

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

DIM BASQUE PIRES

**OTIMIZAÇÃO DA COLETA DE ENERGIA A PARTIR DE MATERIAIS
PIEZELÉTRICOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2019

DIM BASQUE PIRES



**OTIMIZAÇÃO DA COLETA DE ENERGIA A PARTIR DE MATERIAIS
PIEZELÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Ângelo Marcelo Tusset

PONTA GROSSA

2019

	<p>MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ CÂMPUS PONTA GROSSA Departamento Acadêmico de Engenharia de Produção</p>	 <p>UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ</p>
---	---	---

TERMO DE APROVAÇÃO DE TCC

OTIMIZAÇÃO DA COLETA DE ENERGIA A PARTIR DE MATERIAIS PIEZELETRICOS

por

Dim Basque Pires

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado em 25 de junho de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. ÂNGELO MARCELO TUSSET
Prof. Presidente da banca

Prof. Dr. ANTONIO CARLOS DE FRANCISCO
Membro titular

Prof. Dr. FABIO NEVES PUGLIERI
Membro titular

Dedico este trabalho a minha mãe,
meu exemplo de vida e porto seguro,
que sempre me apoiou e me deu forças para
concluir mais esta etapa na minha vida

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder saúde e forças para concluir mais essa etapa da minha jornada.

Agradeço minha família e minha namorada, que me deram muito apoio ao decorrer de todo este percurso, me ouvindo, me aconselhando e me incentivando nos momentos difíceis.

Agradeço em especial minha mãe Maria do Carmo Basque, que é meu exemplo de vida e meu porto seguro.

Agradeço ao Prof. Dr. Ângelo Marcelo Tusset, pela sabedoria com que me guiou por esta etapa, e pela paciência que teve ao me auxiliar no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos colegas do laboratório de elétrica, Mauricio e Wagner, que me ajudaram tantas vezes ao decorrer deste trabalho.

Enfim, agradeço a todos que de alguma maneira me ajudaram neste processo, peço desculpas caso não tenha mencionado aqui, mas podem ter a certeza de que fazem parte da minha gratidão.

RESUMO

PIRES, D. B. **Otimização da Coleta de Energia a Partir de Materiais Piezoelétricos**. 2019. 43 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2019.

Devido à preocupação crescente com o desenvolvimento de fonte de energias renováveis para aplicações em microssistemas, este trabalho teve como objetivo, propor um algoritmo genético para análise paramétrica de sistemas micro eletromecânicos, para otimizar a coleta de energia por meio de materiais piezoelétricos acoplados a um sistema aporticado. Com a utilização do algoritmo genético foi possível determinar parâmetros relacionados à rigidez estrutural do sistema, que proporciona a produção ótima de energia. Os resultados numéricos demonstram que o algoritmo proposto é eficiente em determinar os parâmetros ideais para geração de energia.

Palavras-chave: Algoritmo Genético. Coleta de Energia. Material Piezoelétrico.

ABSTRACT

PIRES, D. B. **Harvest Energy Optimization by Piezoelectric Materials**. 2019. 43 p. TCC. Final Paper. (University Graduate in Production Engineer) - Federal Technological University of Parana, Ponta Grossa, 2019.

Due to growing concern with the development of renewable energy source for applications in microsystems, this work aimed to propose a genetic algorithm for parametric analysis of microelectromechanical systems to optimize the energy collection by means of piezoelectric materials coupled to a framed system. With the use of the genetic algorithm it was possible to determine parameters related to the structural rigidity of the system, which provides the optimal energy production. The numerical results demonstrate that the proposed algorithm is efficient in determining the ideal parameters for energy generation.

Keywords: Genetic Algorithm. Harvest Energy. Piezoelectric Material.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fontes Geradores de Energia Elétrica	14
Figura 2 - Tipos de Coletas de Energia.....	16
Figura 3 - Estrutura Cristalina Perovskita.....	17
Figura 4 - Efeito Direto.	18
Figura 5 - Efeito Inverso.	18
Figura 6 - Sistema de Coleta de Energia.	19
Figura 7 - Modelo Físico do Oscilador com Controle Passivo.....	20
Figura 8 - Algoritmos Bioinspirados.....	23
Figura 9 Fluxograma do Algoritmo Genético.....	26
Figura 10 - Roleta Viciada.....	28
Figura 11 - Crossover.....	29
Figura 12 - Mutação.	30
Figura 13 - RMS(P) x $\epsilon 1$	34
Figura 14 - Caso 2 - RMS(P) x $\epsilon 2$	35
Figura 15 - Caso 3 - RMS(P) x $\epsilon 2$	36

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Correlação da Terminologia do AG com a Biologia.....	24
Quadro 2- Parâmetros da Roleta Viciada.....	28
Quadro 3 - Parâmetros para Simulação Numérica.....	31
Quadro 4 - Comparativo dos Resultados.	36

LISTA DE SIGLAS:

AG	Algoritmo Genético
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DENL	Dissipador de Energia Não Linear
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
SNI	Sistema Não Ideal

LISTA DE SÍMBOLOS

$X_1(t)$	Deslocamento do oscilador
$X_2(t)$	Deslocamento do oscilador Dissipador de Energia Não Linear
b_1	Coefficiente do amortecedor linear 1
k_1	Coefficiente da mola 1
m_0	Massa desbalanceada
m_1	Massa da estrutura
m_2	Massa do Dissipador de Energia Não Linear
ω_1	Frequência natural
b	Coefficiente do amortecedor linear 0
J	Momento de inércia
k	Coefficiente da mola 0
r	Excentricidade
α	Variável adimensional
ε	Variável adimensional
$\varphi(t)$	Deslocamento angular do rotor

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	10
1.2. PERGUNTA DE PARTIDA	11
1.3. JUSTIFICATIVA	11
1.4. OBJETIVO GERAL	11
1.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
1.6. DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	12
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	13
2.1 ENERGIA ELÉTRICA E MEIOS GERADORES	13
2.1.1. Fontes Não Renováveis	14
2.1.2. Fontes Renováveis.....	15
2.1.4. Piezoelectricidade e Material Piezoelétrico	17
2.2. MODELO ESTUDADO	19
2.2.1. Entendimento do Modelo.....	19
2.3. ALGORITMO.....	22
2.3.1 Programação Bioinspirada	22
2.3.2. Algoritmo Evolucionário e Algoritmo Genético	23
3.4. ALGORITMO GENÉTICO	24
3.4.1. População Inicial	27
3.4.2. Avaliação e seleção.....	27
3.4.3. Roleta viciada.....	27
3.4.4. Crossover	29
3.4.5. Mutação.....	30
3.4.6. Critério de Parada	30
3. METODOLOGIA	31
3.1. SIMULAÇÃO NUMÉRICA	31
3.2. CASO 1	32
3.3. CASO 2	32
3.4. CASO 3	33
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	34
4.1. CASO 1	34
4.2. CASO 2	35
4.3. CASO 3	35
5. CONCLUSÃO	37
REFERÊNCIAS	38

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentada a motivação para realização deste trabalho e seus objetivos, assim como uma contextualização do tema.

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Com os avanços tecnológicos, a energia elétrica vem se tornando indispensável para a manutenção da sociedade, junto a isto, existe uma preocupação ambiental, relacionada a alguns dos meios geradores de energia mais convencionais, que utilizam de fontes geradoras não renováveis, ou seja, que utilizam de recursos esgotáveis.

Sendo assim, métodos de geração de energia renováveis vêm sendo amplamente estudados para garantir um futuro mais sustentável para sociedade, tanto em escala macro, para suprir a necessidade de grandes instalações, quanto escala micro para suprir a necessidade de sistemas que apresentam pouca demanda de energia para funcionarem.

O Brasil vem desenvolvendo infraestrutura para geração de energia elétrica por meio de fontes renováveis em escala macro, pois segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2018) as fontes geradoras mais utilizadas no Brasil em 2017 foram: hidráulica (63,1%), gás natural (11,2%), biomassa (8,4%) e eólica (7,2%).

Porém é necessário também pesquisas no espectro micro, visto que existem locais ou aplicações que é mais interessante a utilização de fontes geradoras locais devido seu difícil acesso (FERREIRA, 2017).

Uma alternativa para a geração de energia elétrica para micro sistemas é coleta de energia (*energy harvesting*), que consiste em reaproveitar a energia dissipada por um sistema e transformá-la em energia elétrica para a alimentação de outros sistemas menores (MORAES, 2018). De acordo com Elvin e Erturk (2013) esse tipo de sistema tem diversas áreas de aplicação, tais como: implantes médicos, monitoramento e instrumentação de estruturas, sensores sem fios, relógios, entre outros.

Dentre os métodos de coleta de energia mais comuns, este trabalho optou pela utilização do método de coleta vibracional por meio de materiais piezoelétricos, que são capazes de gerar tensão elétrica ao serem submetidos a deformações, devido a sua estrutura cristalina do tipo Perovskita (PEREIRA, 2010).

Segundo Iliuk (2016), um sistema que vem amplamente sendo estudado para coleta de energia através de materiais piezoelétricos é a estrutura aporticada do tipo *shear building* proposta por Garzeri (2001).

Visto isso, este trabalho propõe a utilização de algoritmos computacionais, para maximizar a geração de energia oriunda dos materiais piezoelétricos acoplados a estrutura aporticada, proposta por Garzeri (2001).

Para propor novos valores aos parâmetros utilizados por Iliuk (2016), foi utilizada a heurística do algoritmo genérico, que consiste em um algoritmo evolucionário, ou seja, parte de uma população de dados previamente definidos e seleciona novos parâmetros para satisfazer as restrições que são impostas.

Os algoritmos evolucionários são inspirados diretamente pela teoria da evolução de Darwin na qual os indivíduos têm a necessidade de se adaptar ao ambiente, que por sua vez possui uma capacidade limite de indivíduos, fazendo com que os mais aptos sobrevivam e reproduzam, dando origem a novas gerações mais adaptadas a este ambiente.

1.2. PERGUNTA DE PARTIDA

Qual a eficiência de um algoritmo genético para obtenção dos parâmetros para otimização da produção de energia elétrica oriunda de materiais piezoelétricos acoplados em um sistema aporticado?

1.3. JUSTIFICATIVA

Devido aos avanços tecnológicos, muitos equipamentos eletrônicos vêm se tornando cada vez mais eficientes e utilizando menor quantidade de energia elétrica. Visto isso, é interessante pesquisar a utilização de meios que colem energia, que a priori está sendo dissipada por um sistema, para transformá-la em energia elétrica, podendo assim alimentar outros sistemas, tornando o processo mais eficiente energeticamente

1.4. OBJETIVO GERAL

Por meio da utilização de Algoritmos Genéticos propor uma estratégia para determinação dos valores dos parâmetros de um sistema micro eletromecânicos que

otimizaram a coleta de energia gerada pelos materiais piezoelétricos acoplados ao sistema aporticado, utilizando simulações numéricas.

