



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

VINICIUS CAINÃ FÉLIX BARROS

**ALGORITMO GENÉTICO APLICADO PARA OTIMIZAÇÃO
DE ABSORVEDORES DE MICRO-ONDAS INTEGRADOS
COM SUPERFÍCIES SELETIVAS EM FREQUÊNCIA PARA
APLICAÇÕES STEALTH**

Palmas/TO
2022

VINICIUS CAINÃ FÉLIX BARROS

**ALGORITMO GENÉTICO APLICADO PARA OTIMIZAÇÃO
DE ABSORVEDORES DE MICRO-ONDAS INTEGRADOS
COM SUPERFÍCIES SELETIVAS EM FREQUÊNCIA PARA
APLICAÇÕES STEALTH**

Monografia foi avaliada e apresentada à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Elétrica para aprovação na disciplina Projeto de Graduação II.

Orientador: Prof. Dr. Eliel Poggi dos Santos

Palmas/TO
2022

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

- B277a Barros, Vinicius Cainã Félix.
Algoritmo genético aplicado para otimização de absorvedores de micro-ondas integrados com superfícies seletivas em frequência para aplicações *stealth*. / Vinicius Cainã Félix Barros. – Palmas, TO, 2022.
53 f.
Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Elétrica, 2022.
Orientador: Eliel Poggi dos Santos
1. Algoritmo Genético. 2. FSS. 3. Otimização. 4. Stealth. 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).

FOLHA DE APROVAÇÃO

VINICIUS CAINÃ FÉLIX BARROS

ALGORITMO GENÉTICO APLICADO PARA OTIMIZAÇÃO DE ABSORVEDORES DE MICRO-ONDAS INTEGRADOS COM SUPERFÍCIES SELETIVAS EM FREQUÊNCIA PARA APLICAÇÕES STEALTH

Projeto de Graduação foi avaliado e apresentado à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Elétrica, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Data de aprovação: 11 / 02 / 2022

Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente
 Eliel Poggi dos Santos
Data: 11/02/2022 13:50:44-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Eliel Poggi dos Santos, UFT

Documento assinado digitalmente
 KATHY CAMILA CARDOZO OSINSKI SENHORINI
Data: 11/02/2022 16:01:16-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof^ª. Dr^ª. Kathy Camila Cardozo Osinski Senhorini, UFT



Prof. Dr. Ivan Ney Alvizuri Romani, UFT

Palmas, 2022

RESUMO

O presente trabalho apresenta um algoritmo genético desenvolvido para otimização de absorvedores eletromagnéticos a serem utilizados na tecnologia *stealth*, onde o usuário define alguns parâmetros que definem a otimização buscada e etc. Foi usado como base alguns absorvedores obtidos em outros trabalhos para ser decidido os modelos usados assim como quais parâmetros deveriam ser analisados. O programa foi feito com a linguagem Python e teve o tempo de execução baixo quando comparado a simulações de onda completa. O algoritmo conseguiu soluções otimizadas e pode ser utilizado para encontrar parâmetros automaticamente em problemas envolvendo FSS.

Palavras-Chaves: Algoritmo Genético; FSS; Otimização; *Stealth*.

ABSTRACT

The present work shows a genetic algorithm developed to be used in electromagnetic absorbers for stealth technology, in this algorithm the user chooses some parameters that define what kind of optimization the program will look for. The algorithm uses as its first step some absorbers obtained in other works to decide the FSS's models to be used as well as which parameters should be analyzed. The program was made with the language Python and got a low execution time when compared with full-wave analysis method. The algorithm found optimized previous solutions and can be used to find parameters automatically in FSS involving problems.

Palavras-Chaves: Genetic Algorithm; FSS; Optimization; Stealth.

LISTRA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Filtro passa-baixa	16
Figura 2 - Filtro passa-alta	16
Figura 3 - Filtro passa-faixa	17
Figura 4 - Filtro rejeita-faixa	17
Figura 5 - Circuito de Micro-ondas	18
Figura 6 - Arranjo de fitas paralelas	19
Figura 7 - Espiras quadradas	20
Figura 8 - Arranjo absorvedor	20
Figura 9 - Circuito equivalente do absorvedor	21
Figura 10 - Absorvedor de faixa larga	23
Figura 11 - Indivíduo e geração	24
Figura 12 - Cromossomo e <i>crossover</i>	25
Figura 13 - Mutação	26
Figura 14 - Seleção natural	27
Figura 15 - Seleção do AG	28
Figura 16 - Arranjo final	30
Figura 17 - Circuito equivalente do arranjo final	30
Figura 18 - Matrizes ABCD	32
Figura 19 - Cálculo do <i>fitness</i>	34
Figura 20 – Fluxograma do Algoritmo Construído	36
Figura 21 – Intervalos do <i>crossover</i>	38
Figura 22 – Espira Quadrada do Tipo Abertura	42
Figura 23 – Comparação Passa-Faixa	43
Figura 24 – Simulação da FSS passa-faixa no CST de 1 GHz a 25 GHz	43
Figura 25 – Absorção a ser otimizada	45
Figura 26 - Solução otimizada utilizando o 1º método de cálculo de <i>fitness</i>	45
Figura 27– Ressonância e <i>Salisbury's Screen Zone</i> da primeira solução	46
Figura 28- Solução otimizada utilizando o 2º método de cálculo de <i>fitness</i>	47
Figura 29- Ressonância e <i>Salisbury's Screen Zone</i> da segunda solução	48
Figura 30- Solução otimizada utilizando o 3º método de cálculo de <i>fitness</i>	49
Figura 31 - Ressonância e <i>Salisbury's Screen Zone</i> da terceira solução	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AFSS	Absorvedores Baseados em FSS
AG	Algoritmo Genético
CST	<i>Computer Simulation Technology - Studio Suite</i>
RCS	<i>Radar Cross Section</i> (Seção Transversal de Radar)
FSS	Superfície Seletiva em Frequência
RFSS	Superfície Seletiva em Frequência Resistiva

LISTA DE SÍMBOLOS

ϕ	Ângulo de Incidência
A	Coefficiente de Absorção
Γ	Coefficiente de Reflexão
T	Coefficiente de Transmissão
λ	Comprimento de Onda
β	Constante de Fase
k	Constante de Propagação
k_s	Constante de Propagação no Dielétrico
k_0	Constante de Propagação no Vácuo
k_t	Constante de Propagação Transversal
g	Espaçamento Entre as Espiras Quadradas/Fitas Paralelas
F	Função <i>fitness</i>
A_k^n	K-ésimo(a) Gene do Enésimo Indivíduo da Geração A
Z_L	Impedância Após o Dielétrico
Z_{FSS}^{metal}	Impedância da FSS Passa-Faixa
Z_{FSS}^{res}	Impedância da FSS Resistiva
Z_0	Impedância do Vácuo
Z_s	Impedância Intrínseca do Dielétrico
Z_d	Impedância na Entrada do Dielétrico no Absorvedor
Z_p	Impedância na Entrada do Dielétrico no Absorvedor/Transmissor
Z_{in}	Impedância na Superfície do Arranjo
A^n	Enésimo Indivíduo da Geração A
d	Lado Externo da Espira Quadrada

w	Largura das Espiras/Fitas Paralelas
TE	Onda Transversa Elétrica
TM	Onda Transversa Magnética
p	Periodicidade da FSS
ϵ_r	Permissividade Relativa do Dielétrico
ϵ_0	Permissividade Relativa do Vácuo
X_L	Reatância Indutiva do Circuito Equivalente
R_o	Resistência Ótima

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Justificativa.....	13
1.2	Objetivos	14
1.2.1	Objetivo Geral.....	14
1.2.2	Objetivos Específicos	14
1.3	Metodologia	15
2	FILTROS	16
2.1	Classificação de filtros.....	16
2.2	Análise de filtros.....	17
2.2.1	Método do circuito equivalente	19
3	ABSORVEDORES BASEADOS EM FSS (AFSS).....	20
3.1	Absorvedor de faixa larga.....	23
4	ALGORITMO GENÉTICO	24
4.1	Indivíduo, geração.....	24
4.2	Cromossomo e <i>crossover</i>	25
4.3	Mutação	26
4.4	<i>Fitness</i> e seleção	27
4.5	Critério de parada e outras particularidades	28
5	PROPOSTA DE MELHORIA DO RCS DE ANTENA COM AG	29
5.1	Circuito equivalente da FSS e parâmetros S	29
5.2	Funcionamento do arranjo	32
5.3	Cromossomo, mutação, fitness, seleção e critério de parada	33
6	ALGORITMO CONSTRUIDO	35
6.1	Implementação da população inicial	36
6.2	Implementação da seleção e criação de uma nova geração	37
6.3	Implementação do <i>crossover</i>.....	38

6.4	Implementação da mutação.....	39
6.5	Implementação da função <i>fitness</i>	39
7	RESULTADOS	42
7.1	Resultados da camada passa-faixa	42
7.2	Resultados da RFSS e Dielétrico	44
7.2.1	Resultados utilizando o 1º método de cálculo de <i>fitness</i>	45
7.2.2	Resultados utilizando o 2º método de cálculo de <i>fitness</i>	47
7.2.3	Resultados utilizando o 3º método de cálculo de <i>fitness</i>	48
8	CONCLUSÃO.....	50
	REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

A tecnologia *Stealth* sempre está em desenvolvimento já que continuamente se pretende criar meios de diminuir RCS (*Radar Cross Section* ou Seção Transversal de Radar) de objetos, assim como sempre há uma busca por radares capazes de detectar objetos com RCS cada vez menores (MARTINI, *et al.*, 2006). Geralmente alguns objetos, como aeronaves e navios, precisam diminuir sua RCS para diminuir sua visibilidade perante radares, porém esses objetos possuem antenas que devem receber/enviar ondas eletromagnéticas em uma certa faixa de frequência, essas antenas são um empecilho para com a furtividade, pois causam uma grande reflexão na faixa de frequências fora de sua operação (ARCENEUX; AKINS; MAY, 1995).

Um método computacional para otimizar a resposta em frequência de uma FSS (*Frequency Selective Surface* ou Superfície Seletiva em Frequência) a partir da variação dos parâmetros construtivos da mesma, como sua geometria e seus materiais pode ajudar a obter superfícies com propriedades interessantes para diminuir RCS de antenas (KENT; DÖKEN; KARTAL, 2010).

Alguns trabalhos já utilizam o método heurístico muito conhecido chamado de algoritmo genético para resolver problemas relacionados ao eletromagnetismo (JHOSON; RHAHMAT-SAMII, 1997) e também especificamente com aplicações em FSS (OHIRA, *et al.*, 2004). Esse método é muito utilizado para FSS pois esse problema de otimização se trata de uma otimização global (JHOSON; RHAHMAT-SAMII, 1997) e que possui funções analíticas complexas (no caso do circuito equivalente).

1.1 Justificativa

A análise de FSS é uma tarefa que se mostra difícil de ser praticada analiticamente, com isso, há a necessidade da análise a partir da utilização de circuitos equivalentes (GOSH; SRIVASTAVA, 2014) para alcançar uma possível solução do problema que é tratado neste trabalho. Mesmo com o uso de circuitos equivalentes há uma grande dificuldade para se otimizar uma FSS, pois existem muitas variáveis envolvidas, assim como o modelo contém funções trabalhosas de se manipular analiticamente, por isso o uso de uma alternativa heurística se mostra ideal para solucionar este problema, para isso será utilizado um algoritmo genético (AG). O circuito equivalente também é uma escolha mais apropriada quando comparado a simulações de onda completa, pois o

tempo de execução do AG seria muito longo caso fosse utilizado esse tipo de simulação (KENT; DÖKEN; KARTAL, 2010). A busca por uma ótima solução foi direcionada por teorias utilizadas em trabalhos anteriores que tratam acerca da simulação de AFSS (*Absorbers Frequency Selective Surfaces* ou Absorvedores baseados em FSS), pois assim pode se obter um norte quanto a quais parâmetros alterar para alcançar o objetivo, invés de fazê-lo de forma totalmente aleatória, assim como obter um bom ponto de partida.

A motivação do uso de absorvedores se dá pelo fato de que quando as FSS não possuem a característica de absorver, apesar de diminuírem RCS, são facilmente contornadas por sistemas de radares mais avançados, pois refletem muita radiação eletromagnética (COSTA; MONORCHIO, 2012). Além disso, essas superfícies (que não são absorvedores) precisam atender outros requisitos, como por exemplo, o seu formato tendo que ser moldado de acordo com o objeto onde será aplicado (CHEN; FU, 2014).

1.2 Objetivos

Este trabalho visa otimizar um absorvedor de onda eletromagnética para diminuição da RCS de antenas a serem utilizadas de modo furtivo.

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo a otimização de um absorvedor de ondas eletromagnéticas, o comportamento do absorvedor desejado caracteriza-se pela absorção máxima fora da faixa de operação de uma antena (aqui a faixa escolhida foi entre 4,2 GHz e 4,9 GHz) e transmissão máxima nesta faixa (LIGUO, LI *et al.*, 2013). Também se busca uma estrutura com a mínima espessura possível.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Encontrar um arranjo que transmita na frequência da antena e absorva numa larga faixa fora da faixa de operação da antena. Essa será a geração inicial no AG;
- Obter os circuitos equivalentes das camadas do arranjo, ou seja, da superfície seletora de frequência resistiva (RFSS), dielétrico, e da FSS

passa faixa;

- Obter o circuito equivalente de todo o arranjo junto com seus parâmetros S;
- Aplicação de um algoritmo genético para encontrar os parâmetros que otimizam a resposta em frequência do arranjo.

1.3 Metodologia

A metodologia consistiu em primeiramente determinar as melhorias desejadas (que serviram no cálculo do *fitness* do AG) assim como algumas FSS que foram usadas como base de partida. Foram determinados os parâmetros a serem variados usando como base estudos anteriores, como (COSTA; MONORCHIO, 2010), (COSTA; MONORCHIO, 2012) etc.

