



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**RAMON ANDRÉ MESQUITA TEIXEIRA**

**ALGORITMO GENÉTICO APLICADO À OTIMIZAÇÃO DE AEROFÓLIO PARA  
DIMINUIÇÃO DE RUÍDO AERODINÂMICO**

**FORTALEZA**

**2016**

RAMON ANDRÉ MESQUITA TEIXEIRA

ALGORITMO GENÉTICO APLICADO À OTIMIZAÇÃO DE AEROFÓLIO PARA  
DIMINUIÇÃO DE RUÍDO AERODINÂMICO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de concentração: processos, equipamentos e sistemas para energias renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Ilson da Silva Júnior.

FORTALEZA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

T269a Teixeira, Ramon André Mesquita.

Algoritmo genético aplicado à otimização de aerofólio para diminuição de ruído aerodinâmico / Ramon André Mesquita Teixeira. – 2016.  
88 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2016.

Orientação: Prof. Dr. Francisco Ilson da Silva Júnior.

1. Algoritmo genético. 2. Otimização. 3. NAFNoise. 4. Ruído. 5. Aerogerador. I. Título.

CDD 620.1

---

RAMON ANDRÉ MESQUITA TEIXEIRA

ALGORITMO GENÉTICO APLICADO À OTIMIZAÇÃO DE AEROFÓLIO PARA  
DIMINUIÇÃO DE RUÍDO AERODINÂMICO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis.

Aprovada em 08/07/2016

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Francisco Ilson da Silva Junior (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Lutero Carmo de Lima  
Universidade Estadual do Ceará (UECE)

Dedico a minha família

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por ter proporcionado a oportunidade de ingressar no referido curso de mestrado;

À minha família, pelo comprometimento comigo;

Ao professor Francisco Ilson, pela orientação cortês com que tem feito;

Ao referido programa de mestrado, pela estrutura oferecida;

Aos meus colegas de turma, que foram fundamentais para que passasse em Termodinâmica;

Aos meus amigos, especialmente Leandro Filho, Natalia Barbosa, Ticia Cavalcante, Valdi Matos.

*“Faça as coisas o mais simples que você puder,  
porém não se restrinja às mais simples.”*

(Albert Einstein)

## RESUMO

O ruído produzido pelos aerogeradores, causador de danos à saúde, tem sido um empecilho para a acomodação daqueles à sociedade. Esse trabalho usou o modelo de Brooks, Pope e Marcolini (BPM) de predição de ruído, aperfeiçoado para a descrição espacial do ruído aerodinâmico das principais linhas de aerogeradores produzidos, utilizados em parques eólicos, ou em meio urbano (de pequena escala), e foi feita a otimização dos perfis s809, s822, s834, FX 63-137, SD 2030 e SG 6043, em termos de níveis de ruído e performance da pá. O principal propósito desse processo de otimização é diminuir os níveis de emissão de ruído, ao mesmo tempo que se evite grandes reduções na performance aerodinâmica da turbina através de ajustes na geometria do aerofólio. O ruído aerodinâmico apresenta duas fontes: ruído de influxo turbulento e autoruído. Este, por sua vez, possui quatro mecanismos diferentes a se manifestar: ruído de camada limite turbulenta no bordo de fuga, ruído de separação-estol, ação de vórtice na camada limite laminar, ruído devido à rigidez do bordo de fuga. Para isso, foi usado o programa NAFNoise, que contém o modelo BPM e o código do XFOIL para fornecer os dados de entrada do BPM e Algoritmo Genético, para realizar o processo de otimização. Os perfis otimizados apresentaram redução de ruído em torno de 1dB, redução no desempenho aerodinâmico e uma conformação enrugada.

**Palavras-chave:** Algoritmo Genético.Otimização.NAFNoise.Ruído.Aerogerador.

## ABSTRACT

The noise produced by wind turbines which damages the health, has been a kind of barrier for the accommodation of those to society. This work uses the Brooks, Pope and Marcolini (BPM) model to noise prediction improved for the spatial description of the aerodynamic noise of the main lines of wind turbines produced, used in wind farms, or in urban areas (small-scale), and it was made the optimization of the profiles s809, s822, s834, FX 63-137, SD 2030 e SG 6043 blades in terms of noise levels and the blade performance. The main purpose of this optimization process is to reduce noise emission levels while it avoids large reductions in aerodynamic performance of the turbine by adjusting the geometry of the airfoil. The aerodynamic noise has two sources: inflow self-noise and self-noise. This, in turn, has four different mechanisms to manifest: turbulent boundary layer trailing edge noise, separation-stall noise, laminar boundary layer vortex shedding noise, trailing edge bluntness – vortex shedding noise. For this, it was used the NAFNoise program containing the BPM model and XFOIL code to provide the BPM data input and Genetic Algorithm to perform the optimization process. The optimized profiles fell around 1dB in noise emission, reduction in aerodynamic performance and a corrugated conformation.

**Keywords:** Genetic Algorithm. Optimization. NAFNoise. Noise. Wind Turbine.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Potencial eólico do Nordeste brasileiro.....	18
Figura 2 –	Níveis de ruídos permitidos pela ABNT em vários ambientes.....	19
Figura 3 –	Relação entre ruído e exposição máxima.....	19
Figura 4-	Ilustração da atuação das forças em um aerofólio.....	23
Figura 5-	Ilustração do TBL-TE, para pequenos ângulos de ataque .....	27
Figura 6-	Ângulos diretivos, definindo a posição angular do observador em relação ao aerofólio.....	27
Figura 7-	Ilustração do TBL-TE, para ângulos de ataque superiores.....	30
Figura 8-	Ilustração do LBL-VS.....	33
Figura 9-	Ilustração do TEB-VS.....	35
Figura 10-	Algoritmo Genético básico.....	41
Figura 11-	Geometrias do perfil s809 original e otimizado para duas variações.	53
Figura 12-	Gráfico de ruído do perfil s809 original e otimizado para duas variações.....	54
Figura 13-	Geometria e gráfico de desempenho do perfil FX 63-137 original....	56
Figura 14-	Geometria e gráfico de desempenho do perfil FX 63-137 otimizado.	57
Figura 15-	Geometria e gráfico de desempenho do perfil s809 original.....	57
Figura 16-	Geometria e gráfico de desempenho do perfil s809 otimizado.....	58
Figura 17-	Geometria e gráfico de desempenho do perfil s822 original.....	58
Figura 18-	Geometria e gráfico de desempenho do perfil s822 otimizado.....	59
Figura 19	Geometria e gráfico de desempenho do perfil s834 original.....	59
Figura 20-	Geometria e gráfico de desempenho do perfil s834 otimizado.....	60
Figura 21-	Geometria e gráfico de desempenho do perfil SD 2030 original.....	60
Figura 22-	Geometria e gráfico de desempenho do perfil SD 2030 otimizado....	61

Figura 23-	Geometria e gráfico de desempenho do perfil SG 6043 original.....	61
Figura 24-	Geometria e gráfico de desempenho do perfil SG 6043 otimizado..	62
Figura 25-	Gráficos de ruído do perfil FX 63-137 original e otimizado.....	63
Figura 26-	Gráficos de ruído do perfil s809 original e otimizado.....	63
Figura 27-	Gráficos de ruído do perfil s822 original e otimizado.....	64
Figura 28-	Gráficos de ruído do perfil s834 original e otimizado.....	64
Figura 29-	Gráficos de ruído do perfil SD 2030 original e otimizado.....	65
Figura 30-	Gráficos de ruído do perfil SG 6043 original e otimizado.....	65

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

NREL	National Renewable Energy Laboratory
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BPM	Brooks, Pope, Marcolini
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics
AG	Algoritmo Genético
TBL-TE	Turbulent Boundary Layer – Trailing Edge
LBL-VS	Laminar Boundary Layer - Vortex Shedding
TEB-VS	Trailing Edge Bluntness – Vortex Shedding
SPL	Sound Pressure Level
NBR	Norma Brasileira Registrada
NR	Norma Regulamentadora

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\delta^*$	Desvio da camada limite
$\delta$	Espessura da camada limite
$\alpha$	Ângulo de ataque
$Re_c$	Número de Reynolds baseado no comprimento da corda
$L$	Comprimento da seção do perfil, envergadura
$r_e$	Distância efetiva do observador
$St$	Número de Strouhal
$f$	Frequência
$U$	Velocidade média local
$D_h$	Função diretiva
$M$	Número de Mach
$M_c$	Número de Mac convectivo
$\Theta_e, \Phi_e$	Ângulos diretivos
$SPL_\alpha$	Nível de pressão sonora devido a separação-estol
$SPL_{TBL-TE}$	Nível de pressão sonora devido a camada limite turbulenta de bordo de fuga
$SPL_p$	Nível de pressão sonora devido a bordo de fuga ao longo da superfície de pressão
$SPL_s$	Nível de pressão sonora devido a bordo de fuga ao longo da superfície de sucção
$SPL_{LBL-VS}$	Nível de pressão sonora devido a camada limite laminar com produção de vórtice
$G_1, G_2, G_3$	Funções empíricas
$St'$	Número de Strouhal baseado em $\delta^*_p$
$St'_{peak}$	Número de Strouhal de ponta

$(Re_c)_0$	Número de Reynolds de referência dependente do ângulo de ataque
$SPL_{TEB-VS}$	Nível de pressão sonora devido a rigidez do bordo de fuga com produção de vórtice
$h$	Espessura do bordo de fuga
$\delta^*_{avg}$	Desvio médio da camada limite para ambos os lados do aerofólio
$\Psi$	Ângulo sólido do bordo de fuga
$St''$	Número de Strouhal baseado em $h$
$St''_{peak}$	Número de Strouhal de ponta baseado em $h$
$G_4, G_5,$	Funções empíricas
$SPL_{inflow}$	Nível de pressão sonora devido a influxo turbulento
$\rho_0$	Densidade do ar
$c_0$	Velocidade do som
$l$	Comprimento de turbulência
$I$	Intensidade de turbulência
$K$	Número de onda local
$c$	Comprimento de corda local do aerofólio
$LFC$	Fator de correção de baixa frequência
$S$	Função de compressibilidade de Sears
$A$	Função espectral de ruído de bordo de fuga
$B$	Função espectral para ruído de bordo de fuga dependente do ângulo de ataque
$f_o(G)$	Função objetivo sobre o genótipo G
$d(G)$	Função tradução sobre o genótipo G
$G$	Genótipo, cromossomo
$b_{10}$	Número binário na base 10
$\epsilon$	Tamanho do cromossomo

$f_A(x)$	Aptidão da solução
$M_A$	Aptidão média
$n$	Tamanho da população
$C_l$	Coefficiente de sustentação
$C_d$	Coefficiente de arraste

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>17</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa.....</b>	<b>17</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>20</b>
<b>1.3</b>	<b>Descrição do Trabalho.....</b>	<b>20</b>
<b>2</b>	<b>NOÇÕES PRELIMINARES.....</b>	<b>22</b>
<b>2.1</b>	<b>Desempenho Aerodinâmico.....</b>	<b>22</b>
<b>2.2</b>	<b>Impactos na Saúde Humana.....</b>	<b>23</b>
<b>2.3</b>	<b>Frequência.....</b>	<b>24</b>
<b>2.4</b>	<b>Ponderações.....</b>	<b>25</b>
<b>2.5</b>	<b>Tipos de Ruído.....</b>	<b>25</b>
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>26</b>
<b>3.1</b>	<b>Modelo BPM.....</b>	<b>26</b>
<b>3.1.1</b>	<b><i>Camada Limite Turbulenta no Bordo de Fuga.....</i></b>	<b>26</b>
<b>3.1.2</b>	<b><i>Ruído de Separação - Estol.....</i></b>	<b>29</b>
<b>3.1.3</b>	<b><i>Camada Limite Laminar com esteira de Vórtice.....</i></b>	<b>32</b>
<b>3.1.4</b>	<b><i>Rigidez de Bordo de Fuga com Esteira de Vórtice.....</i></b>	<b>35</b>
<b>3.1.5</b>	<b><i>Influxo Turbulento no Bordo de Ataque.....</i></b>	<b>38</b>
<b>3.2</b>	<b>Algoritmo Genético.....</b>	<b>39</b>
<b>3.2.1</b>	<b><i>Noções Gerais.....</i></b>	<b>39</b>
<b>3.2.2</b>	<b><i>Funcionamento.....</i></b>	<b>40</b>
<b>3.2.3</b>	<b><i>Componentes.....</i></b>	<b>41</b>
<b>3.2.3.1</b>	<b><i>Indivíduo.....</i></b>	<b>41</b>
<b>3.2.3.2</b>	<b><i>População.....</i></b>	<b>42</b>
<b>3.2.4</b>	<b><i>Operadores Genéticos.....</i></b>	<b>43</b>
<b>3.2.4.1</b>	<b><i>Inicialização.....</i></b>	<b>43</b>
<b>3.2.4.2</b>	<b><i>Avaliação.....</i></b>	<b>44</b>
<b>3.2.4.3</b>	<b><i>Seleção.....</i></b>	<b>44</b>
<b>3.2.4.4</b>	<b><i>Reprodução (Crossover).....</i></b>	<b>45</b>
<b>3.2.4.5</b>	<b><i>Reprodução (Mutaç�o).....</i></b>	<b>46</b>
<b>3.2.4.6</b>	<b><i>Atualiza�o e Finaliza�o.....</i></b>	<b>46</b>

<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>48</b>
<b>4.1</b>	<b>NAFNoise.....</b>	<b>48</b>
<b>4.2</b>	<b>Formulação e Implementação do Algoritmo Genético.....</b>	<b>49</b>
<b>5</b>	<b>VALIDAÇÃO.....</b>	<b>53</b>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>55</b>
<b>6.1</b>	<b>Resultados de Desempenho.....</b>	<b>55</b>
<b>6.2</b>	<b>Resultados de Ruído.....</b>	<b>62</b>
<b>6.3</b>	<b>Considerações.....</b>	<b>66</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>68</b>
<b>7.1</b>	<b>Observações para Trabalhos Futuros.....</b>	<b>68</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>70</b>
	<b>APÊNDICE A – CÓDIGO DE FORMULAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO.....</b>	<b>73</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A partir das crises do petróleo na década de 1970, o mundo pleiteou bastante o uso de energias alternativas às provindas de combustíveis fósseis. Decorrente disso, as pesquisas nessa área aumentaram muito, a saber energias eólica e solar, geotérmicas, energia de marés, energia do Hidrogênio, dentre outras. Concomitante a isso, houve um aumento na preocupação em se preservar o meio ambiente.

O Brasil é o maior produtor de energia eólica da América Latina, com capacidade instalada de 1543MW. Apesar de ter apresentado uma taxa de crescimento modesta nos últimos anos, o País continua acima da média global, consolidando-se como um dos principais mercados da região.

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), existem diversas centrais de energia eólica no Brasil. Os maiores parques eólicos instalados estão no Ceará (Praia Formosa, com potência de 104,4MW), Rio Grande do Sul (Índios, Osório e Sangradouro, com potência de 50MW) e Rio Grande do Norte (Rio do Fogo, com potência de 49,3MW). Todavia, a tecnologia utilizada por eles na conversão de energia cinética em energia elétrica não é nacional. Por isso, surge a necessidade de investimentos e pesquisas para o desenvolvimento da tecnologia brasileira. Na Figura 1, é apresentado o potencial eólico da região Nordeste do Brasil, onde existe a maior parte da potência instalada, ainda com um enorme potencial eólico a ser explorado.

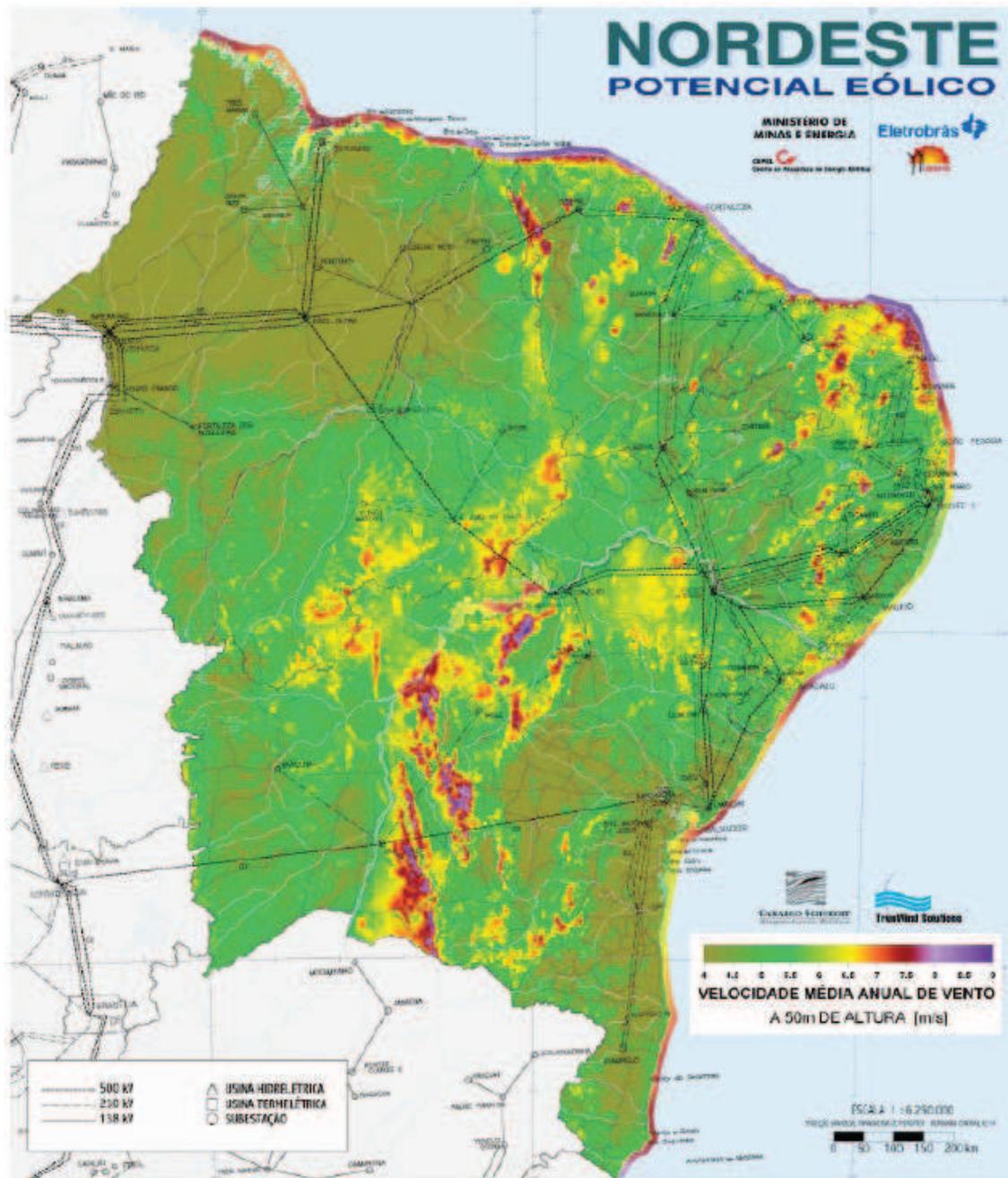
Devido às condições naturais, o estado do Ceará vem despontando no cenário nacional como um forte polo tecnológico e de instalação de usinas eólicas, onde diversas empresas do ramo estão em regiões como a do complexo industrial do Pecém. O Atlas do potencial eólico brasileiro se tornou possível pelo desenvolvimento, nos últimos anos, de um abrangente sistema de software de modelamento dos ventos de superfície (DEWI, 2001).

### 1.1 Justificativa

Como todo e qualquer projeto, as iniciativas de parques eólicos têm o seu revés. A vibração dos elementos móveis constituintes do aerogerador contribui para a geração de ruído. Além disso, a forte interação das pás com o vento é capaz de

tornar insalubres as áreas próximas aos parques eólicos, constituindo-se assim em um problema de aeroacústica.

Figura 1 – Potencial eólico do Nordeste brasileiro.



Fonte: DEWI (2001).

De acordo com Rogers, Manwell e Wright (2006), o ruído emitido pelos aerogeradores decrescem de 60dB, junto à torre, aos 35dB, a uma distância cerca de 300m da torre. A ABNT NBR 10151 e NBR 15 (Figuras 2 e 3, respectivamente) estabelecem algumas regras de níveis de ruído para a saúde humana.

