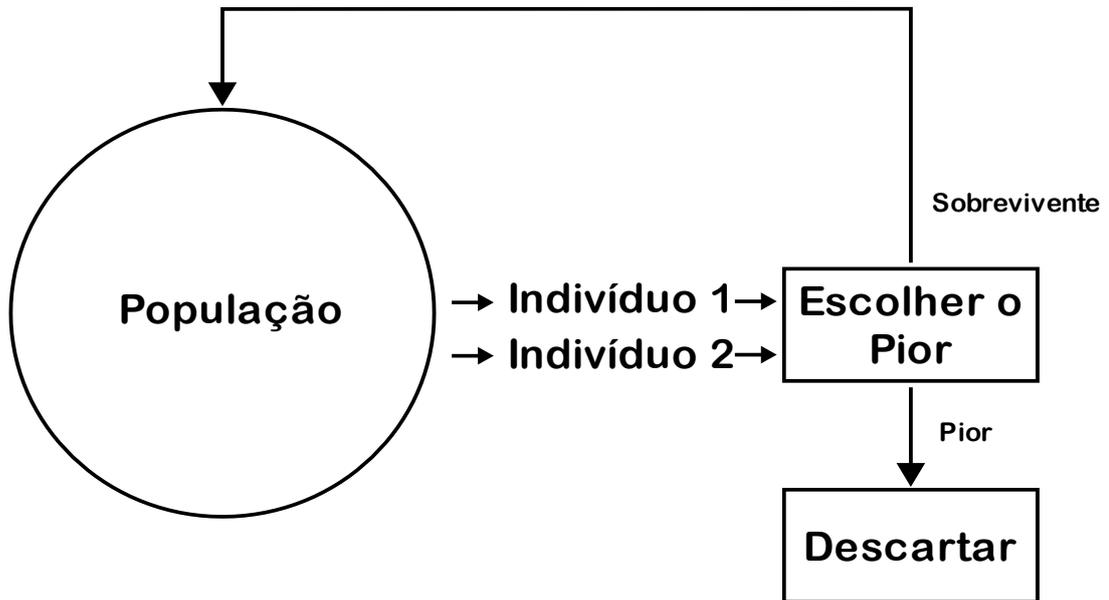
Começando com o torneio, essa seleção será aplicada com duas finalidades no algoritmo: selecionar indivíduos para se reproduzir e escolher quais indivíduos serão descartados. Será iniciado explicando o descarte: como os recursos computacionais são finitos, a população possui tamanho fixo (LINDEN, 2012). Logo, ainda conforme o autor, uma vez que o processo de reprodução aumenta a quantidade de indivíduos, é necessário que o algoritmo descarte os excedentes, de modo a manter esse número de indivíduos estável. Fazendo o paralelo com a realidade, os recursos computacionais finitos seriam análogos aos recursos naturais finitos, como é o caso de alimento e moradia (LINDEN, 2012).

Nesse caso, o processo do torneio é representado pela Figura 39. Inicialmente, seleciona-se dois indivíduos aleatoriamente do conjunto da população. Depois, compara-se suas avaliações (tanto nota quanto eventuais penalizações) e o pior deles é descartado (HEATON, 2014). Por fim, ressalta-se que o sobrevivente retorna para a população e esse processo de selecionar para descartar entra em loop até que a quantidade de indivíduos tenha o valor determinado previamente (HEATON, 2014).

Já o processo de torneio para crossover é baseado no abordado por (LINDEN, 2012), onde, para selecionar os dois indivíduos genitores, são selecionados aleatoriamente quatro indivíduos da população. Esses quatro são divididos em dois grupos e o melhor indivíduo de cada grupo participará do processo de crossover. Segundo (LINDEN, 2012), essa abordagem simula o postulado da seleção natural que afirma que os mais aptos têm mais chances de se reproduzir. A Figura 40 ilustra esse processo, exibindo que os indivíduos tanto gerados quanto os selecionados anteriormente retornam para a população, aumentando seu tamanho.

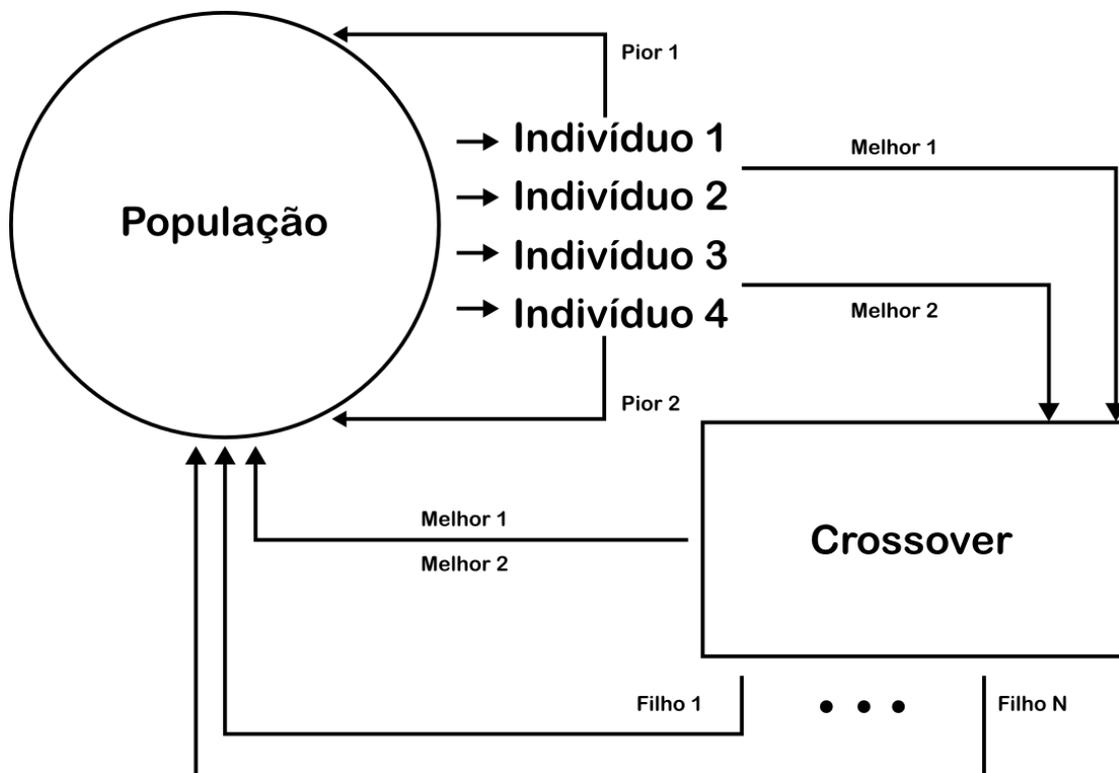
Ainda sobre o crossover, vale ressaltar duas observações: primeiro, que não é obrigado selecionar apenas dois genitores. É possível selecionar mais ou mudar a dinâmica do torneio, como adotar um sistema onde todos enfrentam todos, conforme mostrado em (LINDEN, 2012); Um outro ponto a ser abordado é que um operador de crossover pode gerar qualquer quantidade de indivíduos, porém, esse detalhe será melhor abordado no tópico específico sobre crossover

Figura 39 - Torneio para Descartar Indivíduos.



Fonte: Do Autor.

Figura 40 - Torneio para Crossover.



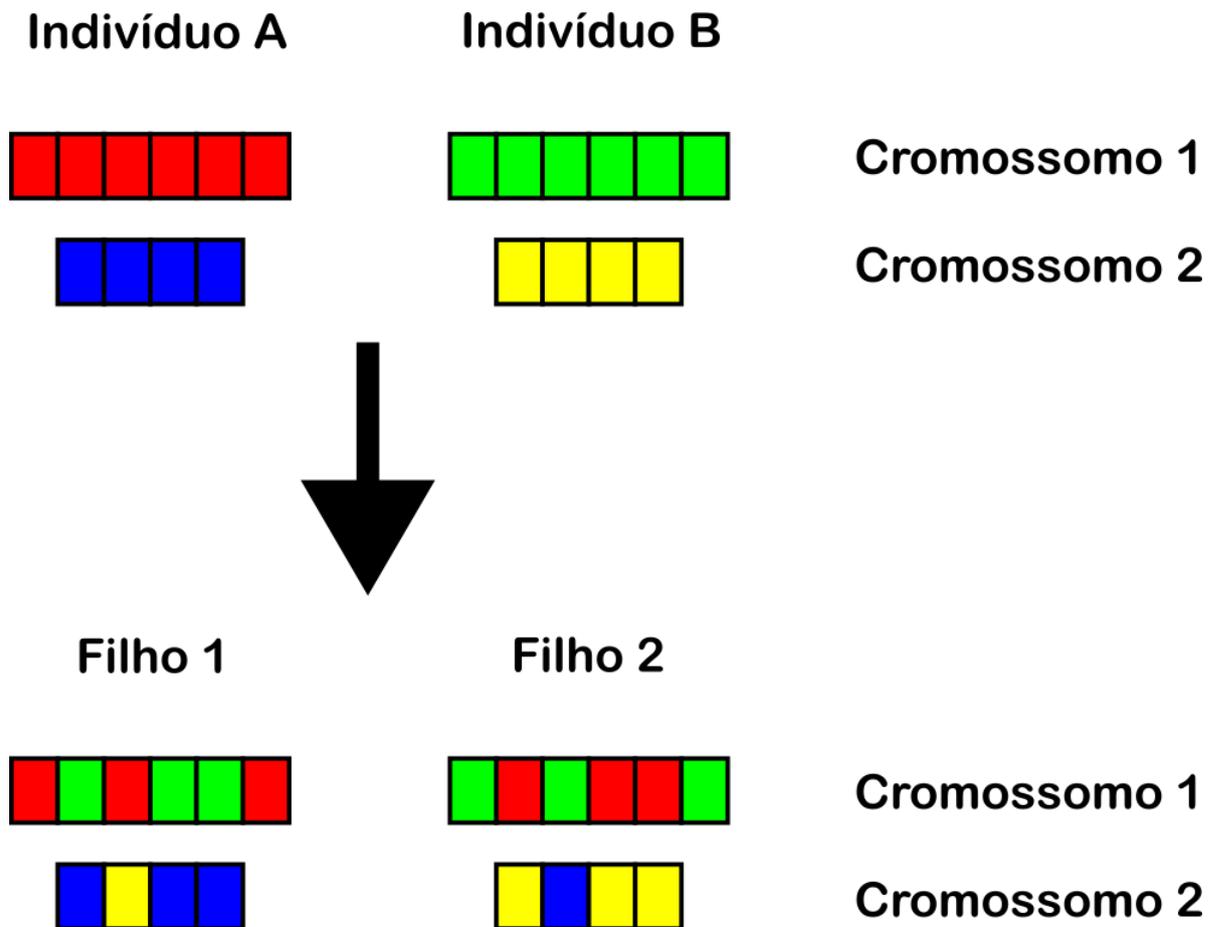
Fonte: Do Autor.

Ainda existe a seleção aleatória simples, que é usada na mutação. De acordo com (LINDEN, 2012), na realidade a mutação pode atingir qualquer ser, logo, no algoritmo, é importante usar um método de seleção que não seja enviesado pela avaliação do indivíduo. Dessa forma, portanto, seleciona-se um indivíduo de forma aleatória, aplica-se o operador de mutação e o mesmo é retornado à população.

5.2.3. Sistema de Crossover

Assim como nas técnicas de seleção, existem várias técnicas de crossover. Porém, aqui é usado o crossover uniforme proposto por (LINDEN, 2012). Nesse crossover há dois pais que irão gerar dois filhos. A Figura 41 mostra esse processo.

Figura 41 - Crossover Uniforme.



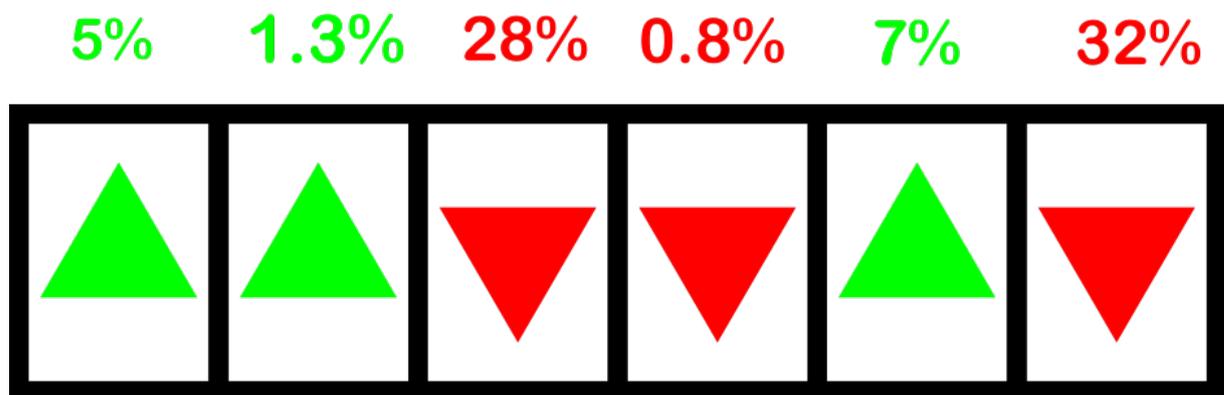
Fonte: Do Autor.

Para cada cromossomo, haverá um sorteio para saber se um dado gene do indivíduo *A* vai para o filho 1 ou para o filho 2. De maneira análoga, o gene em questão do indivíduo *B* irá para o outro filho. Observe que esse processo usa uma arquitetura de camadas, ou seja, o cromossomo 1 só troca genes com outro cromossomo 1 para compor um novo cromossomo 1. Não há troca de genes entre um cromossomo 1 e um cromossomo 2, por exemplo. Tampouco uma combinação de cromossomos 1 pode gerar um cromossomo 2. Esse tipo de crossover permite explorar uma ampla variabilidade genética, pois ele permite qualquer combinação possível entre os dois indivíduos (LINDEN, 2012).

5.2.4. Sistema de Mutação

A técnica de mutação usada nesse trabalho foi a mutação por perturbação, apresentada por (HEATON, 2014). Essa técnica se aplica a apenas variáveis numéricas contínuas, porém, conforme será visto adiante, o AG desse trabalho lida apenas com o dimensionamento da célula metamaterial, a qual apresenta variáveis contínuas maiores que zero, logo, a mutação por perturbação é suficiente. Como exemplo, considere a Figura 42.

Figura 42 - Mutação por Perturbação.



Fonte: Do Autor.

Inicialmente, define-se um limite inferior e um superior para indicar, respectivamente, a variação percentual mínima e máxima dos genes. Em particular, no presente trabalho e no exemplo da Figura 42, os limites usados são de -50% a 50%, ou seja, um gene pode variar seu valor em, no máximo, 50% para menos ou para mais. Após esse processo, gera-se um vetor que possua a mesma quantidade de elementos que o cromossomo, onde cada elemento desse vetor representa a porcentagem de variação de uma variável. No exemplo acima, foram

sorteadas seis porcentagens, cada uma é aplicada a um gene, sendo as de cor verde uma porcentagem positiva e as de cor vermelha, uma porcentagem negativa. Portanto, é possível notar que o valor de um gene decresce com uma porcentagem negativa e cresce com uma porcentagem positiva.

É importante ressaltar que, segundo (LINDEN, 2012), mutações mais agressivas (nesse caso, intervalo de porcentagens mais amplo) aumenta o grau de aleatoriedade do algoritmo, de modo que o mesmo começa a se aproximar de uma busca por força bruta e, portanto, perde eficiência. Já no caso de mutações mais brandas (aqui, interpretadas como intervalo de porcentagens estreito), o algoritmo pode demorar muito para explorar novos subconjuntos, diminuindo também sua eficiência. Ainda conforme (LINDEN, 2012), não existe método para determinar o valor ideal, ficando a critério do programador.

5.2.5. Funcionamento de um Algoritmo Genético

Um algoritmo genético funciona combinando todos os conceitos vistos até aqui. Inicialmente, uma população é gerada aleatoriamente com um número fixo de indivíduos. Posteriormente, esses indivíduos são avaliados e então ocorre o processo de reprodução, onde alguns são selecionados para reproduzir. Após a reprodução, os filhos gerados também são avaliados. Em seguida, alguns indivíduos sofrerão mutação e serão avaliados após a modificação genética. Para finalizar, serão selecionados indivíduos para descarte de modo a deixar a população com a quantidade de indivíduos que foi fixada anteriormente no início do algoritmo. Esse processo fica em um loop e cada iteração é chamada de geração.

Nesse ponto, é importante entender a importância dos operadores genéticos: retornando à Figura 35, salienta-se que o crossover é responsável pela exploração de um dado subconjunto, uma vez que ele apenas trabalha a recombinação dos genes dos indivíduos (HEATON, 2014). Já a mutação, por ser aleatório, permite que o algoritmo passe para outro subconjunto, impedindo que a população fique estagnada geneticamente (LINDEN, 2012).

Há ainda três conceitos que não foram abordados: critério de parada, taxa de crossover e taxa de mutação. Esses conceitos são detalhados por (LINDEN, 2012) e serão explicados a seguir.

5.2.5.1. Critério de Parada

Conforme visto no item 5.2.5, o algoritmo genético fica passando de geração em geração dentro de um loop, porém, eventualmente, será necessário parar esse loop para ver a melhor proposta de solução que o AG conseguiu encontrar. Nesse contexto, (LINDEN, 2012) aborda três métodos, os quais serão detalhados a seguir.

O primeiro critério é esperar o algoritmo chegar na resposta correta. A primeira ponderação a ser feita desse critério é: deve existir uma resposta correta. É comum em problemas de otimização não existir uma resposta correta, bastando apenas que a solução a ser usada atenda a alguns requisitos. Para o caso desse trabalho, por exemplo, espera-se encontrar uma célula metamaterial que mais se aproxime da banda de sintonia para 5G, porém, pode ser que não exista essa célula, logo, adotar esse critério de parada pode obrigar o AG a entrar em um loop infinito.

O segundo critério é usar um número fixo de gerações. Como vantagem, o tempo de execução do algoritmo é finito e previsível. Como desvantagem tem-se o fato de um valor máximo de gerações estipulado pode não ser suficiente para que o algoritmo encontre uma solução satisfatória. Para esse critério, portanto, deve-se adicionar um conjunto de testes extras para determinar qual o melhor número máximo de gerações. Lembrando que esse valor estabelecido se aplicará somente ao problema em questão, pois ele é muito sensível à natureza da aplicação.

O terceiro critério tenta combinar o melhor dos dois anteriores, que é o número de gerações consecutivas sem melhoras. Para tal, deve-se monitorar o melhor indivíduo de cada geração. Se esse indivíduo não mudar após um número estabelecido de gerações consecutivas, o algoritmo parará sua execução e exibirá a proposta de solução carregada por esse indivíduo. Com essa abordagem, tem-se uma maior certeza de que virá uma resposta satisfatória e ainda é possível aplicar esse critério em problemas que não tenham uma resposta correta. Porém, o risco de entrar em loop infinito, embora atenuado, ainda existe. Como há um limite de gerações sem melhoras, a previsibilidade e finitude da execução desse algoritmo existem, porém, também é necessário haver mais testes para definir qual o melhor limite de gerações sem melhoras.

