



Universidade de Brasília – UnB
Faculdade UnB Gama – FGA
Engenharia Aeroespacial

Otimização de Perfis de Asa Utilizando o Algoritmo Genético de Otimização

Autor: Lucas Santos de Moraes Silva
Orientador: Jhon Nero Vaz Goulart, PhD

Brasília, DF
2017



Lucas Santos de Moraes Silva

Otimização de Perfis de Asa Utilizando o Algoritmo Genético de Otimização

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Aeroespacial da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Aeroespacial.

Universidade de Brasília – UnB

Faculdade UnB Gama – FGA

Orientador: Jhon Nero Vaz Goulart, PhD

Brasília, DF

2017

Lucas Santos de Morais Silva

Otimização de Perfis de Asa Utilizando o Algoritmo Genético de Otimização/
Lucas Santos de Morais Silva. – Brasília, DF, 2017-
41 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Jhon Nero Vaz Goulart, PhD

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília – UnB
Faculdade UnB Gama – FGA , 2017.

1. Palavra-chave01. 2. Palavra-chave02. I. Jhon Nero Vaz Goulart, PhD. II.
Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Otimização de Perfis de
Asa Utilizando o Algoritmo Genético de Otimização

CDU 02:141:005.6

Lucas Santos de Moraes Silva

Otimização de Perfis de Asa Utilizando o Algoritmo Genético de Otimização

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Aeroespacial da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Aeroespacial.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 01 de junho de 2013 – Data da aprovação do trabalho:

Jhon Nero Vaz Goulart, PhD
Orientador

Sérgio carneiro, PhD
Membro Convidado

Carla Anflor, PhD
Membro Convidado

Brasília, DF
2017

Agradecimentos

A inclusão desta seção de agradecimentos é opcional, portanto, sua inclusão fica a critério do(s) autor(es), que caso deseje(em) fazê-lo deverá(ão) utilizar este espaço, seguindo a formatação de *espaço simples e fonte padrão do texto (sem negritos, aspas ou itálico)*.

Caso não deseje utilizar os agradecimentos, deixar toda este arquivo em branco.

Resumo

Técnicas de otimização numérica são essenciais na resolução de problemas de engenharia. As mesmas são capazes de substituir métodos experimentais, que muitas vezes podem ter custos elevados em termos financeiros e de tempo. Esse estudo tem por objetivo a utilização de um método de otimização de perfis de asa que seja capaz de encontrar formas de aerofólio ótimas que possuam características aerodinâmicas desejadas. O método desenvolvido consiste em um acoplamento entre o algoritmo genético de otimização e o software XFOIL, que é responsável pela análise aerodinâmica do processo de otimização. Os aerofólios são parametrizados através de curvas polinomiais, denominadas curvas de Bézier. O algoritmo desenvolvido foi capaz de otimizar um aerofólio NACA0012 em termos de sustentação, aumento seu coeficiente de sustentação c_l em 11,77%, e sua razão sustentação/arrasto em 14,6%.

Palavras-chaves: Otimização. Aerofólios. Aerodinâmica. Algoritmo Genético. Curvas de Bézier.

Abstract

Numerical optimization techniques are essential in the solution of engineering problems. These techniques are capable of replacing experimental methods that are usually expensive in financial terms and time constraints. The goal of the present study is to create a method for wing profile optimization that is capable of finding optimal airfoil shapes for aerodynamics applications. The developed method consists in coupling the genetic algorithm of optimization with XFOIL, a 2D airfoil flow solver. The airfoils were parameterized using polynomial curves, defined as b  zier curves. The algorithm was capable of optimizing a NACA0012 airfoil, improving its lift coefficient by 11,6% and its lift-to-drag ratio by 14,6%. **Key-words:** Optimization. Airfoils. Aerodynamics. Genetic Algorithm. B  zier Curves.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Definição de um aerofólio. (Anderson, 2005)	17
Figura 2 – Primeiros aerofólios de forma curva (Anderson, 2005).	18
Figura 3 – Fokker Dr- 1. (Anderson, 2005)	18
Figura 4 – Características geométricas de um aerofólio.	19
Figura 5 – Típica curva de sustentação de um aerofólio (Anderson, 2005).	19
Figura 6 – Típica curva de Bèzier de grau 3. (Salunke, Juned e Channiwala, 2014)	24
Figura 7 – Aerofólio corretamente representado por curvas de Bèzier. (Hassanza- deh, 2014)	24
Figura 8 – Estrutura básica do algoritmo genético. (Álvares, 2002)	25
Figura 9 – Estrutura do processo de seleção. (Anflor, 2007)	26
Figura 10 – Estrutura do processo de pareamento. (Anflor, 2007)	27
Figura 11 – Estrutura do processo de cruzamento. (Anflor, 2007)	27
Figura 12 – Estrutura do processo de mutação. (Anflor, 2007)	28
Figura 13 – Estrutura do processo de otimização utilizado.	29
Figura 14 – Estrutura do processo de aproximação dos pontos de controle.	30
Figura 15 – Estrutura do processo de aproximação dos pontos de controle.	30
Figura 16 – Operações de reprodução em um aerofólio	32
Figura 17 – Vizualização do processo de parametrização.	33
Figura 18 – Curva de convergência do processo de parametrização.	34
Figura 19 – Perfil Otimizado.	34
Figura 20 – Comparação entre curvas de sustentação.	35
Figura 21 – Distribuição de coeficientes de pressão.	35
Figura 22 – Performance aerodinâmica de ambos perfis de asa.	36
Figura 23 – Curva de arrasto de ambos perfis de asa.	36

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Definição e História de Aerofólios	17
2.2	Características Básicas de um Aerofólio	18
2.3	Otimização de Aerofólios	19
3	FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS	23
3.1	Parametrização & Curvas de Bèzier	23
3.2	Método dos Painéis	24
3.3	Algoritmo Genético de Otimização	25
3.3.1	Inicialização	26
3.3.2	Avaliação & Seleção	26
3.3.3	Reprodução	27
3.3.4	Mutação	27
3.3.5	Formação da Nova População	28
3.3.6	Finalização	28
4	METODOLOGIA	29
4.1	Gerador de Geometrias	29
4.2	Análise Numérica	31
4.3	Algoritmo Genético de Otimização	31
5	RESULTADOS	33
6	CONCLUSÕES PARCIAIS	39
7	REFERÊNCIAS	41

1 Introdução

O estudo da dinâmica de fluidos se mostrou fundamental em várias etapas da história. Um dos muitos exemplos dos quais esse tipo de estudo se mostrou muito importante, data do século XVI, quando batalhas navais eram sinônimo de poder. A construção de navios mais ágeis e manobráveis fez com que a diminuição do arrasto se tornasse um problema de engenharia, dando assim impulso ao estudo da dinâmica de fluidos.

No decorrer do tempo, os avanços no campo de dinâmica dos fluidos abriram portas para o estudo da aerodinâmica, que por sua vez possibilitou os primeiros voos bem sucedidos no início do século XX por parte de Alberto Santos Dumont e os irmãos Wright. Os irmãos Wright realizaram testes com mais de 200 tipos diferentes de formatos de asa em um túnel de vento movido com um motor a gasolina. Os mesmos testaram desde placas planas até formatos curvos, similares aos utilizados nos dias de hoje, verificando assim a importância da configuração de asas na geração de sustentação.

O design de formatos de asa, ou aerofólios, se tornou então uma das principais preocupações por parte de aerodinamicistas. Diferentes aerofólios servem à diferentes aplicações. Aerofólios assimétricos podem gerar sustentação com ângulo de ataque zero, enquanto um perfil aerodinâmico simétrico pode se adequar ao voo invertido freqüente como em um avião acrobático. Asas de aviões modernos podem ter diferentes seções de aerofólios ao longo de seu comprimento, cada um otimizado para as condições em cada seção da asa.