Haja vista os aspectos citados acima, tem-se que a emissão de ruído é um empecilho para a expansão dos atuais parques eólicos, sabendo que eles são dimensionados de acordo com a ABNT, bem como para a implantação de aerogeradores mais próximos de zona urbana, aerogeradores de pequena escala, por exemplo. Assim, para um melhor uso das turbinas eólicas, é fundamental se obter uma melhor compreensão do comportamento estrutural de aerogeradores, acoplado com os efeitos aeroacústicos provocados pelo vento.

Figura 2 – Níveis de ruídos permitidos pela ABNT em vários ambientes.

<b>Tipos de Áreas</b>	<b>Diurno</b>	<b>Noturno</b>
Áreas de sítios e fazendas	40 - 50	35 - 45
Área estritamente residencial urbana ou de hospitais ou de escolas	50 - 60	45 - 55
Área mista, predominantemente residencial	55 - 65	50 - 60
Área mista, com vocação comercial e administrativa	60 - 70	55 - 65
Área mista, com vocação recreacional	65 - 75	55 - 65
Área predominantemente industrial	70 - 80	60 - 70

Fonte: ABNT (2000).

Figura 3 – Relação entre ruído e exposição máxima.

<b>Nível de Ruído dB(A)</b>	<b>Máxima Exposição Diária Permissível</b>	<b>Nível de Ruído dB(A)</b>	<b>Máxima Exposição Diária Permissível</b>
85	8h	96	1h45min
86	7h	98	1h15min
87	6h	100	1h
88	5h	102	45min
89	4h30min	104	35min
90	4h	106	25min
91	3h30min	108	20min
92	3h	110	15min
93	2h40min	112	10min
94	2h15min	114	8min
95	2h	115	7min

Fonte: NORMA REGULAMENTADORA N° 15 (1978).

Wagner, Bareis e Guidati (1996) ressaltam a atenção que os estudos sobre ruído aerodinâmico estão auferindo da comunidade acadêmica, destacando, assim, a importância dessa linha de pesquisa. Leloudas (2007) traz ainda 5 fontes de ruído de um aerofólio: ruído de camada limite turbulenta no bordo de fuga, ruído de separação-estol, ruído de camada limite laminar com esteira de vórtice, ruído de rigidez de bordo de fuga com esteira de vórtice e ruído de influxo turbulento.

Lima (2015) reforça ainda os esforços de nações europeias para a utilização de energia eólica, promovendo instalações de parques eólicos *offshore*, em vez de *onshore*, dada a atual incompatibilidade com as respectivas populações.

## 1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal otimizar o perfil de aerofólios, alterando a geometria do perfil, a fim de reduzir os níveis de ruído aerodinâmico emitido pelo aerofólio.

Para a realização da otimização, faz-se uso de técnicas de Algoritmo Genético (AG). Este surge efetivamente com Goldberg (1989), e apresenta características como globalidade, simplicidade e não é afetado por descontinuidades na função e em suas derivadas, o que garante a estabilidade do processo de otimização, além de funcionar muito bem com funções de várias variáveis (LINDEN, 2008).

Como objetivo específico, este trabalho visa otimizar os perfis s809, s822, s834, FX 63-137, SD 2030 e SG 6043, através do AG implementado, sendo que as coordenadas dos perfis devem funcionar como variáveis para o AG, e o programa NAFNoise (MORIARTY, 2005), que utiliza os modelos de Brooks, Pope e Marcoline (1989) e de Amiet (1975) para a predição de ruído segundo as fontes apresentadas na Justificativa, como função objetivo.

## 1.3 Descrição do Trabalho

Este trabalho apresenta em Noções Preliminares algumas explicações e noções para melhor compreensão do leitor sobre o jargão utilizado e sobre a relevância da existência do trabalho.

Na fundamentação teórica, são apresentadas as bases fundamentais sobre as quais o trabalho é realizado. A saber a teoria do modelo BPM (de Brooks, Pope e Marcolini (1989)) e a teoria sobre Algoritmo Genético. O modelo BPM fornece a predição de nível de pressão sonorabaseado em 4 das fontes de ruído citadas na Justificativa, enquanto que o modelo de Amiet (1975) é baseado na fonte de influxo turbulento. Ambos os modelos são tratados na subseção 3.1.

Em Materiais e Métodos, é descrito tudo o que é preciso saber sobre o programaNAFNoise e detalha o processo de formulação e implementação do AG utilizado.

Em Validação, é mostrada a validação das linhas de programação qualitativa e quantitativamente, através do um exemplo de uma das funções testadas e usadas para a validação.

Em Resultados e Discussão, são mostrados os gráficos de predição de ruídos dos perfis originais e otimizados, bem as geometrias e os resultados de desempenho aerodinâmico dos originais e otimizados. Ainda é feita uma abordagem bem delineada das dificuldades encontradas, na subseção 6.3.

Em Conclusão, é feita basicamente uma revisão dos objetivos, vistos na Introdução, e dos Resultados e Discussão.

No tópico Referências, estão as referências usadas.

No Apêndice A, está o Algoritmo Genético feito e utilizado.

## 2. NOÇÕES PRELIMINARES

### 2.1 Desempenho Aerodinâmico

Um aerofólio é um corpo projetado para provocar forças de sustentação. A explicação qualitativa mais elementar do aparecimento da força de sustentação é o fato de a velocidade do fluido ser diferente nas duas faces do aerofólio, provocando o diferencial de pressões causador de uma força resultante perpendicular à direção do movimento, chamada força de sustentação (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2006). Na Figura 4, é ilustrado um esquema das forças atuantes em um aerofólio.

As forças de sustentação e de arraste têm a mesma natureza das tensões, ou seja, a força é proporcional à área ( $F \propto A$ ). De acordo com a literatura (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2006), essas forças são dadas por:

$$F_l = C_l \frac{\rho v_0^2}{2} cL \quad (1)$$

$$F_d = C_d \frac{\rho v_0^2}{2} cL \quad (2)$$

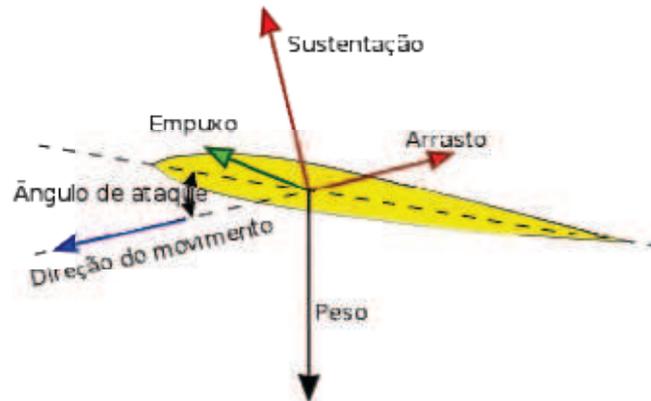
sendo  $F_l$  e  $F_d$ , as forças de sustentação e de arraste respectivamente;  $C_l$  e  $C_d$  os coeficientes de sustentação e de arraste respectivamente;  $\rho$  a densidade do fluido,  $v_0$  a velocidade de escoamento,  $c$  o comprimento da corda, e  $L$  o comprimento da seção do perfil, ou tamanho da asa, ou envergadura. Notar que o produto  $cL$  é a área de atuação das forças de sustentação e de arraste.

Logo, as forças são definidas pelos coeficientes. Um aerofólio ótimo, no quesito desempenho aerodinâmico, que confere maior aproveitamento na conversão de energias por um aerogerador, é o aerofólio que apresenta a maior relação  $C_l/C_d$ .

Define-se espessura da camada limite a distância entre a superfície do aerofólio e o ponto a partir do qual o escoamento é sempre laminar e de velocidade constante.

Define-se desvio da camada limite a espessura equivalente de região turbulenta que torna o escoamento laminar sempre com velocidade constante, conservando as respectivas regiões, de turbulência e de escoamento laminar com velocidade variável.

Figura 4 – Ilustração da atuação das forças em um aerofólio.



Fonte: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Aerof%C3%B3lio>>.

## 2.2 Impactos na Saúde Humana

De acordo com Alberts (2006), a energia total do som a qual uma pessoa está exposta está relacionada com a perda de audição, parcial ou total, sendo a combinação do nível de pressão sonora e da duração da exposição.

Maia (2010) levanta três formas de exposição a ruído que perturbam o sono. São elas: exposição total ao ruído (em que o período diurno também está incluído), exposição a picos de ruído, e exposição a ruídos intermitentes.

Fiorini(1991) mostra a relação íntima de perturbação do sono com o estresse, que acarreta em nervosismo, intolerância e irritação.

Maia (2010) ainda relaciona a exposição de ruído com doenças cardiovasculares, mostrando que a exposição excessiva a ruídos aumenta a produção de colágeno, que tornam os vasos sanguíneos mais espessos, podendo resultar em coagulação sanguínea ou acidente cardiovascular.

Tendo em vista os potenciais de danos à saúde causados por ruído, a ABNT expede a norma de tolerância sonora NBR 10151 de 2000, que, junto à NR 15 de 1978, definem os limites legais de exposição ao ruído. Logo, há uma relação de sujeição dos parque eólicos a essas normas.

### 2.3 Frequência

Um som singular pode ser de banda larga ou de banda curta. Essa caracterização é feita dependendo do intervalo, na rede, que cobre o espectro sonoro. Para analisar a fonte sonora é necessário determinar o espectro de frequência da fonte. Se a fonte sonora é instável, a pressão sonora será uma função do tempo. Sendo assim, é muito mais conveniente estudar o domínio de frequência do que a dinâmica da pressão (LATHI, 2007).

Um som singular pode ser decomposto em alguns componentes espectrais usando um analisador digital. Este pode filtrar o sinal com relativa largura, que é um percentual da frequência central. Os filtros mais comuns em acústica são os de banda curta, banda de 1/3-oitava e banda de oitava (FASOLD; VERES, 2003).

Esses termos que diferenciam as bandas de frequência denotam a razão entre as frequências do limite inferior e superior da banda. Para a banda de oitava, por exemplo, tem-se uma razão 1:2, ou seja,  $f_i/f_s = 1/2$ . Sendo assim, tem-se:

$$f_i/f_s = 1/2 \quad (3)$$

$$f_i = \frac{f_c}{2^{1/2}} \quad (4)$$

$$f_s = 2^{1/2} f_c \quad (5)$$

$$f_c = \sqrt{f_i f_s} \quad (6)$$

Sendo  $f_i$  a frequência inferior,  $f_s$  a frequência superior,  $f_c$  a frequência central. Para 1/3-oitava, tem-se (FASOLD; VERES, 2003):

$$f_i = \frac{f_c}{2^{1/6}} \quad (7)$$

$$f_s = 2^{1/6} f_c \quad (8)$$

$$f_c = \sqrt{f_i f_s} \quad (9)$$

## 2.4 Ponderações

Define-se nível de pressão sonora, SPL (Sound Pressure Level), como função de pressão, a saber  $SPL = SPL(P)$ .

O ouvido humano tem comportamento específico às variações de níveis sonoros, como ressaltam Everest e Pohlmann (2009). Sendo assim, são necessários ponderadores (que são curvas de ponderação), para definir o efeito dos sons ou ruídos analisados no ouvido humano.

As curvas mais usadas para correlacionar os efeitos no ouvido humano e as variações reais de intensidade sonora são a “A” e a “C” (LIMA, 2015), internacionalmente padronizadas e caracterizadas em (IEC, 2002). Quando uma ponderação é utilizada, ela é identificada na unidade, exemplo, utilizando a curva de ponderação “C”, tem-se o nível de pressão sonora dB(C).

## 2.5 Tipos de Ruído

De acordo com Wagner, Bareis e Guidati (1996), o ruído de um aerogerador é proveniente do seu maquinário (caixa de engrenagens, gerador, sistema de arrefecimento...) e proveniente da interação com o ar (ruído aerodinâmico).

O ruído aerodinâmico pode ser dividido ainda em (LIMA, 2015):

- a) **Ruído de baixa frequência:** ocorre quando a pá, em princípio, passa por uma região pontual de descontinuidade do fluxo, a presença da torre, por exemplo;
- b) **Influxo turbulento:** representa a interação de turbulência, ou de um fluxo turbulento, com uma estrutura sólida;
- c) **Autoruído (*Airfoil self-noise*):** representa o ruído gerado devido à geometria do aerofólio.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 Modelo BPM

Como visto, os aerogeradores produzem ruído, devido à mecânica ou à aerodinâmica, e que é necessário manter certa distância de uma torre eólica para minimizar os efeitos do som produzido por ela. Sabe-se também que a intenção deste trabalho é alterar a geometria do aerofólio, de modo que diminua os níveis de ruído emitidos, com a menor redução de desempenho aerodinâmico possível.

O modelo BPM (BROOKS, POPE, MARCOLINI; 1989) traz à luz exatamente as equações de descrição dos níveis de ruído, em função do posicionamento do observador, do posicionamento do aerogerador e de características do aerofólio.

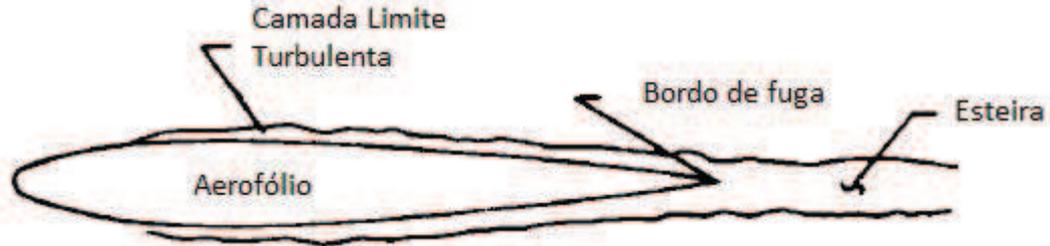
Brooks, Pope e Marcolini (1989) conseguiram modelar o ruído produzido pelo aerofólio NACA 0012 empiricamente, em escala, através de técnicas de estudo de sinais. Usando um espectrômetro de frequência, com um filtro de 1/3 de oitava, eles conseguiram identificar seis fontes de ruído provindos do aerofólio: ruído de camada limite turbulenta no bordo de fuga, ruído de separação-estol, ruído de camada limite laminar com esteira de vórtice, ruído de rigidez de bordo de fuga com esteira de vórtice, formação de vórtice de ponta e ruído de influxo turbulento. Contudo o modelo BPM não aborda o ruído devido ao influxo e este trabalho não aborda o ruído de ponta do aerofólio, pois, uma vez que a seção de perfil compo nha o aerofólio, essa fonte de ruído deixa de existir, em princípio.

##### **3.1.1 Camada Limite Turbulenta no Bordo de Fuga**

O ruído oriundo do efeito de camada turbulenta de bordo de fuga (TBL-TE) é reconhecido por Brooks, Pope e Marcolini (1989) como uma das principais fontes de ruído (ou *self-noise*). Este é gerado quando a camada limite turbulenta rente à superfície do aerofólio é convertida em uma esteira de turbulência no bordo de fuga, como ilustra a Figura 5. Para que se possa analisar essa conversão, é necessário saber como se comporta a camada limite turbulenta no decorrer da superfície do aerofólio. Em certas condições de ângulo de ataque e número de Reynolds, a transição do escoamento laminar para o turbulento ocorre em um ponto da superfície do aerofólio. Essa turbulência gera uma flutuação de pressão nas

superfícies de sucção e de pressão do bordo de fuga. A espessura da camada limite é um parâmetro chave para a determinação dos níveis de ruído.

Figura 5 – Ilustração do TBL-TE, para pequenos ângulos de ataque.



Fonte: BROOKS, POPE, MARCOLINI. (1989).

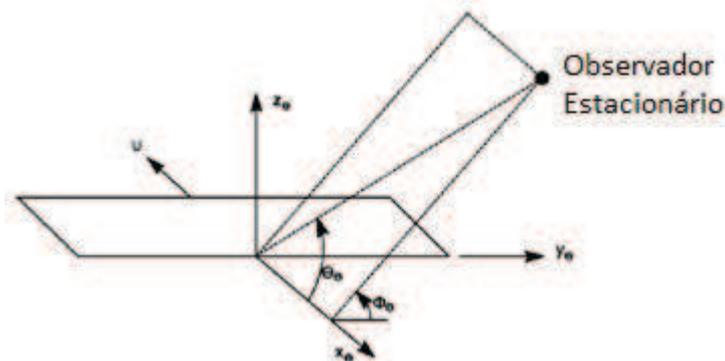
Segundo Brooks, Pope e Marcolini(1989), o nível da pressão sonora para essa fonte é dado pelas Equações (10) e (11).

$$SPL_p = 10 \log \left( \frac{\delta_p^* M^5 L \bar{D}_h}{r_e^2} \right) + A \left( \frac{St_p}{St_1} \right) + (K_1 - 3) + \Delta K_1 \quad (10)$$

$$SPL_s = 10 \log \left( \frac{\delta_s^* M^5 L \bar{D}_h}{r_e^2} \right) + A \left( \frac{St_s}{St_1} \right) + (K_1 - 3) \quad (11)$$

Sendo  $\delta^*$  o desvio de camada limite e  $\bar{D}_h$  a função diretiva da fonte sonora, que indica a posição angular do observador em relação à fonte sonora, como ilustra a Figura 6. A função diretiva é dada pela Equação (12).

Figura 6 - Ângulos diretivos, definindo a posição angular do observador em relação ao aerofólio.



Fonte: BROOKS, POPE, MARCOLINI. (1989).

$$\bar{D}_h(\theta_e, \phi_e) = \frac{2 \sin^2 \left( \frac{1}{2} \theta_e \right) \sin^2 \Phi_e}{(1 + M \cos \theta_e)(1 + (M - Mc) \cos \theta_e)^2} \quad (12)$$

sendo  $M$  o número de Mach na seção do aerofólio,  $M_c$  o número de Mach convectivo (número de Mach do fluxo junto ao bordo de fuga) e  $\theta_e$  e  $\Phi_e$  os ângulos diretivos, definidos na Figura 4. Segundo Amiet (1975), a Equação (12) pode ser normalizada para  $\theta_e = 90^\circ$  e  $\Phi_e = 90^\circ$ . No entanto, nessa posição, a diretividade do som alcança o valor máximo.

O número de Strouhal nas superfícies de pressão e sucção são dados por:

$$St_p = \frac{f \delta_p^*}{U} \quad (13)$$

$$St_s = \frac{f \delta_s^*}{U} \quad (14)$$

O número de Strouhal é um adimensional característico de mecanismos de fluxo oscilante (PINHATA, 2006).