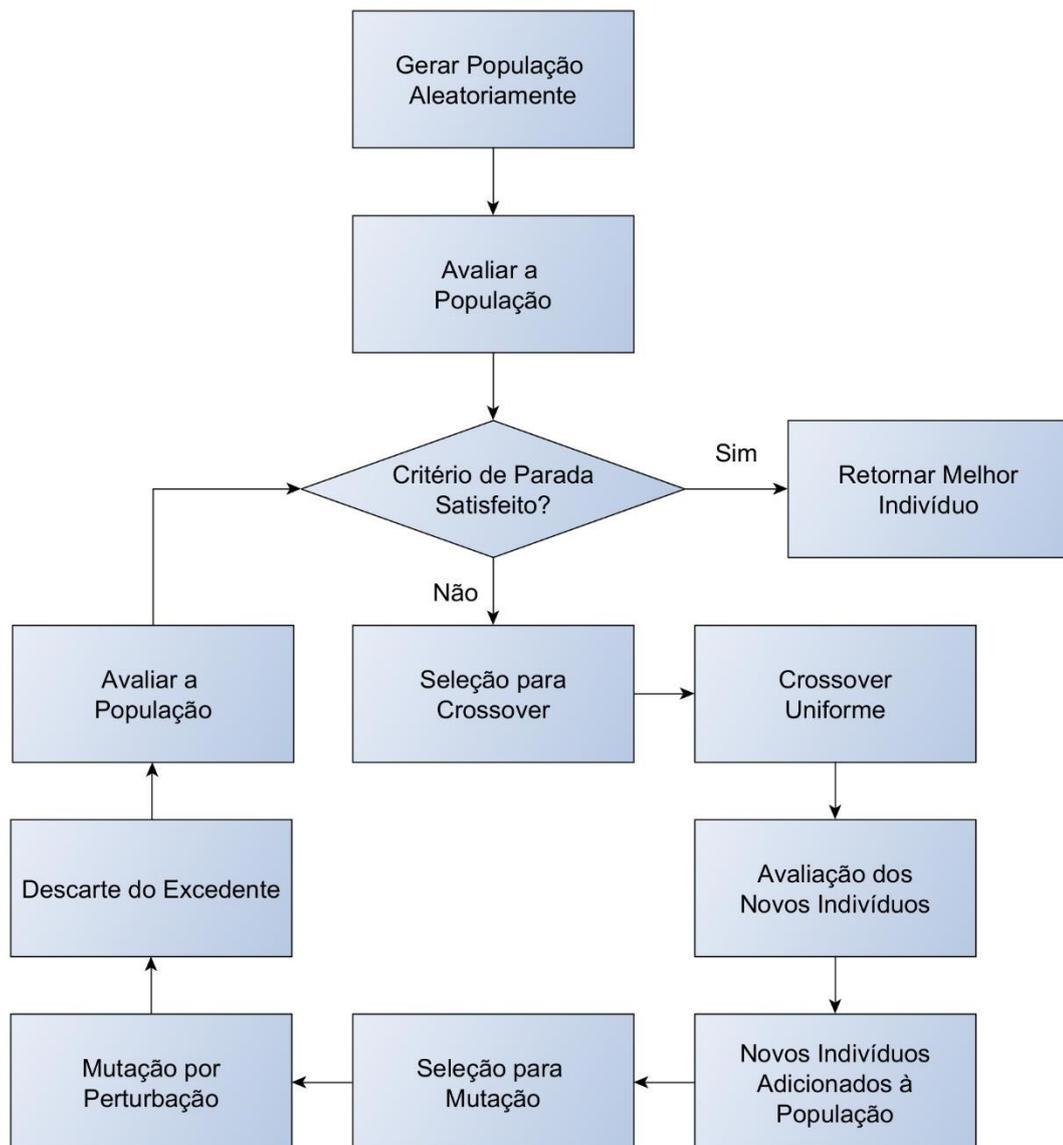
Como as simulações são demoradas, no presente trabalho foi adotado o critério de esperar por um número fixo de gerações a fim de conseguir gerar propostas de solução

satisfatórias em tempo hábil. Para finalizar, a Figura 43 exibe um fluxograma acerca do funcionamento de um algoritmo genético.

5.2.5.2. Taxa de Crossover e Taxa de Mutação

Até o momento não foi explicitada a quantidade de indivíduos que irão se reproduzir. Esse valor, na verdade, é determinado pela taxa de crossover, abordada tanto por (LINDEN, 2012) como (HEATON, 2014). Em ambos os casos, sua utilização se dá da forma como será mostrado a seguir.

Figura 43 - Fluxograma de um Algoritmo Genético.



Fonte: Do Autor.

Essa taxa de crossover representa a quantidade (cumulativa) de reproduções que haverá em uma dada geração. Para exemplificar, considere uma população com 10 indivíduos e taxa de crossover igual a 80%. A cada geração, haverá 8 reproduções, ou seja, o processo de selecionar dois pais para gerar dois filhos ocorrerá 8 vezes em cada geração. Agora suponha uma taxa de 83% para os mesmos 10 indivíduos. A cada geração seriam 8,3 reproduções, porém, serão realizadas apenas 8 e o 0,3 restante será somado para as próximas gerações até chegar no próximo inteiro, isto é, haverá uma geração que executará 9 reproduções. Por fim, segundo (LINDEN, 2012), a maioria dos problemas emprega uma taxa de crossover entre 80% e 90%.

A taxa de mutação funciona da mesma forma que a taxa de crossover, sendo a única diferença o fato de que geralmente seu valor gira em torno de 1% (LINDEN, 2012).

5.3. Implementação Do Algoritmo Genético

Para criar o algoritmo genético, foi usado um framework elaborado pelo próprio autor desse trabalho e disponível em repositório público no GitHub, conforme pode ser visto em (LACERDA, 2018). Esse framework consiste em um conjunto de classes que, ao servirem de classe-mãe para outras classes, conseguem facilitar o trabalho de programar um AG.

O algoritmo genético foi programado na linguagem Python 3.7 e a simulação das células metamateriais foi feita no software CST Microwave Studio 2016®. Para automatizar esse processo, foi usada uma API em MATLAB®, criada por (SYMEONIDIS, 2018), que consegue fazer a comunicação com o CST. Dessa forma a arquitetura do projeto ficou o seguinte: o AG programado em Python consegue se comunicar com API feita em MATLAB que consegue se comunicar com o CST Microwave Studio através da interface COM-Objects, desenvolvida pela Microsoft (MICROSOFT, 2018).

5.4. Indivíduos

Os indivíduos possuem apenas um cromossomo contendo os genes que consegue descrever as dimensões dos componentes. Vale salientar que algumas restrições foram embutidas diretamente na solução do problema: o substrato é o Rogers RT Duroid 5880 com espessura de 0,508 mm; o tamanho do substrato é uma constante multiplicada pelo tamanho do maior componente de cobre e o plano terra é completamente preenchido. Como esse cromossomo carrega variáveis numéricas contínuas maiores que zero, a mutação usada foi a por perturbação e crossover é do tipo uniforme.

5.5. Sistema de Avaliação

5.5.1. Nota

A nota é calculada com base na perda por retorno da célula simulada. O CST gera um arquivo de texto com os pontos do gráfico da perda por retorno da célula, o AG lê esse arquivo e determina qual a banda de sintonia que mais se aproxima da banda 26-30 GHz. Determinado

isso, a nota corresponde ao valor médio da perda por retorno nessa banda. Constata-se, portanto, que esse problema é de minimização e, logo, quanto menor a nota, melhor é o indivíduo.

5.5.2. Penalizações

Existem dois tipos de penalizações nesse algoritmo. Essas penalizações utilizam o mesmo contador, logo, sua separação em tipos é apenas didática. As penalizações do tipo física são aquelas que acontecem quando o algoritmo encontra valores para as variáveis de modo que o desenho fuja do formato pré-estabelecido. Como exemplo, uma penalização desse tipo ocorre quando o gap de um SRR é dimensionado a ficar maior que os anéis.

O outro tipo de penalização é referente ao resultado. Conforme foi dito acima, é escolhida a banda que mais se aproxima da banda 26-30 GHz. Caso a banda mais próxima não englobe essa faixa de frequência, o indivíduo também é penalizado.

5.6. Critério de Parada, Taxas e Tamanho da População

Para esse algoritmo genético, em virtude da demora de cada simulação, foi usada uma população de 10 indivíduos e um critério de parada de 10 gerações. Como valores das taxas, foi usado 90% para crossover e 1% para mutação.

7 ESTRUTURAS BASE

A seguir serão mostradas as estruturas base usadas no trabalho. Salienta-se que todas possuem o plano terra totalmente preenchido, logo, o mesmo não será mostrado nos *layouts*. Por fim, é importante ressaltar que as dimensões assinaladas estão em milímetros.

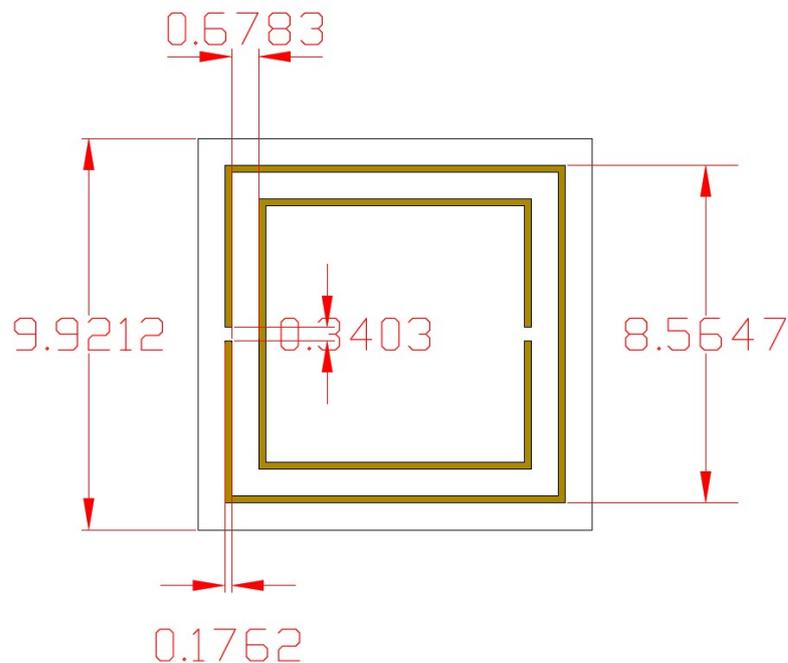
7.1 Metamateriais

Os metamateriais base empregados nas antenas foram dimensionados através do algoritmo genético montado para esse trabalho.

7.1.1 SRR

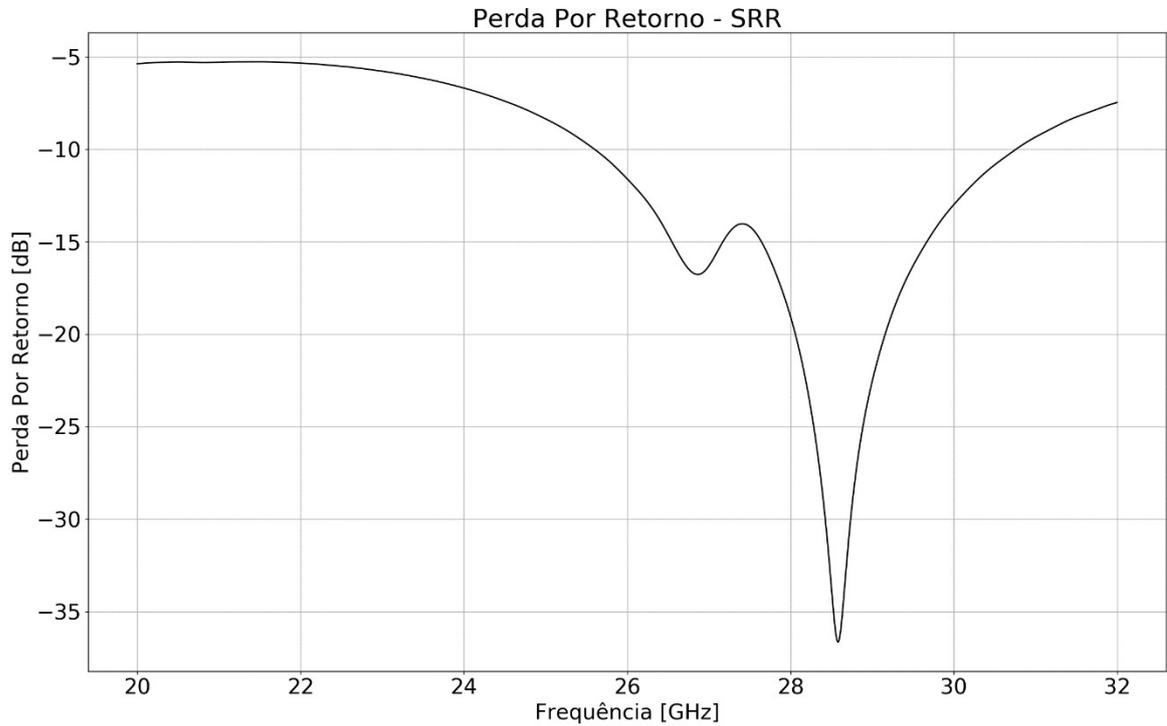
A Figura 44 mostra o *layout* da célula unitária do SRR. Além disso, na Figura 45 é exibido o gráfico da perda por retorno de 20 a 30 GHz.

Figura 44 - *Layout* do SRR.



Fonte: Do Autor.

Figura 45 - Perda Por Retorno do SRR.



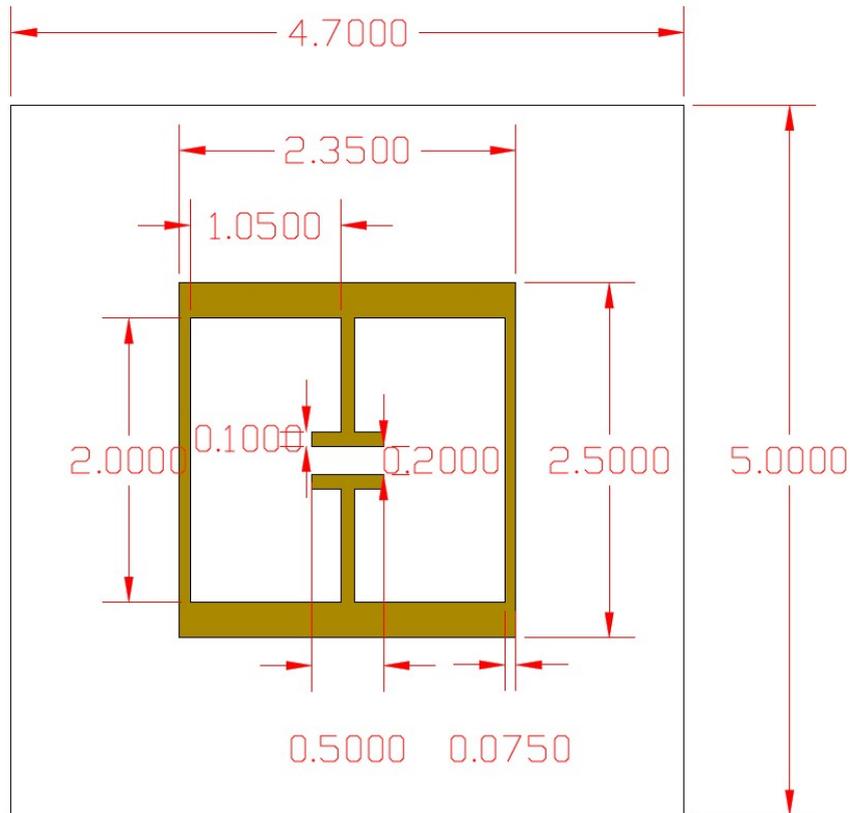
Fonte: Do Autor.

É possível observar que o SRR está ressonando na banda de 25,60 GHz a 30,76 GHz, aproximadamente, tendo a frequência de 28 GHz com -19,10 dB.

7.1.2 ELC

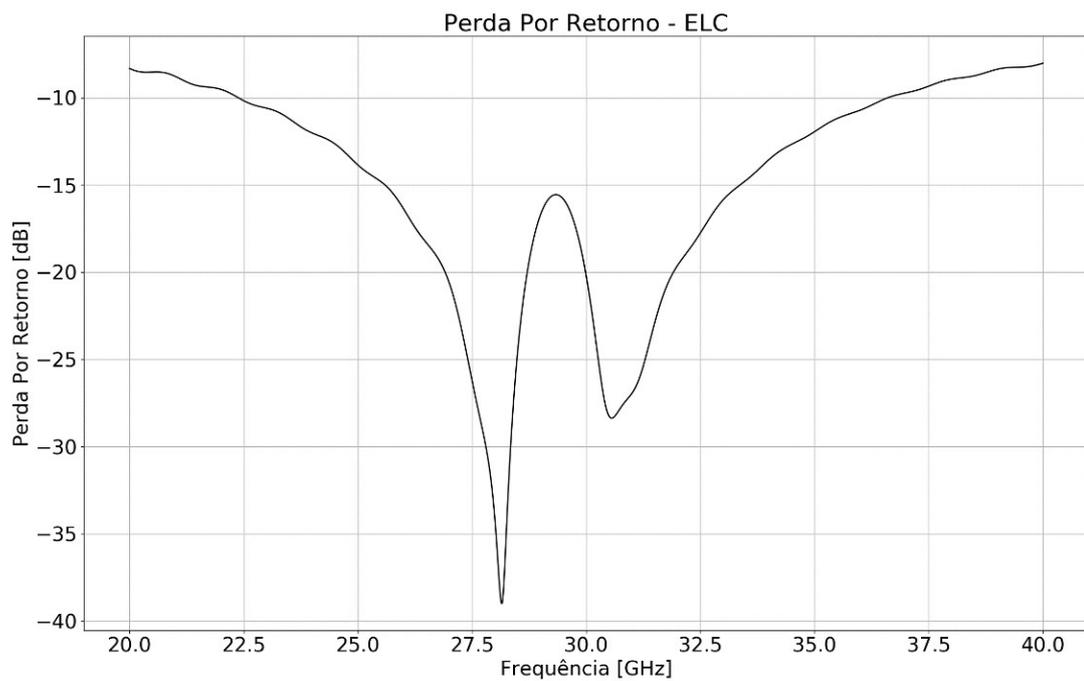
Seguindo a mesma sequência da célula anterior, são exibidos tanto o *layout* quanto a perda por retorno da estrutura ELC, conforme Figura 46 e Figura 47, respectivamente. Pela Figura 47, observa-se que o ELC tem uma ampla faixa de sintonia, começando em 22,40 GHz e terminando em 36,62 GHz. É importante ressaltar que a perda por retorno em 28GHz é de -34,13 dB.

Figura 46 - *Layout* do ELC.



Fonte: Do Autor.

Figura 47 - Perda por Retorno do ELC.



Fonte: Do Autor.

7.2 Antenas Planares

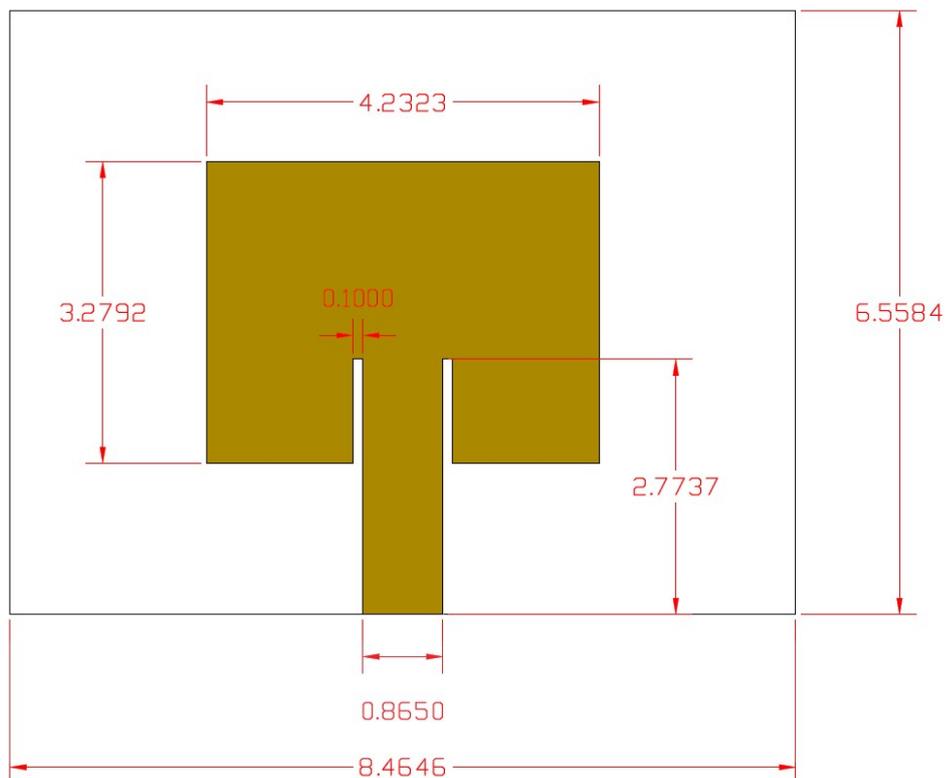
Conforme já mencionado anteriormente, foram usados as equações e os scripts em todas as dimensões possíveis. Caso haja alguma dimensão sem equacionamento ou script, significa que a mesma foi ajustada com base em sucessivas tentativas.