A otimização de perfis de asa consiste na procura do melhor formato de aerofólio que é capaz de atender requisitos de desempenho, como diminuição do arrasto ou aumento da sustentação para certas características de escoamento. O processo de otimização pode ser dividido em quatro partes fundamentais: geração da primeira geometria, simulação numérica, verificação de critérios de parada e por fim a aplicação do algoritmo de otimização (Ribeiro, Awruch e Gomes, 2011).

A geração de geometrias consiste na parametrização de perfis de asa, onde esses perfis são representados por pontos de controle que dão formato ao aerofólio. Assim que as geometrias são geradas, as mesmas são repassadas para softwares de análise numérica. Esses programas são responsáveis por fornecer as características aerodinâmicas de cada perfil, como os coeficientes de arrasto e sustentação. Após as características aerodinâmicas serem computadas, as mesmas passam por um processo de verificação. Nesse processo, as características aerodinâmicas são comparadas ao valor desejado. Se as mesmas obedecerem ao critério de parada, o processo de otimização será finalizado. Caso os critérios de parada não sejam satisfeitos, o algoritmo de otimização é então chamado para gerar perfis que

potencialmente possuem características aerodinâmicas melhores que o perfil anterior. Esse processo se repete até que os critérios de parada sejam satisfeitos.

Os algoritmos de otimização utilizados em problemas de engenharia podem ser de vários tipos. Dentre eles se destaca o algoritmo genético, que se baseia nos princípios da seleção natural. O algoritmo genético consiste basicamente em criar uma população inicial de possíveis respostas para o problema a ser tratado, para depois submeter essa mesma população ao processo evolutivo (Álvares, 2002). Esse processo de evolução consiste nas etapas de avaliação, seleção e reprodução, que são explicadas em mais detalhes na seção 3.3 desse trabalho.

1.1 Objetivos

Esse trabalho tem por objetivo o desenvolvimento e aplicação de uma técnica de otimização de perfis de asa. Essa técnica consiste em primeiramente gerar aerofólios através de curvas de *bèzier*, para que os mesmos sejam analisados posteriormente pelo pacote XFOIL, que fornecerá características aerodinâmicas de cada perfil. O algoritmo genético de otimização é então responsável por selecionar os perfis com melhor desempenho em termos aerodinâmicos, ranqueá-los e por fim formar novos aerofólios através do processo de reprodução.

O objetivo específico desse estudo consiste em otimizar um perfil simétrico NACA 0012 em termos de coeficiente de sustentação c_l . A otimização do c_l consiste em transformar o perfil simétrico em um perfil assimétrico, que possui a parte inferior curvada.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Definição e História de Aerofólios

Considere uma asa desenhada em perspectiva representada na figura 1. Sendo o escoamento paralelo ao plano xz , qualquer seção de asa cortada paralelamente a esse plano é definida como um *aerofólio*.

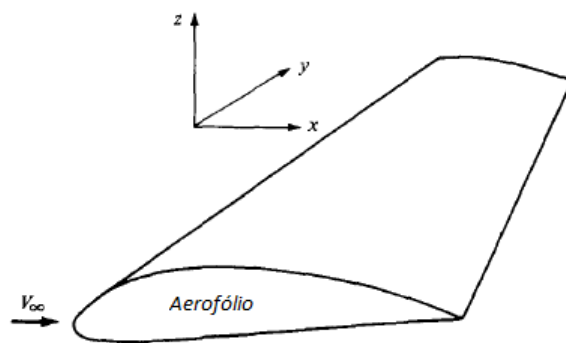


Figura 1 – Definição de um aerofólio. (Anderson, 2005)

No século 19 era conhecido que placas planas eram capazes de gerar sustentação quando fixadas em determinados ângulos de ataque. Porém existiam suspeitas de que formas curvadas, semelhantes as asas de pássaros poderiam gerar mais sustentação, ou fazê-lo de forma mais eficiente. Horatio Phillips, um dos pioneiros da aviação, patenteou em 1884 uma série de aerofólios, que tinham como principais características curvaturas mais evidentes e baixíssima espessura, como indicado na figura 2a. Os famosos *Wright Brothers*, que também foram um dos pioneiros da aviação, aderiram ao uso de aerofólios com as características mencionadas acima, como mostra a figura 2b.

O uso de aerofólios de baixíssima espessura se perpetuou até o final da primeira guerra mundial, quando engenheiros perceberam que esses perfis de asa eram pobres em termos aerodinâmicos. Tais aerofólios sofriam de separação de escoamento em pequenos ângulos de ataque, tendo portanto valores muito baixos de $c_{l,max}$. Os pioneiros da aviação tinha a falsa noção de que aerofólios mais espessos gerariam maior arrasto.

Aerofólios de maior espessura começaram a ser utilizados então, fazendo com que aeronaves tivessem melhoras significativas principalmente em termos de manobras, já que podiam alcançar maior $c_{l,max}$ sem provocar Stall¹. O primeiro avião de combate a utilizar

¹ Stall é um termo utilizado para definir separação de escoamento, que pode ser catastrófico para aeronaves.

perfis de asa mais espessos, *Fokker Dr- 1* (figura 3), foi curiosamente pilotado pelo famoso *Barão Vermelho*, combatente da primeira guerra mundial.

Com isso, até mesmo os aerofólios mais atuais utilizam aerofólios com espessura maior se comparada aos perfis utilizados pelos pioneiros da aviação (Anderson, 2005).

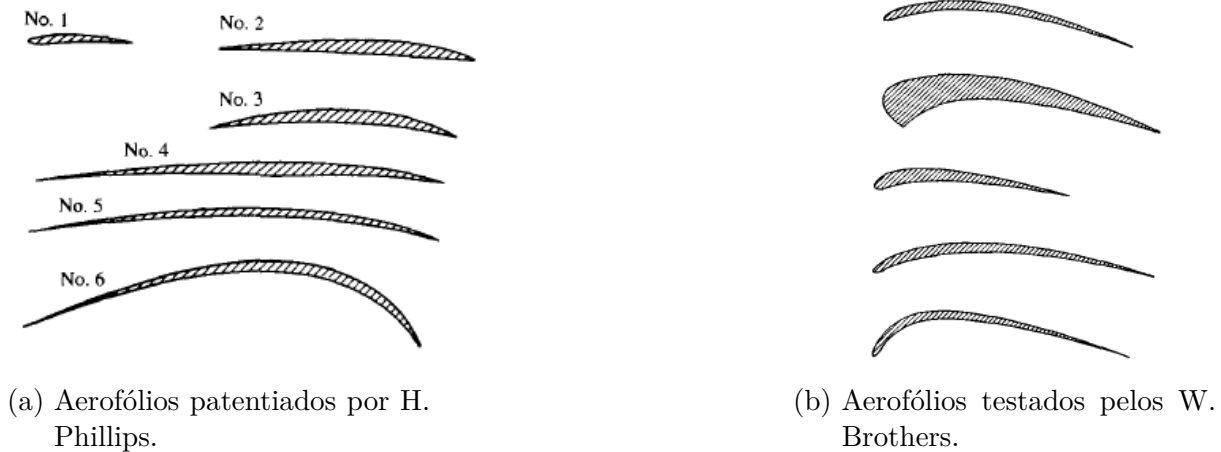


Figura 2 – Primeiros aerofólios de forma curva (Anderson, 2005).