Após isso foi aplicado o AG para obter resultados ótimos para diminuição do RCS de antenas. Com o *feedback* dos resultados do AG os parâmetros iniciais do algoritmo foram mudados, assim como novos parâmetros foram adicionados ao mesmo, após um resultado satisfatório foi utilizado um *software* que utilizam outros métodos computacionais bem estabelecidos para validar o resultado alcançado pelo AG.

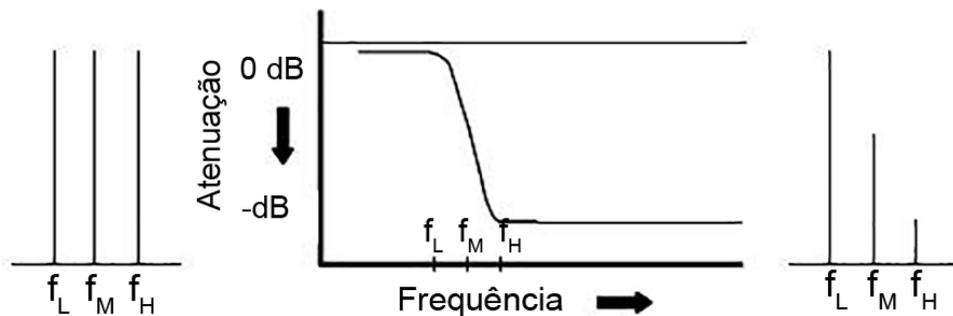
2 FILTROS

Filtros são elementos que em sua entrada recebem sinais que são selecionados de acordo com uma frequência, em uma faixa o sinal é atenuado/rejeitado em outra é transmitido (PRAMANICK; BHARTIA, 2016).

2.1 Classificação de filtros

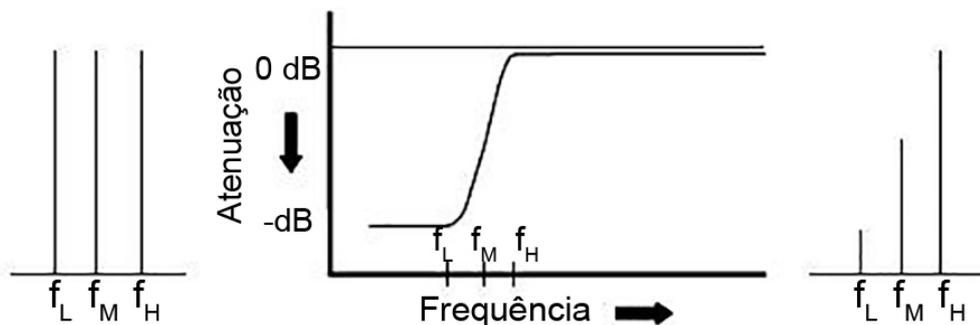
Os filtros são classificados em 4 tipos, passa-baixa, passa-alta, passa-faixa e rejeita-faixa, que são ilustrados respectivamente nas figuras 1 a 4. Devido a uma característica intrínseca a filtros (critério de Paley-Wiener) não se pode obter filtros ideais, ou seja, que rejeita totalmente uma faixa de frequência e transmite totalmente uma faixa imediatamente vizinha ou vice-versa (PRAMANICK; BHARTIA, 2016), então a transição ocorre de forma gradual.

Figura 1 - Filtro passa-baixa



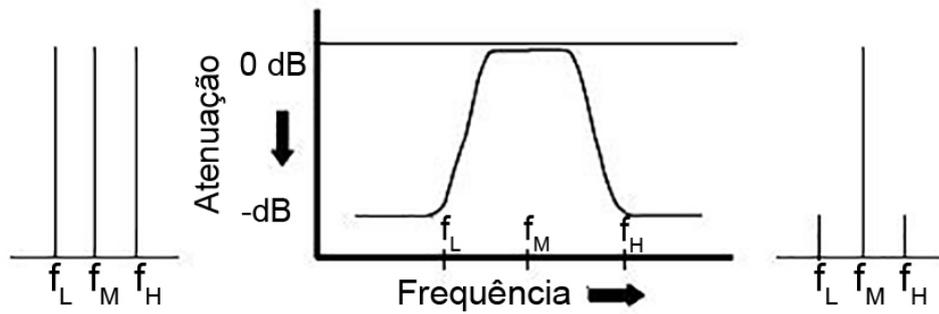
Fonte: Adaptado de (PRAMANICK; BHARTIA, 2016)

Figura 2 - Filtro passa-alta



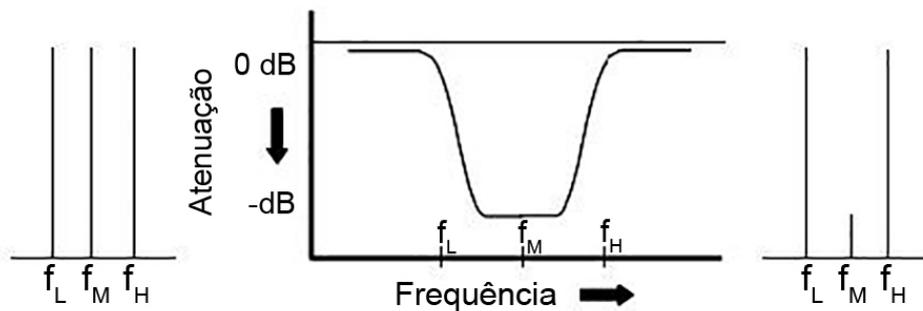
Fonte: Adaptado de (PRAMANICK; BHARTIA, 2016)

Figura 3 - Filtro passa-faixa



Fonte: Adaptado de (PRAMANICK; BHARTIA, 2016)

Figura 4 - Filtro rejeita-faixa



Fonte: Adaptado de (PRAMANICK; BHARTIA, 2016)

2.2 Análise de filtros

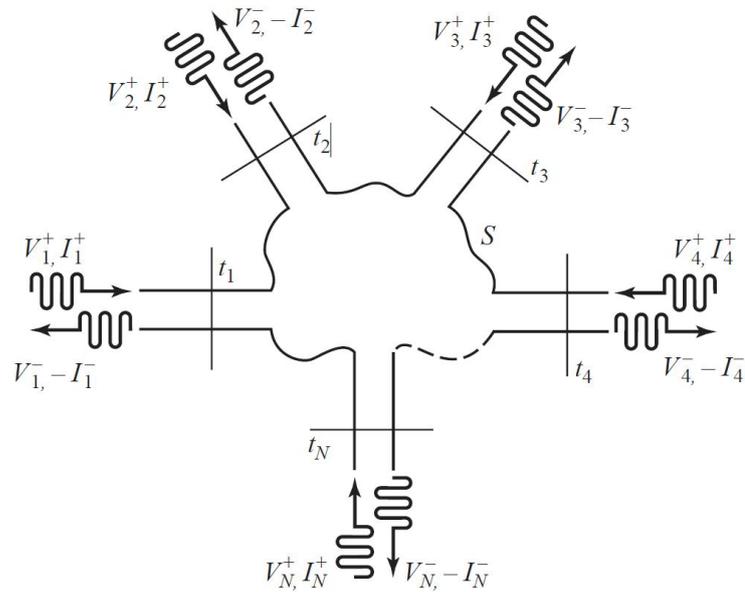
Para ser mais direto, foi tratado neste trabalho somente a análise de filtro de duas portas. A análise de filtros eletromagnéticos pode ser feita a partir de 3 modelos: matriz impedância/admitância, matriz de espalhamento e matriz ABCD (POZAR, 2011). As três formas foram úteis para a obtenção dos resultados das superfícies seletivas em frequência analisadas neste trabalho.

Na análise de filtros considera-se que toda porta tem um sinal recebido (V_n^+, I_n^+) e outro refletido (V_n^-, I_n^-), representados nas equações (1) e (2) (POZAR, 2011), como ilustrado na figura 5:

$$V_n = V_n^+ + V_n^- \quad (1)$$

$$I_n = I_n^+ + I_n^- \quad (2)$$

Figura 5 - Circuito de Micro-ondas



Fonte: (POZAR, D. M., 2011)

As matrizes de impedância, espalhamento e ABCD (matrizes 2x2) são mostradas respectivamente, nas equações (3), (4) e (5).

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ V_2^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_2^+ \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

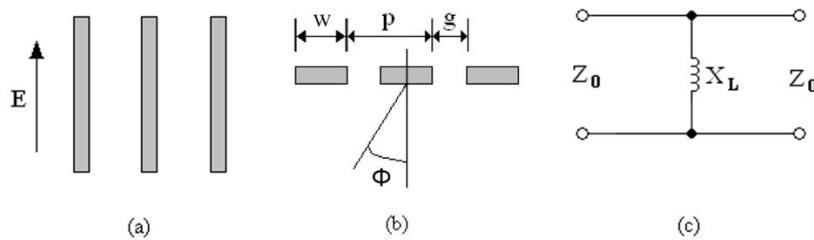
É possível achar relações entre as matrizes. Por exemplo, pode-se encontrar S_{21} em função de Z_{nn} e A, B, C, D , ver equação (6), o que foi muito útil para este trabalho, sendo Z_0 a impedância em série com a fonte (POZAR, 2011):

$$S_{21} = \frac{2}{A + \frac{B}{Z_0} + CZ_0 + D} \quad (6)$$

2.2.1 Método do circuito equivalente

O método do circuito equivalente para FSS é muito útil no contexto desse trabalho, pois demanda bem menos poder computacional quando comparado a uma simulação de onda completa assim como proporciona uma interpretação física do comportamento da FSS mais intuitiva (COSTA; MONORCHIO, 2010). O modelo mais simples, representado na figura 6, é de um arranjo de fitas paralelas o arranjo é composto por fitas espaçadas g entre si, com periodicidade p , com largura w e recebe uma onda com ângulo de incidência ϕ . As equações (7) a (10) representam matematicamente o circuito desse arranjo. Circuitos equivalentes de geometrias mais complexas podem ser encontrados pela manipulação dessa formulação (CAMPOS, 2008). Esse modelo se encaixa perfeitamente na análise de filtros pelo fato de fornecer as impedâncias que compõem a matriz impedância de um filtro.

Figura 6 - Arranjo de fitas paralelas



Fonte: (CAMPOS, 2008)

$$\frac{X_L}{Z_0} = F(p, w, \lambda, \phi) = \frac{p \cos \phi}{\lambda} \left\{ \ln \left[\operatorname{cosec} \left(\frac{\pi w}{2p} \right) \right] + G(p, w, \lambda, \phi) \right\} \quad (7)$$

$$G(p, w, \lambda, \phi) = \frac{\frac{1}{2}(1 - \ell^2) \left[\left(1 - \frac{\ell^2}{4}\right) C_+ + C_- + 4\ell^2 C_+ C_- \right]}{\left(1 - \frac{\ell^2}{4}\right) + \ell^2 \left(1 + \frac{\ell^2}{4} - \frac{\ell^4}{8}\right) C_+ + C_- + 2\ell^6 C_+ C_-} \quad (8)$$

$$C_{\pm} = \frac{1}{\sqrt{1 \pm \frac{2p \operatorname{sen} \phi}{\lambda} - \left(\frac{p \cos \phi}{\lambda}\right)^2}} - 1 \quad (9)$$

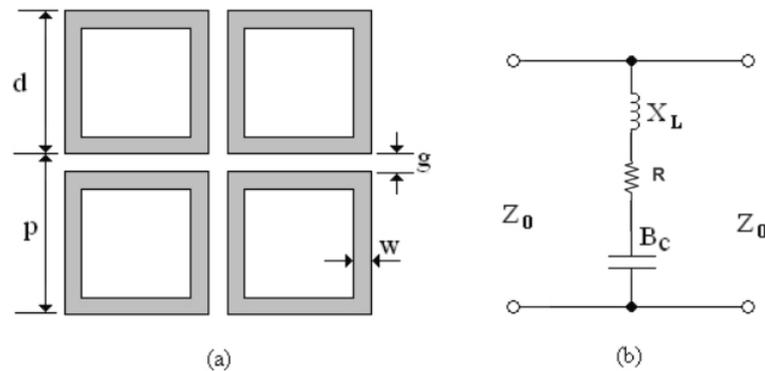
$$\ell = \operatorname{sen} \left(\frac{\pi w}{2p} \right) \quad (10)$$

3 Absorvedores baseados em FSS (AFSS)

Absorvedores baseados em FSS podem ter uma curta ou uma larga faixa de absorção, o objetivo deste trabalho consiste em diminuir a RCS de uma antena, logo, deseja-se com um arranjo ao redor da antena transmitir o máximo possível na frequência de operação da mesma, ao mesmo tempo que absorver o máximo de energia eletromagnética na faixa fora da operação da antena, então, este trabalho precisa moldar um arranjo com uma faixa larga de absorção.

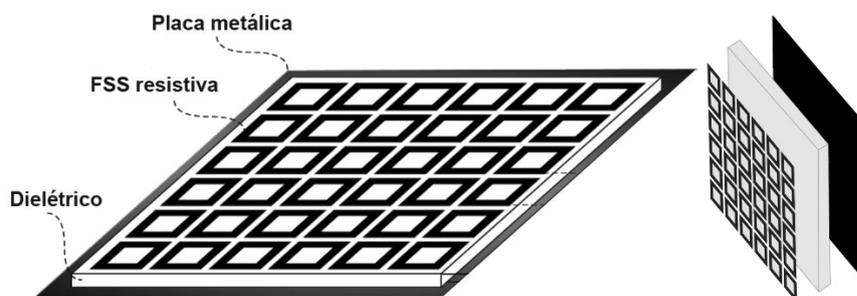
Um tipo de absorvedor muito utilizado é formado por uma FSS resistiva (RFSS) na forma de espiras quadradas (Figura 7) para dissipar energia eletromagnética, um dielétrico e um placa metálica, como mostrado na figura 8. A permissividade do dielétrico está intimamente ligada à estabilidade angular do arranjo, porém ela também influencia outros parâmetros (COSTA; MONORCHIO, 2010).