Salienta-se ainda que a resposta do ANEXO I – DIMENSIONAMENTO DA LINHA MICROSTRIP é apenas uma aproximação inicial, portanto, o valor da largura da *Microstrip* foi ajustado para melhorar o desempenho da antena. Por fim, o substrato usado nas antenas foi o Rogers RT5880, com permissividade relativa de 2,2 e espessura de 0,508 mm, por ser recomendado para uso em altas frequências.

7.2.1 Patch Retangular

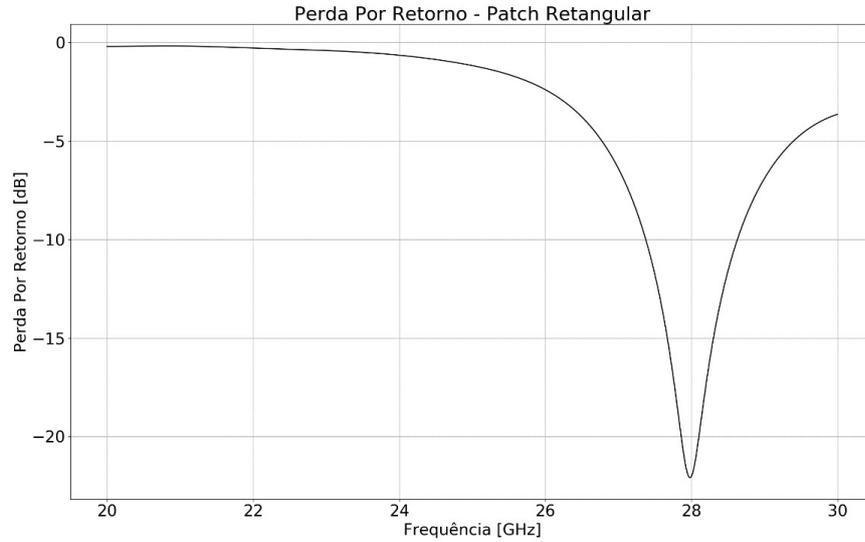
A Figura 48 mostra o *layout* da antena com as respectivas dimensões cotadas. Em seguida, são mostrados os gráficos de perda por retorno, ganho e diretividade.

Figura 48 - *Layout* do Patch Retangular.



Fonte: Do Autor.

Figura 49 - Perda por Retorno da Antena com *Patch* Retangular

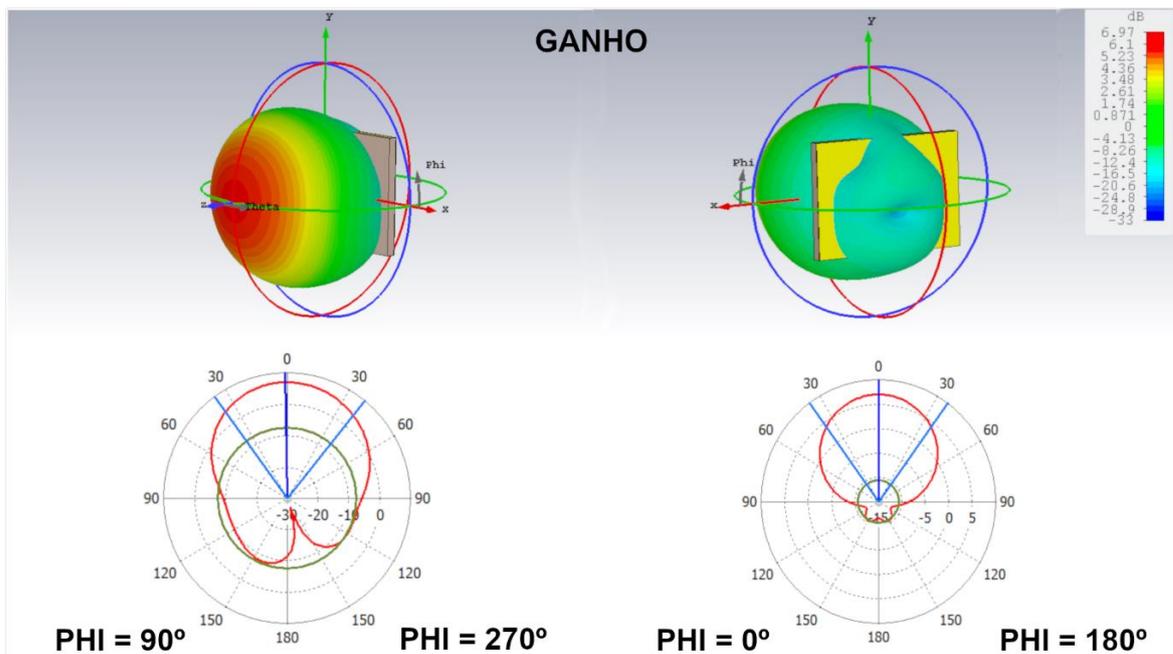


Fonte: Do Autor.

A banda de sintonia da antena é de 27,38 GHz a 28,63 GHz, tendo 28 GHz com -22,04 dB.

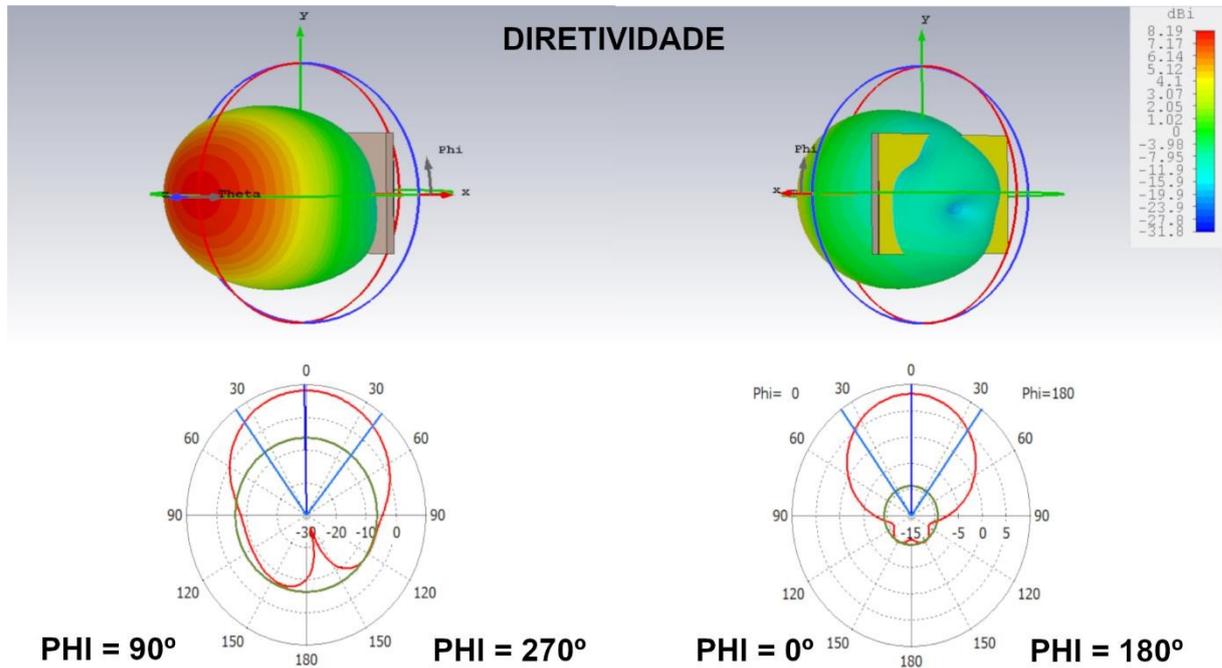
A Figura 50 e Figura 51 mostram o ganho e a diretividade da antena em 28 GHz, respectivamente, a partir dos quais, além de ver o padrão de radiação, é possível obter a eficiência da antena.

Figura 50 - Ganho da Antena com Patch Retangular.



Fonte: Do Autor.

Figura 51 - Diretividade da Antena com Patch Retangular.



Fonte: Do Autor.

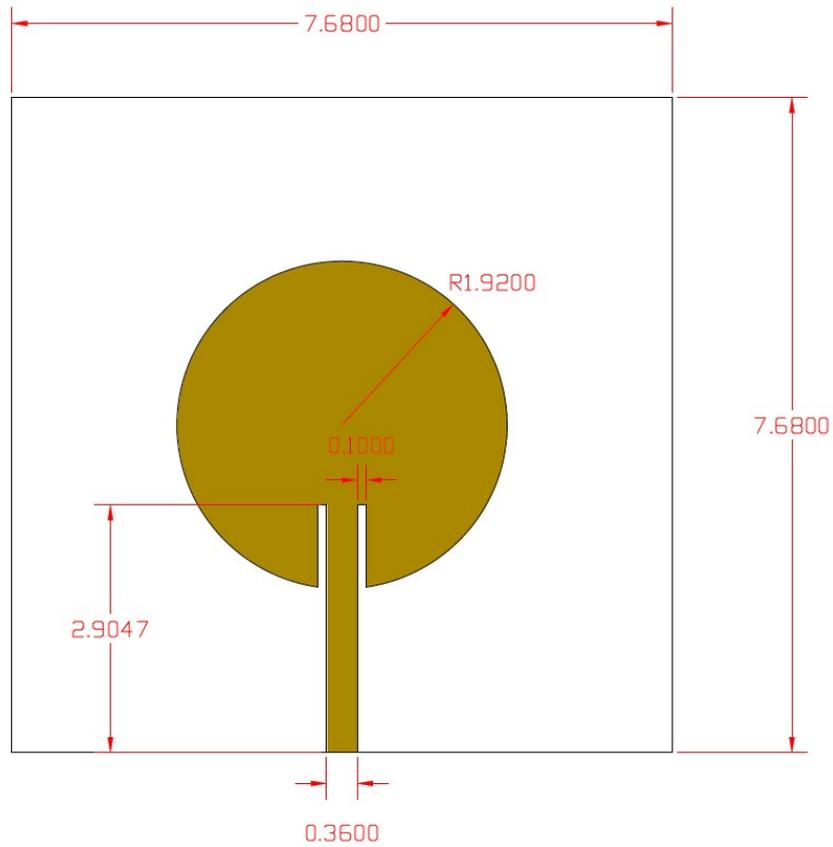
As imagens mostram que a antena possui um padrão diretivo, o que é desejado para antenas de celulares. Em particular, observa-se que a parte traseira da antena possui radiação bem menor que a parte do *patch*, sendo isso uma vantagem, conforme visto em (RÜTSCHLIN, 2018).

7.2.2 Patch Circular

A Figura 52 mostra o *layout* da antena com *patch* circular. Salienta-se que o ajuste fino nas medidas foi feito através de otimizações. Para esse caso em particular, até o raio do *patch* foi alterado em relação ao resultado fornecido pelo script em ANEXO III – DIMENSIONAMENTO DE PATCH CIRCULAR.

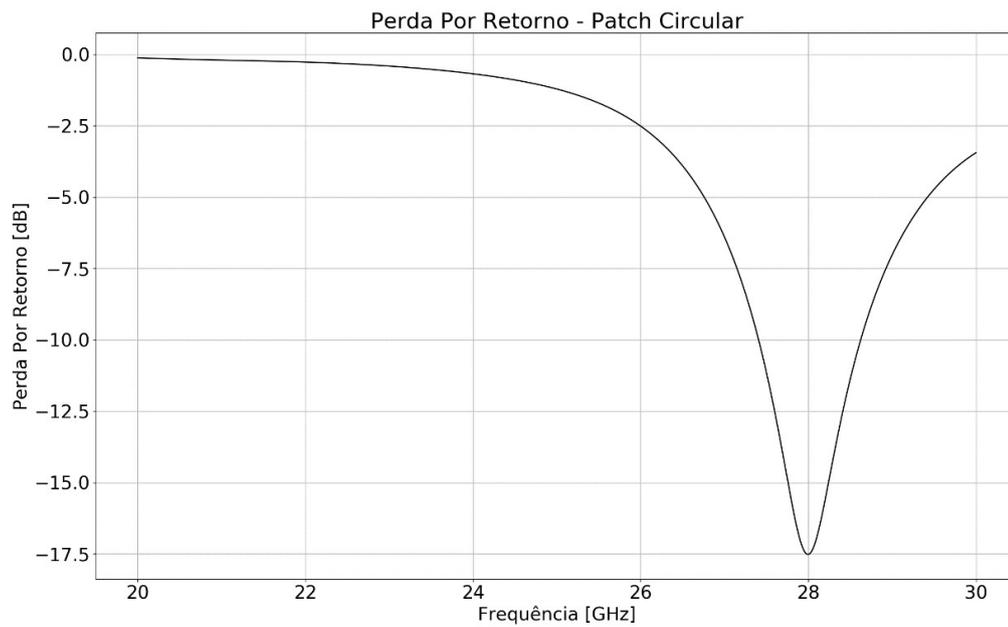
A Figura 53 mostra o gráfico da perda por retorno da antena, evidenciando a banda de sintonia de cerca de 27,41 GHz a 28,63 GHz. É possível ver ainda que em 28 GHz tem perda por retorno de -17,52 dB.

Figura 52 - *Layout* da Antena com *Patch* Circular.



Fonte: Do Autor.

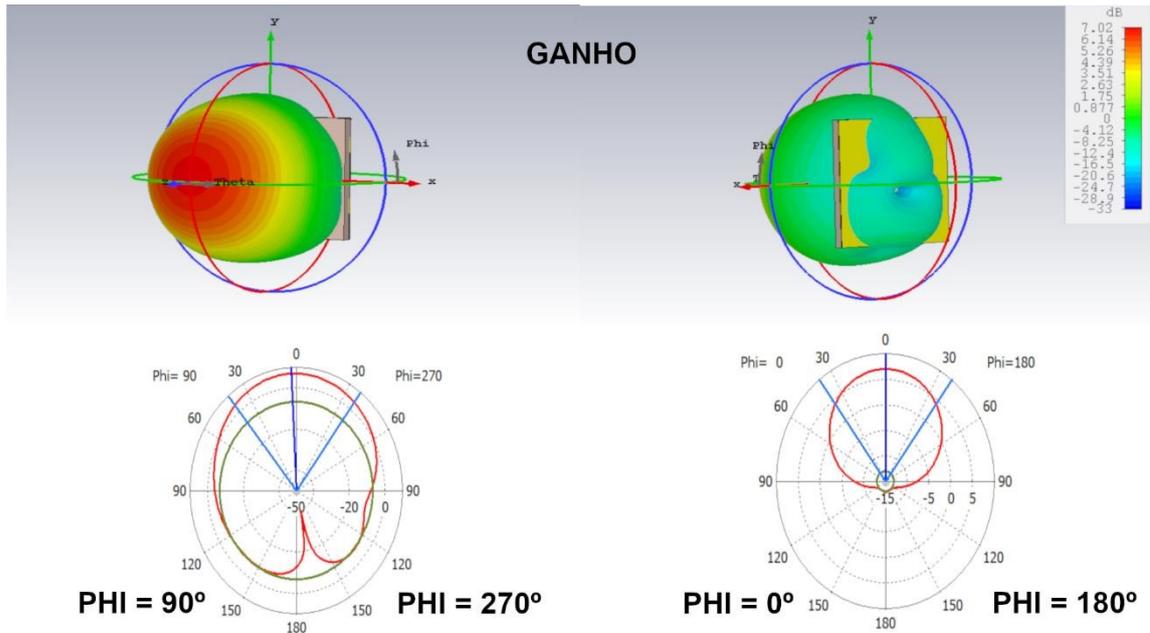
Figura 53 - Perda por Retorno da Antena com *Patch* Circular.



Fonte: Do Autor.

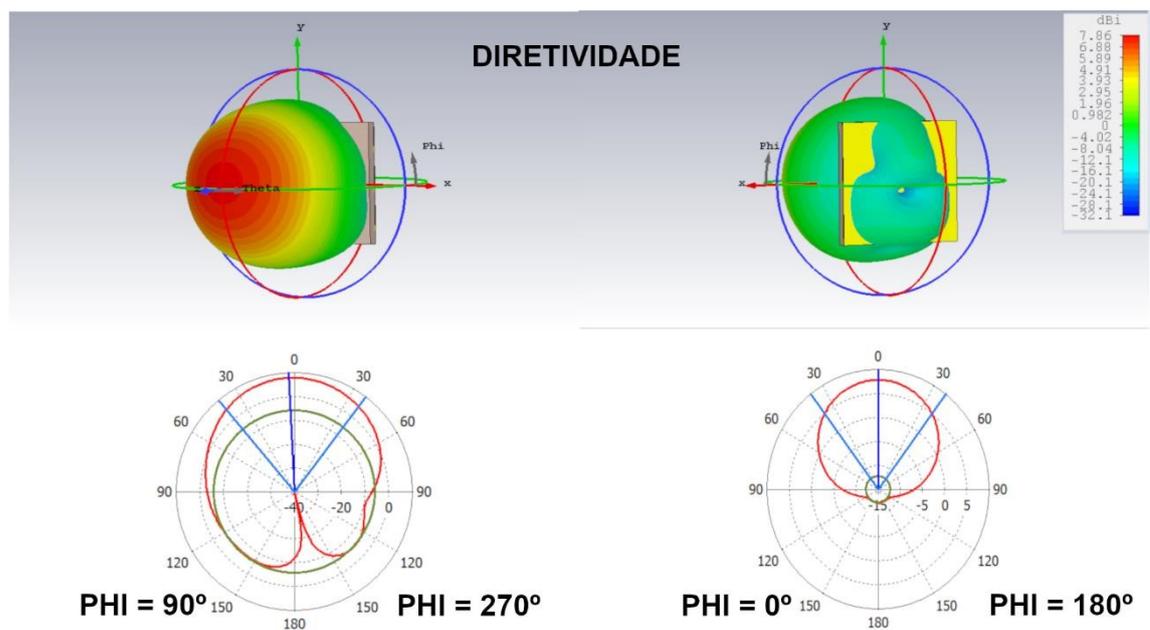
A Figura 54 e Figura 55 mostram um diagrama de radiação para 28 GHz também diretivo, muito parecido com o diagrama da antena com *patch* retangular. Salienta-se, portanto, que valem as mesmas observações feitas anteriormente.

Figura 54 - Ganho da Antena com *Patch* Circular.



Fonte: Do Autor.

Figura 55 - Diretividade da Antena com *Patch* Circular.