$St_1$  é dado por:

$$St_1 = 0,02M^{-0,6} \quad (15)$$

A função de forma  $A$  é dada por:

$$A(a) = A_{min}(a) + A_R(a_0)[A_{max}(a) - A_{min}(a)] \quad (16)$$

Para a função  $A$ , as curvas  $A_{max}(a)$  e  $A_{min}(a)$  são definidas por:

$$A_{min}(a) = \begin{cases} \sqrt{67,552 - 886,788a^2} - 8,219 & (a < 0,209) \\ -32,665a + 3,981 & (0,209 \leq a \leq 0,244) \\ -142,795a^3 + 103,656a^2 - 57,757a + 6,006 & (0,244 < a) \end{cases} \quad (17)$$

$$A_{max}(a) = \begin{cases} \sqrt{67,552 - 886,788a^2} - 8,219 & (a < 0,13) \\ -15,901a + 1,098 & (0,13 \leq a \leq 0,321) \\ -4,669a^3 + 3,491a^2 - 16,669a + 1,149 & (0,321 < a) \end{cases} \quad (18)$$

$a$  é a razão do número de Strouhal como:

$$a = \left| \log \left( \frac{St}{St_{peak}} \right) \right| \quad (19)$$

sendo  $St = St_p$  ou  $St_s$ ,  $St_{peak} = St_1$ .  $A_R(a_0)$  é o fator de interpolação, determinado por:

$$A_R(a_0) = \frac{-20 - A_{min}(a_0)}{A_{max}(a_0) - A_{min}(a_0)} \quad (20)$$

$a_0$  é uma função do número de Reynolds  $R_c$ :

$$a_0(R_c) = \begin{cases} 0,57 & (R_c < 9,52 \times 10^4) \\ (-9,57 \times 10^{-13})(R_c - 8,57 \times 10^5)^2 + 1,13 & (9,52 \times 10^4 \leq R_c \leq 8,57 \times 10^5) \\ 1,13 & (8,57 \times 10^5 < R_c) \end{cases} \quad (21)$$

$K_1$  é chamada de função de amplitude:

$$K_1 = \begin{cases} 4,31 \log(R_c) + 156,3 & (R_c < 2,47 \times 10^5) \\ -9 \log(R_c) + 181,6 & (2,47 \times 10^5 \leq R_c \leq 8 \times 10^5) \\ 128,5 & (8 \times 10^5 < R_c) \end{cases} \quad (22)$$

Para ângulos de ataque diferentes de zero, a função de ajuste de nível de pressão  $\Delta K$  é usada na Equação (10) para a superfície de pressão:

$$\Delta K_1 = \begin{cases} \alpha [1,43 \log R_{\delta_p^*} - 5,29] & (R_{\delta_p^*} \leq 5000) \\ 0 & (5000 < R_{\delta_p^*}) \end{cases} \quad (23)$$

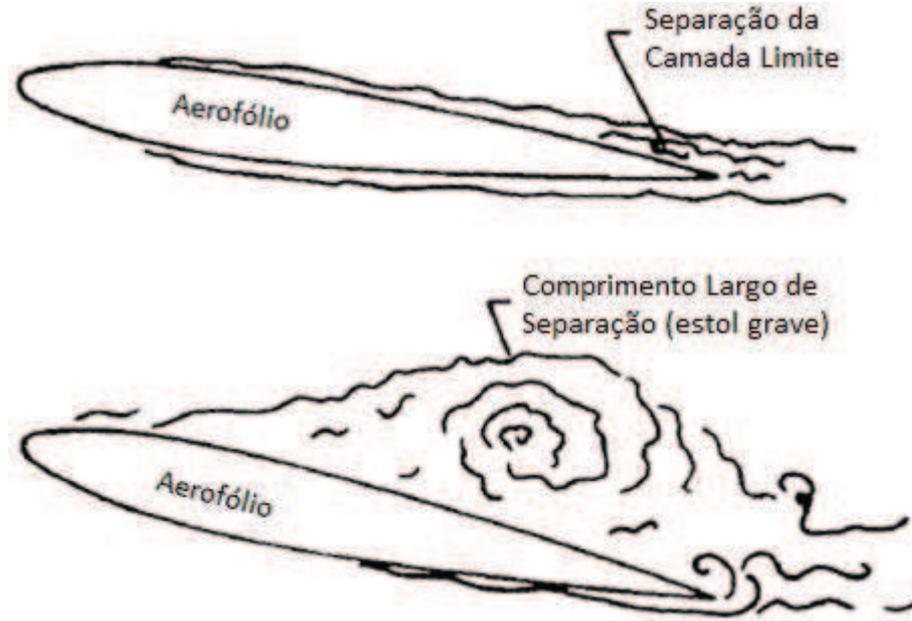
Sendo  $R_{\delta_p^*}$  o número de Reynolds baseado no desvio da camada limite na superfície de pressão. O ângulo de ataque  $\alpha$  é dado em graus.

### 3.1.2 Ruído de Separação – Estol

Para altos ângulos de ataque e certo número de Reynolds, ocorre a separação da camada limite da superfície de sucção. Essa separação, chamada estol (Figura 7), gera uma região que contém vórtices, que são maiores do que os

produzidos para baixos ângulos de ataque. O ruído é causado pela conversão desses vórtices turbulentos em uma esteira.

Figura 7 – Ilustração do TBL-TE, para ângulos de ataque superiores.



Fonte: BROOKS, POPE, MARCOLINI. (1989).

A equação de ruído devido ao estol,  $SPL_\alpha$ , segundo Brooks, Pope e Marcolini(1989), é dada pela Equação (24).

$$SPL_\alpha = 10 \log \left( \frac{\delta_s^* M^5 L \bar{D}_h}{r_e^2} \right) + B \left( \frac{St_s}{St_2} \right) + K_2 \quad (24)$$

$St_2$  é dado por:

$$St_2 = St_1 x \begin{cases} 1 & (\alpha < 1,33^\circ) \\ 10^{0,0054(\alpha-1,33)^2} & (1,33^\circ \leq \alpha \leq 12,5^\circ) \\ 4,72 & (12,5^\circ < \alpha) \end{cases} \quad (25)$$

A função de forma  $B$  é dada similarmente a  $A$ :

$$B(b) = B_{min}(b) + B_R(b_0)[B_{max}(b) - B_{min}(b)] \quad (26)$$

$$B_{min}(b) = \begin{cases} \sqrt{16,888 - 886,788b^2} - 4,109 & (b < 0,13) \\ -83,607b + 8,138 & (0,13 \leq b \leq 0,145) \\ -817,81b^3 + 355,21b^2 - 135,024b + 10,619 & (0,145 < b) \end{cases} \quad (27)$$

$$B_{max}(b) = \begin{cases} \sqrt{16,888 - 886,788b^2} - 4,109 & (b < 0,1) \\ -31,33b + 1,854 & (0,1 \leq b \leq 0,187) \\ -80,541b^3 + 44,174b^2 - 39,381b + 2,344 & (0,187 < b) \end{cases} \quad (28)$$

$b$  é a razão de número de Strouhal:

$$b = \left| \log \left( \frac{St_s}{St_2} \right) \right| \quad (29)$$

O fator de interpolação  $B_R$  é dado por

$$B_R(b_0) = \frac{-20 - B_{min}(b_0)}{B_{max}(b_0) - B_{min}(b_0)} \quad (30)$$

$b_0$  é função do número de Reynolds  $R_c$ :

$$b_0(R_c) = \begin{cases} 0,3 & (R_c < 9,52 \times 10^4) \\ (-4,48 \times 10^{-1})(R_c - 8,57 \times 10^5)^2 + 0,56 & (9,52 \times 10^4 \leq R_c \leq 8,57 \times 10^5) \\ 0,56 & (8,57 \times 10^5 < R_c) \end{cases} \quad (31)$$

$K_2$  é a função de amplitude:

$$K_2 = K_1 + \begin{cases} -1000 & (\alpha < \gamma_0 - \gamma) \\ \sqrt{\beta^2 - (\beta/\gamma)^2(\alpha - \gamma_0^2) + \beta_0} & (\gamma_0 - \gamma \leq \alpha \leq \gamma_0 + \gamma) \\ -12 & (\gamma_0 + \gamma < \alpha) \end{cases} \quad (32)$$

sendo

$$\gamma = 27,094M + 3,31 \quad (33)$$

$$\gamma_0 = 23,43M + 4,651 \quad (34)$$

$$\beta = 72,65M + 10,74 \quad (35)$$

$$\beta_0 = -34,19M - 13,82 \quad (36)$$

Dessa forma, Brooks, Pope e Marcolini(1989) definem o ruído causado por camada limite turbulenta no bordo de fuga como:

$$SPL_{TBL-TE} = 10 \log \left( 10^{\frac{SPL_p}{10}} + 10^{\frac{SPL_s}{10}} + 10^{\frac{SPL_\alpha}{10}} \right) \quad (37)$$

O entendimento, como visto nos limites das funções supracitadas, é de que  $SPL_p$  e  $SPL_s$  dominam, para ângulos de ataque até  $12,5^\circ$ , e que  $SPL_\alpha$  domina, para ângulos de ataque superiores a  $12,5^\circ$ .

### **3.1.3 Camada limite laminar com Esteira de Vórtice**

Uma turbina eólica pode operar abaixo do intervalo de número de Reynolds de  $10^5$  a  $10^6$ , por causa das mudanças na velocidade relativa do vento e no comprimento da corda ao longo da pá (ZHU, 2004). Logo, as condições de escoamento são diferentes para cada seção da pá. Se a camada limite laminar cobrir a maior parte da superfície do aerofólio, desde que a transição da camada limite laminar para turbulenta seja próxima do bordo de fuga, ocorrerá ruído,

caracterizando essa fonte. Esse fenômeno é chamado por Brooks, Pope e Marcolini(1989) de camada limite laminar com esteira de vórtice, *Laminar BoundaryLayerVortexShedding* (LBL- VS), como ilustra a Figura 8.

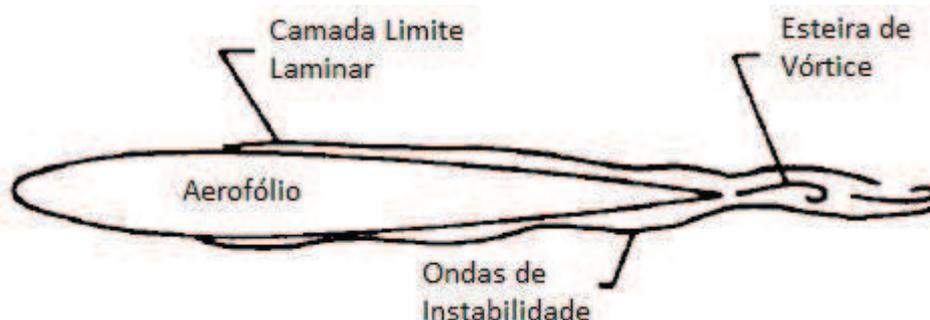
O parâmetro espessura da camada limite é usado da mesma forma que o definido para a predição do ruído de TBL-TE, desde que o ponto de transição seja próximo do bordo de fuga. A instabilidade de pressão próxima ao bordo de fuga resulta em um ruído que domina os níveis de pressão sonora nos espectros de alta frequência. Essa fonte de ruído não fornece grandes efeitos para aerogeradores de grande escala, mas é importante para os de pequena escala (GOÇMEN; ÖZERDEM, 2012).

O método utilizado para o LBL-VS é similar ao utilizado para o TL-TE. Os parâmetros usados são os parâmetros de camada limite, número de Mach, ângulo de ataque e número de Reynolds. A espessura da camada limite no bordo de fuga é utilizada no modelo de predição de ruído LBL-VS, em vez do desvio da camada limite.

De acordo com Brooks, Pope e Marcolini (1989), o modelo de predição de ruído LBL-VS é dado pela Equação(38):

$$SPL_{LBL-VS} = 10 \log \left( \frac{\delta_s M^5 L \bar{D}_h}{r_e^2} \right) + G_1 \left( \frac{St'}{St'_{peak}} \right) + G_2 \left( \frac{R_c}{(R_c)_0} \right) + G_3(\alpha) \quad (38)$$

Figura 8 – Ilustração do LBL-VS.



Fonte: BROOKS, POPE, MARCOLINI. (1989).

Sendo que os números de Strouhalsão definidos como:

$$St' = \frac{f \delta_p}{U} \quad (39)$$

$$St'_1 = \begin{cases} 0,18 & (R_c < 1,3 \times 10^5) \\ 0,001756 R_c^{0,3931} & (1,3 \times 10^5 \leq R_c \leq 4 \times 10^5) \\ 0,28 & (4 \times 10^5 < R_c) \end{cases} \quad (40)$$

$$St'_{peak} = St'_1 \times 10^{-0,04\alpha} \quad (41)$$

$G_1(e)$  é chamada de função de forma de espectro, sendo  $e$  a razão entre os números de Strouhal,  $e = St' / St'_{peak}$ .

$$G_1(e) = \begin{cases} 39,8 \log e - 11,12 & (e \leq 0,5974) \\ 98,409 \log e + 2 & (0,5974 < e \leq 0,8545) \\ -5,076 \sqrt{2,484 - 506,25 (\log e)^2} & (0,8545 < e \leq 1,17) \\ -98,409 \log e + 2 & (1,17 < e \leq 1,674) \\ -39,8 \log e - 11,2 & (1,674 < e) \end{cases} \quad (42)$$

A função de forma  $G_1$  tem um pico de -3,5dB quando  $St' = St'_{peak}$ . A integração total de  $G_1$  é nula.

$G_2$  é chamada de função de forma de nível de pico em escala, que é função do ângulo de ataque e do número de Reynolds.

$$G_2(d) = \begin{cases} 77,852 \log d + 15,328 & (d \leq 0,3237) \\ 65,188 \log d + 9,152 & (0,3237 < d \leq 0,5689) \\ -114,052 (\log e)^2 & (0,5689 < d \leq 1,7579) \\ 65,188 \log d + 9,152 & (1,7579 < d \leq 3,0889) \\ -77,852 \log d + 15,328 & (3,0889 < d) \end{cases} \quad (43)$$

sendo  $d = R_c / (R_c)_0$ , e o número de Reynolds de referência  $(R_c)_0$  é definido como:

$$(R_c)_0 = \begin{cases} 10^{0,215\alpha+4,978}, & \alpha \leq 0 \\ 10^{0,12\alpha+5,263}, & \alpha > 0 \end{cases} \quad (44)$$

O intervalo de funcionamento de  $G_2$  é de aproximadamente 120dB a 170dB, depende do número de Reynolds e do ângulo de ataque. Então  $G_2$  desempenha um papel preponderante nos níveis de ruído LBL-VS.

A outra função  $G_3$  depende do ângulo de ataque, da seguinte forma:

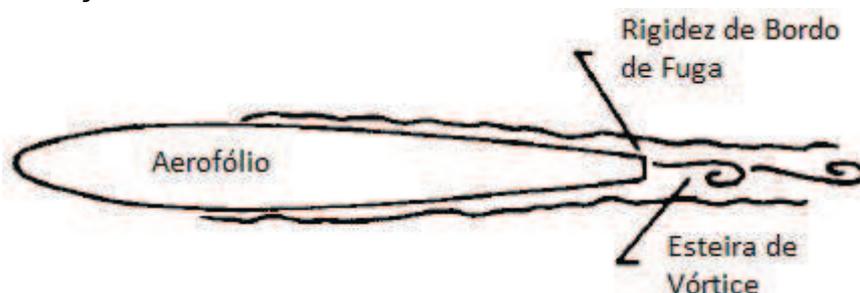
$$G_3(\alpha) = 171,04 - 3,03\alpha \quad (45)$$

Os valores de  $G_3$  ficam entre 0dB e -45dB. A curva de forma  $G_3$  é similar à curva de forma  $G_2$ .

### 3.1.4 Rigidez de Bordo de Fuga com Esteira de Vórtice

Essa fonte de ruído, *Trailing Edge Bluntness-Vortex Shedding* (TEB-VS), ilustrada na Figura 9, diz respeito à produção de uma esteira de vórtices devido à geometria do bordo de fuga. O nível de ruído varia com a espessura da rigidez a cada seção da pá, especialmente perto da ponta.

Figura 9 – Ilustração do TEB-VS.



Fonte: BROOKS, POPE, MARCOLINI. (1989).

A espessura da rigidez é comparável à espessura da camada limite no bordo de fuga, mas é muito maior do que o desvio da camada limite. Por isso, é desejável fazer a espessura da rigidez do bordo de fuga ser comparável ao desvio da camada limite, respeitando os limites do modelo (ZHU, 2004).

O modelo TEB-VS é similar aos do TBL-TE e LBL-VS, trazendo em si ainda funções de forma e aparecendo um novo parâmetro, que é a espessura da rigidez do bordo de fuga. O modelo, segundo Brooks, Pope e Marcoline (1989) é dado a seguir:

$$SPL_{TEB-VS} = 10 \log \left( \frac{hM^{5,5}L\bar{D}_h}{r_e^2} \right) + G_4 \left( \frac{h}{\delta_{avg}^*}, \Psi \right) + G_5 \left( \frac{h}{\delta_{avg}^*}, \Psi, \frac{St''}{St''_{peak}} \right) \quad (46)$$

$h$  é a espessura da rigidez do bordo de fuga. Essa espessura é usada para calcular o número de Strouhal, em vez da espessura da camada limite. A saber:

$$St'' = \frac{fh}{U} \quad (47)$$

O número de Strouhal de ponta é definido como:

$$St''_{peak} = \frac{f_{peak}h}{U} \quad (48)$$

Contudo,  $St''_{peak}$  também pode ser escrito como função de  $h/\delta^*$  e  $\Psi$ , este é o ângulo sólido do bordo de fuga. Então, de acordo com Brooks, Pope e Marcolini (1989),  $St''_{peak}$  fica:

$$St''_{peak} = \begin{cases} \frac{0,212 - 0,0045\Psi}{1 + 0,235(h/\delta_{avg}^*)^{-1} - 0,0132(h/\delta_{avg}^*)^{-2}}, & 0,2 \leq h/\delta_{avg}^* \\ 0,1(h/\delta_{avg}^*) - 0,00243\Psi + 0,095, & 0,2 > h/\delta_{avg}^* \end{cases} \quad (49)$$

Sendo  $\delta_{avg}^* = (\delta_p^* + \delta_s^*)/2$  a média dos desvios das camadas limites nas superfícies de sucção e de pressão. A razão  $h/\delta_{avg}^*$  normalmente fica entre 0,25 e 1,25, dependendo da razão entre os números de Strouhal e do ângulo no bordo de fuga.

$G_4$  e  $G_5$  são as funções de forma do espectro. A saber:

$$G_4\left(\frac{h}{\delta_{avg}^*}, \Psi\right) = \begin{cases} 17,5 \log\left(\frac{h}{\delta_{avg}^*}\right) - 1,114\Psi + 157,5, & h/\delta_{avg}^* \leq 5 \\ -1,114\Psi + 169,7 & , \quad h/\delta_{avg}^* > 5 \end{cases} \quad (50)$$

Para calcular  $G_5$ , faz-se uma interpolação entre  $\Psi = 0^\circ$  e  $\Psi = 14^\circ$ , que é o ângulo sólido do bordo de fuga do perfil NACA 0012. Assim, tem-se:

$$G_5\left(\frac{h}{\delta_{avg}^*}, \Psi, \frac{St''}{St''_{peak}}\right) = (G_5)_{\Psi=0} + 0,0714\Psi[(G_5)_{\Psi=14^\circ} - (G_5)_{\Psi=0^\circ}] \quad (51)$$

$$(G_5)_{\Psi=14^\circ} = \begin{cases} m\eta + k & (\eta < \eta_0) \\ 2,5\sqrt{1 - (\eta/\mu)^2} - 2,5 & (\eta_0 \leq \eta < 0) \\ \sqrt{1,5625 - 1194,99\eta^2} - 1,25 & (0 \leq \eta < 0,03616) \\ -155,54\eta + 4,375 & (0,03616 \leq \eta) \end{cases} \quad (52)$$

Sendo

$$\eta = \log\left(\frac{St''}{St''_{peak}}\right) \quad (53)$$

$$\mu = \begin{cases} 0,1221 & (h/\delta_{avg}^* < 0,25) \\ -0,2175(h/\delta_{avg}^*) + 0,1755 & (0,25 \leq h/\delta_{avg}^* < 0,62) \\ -0,0308(h/\delta_{avg}^*) + 0,0596 & (0,62 \leq h/\delta_{avg}^* < 1,15) \\ 0,0242 & (1,15 \leq h/\delta_{avg}^*) \end{cases} \quad (54)$$

$$m = \begin{cases} 0 & (h/\delta_{avg}^* \leq 0,02) \\ 68,724(h/\delta_{avg}^*) - 1,35 & (0,02 \leq h/\delta_{avg}^* \leq 0,5) \\ 308,475(h/\delta_{avg}^*) - 121,23 & (0,5 \leq h/\delta_{avg}^* \leq 0,62) \\ 224,811(h/\delta_{avg}^*) - 69,35 & (0,62 < h/\delta_{avg}^* \leq 1,15) \\ 1583,28(h/\delta_{avg}^*) - 1631,59 & (1,15 < h/\delta_{avg}^* \leq 1,2) \\ 268,344 & (1,2 < h/\delta_{avg}^*) \end{cases} \quad (55)$$

Sendo

$$\eta_0 = -\sqrt{\frac{m^2\mu^4}{6,25 + m^2\mu^2}} \quad (56)$$

$$k = 2,5\sqrt{1 - (\eta_0/\mu)^2} - 2,5 - m\eta_0 \quad (57)$$

Para calcular  $(G_5)_{\Psi=0^\circ}$ , é só usar a Equação (52) e substituir  $h/\delta_{avg}^*$  por  $(h/\delta_{avg}^*)'$ . Assim, tem-se:

$$(h/\delta_{avg}^*)' = 6,724(h/\delta_{avg}^*)^2 - 4,019(h/\delta_{avg}^*) + 1,107 \quad (58)$$

### 3.1.5 Influxo Turbulento no Bordo de Ataque

Quando a turbulência atmosférica encontra um prédio ou qualquer outra estrutura sólida, será gerado ruído, que é chamado de ruído de influxo turbulento. A banda de ruído de aerogeradores também depende do influxo turbulento, principalmente no caso de larga escala.