1.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Propor um algoritmo computacional que utilizem Algoritmos Genéticos de forma a avaliar a otimização paramétrica de um modelo matemático que represente um sistema de geração de energia;

Propor uma função objetivo de otimização que considere a massa da estrutura aporticada e sua rigidez;

Através de simulações e computacionais, determinar quais valores dos parâmetros relacionados à rigidez e massa da estrutura são os ideais para otimizar a geração de energia elétrica por meio da utilização de materiais piezoelétricos.

Avaliar a eficiência dos resultados encontrados pelo algoritmo utilizado, realizando varreduras computacionais nas equações, para encontrar os melhores resultados e compará-los com os resultados obtidos pelo algoritmo.

1.6. DELIMITAÇÃO DO TEMA

Este trabalho tem como intuito, propor um algoritmo computacional que auxilie na pesquisa para otimização da geração de energia elétrica através de materiais piezoelétricos, que estão acoplados ao sistema aporticado proposto por Garzeri (2001), analisando a variação da rigidez e da massa da estrutura aporticada proposta por Iliuk (2016).

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo será abordado o referencial teórico para a realização do trabalho, abrangendo trabalhos anteriores que serviram de base para este.

2.1 ENERGIA ELÉTRICA E MEIOS GERADORES

O panorama energético brasileiro vem se modificando ao decorrer das décadas, pois com a pressão mundial para a busca de meios mais sustentáveis e o risco da utilização de uma matriz que depende muito de um só recurso fez com que fossem diversificadas as fontes geradoras no Brasil, como vem sendo com os campos eólicos (CUNHA *et al.*, 2017).

Segundo Rodrigues (2019), com o crescimento na demanda de energia elétrica e as preocupações com os problemas ambientais, países e empresas buscam a sustentabilidade energética para garantir um futuro competitivo. Nesse cenário é necessário se atentar aos tipos de fontes de energia disponíveis.

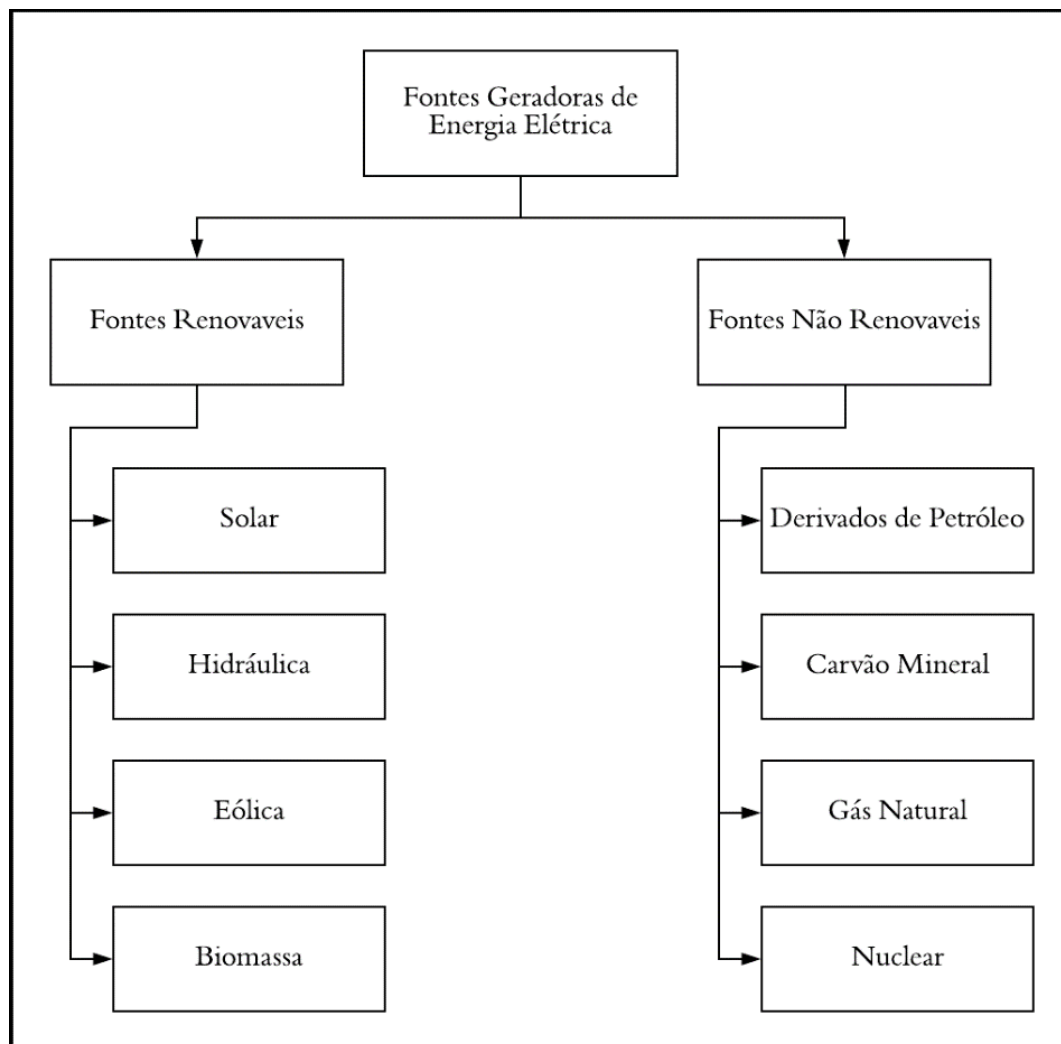
Além da viabilidade de matéria prima para a implantação de um sistema, como o caso da energia eólica que depende diretamente da incidência de ventos, é necessário fazer uma análise socioeconômica, para garantir que todos os pilares da sustentabilidade sejam atendidos (CUNHA *et al.*, 2017).

A utilização de energias renováveis por empresas, pode ser vista como parte da estratégia empresarial, fazendo um marketing sustentável é possível construir uma imagem mais atrativa a vários nichos no mercado mundial, ao mesmo tempo que reduzem seus custos operacionais (VASCONCELOS *et al.*, 2019).

As fontes geradoras de energia dividem-se em dois principais tipos, sendo eles fontes renováveis e não renováveis (BARBOSA; AZEVEDO2013). Para que as empresas tenham um melhor marketing sustentável, é necessário que utilizem fontes renováveis e façam relatórios de sustentabilidade (VASCONCELOS *et al.*, 2019).

É possível observar na Figura 1 as principais fontes geradoras renováveis e não renováveis segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2018).

Figura 1 - Fontes Geradoras de Energia Elétrica



Fonte: Adaptado de Empresa de Pesquisa Energética (2018).

Conforme visto no Quadro 1, existem meios sustentáveis para a produção de energia elétrica em escala macro, porém este trabalho trata de microescala e por isso é inviável a utilização destes meios mais comuns.

2.1.1. Fontes Não Renováveis

As fontes não renováveis de geração de energia são provenientes de recursos que estão passíveis de se esgotar, pois a taxa de formação desses recursos é menor que a taxa de extração atual (BARBOSA; AZEVEDO 2013).

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2018) as energias não renováveis mais utilizadas são:

- Derivados de petróleo;
- Carvão mineral;
- Gás natural;
- Nuclear.

Esses exemplos têm características de termoelétricas, pois geram calor para aquecer uma caldeira com água, transformando-a em vapor para movimentar turbinas que transformam a energia cinética em energia elétrica (BARBOSA; AZEVEDO, 2013).

Além do aspecto de possível esgotamento do material utilizado para a produção de energia elétrica, é importante atentar para o fator de poluição que algumas fontes geradoras produzem, como gases de efeito estufa (RODRIGUES, 2019).

2.1.2. Fontes Renováveis

As fontes de energia renováveis são aquelas que a taxa de utilização pelo homem é menor do que a taxa de formação pela natureza, (BARBOSA; AZEVEDO, 2013).

Segundo Pacheco (2006), as fontes de energia renováveis mais comuns são:

- Solar
- Hídrica
- Eólica
- Biomassa

Essas fontes, mesmo sendo renováveis, não significa que satisfazem todos os pilares da sustentabilidade, pois, segundo Dincer e Acar (2015), para que um sistema gerador de energia elétrica seja verdadeiramente considerado sustentável, é necessário atender os seguintes critérios:

- Impacto social e ambiental mínimo ou nulo;
- Preservar recursos naturais;
- Suprir a demanda de energia atual e futura de forma eficiente;
- Proteger o meio ambiente;
- Emitir quantidade mínima ou nula de gases de estufa.

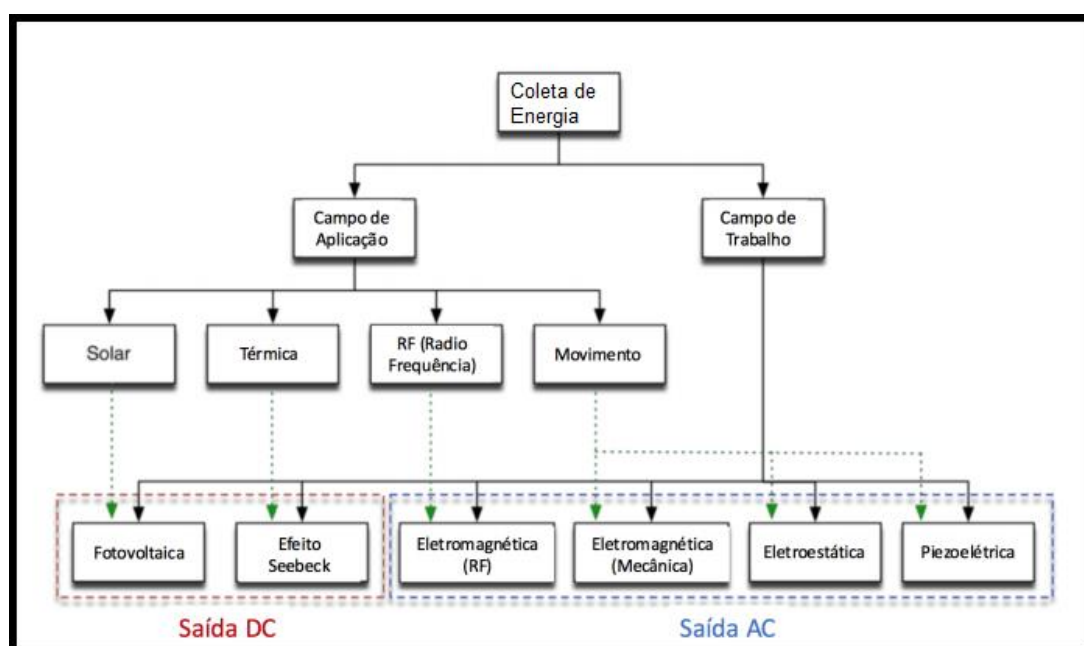
Mesmo que as fontes sejam sustentáveis, ainda existem sistemas que devido a suas particularidades são mais economicamente viáveis que sejam auto alimentados com sistemas de coleta de energia, como por exemplo: rede de sensores sem fio utilizados para monitoramento (RANGEL, 2014).