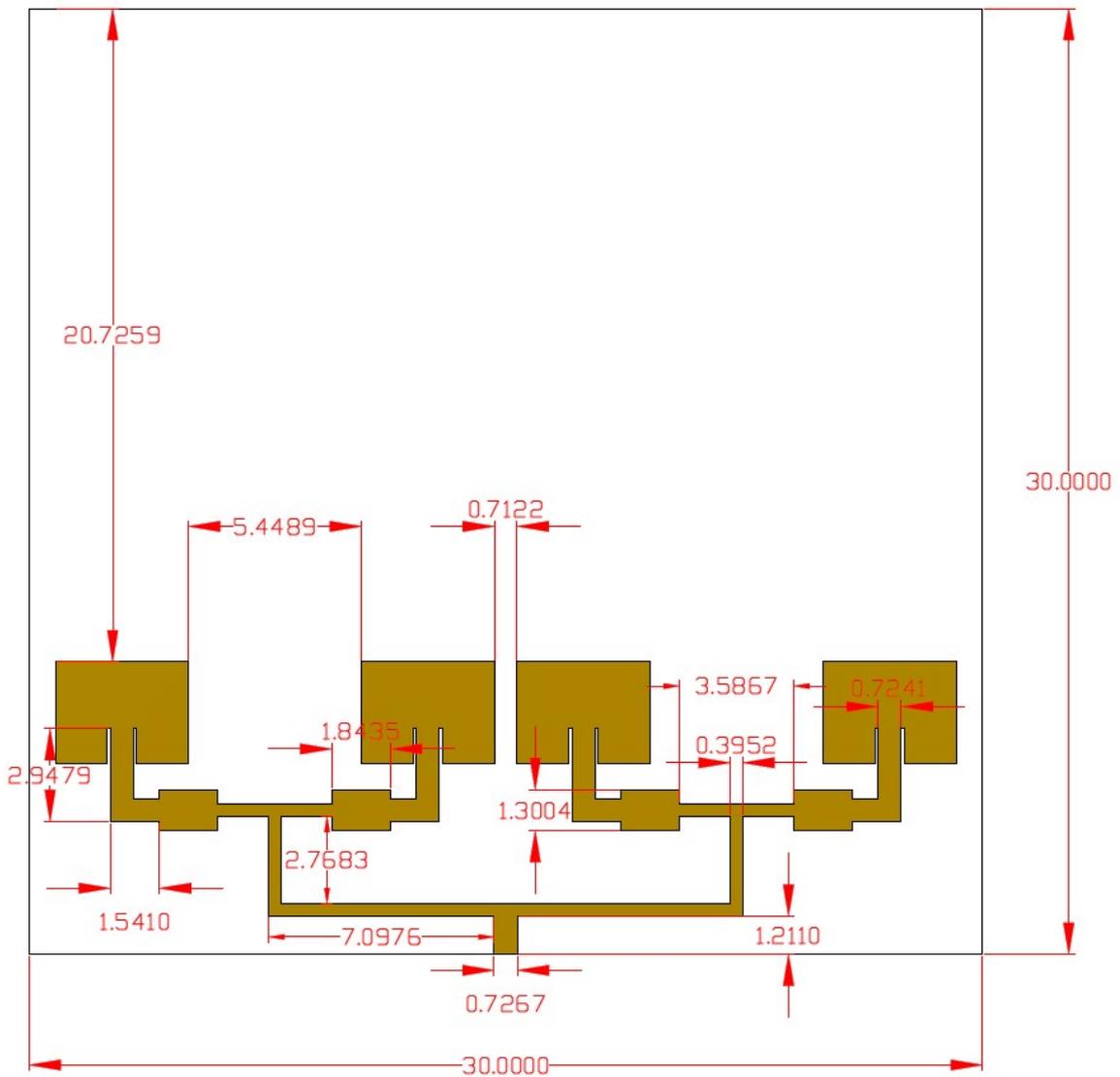
Fonte: Do Autor.

7.3 Arranjos

7.3.1 Arranjo Retangular

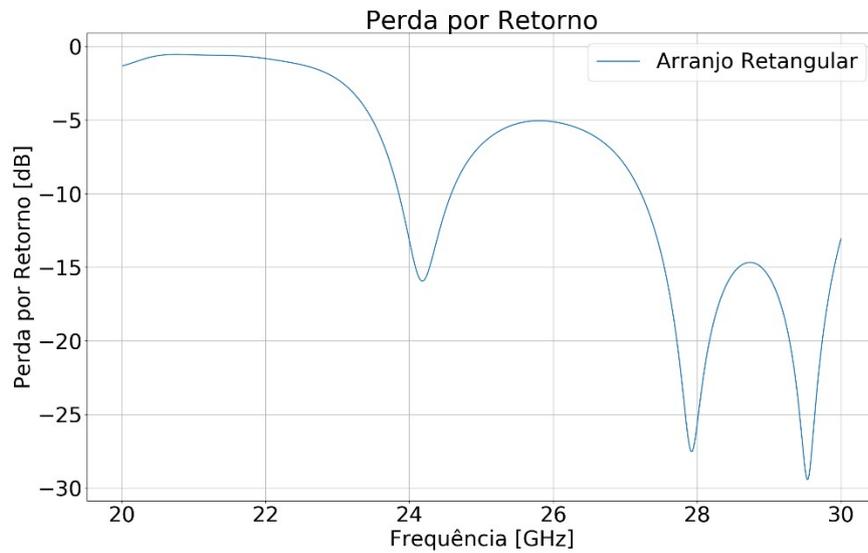
A Figura 56 mostra o *layout* do arranjo. Vale salientar que as dimensões do *patch* foram mantidas em relação à antena mostrada anteriormente, porém, as medidas das linhas de alimentação foram modificadas para fazer o casamento de impedâncias.

Figura 56 - *Layout* do Arranjo com *Patches* Retangulares.



Fonte: Do Autor.

Figura 57 - Perda por Retorno do Arranjo com *Patches* Retangulares.

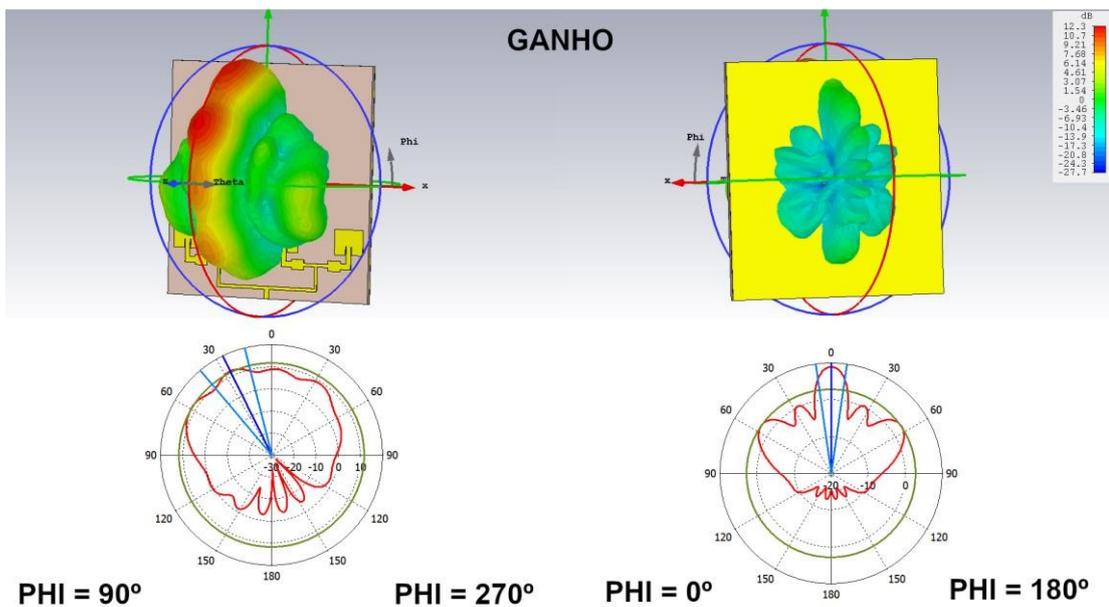


Fonte: Do Autor.

A Figura 57 mostra a perda por retorno do arranjo, exibindo uma banda de sintonia para 5G de aproximadamente 27,23 GHz a 30,00 GHz. Por fim, vale salientar que a perda por retorno em 28 GHz é -25,72 dB.

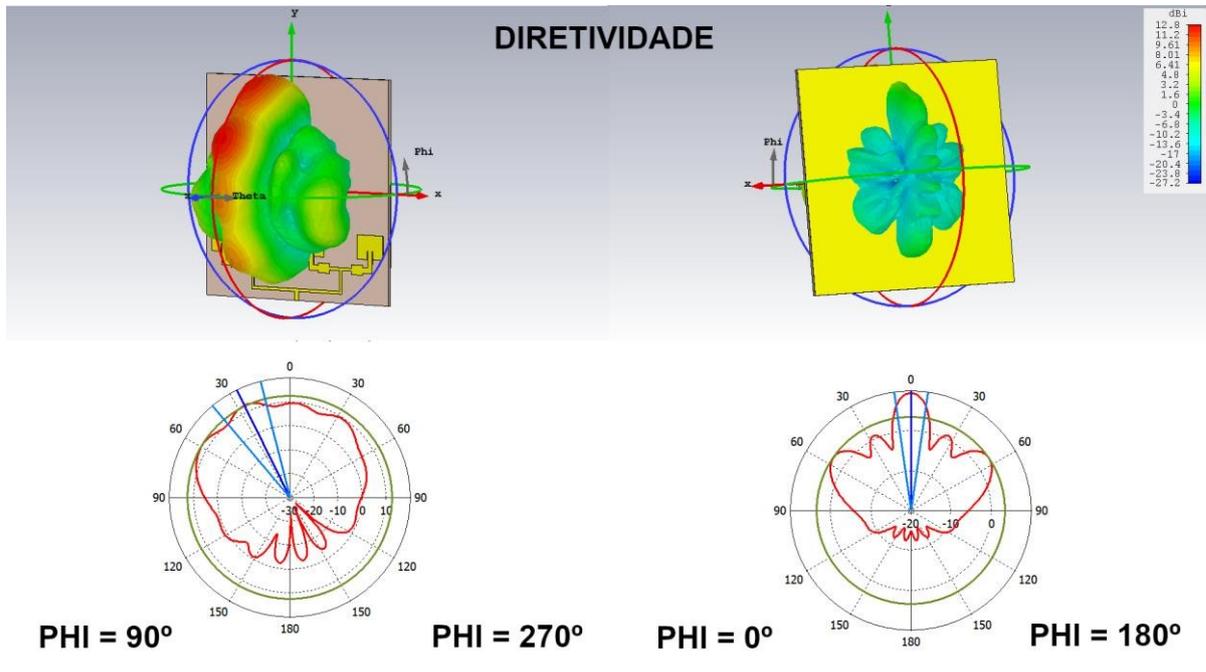
Finalmente, a Figura 58 e Figura 59 mostram os diagramas de radiação para ganho e diretividade do arranjo em 28 GHz.

Figura 58 - Ganho do Arranjo Retangular.



Fonte: Do Autor.

Figura 59 - Diretividade do Arranjo Retangular.



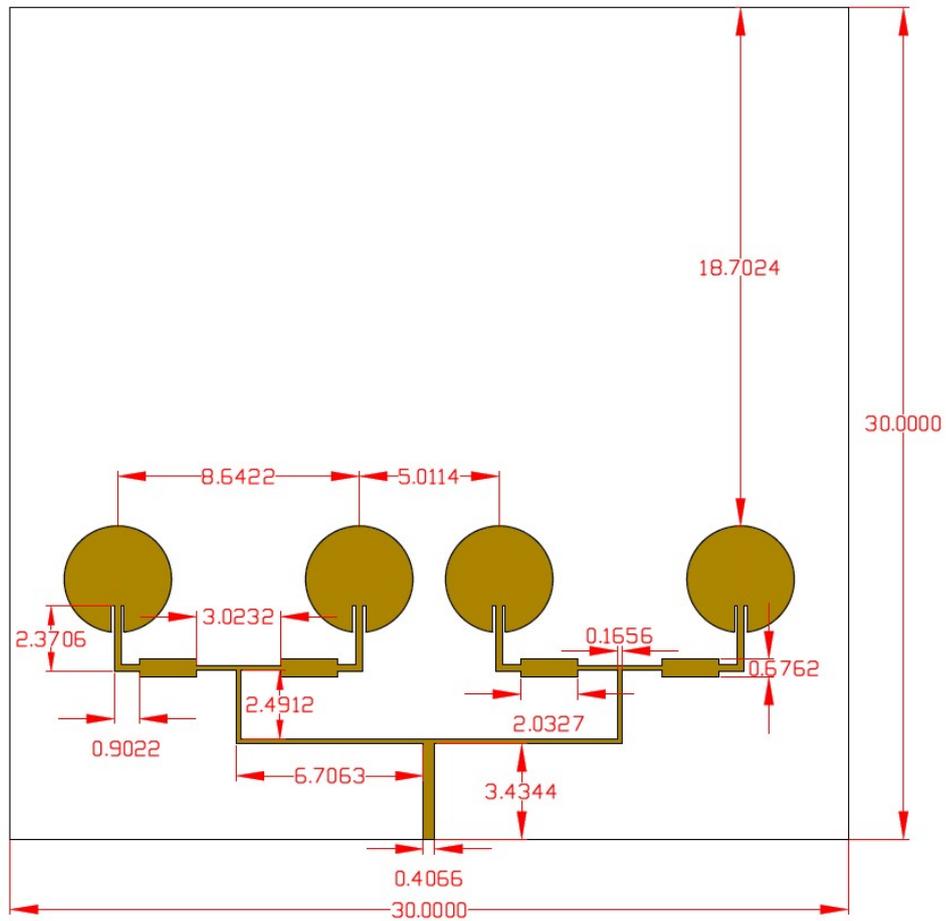
Fonte: Do Autor.

7.3.2 Arranjo Circular

Assim como explicado no arranjo retangular, os *patches* exibidos na Figura 60 possuem as mesmas dimensões do *patch* mostrado na antena base, sendo que as modificações foram feitas nas linhas de transmissão para realizar o casamento de impedâncias.

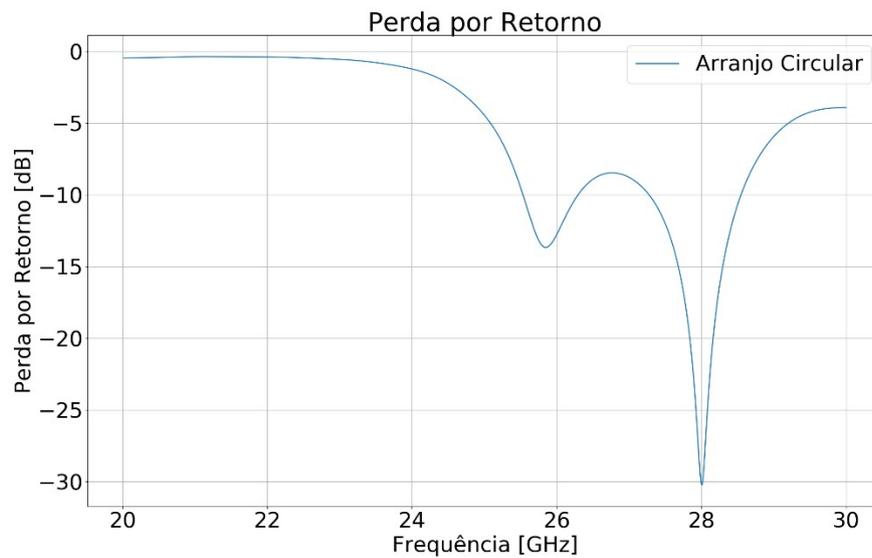
A Figura 61 exibe a perda por retorno do arranjo. Nela, é possível ver duas bandas que entram na faixa de 5G. A primeira delas começa em 25,54 GHz e vai até 26,30 GHz, porém, a faixa útil para a aplicação em questão começa em 26,0000 GHz. A segunda banda é iniciada em 27,28 GHz e finalizada em 28,55 GHz, com perda por retorno em 28 GHz de -30,21 dB. Além disso, os diagramas de radiação também mostram um padrão diretivo para o arranjo.

Figura 60 - *Layout* do Arranjo com *Patches* Circulares.



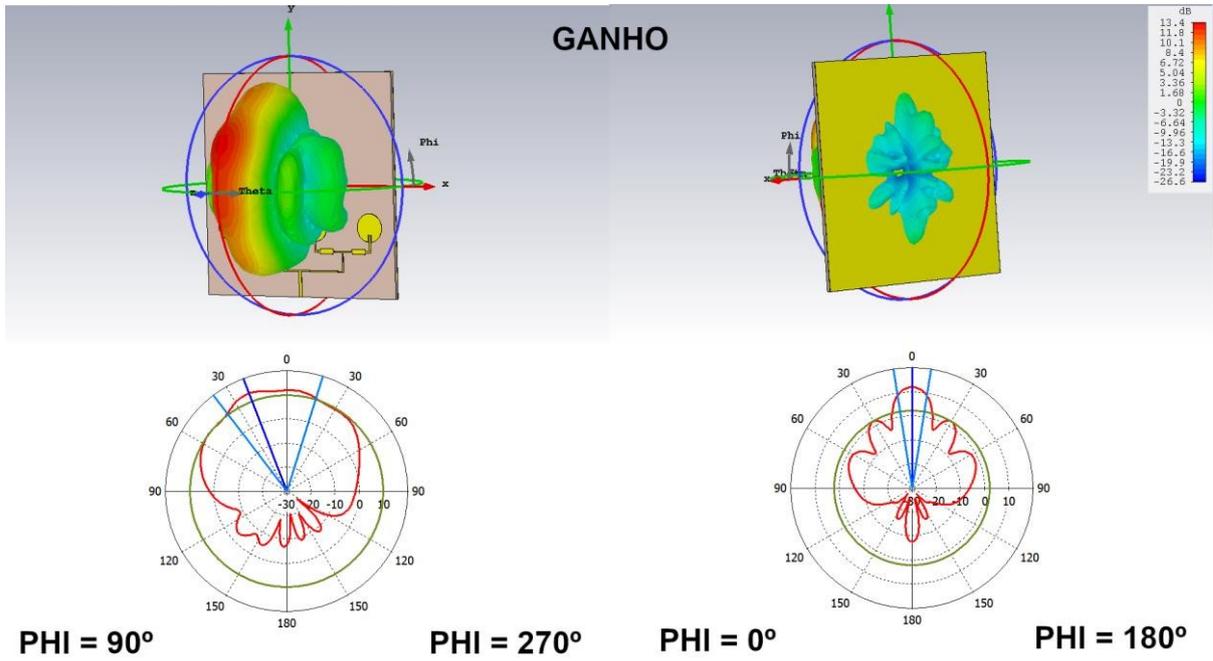
Fonte: Do Autor.

Figura 61 - Perda por Retorno do Arranjo com *Patches* Circulares.