O modelo de predição para essa fonte de ruído não é dado pelo modelo BPM, mas pelo modelo semi-empírico de Amiet (1975). As equações são as a seguir:

$$SPL_{inflow} = SPL_{inflow}^H + 10 \log\left(\frac{LFC}{1 + LFC}\right) \quad (59)$$

$$SPL_{inflow}^H = 10 \log\left(\frac{\rho_0^2 c_0^2 L L}{r_e^2} M^3 I^2 \frac{K^3}{(1 + K^2)^{\frac{7}{3}}}\right) + 58.4 \quad (60)$$

$$LFC = 10S^2MK^2\beta^{-2} \quad (61)$$

$$S^2 = \left( \frac{2\pi K}{\beta^2} + \left( 1 + 2.4 \frac{K}{\beta^2} \right)^{-1} \right)^{-1} \quad (62)$$

Sendo  $SPL_{inflow}^H$  o nível de pressão sonora para as regiões de alta frequência, LFC a correção de baixa frequência,  $\rho_0$  a densidade do ar,  $c_0$  a velocidade do som,  $l_0$  comprimento de turbulência,  $K = \pi fc/U$  o número de onda local dado por Lawson (1993),  $f$  a frequência de interesse,  $c$  o comprimento de corda local,  $U$  a velocidade local sobre a seção do aerofólio);,  $S$  a função de compressibilidade de Sears, e  $\beta^2 = 1 - M^2$ .

## 3.2 Algoritmo Genético

### 3.2.1 Noções Gerais

O algoritmo genético é um artifício, desenvolvido por John Holland (1975), que simula a teoria da evolução de Charles Darwin. A seguir, algumas características da teoria da evolução:

- a) Indivíduos de mesmas, ou diferentes, espécies disputam, continuamente, por limitados recursos presentes no meio ambiente;
- b) Dentre os vários concorrentes presentes em um determinado meio, alguns, por conta de suas características específicas, possuem uma melhor chance (maior probabilidade) de sobrevivência. Tais indivíduos são ditos mais adaptados ao ambiente;
- c) Indivíduos mais adaptados possuem uma maior probabilidade de sobrevivência, e, conseqüentemente, apresentam maior número de descendentes;
- d) Visto que, no processo de reprodução, um grande número de características dos pais são repassadas aos filhos, indivíduos que se reproduzem mais tendem a propagar mais significativamente suas características nas gerações posteriores;

- e) Logo, ao longo do processo de evolução, características mais desejáveis tendem a se propagar na espécie, aumentando assim o grau de adaptação desta como um todo;
- f) O processo de reprodução não ocorre sem falha. Durante a replicação e transmissão dos genes aos novos indivíduos criados o fenômeno conhecido como mutação pode ocorrer. Este fenômeno é geralmente prejudicial ao indivíduo, mas, em alguns casos, pode incorporar a ele uma característica desejável, não contida no conjunto de genes dos seus pais. Desta forma, a natureza adquire a capacidade de explorar um número maior de combinações e possibilidades.

Diferentemente dos métodos convencionais, que varrem o domínio da função ponto a ponto, um modelo por algoritmo genético escolhe pontos aleatórios do domínio e escolhe os melhores resultados para a iteração seguinte. Os novos pontos terão influência dos pontos anteriores.

### **3.2.2 Funcionamento**

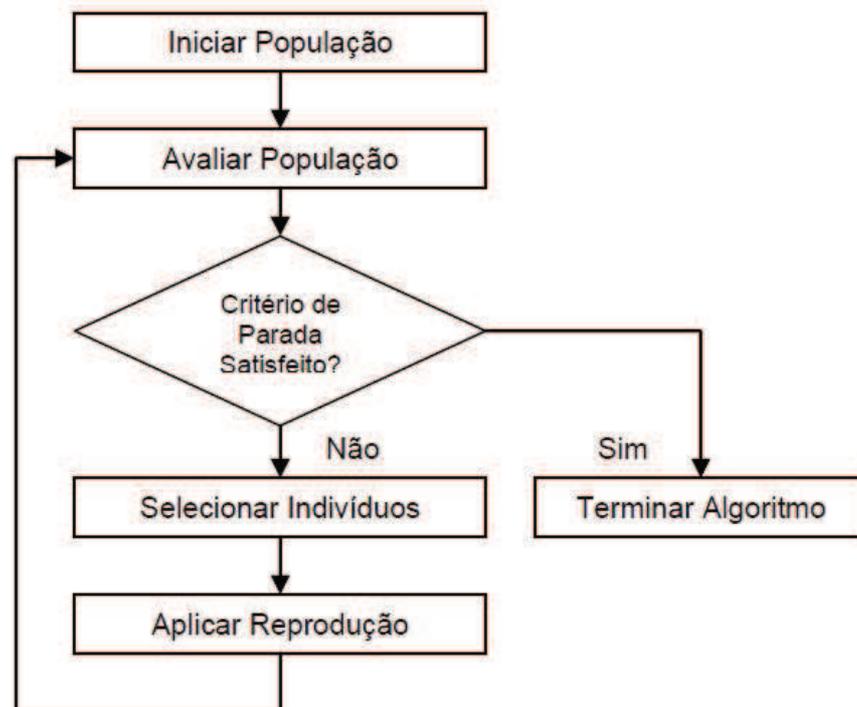
Tendo em vista manter a similaridade com o mecanismo darwiniano da evolução das espécies, Holland (1975) decompõe o método nas seguintes fases: Inicialização, avaliação, seleção, cruzamento, mutação, atualização e finalização.

- a) Inicialização: definição do genoma, do indivíduo e da população;
- b) Avaliação: determina a aptidão, o quão boa é a solução. É feita uma análise para saber quão bem as aptidões respondem ao problema proposto;
- c) Seleção: indivíduos são selecionados para a reprodução. A probabilidade de uma dada solução ser selecionada é proporcional a sua aptidão;
- d) Cruzamento: características das soluções escolhidas são recombinadas, gerando novos indivíduos;
- e) Mutação: características dos indivíduos resultantes do processo de reprodução são alteradas, acrescentando assim variedade à população;

- f) Atualização: os indivíduos criados nesta geração são inseridos na população;
- g) Finalização: verifica se as condições de encerramento da evolução foram atingidas, retornando para a etapa de avaliação em caso negativo e encerrando a execução em caso positivo.

A ideia geral de um algoritmo genético está fundamentada na representação de um problema, por meio de um conjunto de indivíduos que são possíveis soluções para o tal problema. Através de processos de seleção, reprodução e mutação, obtém-se uma nova geração de indivíduos e o processo continua. Após um certo número de gerações, espera-se que convirja para uma geração de elite que corresponde à melhor solução, ou solução aceitável para o problema. A Figura 10 ilustra como é um Algoritmo Genético básico.

Figura 10 – Algoritmo Genético básico.



Fonte: SOARES JÚNIOR (2011).

### 3.2.3 Componentes

#### 3.2.3.1 Indivíduo

Os indivíduos, ou cromossomos, ou genótipos, são a unidade fundamental de um algoritmo genético. Eles codificam potenciais soluções para o problema a ser

tratado, e é através de sua manipulação (pelo processo de evolução) que respostas são encontradas. Os tipos de indivíduo mais comuns, vistos no levantamento bibliográfico são binários (001010), números inteiros (123456) e símbolos (ABCDEFGH). Como exemplo, citam-se os trabalhos de Teodoro, dos Santos e Prado (2012), que usou codificação binária, e Malaquias (2006), que usou codificação de números inteiros.

Define-se fenótipo como o ponto no domínio da função objetivo correspondente ao genótipo utilizado. Tomando como exemplo a otimização da seguinte função:

$$f(x) = x^3 - x^2 - 10x. \quad (63)$$

Tem-se que

$$f_o(G) = f(d(G)). \quad (64)$$

Sendo  $f_o(G)$  a função objetivo aplicada sobre o genótipo  $G$ ,  $d(G)$  a função que decodifica os genes do cromossomo em um valor  $x$ . A decodificação do código binário é dada pela Equação (65).

$$x = \min + (\max - \min) \frac{b_{10}}{2^\epsilon - 1} \quad (65)$$

Sendo  $b_{10}$  o valor do binário na base decimal e  $\epsilon$  o tamanho do cromossomo.

Define-se grau de adaptação o valor da função objetivo, e grau de aptidão  $f_A(x)$  o seguinte resultado:

$$f_A(x) = \frac{f_o(x)}{\sum_{i=1}^n f_o(i)}. \quad (66)$$

Sendo  $n$  o tamanho da população (conjunto de indivíduos).

### 3.2.3.2 População

Assim como na teoria de Darwin, a evolução só é possível graças à dinâmica populacional. Ao propagar características desejáveis a gerações subsequentes

(cruzamento), enquanto novas são testadas (mutação), um Algoritmo Genético manipula a frequência com que determinadas sequências de genes aparecem nas populações sobre as quais atua.

A ordem de iteração pode ser chamada de geração, replicando a ideia da evolução das espécies. Diz respeito ao número de vezes pelas quais a população passou pelo processo de seleção, reprodução, mutação e atualização.

Um dos critérios de parada, na utilização do AG, é a quase invariância da média de adaptação  $M_A$  dentre as últimas gerações. Ou seja, quando  $M_A$  começar a apresentar baixa variação no decorrer das iterações, significa que o problema está aceitavelmente próximo de sua situação ótima. A média de adaptação nada mais é do que a média aritmética dos valores da função objetivo, correspondente aos indivíduos da atual população. Matematicamente, tem-se

$$M_A = \frac{\sum_{i=1}^n f_o(i)}{n} \quad (67)$$

Sendo  $n$  o tamanho da população.

Ao montar os indivíduos da primeira população, é importante gerar uma população com boa variedade, pois isso aumenta o campo de busca. Para garantir a propagação dos melhores indivíduos, usa-se uma técnica chamada elitismo, é composta pelos indivíduos mais adaptados da população, sendo os  $m$  melhores indivíduos sempre mantidos a cada geração, evitando que a nova população se torne pior do que a população atual (LINDEN, 2008). O elitismo é um processo não obrigatório no código de AG. Ao se criar a nova população por cruzamento e mutação, tem-se grande chance de perder os melhores indivíduos.

### **3.2.4 Operadores Genéticos**

#### **3.2.4.1 Inicialização**

A inicialização é a primeira etapa do processo, onde vão ser definidos os indivíduos da primeira geração. Normalmente, o genoma do indivíduo é produzido

aleatoriamente, mas o usuário pode gerar todas as combinações possíveis dos genes (espaço de um parâmetro, bit, no caso de binário). Todavia, se torna óbvio que, nesse caso, o cromossomo deve ser pequeno. Tomando o tipo de genoma binário, tem-se que um cromossomo de tamanho 10, geraria  $2^{10}$  possibilidades de indivíduo. Quanto menor for o cromossomo, menos variação no campo de busca terá o algoritmo.

Os operadores de inicialização abordados por Holland (1975) e De Jong (1975) são do tipo inicialização randômica e inicialização por *grid*. A inicialização randômica toma valores puramente aleatórios no domínio da função objetivo, podendo permitir áreas não exploradas, enquanto que a inicialização por *grid* toma valores igualmente espaçados no espaço de busca, causando uma exploração uniforme no espaço de busca para a primeira população.

#### 3.2.4.2 Avaliação

Usando-se a média de adaptação, já comentada na seção 3.2.3.2, um cromossomo razoavelmente grande, como de tamanho 22, por exemplo, permite intervalos de variação da média de adaptação por geração menores, o que permite melhorar o critério de parada.

#### 3.2.4.3 Seleção

É no estágio de seleção que os indivíduos são escolhidos para posterior cruzamento. Neste ponto, fazendo uso do grau de adequação de cada um, é efetuado um sorteio onde os mais aptos possuem maior probabilidade de se reproduzirem. Este grau é calculado a partir da função de avaliação de cada indivíduo, e determina quão apto ele está para a reprodução em relação à população a que pertence.

De acordo com Goldberg (1989), Wall(2000) e Geyer-Schultz (1997), o uso de um método de *scaling* sobre o valor de adaptação de cada indivíduo normalmente é útil, por reduzir a probabilidade de convergência prematura.

Dentre os outros métodos de seleção, se destacam no levantamento bibliográfico os seguintes:

- a) Seleção por ranking: os indivíduos da população são ordenados de acordo com seu valor de adequação e então sua probabilidade de escolha é atribuída conforme a posição que ocupam;
- b) Seleção por giro de roleta: o método de seleção por giro de roleta funciona calculando-se o somatório da adequação da população (total), sorteia-se um valor  $i$  tal que pertença ao intervalo  $[0; \text{total}]$  seleciona-se o indivíduo  $x$  tal que a ele corresponda o intervalo do somatório onde  $i$  se localiza (DAVIS, 1991);
- c) Seleção por torneio: Grupos de soluções são escolhidos sucessivamente e as mais adaptadas dentro de cada um destes são selecionadas (GOLDBERG, 1989; WALL, 2000; GEYER-SCHULTZ, 1997);
- d) Seleção uniforme: todos os indivíduos possuem a mesma probabilidade de serem selecionados (WALL, 2000). Obviamente, essa forma de seleção possui uma probabilidade muito remota de causar uma melhora da população sobre a qual atua.

#### 3.2.4.4 Reprodução (Crossover)

Assim como na Biologia, o crossover, ou recombinação, é um artifício em AG's. Nessa etapa, existem cruzamentos de indivíduos melhores com piores, melhores com melhores, piores com piores, parentes, e replicação. Os mais conhecidos operadores tradicionais de cruzamento para genomas de comprimento fixo são (GOLDBERG, 1989): cruzamento de um ponto (1PX), cruzamento multiponto (MPX), cruzamento Segmentado (SX), cruzamento uniforme (UX), cruzamento por combinação parcial (PMX).

Fazendo uso dos operadores acima citados e tomando a ideia de similaridade com o que ocorre na divisão celular, um operador que escolha um ponto de corte do cromossomo aleatoriamente e faça a recombinação é o mais adequado. Um operador assim representaria os operadores 1PX e SX.

Não há definição quanto à taxa de crossover. A maioria da literatura usa taxas entre 60% e 90% de probabilidade de ocorrer. A exemplo, tem-se De Jong (1975), que indica a utilização de probabilidades entre 60% e 80%, e Malaquias (2006)

mostra que taxas de crossover maiores geram resultados melhores. Todavia, pelo princípio analógico dos AG's com a Biologia, não faz sentido o uso de taxas de 0% ou de 100%.

#### 3.2.4.5 Reprodução (Mutaç o)

A muta o ataca os indiv duos resultantes da reprodu o, com uma probabilidade definida. Isso d  alguma garantia quanto   variabilidade do processo.   importante notar que, se todos os indiv duos da popula o tiverem o mesmo gene no respectivo loco cromoss mico, mesmo que esses passem pelo crossover, n o haver  altera o fenot pica causada pelo gene do respectivo loco. A muta o, por natureza, pode atacar o gene desse loco, mudando-o, causando a variabilidade desejada.

A muta o n o   regra, mas   uma ferramenta de garantia, salutar para o processo. Tem-se os seguintes operadores de muta o:

- a) Muta o *flip*: cada gene a ser mutado recebe um valor sorteado do alfabeto v lido;
- b) Muta o por troca *swap*: s o sorteados  $n$  pares de genes, e os elementos do par trocam de valor entre si;
- c) Muta o *creep*: um valor aleat rio   somado ou subtra do do valor do gene.

Assim como para o crossover, n o se tem definida uma taxa de ocorr ncia de muta o na literatura. A exemplo, De Jong (1975) indica a utiliza o da taxa de muta o igual ao inverso do tamanho da popula o. Mas Teodoro, dos Santos e Prado (2012) utiliza uma taxa 0,5% para uma popula o de 100 indiv duos. O que p de ser conclu do com a revis o bibliogr fica   que a taxa de muta o deve ser pequena, em torno de 1%.

#### 3.2.4.6 Atualiza o e Finaliza o

Na etapa de Atualiza o, os indiv duos decorrentes do processo de cruzamento e muta o s o inseridos na popula o, de acordo com a pol tica adotada pelo AG. Na forma mais tradicional deste (algoritmo gen tico simples), a

população mantém um tamanho fixo e os indivíduos são criados em mesmo número que seus antecessores e os substituem por completo.

Na finalização, ocorre o critério de parada, definindo se processo chegou a seu fim, ou se deve voltar para a etapa de avaliação, para passar por mais uma iteração, produzindo mais uma geração.

O capítulo seguinte torna clara a escolha de algumas características do AGimplementado neste trabalho, como a codificação binária do cromossomo, por se tratar de uma otimização numérica; ou a escolha do critério de parada ser o número de iterações, decorrente da exigência do próprio processo de otimização.

## 4 MATERIAIS E MÉTODO

### 4.1 NAFNoise

Para a predição do ruído gerado por efeito de autoruído nos perfis de aerofólio estudados, foi utilizado o programa NAFNoise (MORIARTY; MIGLIORE, 2003), produzido pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), disponibilidade gratuita no site do NREL. O algoritmo numérico usado pelo NAFNoise é baseado nos modelos semiempíricos alcançados por Brooks, Pope e Marcolini (1989), modelo BPM.

Como já visto, o modelo BPM não descreve o ruído de fonte de influxo turbulento. Para isso, o NAFNoise utiliza o modelo semiempírico de Amiet (1975). A validação do NAFNoise foi feita por Moriarty (2005).

Para os dados de entrada dos modelos de predição de ruído supracitados, o NAFNoise utiliza o código do XFOIL, que fornece a espessura da camada limite, o desvio da camada limite.

O código do XFOIL usado no NAFNoise tem as seguintes características: número de Mach = 0,1892; número de Reynolds = 1005720; 200 painéis, com densidade variando de 0,15 a 0,2; e trabalha com 50 iterações. Essas são características imutáveis do código. O XFOIL fornece ainda o coeficiente de sustentação, coeficiente de arraste; espessura máxima e curvatura máxima do perfil.

As entradas do NAFNoise que podem ser alteradas pelo usuário são a velocidade do som, viscosidade cinemática, densidade do ar, os modelos de predição de ruído a escolher (pois são apresentados outros modelos também), comprimento da corda, largura da seção do aerofólio, velocidade livre, ângulo de ataque, espessura e ângulo sólido do bordo de fuga, intensidade da turbulência, comprimento de turbulência, número de linhas e distância entre as linhas, distância do observador,  $\theta_e$  e  $\Phi_e$ .

O NAFNoise fornece como saída, os níveis de pressão sonora de 1/3-oitava, 8 colunas: a primeira apresenta as frequências audíveis (20Hz a 20kHz); as três seguintes, SPL de camada turbulenta; a quinta, SPL de camada laminar; a sexta, SPL da rigidez do bordo de fuga; a sétima, SPL do influxo e a oitava a soma das

contribuições de todas as fontes. É importante ressaltar que a saída gerada pelo NAFNoise não caracteriza uma composição de frequências, mas, tão somente, a contribuição de cada fonte de ruído quando todas elas estão à mesma frequência (MORIARTY, 2005).

O objetivo da otimização aqui tratada então é achar a conformação de perfil que gera o menor máximo de ruído produzido, pois não se sabe a que frequência o ruído pode ser emitido. Só é definido o intervalo de frequência que ele possa ser emitido, que é a faixa do audível. Como esclarecimento, a população do AG implementado é composta por máximos, sendo que cada um representa o maior nível de ruído, em uma determinada frequência, no intervalo do audível.

Os perfis utilizados nesse trabalho foram o s809, s822, s834, FX 63-137, SD 2030 e SG 6043. Com exceção do s809, os perfis listados foram considerados como viáveis para uso em aerogeradores de pequena escala por Migliore e Oerlemans (2003) e revisto por Göçmen e Ozerdem (2012).

#### **4.2 Formulação e Implementação do Algoritmo Genético**

Como visto acima, e como foi feito, o NAFNoise foi tratado como uma “caixa preta” e foi a função objetivo, de forma que apenas se forneciam as coordenadas dos perfis e o programa fornecia os SPL's.

No pacote do NAFNoise, as coordenadas do perfil s809 são dadas a título de exemplo. Então todos os testes de formulação e implementação feitos foram com o s809. Posteriormente, com as diretrizes já definidas, aplicou-se o modelo aos demais perfis.

Notadamente, e assim foi feito, entra-se com as “novas” coordenadas no NAFNoise, então ele dá o resultado de SPL. Apesar da versatilidade e da maleabilidade do algoritmo genético, não se tinha um domínio definido. Só o que se tinha era o ponto específico de cada coordenada. Para gerar o domínio da função objetivo (que foi o próprio NAFNoise), partiu-se do entendimento de Lee *et al.* (2013), de não alterar a espessura máxima do perfil mais do que 10%, para não alterar o desempenho do perfil. Partindo dessa ideia, o domínio da função objetivo foi definido como sendo o intervalo de variação de até 10% (5% para mais ou para

menos) da ordenada dos pontos do perfil original (considerando que cada ponto seja uma variável da função objetivo).