2.1.3. Coleta de Energia

O termo coleta de energia é utilizado para classificar um sistema que coleta pequenas quantidades de energia do ambiente e transforma em energia elétrica para alimentar sistemas que tem um baixo consumo (ELVIN; ERTURK, 2013).

Existem vários métodos de coleta de energia, tais como coleta de energia mecânica, térmica, ondas eletromagnéticas, entre outras (ELVIN; ERTURK, 2013). É possível observar na Figura 2, os princípios de coleta energética, onde eles são aplicados e qual tipo de corrente elétrica eles fornecem, corrente alternada (CA) ou corrente contínua (CC).

Figura 2 - Tipos de Coletas de Energia



Fonte: Adaptado de Moraes *et al.* (2014).

Uma característica muito importante é que, quando não se pode utilizar alimentação por meio de fios e existe a necessidade da utilização de sistemas que utilizam acumuladores eletroquímicos, como pilhas ou baterias, que devido a possuírem um tempo de vida limitado, necessitam de substituição, algo que pode ser

muito oneroso e também arriscado, como no caso de dispositivos implantados no corpo (RANGEL, 2014).

2.1.4. Piezoelectricidade e Material Piezoelétrico

Segundo Pereira (2010), a piezoelectricidade é baseada na capacidade de alguns materiais de gerarem cargas elétricas quando submetidos a uma deformação mecânica. Isto ocorre, pois estes materiais pertencem ao grupo das cerâmicas denominado materiais ferroelétricos.

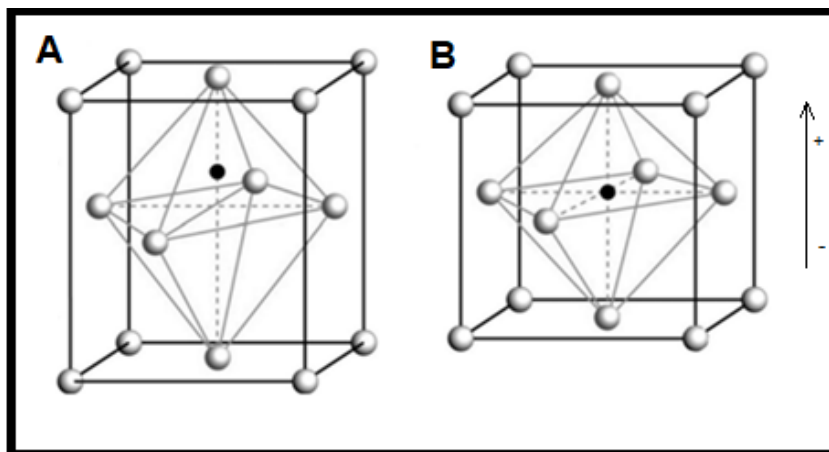
Os materiais ferroelétricos possuem estrutura cristalina do tipo Perovskita que pode ser encontrada na natureza, nos materiais quartzos, além da possibilidade de sintetização em laboratório, como os cristais cerâmicos criados a base de titanato de chumbo ($PbTiO_3$) e zirconato de chumbo ($PbZrO_3$).

As cerâmicas piezoelétricas possuem estrutura cristalina do tipo Perovskita, que dependendo da temperatura em que o material se encontra, podem apresentar simetria tetragonal, romboédrica ou cúbica simples (JAFFE, 1971).

Segundo Jaffe (1971), quando a temperatura é inferior a temperatura crítica, também conhecida como temperatura de Curie, a estrutura cristalina Perovskita apresenta simetria tetragonal, onde o centro de simetria das cargas positivas e negativas não coincidem, dando origem a um dipolo elétrico, como é possível observar na Figura 3.

Figura 3 - Estrutura Cristalina Perovskita.

A) Temperatura inferior a crítica. B) Temperatura superior a crítica.



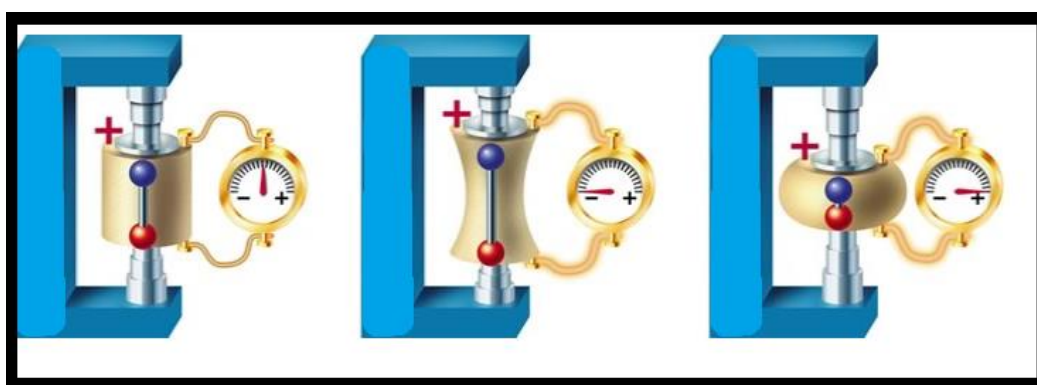
Fonte: Adaptado de Pereira (2010).

Devido a este dipolo, é possível observar 2 tipos de efeitos piezoelétricos, que possuem muitas aplicações na área de engenharia, tanto para geração de energia, quanto para controle de sistemas (PEREIRA, 2010).

Segundo Jaffe (1971) existem 2 tipos de efeito piezoeletrico, sendo eles:

Efeito direto, que se caracteriza quando uma força mecânica atua sobre o material e este por sua vez gera um dipolo elétrico produzindo energia elétrica, como pode ser observado na Figura 4.

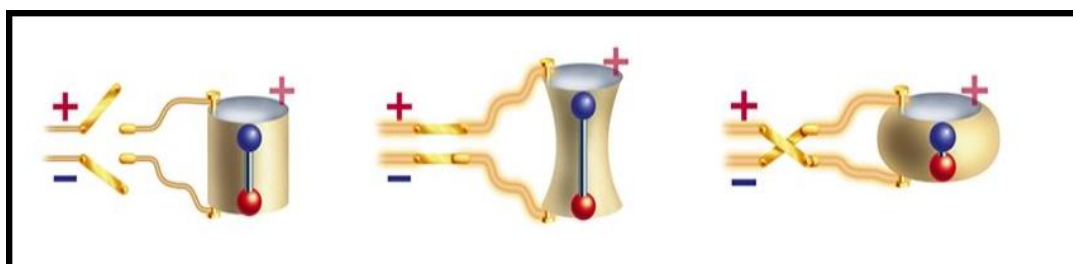
Figura 4 - Efeito Direto.



Fonte: Adaptado de Pereira (2010).

Efeito inverso, que se caracteriza quando uma tensão elétrica é aplicada ao material, fazendo com que ele se deforme mecanicamente dependendo do tipo da tensão, gerando assim energia mecânica, como é possível observar na Figura 5.

Figura 5 - Efeito Inverso.



Fonte: Adaptado de Pereira (2010).

Devido a esses efeitos, os materiais piezoelétricos são utilizados em várias áreas de pesquisas, tanto como fonte de geração de energia, (FERREIRA, 2017; RODRIGUES, 2019), como controladores (CLEMENTINO, 2019).

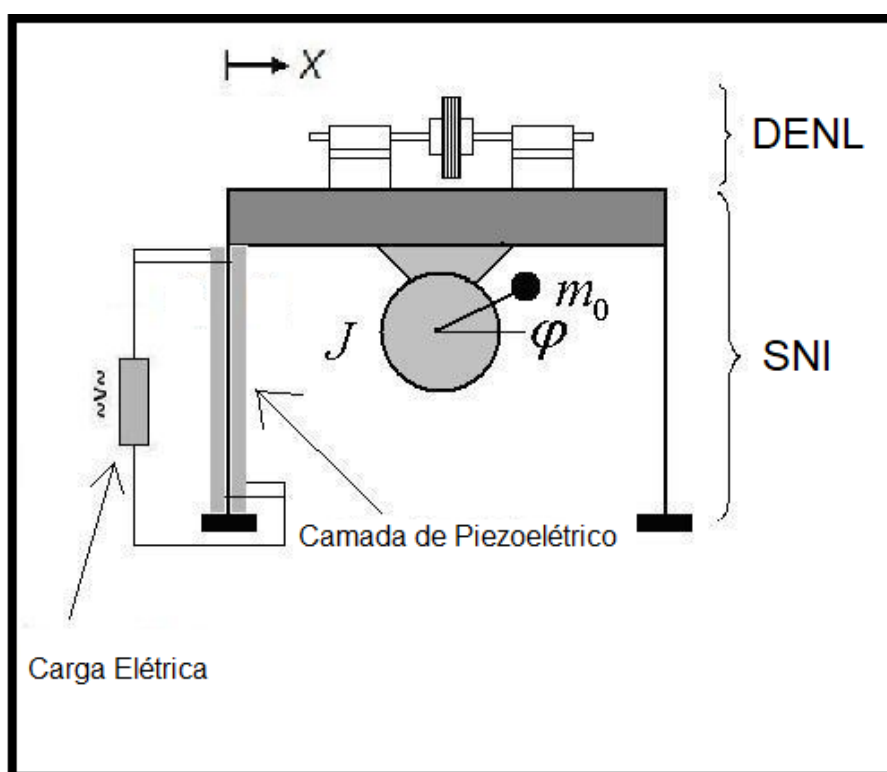
2.2. MODELO ESTUDADO

Neste capítulo é feito o entendimento físico e matemático do modelo estudado.

2.2.1. Entendimento do Modelo

O sistema de coleta de energia analisado neste trabalho, que pode ser observado na Figura 6, foi proposto por Iliuk (2016), com base na estrutura aporticada não linear, estudada anteriormente por Brasil (1990) e Felix (2002) e com controlador passivo estudado por Tusset *et al.* (2013) e Tusset e Balthazar (2012).

Figura 6 - Sistema de Coleta de Energia.