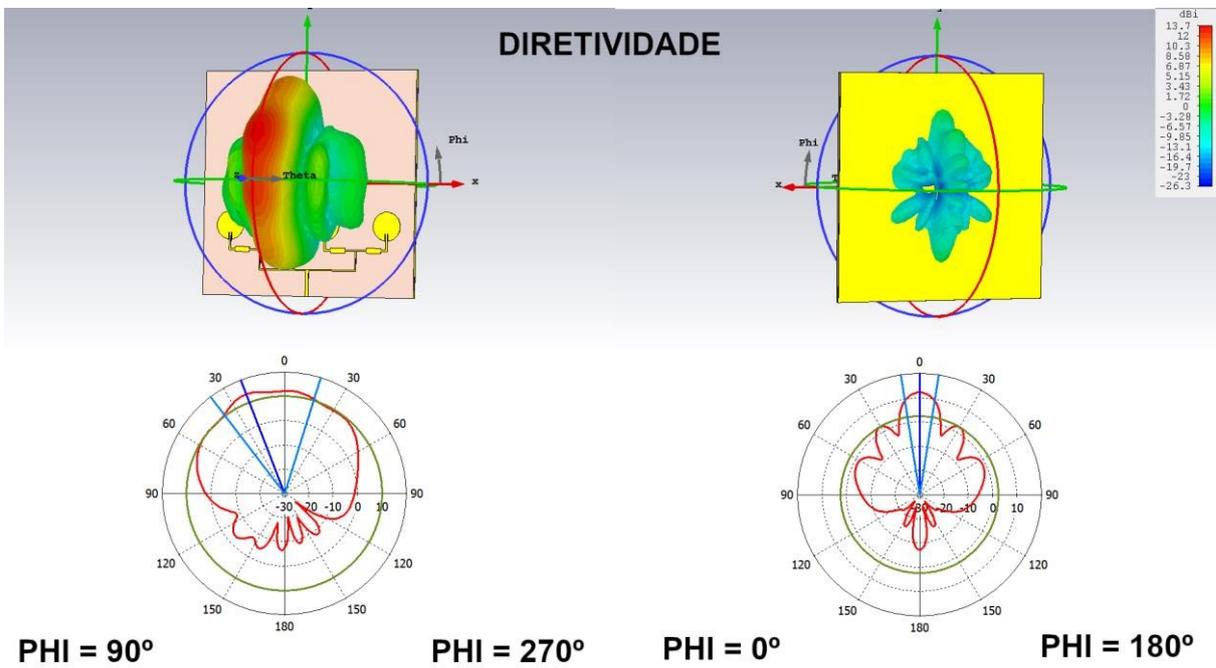
Fonte: Do Autor

Figura 62 - Ganho do Arranjo Circular.



Fonte: Do Autor.

Figura 63 - Diretividade do Arranjo Circular.



Fonte: Do Autor.

7.4 Comparação das Estruturas

Nessa parte é feito um resumo comparativo entre as estruturas base geradas para escolher como foram as modificações com o intuito de obter uma antena otimizada para redes 5G. A Tabela 1 exibe os resultados obtidos das células metamateriais.

Tabela 1 - Comparativo entre as Células Metamateriais.

Metamaterial	Início da Banda	Fim da Banda	Largura da Banda	S11 em 28 GHz
SRR	25,6040 GHz	30,7640 GHz	5,1600 GHz	-19,1016 dB
ELC	22,4000 GHz	36,6200 GHz	14,2200 GHz	-34,1296 dB

Fonte: Do Autor.

No tocante às antenas, a Tabela 2 as compara no contexto da perda por retorno. A Tabela 3, por sua vez, foca nos valores referentes aos diagramas de radiação em 28 GHz.

Tabela 2 - Comparativo das Antenas pela Perda por Retorno.

Antena	Início da Banda	Fim da Banda	Largura da Banda	S11 em 28 GHz
<i>Patch</i> Retangular	27,3800 GHz	28,6300 GHz	1,2500 GHz	-22,0146 dB
<i>Patch</i> Circular	27,4100 GHz	28,6300 GHz	1,2200 GHz	-17,5193 dB
Arranjo Circular	26,0000 GHz	26,3000 GHz	0,3000 GHz	---
	27,2800 GHz	28,5500 GHz	1,2700 GHz	-30,2136 dB
Arranjo Retangular	27,0500 GHz	30,0000 GHz	2,9500 GHz	-25,7233 dB

Fonte: Do Autor.

Vale salientar que na Tabela 2 são mostradas apenas as bandas de sintonia que interessam para a aplicação nas redes 5G.

Tabela 3 - Comparativo das Antenas pelo Diagrama de Radiação.

Antena	Maior Ganho	Maior Diretividade	Eficiência
<i>Patch</i> Retangular	7,8 dB	8,18 dBi	91,62%
<i>Patch</i> Circular	7,07 dB	7,87 dBi	83,18%
Arranjo Circular	13,4 dB	13,7 dBi	93,33%
Arranjo Retangular	12,3 dB	12,8 dBi	89,13%

Fonte: Do Autor.

As antenas escolhidas para participar dos testes com metamateriais foram os dois arranjos, pois os mesmos se mostraram superiores no contexto da perda por retorno e no contexto do diagrama de radiação. O único parâmetro em que isso não ocorreu foi na eficiência, no qual os arranjos ficaram praticamente no mesmo patamar que a antena com *patch* retangular. Por fim, salienta-se que as modificações foram feitas usando as duas células metamateriais, pois todas tiveram resultados satisfatórios.

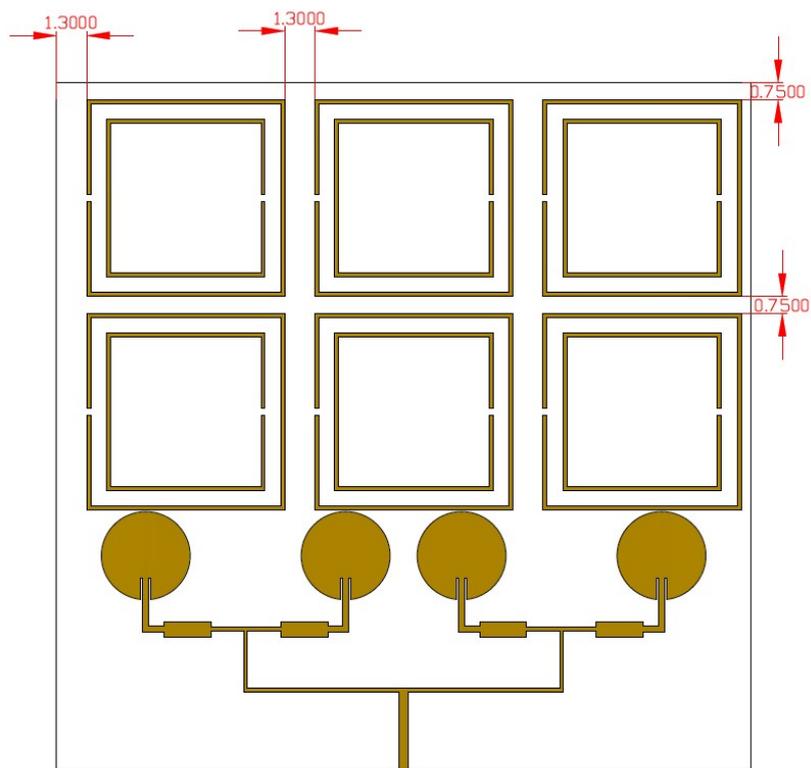
8 ARRANJOS MODIFICADOS

A seguir serão exibidas as melhores modificações com cada metamaterial aplicado em cada arranjo. Como de praxe, será exibido o *layout*, seguido do gráfico da perda por retorno e posteriormente os diagramas de radiação para 28 GHz. No final, serão escolhidos os dois melhores arranjos para receberem o retificador.

8.1. Arranjo Circular

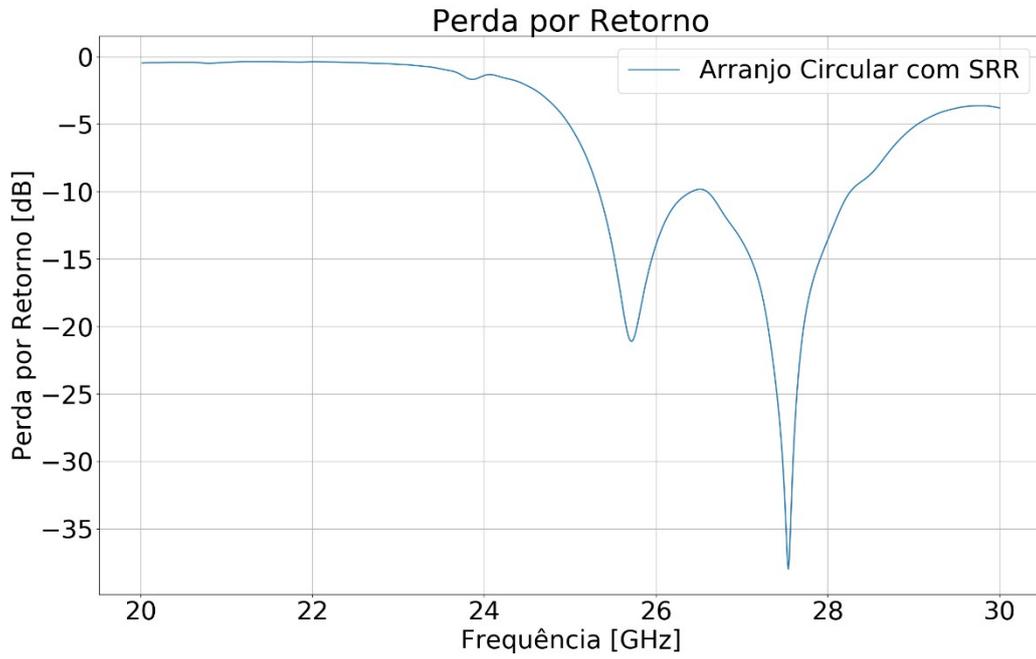
8.1.1. Modificação com SRR

Figura 64 - Layout do Arranjo Circular com Células SRR.



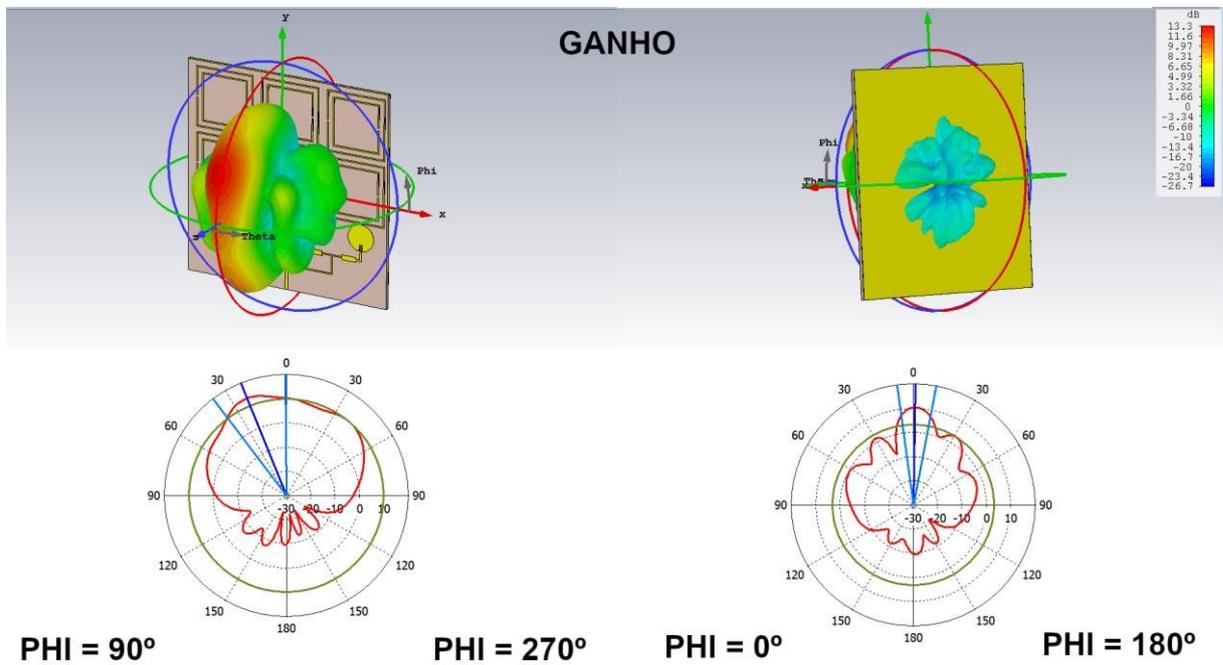
Fonte: Do Autor.

Figura 65 - Perda por Retorno do Arranjo Circular com Células SRR.



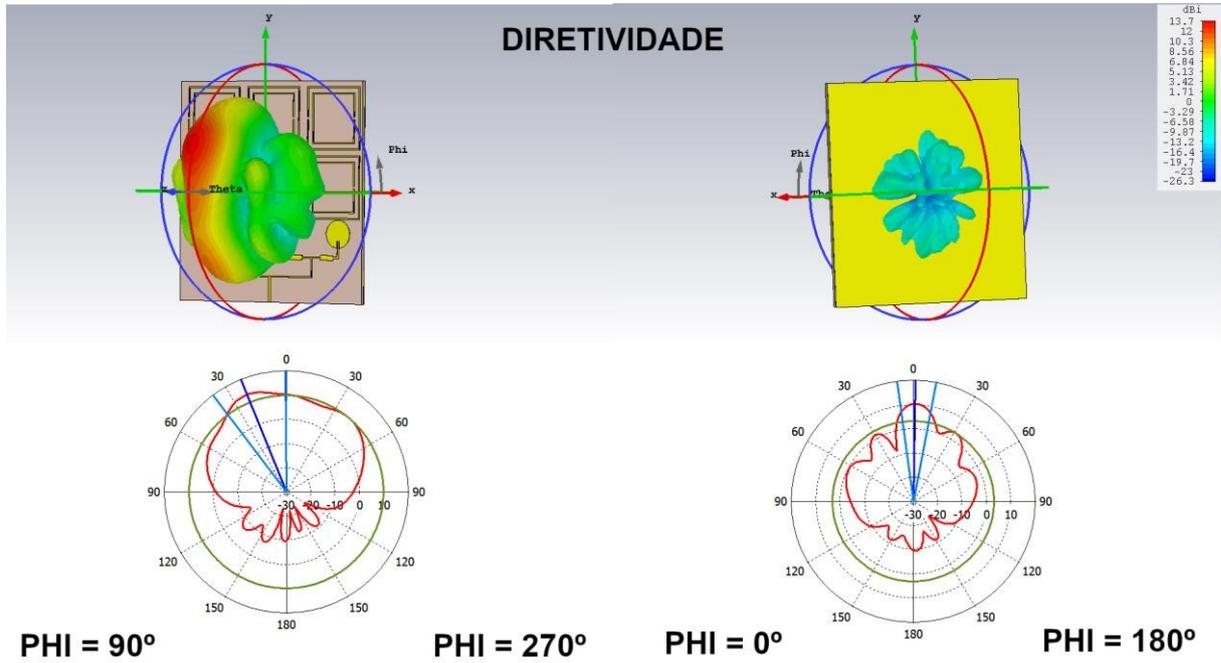
Fonte: Do Autor.

Figura 66 - Ganho do Arranjo Circular com Células SRR.



Fonte: Do Autor.

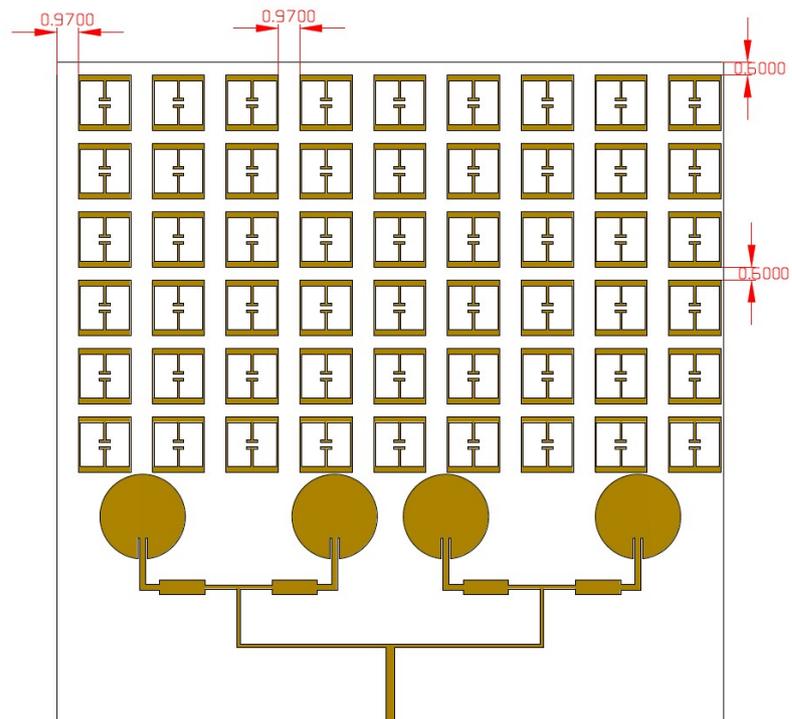
Figura 67 - Diretividade do Arranjo Circular com Células SRR.



Fonte: Do Autor

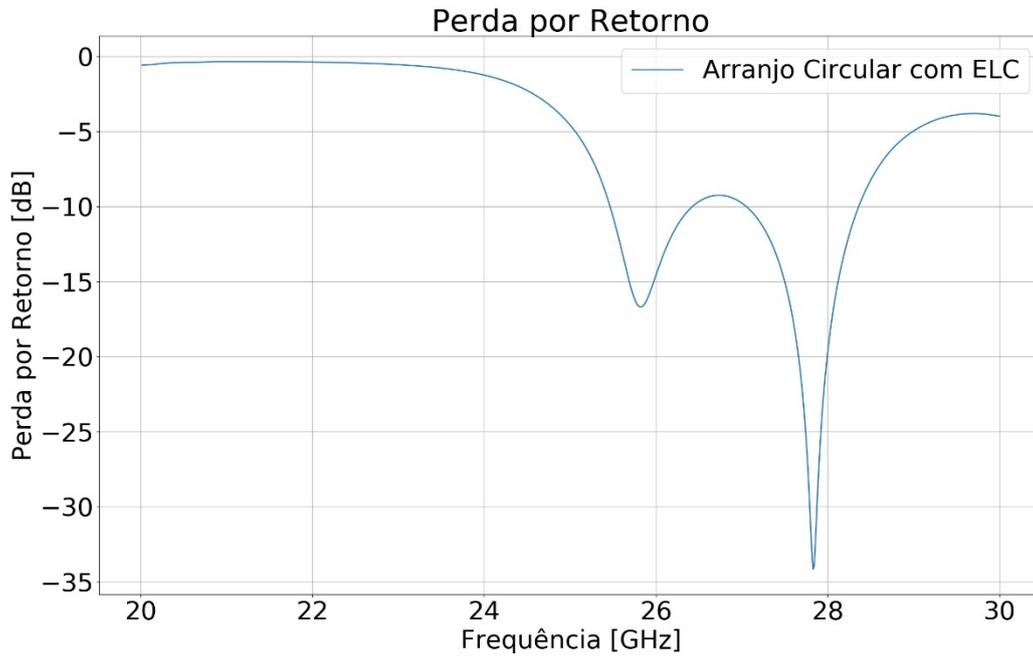
8.1.2. Modificação com ELC

Figura 68 - Layout do Arranjo Circular com Células ELC



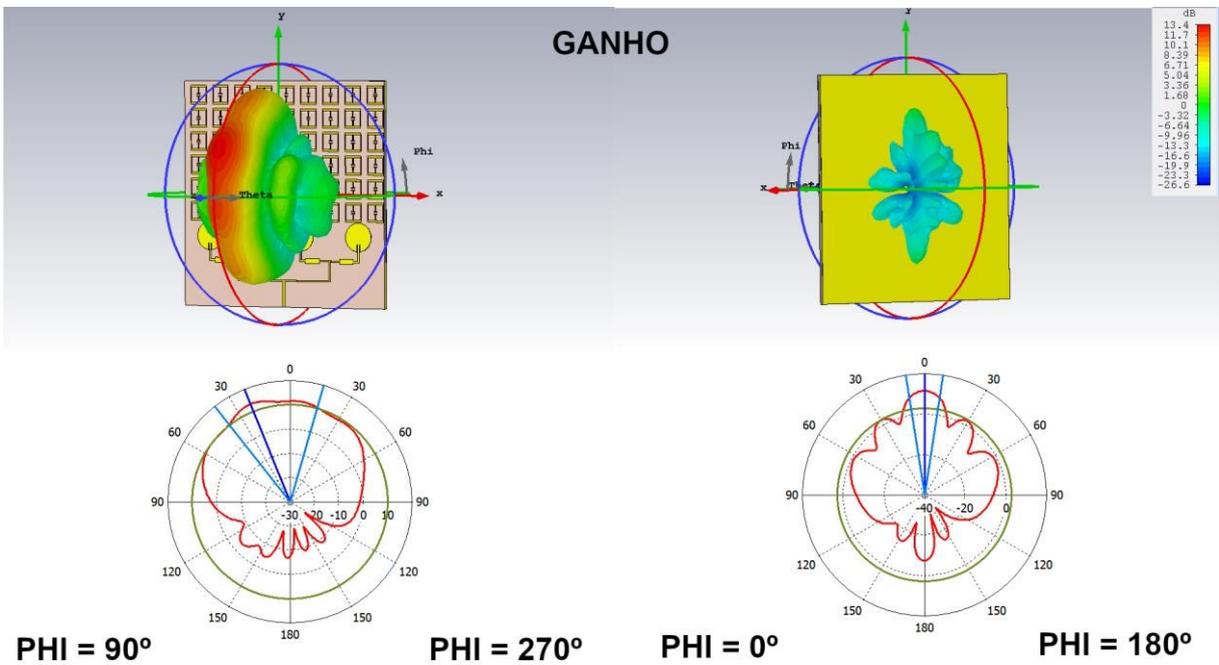
Fonte: Do Autor.