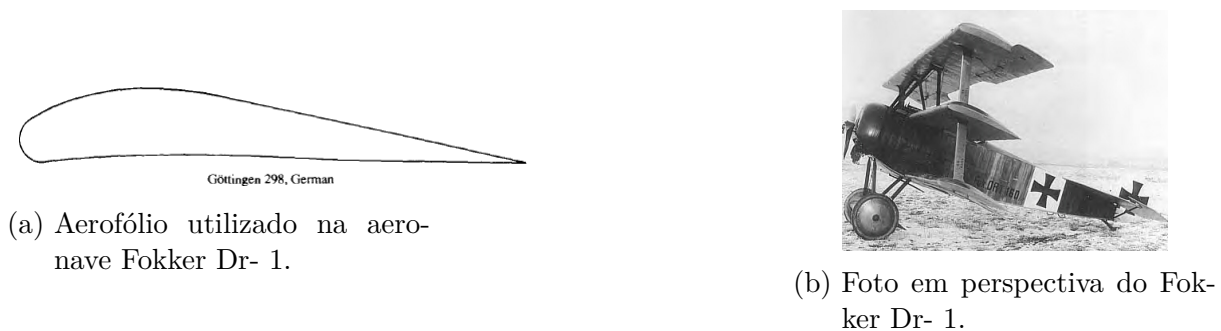


Figura 3 – Fokker Dr- 1. (Anderson, 2005)

2.2 Características Básicas de um Aerofólio

Os aerofólios são classificados normalmente quanto as suas características geométricas como indicado na figura 4. Os pontos que delimitam um perfil à esquerda e à direita são definidos como *bordo de ataque* e *bordo de fuga* respectivamente. A linha reta ligando o bordo de fuga ao bordo de ataque é definida como *linha de corda*, e seu comprimento é simplesmente designado como *corda*. A *linha de arqueamento média* consiste em um conjunto de pontos que dividem pela metade as superfícies superior e inferior do aerofólio. O *arqueamento* é a maior distância perpendicular entre a linha de corda e a linha de arqueamento. A *espessura* por fim é simplesmente a maior distância entre as superfícies inferior e superior do aerofólio.

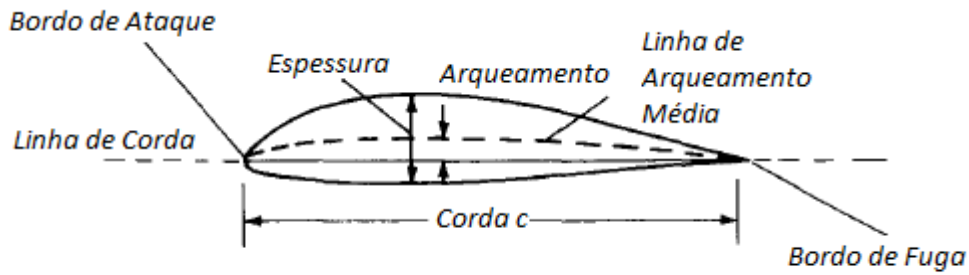


Figura 4 – Características geométricas de um aerofólio.

Além das características geométricas, diferentes aerofólios possuem uma característica única que é sua *curva de sustentação*. Nessa curva pode-se verificar como o *coeficiente de sustentação* (c_l) varia com o *ângulo de ataque* (α) como indicado na figura 5. Além disso, nessa curva pode-se identificar quando ocorrerá separação de escoamento na superfície do aerofólio, indicado por $c_{l,max}$, que é de extrema preocupação em termos aerodinâmicos.

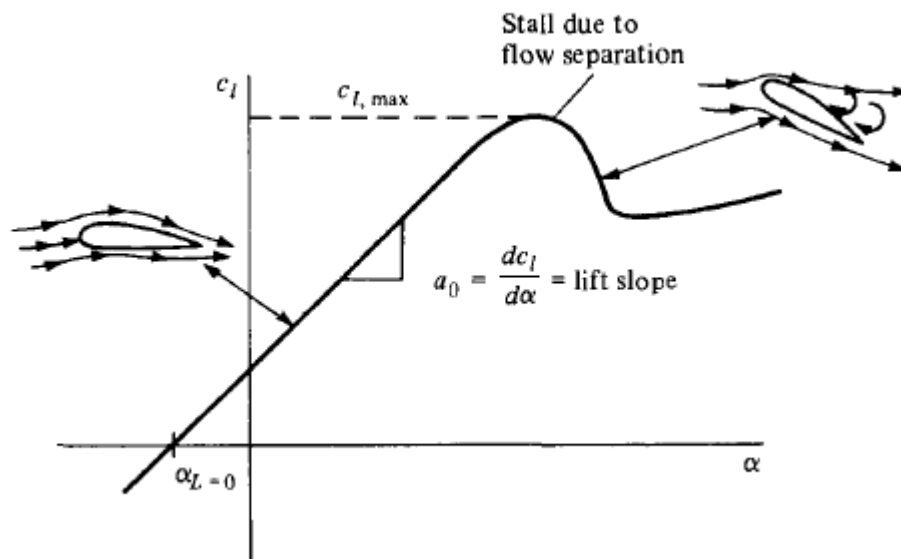


Figura 5 – Típica curva de sustentação de um aerofólio (Anderson, 2005).

2.3 Otimização de Aerofólios

Encontrar o formato de aerofólio adequado para certas condições de escoamento é de extrema importância para que requisitos de performance sejam atendidos.

O design de aerofólios é fundamental para que por exemplo, turbinas eólicas gerem quantidades apropriadas de energia (Mauclère, 2009). Quando um aerofólio é pro-

jetado, questões conflitantes como rigidez estrutural e performance aerodinâmica devem ser levadas em consideração. Portanto é necessário que aerofólios tenham seus formatos otimizados a fim de se adequarem a suas funcionalidades.

Muitos designers tradicionalmente adotam uma abordagem de "tentativa e erro" na concepção e na análise de performance de um projeto, baseando-se em dados experimentais e empíricos. Afim de reduzir custos e tempo gastos em tentativas mal sucedidas, métodos numéricos de otimização foram desenvolvidos para simplificar esse processo, além de melhorar significativamente os resultados (Zhang e Khalid, 2002).

Os avanços na ciência da computação permitiram que métodos numéricos de otimização, tais como o *Algoritmo Genético* fossem implementados com sucesso. Esses métodos são amplamente utilizados na otimização aerodinâmica de perfis de asa, possibilitando a criação de formas ótimas para determinadas condições de escoamento.

Autores como (Zhang e Khalid, 2002) conseguiram através de uma técnica numérica de otimização reduzir o arrasto de um perfil NACA0012 de 46,1% para um coeficiente de sustentação $c_l = 0,30$. Já (Mauclère, 2009) conseguiu aumentar a razão sustentação-arrasto de um perfil MH43 de 93 para 120 utilizando o algoritmo genético de otimização em sua análise.

A otimização de perfis de asa consiste essencialmente nas seguintes etapas de acordo com (Ribeiro, Awruch e Gomes, 2011):

1. Geração de geometria ou Parametrização
2. Simulação numérica
3. Aplicação do algoritmo de otimização

A *geração da geometria* consiste na representação do aerofólio através de parâmetros que controlam sua forma, denominados *pontos de controle*. Em outras palavras, qualquer mudança no formato do aerofólio está relacionada com mudança de posição dos pontos de controle. Existem diversos métodos de parametrização, que variam desde formulações feitas especificamente para aerofólios, como o *Método Parsec*, assim como curvas paramétricas. Dentre as curvas paramétricas mais utilizadas se destacam *B-Splines* e *Curvas de Bézier*.

A *simulação numérica* é comumente realizada por pacotes CFD, a depender do tipo de análise desejada. A simulação numérica fornece as características aerodinâmicas de cada perfil analisado, que servirão de entrada para o algoritmo de otimização.