Fonte: Adaptado de Iliuk (2016).

O movimento horizontal, que atua sobre a estrutura aporticada, é proveniente da excitação não linear do motor elétrico de corrente contínua (CC), que possui massa desbalanceada e do controle passivo aplicado pelo Dissipador de Energia Não Linear (ILIUK, 2016).

O movimento do motor caracteriza o Sistema Não Linear (SNI) que atua sobre o sistema. A estrutura conta com materiais piezoelétricos conectados por meio de

eletrodos em ambos os lados de uma coluna, e a uma carga elétrica, como por exemplo um resistor (ILIUK, 2016; ILIUK *et al.*, 2014).

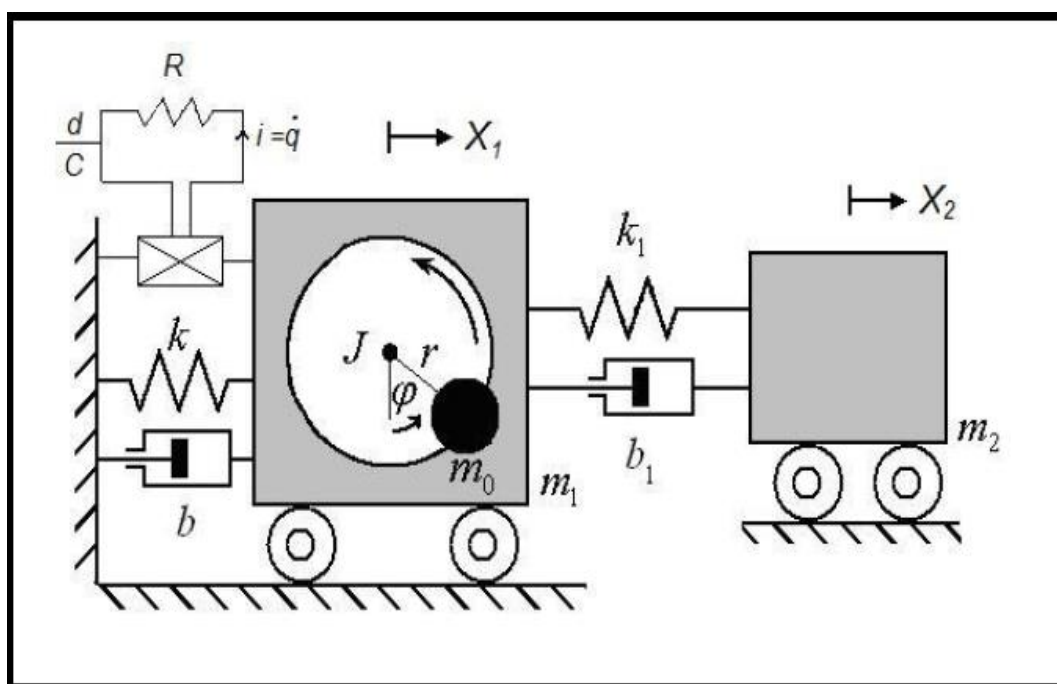
Segundo Iliuk (2016), foi utilizado o método de Lagrange para obtenção das equações do movimento do sistema eletromecânico não linear, e o termo de acoplamento do material piezoelétrico nas equações foram definidos por Triplett e Quinn (2009).

Como o Dissipador de Energia Não Linear (DENL) não requer nenhuma injeção de energia no sistema para controlar a estrutura, ele é considerado uma estratégia muito eficaz de controle passivo (TUSSET *et al.*, 2013).

O modelo matemático do Sistema Não Ideal (SNI) com controle passivo feito pelo Dissipador de Energia Não Linear (DENL) é dado pela Equação 1.

O modelo físico do oscilador com controle passivo acoplado pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 - Modelo Físico do Oscilador com Controle Passivo.



Fonte: Adaptado de Iliuk (2016).

Onde as variáveis são: m_0 é a massa desbalanceada; m_1 é a massa da estrutura; k é o coeficiente da mola; b é o coeficiente do amortecedor linear; $X_1(t)$ é o deslocamento do oscilador; $\varphi(t)$ é o deslocamento angular do rotor; J é o momento de inércia; r é a excentricidade; m_2 é a massa do DENL; k_1 é o coeficiente da mola;

b_1 é o coeficiente do amortecedor linear, $X_2(t)$ é o deslocamento do oscilador DENL; onde o coeficiente da mola $k = -k_l X_l + k_{nl} X_l^3$.

De acordo com Iliuk (2016), as equações que regem o movimento do sistema para a forma adimensional podem ser vistas na Equação 1.

$$\begin{aligned}
 x'' - \beta_1 x + \alpha_1 x' + \alpha_2(x' - z') + \beta_3 x^3 + \alpha_3(x' - z')^3 - \theta(1 + \theta|x|)v \\
 \varphi'' \text{sen}\varphi + \delta_1 \varphi'^2 \text{cos}\varphi; \\
 z'' - e\epsilon_1(x' - z') - e\epsilon_2(x - z)^3 = 0; \\
 \varphi'' = \rho_1 \text{cos}\varphi x'' - \rho_3 \varphi + \rho_2; \\
 \rho v' = \theta(1 + \theta|x|)x + v
 \end{aligned} \tag{1}$$

Utilizando os parâmetros adimensionalizados propostos por Tusset e Balthazar (2012), Tusset *et al.* (2013),

$$\alpha_2 = \frac{b_1}{m_2 \omega_1}; \quad \alpha_3 = \frac{k_1 r^2}{m_1}; \quad \epsilon_1 = \frac{m_1 b_1}{m_2 \omega_1}; \quad \epsilon_2 = k_1 r^2; \quad e = \frac{1}{m_2}.$$

Utilizando novas variáveis definidas como: $x_1 = x$; $x_2 = x'$; $x_3 = z$; $x_4 = z'$; $x_5 = \varphi$; $x_7 = v$, é possível reescrever as equações em forma de espaço de estados, Equação 2.

$$\begin{aligned}
 x'_1 &= x_2; \\
 x'_2 &= \beta_1 x_1 - \alpha_1 x_2 - \alpha_2(x_2 - x_4) - \beta_3 x_1^3 - \alpha_3(x_1 - x_3)^3 + \dots \\
 &\dots \theta(1 + \theta|x_1|)x_7 + \delta_1 \text{sen}(x_5)x'_6 + \delta_1 \text{cos}(x_5)x_6^2; \\
 x'_3 &= x_4; \\
 x'_4 &= e\epsilon_1(x_2 - x_4) + e\epsilon_2(x_1 - x_3)^3; \\
 x'_5 &= x_6; \\
 x'_6 &= \rho_1 \text{sen}(x_5)x'_2 + \rho_2 - \rho_3 x_6; \\
 x'_7 &= \frac{\theta(1 + \theta|x_1|)x_1}{\rho} - \frac{x_7}{\rho}.
 \end{aligned} \tag{2}$$

De acordo com Tusset *et al.* (2013), o sistema (2) representa o sistema (1) em espaços estados na forma canônica.

2.3. ALGORITMO

Segundo Cormen (2009), um algoritmo pode ser definido como uma sequência finita de passos para se resolver um determinado problema. Ele capta os inputs (entradas), faz um processo seguindo determinados padrões e retorna outputs (saídas). Eles podem ser aplicados em diversas áreas, tais como manufatura, economia, logística, engenharia, medicina, computação, entre outras.

A palavra algoritmo está comumente associada as áreas de programação, porém ele teve início muitos séculos atrás. Um dos primeiros algoritmos que se tem registro data-se de 300 a.C., é o Algoritmo Euclidiano, que traz um método para encontrar o máximo divisor comum entre dois números inteiros (CAIXETA, 2016).

Com os avanços na área da computação, os algoritmos começaram a se tornar mais complexos, utilizando várias restrições e sequências maiores de passos para solução de problemas (PAPPA; FREITAS, 2009).

Existe um segmento de algoritmos que buscam solucionar problemas complexos utilizando sistemas que existem na natureza, o nome dado a esse tipo de algoritmos é bioinspirado. Este grupo de algoritmos compreende uma grande gama de heurísticas e métodos que tem como foco, a solução mais eficiente de problemas utilizando métodos conhecidos na biologia (PAPPA; FREITAS, 2009).

2.3.1 Programação Bioinspirada

De acordo com Mitchell (1996), a programação bioinspirada teve início na década de 1950 com vários pesquisadores, dentre eles: Box (1957), Friedman (1959), Bledsoe (1961), Bremermann (1962).

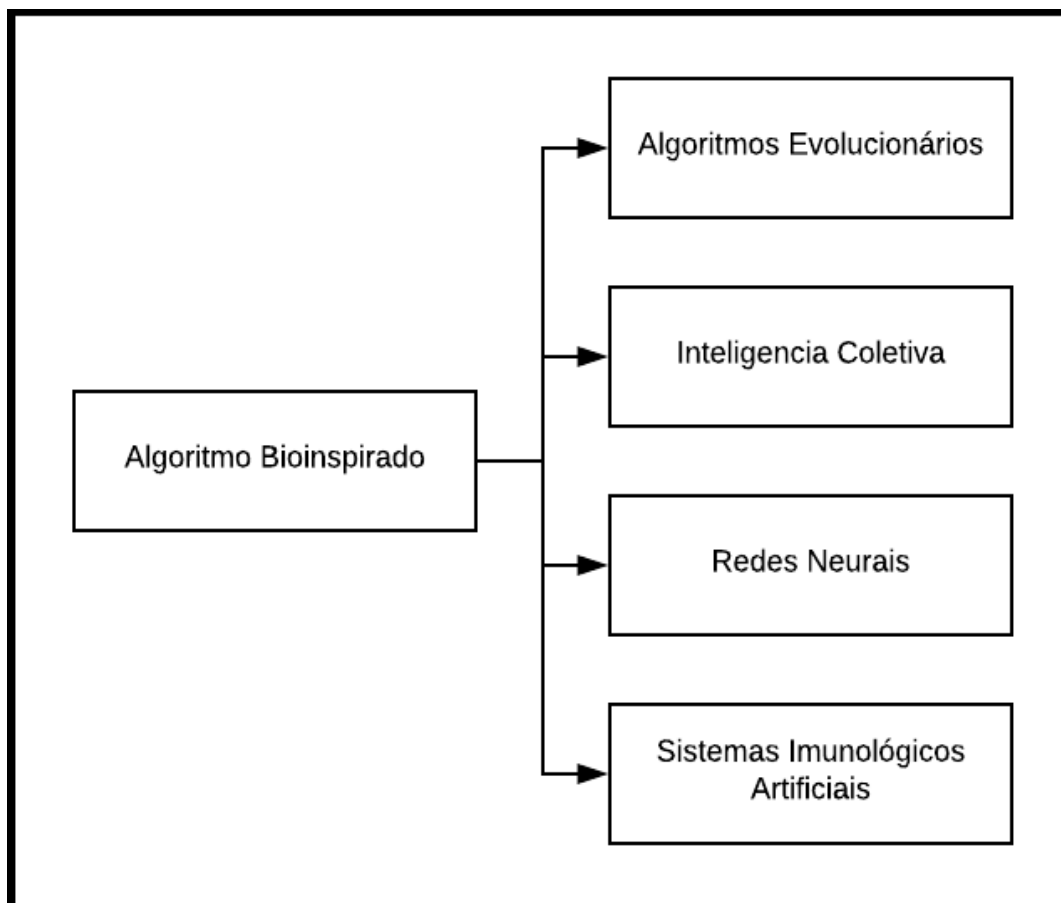
Atualmente algoritmos bioinspirados são utilizados para solução de problemas em várias áreas do conhecimento, tais como:

- Algoritmo genético: Moura *et al.* (2019) em geração de energia;
- Enxame de Partículas: Lima (2019) em planejamento empresarial;
- Colônia de Formigas: Souza (2018) em pesquisa operacional;

Como as heurísticas bioinspiradas tendem a consumir menos tempo computacional, são muito utilizadas em otimizações (PAPPA; FREITAS, 2009).