Figura 69 - Perda por Retorno do Arranjo Circular com Células ELC.



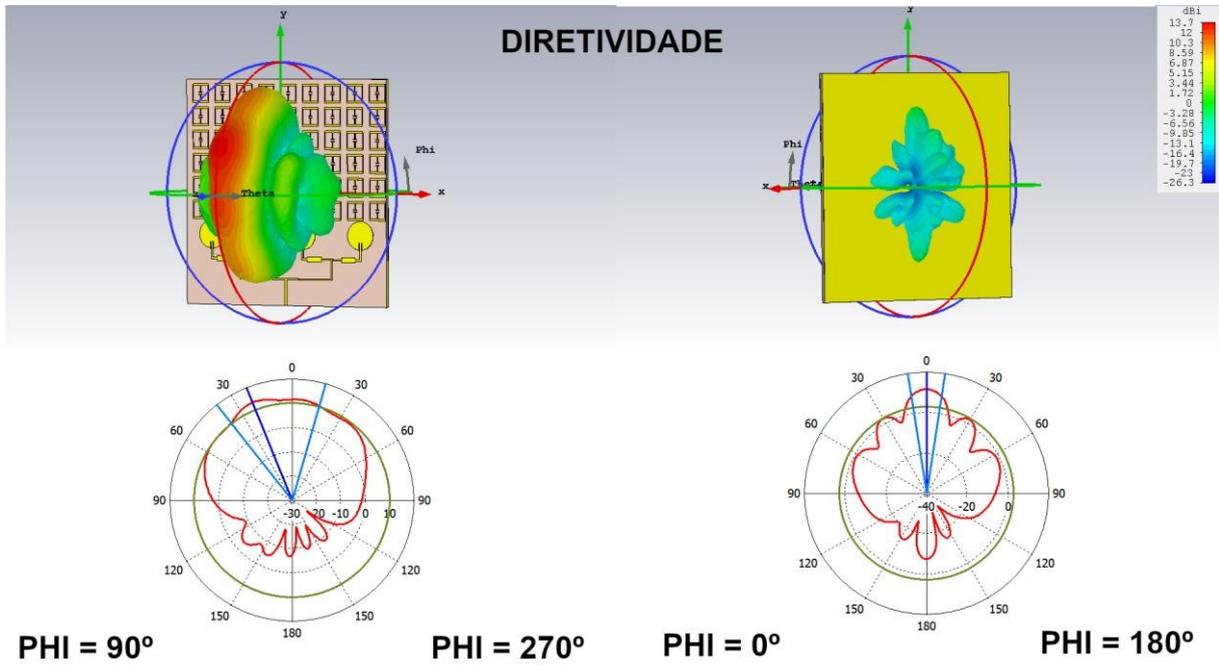
Fonte: Do Autor.

Figura 70 - Ganho do Arranjo Circular com Células ELC.



Fonte: Do Autor.

Figura 71 - Diretividade do Arranjo Circular com Células ELC.

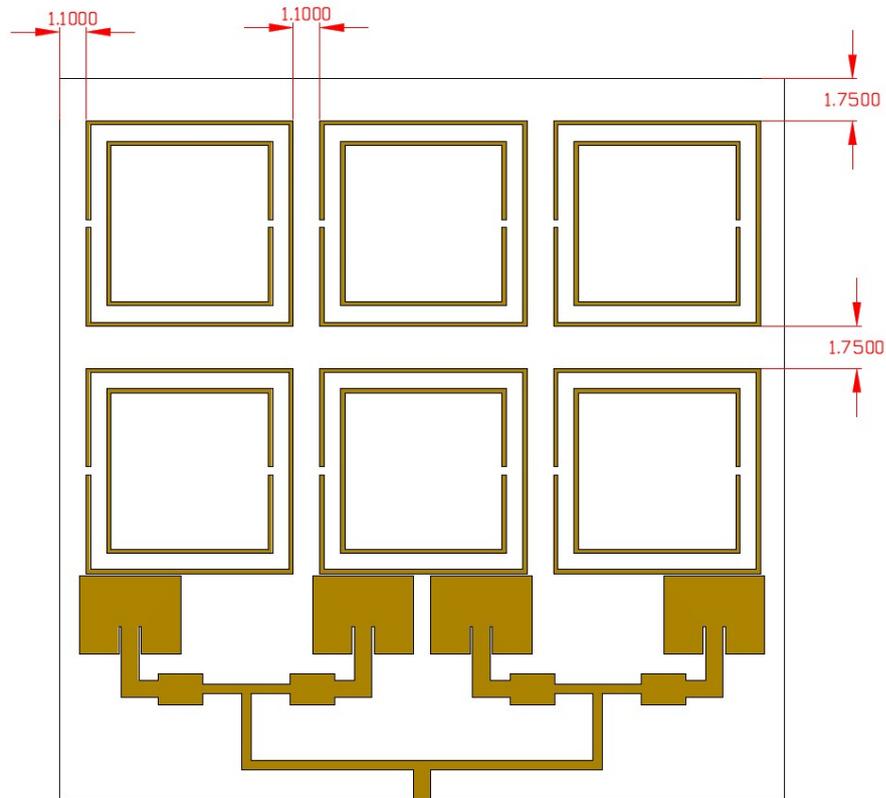


Fonte: Do Autor.

8.2. Arranjo Retangular

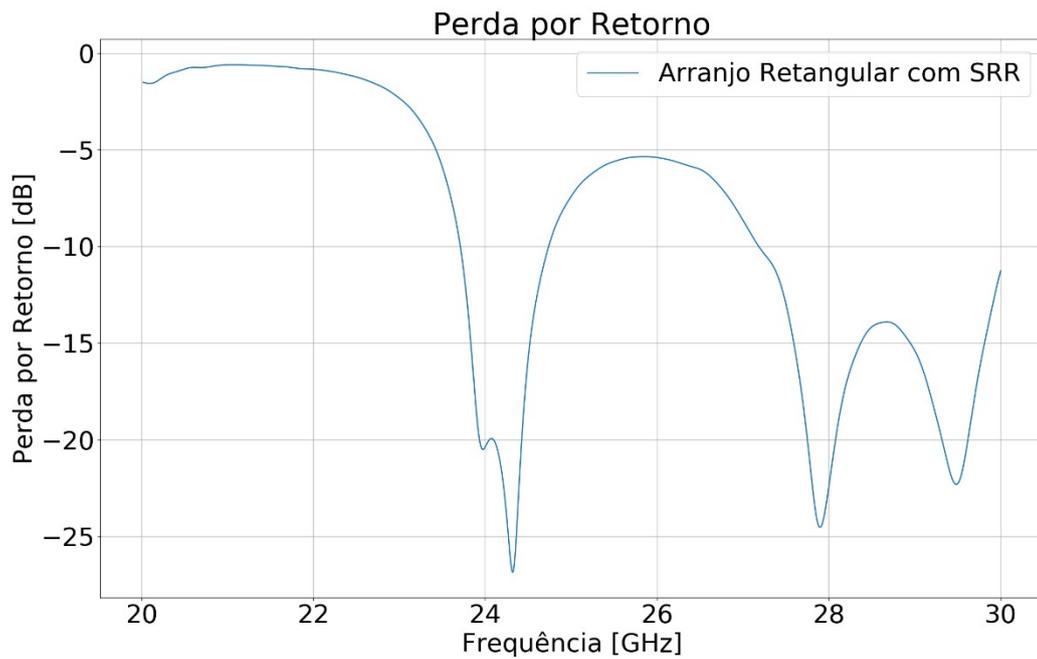
8.2.1. Modificação com SRR

Figura 72 - Layout do Arranjo Retangular com Células SRR.



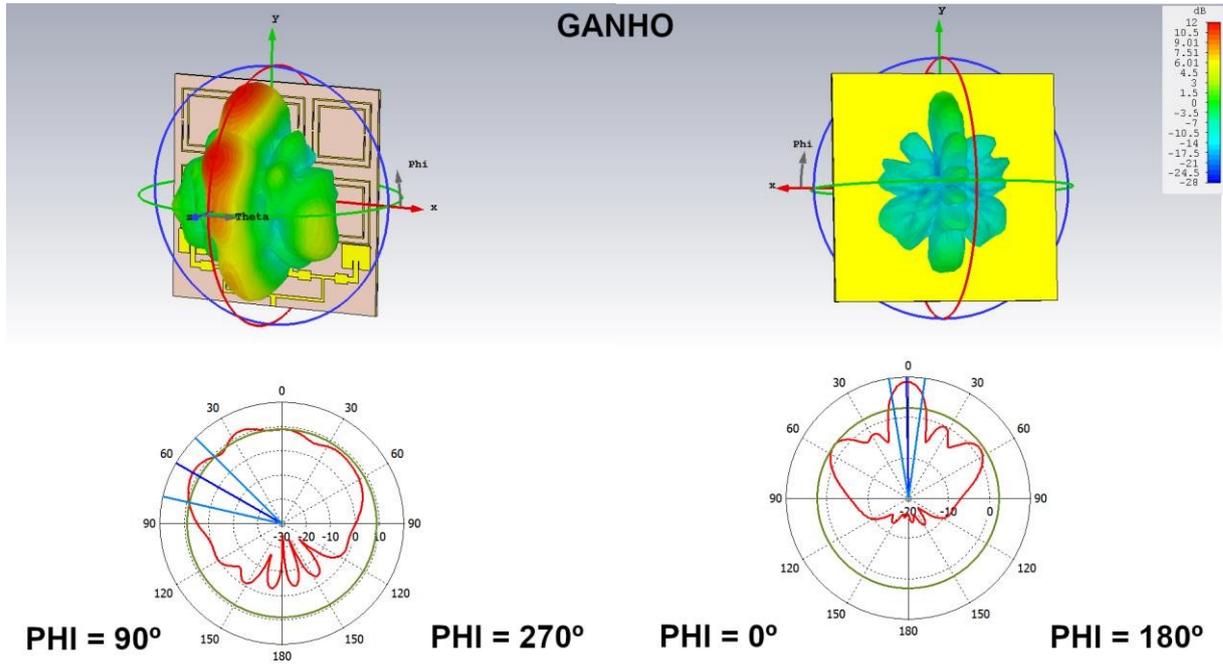
Fonte: Do Autor.

Figura 73 - Perda por Retorno do Arranjo Retangular com Células SRR.



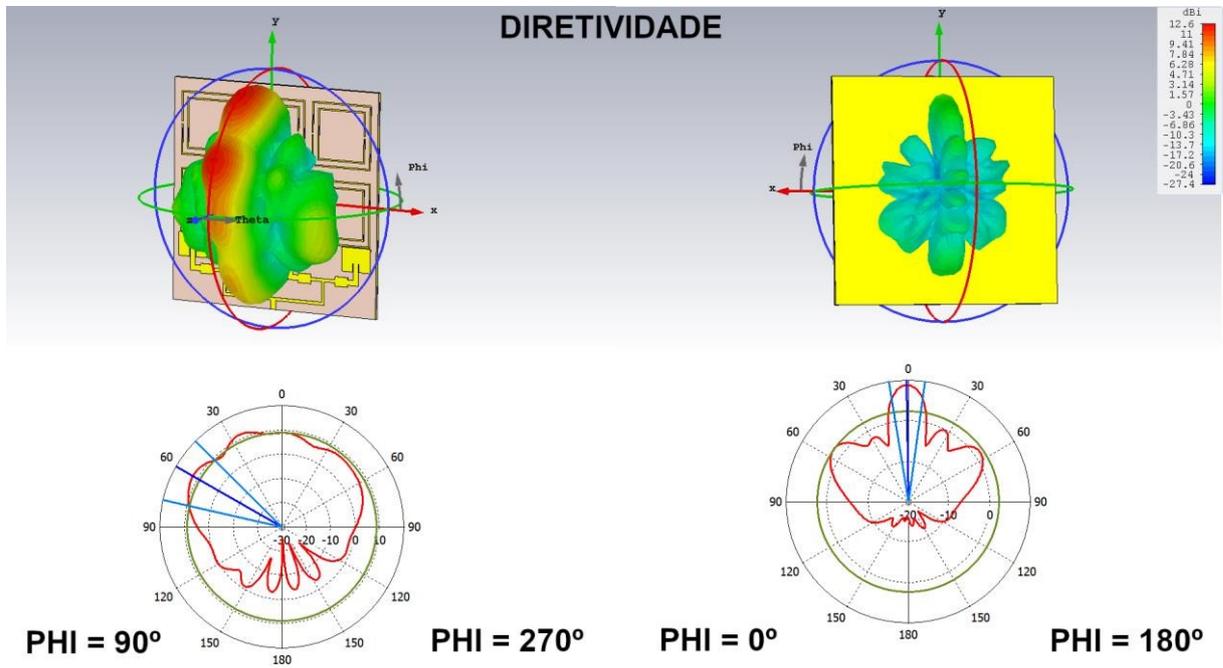
Fonte: Do Autor.

Figura 74 - Ganho do Arranjo Retangular com Células SRR.



Fonte: Do Autor.

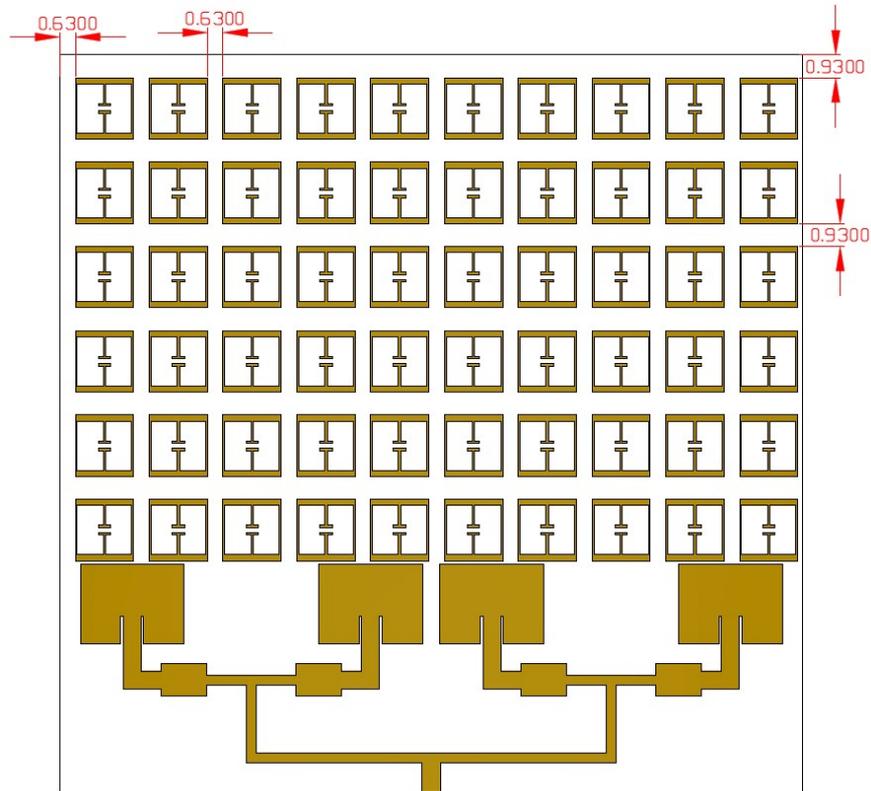
Figura 75 - Diretividade do Arranjo Retangular com Células SRR.



Fonte: Do Autor.

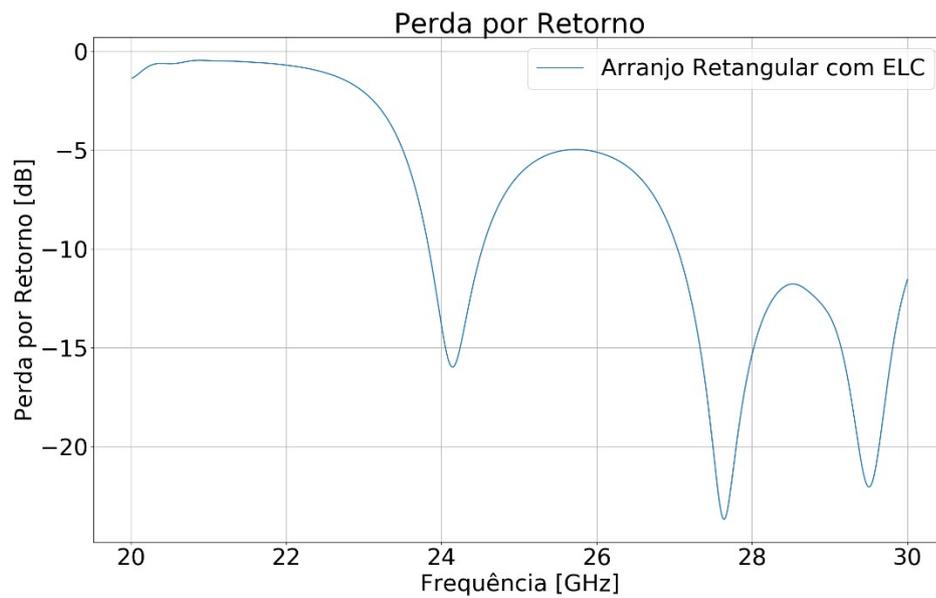
8.2.2. Modificação com ELC

Figura 76 - Layout do Arranjo Retangular com Células ELC.