O algoritmo de otimização é responsável por selecionar o melhor elemento que satisfaz um ou vários critérios estabelecidos. No caso de aerofólios, o algoritmo seleciona qual perfil satisfaz melhor certas características aerodinâmicas, como por exemplo, maior

sustentação, menor arrasto ou até mesmo maior razão entre essas duas grandezas. Os algoritmos de otimização podem ser divididos em locais e globais. Métodos locais são baseados em gradientes, e portanto realizam a busca da solução ótima em apenas uma parte do espaço de design. Métodos globais, como o algoritmo genético, levam em consideração todo o espaço de design. O algoritmo genético através das operações de cruzamento e mutação consegue explorar de forma muito abrangente o espaço de design de um problema, mesmo se esse espaço for descontínuo.

3 Fundamentos Matemáticos

3.1 Parametrização & Curvas de Bèzier

Muitos aerofólios apresentam uma equação polinomial característica, que apresenta as coordenadas verticais de um perfil em função de suas coordenadas horizontais como mostrado na equação 3.1. Essa equação é característica de um aerofólio NACA 23012, que tem suas coordenadas expressas como razão do comprimento de corda c .

$$\frac{z}{c} = 2.6595 \left[\left(\frac{x}{c} \right)^3 - 0.6075 \left(\frac{x}{c} \right)^2 + 0.1147 \left(\frac{x}{c} \right) \right] \quad (3.1)$$

Nem todas as formas de perfis de asa possuem uma equação característica, e portanto precisam ser representadas matematicamente de outra forma. À essa representação matemática dá-se o nome de *parametrização*. Existem diversos métodos de parametrização, tais como parametrização *PARSEC*, *B-Splines* e *Curvas de Bèzier* (Salunke, Juned e Channiwala, 2014). Outra vantagem de parametrizar um aerofólio se dá no número de parâmetros necessários para representar um perfil. Em uma equação característica são necessários em média cerca de 200 pontos para que um aerofólio seja corretamente representado. Por outro lado, na parametrização *PARSEC* são necessários 11 parâmetros para representar um aerofólio e as *Curvas de Bèzier* exigem cerca de 10 pontos de controle a depender da complexidade do formato do perfil. A redução do número de parâmetros é de extrema importância em um processo de otimização, pois reduz o número de variáveis do problema, e como consequência o custo computacional.

Representar aerofólios através de *Curvas de Bèzier* é uma das formas mais populares de parametrização. Uma curva de Bèzier consiste em uma curva polinomial no plano ou no espaço. Essa curva é controlada com a ajuda de seus *pontos de controle*, representados por **P0**, **P1**, **P2** e **P3** como mostrado na figura 6.

É possível perceber pela figura 6 que a curva de Bèzier intercepta os pontos de controle inicial e final, mas não necessariamente intercepta os pontos intermediários. Uma curva de Bèzier de grau n é definida por $(n + 1)$ pontos de controle. Portanto, uma curva de Bèzier de grau três terá quatro pontos de controle, como também mostrado na figura 6.

Curvas de Bèzier de grau n são definidas algebricamente como demonstrado na equação 3.2. Onde P_i representa o i -ésimo ponto de controle e $B_i^n(t)$ são *Polinômios de Bernstein*, definidos como mostrado na equação 3.3.

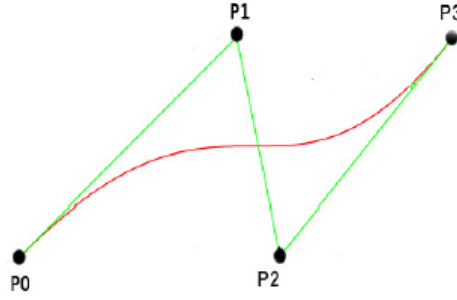


Figura 6 – Típica curva de Bèzier de grau 3. (Salunke, Juned e Channiwala, 2014)

$$P(t) = \sum_{i=0}^n P_i B_i^n(t) \quad (3.2)$$

$$B_i^n(t) = \binom{n}{i} (1-t)^{n-i} t^i \quad (3.3)$$

O coeficiente binomial presente na equação 3.3 é dado pela equação 3.4:

$$\binom{n}{i} = \frac{n!}{i!(n-i)!} \quad (3.4)$$

Na figura 7 pode-se verificar um aerofólio corretamente representado por curvas de Bèzier.

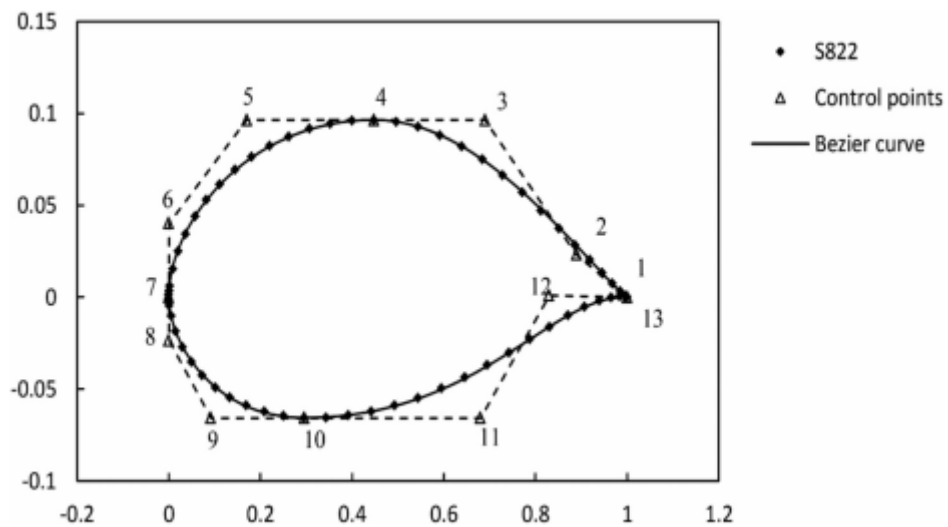


Figura 7 – Aerofólio corretamente representado por curvas de Bèzier. (Hassanzadeh, 2014)

3.2 Algoritmo Genético de Otimização

Frequentemente em problemas de engenharia existem situações em que deve-se encontrar determinadas características de um sistema de forma a extrair do mesmo o maior número possível de benefícios. Muitos desses problemas podem ser descritos através de funções matemáticas, e com isso foram criados métodos para encontrar os valores máximos ou mínimos destas funções. A tal processo dá-se o nome de *otimização* (Álvares, 2002).

O *Algoritmo Genético* é um desses processos, se encaixando na categoria de algoritmos evolutivos, que se baseiam nos princípios de seleção natural. Inspirado no darwinismo, o algoritmo genético consiste nas seguintes etapas:

- Inicialização
- Avaliação
- Seleção
- Reprodução (Pareamento, Cruzamento e Mutação)
- Formação de nova geração
- Finalização

Cada uma dessas etapas são explicadas na sub-seções seguintes e seguem a ordem representada pelo diagrama de fluxo contido na figura 8.



Figura 8 – Estrutura básica do algoritmo genético. (Álvares, 2002)

3.2.1 Inicialização

A inicialização do algoritmo genético consiste na formação de uma população inicial a ser analisada. Geralmente, os primeiros indivíduos são gerados a partir de funções randômicas, o que garante maior diversidade da população inicial, aumentando assim o espaço de busca. Cada indivíduo pode também ser denominado como um *cromossomo*, que consiste em uma *cadeia de bits*¹. Como o algoritmo genético é de origem combinatória, quanto maior o número de bits a ser manipulado, maior seu custo computacional (Anflor, 2007).

3.2.2 Avaliação & Seleção

Com a população inicial formada, cada indivíduo da mesma é avaliado de acordo com seu desempenho, ou grau de adaptação. É necessário que o algoritmo genético seja capaz de responder sobre quão boa uma resposta é para o problema proposto. O desempenho de cada indivíduo pode ser entendido pelo valor de saída que o mesmo retorna, denominado valor da *função objetivo* ou *função custo*.