Na Figura 8 é possível observar os 4 grupos que englobam os algoritmos bioinspirado (PAPPA; FREITAS, 2009).

Figura 8 - Algoritmos Bioinspirados.



Fonte: Adaptado Pappa e Freitas (2009).

O algoritmo utilizado para este trabalho está englobado nos algoritmos evolucionários.

2.3.2. Algoritmo Evolucionário e Algoritmo Genético

Os Algoritmos Genéticos (AG) fazem parte dos Algoritmos Evolucionários (AE), que tiveram estudos iniciais feitos na década de 50 (MITCHELL, 1996).

Após a fase inicial de pesquisa sobre os algoritmos evolucionários, foram aproximadamente 3 décadas de pouca explosão do assunto, devido principalmente a falta de plataformas computacionais robustas o suficiente para fazer simulações naquela época (FOGEL, 1994).

Segundo Mitchell (1996), partir da década de 80, os avanços computacionais possibilitaram a aplicação de algoritmos evolucionários para a resolução de problemas reais.

Os AGs são algoritmos inspirados na teoria da evolução proposta por Darwin no livro “On the Origin of Species” (1859), onde os indivíduos mais adaptados são selecionados e se reproduzem mais, dando origem a indivíduos com características semelhantes e assim por diante (PINHO *et al.*, 2013).

Esse conceito de seleção natural foi a base para que Holland (1975), desenvolvesse os algoritmos genéticos, que depois foram aperfeiçoados por Goldberg (1989) e Michalwicz (1992).

Os AGs buscam soluções aleatórias para a resolução de um problema, sem ter conhecimento específico sobre os mesmos, de modo que a busca pela solução ótima é baseada exclusivamente pelo valor da função objetivo (PINHO *et al.*, 2013).

3.4. ALGORITMO GENÉTICO

Para facilitar o entendimento do algoritmo genético, é possível ver a correlação da terminologia do AG e da biologia, que foi utilizada como base para o desenvolvimento do algoritmo no Quadro 1.

Quadro 1 - Correlação da Terminologia do AG com a Biologia.

Biologia	Algoritmo Genético (AG)
Gene	Parâmetros que caracterizam o indivíduo
Cromossomo	Indivíduo
Alelo	Valor dos parâmetros do gene
Locus	Posição de um gene no indivíduo
Genótipo	Indivíduo candidato a uma solução : x
Fenótipo	Valor da função para um dado indivíduo : $f(x)$

Fonte: Adaptado de Barboza (2005).

Como é possível observar no Quadro 1, cada parâmetro do algoritmo genético, tem seu respectivo parâmetro na biologia (BARBOZA, 2005).

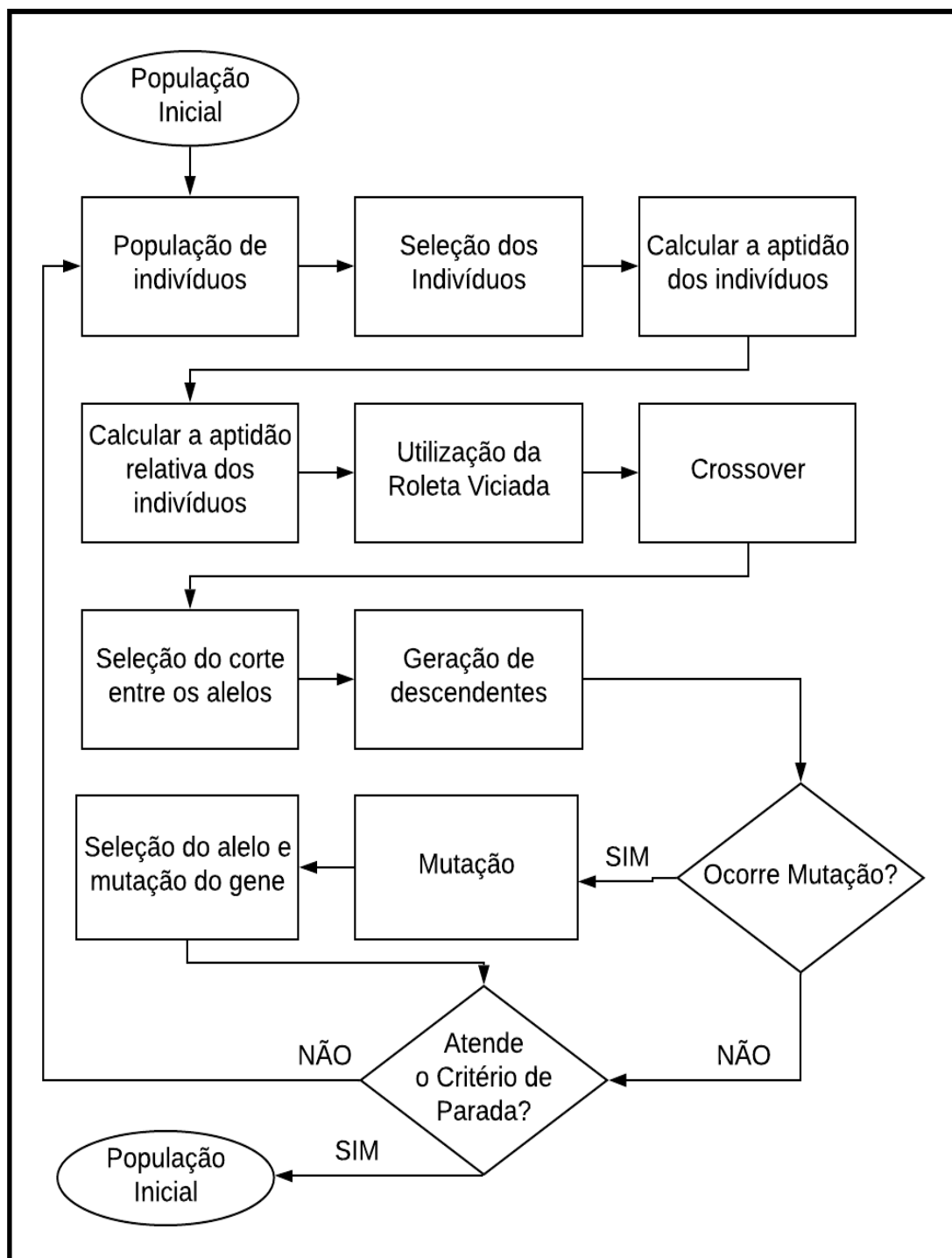
Segundo Holland (1975), o algoritmo genético clássico, segue determinadas etapas específicas, que consistem em:

1. Geração da população inicial;
2. Determinar número máximo de interações e critério de parada;
3. Calcular aptidão dos indivíduos da população inicial;
4. Em cada iteração, fazer;
 - a. Selecionar pais na população, para crossover;
 - b. Realizar crossover;
 - c. Realizar mutação;
 - d. Realizar busca local a cada geração;
5. Realizar iterações até atingir o número máximo de iterações ou satisfazer algum critério previamente estipulado.

Segundo Pinho *et al.* (2013), os algoritmos genéticos seguem mesma estrutura proposta por Holland (1975) e aperfeiçoada por Goldberg (1989), desde a década de 90, porém ainda vem sendo amplamente utilizado em conjunto com outras heurísticas para soluções mais eficientes de problemas dinâmicos que demandem muito tempo computacional, como nos casos de:

É possível uma visualização mais fluida do funcionamento do algoritmo na Figura 9.

Figura 9 Fluxograma do Algoritmo Genético.



Fonte: Adaptado de POZO et al. (2005).

É possível observar na Figura 9, que são seguidas várias instruções dentro de cada etapa, visto isso, será descrito e exemplificado cada etapa do algoritmo.

3.4.1. População Inicial

A população inicial é gerada de maneira simples e aleatória, para que exista uma boa distribuição da população, pois desta forma é possível cobrir um espaço maior no domínio da busca (SOUZA *et al.*, 2010).

Para que não exista uma convergência prematura é necessário que não exista um conhecimento prévio da função objetivo (PINHO *et al.*, 2013).

3.4.2. Avaliação e seleção

A avaliação da população é feita de modo que, os valores obtidos pelos indivíduos são inseridos na função objetivo, está por sua vez retorna o valor de aptidão (LACERDA *et al.*, 2002).

A partir do valor de aptidão, é gerado o valor de aptidão relativo, para que seja possível montar a roleta de sorteio, esse método garante que os indivíduos com mais aptidão relativa tenham maiores chances de serem escolhidos, porém este método também permite que qualquer indivíduo da amostra seja escolhido, não só os melhores classificados (PAPPA; FREITAS, 2009).

O valor relativo é calculado a partir da razão entre a aptidão de cada indivíduo e a soma de todas as aptidões, para gerar um percentual no método roleta viciada (LACERDA *et al.*, 2002).

3.4.3. Roleta viciada

É possível observar no exemplo abaixo, adaptado de Pappa e Freitas (2009), o funcionamento da roleta. A função objetivo expressa na Equação 3 representa um problema que necessita ser otimizado.

$$f(x) = x^2 + 5 - x \quad (3)$$

Segundo Pappa e Freitas (2009), na interpretação do algoritmo, x é o valor do indivíduo e $f(x)$ é o valor da aptidão do indivíduo, ou seja, $f(x)$ é a função objetivo a se otimizar.