Figura 7 - Espiras quadradas



Fonte: Adaptado de (CAMPOS, 2008)

Figura 8 - Arranjo absorvedor



Fonte: (COSTA; MONORCHIO, 2010)

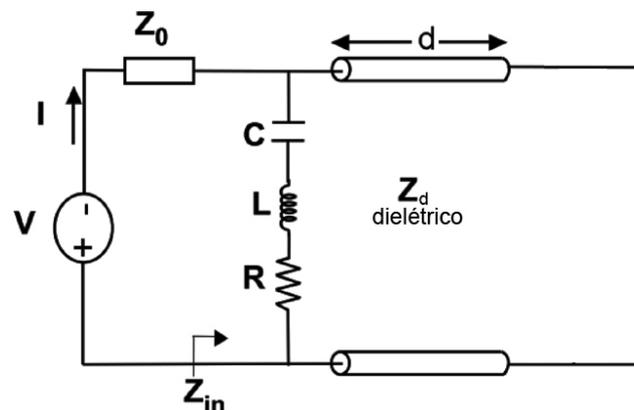
O circuito equivalente da FSS de espiras quadradas é dado por (CAMPOS, 2008):

$$\frac{X_L}{Z_0} = \frac{d}{p} F(p, 2w, \lambda, \phi) \quad (11)$$

$$\frac{B_C}{Z_0} = 4 \frac{d}{p} F(p, w, g, \phi) \quad (12)$$

Nas equações (11) e (12), p é a periodicidade da FSS, d a largura da espira, w a espessura da espira quadrada e $g = p - d$, como mostrado na figura 7. Pode-se, através do método do circuito equivalente, achar a impedância do circuito como um todo, representando tanto a RFSS (RLC série, aqui chamado de Z_{fss}^{res}), como o dielétrico (linha de transmissão, Z_d) e como a placa metálica (curto-circuito no fim da linha de transmissão), como ilustrado na figura 9.

Figura 9 - Circuito equivalente do absorvedor



Fonte: Adaptado de (COSTA; MONORCHIO, 2012)

O funcionamento do absorvedor ocorre, resumidamente, da seguinte maneira: a impedância da RFSS, Z_{fss}^{res} (RLC série na figura 9), varia de acordo com a frequência, equação (13), assim como o conjunto do dielétrico mais a placa metálica produz uma impedância em paralelo com Z_{fss}^{res} , chamada de Z_d , que também varia com a frequência, equação (14), o que faz com que em certo momento a impedância Z_{in} , equação (15), tenha caráter puramente resistivo. Para obter a maior absorção possível só resta fazer o casamento de Z_0 com a parte real de Z_{in} (COSTA; MONORCHIO, 2010).

$$Z_{fss}^{res} = R - j\left(\frac{1 - \omega^2 LC}{\omega C}\right) \quad (13)$$

$$Z_d = jZ_s^{TM,TE} \tan(\beta d) \quad (14)$$

$$Z_{in} = \frac{Z_{fss}^{res} Z_d}{Z_{fss}^{res} + Z_d} \quad (15)$$

Nas equações (13), (14) e (15) (COSTA; MONORCHIO, 2010), têm-se que, $Z_s^{TM} = \frac{\omega \mu_r \mu_0}{\beta}$, $Z_s^{TE} = \frac{\beta}{\epsilon_r \epsilon_0}$, $\beta = \sqrt{k^2 - k_t^2}$, $k_t = k_0 \text{sen}(\phi)$, em que ϕ representa o ângulo de incidência da onda com o arranjo. X^{TM} se refere à variável X medida com a incidência de uma onda transversa magnética (TM), assim como X^{TE} se refere à variável X medida com a incidência de uma onda transversa elétrica (TE) e X_s se refere ao valor da variável X medida no substrato, ou seja, no dielétrico. Com manipulações algébricas pode-se encontrar a parte real e imaginária de Z_{in} , conforme mostrado nas equações (16) e (17):

$$Re\{Z_{in}\} = \frac{RZ_d^2}{\left[\frac{1 - \omega^2 LC}{\omega C} - Z_d\right]^2 + R^2} \quad (16)$$

$$Im\{Z_{in}\} = \frac{[-\omega LZ_d] \left[\frac{1 - \omega^2 LC}{\omega C} - Z_d\right] + \left[\frac{Z_d}{\omega C}\right] \left[\frac{1 - \omega^2 LC}{\omega C} - Z_d\right] + R^2 Z_d}{\left[\frac{1 - \omega^2 LC}{\omega C} - Z_d\right]^2 + R^2} \quad (17)$$

O momento em que Z_{in} é puramente resistivo é quando $Im\{Z_{fss}\} = Z_d$, ou seja $\frac{1 - \omega^2 LC}{\omega C} = Z_d$. Após Z_{in} ser puramente resistivo, para casar a impedância Z_0 com a parte real de Z_{in} , tem-se que:

$$Re\{Z_{in}\} = \frac{(Z_s^{TE, TM} \tan(k_s^{TE, TM} d))^2}{R} = Z_0 \quad (18)$$

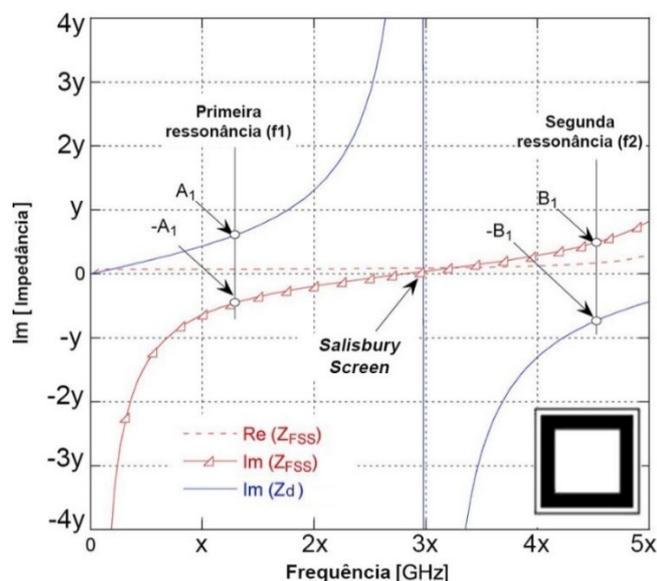
Para isso ocorrer o valor de R deve ser R_0 :

$$R_0 = \frac{(Z_s^{TE, TM} \tan(k_s^{TE, TM} d))^2}{Z_0} \quad (19)$$

3.1 Absorvedor de faixa larga

Como dito anteriormente é necessário para a tecnologia *stealth* que a superfície absorva durante uma larga faixa de frequência, para isso o arranjo tem que absorver mais do que no momento de uma ressonância. De acordo com (COSTA; MONORCHIO, 2010) a escolha da FSS deve ser de modo que a mesma tenha outra frequência de ressonância com Z_d e que a mesma ocorra longe do primeiro *grating lobe* (lóbulos laterais), assim terá duas frequências onde haverá alta absorção, para o absorvedor manter o desempenho na faixa entre essas duas frequências, o mesmo deve ser projetado de forma a agir como uma *Salisbury's Screen* (SALISBURY, 1952). O comportamento de *Salisbury's Screen* ocorre quando espessura do dielétrico (l) for $\frac{\lambda}{4}$ na faixa entre essas duas frequências de ressonância, no momento que $l = \frac{\lambda}{4}$, Z_{FSS} deve ser puramente resistivo. Basicamente uma *Salisbury's Screen* causa absorção devido interferências destrutivas no dielétrico, ou seja, quando o sinal encontrar o arranjo proposto, uma parte dele refletirá e outra entrará no dielétrico, haverá reflexão na placa metálica e essa reflexão interferirá destrutivamente com a onda no dielétrico, uma parte do sinal refletido voltará para o ambiente novamente enquanto outra continua sofrendo interferência no dielétrico devido múltiplas reflexões (SALISBURY, 1952). A figura 10 ilustra a operação do absorvedor de faixa larga tendo os pontos de ressonância e o ponto onde trabalha como *Salisbury's Screen* evidenciados:

Figura 10 - Absorvedor de faixa larga



Fonte: Adaptado de (COSTA; MONORCHIO, 2010)

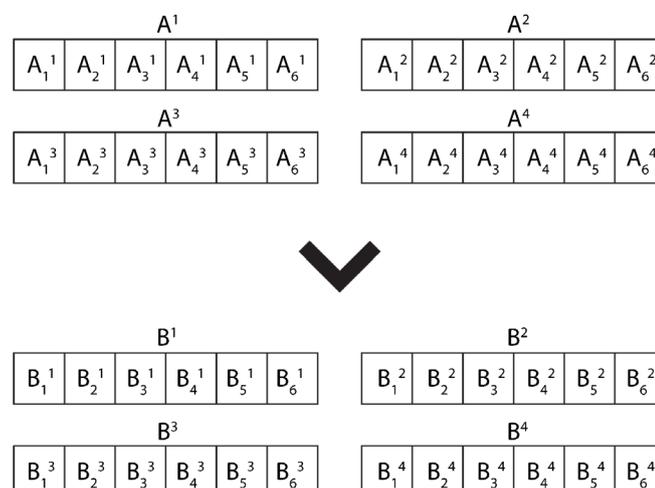
4 ALGORITMO GENÉTICO

De acordo com Linden (2008) os algoritmos genéticos (AG) surgiram quando cientistas começaram a se basear na seleção natural para desenvolver algoritmos de otimização, esses algoritmos se baseavam no conceito de evolução para alcançar otimização em problemas multivariáveis. Ao longo do tempo o conceito foi se desenvolvendo e melhorando a partir da implementação de conceitos como *crossover* e outros no processo evolucionário do algoritmo (LINDEN, 2008). Um AG é um método de solução heurístico, iniciando com uma solução que pode ou não ser considerada boa e vai encontrando soluções cada vez melhores baseado nas soluções anteriores. É importante notar que junto com seu tempo de execução, um AG sempre melhora ou no mínimo mantém a qualidade da solução, a menos que sua função de cálculo do *fitness* esteja incorreta.

4.1 Indivíduo, geração

Um indivíduo é uma solução para o problema que o AG se propõe a resolver, como os problemas a serem resolvidos são multivariáveis um indivíduo carrega em seu genoma vários valores, formando assim uma possível solução (LINDEN, 2008). A execução do AG começa com um grupo de indivíduos, que são possíveis soluções, após isso há interações entre esses indivíduos e o AG cria um novo grupo de indivíduos, o nome dado a cada um desses grupos é geração (LINDEN, 2008).

Figura 11 - Indivíduo e geração



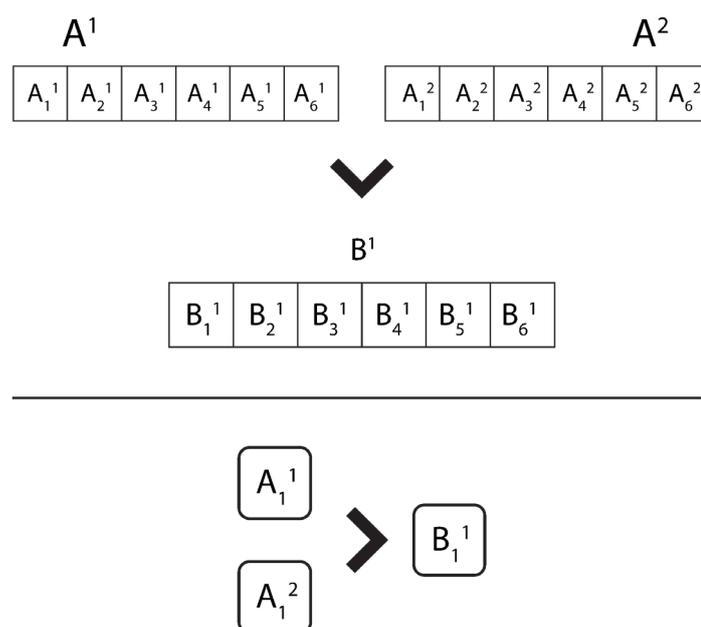
Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 11 mostra representação de duas gerações, a primeira, a geração A constituída dos indivíduos A^1, A^2, A^3, A^4 e a próxima, geração B , é formada pelos indivíduos B^1, B^2, B^3, B^4 , sendo A_n^1 a n ésima característica (gene) do indivíduo A^1 e assim por diante.

4.2 Cromossomo e *crossover*

De acordo com Linden (2008), uma das técnicas baseadas na evolução natural utilizadas no AG consiste na técnica do *crossover*, baseado no fenômeno biológico de mesmo nome, que ocorre através da mistura de características de dois indivíduos de uma geração na criação da próxima, assim fazendo com que haja variabilidade genética ao mesmo tempo com que aumenta a possibilidade de haver uma junção de duas características boas dos indivíduos “pais” (que o geraram). Na figura 12 verifica-se a representação do indivíduo A^1, A^2 , de uma mesma geração, e do indivíduo B^1 , de uma próxima geração, o cromossomo do indivíduo A^1 é constituído dos 6 genes $[A_1^1, A_2^1, A_3^1, A_4^1, A_5^1, A_6^1]$, enquanto A^2 é constituído pelos 6 genes $[A_1^2, A_2^2, A_3^2, A_4^2, A_5^2, A_6^2]$ e assim por diante, o número de genes foi escolhido arbitrariamente a título de exemplo.

Figura 12 - Cromossomo e *crossover*

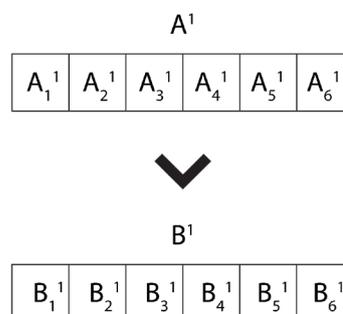


Na criação do indivíduo da geração B há uma mistura dos genes A_1^1 e A_1^2 para formação de B_1^1 , figura 12, essa mistura pode se dar de várias formas, e mais genes podem ser envolvidos no processo de acordo com a programação do AG. É importante notar que o *crossover* ocorre, assim como na natureza, de forma aleatória e o programador deve definir as probabilidades envolvidas assim como definir qual a forma que ele ocorre (COLEY, 1999).