Após a avaliação de cada indivíduo, os indivíduos com melhor desempenho são selecionados para se reproduzirem. Neste ponto, de acordo com o grau de adequação de cada um, é efetuado um ranqueamento onde os mais aptos possuem maior probabilidade de se reproduzirem. A figura 9 demonstra o processo de seleção.

População	custo		População selecionada	custo
0001111100	10	}	1111100000	1
0001001011	55		1010101100	2
1101101010	4		1010101110	3
1010101110	3		1101101010	4
1010101100	2			
1111100000	1			
0010101001	15			
1010111001	10			

Figura 9 – Estrutura do processo de seleção. (Anflor, 2007)

Como pode-se perceber, cada indivíduo é representado por uma cadeia de bits, e tem associado a si um valor de função custo. Como o algoritmo genético é utilizado para minimizar funções, os indivíduos com menor valor de função custo seguem para a próxima etapa como mostrado na figura 9. Os indivíduos descartados são aqueles que não possuem bom desempenho, ou que simplesmente violam alguma das restrições impostas ao problema.

¹ Uma cadeia de bits consiste em arranjo de números binários como por exemplo 11100011

3.2.3 Reprodução

Assim que os melhores indivíduos são selecionados, os mesmos devem se reproduzir, gerando novos indivíduos. Nesse processo, os indivíduos são primeiramente combinados (pareamento), seus genes trocados (cruzamento) e por fim uma de suas característica é alterada (mutação).

O *pareamento* consiste na formação de pares de indivíduos selecionados de forma aleatória. O par de cromossomos formado pode ser entendido como os "pais" do novo indivíduo que será gerado (filho ou offspring²). A figura 10 apresenta o processo de pareamento.

1111100000	1	e	1010101100	2
1010101100	2	e	1010101110	3
1010101110	3	e	1101101010	4
1101101010	4	e	1111100000	1

Figura 10 – Estrutura do processo de pareamento. (Anflor, 2007)

Assim que os pares são formados, os genes de cada indivíduo pareado são combinados, formando um novo indivíduo. A esse processo dá-se o nome de *cruzamento*. O cruzamento se inicia pela determinação do *ponto de crossover*, que consiste em uma porcentagem dos bits que serão trocados entre os pais selecionados, e passado aos filhos. A figura 11 apresenta um exemplo do processo de cruzamento. Nesse exemplo, escolhe-se aleatoriamente um ponto de cruzamento $p = 6$, que em outras palavras corresponde ao sexto dígito da string de bits que forma o indivíduo.

cromossomo 1		cromossomo 2
1111100000 1		1010101100 2
“Cada par de cromossomos origina dois novos indivíduos”.		
Offspring 1		Offspring 2
1010100000		1111101100

Figura 11 – Estrutura do processo de cruzamento. (Anflor, 2007)

3.2.4 Mutação

Os indivíduos resultantes do processo de cruzamento tem então uma de suas características alteradas, o que consiste no processo de mutação. Após o processo de cruzamento, os bits são armazenados na forma matricial, e então uma linha e uma coluna são selecionados ao acaso, determinando assim a posição que deve ser alterada. Nessa mesma posição ocorre a troca de 0 por 1 ou vice-versa como demonstrado na figura 12.

² Offspring é um termo em inglês que define um indivíduo resultante de um processo de reprodução

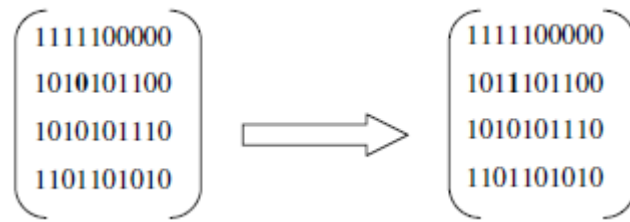


Figura 12 – Estrutura do processo de mutação. (Anflor, 2007)

3.2.5 Formação da Nova População

Nesta fase os indivíduos resultantes do processo de reprodução formam uma nova população. Na versão mais tradicional do algoritmo genético, também conhecida como *Algoritmo Genético Simples*, população mantém um tamanho fixo e os indivíduos são criados em mesmo número que seus antecessores e os substituem por completo (Álvares, 2002).

3.2.6 Finalização

A finalização consiste em um teste, onde são verificados se critérios de parada foram satisfeitos. Um desses critérios é verificar se o valor da função objetivo foi alcançado, o que significa que o processo de otimização foi concluído com êxito. Além disso, os critérios de parada podem estar relacionados ao número de gerações criadas até então, assim como o grau de convergência da população atual. É importante ressaltar que a função objetivo pode não alcançar o valor desejado para a solução de um problema. Porém é possível que o algoritmo genético seja capaz de encontrar soluções intermediárias, que se aproximam da solução desejada.

4 Metodologia

O problema físico desse trabalho consiste em otimizar o coeficiente de sustentação c_l de um aerofólio NACA0012 para as seguintes condições de escoamento:

- Número de Reynolds $R_e = 100000$
- Ângulo de ataque = 0 graus.

O processo de otimização utilizado nesse estudo segue a estrutura presente na seção de otimização de aerofólios. O algoritmo se inicia com a entrada do formato de um perfil de asa pré-existente, que é o perfil a ser otimizado. Nesse estudo o aerofólio NACA0012 é o perfil a ser otimizado. O aerofólio inicial serve de base para a criação de outras geometrias, que tem então suas características aerodinâmicas extraídas da simulação numérica. As características associadas a cada aerofólio servem como parâmetro de entrada para o algoritmo de otimização, que realizará alterações nas populações de perfis de asa até encontrar um indivíduo com as características desejadas. Cada uma dessas etapas do processo de otimização é explicada na subseções seguintes.

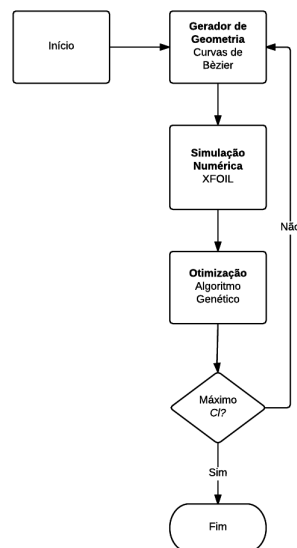


Figura 13 – Estrutura do processo de otimização utilizado.

4.1 Gerador de Geometrias

Dentro de um processo de otimização, aerofólios devem ter sua forma representadas por parâmetros denominados pontos de controle. Em outras palavras, os mesmo devem

ser parametrizados. Para esse trabalho foi escolhido o método de parametrização *Curvas de Bézier* (seção 3.1), devido principalmente a sua simplicidade matemática e capacidade de representar diversos aerofólios com características diferentes.

Um dos desafios do uso desse método de parametrização consiste em encontrar a localização dos pontos de controle no plano xy que representam corretamente o aerofólio NACA0012. Na figura 15 é possível perceber que a localização não precisa dos pontos de controle resulta em formas estranhas, que não correspondem a formas aerodinâmicas. Foi criado então um algoritmo com a função de encontrar a localização correta dos pontos de controle.

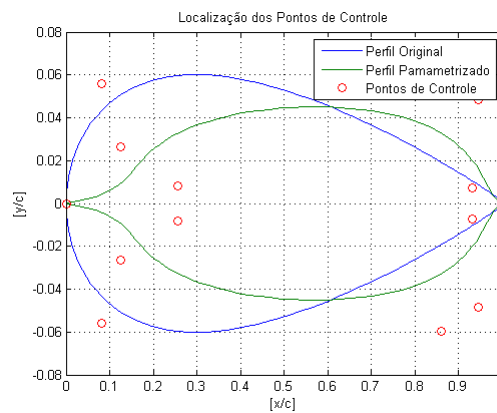


Figura 14 – Estrutura do processo de aproximação dos pontos de controle.