O Quadro 2 representa o genótipo em valor numérico, enquanto o fenótipo está expresso como aptidão. Os indivíduos (cromossomos) neste exemplo são compostos por números binários, onde cada número binário representa um gene

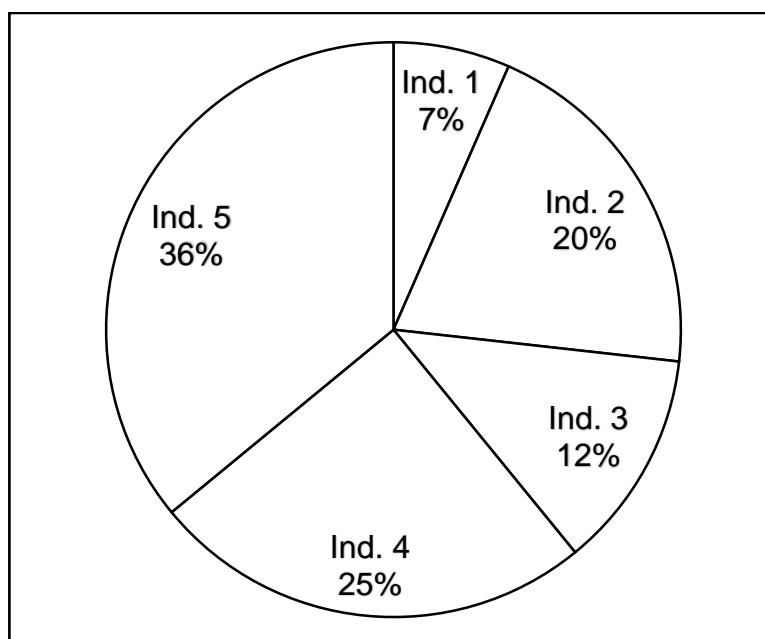
Quadro 2 - Parâmetros da Roleta Viciada.

Indivíduo	Binário	Valor Decimal	Aptidão	Aptidão Relativa
1	0101	5	25	7%
2	1001	9	77	20%
3	0111	7	47	12%
4	1010	10	95	25%
5	1100	12	137	36%
		Total	381	100%

Fonte: Adaptado de Pappa e Freitas (2009).

Conforme o valor de aptidão de cada indivíduo, é gerado um valor de aptidão relativa, que representa o percentual de chance que o indivíduo tem de ser selecionado para o crossover, como pode ser observado na Figura 10.

Figura 10 - Roleta Viciada.



Fonte: Adaptado de Pappa e Freitas (2009).

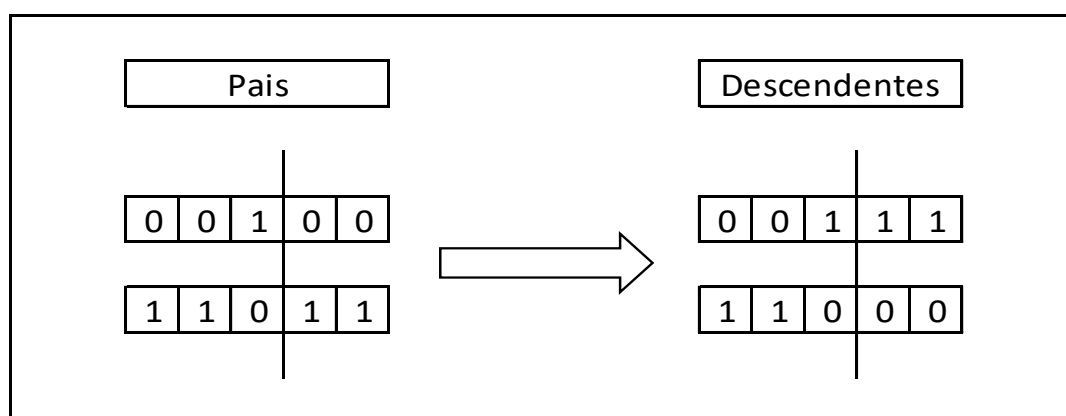
Com o tempo, é natural que as características dos indivíduos acabem convergindo, sendo assim, a probabilidade de a rola selecionar sempre os mesmos indivíduos para o crossover aumenta (PAPPA; FREITAS, 2009).

3.4.4. Crossover

Após a escolha dos pais é feito um processo chamado de crossover, este processo consiste em recombinar os genes dos pais, para dar origem a dois descendentes. Isso pode ser feito com vários pontos de corte para recombinação, ou apenas um (PAPPA; FREITAS, 2009).

Através da troca de genes partindo de um ponto de corte, os genes serão trocados e gerarão novos indivíduos, como pode ser observado na Figura 11 (SOUZA *et al.*, 2010).

Figura 11 - Crossover.



Fonte: Adaptado de Moori *et al.* (2010).

Além do crossover a partir de um ponto de corte, existe também algoritmos que contam com múltiplos pontos de corte, ou até mesmo com seleção individual de cada alelo a ser alterado, isso para aumentar a eficiência do algoritmo, diversificando mais aos descendentes e cobrindo mais pontos no universo estudado (PAPPA; FREITAS, 2009).

Como o algoritmo utiliza de técnicas randômicas e é imprevisível, existe a possibilidade de menos pontos de corte alcançarem mais rapidamente valor ideal para a função objetivo (PAPPA; FREITAS, 2009).

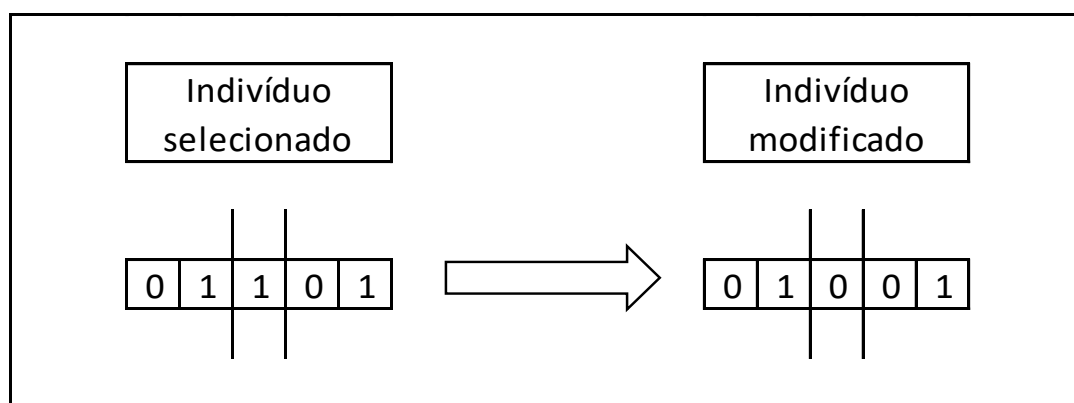
Como este trabalho utiliza números binários nos alelos, uma troca de parâmetro pode significar uma grande variação no indivíduo, assim como acontece na biologia (BARBOZA, 2005).

3.4.5. Mutação

A mutação consiste na alteração de um ou mais genes de um determinado cromossomo, para garantir a diversidade da amostra (SOUZA *et al.*, 2010).

Pode-se observar na Figura 12 um exemplo de mutação com corte único.

Figura 12 - Mutação.



Fonte: Adaptado de Moori *et al.* (2010).

A mutação auxilia para que o algoritmo evite máximos e mínimos locais, fazendo com que o algoritmo não tenha um resultado prematuro, ou até mesmo não chegue no resultado ideal (PINHO *et al.*, 2013).

3.4.6. Critério de parada

Os critérios de parada devem ser previamente estipulados e são responsáveis por interromper o laço de interações que inicialmente não teriam fim (KOZA, 1992).

De acordo com Pinho *et al.* (2013), os principais critérios de parada são;

- Atingir um número máximo de iterações;
- Atingir o valor ideal desejado;
- Quando não houver mais melhorias significativas no indivíduo de maior aptidão, indicando assim que o sistema convergiu.

Caso um desses critérios seja satisfeito, o algoritmo encerra o laço de repetições e retorna os melhores valores obtidos (KOZA, 1992).

3. METODOLOGIA

Neste capítulo será descrita a metodologia que foi utilizada, assim como parâmetros e ferramentas numéricas.

3.1. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

As simulações numéricas do modelo do pórtico foram realizadas no Matlab®, utilizando o integrador “ode45” para solução das equações, com passo fixo de 0,01.

Os parâmetros utilizados, para simular numericamente as equações no software, podem ser vistos no Quadro 3:

Quadro 3 - Parâmetros para Simulação Numérica.

α_1	0,1
β_1	1,0
β_2	0,2
δ_1	8,373
ρ_1	0,05
ρ_2	100
ρ_3	200
α_2	0,1
α_3	0,5
ϵ_1	1
ϵ_2	5
θ	0,2
θ	0,6
ρ	1,0

Fonte: Adaptado de Iliuk (2016).

Para verificar a otimização, o critério de varredura teve um passo de 0,01, $0,01 \leq \epsilon_1 \leq 2$, e $1 \leq \epsilon_2 \leq 10$.

Os parâmetros internos do algoritmo, tais como porcentagem permanente da população, razão de crossover e mutação, foram utilizados os padrões do Matlab® (ACKLEY, 1987).

A Equação 4 rege a potência gerada pelo material piezoelétrico

$$P = \frac{\theta(1+\theta|x_1|)x_1}{\rho} - \frac{x_7}{\rho} \quad (4)$$

Como a potência que está sendo produzida é de corrente alternada, os valores alternam entre positivos e negativos em caráter senoidal, por tanto foi utilizado o método de *Root Mean Square* (RMS), que representa o valor eficaz da potência gerada.

Devido a este caráter a função objetivo, observada na Equação 5, é o valor eficaz da potência gerada.

$$FOBJ = RMS(P) \quad (5)$$

Como este trabalho está visando a otimização de 2 parâmetros, foi necessário otimizá-los separadamente e também analisar a eficiência do algoritmo separadamente para cada parâmetro, devido a isto foi separado em casos de estudo.

3.2. CASO 1

Para realizar a otimização do parâmetro ε_1 por meio algoritmo genético foi utilizado a função objetivo Equação 5, sujeita aos parâmetros descritos no Quadro 3, exceto o parâmetro ε_1 , pois ele é a variável de otimização.

A variável de otimização está sujeita as restrições:

- $\varepsilon_1 \geq 0,01$;
- $\varepsilon_1 \leq 2,00$.

Para testar a eficiência do algoritmo foi feito uma varredura no parâmetro ε_1 variando de 0,01 a 2,00, com 200 valores intermediários.