4.3 Mutação

Durante a execução de um AG parte-se de uma geração inicial, as soluções dessa geração, indivíduos, podem ser muito ruins e o *crossover* pode não ser o bastante para fazer com que a próxima geração melhore significativamente, com isso há a necessidade do uso do conceito de mutação, também presente na natureza. A mutação, figura 13, é uma mudança no cromossomo que acontece de forma aleatória e pode ou não resultar em uma solução (indivíduo) melhorada. Assim como o *crossover*, a mutação também tem suas probabilidades definida pelo programador, assim como este também delimita e cria como ela deve ocorrer (LINDEN, 2008). Na figura 13, A_1^1 é transformado em B_1^1 através de uma mutação, sendo importante notar que o *crossover* e a mutação podem ocorrer simultaneamente. Um exemplo bem conhecido de mutação é o que ocorre na pandemia de COVID-19, onde novas mutações ocorrem e faz com que apareçam novas variantes do vírus (GRUBAUGH; HANAGE; RASMUSSEN, 2020).

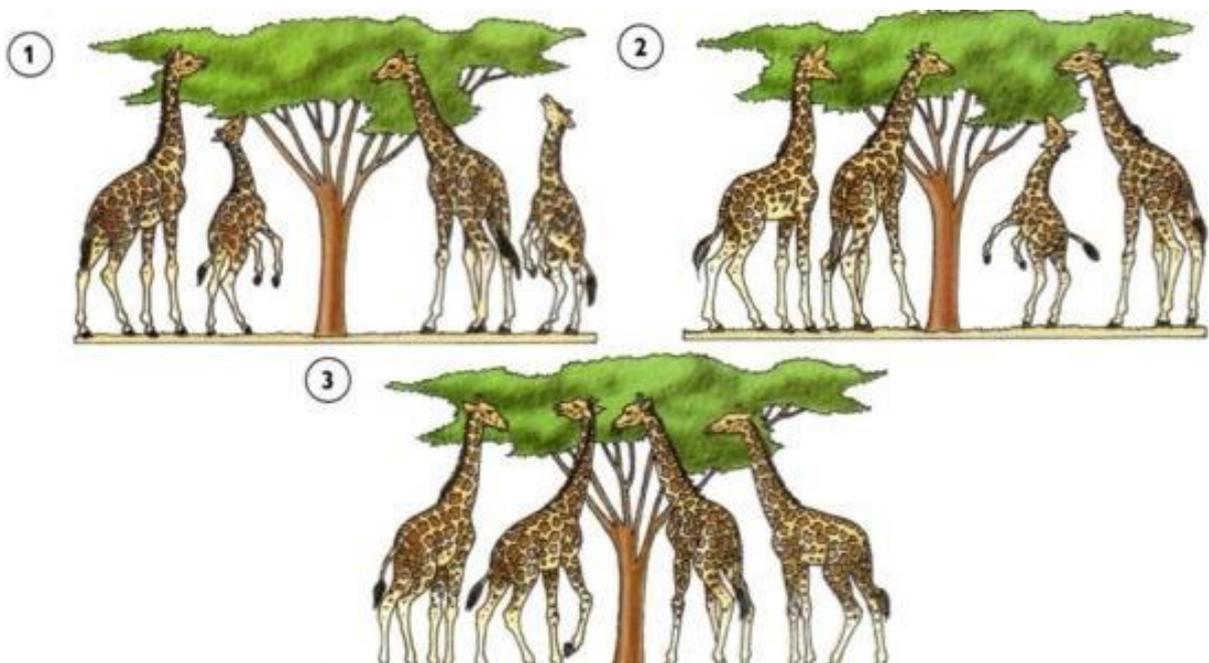
Figura 13 - Mutação



4.4 *Fitness* e seleção

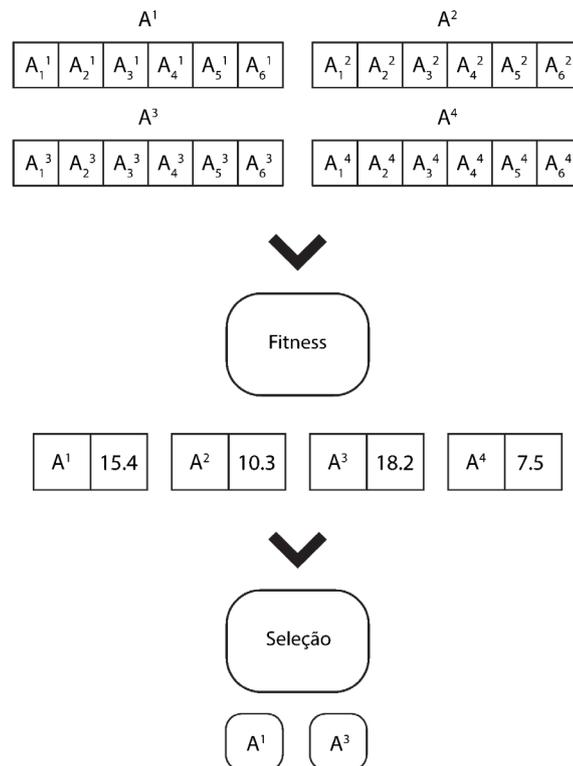
Um dos conceitos mais importantes de AG é o da seleção, o fenômeno que dá nome ao processo da natureza em que todos os AG's são inspirados (seleção natural, figura 14), a seleção garante que junto com o avanço das gerações sempre ocorra melhora das soluções, ou no mínimo mantenha o mesmo resultado. O conceito de seleção natural é muito simples de se entender, por exemplo, na biologia após uma mutação e uma combinação de genes dos pais (*crossover*) é criado um novo indivíduo, se esse indivíduo tiver qualidades que ajudem na sobrevivência superiores aos outros indivíduos de sua geração (girafa poder alcançar a comida, por exemplo) ele terá muito mais chance de sobreviver e ao longo do tempo ele passará os seus genes para próxima geração através da reprodução, ver figura 14. Essa qualidade que ajuda na sobrevivência que foi citada tem seu análogo em AG chamado de função *fitness*, ou seja, função *fitness* é um valor que representa o quão bom é um indivíduo (solução) do AG, em outras palavras, quanto maior/menor (o programador define) o *fitness* de um indivíduo, melhor a solução representada, caracterizando-se como uma otimização.

Figura 14 - Seleção natural



Fonte: < <https://trabalhosparaescola.com.br/evolucao-das-especies/evolucao-das-especies-segundo-darwin/> >

Figura 15 - Seleção do AG



Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 15 mostra como um AG faz o processo de seleção. Primeiro é calculado o *fitness* de cada indivíduo de uma geração, após isso é selecionado os indivíduos de maiores *fitness* (nesse caso A^1 e A^3) para gerar a próxima geração (o critério de seleção poderia ser pelo menor valor), é importante notar que esses indivíduos ainda passarão por *crossover* entre eles, assim como por mutações, de acordo com a taxas estabelecidas, para gerarem os indivíduos da próxima geração.

4.5 Critério de parada e outras particularidades

Segundo Linden (2008) dois critérios de parada podem ser utilizados, o número de gerações alcançadas e um determinado número de gerações sem uma melhoria significativa no *fitness* alcançado, os dois critérios são implementados ao mesmo tempo, porém em uma execução somente um é o responsável pelo fim da execução. Algo importante a ser validado é que indivíduos precisam representar soluções que façam sentido para o problema, ou seja, alguns indivíduos devem ser eliminados pelo fato de não respeitarem restrições do problema.

5 Proposta de melhoria do RCS de antena com AG

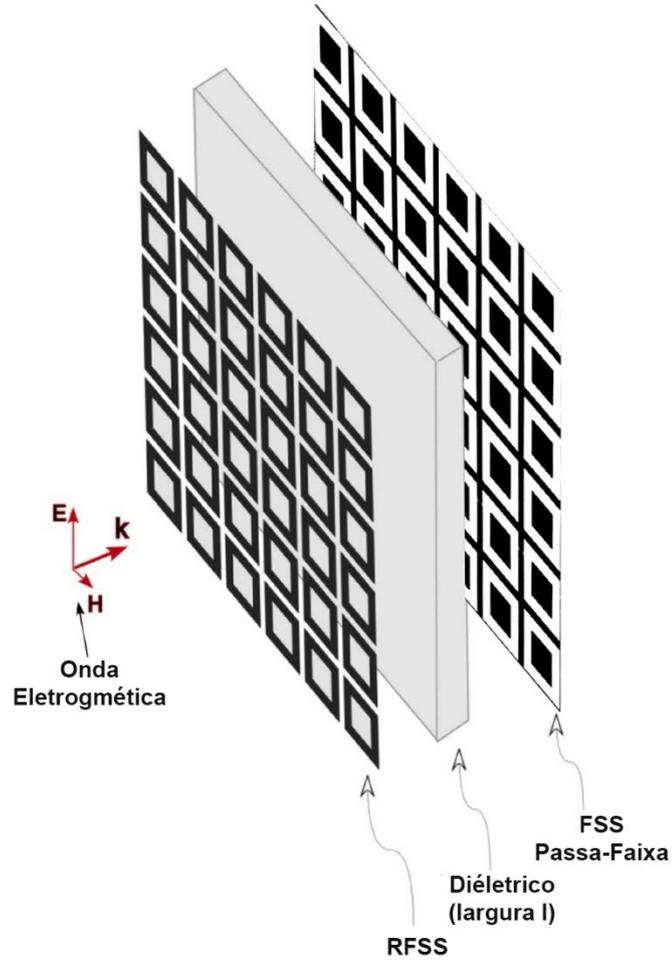
A faixa de operação da antena que se pretende diminuir o FSS é escolhida arbitrariamente como 4,2 GHz a 4,9 GHz. O arranjo final proposto é formado pela RFSS, um dielétrico e uma FSS passa-faixa, esses elementos terão seus parâmetros variados pelo AG que buscará heurísticamente a melhor solução para o problema proposto. Para cada geometria e material (indivíduo), serão calculados os parâmetros do circuito equivalente, após isso, serão calculados os parâmetros S da possível solução, ou seja, do conjunto de parâmetros do arranjo. Com as curvas dos parâmetros S poderá se calcular o fitness dos indivíduos.

5.1 Circuito equivalente da FSS e parâmetros S

Como já dito, o absorvedor desse exemplo precisa transmitir na faixa de operação da antena, com isso, não se pode colocar uma placa metálica no arranjo, pois a mesma impediria qualquer sinal de chegar à antena. Para contornar isso usa-se uma superfície que se comportará como uma placa metálica (*ground plane* – plano terra) quando fora da faixa de operação da antena e que transmitirá nesta faixa (COSTA; MONORCHIO, 2012). A escolha feita mais uma vez é pela FSS de espiras quadradas do tipo abertura, pois essa pode apresentar um comportamento de passa-faixa muito parecido com o necessário neste trabalho. Para se encontrar os parâmetros dessa FSS para transmitir na faixa escolhida e refletir nas outras também será usado o AG, esse AG utilizará somente o circuito equivalente da FSS de espira quadrada no espaço, que difere do arranjo final que englobará tanto a RFSS como o dielétrico e essa FSS passa-faixa. O valor de R para essas espiras será 0 pelo fato não ter resistividade no material, já os outros parâmetros serão calculados assim como na FSS de espiras quadradas do absorvedor mostrado anteriormente (Seção 3).

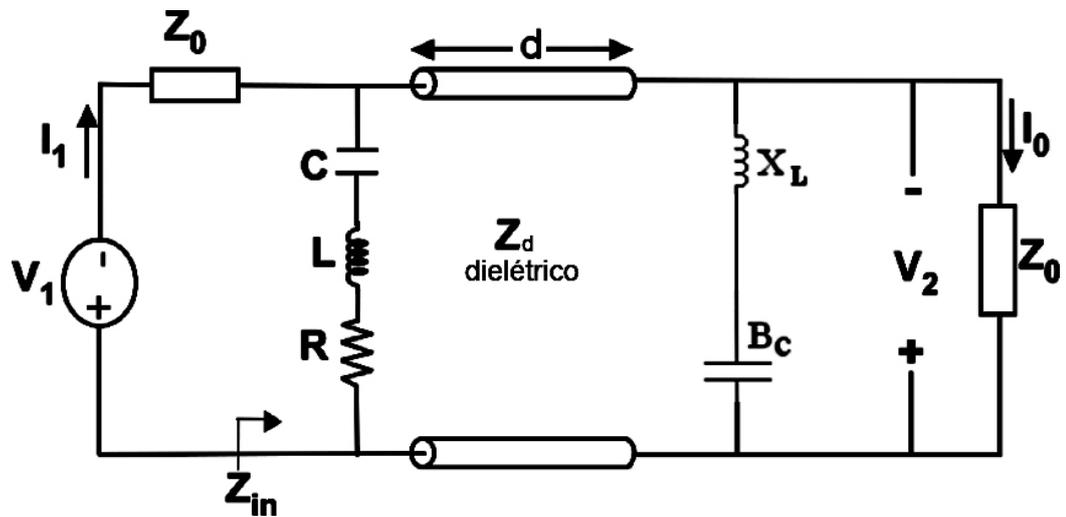
A partir do circuito equivalente, figura 17, do arranjo final, figura 16, pode-se calcular os seus parâmetros S, primeiro encontra-se o valor de $T_{receptor}$ e $\Gamma_{receptor}$, que são o coeficiente de transmissão e reflexão, respectivamente. A subscrição se refere ao fato da antena estar agindo como receptor, pois, os parâmetros Γ e T mudam de acordo com a direção de propagação da onda.