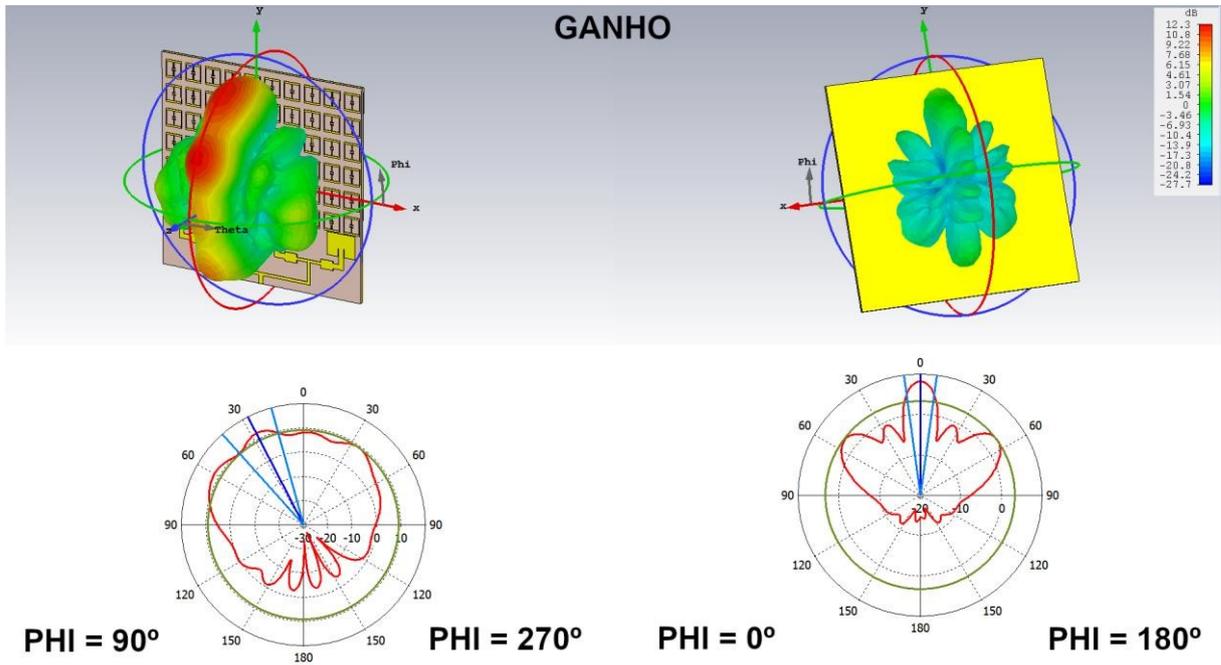
Fonte: Do Autor.

Figura 77 - Perda por Retorno do Arranjo Retangular com Células ELC.



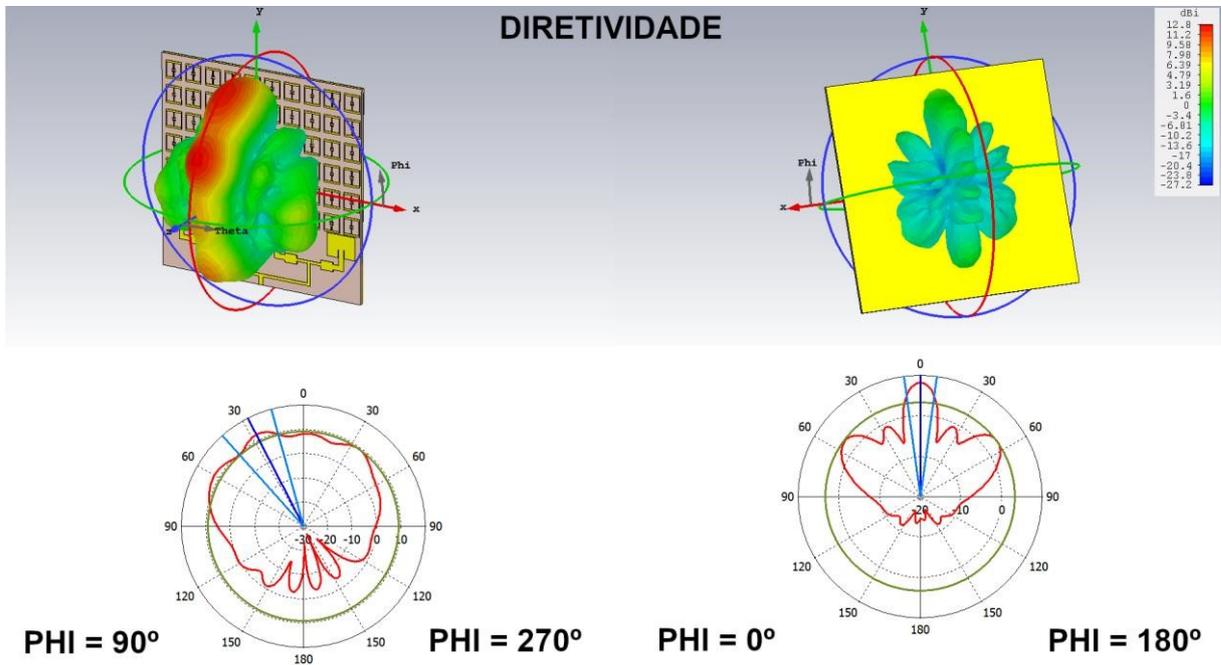
Fonte: Do Autor.

Figura 78 - Ganho do Arranjo Retangular com Células ELC.



Fonte: Do Autor.

Figura 79 - Diretividade do Arranjo Retangular com Células ELC.

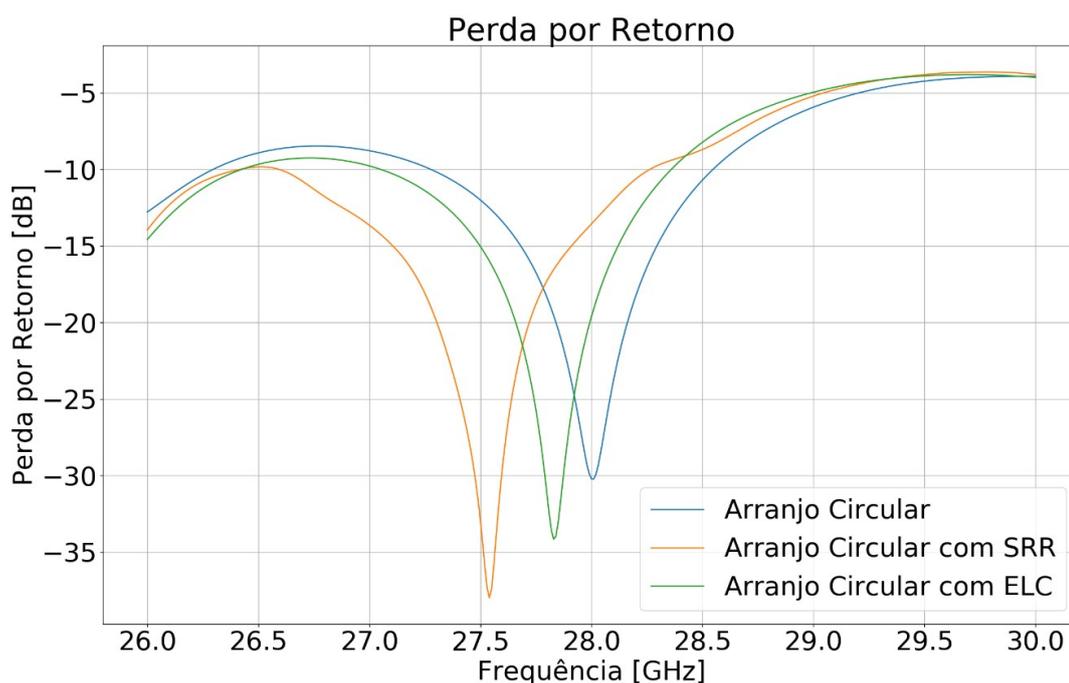


Fonte: Do Autor.

8.3. Comparação das Estruturas

A Figura 80 compara as curvas de perda por retorno dos arranjos circulares, tanto os modificados quanto o original. Salienta-se ainda que a Tabela 4 quantifica as bandas de sintonia que estão inseridas na faixa para redes 5G em conjunto com a perda por retorno em 28 GHz.

Figura 80 - Perda por Retorno dos Arranjos Circulares.



Fonte: Do Autor.

Tabela 4 - Bandas de Sintonia dos Arranjos Circulares.

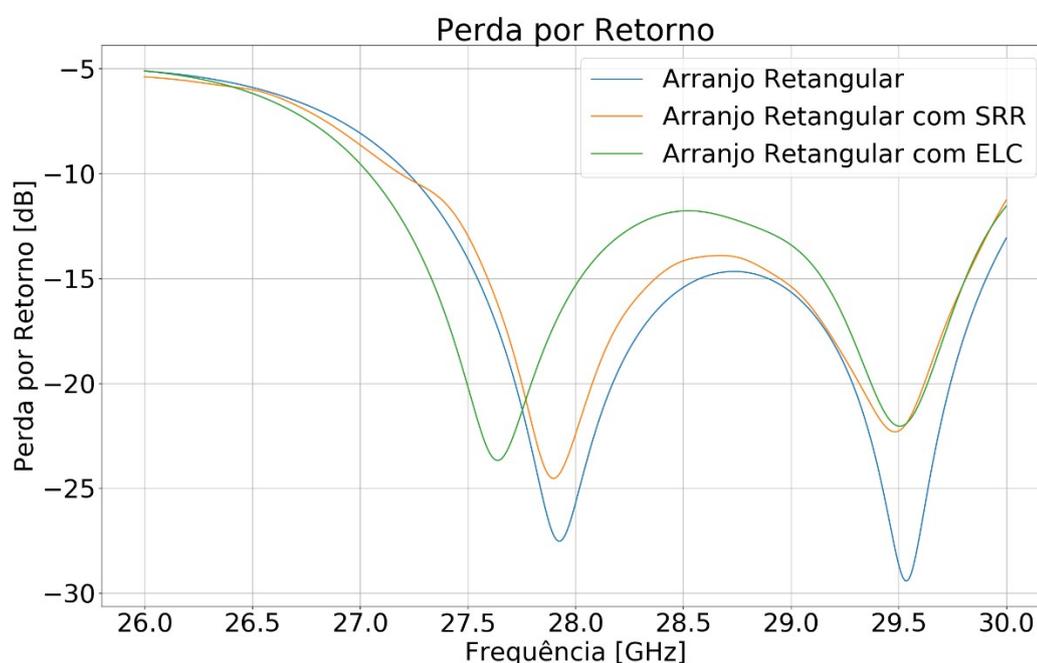
Arranjo	Início da Banda	Fim da Banda	Largura da Banda	Perda por Retorno em 28 GHz
Arranjo Circular	26,0000 GHz	26,3000 GHz	0,3000 GHz	-
	27,2800 GHz	28,5500 GHz	1,2700 GHz	-30,2136 dB
Arranjo Circular com SRR	26,0000 GHz	26,4200 GHz	0,42 GHz	-
	26,6000 GHz	28,2700 GHz	1,6700 GHz	-13,5667 dB

Arranjo Circular	26,0000 GHz	26,4300 GHz	0,4300 GHz	-
com ELC	27,0500 GHz	28,3600 GHz	1,3100 GHz	-19,6289 dB

Fonte: Do Autor

Seguindo a mesma metodologia, a Figura 81 e a Tabela 5 mostram, respectivamente, as curvas de perda por retorno dos arranjos retangulares e as bandas de sintonia em conjunto com a perda por retorno em 28 GHz.

Figura 81 - Perda por Retorno dos Arranjos Retangulares.



Fonte: Do Autor.

Tabela 5 - Bandas de Sintonia dos Arranjos Retangulares

Antena	Início da Banda	Fim da Banda	Largura da Banda	Perda por Retorno em 28 GHz
Arranjo Retangular	27,2300 GHz	30,0000 GHz	2,7700 GHz	-25,7233 dB

Arranjo				
Retangular com SRR	27,1900 GHz	30,0000 GHz	2,8100 GHz	-22,4362 dB
Arranjo				
Retangular com ELC	27,0500 GHz	30,0000 GHz	2,9500 GHz	-15,3400 dB

Fonte: Do Autor.

Para melhor embasar tanto a análise quanto a escolha dos arranjos para receber o retificador, é exibida abaixo a Tabela 6, que contém a largura de banda útil total dentro da faixa 5G de cada arranjo e sua respectiva eficiência com base nos diagramas de radiação exibidos previamente.

Tabela 6 - Análise de Todos os Arranjos em 28 GHz.

Antena	Largura de Banda Útil na Faixa 5G	Maior Ganho em 28 GHz	Maior Diretividade em 28 GHz	Eficiência em 28 GHz
Arranjo Circular	1,5700 GHz	13,4 dB	13,7 dBi	93,33%
Arranjo Circular com SRR	2,0900 GHz	13,3 dB	13,7 dBi	91,20%
Arranjo Circular com ELC	1,7400 GHz	13,4 dB	13,7 dBi	93,33%
Arranjo Retangular	2,7700 GHz	12,3 dB	12,8 dBi	89,13%
Arranjo Retangular com SRR	2,8100 GHz	12,0 dB	12,6 dBi	87,10%
Arranjo Retangular com ELC	2,9500 GHz	12,3 dB	12,8 dBi	89,13%

Fonte: Do Autor.

Através da Tabela 6 é possível comparar os efeitos de cada tipo de célula metamaterial nos arranjos. Observa-se uma tendência de os metamateriais aumentarem a banda de sintonia

do arranjo em relação ao arranjo de referência. Além disso, mostrou-se repetitivo também o fato de as células SRR diminuírem a eficiência do arranjo em cerca de 2%.

No âmbito do *patch* circular, o arranjo com células SRR apresentou a maior largura de banda útil, conseguindo ainda manter a eficiência em 91,20%. Portanto, esse arranjo foi testado com o retificador pelo fato de conseguir manter uma largura de banda maior que 2 GHz e eficiência acima de 90%.

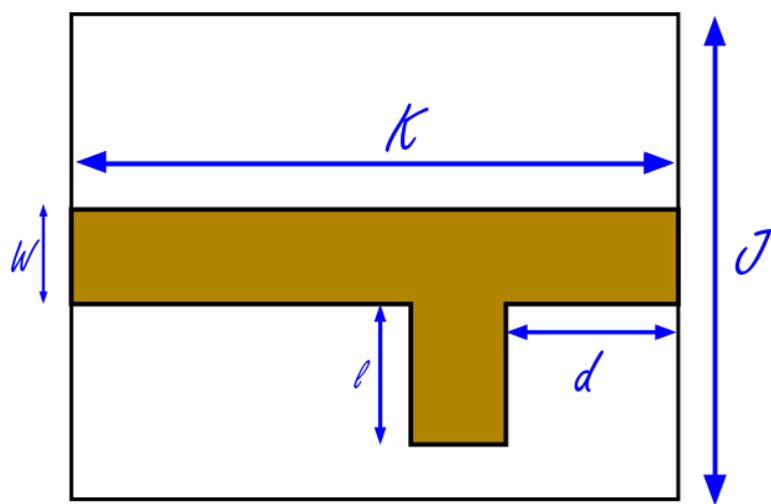
No que tangencia o arranjo retangular, embora a eficiência de todos os três tenha ficado abaixo de 90%, o arranjo modificado com células ELC foi levado para os testes seguintes pelo motivo de ter conseguido a maior largura de banda de todos os seis.

Dessa forma, portanto, estão finalizados os testes dessa etapa do trabalho, demonstrando que as células metamateriais conseguiram aumentar a largura de banda dos arranjos com um pedágio de cerca de 2% na eficiência para o pior caso.

9. RETIFICADOR

O retificador foi feito nos softwares CST Microwave Studio 2016 e CST Design Studio 2016. No primeiro foi desenhado o toco para casar impedância, o qual é mostrado na Figura 82 e as dimensões são detalhadas na Tabela 7.

Figura 82 - Toco para Casamento de Impedâncias



Fonte: Adaptado de Pozar, 2011.

Tabela 7 - Dimensões do Toco

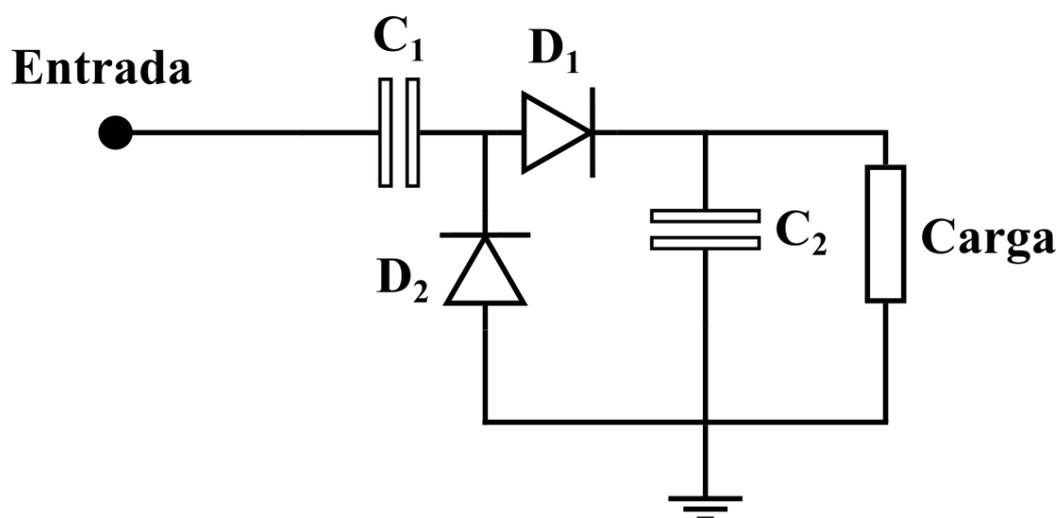
Dimensão	Valor
d	0,4865 mm
l	9,8947 mm
K	10,0000 mm
W	0,4066 mm
J	30,0000 mm

Fonte: Do Autor.

Vale ainda salientar que esses valores para o toco foram obtidos através dos algoritmos de simulação do próprio software, com exceção de K e W que correspondem às dimensões do substrato dos arranjos.

A segunda etapa do procedimento foi otimizar os valores dos capacitores no modelo proposto de modo que o toco consiga casar a impedância da antena com o circuito. A topologia do retificador é recordada na Figura 83.

Figura 83 - Topologia do Circuito Retificador



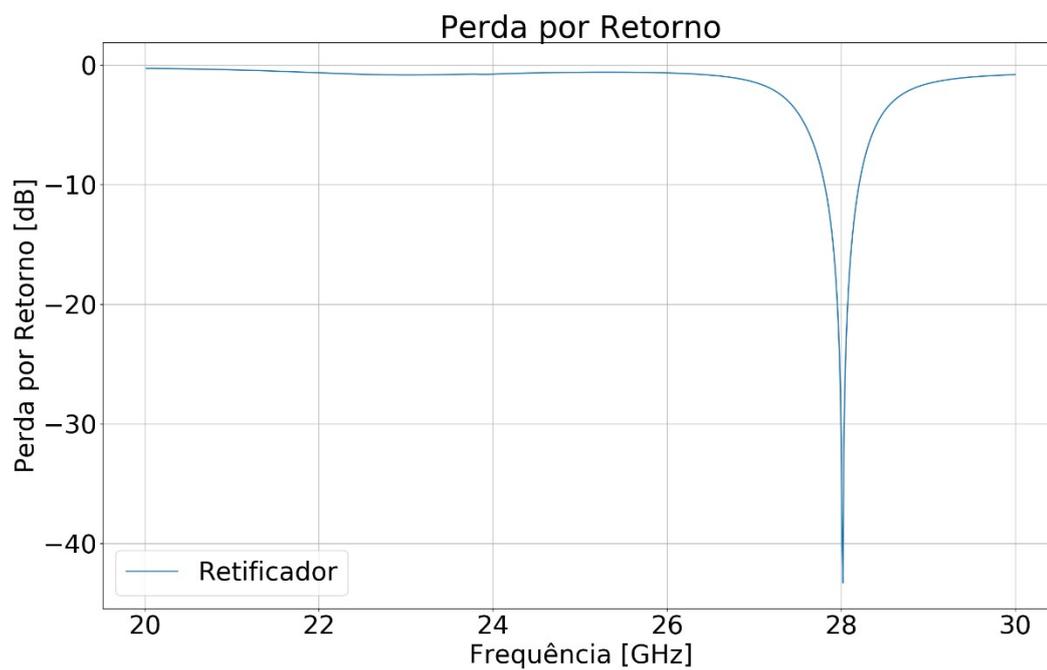
Fonte: Adaptado de Zhang, *et al.*, 2015.