3.3. CASO 2

Para realizar a otimização do parâmetro ε_2 por meio algoritmo genético foi utilizada a função objetivo Equação 5, sujeita aos parâmetros descritos no Quadro 3, exceto o parâmetro ε_2 , pois ele é a variável de otimização, e o parâmetro ε_1 que foi previamente determinado como 0,9500.

A variável de otimização está sujeita as restrições:

- $\varepsilon_2 \geq 0,01$;

- $\varepsilon_2 \leq 10,00$.

Para testar a eficiência do algoritmo foi feito uma varredura no parâmetro ε_2 variando de 0,01 a 10,00, com 500 valores intermediários.

3.4. CASO 3

Para observar qual seria o melhor valor, caso fosse utilizado apenas o algoritmo genético na otimização do parâmetro ε_1 , foi feito uma otimização no parâmetro ε_2 utilizando a função objetivo vista na Equação 5, e os parâmetros descritos no Quadro 3, exceto ε_2 que é a variável de otimização e ε_1 que foi previamente definida como 1,3770.

A variável de otimização está sujeita às restrições:

- $\varepsilon_2 \geq 0,01$;
- $\varepsilon_2 \leq 10,00$.

Para encontrar o valor ideal e obter uma representação visual, foi feito uma varredura no parâmetro ε_2 variando de 0,01 a 10,00, com 500 valores intermediários.

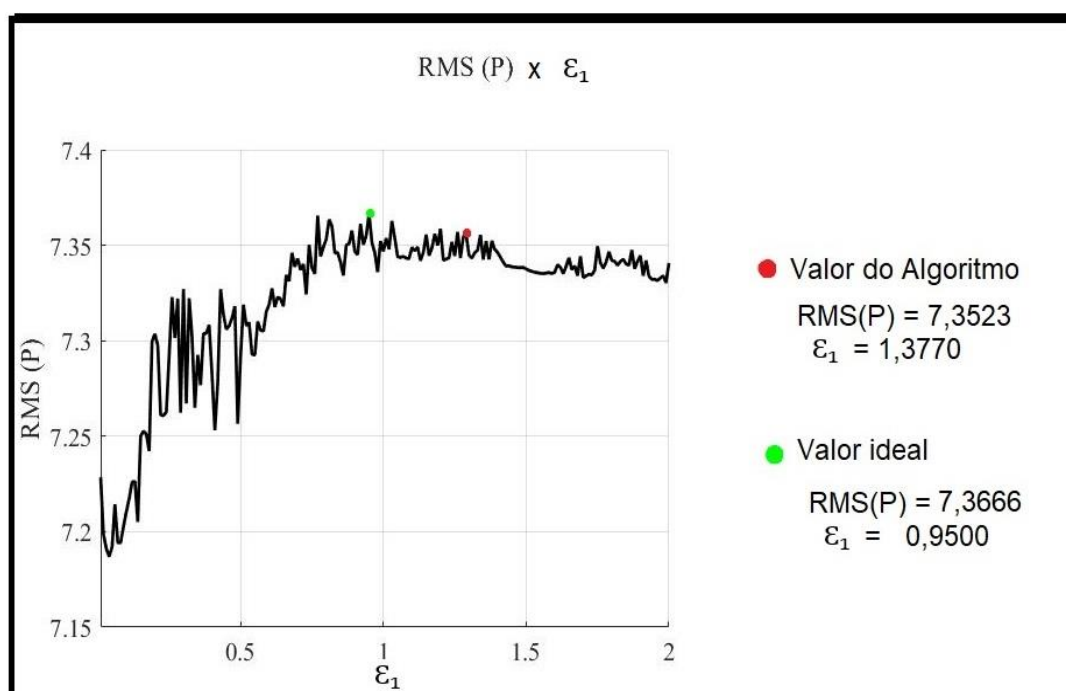
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos com as simulações numéricas.

4.1. CASO 1

O valor encontrado pelo algoritmo genético para ε_1 foi de 1,3770, com o RMS(P) de 7,3523. Enquanto a varredura encontrou o valor de 0,9500 para ε_1 com o RMS(P) de 7,3666, como pode ser observado na Figura 13.

Figura 13 - RMS(P) x ε_1 .



Fonte: Autoria própria.

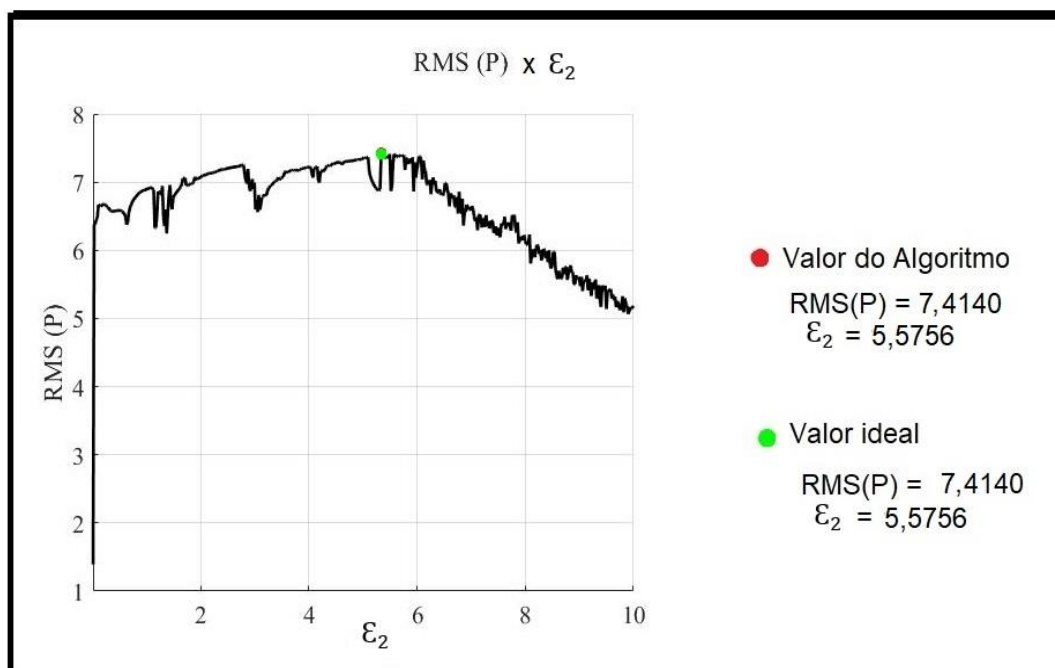
É possível observar, que mesmo os valores de ε_1 não sendo próximos, o algoritmo conseguiu encontrar um máximo local muito satisfatório, representando 99,8% do valor ideal.

É válido apontar que o valor ideal para este problema, também pode ser caracterizado como máximo local, pois existe restrições quanto ao valor que o parâmetro tido como variável de otimização pode variar, sendo de 0,01 a 2,00.

4.2. CASO 2

O valor encontrado pelo algoritmo genético para ε_2 foi de 5,5756, com o RMS(P) de 7,4140, o mesmo valor encontrado com a varredura, como pode ser observado na Figura 14.

Figura 14 - Caso 2 - RMS(P) x ε_2



Fonte: Autoria própria.

Como visto na Figura 14, o algoritmo conseguiu chegar no valor ideal para a solução do problema, mostrando-se um eficiente método para otimizações de problemas que envolvem vários parâmetros.

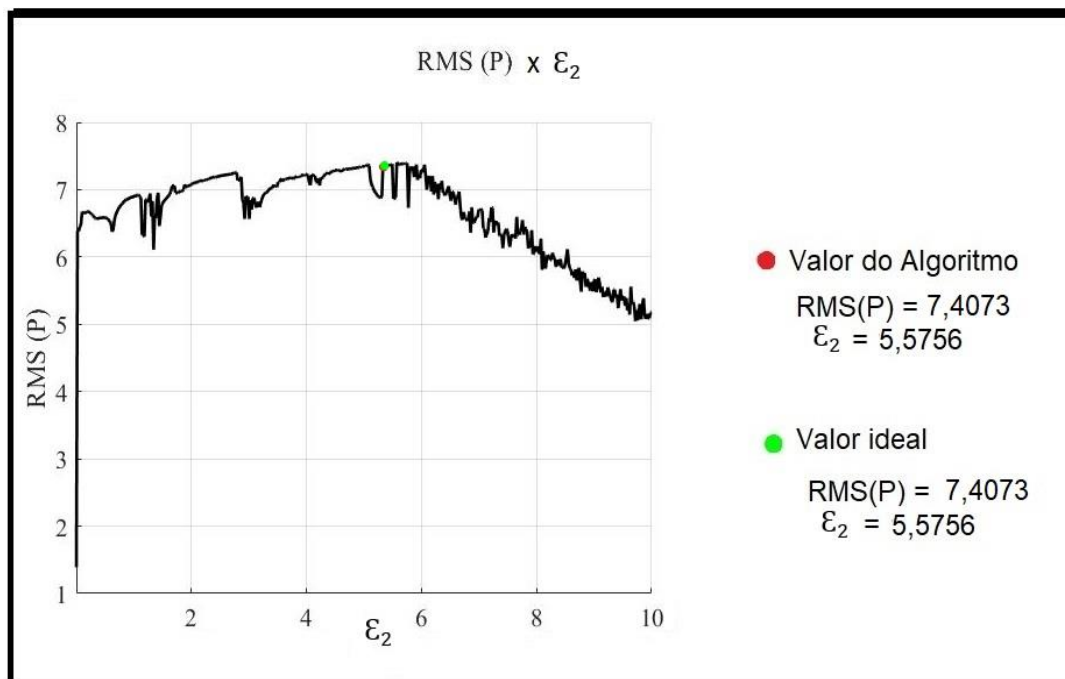
4.3. CASO 3

O valor encontrado pelo algoritmo genético para ε_2 foi de 5,5756, com o RMS(P) de 7,4073, o mesmo valor encontrado com a varredura, como pode ser observado na Figura 15.

Como é visto na Figura 15, o algoritmo encontrou o valor ideal de ε_2 para o problema, quando o ε_1 é 1,3770, sendo o RMS(P) 7,4073. Porém como o valor ideal para o ε_1 é 0,9500, o máximo local entre 0,01 e 10, representa 99,9% do ideal otimizando os 2 parâmetros.

A Figura 15 pode ser observada abaixo:

Figura 15 - Caso 3 - RMS(P) x ϵ_2 .



Fonte: Autoria própria.

Para analisar os resultados obtidos com os 3 casos apresentados, foi feito um comparativo, que pode ser visto no Quadro 4, o algoritmo atingiu valores muito satisfatórios.

Quadro 4 - Comparativo dos Resultados.