Figura 16 - Arranjo final



Fonte: Adaptado de (COSTA; MONORCHIO, 2012)

Figura 17 - Circuito equivalente do arranjo final



Fonte: Adaptado de (COSTA; MONORCHIO, 2012)

$$Z_p^{TE, TM} = Z_d^{TE, TM} \frac{[Z_L^{TE, TM} + jZ_d^{TE, TM} \tan(\beta_s d)]}{[Z_d^{TE, TM} + jZ_L^{TE, TM} \tan(\beta_s d)]} \quad (20)$$

$Z_p^{TE, TM}$ se refere à impedância vista logo antes de $Z_d^{TE, TM}$ e logo depois de Z_{FSS}^{res} (impedância da RFSS), ou seja, se refere à impedância vista na entrada da linha de transmissão que representa o dielétrico (POZAR, 2011). $Z_L^{TE, TM}$ é a impedância após o dielétrico.

$$\Gamma_{receptor} = \left| \frac{Z_{in}^{TE, TM} - Z_0^{TE, TM}}{Z_{in}^{TE, TM} + Z_0^{TE, TM}} \right| \quad (21)$$

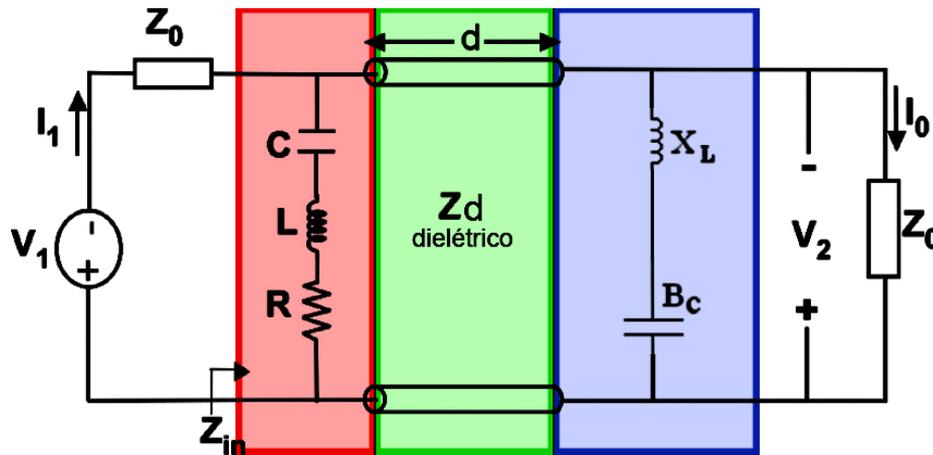
O parâmetro $S_{11} = \Gamma_{receptor}$, é o coeficiente de reflexão na entrada do arranjo, equação (21), no circuito equivalente se refere ao ponto entre Z_0 e Z_{in} (POZAR, 2011).

$$T_{receptor} = \left| \frac{2V_2}{V_1} \right| = \left| \frac{2}{A + B/Z_0^{TE, TM} + CZ_0^{TE, TM} + D} \right| \quad (22)$$

O parâmetro $S_{21} = T_{receptor}$, é o coeficiente de transmissão na entrada do arranjo, equação (22). O parâmetro S_{21} pode ser encontrado em função de elementos da matriz impedância e da matriz ABCD (POZAR, 2011). Assim como mostrado em (POZAR, 2011), podemos achar a matriz ABCD de uma associação de filtros através da multiplicação de suas respectivas matrizes ABCD. A figura 18 mostra as partes do circuito que são representadas pelas matrizes ABCD da equação (23), sendo $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_{FSS}^{res}} & 1 \end{bmatrix}$ representado em vermelho, a parte verde representando a segunda matriz e a parte azul representando a terceira matriz do lado direito da igualdade. Z_{FSS}^{res} se refere à impedância da RFSS, Z_{FSS}^{metal} se refere à impedância da FSS passa-faixa.

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_{FSS}^{res}} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\beta_s d) & jZ_m \sin(\beta_s) \\ j \frac{\sin(\beta_s d)}{Z_d} & \cos(\beta_s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_{FSS}^{metal}} & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

Figura 18 - Matrizes ABCD



Fonte: Adaptado de (COSTA; MONORCHIO, 2012)

$$A^2 = 1 - (\Gamma^2 + T^2) \quad (24)$$

$$A_{dB} = -10 \log(1 - A^2) = -10 \log(\Gamma^2 + T^2) \quad (25)$$

Nas equações (24) e (25) são apresentados o coeficiente de absorção ao quadrado e o coeficiente de absorção em decibéis (dB), respectivamente, como definido em (COSTA; MONORCHIO, 2012).

5.2 Funcionamento do arranjo

O funcionamento do arranjo é semelhante ao do absorvedor descrito na seção 3.1 (COSTA; MONORCHIO, 2012), porém a FSS passa-faixa só age como *ground plane* fora da faixa de operação da antena, logo a diferença entre o arranjo final e o da seção 3.1 é que o arranjo final transmitirá na faixa de operação da antena.

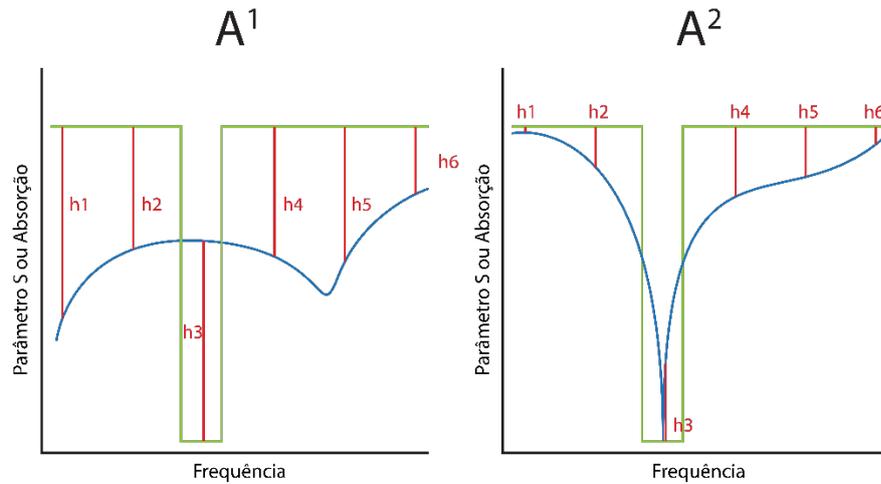
Há uma absorção indesejável na faixa em que a antena opera, que é inevitável, porém deve ser minimizado, isso ocorre porque apesar da FSS passa-faixa transmitir praticamente toda potência a FSS resistiva (RFSS) absorve uma parte do sinal por ocorrer o efeito joule no metal. De acordo com a aplicação o projetista deve escolher o quanto se tolera de absorção nessa banda em benefício de uma absorção maior fora dela, isso é de extrema importância quando se analisa os resultados de um otimizador desse tipo.

5.3 Cromossomo, mutação, fitness, seleção e critério de parada

As variáveis que serão incluídas nos cromossomos dos indivíduos são $p, w, d, g, R, \mu, \epsilon$. É importante notar que $R \neq R_s$, com isso o cálculo dos parâmetros do arranjo será feito usando R , porém, para achar o valor de R_s que fará com que a RFSS tenha o valor de R no seu circuito equivalente basta o auxílio de uma simulação de onda completa, esse valor também pode ser achado aproximadamente, como mostrado em (COSTA; MONORCHIO, 2010).

A mutação ocorrerá de forma algébrica, pois o problema envolve somente valores reais, ou seja, média dos genes, média ponderada, soma, subtração entre genes, etc., tudo isso será testado como uma alternativa de mutação (HAUPT; HAUPT, 2004). Haverá uma taxa de mutação que será proporcional há o quanto os indivíduos vão mudar em cada mutação, o usuário definirá esse valor. Poderá ser analisado o desempenho do algoritmo para diferentes valores assim como para cada objetivo de otimização devendo se ter uma ideia quanto a ter uma baixa ou alta taxa de mutação (HAUPT; HAUPT, 2004). Por exemplo, em um caso em que se começa a execução do algoritmo com bons arranjos na população inicial faz mais sentido haver uma pequena taxa de mutação, pois provavelmente só haverá espaço para pequenas melhorias que se reflete em pequenas alterações do arranjo inicial e caso a mutação fosse demasiada o algoritmo agiria mais baseado em tentativas aleatórias do que baseado no processo de evolução.

A partir das equações do circuito equivalente são obtidos os valores de A, Γ, T . Esses valores são comparados com uma curva que representa o funcionamento ideal de um absorvedor desse tipo. A ideia inicial para a comparação é a soma do quadrado das diferenças entre as duas curvas (no n -ésimo ponto a diferença é h_n), assim, pode-se encontrar um valor que representa o quão bom está aquele indivíduo, como mostrado na figura 19, a curva azul representa o resultado do indivíduo e a verde a curva ideal. Neste caso, quanto menor o valor da função *fitness* melhor o indivíduo (mais parecido com o filtro ideal para o caso).

Figura 19 - Cálculo do *fitness*

Fonte: Elaborado pelo autor

A sensibilidade à diferença é maior em algumas regiões, por exemplo, na banda em que se deve absorver, uma diminuição na transmissão é menos tolerável do que uma mesma diferença na absorção fora desta banda, por isso é adicionado um peso a_k , de acordo com a região, sendo esse peso maior para regiões mais sensíveis. Na figura 19, pode-se notar que F (ver equação (26)) é menor para o indivíduo A^2 do que para o indivíduo A^1 , ou seja, o *fitness* de A^2 é melhor que o de A^1 . Outra coisa importante é que se, por exemplo, a curva azul, na figura 19, tiver um valor menor do que o estabelecido na curva ideal no intervalo onde se encontra h_3 , o valor não deverá contar negativamente para a função *fitness*, mas positivamente, já que nesse caso a curva teria um comportamento até melhor que o estabelecido como ideal, logo isso também é levado em conta na hora de estipular o sinal de a_k . A equação (26) mostra como é a ideia inicial da função para o cálculo do *fitness*.

$$F = \sum_{k=1}^n a_k (h_k)^2 \quad (26)$$

Foi usado como critério de parada o número de gerações alcançadas ou um determinado número de gerações sem uma melhoria significativa no *fitness* alcançado. Os dois critérios terão que ser atendidos a cada geração, assim será garantido que não haverá muito uso computacional sem melhora significativa e que o tempo de execução do programa não seja extremamente alto.

6 ALGORITMO CONSTRUIDO

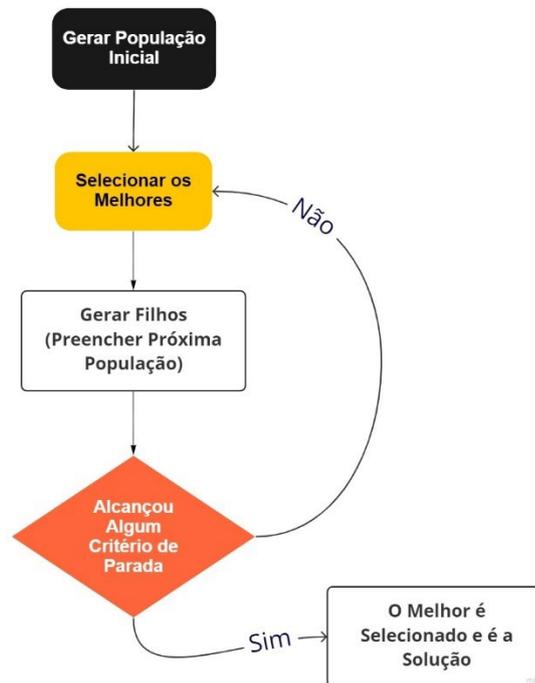
A escolha de busca de solução do algoritmo implementado se dividiu em duas partes, a primeira parte consiste em procurar a FSS passa-faixa ideal e a segunda parte é a busca pelo resto do arranjo (RFSS e dielétrico), essa escolha se deve ao fato de as duas soluções serem independentes então procurá-las heurísticamente ao mesmo tempo seria um desperdício computacional.

As FSS passa-faixa foram implementadas utilizando apenas a geometria espira quadrada do tipo abertura, pois essa possui comportamento passa-faixa e tem uma simples implementação do seu circuito equivalente. A partir da equação (11) e (12) pode-se encontrar o circuito equivalente desse modelo de FSS, pois os elementos tipo abertura possuem transmissão igual a reflexão do seu equivalente do tipo elemento condutor (CAMPOS, 2008), os genes escolhidos para esse tipo de indivíduo foram, p , d e w (ver figura 22).

Já o outro tipo de indivíduo consiste em um dielétrico e uma RFSS. A RFSS escolhida foi a mesma de (COSTA; MONORCHIO, 2012), pois também são modeladas simplesmente por uma espira quadrada, com a diferença de serem do tipo elemento condutor e possuírem uma condutividade menor fazendo com que haja perdas desejadas no material (absorção). Como dito anteriormente esse tipo de indivíduo possui também p , d e w como genes além de e , u e r , sendo que e é a permissividade do dielétrico associado a ele, u a permeabilidade do mesmo e r sua resistência. Essa resistência é a resistência final do circuito equivalente, o que facilita a modelagem do problema invés de se tratar com condutividade etc., assim cabe a quem irá construir o arranjo achar o material que terá a condutividade ideal para alcançar aquela resistência equivalente.

O algoritmo construído é ilustrado de forma simplificada no fluxograma da Figura 20.

Figura 20 – Fluxograma do Algoritmo Construído



Fonte: Elaborado pelo autor

6.1 Implementação da população inicial

A população inicial é gerada aleatoriamente, porém como citado, nos objetivos desse trabalho, pode-se colocar como partida do algoritmo genético uma solução já considerada boa para ter resultados ainda melhores. A função que gera esses indivíduos inicialmente é mostrada na equação (27), onde τ representa um número gerado aleatoriamente e $[x_0, x_1]$ é um intervalo delimitado pelo usuário:

$$x = x_0(\tau - 1) + x_1\tau \quad (27)$$

Essa equação se aplica na geração de todos os genes, para todos os indivíduos, inicialmente. É nessa equação que se pode definir um curto intervalo $[x_0, x_1]$ para o algoritmo partir de uma boa solução inicial conhecida. Após toda essa geração inicial ter sido construída, o próximo passo é ir criando novas gerações, para isso ocorrer é iniciado o processo de reprodução.