Dessa forma, a matriz DNA era composta por  $m$  linhas e  $n$  colunas, sendo  $m$  o número de coordenadas, e  $n$  o produto do tamanho do gene pelo tamanho da população. Assim, cada cromossomo representa uma alteração percentual na ordenada de cada ponto. A exemplo da matriz população a seguir, se o tamanho do cromossomo for igual a 2, então, ter-se-á um perfil de 8 coordenadas e o tamanho da população será igual a 5.

$$\begin{bmatrix}
 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\
 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\
 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\
 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0
 \end{bmatrix}
 \tag{68}$$

Nesse ponto, é importante perceber a lacuna deixada pela literatura. Notar que o Algoritmo Genético foi deduzido de uma analogia com a biologia. Conservando isso, a literatura chama de gene um espaço ocupado pelo valor binário 0 ou 1 (nesse caso, pois foi usado o modo binário), que, de fato, é a menor unidade de informação no AG, bem como o é o gene na Biologia. Um conjunto de genes corresponde a um cromossomo. A literatura chama de cromossomo um indivíduo da população. A situação apresentada e abordada exige um conceito mais amplo de indivíduo de uma população de um AG. Como um indivíduo representa um ponto/solução da função, não é sustentável, para o caso presente, a ideia de que um

cromossomo, que é um conjunto de genes, represente um ponto/solução da função, pois um ponto/ solução da função objetivo será um conjunto de coordenadas, e um cromossomo altera apenas uma coordenada. Sabendo disso, chamamos de célula, que é um conjunto de cromossomos, o indivíduo da população do AG aplicado nessa situação. Então, uma célula (indivíduo) é uma matriz de  $m$  linhas e  $k$  colunas, sendo  $m$  como acima citado, e  $k$  o tamanho do cromossomo. Dessa forma, a matriz população será uma composição de matrizes célula, ou matrizes indivíduo. Tomando o exemplo da matriz supracitada, tem-se que a população é composta por cincélulas (ou cinco indivíduos).

Dessa forma, gera-se uma população de ordenadas alteradas equivalente à usada do AG. Então o AG produz a aptidão de cada célula no NAFNoise através do programa Matlab.

Na tomada das células mais aptas, foi utilizado o método da roleta. Não houve problemas, pois só se pegavam os valores máximos de ruído total (coluna 8 da saída do NAFNoise), e, em todos os testes, não houve valores negativos e os resultados eram bastante próximos.

Foi utilizada uma correção de probabilidade para tomar as células mais aptas. Como se tomavam os menores valores máximos de ruído, eles geravam as menores probabilidades. Sendo assim, foram utilizados os complementares de suas probabilidades. Logo, a célula mais apta é aquela que tem menor valor máximo, ou menor probabilidade, ou maior complementar. Por óbvio que a soma dos complementares é diferente de 1. Então, foi multiplicado pela soma dos complementares o valor sorteado pelo ponteiro (de 0 a 1), mantendo, assim, os pesos estatísticos e a aleatoriedade.

Quanto ao crossover, para cada cromossomo, sorteou-se um número inteiro entre 1 e o tamanho do cromossomo, para definir o ponto de corte, com 90% de chance de ocorrer crossover. Por simplicidade, escolheu-se o cruzamento de um ponto.

Para mutação, cada gene passou por um processo estocástico de ocorrência de mutação, dada a probabilidade de ocorrência dessa de 1%.

Depois de gerada a população de filhos, deu-se 1% de chance de alteração para cada gene.

Por fim, fez-se uso do elitismo, para conservar a melhor solução. Mas apenas há a conservação da melhor solução.

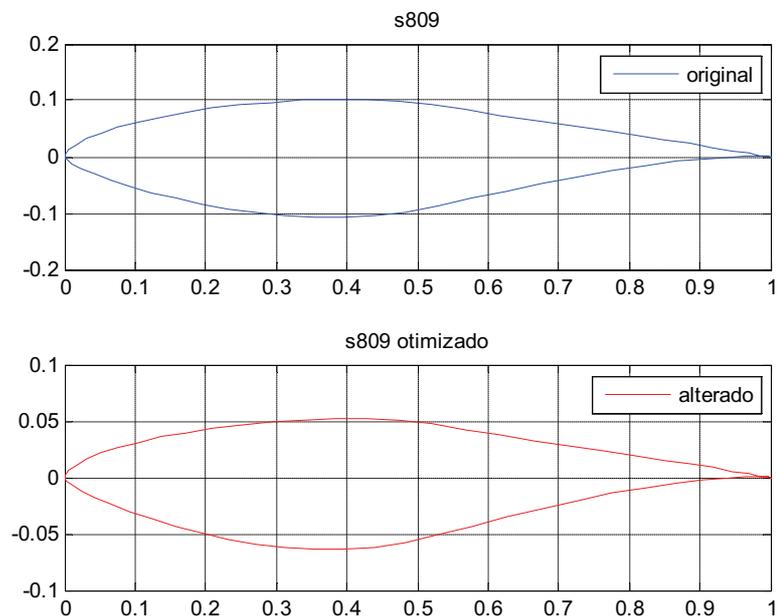
Em suma, foram tomadas populações de 50 indivíduos (células), cromossomo com 25 genes, 25 iterações, taxa de crossover de 90%, taxa de mutação de 1% e variação de 10% (5% para mais ou para menos). Parâmetros que se mostraram ser razoáveis, dado o observado em diversos testes feitos.

## 5 VALIDAÇÃO

Para a validação, foram usadas diversas funções, mas sempre nos limites do domínio em que os resultados são positivos, por causa do método da roleta. Por exemplo, a função  $f(x, y) = \sqrt{x^2 + y^2} + 10$ , para as mesmas condições citadas na metodologia, obteve-se  $f(x, y) = 10,0089$ , para  $x = 0,0041$  e  $y = 0,0079$ , como situação ótima (menor valor de  $f(x, y)$ ). O algoritmo da validação está no APÊNDICE A.

Ainda quanto à validação, segundo Kim *et al.* (2010), o resultado de que o achatamento gera menor ruído é imediato, que foi exatamente o encontrado em um dos testes para o perfil s809. Usando apenas duas variações de 50%, uma para a superfície superior e outra para a inferior, o melhor resultado obtido, visto na Figura 12, foi para a forma mais achatada possível, como na Figura 11, validando a técnica qualitativamente.

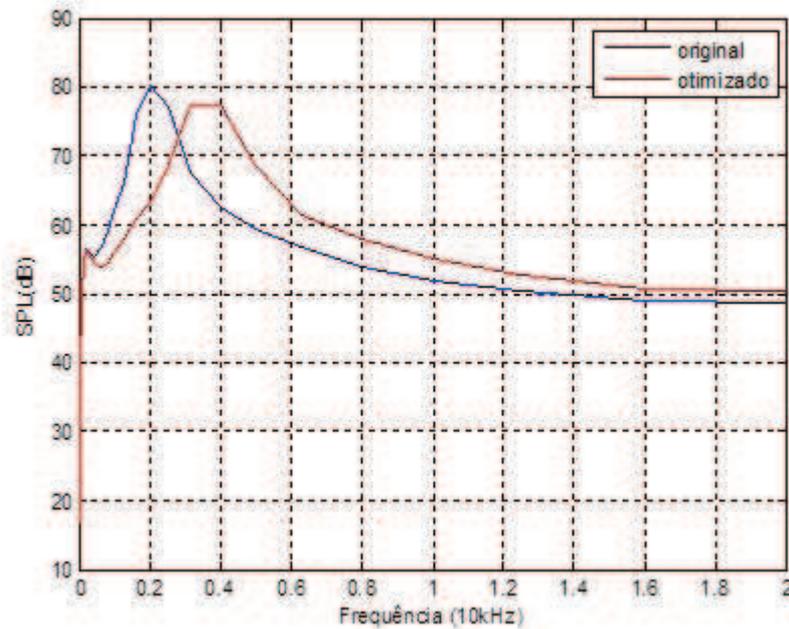
Figura 11 – Geometrias do perfil s809 original e otimizado para duas variações.



Fonte: Autor.

Depois de achar o perfil ótimo, dentro das especificações, quanto ao ruído, foram lançados no XFOIL, através do Matlab, para comparar as características de desempenho entre o perfil original e o otimizado.

Figura 12 – Gráfico de ruído do perfil s809 original e otimizado para duas variações.



Fonte: Autor.

Considera-se o que foi feito nesse aspecto da validação como variação uniforme, ou seja, todos os pontos variam com o mesmo percentual, tem-se uma confirmação do trabalho de Kim et al. (2010). Ou seja, a otimização mais prática da forma do aerofólio é reduzir a espessura máxima da “baseline” do aerofólio.

Na figura 11, tem-se que a espessura máxima reduziu cerca de 50%. É notória a redução do pico de nível de ruído na otimização, através do gráfico da figura 12, o que permite maior aproximação do indivíduo ao aerogerador com segurança.

Como resultado do XFOIL, tem-se que a relação  $C_l/C_d$  do original é de 54,07, enquanto que, para o otimizado, a relação de  $C_l/C_d = 41,63$ , ambos a  $3^\circ$ , sendo o pico de ruído 77,31 dB a 4kHz.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a definição do Algoritmo Genético, este foi aplicado na otimização dos perfis s809, s822, s834, FX 63-137, SD 2030 e SG 6043, a fim de reduzir o ruído emitido. Os últimos 5 perfis têm distinção do s809, pois também foram otimizados por Göçmen e Özerdem (2012). Dessa forma, é possível fazer uma comparação da técnica. Nos gráficos de desempenho, o domínio de variação do ângulo de ataque vai de  $0^\circ$  a  $15^\circ$ , que é basicamente o intervalo usado pelos últimos autores citados.

De maneira geral, os valores de ruído encontrados diferem dos valores encontrados no trabalho de Göçmen e Özerdem (2012) por cerca de 10dB. Mas o padrão, na maioria dos resultados, é o mesmo. A diferença entre os valores do trabalho dos últimos autores citados e os encontrados neste trabalho pode ser explicada pela maneira de utilização do NAFNoise. Uma diferença de valores como essa ocorre de acordo com a escolha do código utilizado para fornecer os dados de entrada do modelo de predição de ruído. Usando apenas o modelo BPM, mesmo para encontrar os parâmetros de camada limite, pois o NAFNoise dá essa alternativa, os resultados são menores, da ordem de 10dB, do que os resultados, usando o XFOIL, para o mesmo fim. Essa suposição é sustentada pelo fato de que, nos primeiros testes deste trabalho, o NAFNoise foi utilizado dessa forma, e os valores coincidiam com os valores de Göçmen e Özerdem (2012). Todavia, não foi possível dar prosseguimento nessa linha, porque o NAFNoise não demonstrou viabilidade, pois os resultados não mudavam.

## **6.1 Resultados de Desempenho**

Como já foi dito, nos gráficos de desempenho, o domínio de variação do ângulo de ataque vai de  $0^\circ$  a  $15^\circ$ , que é basicamente o intervalo usado por Göçmen e Özerdem (2012), possibilitando, então, comparações.

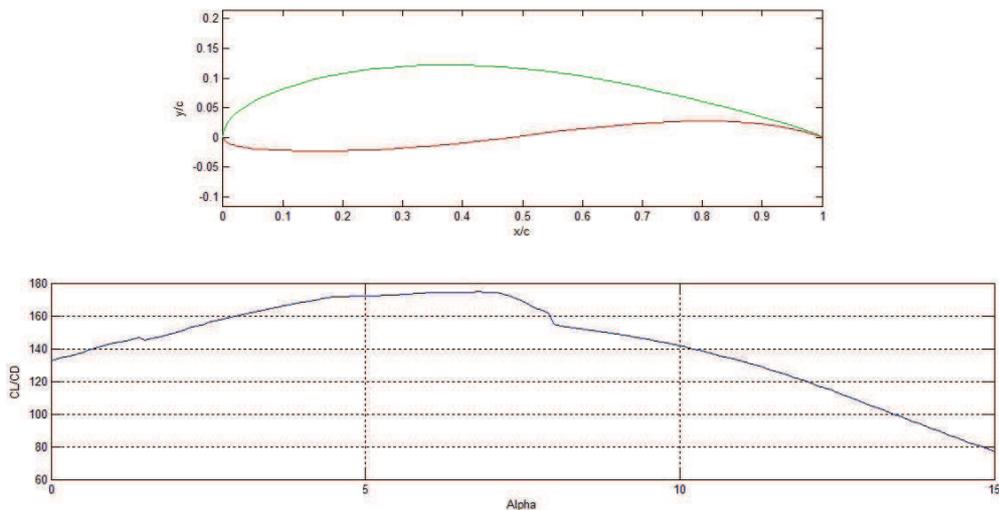
Como é possível ver nas figuras de geometria, a conformação ótima do perfil mostra um enrugamento, principalmente, na superfície de sucção.

Um resultado importante também foi o fato de que todos os perfis otimizados mostraram redução na razão  $C_l/C_d$ . É uma redução do desempenho, mas não implica na redução da sustentação propriamente. Entende-se que o enrugamento apresentado tem muito mais efeito sobre o arraste, pois aumenta a superfície de contato, do que sobre a sustentação.

Pelo aspecto do desempenho, os perfis otimizados podem não ser atraentes para efetiva produção. Contudo, Lima (2015) ressalta a disposição de nações europeias a sacrifícios financeiros, estimulando instalações *offshore*, mais caras, em detrimento das instalações *onshore*, a fim de permitir a utilização de aerogeradores respeitando a saúde das populações correspondentes. Dessa forma, uma leve alteração no desempenho não pode ser critério definitivo para o descarte desses perfis otimizados.

O perfil FX 63-137 original apresentou  $Cl/Cd$  máximo igual a 174,74 a  $6,8^\circ$ , enquanto que o perfil FX 63-137 otimizado apresentou  $Cl/Cd$  máximo igual a 166,28 a  $7,3^\circ$ , apresentados nas Figuras 13 e 14.

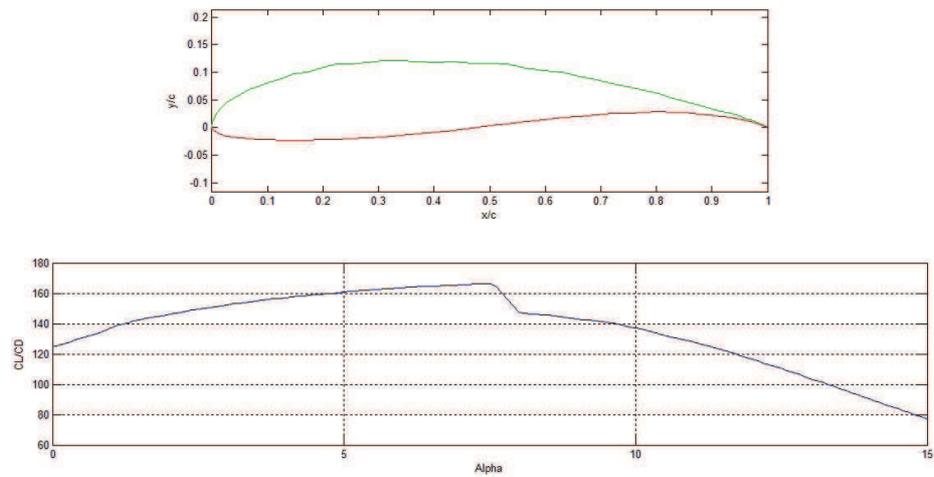
Figura 13 – Geometria e gráfico de desempenho do perfil FX 63-137 original.



Fonte: Autor.

Importante dizer que, para o caso do perfil FX 63-137, a variação de espessura teve de ser 6%, porque o XFOIL não gerava resultados para variações acima de 6%, para esse perfil. Todos os outros perfis tiveram variação de 10%.

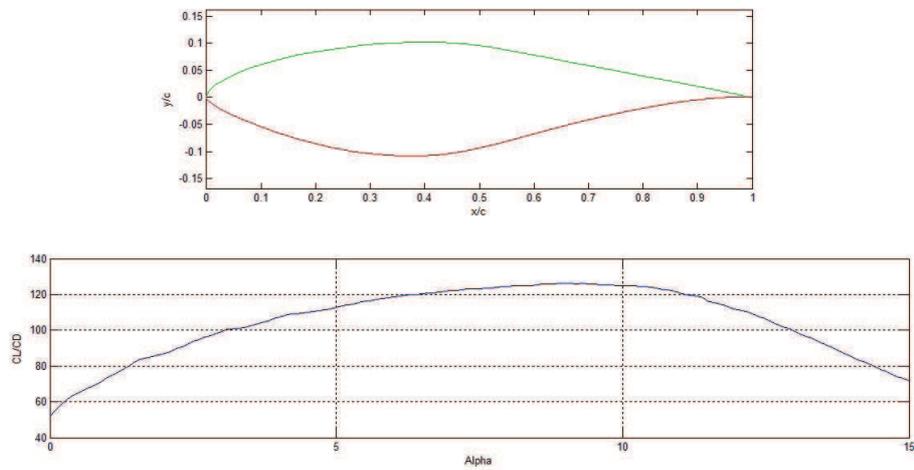
Figura 14 – Geometria e gráfico de desempenho do perfil FX 63-137 otimizado.



Fonte: Autor.

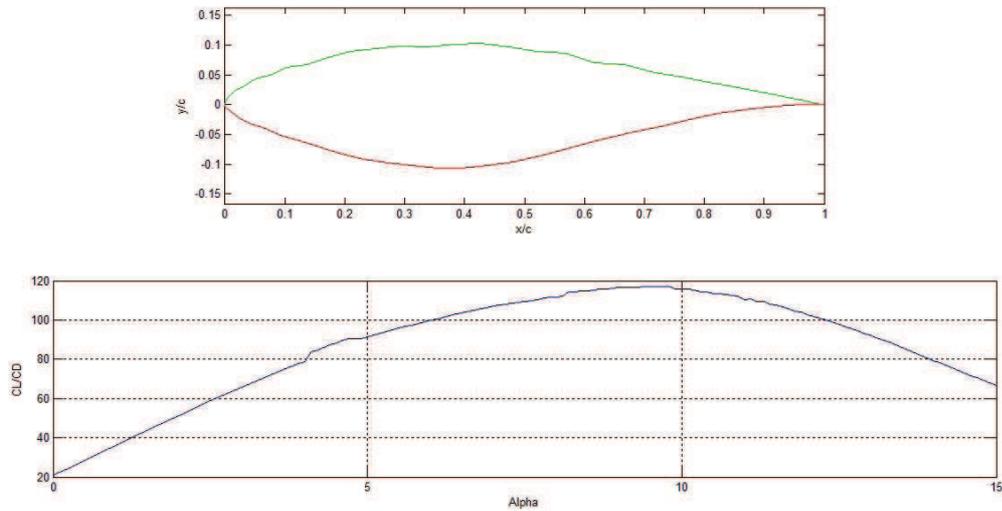
O perfil s809 original apresentou  $Cl/Cd$  máximo igual a 126,20 a  $9^\circ$ , enquanto que o perfil s809 otimizado apresentou  $Cl/Cd$  máximo igual a 117,00 a  $9,7^\circ$ , apresentados nas Figuras 15 e 16.

Figura 15 – Geometria e gráfico de desempenho do perfil s809 original.



Fonte: Autor.

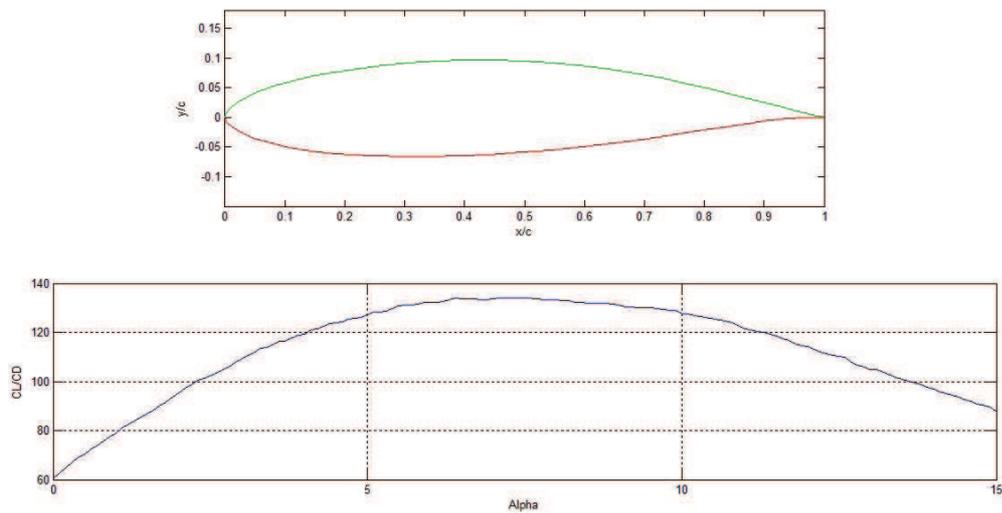
Figura 16 – Geometria e gráfico de desempenho do perfil s809 otimizado.