Esse algoritmo consiste em tentar minimizar a distância entre o perfil original e o perfil parametrizado, como mostrado na figura 14.

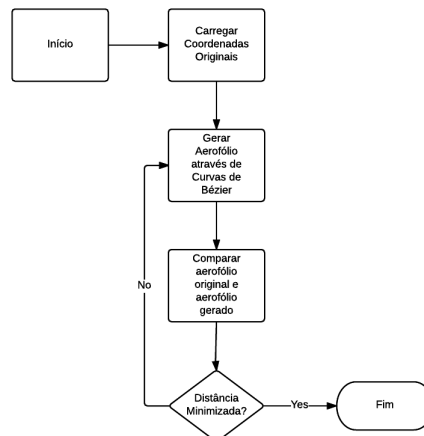


Figura 15 – Estrutura do processo de aproximação dos pontos de controle.

4.2 Análise Numérica

A análise numérica fornece as características aerodinâmicas de cada perfil analisado. No presente estudo, o software XFOIL é utilizado para computar os coeficientes aerodinâmicos dos perfis analisados. O XFOIL é um software livre, onde é possível realizar análise de aerofólios em regime subsônico através do método dos painéis com correção de camada limite (seção 3.2). A escolha desse software se deve principalmente ao seu baixo custo computacional e a possibilidade do XFOIL de ser acoplado ao software MATLAB, ambiente no qual o algoritmo genético opera.

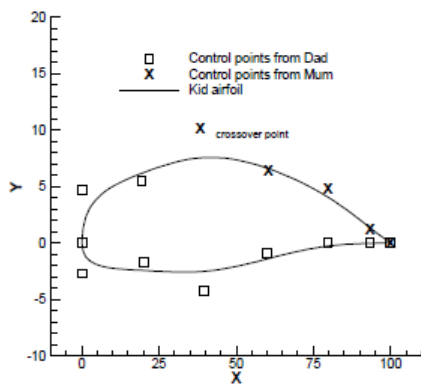
Nesse estudo o XFOIL faz a análise de um escoamento não viscoso a um ângulo de ataque de 0 graus. O software retorna então os coeficientes aerodinâmicos de cada perfil (indivíduo) do processo de otimização. O objetivo dessa análise é transformar um perfil simétrico (NACA0012), que possui $c_l = 0$ para $\alpha = 0$ em um perfil assimétrico que possui maior c_l .

4.3 Algoritmo Genético de Otimização

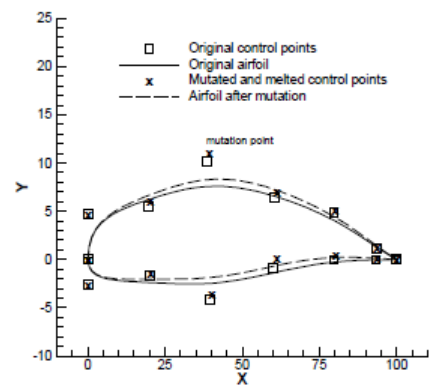
Após a primeira população de aerofólios ser submetida a análise numérica, os indivíduos com maior desempenho são selecionados pelo algoritmo genético, que é responsável por aprimorar suas características através das operações de pareamento, cruzamento e mutação.

O pareamento consiste na formação de pares de aerofólios com bom desempenho (pai e mãe) que posteriormente se reproduzirão formando novos aerofólios (filhos ou offspring). O cruzamento consiste na formação de novos indivíduos que possuem genes de ambos os pais. Os genes nesse caso são os pontos de controle que controlam a forma do perfil. A figura 16a mostra um aerofólio formado por cruzamento. Os "quadrados" representam os pontos de controle do pai, enquanto os "X" representam os pontos de controle da mãe.

Após ser formado pelo cruzamento de dois aerofólios, o novo perfil tem um de seus genes (pontos de controle) alterado pelo processo de mutação. Esse processo é mostrado na figura 16b pelo ponto de mutação (Mutation Point).



(a) Operação de cruzamento em um aerofólio.



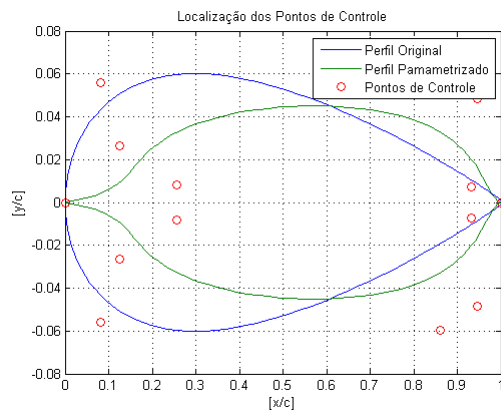
(b) Operação de mutação em um aerofólio.

Figura 16 – Operações de reprodução em um aerofólio

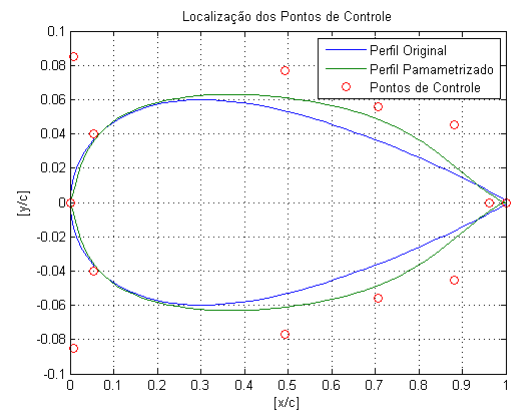
5 Resultados

O primeiro passo da otimização consistiu em parametrizar um aerofólio NACA0012. A finalização desse processo ocorre em 200 iterações como mostrado no gráfico de convergência da figura 18 e o perfil resultante está representado na figura 17d.

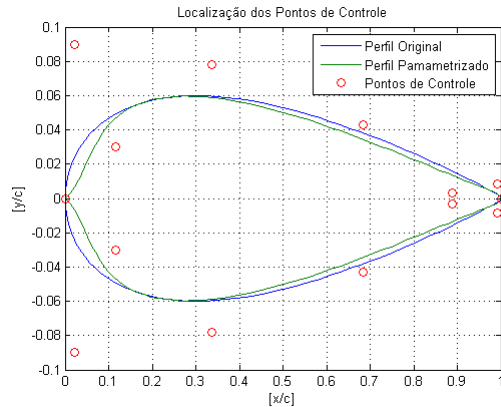
Encontrados os pontos de controle do aerofólio original a ser otimizado, uma nova população será gerada através de alterações randômicas nos pontos de controle originais. Isso dará origem a população inicial a ser avaliada.



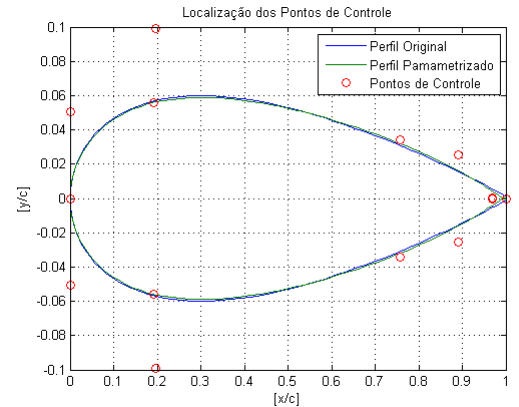
(a) Processo de aproximação após 10 iterações



(b) Processo de aproximação após 25 iterações.



(c) Processo de aproximação após 75 iterações



(d) Processo de aproximação finalizado

Figura 17 – Visualização do processo de parametrização.

A evolução desse processo pode ser visualizada nas figura 17. É possível perceber que a cada iteração o aerofólio gerado se aproxima mais e mais do perfil original, diminuindo a distância entre seus pontos.