6.2 Implementação da seleção e criação de uma nova geração

O processo de reprodução consiste em selecionar os melhores indivíduos baseado no seu *fitness* (que terá sua implementação detalhada mais a frente), e após essa seleção, fazer com que seus genes sejam passados adiante, pois são, pelo menos naquele momento, uma melhor solução. Os seus genes têm de ser passado adiante, porém com alguns cuidados, alguns deles consistem, por exemplo, em não os alterar demasiadamente a ponto de perder a informação de uma boa solução, não alterar muito pouco os mesmos resultando em pouca “variabilidade genética” em uma geração, pois essa pouca variabilidade genética permite que o algoritmo venha a convergir para uma solução que pode não ser desejada.

O processo de seleção utilizado foi o de *rank weighting* (HAUPT; HAUPT, 2004), que consiste em criar uma lista de pesos baseada no número de indivíduos a serem selecionados, e após isso fazer com que os melhores tenham mais chances de ser escolhidos. A lista de pesos é definida como demonstrado nas equações (28), (29) e (30):

$$P_i = \frac{n - i + 1}{Sum} \quad (28)$$

$$Sum = \sum_{i=1}^{n+1} i \quad (29)$$

Para uma população de 4 indivíduos, por exemplo, o peso do enésimo indivíduo, ou seja, aquele que tem o enésimo melhor *fitness*, seria:

$$P_n = \frac{n + 1}{2 + 3 + 4 + 5} \quad (30)$$

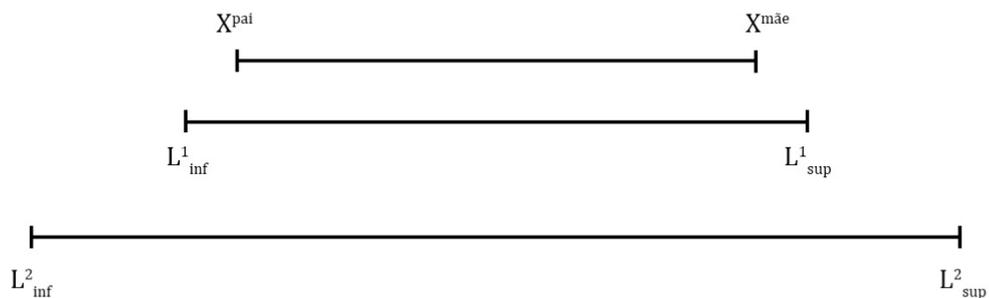
Assim a soma dos pesos seria 1, (para o caso de 4 indivíduos P_1 , P_2 , P_3 , P_4 seriam 0,143, 0,214, 0,286, 0,357 respectivamente), com isso utiliza-se esse peso para selecionar os indivíduos. Para isso é gerado um número aleatório entre 0 e 1, o indivíduo selecionado é o que contém peso mais próximo acima do número gerado. O peso é interpretado como o valor da probabilidade de um indivíduo ser escolhido. Os indivíduos são escolhidos em duplas (aqui chamados de macho e fêmea, um mesmo indivíduo pode

ser escolhido para compor toda a dupla), cada dupla formada gera um filho, isso ocorre até ser atingido o número da população total. Para um filho ser gerado foi implementado primeiramente um *crossover* entre os pais e segundo uma mutação no filho gerado.

6.3 Implementação do *crossover*

O *crossover* (cruzamento) é feito da seguinte forma, para cada gene dos pais (macho e fêmea), que é um número real, é feita uma combinação entre o valor do macho e da fêmea como é ilustrado na figura 21:

Figura 21 – Intervalos do *crossover*



Fonte: Elaborado pelo autor

O intervalo L^1 tem como valor mínimo o menor valor entre o gene dos pais (X^{pai} , na ilustração da figura 21) diminuído de uma porcentagem chamada taxa de *crossover*, tem seu máximo como o maior valor entre o gene dos pais ($X^{mãe}$ na ilustração) acrescido pela taxa de *crossover*. Por exemplo, se os genes dos pais são 1 e 2 e taxa de *crossover* é de 10%, L^1 será $[0.9, 2.2]$. O *crossover* pode ser feito de outra forma, como por exemplo ter uma probabilidade que defina qual a chance de ele acontecer ou não para cada gene.

Já L^2 é um intervalo definido pelo usuário que limita o valor que o gene poderá adquirir em qualquer situação. O intervalo que será gerado o novo indivíduo é $[L_{inf}, L_{sup}]$, em que L_{inf} é o menor valor entre L^1_{inf} e L^2_{inf} , e L_{sup} é o maior valor entre L^1_{sup} e L^2_{sup} . A forma de escolha do valor do gene é semelhante a formula de geração da população inicial, como descrito na equação (27), sendo que L representa qualquer um dos genes:

$$L = L_{inf}(\beta - 1) + L_{sup}\beta \quad (31)$$

Algo importante a se notar é que se $L_{inf} > L_{sup}$, o intervalo é invertido para continuar fazendo sentido.

6.4 Implementação da mutação

Já a mutação do indivíduo, ocorre como mostrado na equação (32), para cada gene, com x_{mutado} sendo o gene após a mutação e x o gene antes da mesma.

$$x_{mutado} = xN \quad (32)$$

Na equação (32) N é um valor aleatório, porém nem todos os números de um certo intervalo tem a mesma probabilidade de ser escolhido, a distribuição é da forma gaussiana, centrada em 1, e com desvio padrão escolhido pelo usuário, esse valor é chamado no algoritmo de taxa de mutação. Se o resultado estiver fora do intervalo máximo permitido para o gene, a formula é aplicada novamente no gene original, isso pode ocorrer até 5 vezes seguidas, na 6ª o valor assume o valor do limite que ele está ultrapassando.

6.5 Implementação da função *fitness*

Antes de se explicar o *fitness* é importante destacar que o usuário no início define em quantos pontos o gráfico será dividido, esses pontos são as frequências em que será calculado os parâmetros para gerar a curva S de uma solução, quanto maior a quantidade de pontos, mais resolução o AG terá para uma solução, porém o tempo de execução também aumenta.

A função *fitness*, tem extrema importância e define que tipo de indivíduo estamos buscando, foram implementados 3 tipos de *fitness* que serão mostrados nas equações (33) a (37). Para auxiliar na escolha do tipo de indivíduo ideal, o usuário define pesos para 4 regiões diferentes, esse processo resulta em algumas regiões que são menos tolerantes a um “erro” na curva do que em outras regiões. Por exemplo, se em uma região (faixa de frequência) o peso é 0, qualquer variação naquela região não causa mudança no *fitness*.

Na equação (33) é demonstrado a função *fitness* calculada semelhantemente ao da figura 19, equação (26), porém nesse caso ele é multiplicado por $\frac{Im\{Z_{RFSS}\}^2}{20000} + 1$, sendo que $Im\{Z_{RFSS}\}$ é a reatância da FSS resistiva na *Salisbury's Screen Zone*, isso ocorre para

que sejam priorizados na escolha os arranjos que nessa região apresentem o máximo de absorção ($Im\{Z_{RFSS}\}$ mais próximo de 0), com essa formula um arranjo que possua $Im\{Z_{RFSS}\} = 100 \Omega$ terá seu *fitness* multiplicado por 1,5, caso $Im\{Z_{RFSS}\}$ seja 200Ω o *fitness* seria multiplicado por 3 e assim por diante. Esse *fitness* será, neste trabalho, chamado de 1° método de cálculo de *fitness*.

$$X = \left(\sum_{k=1}^n a_k (h_k)^2 \right) \left(\frac{Im\{Z_{RFSS}\}^2}{20000} + 1 \right) \quad (33)$$

$$F = \frac{X}{\max(h_k)} \quad (34)$$

Uma diferença da ideia apresentada anteriormente é que a comparação é realizada com as duas curvas normalizadas, h_k sendo a diferença entre as curvas normalizadas, e no fim ocorre a multiplicação do *fitness* pelo inverso do valor máximo da curva (em módulo), assim, quanto maior o pico menor o *fitness*, ou seja, melhor o indivíduo.

As equações (35) e (36) contém a função *fitness* calculada de uma forma diferente, nesta forma em todos os pontos em que a curva (h_k) tem que ter um valor alto, (aqui denotado por $k < m$) é somado ao *fitness* $\left(\frac{a_k}{h_k}\right)^2$, assim quanto maior o valor de h_k nessa região menos é somado ao *fitness*. Consequentemente, para $k > m$, onde h_k deve possuir um valor pequeno, é somado ao *fitness* $(a_k h_k)^2$, assim quanto menor h_k menos é somado ao *fitness* nessa região. Esse *fitness* será aqui chamado de 2° método de cálculo de *fitness*.

$$x = \begin{cases} \sum_{k=1}^n \frac{a_k}{h_k}, & \text{se } k < m \\ \sum_{k=1}^n a_k h_k, & \text{se } k > m \end{cases} \quad (35)$$

$$F = x^2 \quad (36)$$

Já o terceiro método de cálculo do *fitness*, é feito comparando duas curvas, como o primeiro, porém a curva de referência usada neste caso é a que se pretende otimizar. Para cada ponto é somado ao *fitness* um valor, caso a curva do absorvedor gerado esteja

acima do absorvedor de referência um valor negativo é somado para diminuir o *fitness*, caso esteja abaixo é somado um valor positivo, como mostrado na equação (37).

$$F = \begin{cases} \sum_{k=1}^n -a_k h_k, & \text{se } h_k > 0 \\ \sum_{k=1}^n a_k \cdot c \cdot |h_k|, & \text{se } h_k < 0 \end{cases} \quad (37)$$

Onde c é uma constante que está ligada a sensibilidade do AG encontrar curvas com áreas em que estejam abaixo da referência quando devia estar acima e vice-versa. Por exemplo, um valor muito alto de c indica que para cada momento que a curva esteja abaixo da referência quando devia estar acima, ela (a curva) tem que permanecer acima em bem mais pontos para compensar o *fitness* (somando valores negativos) e representar uma melhor solução. Esse *fitness* será chamado aqui de 3º método de cálculo de *fitness*

Algo também implementado no *fitness* foi que valores em decibéis acima de 25 dB foram computados como 25 dB, pois acima desse valor a absorção é praticamente a mesma, assim evitando que picos de altos valores em dB contassem muito para o *fitness*. Quando uma solução não é permitida, o *fitness* dela é colocado automaticamente como $10^7 - 1$ (9.999.999, um indivíduo que representa uma solução muito ruim), isso ocorre quando a periodicidade é muito grande para a frequência máxima de análise, pois nesse caso começa a aparecer *grating lobes* na FSS, e isso faz com que com um valor muito alto no *fitness* aquele indivíduo nem mesmo seja selecionado.

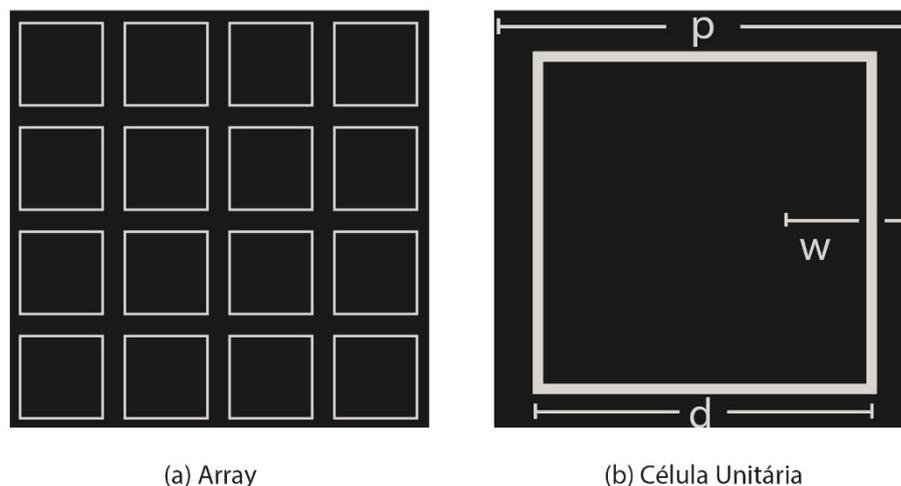
7 RESULTADOS

Os resultados aqui foram comparados com o trabalho anteriormente citado (COSTA; MONORCHIO, 2012), no trabalho referenciado foram escolhidas algumas dimensões que aqui se pretende otimizar. Outros trabalhos podem ter seus resultados comparados com os aqui obtidos (WANG, et al., 2018) e (DUAN, et al., 2020). Foram simulados e calculados pelo algoritmo somente as respostas para o modo TE, ângulo de incidência igual a 0° e o intervalo de frequência analisado foi de 1 a 25 GHz. O usuário define antes do início do algoritmo o máximo de gerações obtidas como critério de parada do AG assim como o máximo de repetições do *fitness* permitidos antes de parar.

7.1 Resultados da camada passa-faixa

A figura 22 é o tipo de FSS passa-faixa buscada, como dito anteriormente o modelo usado no algoritmo foi o de espiras quadradas do tipo abertura, em que a parte preta simboliza a área preenchida por um metal e a parte clara simboliza a parte sem o material, ou seja, a parte corroída.

Figura 22 – Espira Quadrada do Tipo Abertura.

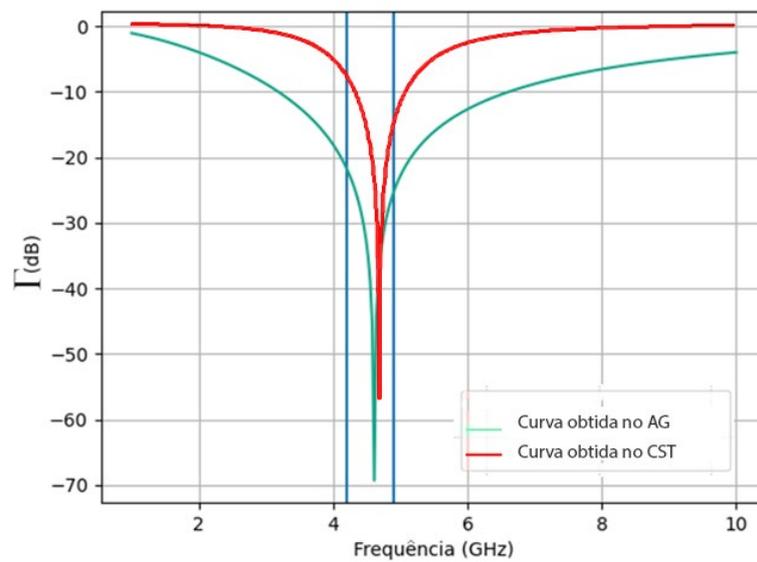


Fonte: Elaborado pelo autor

A espira passa-faixa encontrada foi a de dimensões, $d = 16,97 \text{ mm}$, $p = 19,74 \text{ mm}$, $w = 0,48 \text{ mm}$, conforme mostrada na figura 22(b). É importante considerar que para os cálculos e simulações foi considerado um metal ideal na construção dessa FSS.