Fonte: Autor.

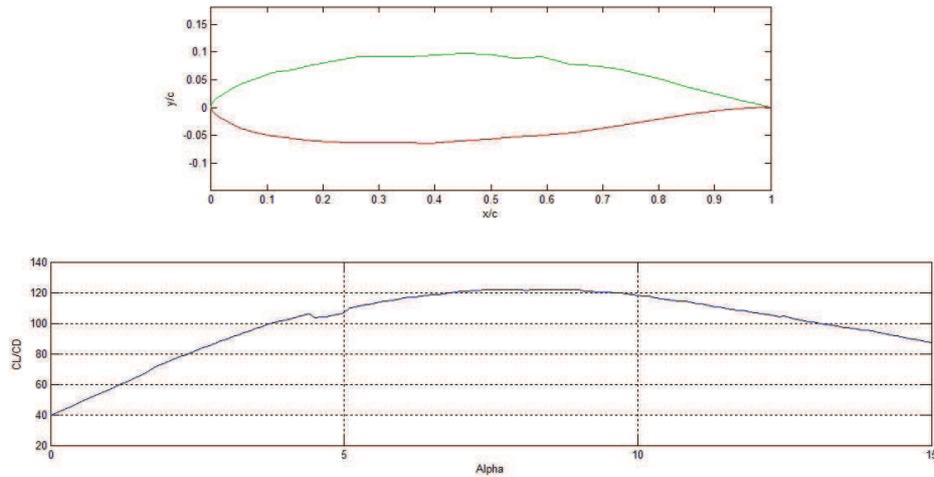
O perfil s822 original apresentou  $Cl/Cd$  máximo igual a 134,19 a  $7,4^\circ$ , enquanto que o perfil s822 otimizado apresentou  $Cl/Cd$  máximo igual a 122,07 a  $8,7^\circ$ , apresentados nas Figuras 17 e 18.

Figura 17 – Geometria e gráfico de desempenho do perfil s822 original.



Fonte: Autor.

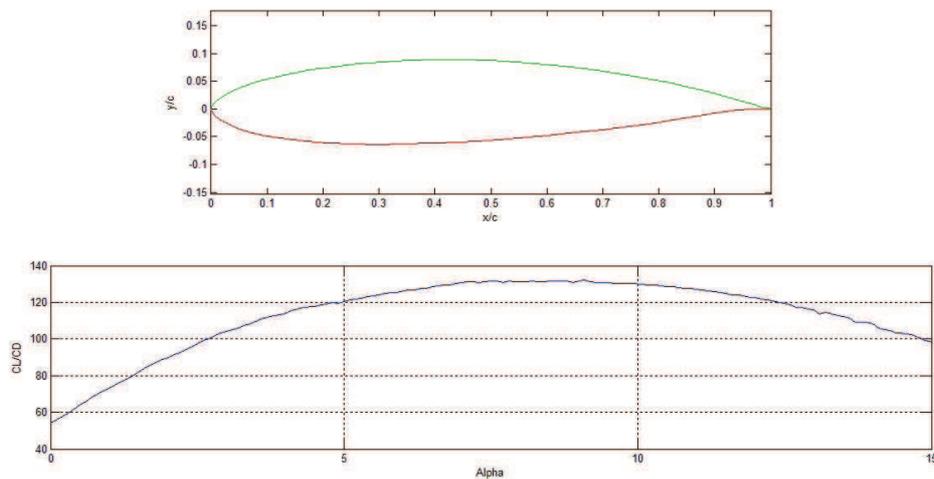
Figura 18 – Geometria e gráfico de desempenho do perfil s822 otimizado.



Fonte: Autor.

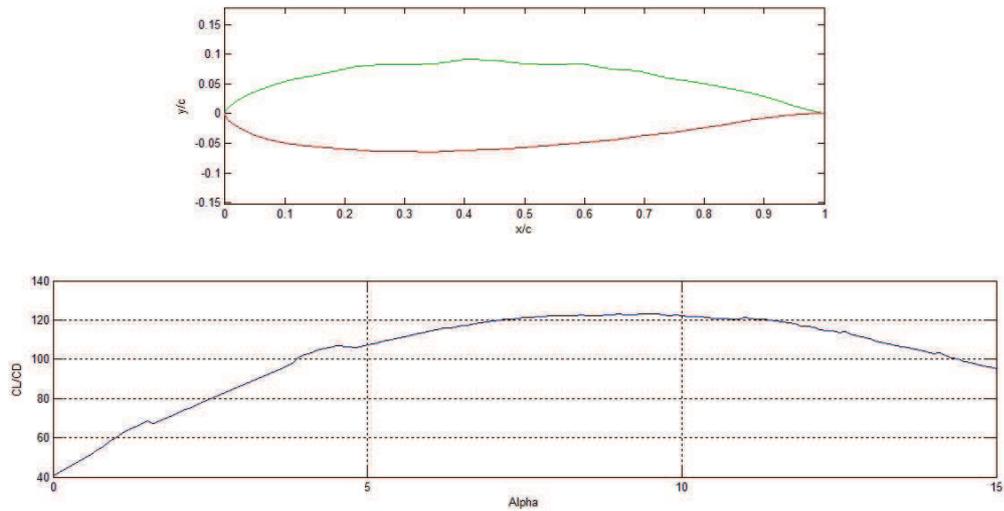
O perfil s834 original apresentou  $Cl/Cd$  máximo igual a 132,01 a  $9,1^\circ$ , enquanto que o perfil s834 otimizado apresentou  $Cl/Cd$  máximo igual a 123,07 a  $9,5^\circ$ , apresentados nas Figuras 19 e 20.

Figura 19 – Geometria e gráfico de desempenho do perfil s834 original.



Fonte: Autor.

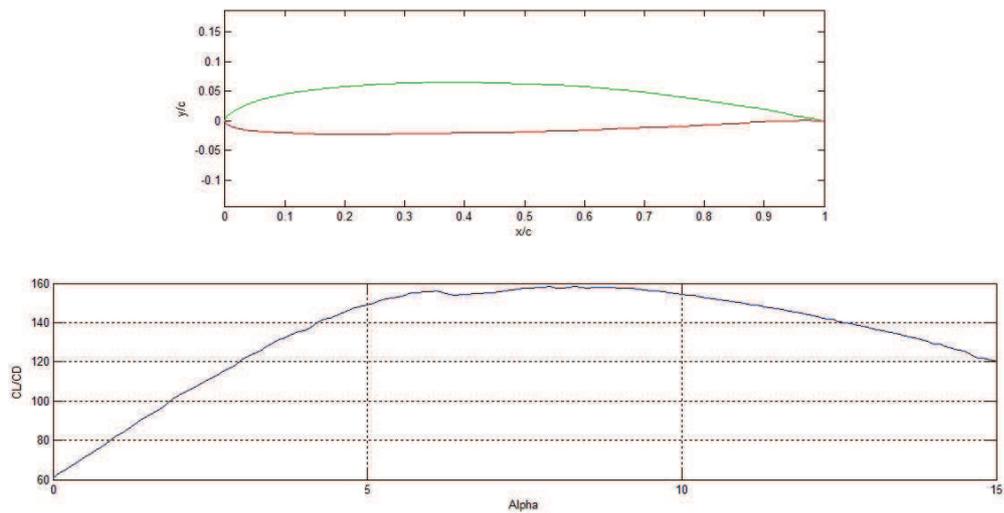
Figura 20 – Geometria e gráfico de desempenho do perfil s834 otimizado.



Fonte: Autor.

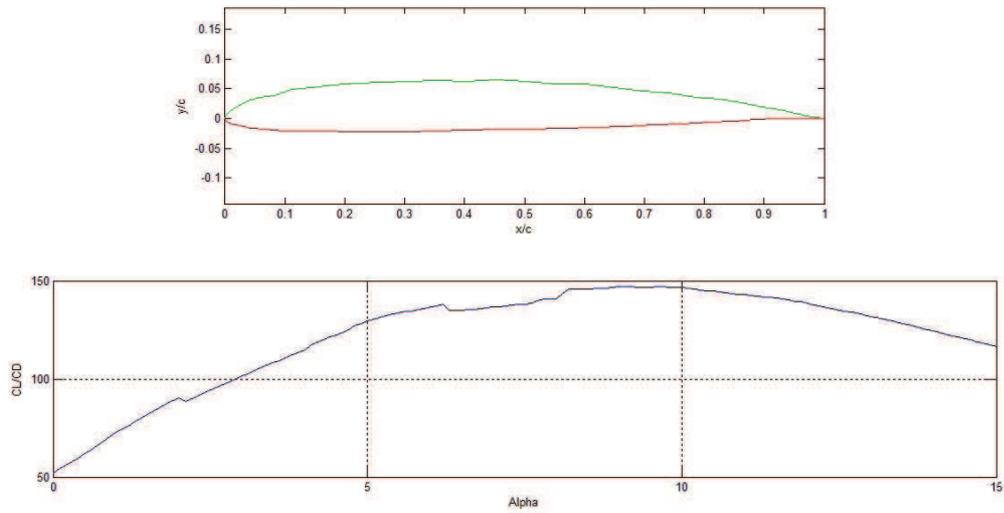
O perfil SD 2030 original apresentou  $Cl/Cd$  máximo igual a 158,28 a  $8,3^\circ$ , enquanto que o perfil SD 2030otimizado apresentou  $Cl/Cd$  máximo igual a 147,16 a  $9,7^\circ$ , apresentados nas Figuras 21 e 22.

Figura 21 – Geometria e gráfico de desempenho do perfil SD 2030 original.



Fonte: Autor.

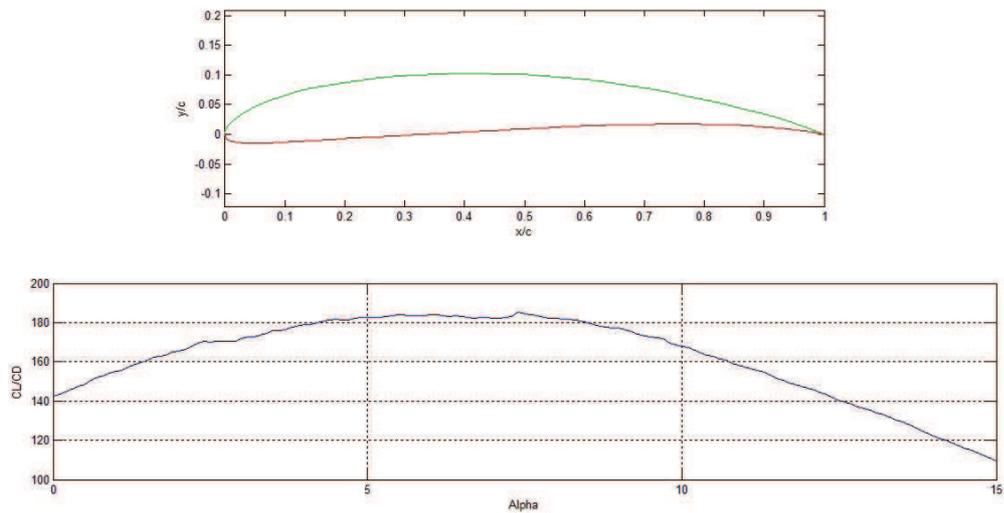
Figura 22 – Geometria e gráfico de desempenho do perfil SD 2030 otimizado.



Fonte: Autor.

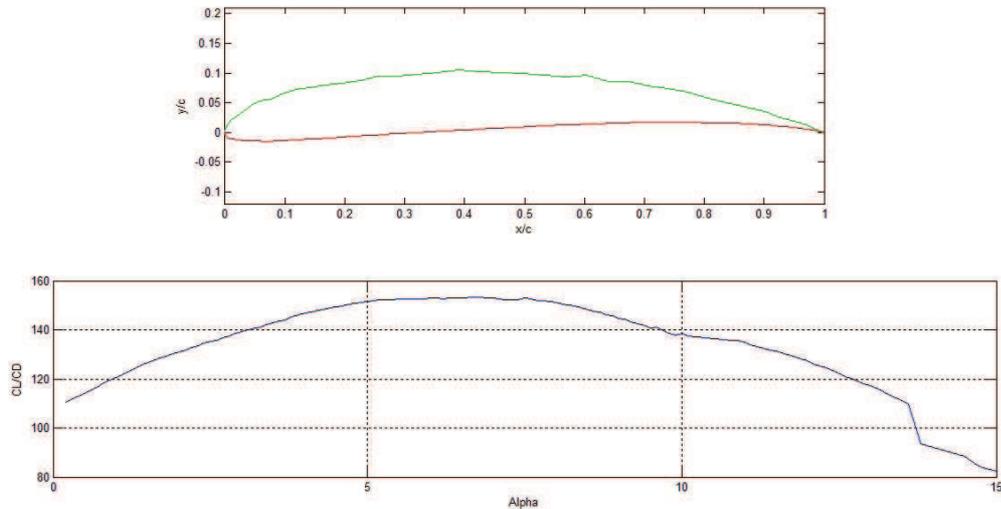
O perfil SG 6043 original apresentou  $Cl/Cd$  máximo igual a 185,17 a  $7,4^\circ$ , enquanto que o perfil SG 6043 otimizado apresentou  $Cl/Cd$  máximo igual a 153,37 a  $6,7^\circ$ , apresentados nas Figuras 23 e 24.

Figura 23 – Geometria e gráfico de desempenho do perfil SG 6043 original.



Fonte: Autor.

Figura 24 – Geometria e gráfico de desempenho do perfil SG 6043 otimizado.



Fonte: Autor.

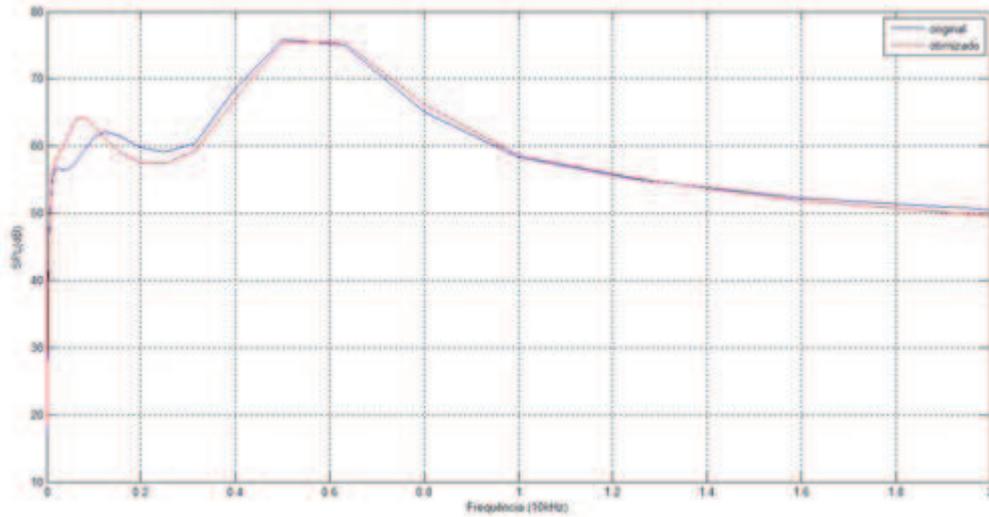
## 6.2 Resultados de Ruído

Como visto na metodologia, o valor máximo de pressão sonora gerada, dentre as frequências do audível, foi o parâmetro a ser reduzido com a otimização. Uma vez que não é possível saber a que frequência o aerogerador está emitindo o ruído, e a norma 10151 da ABNT (2000) deve ser respeitada.

Como visto nos resultados de ruído, a redução dos picos de nível de pressão sonora é bastante pequena, cerca de 1dB, exceto para o perfil FX 63-137, que foi cerca de 0,5dB. Baseado no trabalho de Rogers, Manwell e Wright (2006), cujo modelo de predição de ruído se assemelha ao utilizado nesse trabalho, os resultados de Coutinho (2012) mostram que, para aerogeradores específicos, a distância mínima entre comunidades populacionais em relação a esses aerogeradores é cerca de 300m. A essa distância, pelo decaimento logarítmico, a variação de 1dB implica em uma alternativa de dezenas de metros.

O perfil FX 63-137 original apresentou pico de SPL igual a 75,81 dB a 5kHz, enquanto que o perfil FX 63-137 otimizado apresentou pico de SPL igual a 75,39dB a 5kHz, apresentados na Figura 25.

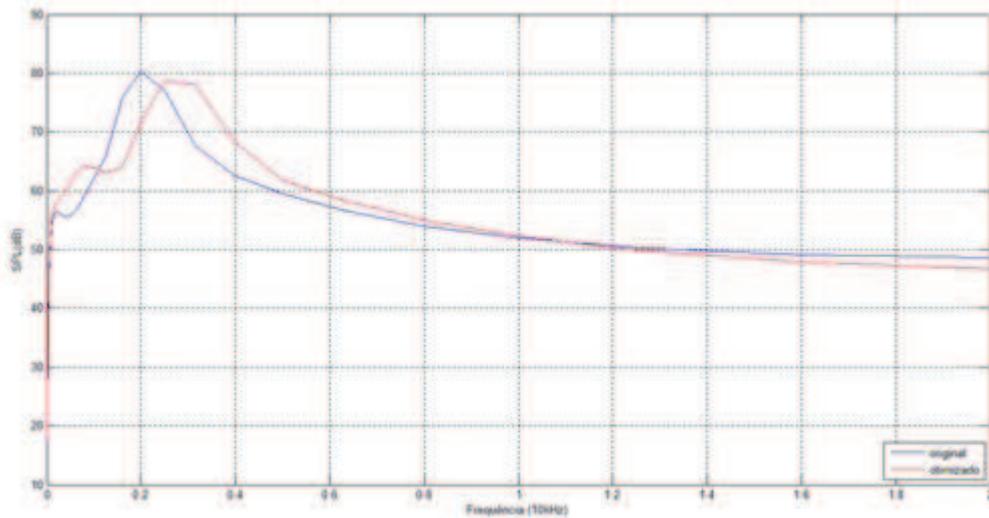
Figura 25 – Gráficos de ruído do perfil FX 63-137 original e otimizado.



Fonte: Autor.

O perfil s809 original apresentou pico de SPL igual a 80,32 dB a 2kHz, enquanto que o perfil s809 otimizado apresentou pico de SPL igual a 78,81 dB a 2,5kHz, apresentados na Figura 26.

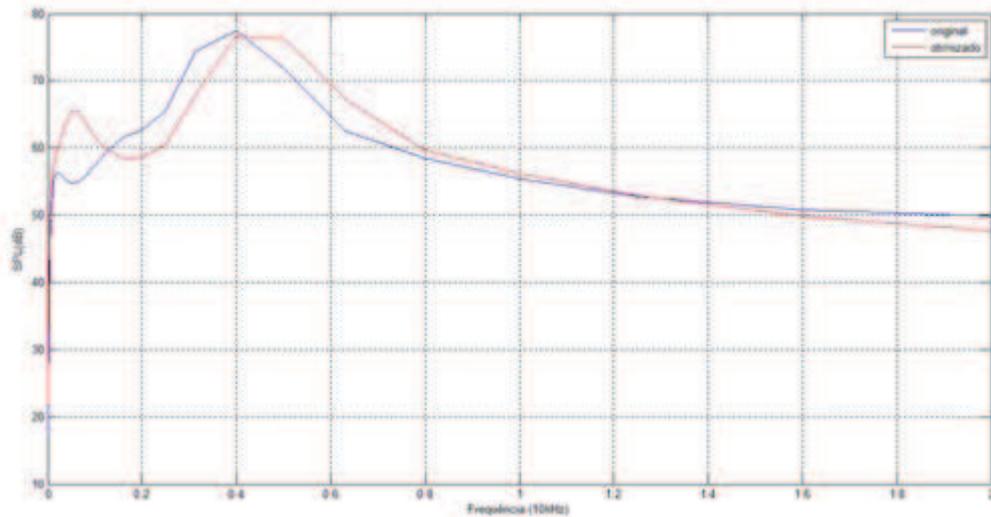
Figura 26 – Gráficos de ruído do perfil s809 original e otimizado.