O processo de otimização resultou no perfil de asa mostrado na figura 19. Como é possível observar, a parte inferior do aerofólio sofreu significas alterações, sendo mais

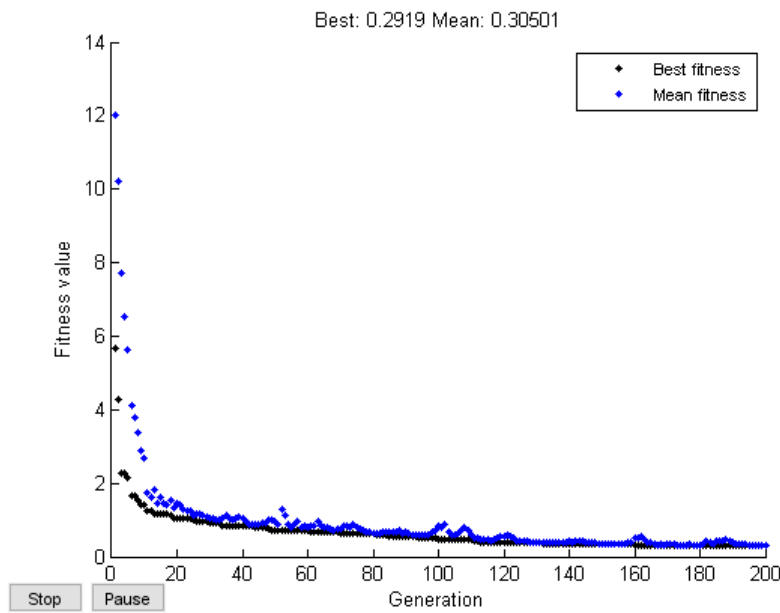


Figura 18 – Curva de convergência do processo de parametrização.

curvada que a do aerofólio original.

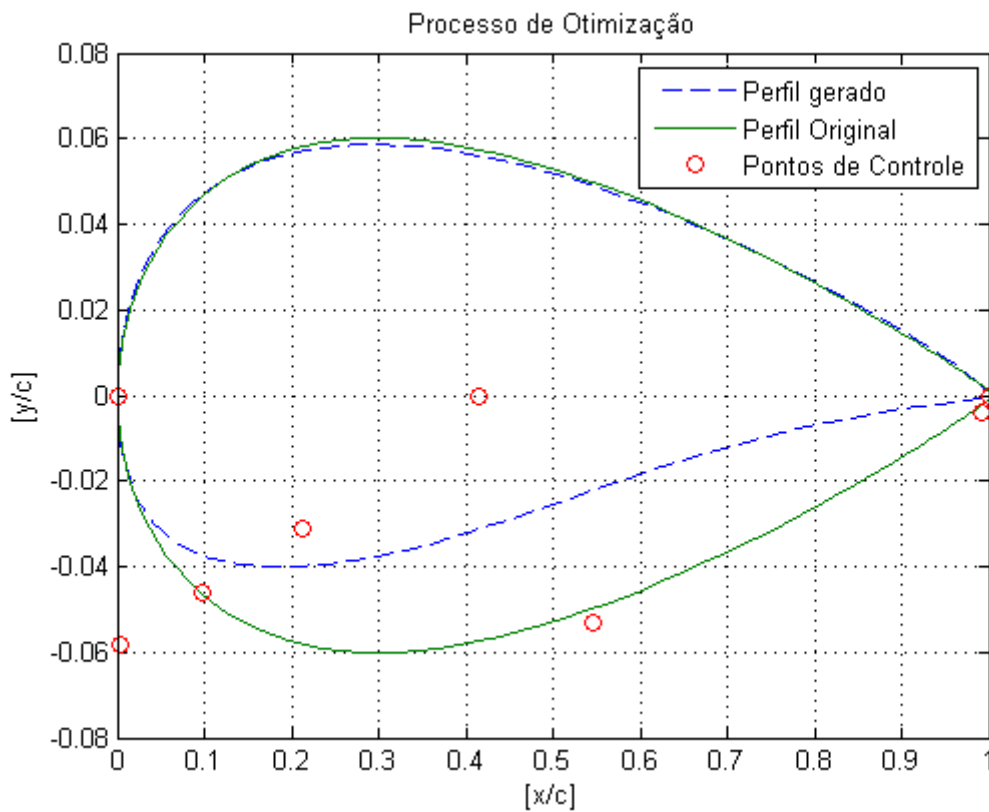


Figura 19 – Perfil Otimizado.

A mudança na curvatura da parte inferior está diretamente relacionada com aumento de sustentação. Isso pode ser verificado na figura 20. Nessa figura é possível perceber

que o perfil gerado possui maior valor de coeficiente de sustentação (c_l) para os mesmo valores de ângulos de ataque (α) quando comparado ao perfil original. O valor máximo de sustentação gerado c_{lmax}

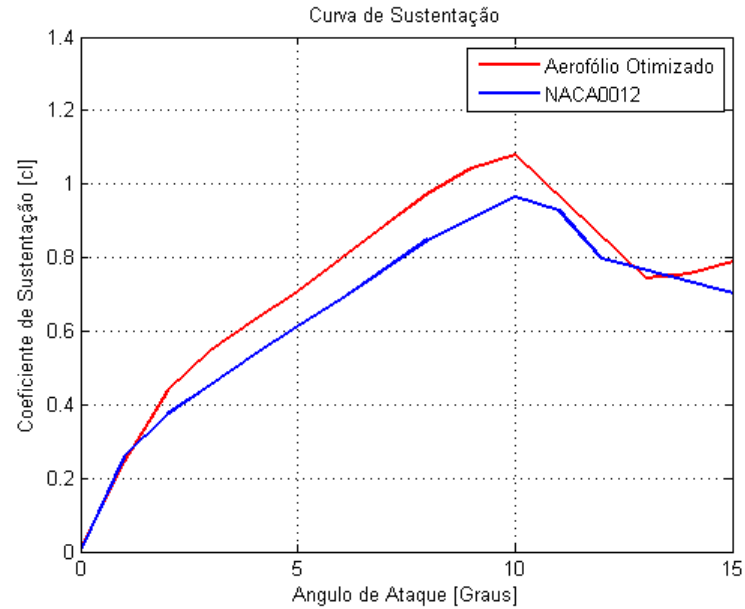


Figura 20 – Comparação entre curvas de sustentação.

O aumento na sustentação pode ser observado também pela análise das distribuições de coeficientes de pressão em ambos os aerofólios na figura 21. O coeficiente de sustentação é dado pela área compreendida pela distribuição de c_p . É possível perceber na figura 21 que a área relativa ao novo perfil é maior que a mesma do perfil NACA0012, o que evidencia maior sustentação.

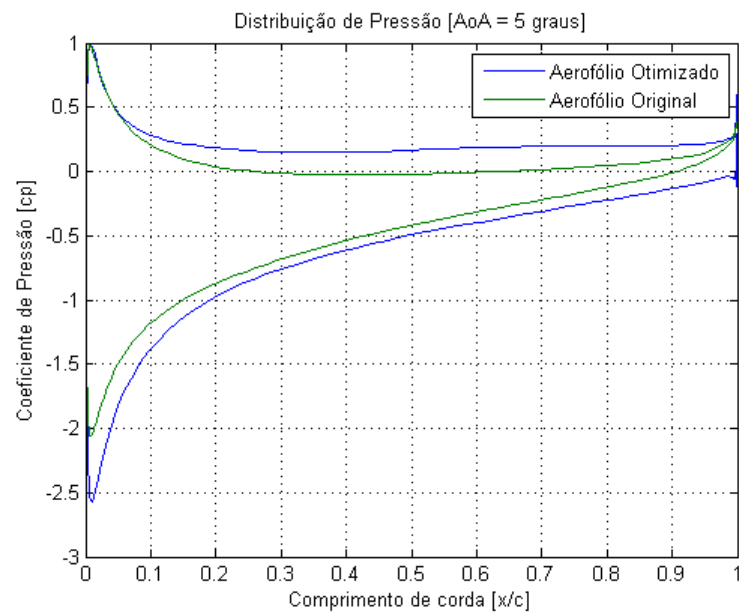


Figura 21 – Distribuição de coeficientes de pressão.