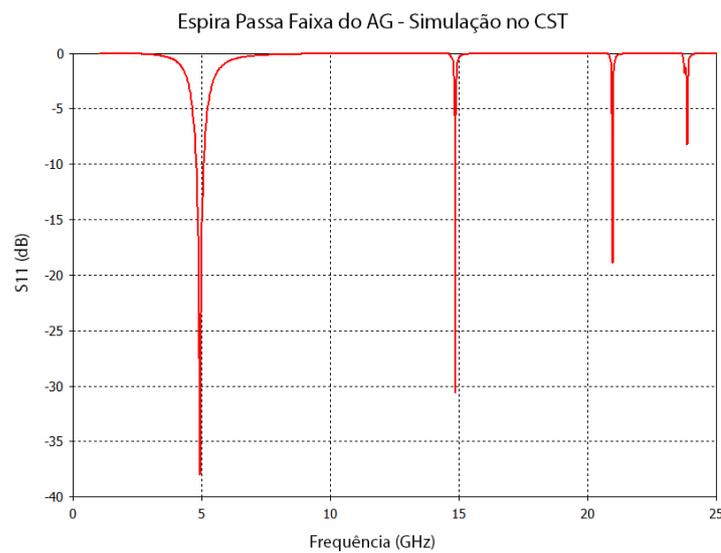
A figura 23 mostra o comportamento do coeficiente de reflexão para cada frequência computada no AG (curva verde) e para a mesma FSS simulada no CST (*Computer Simulation Technology - Studio Suite*), representada pela curva vermelha.

Figura 23 – Comparação Passa-Faixa



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 24 – Simulação da FSS passa-faixa no CST de 1 GHz a 25 GHz



Fonte: Elaborado pelo autor

Na figura 23, compara-se a Espira passa faixa otimizada pelo AG e a simulação da mesma no CST, as faixas azuis representam os extremos da faixa de operação da antena (4,2 GHz e 4,9 GHz). Essa espira foi alcançada com 72 gerações, tamanho da população 130, número de selecionados a cada geração, para serem os pais, de 30 indivíduos e 300 pontos no gráfico. A parada foi pelo critério de máximo repetições de *fitness*, que foi definido como 30 repetições, o tempo de execução foi de 1 minuto e 45 segundos. A simulação no CST do projeto do absorvedor com geometria espira quadrada tipo abertura tem um pico praticamente na mesma faixa de frequência inicialmente, porém é possível notar na figura 24 alguns *grating-lobes* a partir de 15 GHz, com isso pode se concluir que a espira quadrada do tipo abertura não é o ideal para ser aplicado nesse caso, ou seja, em um caso que há uma banda muito grande rejeita faixa após a faixa da antena, entre 4,2 GHz e 4,9 GHz (faixa transmitida). Nesse problema a espira passa-faixa não é o ponto central, até porque existem muitos trabalhos sobre FSS passa-faixa, e como dito anteriormente o motivo da sua escolha foi a fácil implementação no algoritmo. Nesse problema poderia ser usado a própria espira encontrada em (COSTA; MONORCHIO, 2012), que é do tipo *Interdigitated Jerusalem Cross*, pois ela já tem um comportamento totalmente dentro do esperado e otimizado.

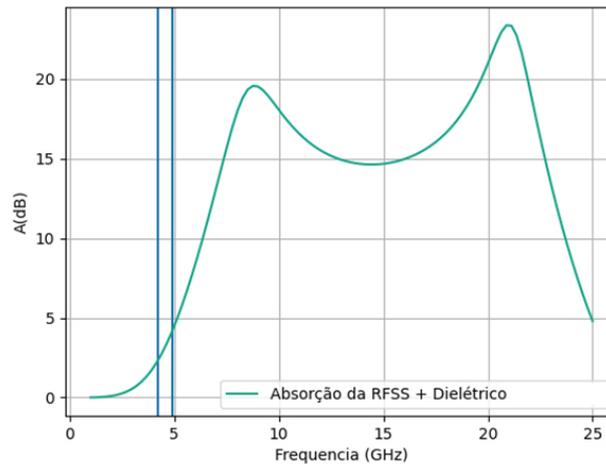
É importante salientar que o resultado aqui alcançado foi obtido sem nenhum conhecimento prévio das dimensões e que a geração inicial do algoritmo iniciava com p entre 6 mm e 11 mm, d entre 80% e 90% de p e w entre 5% e 10% de d e o AG foi convergindo para o resultado obtido. Há também uma discrepância nos valores (obtidos no AG e na simulação no CST), isso ocorre devido a limitação do método do circuito equivalente que é somente uma aproximação.

7.2 Resultados da RFSS e Dielétrico

O algoritmo deste trabalho, na etapa de encontrar a RFSS mais o dielétrico, tem alguns parâmetros fornecidos pelo usuário do programa. Além de o usuário definir um intervalo em que os genes iniciam aleatoriamente, como foi dito anteriormente, ele também deve definir: o intervalo permitido para ocorrer a *Salisbury's Screen Zone*, o método de cálculo de *fitness* a ser utilizado, se o algoritmo deve ou não buscar o dielétrico, o dielétrico usado caso não haja busca por um dielétrico automaticamente e, assim como no caso da FSS passa-faixa, os critérios de parada que são máximo de gerações analisadas e máximo de repetições do *fitness*.

Na figura 25 é apresentado o resultado de um absorvedor (COSTA; MONORCHIO, 2010) que se tomou como referência nesse trabalho, esse é o absorvedor que se pretende otimizar:

Figura 25 – Absorção a ser otimizada

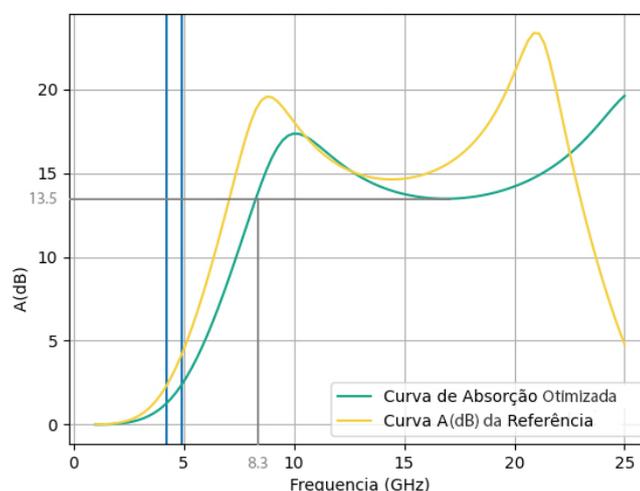


Fonte: Elaborado pelo autor

As linhas azuis delimitam a faixa de operação da antena (definidos anteriormente como 4,2 GHz e 4,9 GHz). Nos resultados a seguir estará presente essa mesma curva, porém, na cor amarela, a título de comparação com os resultados do AG. As gerações iniciais dos AG a seguir terão indivíduos gerados aleatoriamente com p entre 6,9 mm e 12 mm, d entre 57% e 90% de p e w entre 1% e 46% de d e r entre 100 Ω e 400 Ω .

7.2.1 Resultados utilizando o 1º método de cálculo de *fitness*

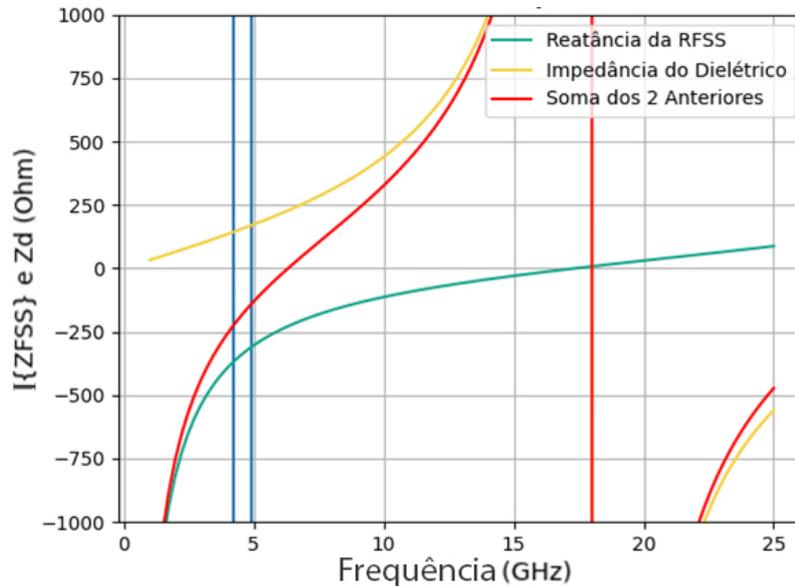
Figura 26 - Solução otimizada utilizando o 1º método de cálculo de *fitness*



Fonte: Elaborado pelo autor

Na figura 26 temos o resultado do AG para a parte absorvedora (RFSS + Dielétrico), o algoritmo com o 1º método de cálculo de *fitness* conseguiu achar um absorver que a partir de 8,3 GHz se mantém acima dos 13,5 dB de absorção, enquanto a referência se mantém acima desse valor a partir de 7,1 GHz, porém na faixa da antenna possui aproximadamente 1,3 dB a menos de absorção. Essa solução levou 4 minutos e 50 segundos para ser alcançado pelo algoritmo e tem como parâmetros: $p = 7,73 \text{ mm}$, $d = 7,09 \text{ mm}$, $w = 1,28 \text{ mm}$, $r = 248 \Omega$, não houve busca por dielétrico e foi usado $\epsilon_r = 1,01$ e $\mu_r = 1$ como parâmetros do substrato. A parada foi por repetição de *fitness*, na 102ª geração. Os pesos usados foram: 0 entre 1 GHz e 4 GHz, 10 entre 4 GHz e 5 GHz (pouca tolerância a absorção na antenna), 2 entre 5 GHz e 10 GHz e 1 de 10 GHz até 25 GHz. Foi utilizado o intervalo de 12 GHz a 18 GHz como permitido para ocorrer a *Salisbury's Screen Zone* e na figura 27, pode-se ver onde ocorreu a *Salisbury's Screen Zone* e a ressonância:

Figura 27– Ressonância e *Salisbury's Screen Zone* da primeira solução



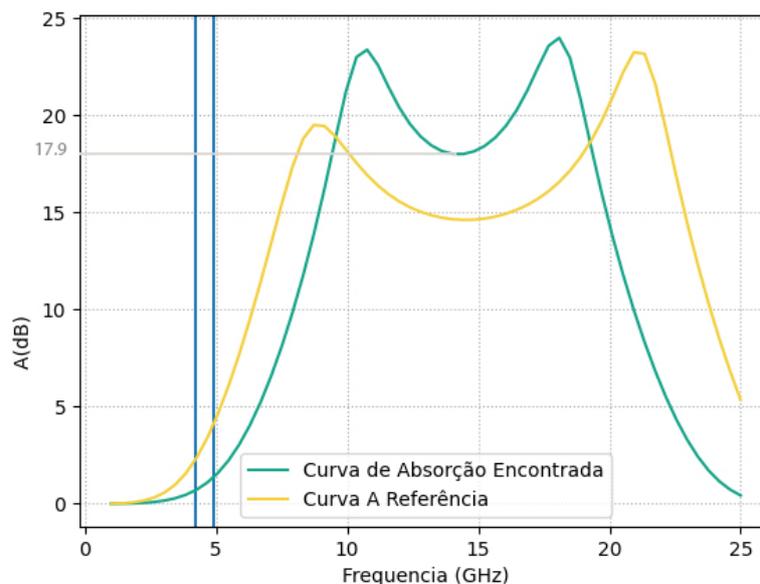
Fonte: Elaborado pelo autor

A linha vermelha da figura 27, é a soma entre $Im\{Z_{RFSS}\}$ e Z_d , e como explicado anteriormente, quando esses valores são iguais em módulo e contrários em sinal ocorre a ressonância. Com o auxílio da linha vermelha pode se ver o momento da ressonância (onde a linha vermelha cruza o 0). Pode se perceber também que a RFSS da solução tem impedância puramente resistiva onde ocorre a *Salisbury's Screen Zone*, isso é, em 17,9 GHz, com isso a largura do dielétrico é de 4,23 mm.