Fonte: Autor.

O perfil s822 original apresentou pico de SPL igual a 77,48 dB a 4kHz, enquanto que o perfil s822 otimizado apresentou pico de SPL igual a 76,59 dB a 4kHz, apresentados na Figura 27.

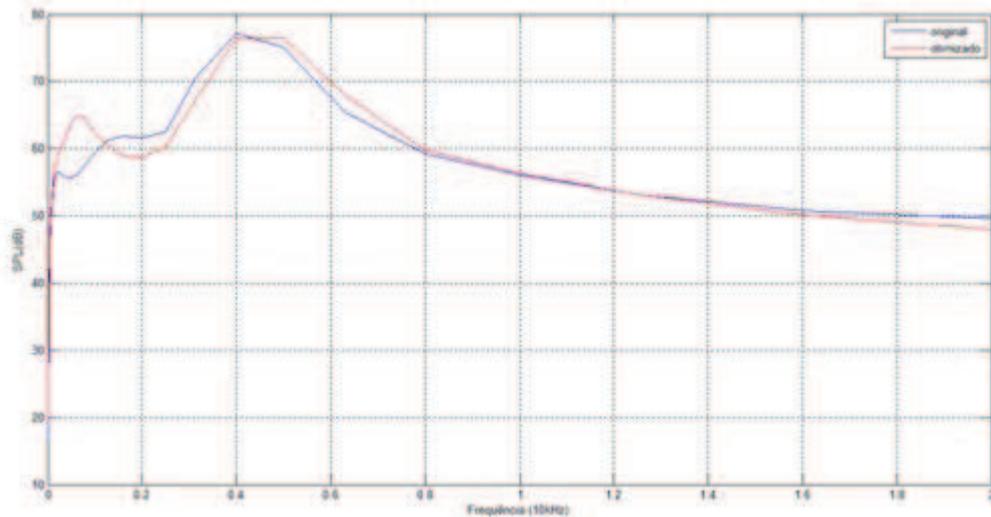
Figura 27 – Gráficos de ruído do perfil s822 original e otimizado.



Fonte: Autor.

O perfil s834 original apresentou pico de SPL igual a 77,10 dB a 4kHz, enquanto que o perfil s834 otimizado apresentou pico de SPL igual a 76,44 dB a 5kHz, apresentados na Figura 28.

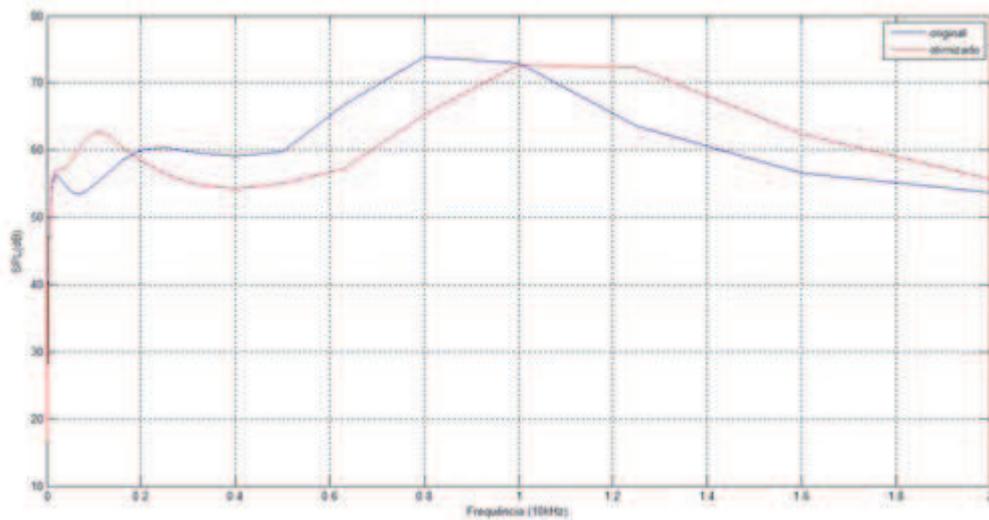
Figura 28 – Gráficos de ruído do perfil s834 original e otimizado.



Fonte: Autor.

O perfil SD 2030 original apresentou pico de SPL igual a 73,92 dB a 8kHz, enquanto que o perfil SD 2030 otimizado apresentou pico de SPL igual a 72,73 dB a 10kHz, apresentados na Figura 29.

Figura 29 – Gráficos de ruído do perfil SD 2030 original e otimizado.

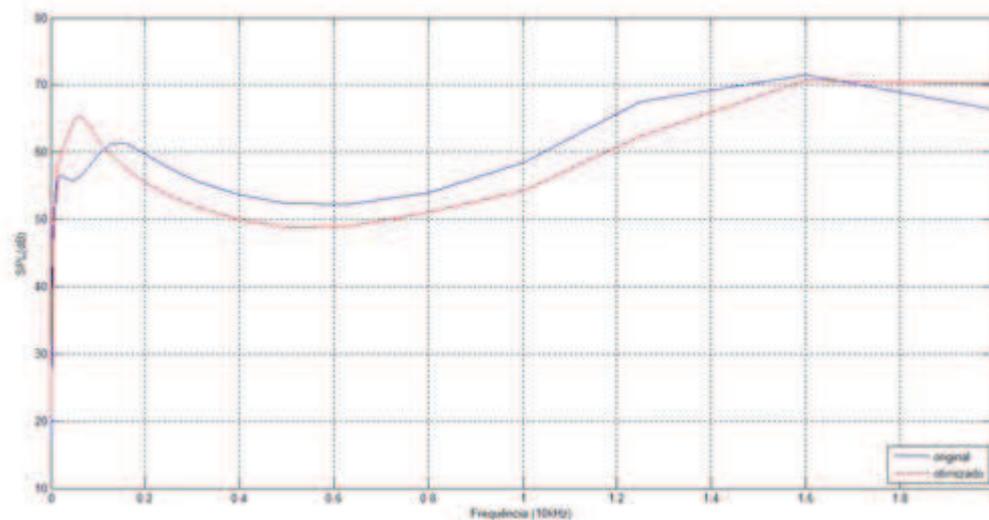


Fonte: Autor.

O perfil SG 6043 original apresentou pico de SPL igual a 71,43 dB a 16kHz, enquanto que o perfil SG 6043 otimizado apresentou pico de SPL igual a 70,75 dB a 16kHz, apresentados na Figura 30.

Importante notar que os perfis SD 2030 e SG 6043 geraram resultados discrepantes dos de Göçmen e Özerdem (2012), mas não entre o original e o otimizado, o que mantém a legitimidade e segurança da técnica.

Figura 30 – Gráficos de ruído do perfil SG 6043 original e otimizado.



Fonte: Autor.

### 6.3 Considerações

A justificativa para se trabalhar com a variação de espessura de 10% é que foi a maior variação possível encontrada, dada a viabilidade fornecida pelo XFOIL, para o perfil s809.

O XFOIL foi o principal limitador das possibilidades da técnica empregada na otimização. Todos os testes foram observados a cada passo. Frequentemente o XFOIL não apresentava qualquer resultado, o que fazia todo o processo de otimização parar. Isso ocorria principalmente para variações de mais de 10% do s809 (perfil utilizado nos testes). Por esse motivo, estabeleceu-se uma variação inicial de 10% para todos os perfis, e utilizou-se como critério de parada a quantidade de iterações do AG.

Outro fator limitador foi a quantidade de iterações do XFOIL. Este (embutido no NAFNoise) funciona até 50 iterações. Se não houver convergência até a quinquagésima iteração, o XFOIL fornece ao modelo de predição de ruído os resultados da última iteração. Então, mesmo que o AG completasse suas iterações, os resultados seriam incorretos. E não havia como selecionar as soluções confiáveis por meio do próprio AG, porque o problema se encontrava na comunicação entre o XFOIL e o modelo BPM. A maneira encontrada para se retirar as soluções confiáveis foi mesmo visual, testando, no NAFNoise, as melhores soluções encontradas pelo AG. Aquela que convergiu até a quinquagésima iteração do XFOIL e que apresentou menor pico de ruído foi tomada como solução ótima.

Ainda nas limitações da técnica, outro fator foi bastante chamativo, que foi o fato do processo de otimização ser muito demorado. Otimizações mais robustas, ou seja, com definições como tamanho da população, tamanho do cromossomo e quantidade de iterações maiores, levavam dias para serem realizadas. E aumentavam o risco de o XFOIL não apresentar resultado, causando a parada e a inutilização de todo aquele processo de otimização. Demora essa causada pelo funcionamento do XFOIL.

Apesar dos parâmetros do AG, quais sejam tamanho da população, tamanho do cromossomo, quantidade de iterações e variação, assumirem valores relativamente pequenos, não houve prejuízo da otimização em si. Tendo em vista a

assunção inicial da ideia de conservar o desempenho do aerofólio na medida do possível (LEE, 2013).

Os resultados mostrados indicam confiabilidade da técnica empregada, pois, tendo em vista as pequenas variações de geometria sofrida pelos perfis, os gráficos de ruído e desempenho, resultante da otimização, se comportam como nos perfis originais, exceto no caso do perfil SD 2030, que o gráfico sofre um deslocamento, mas, ainda assim, o comportamento é como o do original, como se verifica na Figura 26.

Todos os perfis otimizados apresentaram mudanças de  $Cl/Cd$  não suaves para algum ângulo de ataque, diferentemente dos perfis originais. Esse fato caracteriza a maior suscetibilidade dos perfis otimizados à turbulência, ou mesmo ao estol, dentro do intervalo de zero a quinze graus para o ângulo de ataque, o que torna importante saber em quais ângulos de ataque o perfil mostra resultados desempenho bem comportados.

O ruído está intimamente relacionado com a turbulência. O fato de todos os perfis apresentarem uma conformação enrugada indica, de certa forma, uma redução da turbulência. Entende-se que, de alguma forma, a camada limite é succionada nas regiões de depressão ao longo do enrugamento, diminuindo, nem que por instante, a intensidade da turbulência, pontualmente. Essa situação deve ocorrer para ângulos de ataque que geram resultados de desempenho bem comportados, quando não, ocorre estol, em algum nível, gerando ruído

As dificuldades apresentadas indicam onde se deve trabalhar para aprimoramento do processo. Por exemplo, a manipulação efetiva de métodos numéricos, a fim de encontrar os dados de entrada para o modelo de predição de ruído, ou mesmo selecionar previamente as soluções confiáveis e reduzir o tempo de geração dos dados de entrada do BPM, deve conferir maior viabilidade e estabilidade para todo o procedimento.

## **7 CONCLUSÃO**

Esse trabalho expôs, de maneira geral, um vislumbre de como está a situação da energia eólica no Brasil, especialmente, no Ceará. Mostrou, assim, a perspectiva por expansão da exploração dessa fonte de energia. Contudo, foram vistas algumas das limitações da implantação e funcionamento de parques eólicos em relação à acomodação desses em regiões próximas a populações.

Uma das limitações expostas foi quanto ao ruído produzido pelos aerogeradores. Ruído esse que é potencial causador de danos a saúde do ser humano. Foi visto que esse tipo de ruído tem duas fontes de naturezas distintas: mecânica e aerodinâmica.

O ruído de origem aerodinâmica, objeto deste trabalho, tem ainda cinco principais fontes: ruído de camada limite turbulenta no bordo de fuga, ruído de separação-estol, ruído de camada limite laminar com esteira de vórtice, ruído de rigidez de bordo de fuga com esteira de vórtice e ruído de influxo turbulento.

O objetivo desse trabalho foi otimizar os perfis s809, s822, s834, FX 63-137, SD 2030 e SG 6043, alterando sua geometria, a fim de encontrar a conformação que cause a menor emissão de ruído possível, sem grandes reduções em seus desempenhos aerodinâmicos. Para isso, foram usadas técnicas de Algoritmo Genético e o programa NAFNoise, produzido pelo NREL, que, em seu código, aborda as cinco fontes de ruído supracitadas e utiliza o código do XFOIL, para a geração dos dados de entrada do modelo de predição de ruído BPM.

O resultado mostrou reduções de SPL em torno de 1dB, para cinco dos perfis otimizados, enquanto que, para o perfil FX 63-137, a variação foi cerca de 0.5dB. Consequência desse resultado é a forma enrugada encontrada em todos os perfis otimizados e a redução de aproximadamente 10 unidades na razão  $Cl/Cd$ .

### **7.1 Observações para Trabalhos Futuros**

A otimização foi feita com sucesso, apesar das limitações do processo. Todavia as principais limitações foram bem definidas, a fim de dar indicativos substanciais para trabalhos futuros. Os resultados deste trabalho indicam que a manipulação direta de códigos que visem auferir os dados de entrada dos modelos

de predição de ruído deve conferir maior viabilidade ao processo de otimização trabalhado.

## REFERÊNCIAS

ABNT, NBR 10151. 2000.

ALBERTS, D. J. **Primer for addressing wind turbine noise**. Revised Oct, 2006.

AMIET, R. K. **Acoustic radiation from an airfoil in a turbulent stream**. Journal of Sound Vibration: 41 (4), 407-20. 1975.

BROOKS, T. F.; POPE, D.S.; MARCOLINI, M.A. **Airfoil self-noise and prediction**. NASA, 1989.

DARWIN, C. **On the origin of species**. Disponível via <http://www.hn.psu.edu/faculty/jmanis/darwin.htm>. Acessado em: 9 Jan. 2002.

DAVIS, L. D. **Handbook of genetic algorithms**. [S.l.]: Van Nostrand Reinhold, 1991.

DE JONG, K. A. **Analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems**. Tese de Doutorado, Department of Computer and Communication Science, University of Michigan, 1975.

DEWI Magazin. **Atlas do potencial eólico brasileiro**. Agosto, 2001.

DRELA, M.; YOUNGREN, H. **Xfoil 6.94 user guide**. 10 dez. 2001.

EVEREST, F.; POHLMANN, K. **Master handbook of acoustics**. McGraw-Hill Education, 2009. ISBN 9780071603331. Disponível em [:<https://books.google.com.br/books?id=6tiJlcwnwxC>](https://books.google.com.br/books?id=6tiJlcwnwxC).

FASOLD, W.; VERES, E. **Schallschutz+raumakustik in der praxis**. Berlin: Verlag Bauwesen, 2003.

FIORINI, A. C. Ruído, Comunicação e Outras Alterações. **Saúde ocupacional e segurança**. São Paulo, volume único, n.jan/dez, pp. 49-58, 1991.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à mecânica dos fluidos**. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

GEYER-SCHULTZ, A. **Fuzzy rule-based expert systems and genetic machine learning**. Heidelberg: Physica-Verlag, 1997.

GOÇMEN, T.; ÖZERDEM, B. **Airfoil optimization for noise emission problem and aerodynamic performance criterion on small scales wind turbines**. Energy: 46, 62-71. 2012.

GOLDBERG, D. E. **Genetic algorithms in search, optimization & machine learning**. [S.l.]: Addison-Wesley, 1989.

- HOLLAND, J. **Adaptation in natural and artificial systems**. Ann Arbor: Univ. of Michigan Press, 1975.
- IEC. **Electroacoustics – sound level meters part 1: specifications**. 2002.
- KIM, H.; LEE, S.; SON, E.; *et al.* **Aerodynamic noise analysis of large horizontal axis wind turbines considering fluid-structure interaction**. Renewable Energy, 2012.
- LATHI, B. P. **Sinais e sistemas lineares**. 2ed. Porto Alegre: Bookman, 2007.
- LAWSON, M. V. **Assessment and prediction model for wind turbine noise: basic aerodynamic and acoustic models**. Flow Solution Report 93/06 pp. 1-46, 1993.
- LEE, S.; LEE, S.; RYI, J.; *et al.* **Design optimization of wind turbine blades for reduction of airfoil self-noise**. Journal of Mechanical Science and Tecnology 27, 413-420, 2013.
- LELOUDAS, G.; ZHU, W. J.; SORENSEN, J. N.; *et al.* **Prediction and reduction of noise for a 2,3mw wind turbine, the science of making torque from wind**. Journal of Physics: Conference Series, 2007.
- LIMA, S. A. **Caracterização, medição e análise do ruído de aerogeradores de grande porte**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, 2015.
- LINDEN, R. **Algoritmos genéticos: uma importante ferramenta da inteligência computacional**. 2ª Edição. Brasport: Rio de Janeiro, 2008.
- MAIA, D. S. N. **Ruído de parques eólicos: análise e caracterização**. Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, 2010.
- MALAQUIAS, N. G. S. **Uso dos algoritmos genéticos para a otimização de rotas de distribuição**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 2006.
- MIGLIORE, P.; OERLEMANS, S. **Wind tunnel aeroacoustic tests of six airfoil for use on small wind turbines**. National Renewable Energy Laoratory, 2003.
- MORIARTY, P. **Nafnoise user's guide**. Golden Colorado, 2005.
- MORIARTY, P.; MIGLIORE, P. **Semi-empirical aeroacoustic noise prediction code for wind turbines**. National Renewable Energy Laboratory: 2003.
- NR 15. Norma Regulamentadora N°15. 06 de Jul. 1978.
- PINHATA, G. M.; **Estudo do número de strouhal em função do número de reynolds em um anteparo triangular utilizando a técnica da análise tempo-frequência**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2006.

ROGERS, A.L.; MANWELL, J.F.; WRIGHT, M.S.S. **Wind turbine acoustic noise**. Renewable Energy Research Laboratory, Department of Mechanical and Industrial Engineering University of Massachusetts at Amherst, Amherst, 2006.

SOARES JÚNIOR, A. **X-gat: Uma ferramenta baseada em xml para otimização com algoritmos genéticos**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, 2011.

TEODORO, A. R. B.; DOS SANTOS, D. P. S.; PRADO, A. F. B. A. **Implementação de algoritmo genético para otimização de manobras orbitais, utilizando transferência de lambert**. IV Seminário de Tecnologia e Gestão, STG, 2012.

WAGNER, S.; BAREISS, R.; GUIDATI, G. **Wind turbine noise**. Alemanha: Springer Verlag, 1996.

WALL, M. **Galib: a c++ library of genetic algorithm components**. Massachusetts, EUA: [s.n.], 2000. Manual disponível em: <WWW em <http://lancet.mit.edu/ga/>>. Acessado em: 11 Ago. 2015.

ZHU, W. J. **Modelling of noise from wind turbine**. Dissertação de Mestrado, Technical University of Denmark, 2004.