O valor de C_1 é 4,49 pF e C_2 possui capacitância de 5,71 pF. Por fim, o valor de carga é de 400 Ω , em consonância com um dos valores testados em (ZHANG, *et al.*, 2015).

Uma vez que os testes da topologia foram feitos no artigo supracitado, o presente trabalho tratou apenas de casar as impedâncias do circuito e da antena, de modo que o retificador pudesse operar na banda desejada. Com base nessa premissa, o gráfico da perda por retorno é mostrado na Figura 84.

Na Figura 84 é possível ver que a banda de atuação do retificador é de 27,81 GHz a 28,21 GHz, cuja menor perda por retorno é de -43,31 dB em 28,02 GHz. Além disso, nota-se também que a largura de banda de atuação é de 0,40 GHz. Vale acrescentar ainda que, conforme pode ser visto nos trabalhos de (ZHANG, *et al.*, 2015), (ZHANG, *et al.*, 2017) e (PANG, *et al.*, 2018), a correta modelagem da carga influencia no comportamento do retificador, logo, é importante ter conhecimento da mesma para melhorar o processo de otimização. Por fim, a Tabela 8 sumariza os resultados encontrados e os valores utilizados.

Figura 84 - Perda por Retorno do Toco com Retificador.



Fonte: Do Autor.

Tabela 8 - Dados do Retificador

Grandeza	Valor
Capacitor 1	4,4896 pF
Capacitor 2	5,7104 pF
Carga	400 Ω
Banda de Sintonia	27,8100 GHz a 28,2100 GHz
Largura de Banda	0,4000 GHz
Menor S11	-43,3088 dB em 28,0200 GHz

Fonte: Do Autor.

10. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma vez que o presente trabalho é composto por vários objetivos específicos, cada um deles será abordado separadamente para melhor discutir os resultados obtidos.

No que tangencia os procedimentos por trás do projeto de antenas planares, foi mostrado a fundamentação que alicerça os cálculos, sendo explanado os conceitos envolvendo *microstrips*, *patches*, casamento de impedâncias e diagramas de radiação. No âmbito da formulação, foi enaltecido também a natureza multivariável dos fenômenos físicos envolvidos, introduzindo, portanto, a necessidade de técnicas de otimização.

No contexto das técnicas de otimização, foram usados os algoritmos de otimização presentes nos softwares empregados para dimensionar as antenas. Além disso, foi utilizado um algoritmo genético, criado pelo autor, para dimensionar as células metamateriais que foram aplicadas nas antenas. Em ambos os casos, vale ressaltar que os algoritmos usados aumentam a produtividade do projetista, pois, toda a parte multivariável é trabalhada pelo computador, ficando a cargo do humano responsável apenas validar, ou descartar, a resposta da máquina.

No tocante aos aspectos construtivos do algoritmo genético, o mesmo é capaz de otimizar tanto as dimensões quanto o substrato da célula metamaterial. É importante comentar que esse último recurso, mesmo não tendo sido usado por questões de necessidade, não se encontra nos algoritmos do software, ou seja, caso a otimização seja realizada pelo software de simulação, o substrato não entraria nesse processo. Uma outra característica interessante é a escalabilidade do algoritmo genético, pois, ele foi construído de modo a permitir que outras pessoas possam modelar outros tipos de células para serem otimizadas sem, necessariamente, precisar conhecer os conceitos por trás de um algoritmo genético. Em outras palavras, o que foi apresentado nesse trabalho é um algoritmo que pode ser empregado e adaptado para outros contextos.

Os metamateriais sugeridos pelo algoritmo genético, por sua vez, tiveram seus efeitos demonstrados nas seções do presente trabalho, onde foi possível constatar que os mesmos ampliaram a largura de banda das antenas. Há ainda um outro detalhe que merece um comentário: no conjunto das células metamateriais empregadas, o impacto na eficiência foi, no pior caso, negligenciável, ficando apenas com uma variação em torno de 2 pontos percentuais para baixo. De qualquer forma, com o emprego dessas células, os arranjos passaram a sintonizar em uma banda maior dentro do espectro almejado.

Em termos quantitativos, os arranjos modificados escolhidos foram o circular com células SRR, apresentando um aumento de 0,52 GHz na largura de banda e queda de 2% na eficiência, alcançado um patamar de 91,20%, e o arranjo retangular com células ELC, o qual teve um aumento de 0,18 GHz em sua largura de banda e manteve a eficiência igual a do arranjo original: 89,13%. Como é possível observar, em ambos os casos os arranjos foram aprimorados com os metamateriais.

Ao relacionar a melhoria proporcionada pelos metamateriais com os *layouts* dos arranjos, observa-se que o custo adicional das estruturas modificadas é irrisório em virtude da própria natureza do processo de fabricação das antenas planares. Afinal, conforme foi visto nas primeiras seções, essas antenas são fabricadas usando técnicas de circuito impresso, apresentando, portanto, baixo custo de produção.

Após as ponderações do custo benefício dos *layouts* modificados com células metamateriais, o passo seguinte foi adicionar o circuito retificador. Conforme apresentado nas seções anteriores desse trabalho, o circuito em si possui uma impedância que não necessariamente é igual a da antena, fazendo necessário uma etapa de casamento de impedâncias, onde foi aplicado um toco. O toco, por sua vez, teve suas dimensões determinadas através de um processo de otimização, conseguindo uma largura de banda de 0,40 GHz empregando uma topologia já discutida na literatura.

O gráfico da perda por retorno do retificador mostra uma largura de banda bem menor em comparação com o do arranjo em si. Isso acontece em virtude da própria natureza do método empregado, pois o toco é focado em uma frequência. Todavia, em acordo com o que foi abordado anteriormente nesse trabalho, a eficiência do retificador cai à medida que o número de componentes senoidais aumenta, logo, esse estreitamento na sintonia do circuito é importante para não depreciar a eficiência do retificador.

No tocante aos algoritmos criados pelo autor, aqueles cujos códigos fonte são grandes estão hospedados no GitHub, de modo que o link para o repositório se encontra na seção de referências. Para os demais algoritmos, em virtude de seu tamanho reduzido, o código fonte é apresentado nos anexos desse trabalho, possibilitando, portanto, que as funções aqui programadas possam ser usadas em trabalhos futuros por qualquer pesquisador ou outro profissional interessado no tema.

Outro ponto a ser abordado nessa seção é a fabricação dos protótipos. Acerca desse tópico, pretendia-se fabricar os protótipos e atestar o funcionamento das estruturas apresentadas. Para tal, foi estabelecido contato com pesquisadores tanto da Universidade

Federal do Juiz de Fora – UFJF – como da Universidade Federal do Ouro Preto – UFOP. No primeiro caso a equipe informou que a máquina se encontra em manutenção, sendo inviável fabricar as estruturas. Já no segundo, por sua vez, a máquina disponível não possui resolução suficiente para fabricar os arranjos, pois algumas dimensões são bem pequenas. Dessa forma, portanto, os protótipos não foram fabricados em virtude da indisponibilidade de equipamentos capazes de lidar com as estruturas projetadas.

Ainda no contexto da prototipagem, avaliou-se a tentativa de fabricar apenas o retificador, pois as dimensões do toco possibilitam que ele seja feito de forma artesanal. Porém, após entrar em contato com lojas de componentes eletrônicos e verificar a indisponibilidade de diodos *Schottky*, essa possibilidade foi descartada.

Conclui-se esse trabalho, portanto, alegando que os objetivos foram cumpridos. Dessa forma, está aqui apresentada a topologia de uma *rectenna* capaz de operar em redes 5G. Salienta-se ainda que todo o processo metodológico se encontra descrito nesse documento. Por fim, é importante informar que, como próximos passos, além de fabricar os protótipos aqui propostos, há a pretensão de o autor criar seus próprios algoritmos de simulação, acarretando assim em maior controle na configuração dos algoritmos e, conseqüentemente, amplia-se o campo de atuação das técnicas de otimização.

REFERÊNCIAS

AL-FALAHY, N.; ALANI, O. Y. Technologies for 5G Networks: Challenges and Opportunities. **IEEE Computer Society**, Fevereiro 2017. 12-20.

ALSAGER, A. F. Design and Analysis of Microstrip Patch Antenna Arrays, Janeiro 2011. 80.

ANATEL. Aprovada destinação de faixas de frequências de 2,3 GHz e 3,5 GHz. **ANATEL**, 2019. Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br/institucional/ultimas-noticiass/2278-aprovada-destinacao-de-faixas-de-frequencias-de-2-3-ghz-e-3-5-ghz>>. Acesso em: 01 Junho 2019.

ARAUJO, H. X. D. Projeto e Implementação de Câmara GTEM – Giga Hertz Transverse Electromagnetic Para Testes de Compatibilidade Eletromagnética de Circuitos e Sistemas Eletrônicos, Campinas, 31 Janeiro 2012.

AYN, ; RAO, N.; RAO, M. Design and Analysis of High Gain 2x1 and 4x1 Circular Patch Antenna Arrays for 2.4 GHz Applications. **International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology**, 8 Agosto 2017. 8p.

BALANIS, C. **Antenna Theory: Analysis and Design**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.

CHATURVEDI, P. K. **Microwave, Radar and RF Engineering: with Laboratory Manual**. [S.l.]: Springer, 2018.

EICHLER, J. Electrically Small Antennas - Reliable Design and Verification, 25 Outubro 2018. Disponível em: <<https://www.cst.com/solutions/article/electrically-small-antennas>>. Acesso em: 19 Janeiro 2019.

ENERGOUS. WattUp from Energous. **Youtube**, 2016. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=6INH8o6GLec&feature=youtu.be>>. Acesso em: 11 Março 2019.

FORTUNA, B.; KARLA SILVA, H.; MENDES, L. A. M. Telefonía Celular: Os Recursos e a Portabilidade. **Faculdade Santos Dumont**, 2009. Disponível em: <<http://fsd.edu.br/revistaeletronica/arquivos/2Edicao/artigo13.pdf>>.

GUELBER, E. F. Aplicações Da Tecnologia Metamaterial Em Dispositivos, Ouro Branco, Julho 2014. Trabalho de Conclusão de Curso.

HEATON, J. **Artificial Intelligence for Humans: Nature-inspired Algorithms**. [S.l.]: [s.n.], v. 2, 2014.

LACERDA, C. M. D. S. PyAG. **GitHub**, 2018. Disponível em: <<https://github.com/kennynuylly/pyag>>. Acesso em: 14 Maio 2019.

LACERDA, C. M. D. S. Analisador CST. **GitHub**, 2019. Disponível em: <<https://github.com/kennynuylly/analizador-cst>>. Acesso em: 19 Maio 2019.

LADAN, S.; WU, K. High Efficiency Low-Power Microwave Rectifier for Wireless Energy Harvesting. **IEEE**, 9 Março 2013.

LIMBERGER, P.. Projeto De Antenas Multibandas Modificadas Com Metamateriais Para A Futura Quinta Geração De Telefonia Móvel, Palmas, 2017. 78.

LINDEN, R. **Algoritmos Genéticos**. 3ª. ed. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2012.

MARCHETTI, N. Towards the 5th Generation of Wireless Communication Systems, Fevereiro 2017. Disponível em: <<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1702/1702.00370.pdf>>. Acesso em: 16 Dezembro 2018.

MASUD, P. M. A methodology for designing 2.45 GHz wireless rectenna system utilizing Dickson Charge Pump with Optimized Power Efficiency., Waterloo, 2013.

MATSUNAGA, T.; NISHIYAMA, E.; TOYODA, I. 5.8-GHz Stacked Differential Rectenna Suitable for Large-Scale Rectenna Arrays With DC Connection. **IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 63, NO. 12**, 2015. 5944-5949.

MICROSOFT. The Component Object Model. **Microsoft | Windows Dev Center**, 2018. Disponível em: <<https://docs.microsoft.com/en-us/windows/desktop/com/the-component-object-model>>. Acesso em: 21 Março 2019.

MIT. Converting Wi-Fi signals to electricity with new 2-D materials. **MIT News**, 2019. Disponível em: <<http://news.mit.edu/2019/converting-wi-fi-signals-electricity-0128>>. Acesso em: 11 Março 2019.

NGUYEN, D. C. et al. Simulation, design and fabrication of 4-element and 32-element rectenna array applying in the wireless power transmission. **International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)**, 2015. 522-527.

NIOTAKI, K. et al. Optimized Design of Multiband and Solar Rectennas. **WiSNet**, 2014. 31-33.

NOKIA SIEMENS NETWORK. 2020: Beyond 4G Radio Evolution for Gigabit Experience. **Nokia Siemens Network**, 2011.

NORIEGA, R. M. D. A Evolução de Darwin. **Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz**. Disponível em: <http://www.esalq.usp.br/lepse/imgs/conteudo_thumb/A-Evolu--o-de-Darwin.pdf>. Acesso em: 13 Maio 2019.

PANG, P. et al. **A High-Efficiency 35GHz Rectenna with compact structure for rectenna arrays**. IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP 2018). [S.l.]: [s.n.]. 2018. p. 303-305.

POZAR, D. **Microwave Engineering**. 4ª. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011.

PUSHKAR, P.; GUPTA, R. A Design Rule for ELC Resonator. **IEEE ICIECS**, 2015.

RAPPAPORT, T. **Comunicações sem Fio: Princípios e Práticas**. São Paulo: Pearson, 2009.

RÜTSCHLIN, M. 5G Antenna Design for Mobile Phones, 29 Novembro 2018. Disponível em: <<https://www.cst.com/solutions/article/5g-mobile-phone-antenna-design>>. Acesso em: 16 Dezembro 2018.

SAHU, S. K.; MISHRA, C. S.; PALAI, G. Design of SRR and its impact on Effective Permeability Due to Change in Dimensions. **International conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPEs)**, 2016. 804-806.

SAYUYIGBE, S. et al. Design and Analysis of Three-Dimensionalized ELC Metamaterial Unit Cell. **IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTERS**, VOL. 8, 2009.

SCHURIG, D.; MOCK, J. J.; SMITH, D. R. Electric-field-coupled Resonators for Negative Permittivity Metamaterials. **APPLIED PHYSICS LETTERS**, 2006.

SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. **Microelectronic Circuits**. Oxford: Oxford University Press, 2009.

SILVA NETO, A. S. E. Antenas de Microfita para 4G, 5G e Arranjo de Antenas Cilíndricas, Natal, 22 Agosto 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/22045/1/AlmirSouzaESilvaNeto_TES E.pdf>. Acesso em: 19 Dezembro 2018.

SYMEONIDIS, S. CST-MATLAB-API. **Zenodo**, 2018. Disponível em: <<https://zenodo.org/record/1237969#.XJTbjShKhPY>>. Acesso em: 22 Março 2019.

TELECOM HALL. O que é Antena? **Telecom Hall**, 20 Março 2011. Disponível em: <<http://www.telecomhall.com/br/o-que-e-antena.aspx>>. Acesso em: 20 Dezembro 2018.

TIRKEY, S. R. et al. Design of Flexible Meandered Loop Antennas with CSRR and SRR for Implantable Applications. **IEEE WiSPNET**, p. 1595-1598, 2016.

VESELAGO, V. G. The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of ϵ and μ . **Soviet Physics USPEKHI**, p. 509-514, 1968.

ZHANG, B. H. et al. A 2.45 GHz Dielectric Resonator Rectenna for Wireless Power Transmission. **IEEE**, Wuhan, 2017.

ZHANG, J. et al. **A Double-sided Rectenna Design for RF Energy Harvesting**. IEEE International Wireless Symposium (IWS 2015). [S.l.]: [s.n.], 2015.

ANEXO I – DIMENSIONAMENTO DA LINHA MICROSTRIP

#Autor: Cícero Matheus, 2018
#Equações de Pozar, 2011

```
import numpy as np
```

```
z0 = float(input("Digite a impedância característica da linha:"))
er = float(input("Digite a permissividade relativa do substrato:"))
d = float(input("Digite a altura do substrato em [mm]:"))
```

```
A = z0/60 * np.sqrt((er+1)/2) + (er-1)/(er+1) * (0.23 + 0.11/er)
B = (377*np.pi)/(2*z0*np.sqrt(er))
```

```
razao = (8*np.exp(A))/(np.exp(2*A) - 2)
```

```
if razao < 2:
```

```
    print("W = %.4f [mm]" %(razao*d))
```

```
else:
```

```
    razao = 2/np.pi * (B - 1 - np.log(2*B - 1) + (er-1)/(2*er)*(np.log(B-1) +
0.39 - 0.61/er))
```

```
    print("W = %.4f [mm]" %(razao*d))
```

ANEXO II – DIMENSIONAMENTO DE PATCH RETANGULAR

#Autor: Cícero Matheus, 2018

#Adaptado de Alsager, 2011

```
import numpy as np
import scipy.constants as cte, scipy.integrate as integral
from scipy.special import jv as besselj

fr = float(input("Digite a frequência de ressonância desejada em [Hz]: "))
er = float(input("Digite a permissividade relativa do substrato: "))
d = float(input("Digite a espessura do substrato em [mm]: "))
Rin = float(input("Digite a impedância do Patch [ohms]: "))
d /= 1000 # Converter para [m]

k0 = 2*cte.pi*fr*np.sqrt(cte.epsilon_0*cte.mu_0) #Número de onda no vácuo

#Dimensionamento do Patch
L1 = cte.c/(2*fr) * np.sqrt(2/(er+1))
eeff = (er+1)/2 + (er-1)/2 * 1/np.sqrt(1 + 12*d/L1)
deltaL = 0.412*d* ((eeff +0.3)*(L1/d + 0.264))/((eeff - 0.258)*(L1/d + 0.8))
L2 = 1/(2*fr*np.sqrt(eeff*cte.mu_0*cte.epsilon_0)) - 2*deltaL

print("L1 = %.04f [mm]" % (L1*1000))
print("L2 = %.04f [mm]" % (L2*1000))

#Casamento de Impedância
I1_func = lambda x: ((np.sin(k0*L1*np.cos(x)/2)/np.cos(x))**2) * np.sin(x)**3
I1 = integral.quad(I1_func, 0, np.pi)[0]
G1 = I1/(120*cte.pi**2)

G12_func = lambda x: I1_func(x) * besselj(0, k0*L2*np.sin(x))
G12 = 1/(120*cte.pi**2) * integral.quad(G12_func, 0, np.pi)[0]

y0 = (L2/cte.pi)*np.arccos(np.sqrt(2*Rin*(G1+G12)))

print("y0 = %.4f [mm]" %(y0*1000))
```

ANEXO III – DIMENSIONAMENTO DE PATCH CIRCULAR

```
#Autor: Cícero Matheus, 2018
```

```
#Equações de Balanis, 2005
```

```
import numpy as np
```

```
fr = float(input("Digite a frequência de ressonância em [Hz]: "))
```

```
er = float(input("Digite a permissividade relativa do substrato: "))
```

```
d = float(input("Digite a espessura do substrato em [cm]: "))
```

```
F = (8.791e9)/(fr*np.sqrt(er))
```

```
a = F/np.sqrt((1+ (2*d)/(np.pi*er*F) * (np.log((np.pi*F)/(2*d)) + 1.7726)))
```

```
print("a = %.04f [cm]" % (a))
```

ANEXO IV – CÁLCULO DA EFICIÊNCIA DE UMA ANTENA

#Autor: Cícero Matheus, 2019

#Equações de Pozar, 2011

```
ganho = float(input("Ganho [dB]: "))
```

```
diretividade = float(input("Diretividade [dBi]: "))
```

```
ganho = 10**(ganho/10)
```

```
diretividade = 10**(diretividade/10)
```

```
print("Eficiência = %.4f %" %(ganho/diretividade * 100))
```