Parâmetro	Valores Obtidos					
	Caso 1		Caso 2		Caso 3	
	AG	Varredura	AG	Varredura	AG	Varredura
ϵ_1	1,3770	0,9500	0,9500	0,9500	1,3770	1,3770
ϵ_2	5,0000	5,0000	5,5756	5,5756	5,5756	5,5756
RMS(P)	7,3523	7,3666	7,4143	7,4143	7,4073	7,4073

Fonte: Autoria própria.

O algoritmo conseguiu uma eficiência superior a 99% para o resultado, além de ter encontrado o valor ideal, quando otimizou o parâmetro ϵ_2 , tanto no caso 2, quanto no caso 3

5. CONCLUSÃO

Por meio da estratégia de utilização de Algoritmos Genéticos, foi possível determinar os valores dos parâmetros relacionados à massa e rigidez de um sistema micro eletromecânicos, que otimizam a coleta de energia gerada pelos materiais piezoelétricos acoplados ao sistema aproticado.

Considerando simulações numéricas e computacionais, foi apresentado neste trabalho a variação da geração de energia, considerando a variação dos dois parâmetros relacionados à massa e rigidez. Com a proposta da função objetivo, foi possível utilizar o algoritmo genético para determinar, para quais valores de massa e rigidez pode-se obter a maior energia possível, considerando as restrições dos materiais.

Com os resultados apresentados, pode-se concluir que a estratégia proposta para otimização é eficiente, e que a utilização de materiais piezoelétricos é uma excelente alternativa para geração de energia para componentes eletrônicos.

Com a conclusão deste trabalho foi possível contribuir com os estudos para proposta e otimização de fontes de energia renováveis. Como proposta de trabalhos futuros, pode-se propor a continuidade deste trabalho para aplicações em sistemas macros, como em fontes eólicas, fotovoltaicas, biomassa, entre outras.

6. REFERÊNCIAS

- ACKLEY, D. H. **A connectionist machine for genetic hillclimbing**. Boston, Kluwer Academic Publishers, 1987.
- BARBOZA, A. O. **Simulação e Técnicas da Computação Evolucionária Aplicadas a Problemas de Programação Linear Inteira Mista**. 2005. Tese (Doutorado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- BARBOSA, W. P; AZEVEDO, A. C. S. Impactos ambientais de usinas eólicas. Congresso sobre Geração Distribuída e Energia no Meio no Rural. 9. 2013, Itajubá, **Anais**. Itajubá: UNIFEI, 2013
- BLEDSOE, W. W. The use of biological concepts in the analytical study of systems. **Paper presented at ORSA-TIMS National Meeting**, San Francisco, 1961.
- BOX, G. E. P. Evolutionary operation: A method for increasing industrial productivity. **Journal of the Royal Statistical Society**, n. 2: p. 81–101, 1957.
- BRASIL, R. M. L. R. F. **Não-linearidade Geométrica na Dinâmica de Estruturas Apertadas Planas: Um Tratamento pelo Método dos Elementos Finitos**. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.
- CAIXETA, S, B. **Algoritmo da divisão de Euclides**. Dissertação (Mestrado) Universidade de Brasília, Brasília, 2016.
- CHABERT, J. L; BARBIN, E; BOROWCZYK, J; GUILLEMOT, M; MICHEL, A; DJEBBAR, A; MARTZLOFF, J. C. **A History of Algorithms: From the Pebble to the Microchip**. Springer Verlag, 1999.
- CLEMENTINO, M. A; MARQUI C; NIZTSCHKE, F. **Design and experimental verification of a smart piezoelectric pitch link for vibration attenuation**. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.
- CORMEN, H. T; LIESERSON, C. E; RIVEST, R. L; STEIN, C. **Introduction to Algorithm**. Three Ed. Cambridge, Massachusetts. 2009.
- CUNHA, E. A. A. *et al*. Aspectos históricos da energia eólica no brasil e no mundo. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 8, n. 4, Universidade Federal do Paraná, 2017.
- DARWIN, C. **On the Origin of Species by Means of Natural Selection**. 1. ed. John Murray, Londres, 1859.
- DINCER, I; ACAR, C. A review on clean energy solutions for better sustainability. **International Journal Of Energy Research**, v. 39, n. 5, p. 585-606, mar. 2015

- DUTOIT, N. E; WARDLE, B. L. Experimental verification of models for microfabricated piezoelectric vibration energy harvesters **AIAA Journal – American Institute of Aeronautics and Astronautics**, v. 45, n. 5, 2007.
- ELVIN, N; ERTURK, A. **Advances in Energy Harvesting Methods**. 1. ed. Springer. 2013.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2018**, Rio de Janeiro, 2018.
- FELIX, J. L. P. **Teoria de Sistemas Vibratórios Aporticados Não-lineares e Não-ideais**. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.
- FERREIRA, L. F S. S. **Sistemas de Geração de Energia via Sensores Piezoelétricos**. TCC (Graduação) – Centro Universitário de Brasília – UniCeub Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas – Fatecs. Brasília, 2017.
- FOGEL, D. B. **An introduction to simulated evolutionary optimization**. **IEEE Transactions on Neural Networks**, v. 5, n. 1, p. 3-14, 1994.
- FRIEDMAN, G. J. **Digital simulation of an evolutionary process**. *General Systems Yearbook 4*: p. 171–184, 1959.
- GARZERI, F. J. **Dinâmica não linear de um pórtico plano sob carregamento não ideal: análise numérica e experimental**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- GOLDBERG, D. **Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning**. ADDISON-WESLEY PUBLISHING COMPANY, INC., 1989.
- HOLLAND, J. H. **Adaptation in Natural and Artificial Systems**. 1. ed. Cambridge: MIT, 1975.
- ILIUK, I.; BALTHAZAR, J. M.; TUSSET, A. M.; PIQUEIRA, J. R.; PONTES, B. R.; FELIX, J. L.; BUENO, Á. M. Application of passive control to energy harvester efficiency using a nonideal portal frame structural support system. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 25, n. 4, p. 417-429, 2014.
- ILIUK, I. **Análise de um sistema de captura de energia piezoelétrico não linear e não ideal utilizando-se uma estrutura aporticada**. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo – São Paulo, 2016.
- JAFFE, B. **Piezoelectric Ceramics**. 1. Ed. New York, Academic, 1971.
- KOZA, J. R. **Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection**. Cambridge, MIT, 1992.

LACERDA, E.; CARVALHO, A. C. P. L. F.; LUDEMIR, T. **Um tutorial sobre algoritmos genéticos.** *Revista de Informática Teórica e Aplicada*, Porto Alegre, v. 9, n.3, p. 109-139, 2002.

LIMA, F. R. **Um algoritmo inspirado em cat swarm optimization para redução do makespan em soluções de integração de aplicações empresárias.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, São Geraldo, 2019.

MITCHELL, M. **An Introduction to Genetic Algorithms.** The MIT. Cambridge. 1996.

MOORI, R. G; KIMURA, H; ASAKURA, O. K. **Aplicação do algoritmo genético na gestão de suprimentos.** *Revista de Administração e Inovação*, v. 7, n. 2, art. 12, p. 171-192, 2010.

MORAES, R. M. **Desenvolvimento de sistema para coleta de energia vibracional utilizando dispositivos piezoelétricos.** Dissertação – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2018.

MOURA, R. S; REIS, C. F; PEDROSA, R. K. R; NEVES, R. T. **Estudo sobre a capacidade de hospedagem de geração distribuída em sistemas elétricos de potência utilizando algoritmo genético.** *ForSci*, IFMG, Formiga, v. 7, n. 1, , jan./jun. 2019

PACHECO, F. **Energias Renováveis: breves conceitos.** Conjuntura e Planejamento. Salvador, 2006.

PADILHA, A. F. **Materiais de Engenharia.** Curitiba. HEMUS. 1997

PAPPA, G. L; FREITAS, A. A. **Automating the Design of Data Mining Algorithms: An Evolutionary Computation Approach (Natural Computing Series).** Springer. 2009.

PEREIRA, A. H. A. **Cerâmicas piezoelétricas: funcionamento e propriedades.** ATCP Engenharia Física. São Carlos, 2010

PINHO, A. F. de *et al.*. Algoritmos genéticos: Fundamentos e aplicações. *In*: LOPES, H. S.; RODRIGUES, L. C. de A.; STEINER, M. T. A. (Ed.). **Meta-Heurísticas em Pesquisa Operacional.** 1. ed. Curitiba: Ompipax, 2013. p. 21-32.

PRIYA, S., INMAN, D.J., (2009), **Energy Harvesting Technologies**, Springer Science Business Media, LLC.

RANGEL, R. F. **Caracterização de uma célula tubular para geração de energia elétrica.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Paraíba – João Pessoa, 2014.

RODRIGUES, J. I. P. **Integração de Fontes de Energia Renovável em Sistemas Elétricos Isolados**. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Eletrônica – Universidade de Coimbra, Coimbra, 2019

SOUZA, C. C; REIS NETO, J. F. dos; ARIAS, E. R. A.; RODRIGUES, W. O. P. **Uso de Algoritmos Genéticos como ferramenta auxiliar no processo decisório em atividades de gestão empresarial**. Informe Gepec. Toledo, PR, v14, n. 1, p. 113-126, jan./jun. 2010. 14 p.

SOUZA, C. M. **Otimização por Colônia de Formigas para o Problema de Programação Job-Shop Flexível Multiobjetivo**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Carlos – São Carlos, 2018.

TRIPLETT, A; QUINN, D. D. **The Effect of Non-linear Piezoelectric Coupling on Vibration-based Energy Harvesting**, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 20 p. 1959-1967, 2009.

TUSSET, A. M; BALTHAZAR, J. M; CHAVARETTE, F.R; FELIX, J. L. P. **On energy transfer phenomena, in a nonlinear ideal and non-ideal essential vibrating systems, coupled to a (MR) magneto-rheological damper**. *Nonlinear Dynamics*, p. 1-22, 2012.

TUSSET, A. M; BALTHAZAR, J. M; FELIX, J. L. P. **On elimination of chaotic behavior in a non-ideal portal frame structural system, using both passive and active controls**. *Journal of Vibration and Control*, p. 1-11, 2012.

TUSSET, A. M., BALTHAZAR, J. M., (2013), **On the Chaotic Suppression of Both Ideal and Non-ideal Duffing Based Vibrating Systems, Using a Magnetorheological Damper**. *Differential Equations and Dynamical Systems*, v. 21, p. 105-121, 2013.

VASCONCELOS, M. L. D; PIMENTEL, M. S; CALLADO, A. A. C; **Evidenciação nos Relatórios de Sustentabilidade da Empresas de Energia Elétrica com Base na NBC T15**. *Amazônia, Organizações e Sustentabilidade*, v.7, n.2, p. 123-138, 2018.