## APÊNDICE A – CÓDIGO DE FORMULAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO

### EXEMPLO11

```

clear;

airfoil = fopen('C:\Users\██████████\Documents\MATLAB\s809.dat','r');

[matriz, contador] = fscanf(airfoil,'%s');
fclose(airfoil);
matriz;

[m,n]=size(matriz);

for i=5:n
matriznormalizada(1,i-4) = matriz(1,i);
end
matriz = matriznormalizada;
[m,n] = size(matriz);
%este for identifica os blocos negativos
j=1;

i=1;
j=1;
k=0;
z=8;
while (i<=n)

if (matriz(1,i)~='-')
    z=8;

matrizauxiliar(j,1:9)=[matriz(1,i:(i+z-1)) '0'];

else
    z=9;
matriz(1,i:(i+z-1));
matrizauxiliar(j,1:9)=matriz(1,i:(i+z-1));

end

matrizauxiliar;
j=j+1;

```

```

        i=i+z;
    end
    i;

matrizauxiliar;

[m,n] = size(matrizauxiliar);
m;
n;
j=1;
for i=1:m
    if (mod(i,2)==1)
        airfoildata(j,1) = str2num(matrizauxiliar(i,:));
    end
    if (mod(i,2)==0)
        airfoildata(j,2) = str2num(matrizauxiliar(i,:));
        j=j+1;
    end
end

airfoildata;
[m,n] = size(airfoildata);

for i=1:m
    if (airfoildata(i,2)>=0)
        positivo(i,1) = airfoildata(i,2);
        negativo(i,1) = 0;
    else
        positivo(i,1) =0;
        negativo(i,1) =airfoildata(i,2);
    end
end
positivo;
negativo;

```

## **AG**

```

clear;
exemplo11
populacao = [];

%usaremos uma variação de 5% em cada ponto

%chamaremos as linhas da matriz cromossomo de gene,
%que é cada estado de alteração dos pontos

tamanho populacao = 50;
tamanho gene = 25;
iteracoes = 25;
taxa de crossover = 90/100;
taxa de mutacao = 1/100;
variacao = 10;

```

```

%este for cria a matriz da população e a matriz dos valores decimais
%correspondentes a cada gene. A cada 25 colunas da matriz população
%temos um cromossomo.
for i=1:tamanhodapopulacao
cromossomo = randi(2,m,tamanhodogene)-1;
populacao= [populacao cromossomo];
decimais(:,i) = bi2de(cromossomo);
end
populacao;
decimais;

[linhapopulacao,colunapopulacao] = size(populacao);

[linhadecimais, colunadecimais] = size(decimais);

for r=1:iteracoes

vetormax=[];

%Este for gera a matriz de alteração
for i=1:linhadecimais
for j=1:colunadecimais
matrizalteracao(i,j) = 1+(-variacao/2+(variacao/2-(-
variacao/2))*decimais(i,j)/((2^tamanhodogene)-1))/100;
end
end
matrizalteracao;
[linhaalteracao, colunaalteracao] = size(matrizalteracao);

pontosaurfoil = airfoildata;

%gera as possiveis alterações para a populacao dada
for i=1:linhaalteracao

pontosaurfoilalterados(i,:) = pontosaurfoil(i,2)*matrizalteracao(i,:);
end

pontosaurfoilalterados;
[linhapontosaurfoilalterados, colunapontosaurfoilalterados] =
size(pontosaurfoilalterados);

%escreve cada aerofolio modificado em s809.dat
for i=1:colunapontosaurfoilalterados
pontosaurfoil(:,2) = pontosaurfoilalterados(:,i);

fid = fopen('s809.dat','wt');
a='s809';
fprintf(fid, '%s\n', a);
for j=1:m
fprintf(fid, '%f', pontosaurfoil(j,1));
fprintf(fid, '%s', ' ');
fprintf(fid, '%f\n', pontosaurfoil(j,2));
end

```

```

fclose('all');
system('nafnoise.exe');

arquivo = fopen('nafnoise.out','r');
c = fscanf(arquivo, '%c');
fclose('all');
c;
[p,q] = size(c);
k=0;
l=1;
%níveis para diversas frequencias
for l=1:34
matrizresultado(l,1) = str2num(c(l,(726+k):(731+k)));

    k=l*122;

end
matrizresultado;
size(matrizresultado);

%valor máximo de ruído por cromossomo
vetormax(l,i) = max(matrizresultado)

end

vetormax;

[linhavetormax, colunavetormax] = size(vetormax);
soma = sum(vetormax);

%geração da aptidão

for i=1:colunavetormax

probabilidadecromossomo(:,i) = [1-vetormax(l,i)/soma; i];

end
somaprobabilidade = sum(probabilidadecromossomo(l,:));
probabilidadecromossomo;

%elitismo
primeiro = [1000; 1000];
for i=1:colunavetormax

if (vetormax(l,i)<=primeiro(1,1))
primeiro = [vetormax(l,i); i];
end
end
segundo = [1000; 1000];
for j=1:colunavetormax
if (j~=primeiro(2,1))

if (vetormax(l,j)<=segundo(1,1))

```

```

segundo = [vetormax(1,j); j];

end
end
end

primeiro;
segundo;

%sorteio roleta
%escolha dos pais
pais = [];

for l=1:tamanhodapopulacao

for i=1:2
escolhaantes=0;
roleta = rand*somaprobabilidade;
for j=1:colunavetormax

escolhadepois = escolhaantes + probabilidadecromossomo(1,j);

if (roleta>escolhaantes& roleta<=escolhadepois)
probabilidadeindice(:,i) = probabilidadecromossomo(:,j);

end

escolhaantes = escolhadepois;

end

end

if (probabilidadeindice(1,1) >= probabilidadeindice(1,2))
indice(1,1) = probabilidadeindice(2,1);
else
indice(1,1) = probabilidadeindice(2,2);
end

pais = [pais populacao(:, ((indice(1,1)-1)*tamanhodogene +
1):indice(1,1)*tamanhodogene)];
end
probabilidadeindice;
indice;

[linhapais, colunapais] = size(pais)

%crossover

for j=1:2:tamanhodapopulacao
for i=1:linhapais

```

```

cordeauxiliar=[];
crossover = rand;

if (crossover<=taxadecrossover)
pontodecorte = randi(tamanhodogene);
cordeauxiliar = pais(i, (j-1)*tamanhodogene+1:(j-
1)*tamanhodogene+pontodecorte);
pais(i, (j-1)*tamanhodogene+1:(j-1)*tamanhodogene+pontodecorte)=
pais(i, (j)*tamanhodogene+1:(j)*tamanhodogene+pontodecorte);
pais(i, (j)*tamanhodogene+1:(j)*tamanhodogene+pontodecorte) = cordeauxiliar;

end
end
end
filhos=pais;
%mutação

for i=1:linhapais
for j=1:colunapais
mutacao = rand;
if (mutacao<=taxademutacao)
if (filhos(i,j)==0)
filhos(i,j)=1;
else
filhos(i,j)=0;
end
end
end
end

filhos(:,1:tamanhodogene) = populacao(:,(primeiro(2,1)-
1)*tamanhodogene+1:primeiro(2,1)*tamanhodogene);

[linhafilhos, colunafilhos] = size(filhos);
novodecimais = [];
for i=1:colunadecimais
novodecimais(:,i) = bi2de(filhos(:,((i-
1)*tamanhodogene+1):i*tamanhodogene));
end

decimais = novodecimais;

populacao = filhos ;

size(populacao);

vetormaximos(r,:) = vetormax;

r
end

vetormaximos

```

## **OUTROEXEMPLO**

```

%escreve o perfil que se queira
bora = fopen('s809.dat','wt');
    a='s809';
fprintf(bora, '%s\n', a);
for j=1:m
fprintf(bora, '%f', airfoildata(j,1));
fprintf(bora, '%s', ' ');
fprintf(bora, '%f\n', pontosairfoilalterados(j,40));
end
fclose('all');
airfoildata;

break

%define as últimas soluções e põe em ordem crescente

for i=1:linhadecimais
for j=1:colunadecimais
matrizalteracao(i,j) = 1+(-variacao/2+(variacao/2-(-
variacao/2))*decimais(i,j)/((2^tamanhodogene)-1))/100;
end
end

pontosairfoil = airfoildata;

for i=1:linhaalteracao

pontosairfoilalterados(i,:) = pontosairfoil(i,2)*matrizalteracao(i,:);
end

for i=1:colunapontosairfoilalterados
pontosairfoil(:,2) = pontosairfoilalterados(:,i);

fid = fopen('s809.dat','wt');
    a='s809';
fprintf(fid, '%s\n', a);
for j=1:m
fprintf(fid, '%f', pontosairfoil(j,1));
fprintf(fid, '%s', ' ');
fprintf(fid, '%f\n', pontosairfoil(j,2));
end

fclose('all');
system('nafnoise.exe');

arquivo = fopen('nafnoise.out','r');
    c = fscanf(arquivo, '%c');
fclose('all');
c;

```

```

    [p,q] = size(c);
    k=0;
    l=1;
    %níveis para diversas frequencias
    for l=1:34
    matrizresultado(l,1) = str2num(c(l,(726+k):(731+k)));

        k=l*122;

    end
    matrizresultado;
    size(matrizresultado);

    %valor máximo de ruído por cromossomo
    vetormax(l,i) = max(matrizresultado)

    end
    vetormax
    melhores = sort(vetormax)

    break

```

## **SHAPE**

```

s809=[1.000000    0.000000
0.996203    0.000487
0.985190    0.002373
0.967844    0.005960
0.945073    0.011024
0.917488    0.017033
0.885293    0.023458
0.848455    0.030280
0.807470    0.037766
0.763042    0.045974
0.715952    0.054872
0.667064    0.064353
0.617331    0.074214
0.567830    0.084095
0.519832    0.093268
0.474243    0.099392
0.428461    0.101760
0.382612    0.101840
0.337260    0.100070
0.292970    0.096703
0.250247    0.091908
0.209576    0.085851
0.171409    0.078687
0.136174    0.070580
0.104263    0.061697
0.076035    0.052224
0.051823    0.042352
0.031910    0.032299
0.016590    0.022290
0.006026    0.012615

```

```
0.000658    0.003723
0.000204    0.001942
0.000000    -0.000020
0.000213    -0.001794
0.001045    -0.003477
0.001208    -0.003724
0.002398    -0.005266
0.009313    -0.011499
0.023230    -0.020399
0.042320    -0.030269
0.065877    -0.040821
0.093426    -0.051923
0.124111    -0.063082
0.157653    -0.073730
0.193738    -0.083567
0.231914    -0.092442
0.271438    -0.099905
0.311968    -0.105281
0.353370    -0.108181
0.395329    -0.108011
0.438273    -0.104552
0.481920    -0.097347
0.527928    -0.086571
0.576211    -0.073979
0.626092    -0.060644
0.676744    -0.047441
0.727211    -0.035100
0.776432    -0.024204
0.823285    -0.015163
0.866630    -0.008204
0.905365    -0.003363
0.938474    -0.000487
0.965086    0.000743
0.984478    0.000775
0.996141    0.000290
1.000000    0.000000];
```

```
s809otimizado=airfoildata;
```

```
x = s809(:,1);
y = s809(:,2);
subplot(2,1,1), plot(x,y);
title('s809');
legend('original');
gridon
holdon
t=s809otimizado(:,1);
k=s809otimizado(:,2);
subplot(2,1,2), plot(t,k,'r');
title('s809 otimizado');
legend('alterado');
gridon;
```

**NIVEISSONOROS**

frequencia = [10.000

12.500						
16.000						
20.000						
25.000						
31.500						
40.000						
50.000						
63.000						
80.000						
100.000						
125.000						
160.000						
200.000						
250.000						
315.000						
400.000						
500.000						
630.000						
800.000						
1000.000						
1250.000						
1600.000						
2000.000						
2500.000						
3150.000						
4000.000						
5000.000						
6300.000						
8000.000						
10000.000						
12500.000						
16000.000						
20000.000];						
niveissonoross809=[	10.000		-40.886		-14.020	-100.000
-19.180		-7.193	16.865		16.887	
	12.500		-32.520		-7.326	-100.000
-5.616		21.240		21.256		
	16.000		-23.938		-0.504	-100.000
-3.872		25.964		25.979		
	20.000		-16.759		5.166	-100.000
-2.296		30.110		30.127		
	25.000		-10.104		10.389	-100.000
-0.719		34.117		34.138		
	31.500		-3.736		15.355	-100.000
0.914		38.093		38.118		
	40.000		2.314		20.044	-100.000
2.601		41.975		42.004		
	50.000		7.505		24.043	-100.000
4.178		45.337		45.371		
	63.000		12.440		27.825	-100.000
5.811		48.479		48.518		
	80.000		17.099		31.379	-100.000
7.498		51.269		51.316		
	100.000		21.071		34.400	-79.164
9.075		53.364		53.424		
	125.000		24.704		37.158	-51.599
						24.477

10.651	54.896	54.977				
	160.000	28.358	39.935	-26.239		28.744
12.395	55.896	56.021				
	200.000	31.359	42.224	-7.478		32.601
13.972	56.188	56.391				
	250.000	34.098	44.329	7.785		36.458
15.548	55.950	56.311				
	315.000	36.689	46.344	20.376		40.453
17.181	55.219	55.928				
	400.000	39.131	48.279	30.462		44.582
18.869	54.020	55.535				
	500.000	41.224	49.978	37.667		48.439
20.445	52.546	55.661				
	630.000	43.228	51.655	43.352		52.434
22.078	50.687	56.826				
	800.000	45.153	53.329	47.841		56.563
23.766	48.417	59.200				
	1000.000	46.845	54.871	51.230		60.420
25.342	45.959	62.120				
	1250.000	48.461	56.412	54.295		65.050
26.919	43.136	66.017				
	1600.000	50.189	57.601	57.092		75.601
28.663	39.519	75.742				
	2000.000	51.730	57.542	57.135		80.275
30.239	35.715	80.325				
	2500.000	53.271	56.400	54.737		76.889
31.816	31.291	76.972				
	3150.000	54.347	54.804	51.576		67.011
33.448	25.905	67.593				
	4000.000	54.241	53.153	47.986		60.941
35.136	19.269	62.505				
	5000.000	53.030	51.586	43.870		57.084
36.713	11.843	59.469				
	6300.000	51.434	49.906	38.349		53.089
38.332	2.586	56.573				
	8000.000	49.782	48.079	30.785		48.960
39.974	-9.087	53.966				
	10000.000	48.212	46.263	21.541		45.103
41.509	-22.419	51.909				
	12500.000	46.586	44.314	9.744		41.246
43.043	-38.695	50.255				
	16000.000	44.693	41.973	-6.812		36.979
44.740	-61.020	49.030				
20000.000	42.867	39.661		-25.426		33.122
46.274	-86.117	48.637];				

niveissonoross809otimizado = [	10.000			-52.815		10.734	-
100.000	-25.477	-10.773		16.865		17.819	
	12.500	-43.756	15.784	-100.000		-21.620	
-9.198	21.240	22.332					
	16.000	-34.440	20.893	-100.000		-17.353	
-7.455	25.964	27.142					
	20.000	-26.629	25.108	-100.000		-13.496	
-5.880	30.110	31.304					
	25.000	-19.371	28.965	-100.000		-9.639	
-4.305	34.117	35.275					
	31.500	-12.409	32.612	-100.000		-5.644	
-2.674	38.093	39.176					
	40.000	-5.778	36.037	-94.453		-1.515	
-0.987	41.975	42.961					

	50.000	-0.075	38.949	-64.046	2.342
0.588	45.337	46.235			
	63.000	5.359	41.699	-37.486	6.337
2.220	48.479	49.307			
	80.000	10.501	44.287	-14.795	10.466
3.906	51.269	52.062			
	100.000	14.895	46.499	2.497	14.323
5.481	53.364	54.178			
	125.000	18.920	48.538	16.470	18.180
7.056	54.896	55.802			
	160.000	22.973	50.622	28.592	22.447
8.799	55.896	57.035			
	200.000	26.304	52.380	37.012	26.304
10.374	56.188	57.742			
	250.000	29.345	54.044	43.480	30.161
11.950	55.950	58.270			
	315.000	32.217	55.695	48.588	34.156
13.581	55.219	58.922			
	400.000	34.917	57.356	52.682	38.285
15.267	54.020	59.964			
	500.000	37.220	58.897	55.887	42.142
16.843	52.546	61.351			
	630.000	39.410	60.455	59.033	46.137
18.474	50.687	63.176			
	800.000	41.496	61.103	60.764	50.266
20.161	48.417	64.268			
	1000.000	43.307	60.621	59.888	54.123
21.736	45.959	63.887			
	1250.000	45.013	59.179	56.912	57.980
23.311	43.136	63.009			
	1600.000	46.807	57.474	53.456	62.247
25.054	39.519	64.006			
	2000.000	48.373	55.926	49.838	71.429
26.629	35.715	71.601			
	2500.000	49.915	54.340	45.294	78.792
28.204	31.291	78.815			
	3150.000	51.511	52.630	39.143	78.067
29.836	25.905	78.089			
	4000.000	52.721	50.761	30.726	67.981
31.522	19.269	68.189			
	5000.000	52.737	48.894	20.502	60.852
33.097	11.843	61.715			
	6300.000	51.613	46.810	7.029	56.857
34.729	2.586	58.331			
	8000.000	49.963	44.464	-10.498	52.728
36.378	-9.087	55.036			
	10000.000	48.421	42.070	-30.645	48.871
37.913	-22.419	52.277			
	12500.000	46.857	39.454	-54.890	45.014
39.447	-38.695	49.905			
	16000.000	45.065	36.270	-87.016	40.747
41.144	-61.020	47.870			
	20000.000	43.363	33.103	-100.000	36.890
42.678	-86.117	46.735];			

```
plot(frequencia,niveissonoross809(:,8))
```

```
gridon
holdon
```

```

k=niveissonoross809otimizado(:,8);
plot(frequencia,k,'r');
xlabel('Frequência (10kHz)');
ylabel('SPL(dB)');
legend('original', 'otimizado', 'location','southeast');
gridon;

```

## **TESTEAG**

```

clear
x = randi(12)
y = randi(12)
funcao = sqrt(x^2+y^2)

populacao=[];

tamanhoPopulacao = 50;
tamanhoGene = 22;
iteracoes = 75;
taxaCrossover = 90/100;
taxaMutacao = 1/100;
variacao = 200/100;

%início gerando população
for i=1:tamanhoPopulacao
cromossomo = randi(2,2,tamanhoGene)-1;
populacao= [populacao cromossomo];
decimais(:,i) = bi2de(cromossomo);
end

populacao;
decimais;

[linhaPopulacao,colunaPopulacao] = size(populacao);

[linhadecimais, colunadecimais] = size(decimais);

for r=1:iteracoes
vetor = [];

%Este for gera a matriz de alteração
for i=1:2
for j=1:colunadecimais
matrizAlteracao(i,j) = 1+(-variacao/2+(variacao/2-(-
variacao/2))*decimais(i,j)/((2^tamanhoGene)-1));
end
end
matrizAlteracao;
[linhaAlteracao, colunaAlteracao] = size(matrizAlteracao);

```

```

z=[x; y];
%gera as possiveis alterações para a populacao dada

for i=1:2
pontosaiffoilalterados(i,:) = z(i,1)*matrizalteracao(i,:);
end

pontosaiffoilalterados;
[linhapontosaiffoilalterados, colunapontosaiffoilalterados] =
size(pontosaiffoilalterados);

for i=1:colunapontosaiffoilalterados
vetor(1,i) =
sqrt(pontosaiffoilalterados(1,i)^2+pontosaiffoilalterados(2,i)^2)+10;
end
vetor;
soma = sum(vetor);

for i=1:colunapontosaiffoilalterados

probabilidadecromossomo(:,i) = [1-(vetor(1,i)/soma); i];

end
probabilidadecromossomo;
somaprobabilidade = sum(probabilidadecromossomo(1,:));

%sorteio roleta
%escolha dos pais
pais = [];

for l=1:tamanhodapopulacao

for i=1:2
escolhaantes=0;
roleta = rand*somaprobabilidade;
for j=1:colunapontosaiffoilalterados

escolhadepois = escolhaantes + probabilidadecromossomo(1,j);

if (roleta>escolhaantes& roleta<=escolhadepois)
probabilidadeindice(:,i) = probabilidadecromossomo(:,j);

end

escolhaantes = escolhadepois;
j=j+1;
end

end

if (probabilidadeindice(1,1) >= probabilidadeindice(1,2))

```

```

indice(1,1) = probabilidadeindice(2,1);
else
indice(1,1) = probabilidadeindice(2,2);
end

pais = [pais populacao(:, ((indice(1,1)-1)*tamanhodogene +
1):indice(1,1)*tamanhodogene)];
end
probabilidadeindice;
indice;

[linhapais, colunapais] = size(pais);

%crossover

for j=1:2:tamanhodapopulacao
for i=1:linhapais
cordeauxiliar=[];
crossover = rand;

if (crossover<=taxadecrossover)
pontodecorte = randi(tamanhodogene);
cordeauxiliar = pais(i, (j-1)*tamanhodogene+1:(j-
1)*tamanhodogene+pontodecorte);
pais(i, (j-1)*tamanhodogene+1:(j-1)*tamanhodogene+pontodecorte)=
pais(i, (j)*tamanhodogene+1:(j)*tamanhodogene+pontodecorte);
pais(i, (j)*tamanhodogene+1:(j)*tamanhodogene+pontodecorte) = cordeauxiliar;

end
end
end
filhos=pais;

%mutação
for i=1:linhapais
for j=1:colunapais
mutacao = rand;
if (mutacao<=taxademutacao)
if (filhos(i,j)==0)
filhos(i,j)=1;
else
filhos(i,j)=0;
end
end
end
end

[linhafilhos, colunafilhos] = size(filhos);
novodecimais = [];

for i=1:colunadecimais
novodecimais(:,i) = bi2de(filhos(:, ((i-
1)*tamanhodogene+1):i*tamanhodogene));
end

decimais = novodecimais;

populacao = filhos ;

```

```
vetormaximos(r,:) = vetor;  
    r;  
end  
vetormaximos(r,:)  
pontosairfoilalterados;
```