O novo perfil também demonstrou melhor performance aerodinâmica, que consiste na razão entre sustentação e arrasto c_l/c_d . As performances de ambos aerofólios para diferentes ângulos de ataque são apresentadas na figura 23. Nessa figura é possível perceber a superioridade do perfil otimizado para ângulos de ataque menores que 11 graus, que é onde ocorre separação de escoamento.

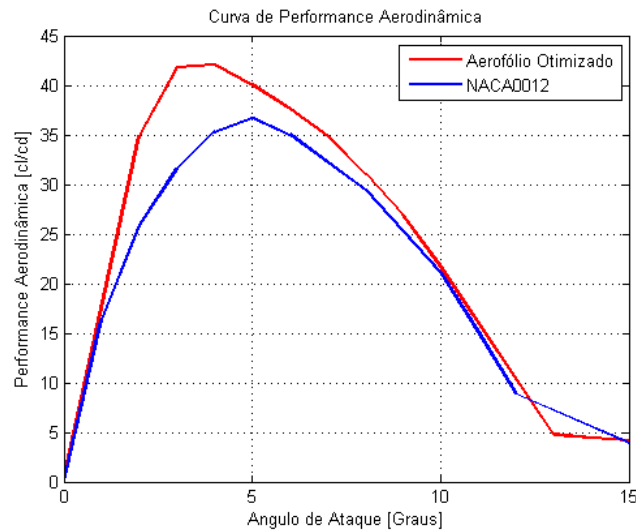


Figura 22 – Performance aerodinâmica de ambos perfis de asa.

Por fim as curvas de arrasto de ambos os perfis foram comparados, e verificou-se que não houve redução significativa do arrasto no novo perfil gerado como apresentado na figura ???. Porém é importante ressaltar que para os mesmos valores de c_d o novo perfil apresentou maiores valores de coeficiente de sustentação c_l . Isso se deve principalmente ao fato de que o processo de otimização tinha por objetivo aumento de sustentação, e não redução do arrasto.

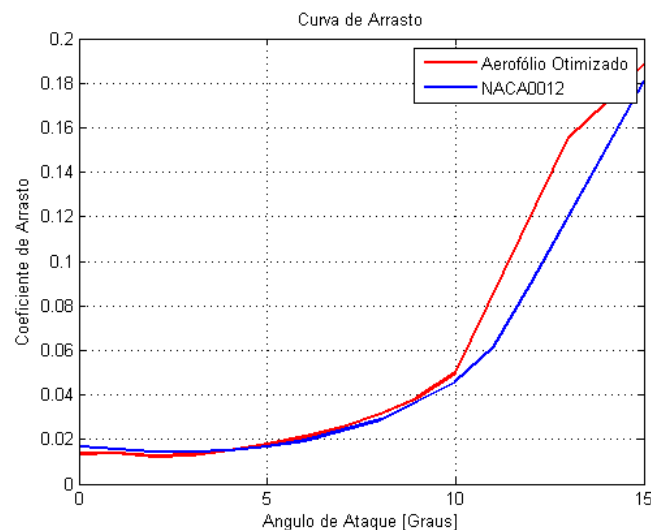


Figura 23 – Curva de arrasto de ambos perfis de asa.

A tabela 1 mostra uma comparação entre algumas das características aerodinâmicas de cada perfil, e suas respectivas diferenças percentuais.

-	Perfil Original	Perfil Otimizado	Aumento Percentual
c_{lmax}	0.96	1.080707	11,77 %
$(L/D)_{max}$	36,68	42,04	14,6 %

Tabela 1 – Tabela comparativa de características aerodinâmicas

6 Conclusões Parciais

O objetivo fundamental desse trabalho consistiu na criação de um algoritmo de otimização que fosse capaz de aperfeiçoar características aerodinâmicas de perfis de asa. Para demonstrar o funcionamento desse algoritmo, um aerofólio NACA0012 foi otimizado relativamente a seu coeficiente de sustentação.

O perfil gerado pelo processo de otimização demonstrou maior desempenho em termos de sustentação se comparado ao NACA0012. Isso é observado pela comparação das curvas de sustentação e distribuições de pressão de cada perfil, presentes na seção de resultados.

As curvas de *bèzier* se demonstraram eficazes na parametrização de perfis de asa. Porém, as curvas de *bèzier* impõem restrições ao número de pontos de controle que podem ser utilizados na parametrização. O grau da curva de *bèzier* i é dado por $i = n + 1$, onde n é o número de pontos de controle. Portanto o grau da curva aumenta quando aumentamos o número de pontos de controle, deixando a análise mais cara em termos de custos computacionais.

O algoritmo genético demonstrou muita eficácia em contornar problemas de descontinuidade presentes no processo de otimização. Tais descontinuidades estão relacionadas a formação de perfis de asa não adequados, com coordenadas que se cruzam por exemplo.

Além disso, o algoritmo genético é independente da análise numérica escolhida. Esse fato faz com que o algoritmo desenvolvido possa ser aplicado a problemas mais complexos, tais como escoamento transônico ou supersônico, que carregam em si mais complexidade devido as descontinuidades geradas por ondas de choque.

7 Referências

1. ANDERSON, John. **Fundamentals of Aerodynamics**. 4. ed. New York, EUA: McGraww-Hill, 2005. 277-348 p.
2. ABBOT, Ira H.; VON DOENHOFF, Albert E. **Theory of Wing Sections**. 1. ed. New York, EUA: Dover Publications, 1949. 46-64 p.
3. ANFLOR, Carla Tatiana Mota. **Otimização Evolucionária e Topológica em Problemas Governados pela Equação de Poisson Empregando o Método dos Elementos de Contorno**. 2007. 34-41 p. Dissertação de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica)- Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2007.
4. ZHANG, F.; CHENG, S.; KHALID, M. **OPTIMIZATION OF AIRFOIL AND WING USING GENETIC ALGORITHM**. 2002. 1-10 p. Artigo Científico (Institute for Aerospace Research (IAR))- National Research Council (NRC), Ontario, Canadá, 2002.
5. HASSANZADEH, Arash; SANAYE, Sepehr. Multi-Objective Optimization of Airfoil Shape for Efficiency Improvement and Noise Reduction in Small Wind Turbines. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, [S.l.], 05 set. 2014. 10.1063/1.4895528, p. 1-23.
6. MAUCLÈRE, Xavier. **Automatic 2D Airfoil Generation, Evaluation and Optimisation using MATLAB and XFOIL**. 2009. 5-26 p. Dissertação de Mestrado (DTU Mechanical Engineering)- Technical University of Denmark, [S.l.], 2009.
7. SALUNKE, Nilesh P.; AHAMAD R. A., Juned; CHANNIWALA, S.A. Airfoil Parameterization Techniques: A Review. **American Journal of Mechanical Engineering**, [S.l.], 18 abr. 2014. DOI:10.12691/ajme-2-4-1, p. 1-4.
8. RIBEIRO, A.F.P; AWRUCH, A.M.; GOMES, H.M. An airfoil optimization technique for wind turbines. **Applied Mathematical Modelling**, [S.l.], 04 dez. 2011. 36 (2012) 4898–4907, p. 1-10. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/apm>>. Acesso em: 12 abr. 2017.
9. ÁLVARES, Luís Otávio. **Algoritmos Genéticos: uma introdução**. [S.l.: s.n.], 2002. 3-17 p.