7.2.2 Resultados utilizando o 2º método de cálculo de *fitness*

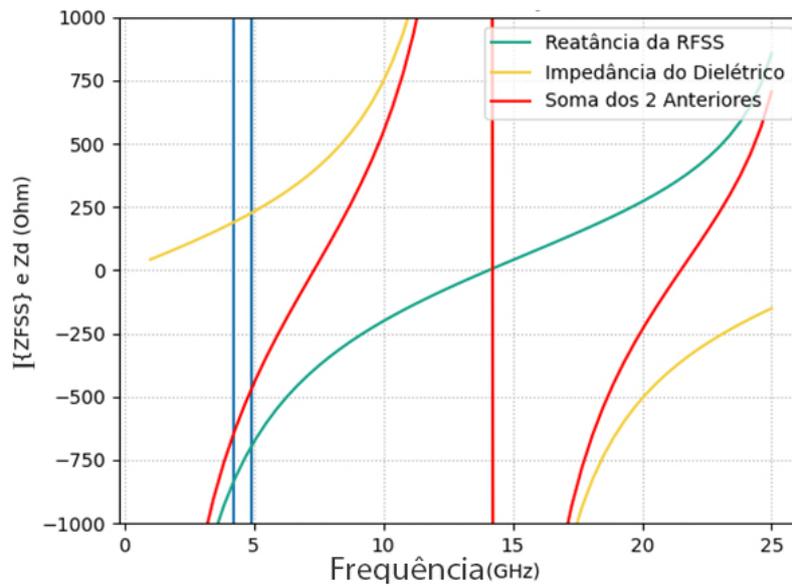
Há várias otimizações que podem ser requisitadas para o algoritmo, na figura 28 encontra-se a otimização em uma faixa pré-definida (entre 10 GHz e 20GHz), a imagem mostra o resultado obtido pelo AG com os pesos: 1 entre 1 GHz e 5 GHz, 0 entre 5 GHz e 10 GHz, 1 entre 10 GHz e 20 GHz e 0 de 20 GHz até 25 GHz, ou seja, é informado ao algoritmo para buscar um absorvedor que absorva o máximo entre 10 GHz e 20 GHz e tenha uma baixa absorção na faixa da antena. O resultado absorve 2,15 dB a menos que a referência e apresenta em praticamente toda a faixa de 10 GHz a 20 GHz uma absorção maior que 17,9 dB. O resultado foi alcançado na 212ª geração, o encerramento do algoritmo se deu por repetição de *fitness* (50 vezes) após aproximadamente 3 minutos, possui $p = 11,61 \text{ mm}$, $d = 8,46 \text{ mm}$, $w = 0,87 \text{ mm}$, $r = 293 \Omega$, não houve busca por dielétrico e foi usado $\epsilon_r = 1,01$ e $\mu_r = 1$ como dielétrico. Na figura 29 pode ser visto as duas frequências onde ocorre ressonância para esse caso, assim como a frequência onde ocorre a *Salisbury's Screen Zone*. O intervalo permitido para a *Salisbury's Screen Zone* ocorrer foi de 14 GHz até 16 GHz, o encontrado pelo algoritmo foi em 14,2 GHz, com isso a largura do dielétrico é de 5,33 mm.

Figura 28- Solução otimizada utilizando o 2º método de cálculo de *fitness*



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 29- Ressonância e *Salisbury's Screen Zone* da segunda solução

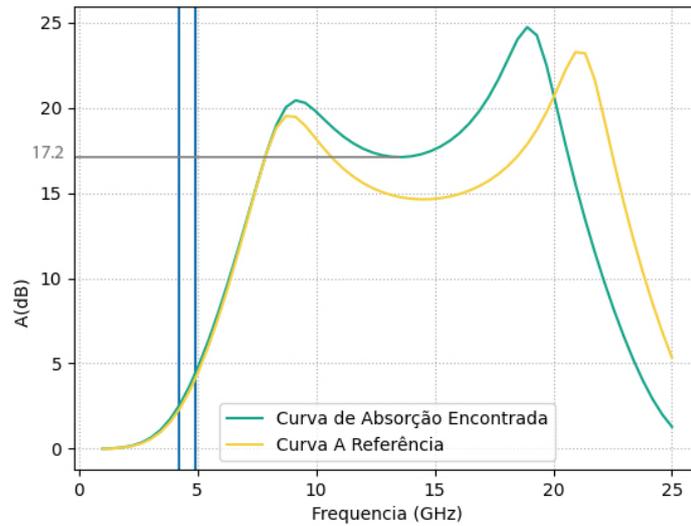


Fonte: Elaborado pelo autor

7.2.3 Resultados utilizando o 3º método de cálculo de *fitness*

No terceiro método, foram escolhidos os pesos de forma que algoritmo buscasse uma curva melhor que a curva de comparação (a curva aqui chamada de referência) até os 20 GHz, não importando a absorção após isso. Para isso os pesos utilizados foram: 1 entre 1 GHz e 20 GHz, 0 entre 20 GHz e 25 GHz. O resultado (figura 30) foi alcançado após 2 minutos e 4 segundos de execução, a parada foi causa por ter ocorrido 50 repetições no *fitness*, na 157ª geração. O resultado obtido foi: $p = 11,46 \text{ mm}$, $d = 9,86 \text{ mm}$, $w = 1,94 \text{ mm}$, $r = 286 \Omega$, não houve busca por dielétrico e foi usado $\epsilon_r = 1,01$ e $\mu_r = 1$ como matéria do substrato, a largura encontrada deste, foi 5,33 mm, o que faz com que ocorra a *Salisbury's Screen Zone* em aproximadamente 14,1 GHz.

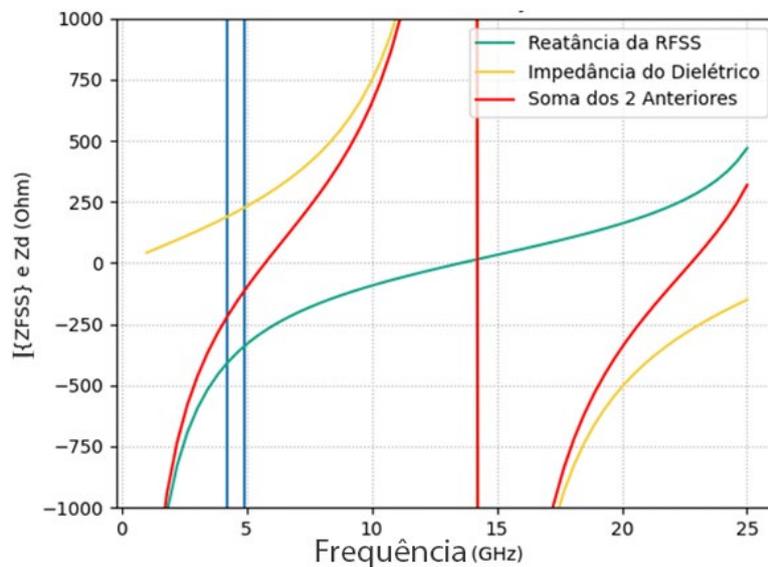
Figura 30- Solução otimizada utilizando o 3º método de cálculo de *fitness*



Fonte: Elaborado pelo autor

O resultado obtido foi exatamente o esperado, com o absorvedor se comportando igual a referência até aproximadamente 8 GHz, quando passa a ter uma melhor absorção, até 20 GHz, o absorvedor mantém a absorção acima dos 17,2 dB em toda a faixa de 10 GHz a 20 GHz. Na figura 31 pode-se observar em que ponto ocorre a ressonância e a *Salisbury's Screen Zone* para este caso.

Figura 31 - Ressonância e *Salisbury's Screen Zone* da terceira solução



Fonte: Elaborado pelo autor

8 CONCLUSÃO

Foram alcançados os objetivos de se obter um algoritmo bem mais rápido que as simulações de onda completa, conseguir resultados que representem uma melhora a partir de um arranjo de referência e mais do que isso, o sistema construído pode ser facilmente aplicado para inúmeras situações com algumas adições na sua implementação. O resultado da camada passa-faixa não foi satisfatório a partir do AG, o que se deve ao fato de o método do circuito equivalente não ser capaz de computar alguns *grating lobes*, assim como também o fato de a espira quadrada do tipo abertura não ser ideal para aplicação, porém mesmo com isso foi possível achar uma FSS desse tipo que tivesse pico de transmissão na frequência desejada.

Algo que torna o algoritmo bastante versátil é o fato de que ele possui um arquivo de configuração em que o usuário define o que ele pretende achar como solução, qual a precisão das curvas, tamanho da geração, intervalos de geração inicial, etc. Outras curvas de referência são facilmente implementadas assim como outras funções fitness, assim é possível transformar o algoritmo não só em um otimizador de absorvedores, mas utilizá-lo em várias outras aplicações.

É importante notar que foi utilizado como referência um bom absorvedor, e como foi dito anteriormente foram utilizados como geração inicial indivíduos gerados aleatoriamente com p entre 6,9 mm e 12 mm, d entre 57% e 90% de p e w entre 1% e 46% de d e r entre 100 Ω e 400 Ω , ou seja, a partir de um alto grau de incerteza na medida da solução pode se chegar até uma solução boa, ou, em alguns casos, até superá-la dependendo da aplicação. Isso demonstra o alto grau de aplicabilidade desse algoritmo, pois os resultados aqui tomados como referências foram obtidos através de demoradas simulações de onda completa, ou seja, esse algoritmo, tem como potencial, ajudar pesquisadores a encontrarem uma solução ótima para o seu caso de estudo a partir de alguns dados obtidos por ele previamente, apesar desse usuário não saber quais medidas exatas utilizar. Assim, ao invés de se testar um conjunto de medidas e escolher o melhor resultado obtido, o algoritmo pode fazer esse trabalho de forma mais eficiente e rápida. O tempo de execução citado em (COSTA; MONORCHIO, 2012), por exemplo, foi por volta de 50 horas, pois a periodicidade das camadas do arranjo eram diferentes entre si, esse problema não ocorre nesse algoritmo o que que coopera também para sua rápida execução.

Para trabalhos futuros há muitas inovações e adições possíveis, alguns exemplos são: *fitness* que incorpore as medidas da FSS, assim favorecendo a seleção de camadas mais fáceis de serem fabricadas e que tenham uma menor espessura, algo muito relevante para absorvedores (DUAN, et al., 2020), também pode ser acrescento a função *fitness* as curvas de uma mesma FSS, porém para vários ângulos de incidência diferente, assim favorecendo a seleção de soluções estáveis perante a inclinação. O sistema também pode incorporar muito mais modelos de FSS, como cruz de Jerusalém, espiras circulares, entre outras para solucionar problemas cada vez mais específicos. Esse algoritmo também pode ser usado da seguinte forma: após obtida uma solução, o mesmo algoritmo é aplicado novamente, porém utiliza se a solução anteriormente obtida como geração inicial e também usa se a simulação de onda completa para realizar os cálculos das curvas de resposta do arranjo e passa-faixa, assim pode se ter uma maior precisão nos resultados e ao mesmo tempo compartilhar do benefício da rapidez de quanto se utiliza o método do circuito equivalente. Isso aumentaria o tempo de execução do algoritmo mas aumentaria sua precisão.

REFERÊNCIAS

ARCENEUX, W. S.; AKINS, R. D.; MAY, W. B. **Absorptive/transmissive radome**. 5,400,043, 21 Março de 1995.

CAMPOS, A. L. P. D. S. **Superfícies Seletivas em Frequência: Análise e Projeto**. Natal: IFRN Editora, 2008. ISBN 978-85-89571-47-0.

CHEN, Q.; FU, Y. A planar stealthy antenna radome using absorptive frequency selective surface. **Microwave and Optical Technology Letters**, 56, n. 8, 24 Ago. 2014. 1788-1792.

COLEY, D. A. **An Introduction to Genetic Algorithms for Scientists and Engineers**. Singapura: World Scientific, 1999. ISBN 981-02-3602-6.

COSTA, F.; MONORCHIO, A. Analysis and Design of Ultra Thin Electromagnetic Absorbers Comprising Resistively Loaded High Impedance Surfaces. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 58, n. 5, p. 1551-1558, Maio. 2010. ISSN 1558-2221.

COSTA, F.; MONORCHIO, A. A Frequency Selective Radome With Wideband Absorbing Properties. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 60, n. 6, p. 2740-2747, Jun. 2012. ISSN 1558-2221.

DUAN, B. et al. Design and preparation of an ultrathin broadband metamaterial absorber with a magnetic substrate based on genetic algorithm. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 501, 166439, Mai. 2020. ISSN 0304-8853.

GOSH, S.; SRIVASTAVA, K. V. An Equivalent Circuit Model of FSS-Based Metamaterial Absorber Using Coupled Line Theory. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, v. 14, p. 511-514, 12 Nov. 2014. ISSN 1548-5757.

GRUBAUGH, N. D.; HANAGE, W. P.; RASMUSSEN, A. L. Making Sense of Mutation: What D614G Means for the COVID-19 Pandemic Remains Unclear. **Cell Press**, v. 182, p. 794-795, 20 Agosto 2020. ISSN 1097-4172.

HAUPT, R. L.; HAUPT, S. E. **Practical Genetic Algorithms**. 2^a. ed. New Jersey: Jhon Wiley & Sons, Inc., 2004. ISBN 978-0-471-45565-3.

JHONSON, M.; RAHMAT-SAMII, Y. Genetic Algorithms in Engineering Electromagnetics. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, Ago. 1997. 4.

KENT, E. F.; DÖKEN; KARTAL, M. K. A New Equivalent Circuit Based FSS Design Method by Using Genetic Algorithm. **2nd International Conference on Engineering Optimization**, Lisboa, 6-9 Set. 2010. 1-4.

- LIGUO, L. et al. Design of an Invisible Radome by Frequency Selective Surfaces Loaded with Lumped Resistors. **Chinese Physics Letters**, v. 30, n. 16, p. 064101-1 064101-4, 17 Dez. 2013. ISSN 1741-3540.
- LINDEN, R. **Algoritmos Genéticos**. 2^a. ed. Rio de Janeiro: Brasport Livros, 2008.
- MARTINI, E. et al. Fast analysis of FSS radome for antenna RCS reduction. **IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium**, Albuquerque, NM, USA, p. 1801-1804, 23 Out. 2006. ISSN 1947-1491.
- OHIRA, M. et al. Multiband Single-Layer Frequency Selective Surface Designed by Combination of Genetic Algorithm and Geometry-Refinement Technique. **IEEE Transaction on Antennas and Propagations**. 11 Nov. 2004. 11.
- POZAR, D. M. **Microwave Engineering**. 4^a. ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- PRAMANICK, P.; BHARTIA, P. **Modern RF and Microwave Filter Design**. 1^a. ed. Norwood, MA: Artech House, 2016. ISBN 978-1-63081-157-0.
- SALISBURY, W. W. **Absorbent Body for Electromagnetic Waves**. US2599944A, 10 jun. 1952.
- WANG, F. et al. Design of an ultra-thin absorption layer with magnetic materials based on genetic algorithm at the S band. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 451, p. 770-773, Abr. 2018. ISSN 0304-8853.