

**ELODIE MARIE-LAURE ARAUJO**

**MODELO REDUZIDO PARA COEFICIENTES AERODINÂMICOS  
UTILIZANDO REDES NEURAS**

**SÃO PAULO**

**2007**

**ELODIE MARIE-LAURE ARAUJO**

**MODELO REDUZIDO PARA COEFICIENTES AERODINÂMICOS  
UTILIZANDO REDES NEURAIS**

Monografia de Trabalho de formatura apresentado  
ao Departamento de Engenharia Mecatrônica e  
Sistemas Mecânicos da Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo

**SÃO PAULO**

**2007**

**ELODIE MARIE-LAURE ARAUJO**

**MODELO REDUZIDO PARA COEFICIENTES AERODINÂMICOS  
UTILIZANDO REDES NEURAIIS**

Monografia de Trabalho de formatura apresentado  
ao Departamento de Engenharia Mecatrônica e  
Sistemas Mecânicos da Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo

Área de Concentração:  
Engenharia Mecatrônica

Orientador: Prof. Dr. Luis Carlos de Castro Santos

**SÃO PAULO**

**2007**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

**Araujo, Elodie Marie Laure**

**Modelo reduzido para coeficientes aerodinâmicos utilizando  
redes neurais / E.M.L. Araujo. -- São Paulo, 2007.  
82 p.**

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade  
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de  
Sistemas Mecânicos.**

**1.Aerodinâmica 2.Equações de Navier-Stokes 3.Redes neu-  
rais 4.Inteligência artificial I.Universidade de São Paulo. Escola  
Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de  
Sistemas Mecânicos II.t.**

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho a meu tio, Daniel.*

## AGRADECIMENTOS

Ao professor Luis Santos, pela orientação e pelo constante apoio durante todo o trabalho.

À Embraer, que me forneceu os recursos necessários para desenvolver esse trabalho, em particular pela oportunidade de estágio.

À empresa ESSS, e particularmente ao Rodrigo Ferraz, pela oportunidade de descobrir e usar uma ferramenta bastante poderosa.

À Olga Saito e ao Alessandro Santana, alunos de doutorado do IME, ao Marcos Ceze e ao Guilherme Lara, da Embraer pelos esclarecimentos e pelas dicas sobre as ferramentas da INRIA e a função de parametrização geométrica.

À Escola Politécnica da USP e particularmente ao laboratório do NDF e ao professor Julio Meneghini pelos recursos computacionais.

Ao Marcos Fortunato Visconti pela ajuda na correção do meu português.

A todos que diretamente ou indiretamente contribuíram para a execução deste trabalho.

## RESUMO

O projeto multidisciplinar de aeronaves requer a integração de diversas ferramentas que enquadram diferentes disciplinas: aerodinâmica, estruturas, desempenho, etc. O custo computacional do ciclo para otimização seria inviável caso fossem utilizadas ferramentas de cálculo de alta-fidelidade, como por exemplo, códigos de “Computacional Fluid Dynamics” ou CFD para aerodinâmica. Para isso, a estratégia mais adequada é a construção de modelos reduzidos, ou meta-modelos, usando, por exemplo, as redes neurais: elas utilizam análises de alta-fidelidade como base de dados de treinamento e permitem assim o fornecimento de respostas por um custo reduzido. O objetivo desse trabalho é combinar uma parametrização de perfis aerodinâmicos que utiliza um número reduzido de variáveis, no entanto com grande flexibilidade de formas geométricas, com um código de resolução das equações de Navier-Stokes concebido pelo INRIA da França, o NSC2KE. Ele é baseado no método dos Volumes Finitos - Galerkin, para cálculo de escoamento 2D ou axissimétrico com malha não estruturada. Ele serviu à geração da base de treinamento e de verificação da rede neural. O modelo foi construído usando o Neural Network Toolbox do Matlab. O processo está descrito. O compromisso custo/representatividade foi avaliado e os resultados foram validados para uma dada geometria, com condições de voo variáveis. Porém, a criação da rede completa necessita a geração de um banco de dados de amostras bem maior do que aquela foi criado.

Palavras-chave: Aerodinâmica. Equações de Navier-Stokes. CFD. NSC2KE. Volumes Finitos-Galerkin. Rede neural. Inteligência artificial.

## RESUMÉ

La conception et la construction d'un avion est un projet multidisciplinaire qui requiert l'utilisation de nombreux outils, dans des disciplines aussi diverses que l'aérodynamique, le calcul de structures, la performance de l'appareil... Le processus d'optimisation, comme les codes de "Computacional Fluid Dynamics" ou CFD en aérodynamique par exemple, utilise des outils de calcul de haute fidélité qui présente un coût computationnel extrêmement lourd. C'est pourquoi la stratégie la plus adéquate est la construction de modèles réduits, ou méta-modèles, basés par exemple sur un réseau neuronal: Leur apprentissage est réalisé à travers l'analyse d'un certain nombre de données résultantes du calcul obtenus par les softwares de haute fidélité. Ainsi, elles deviennent à même de fournir des réponses à un coût réduit. L'objectif de ce travail est de combiner une fonction de paramétrisation de profils aérodynamiques qui utilise un nombre réduit de variables, avec cependant une grande flexibilité quant à la forme géométrique de celui-là, avec un code de résolution des équations de Navier-Stokes conçu par le laboratoire français de l'INRIA: le NSC2KE, qui permettra de gérer la base d'entraînement du réseau d'intelligence artificielle. Le réseau neuronal a été construite avec le 'Neural Network Toolbox » de Matlab. Le processus est décrit et le compromis coût/représentativité a été évalué. Le résultat a été validé pour une géométrie fixée avec des conditions de vol variables. Cependant, la construction du réseau neuronal complet nécessite la création d'une base de données d'échantillons de calculs CFD plus grande que celle qui fut créée.

Mots-clé: Aérodynamique. Équation de Navier-Stokes. CFD. NSC2KE. Volumes Finis-Galerkin. Réseau neuronal. Intelligence artificielle.



## ABSTRACT

The conception and the construction of an airplane are a multidisciplinary project which requires the use of many tools, in areas as aerodynamics, structural analysis, performance, control... The process of optimization, as codes of "Computational Fluid Dynamics" or CFD in aerodynamics for example, uses tools of high fidelity which presents a high computational cost. That is why the most adequate strategy is the construction of reduced models, or metamodels, based for example on a neural network: Their teaching is realized by the analysis of data resulting from the calculation obtained by high fidelity software. Thus, they are able to provide answers for a reduced cost. The aim of this work is to combine a parameterization function of airfoils which uses a reduced number of variables, providing however a great flexibility for its geometrical form, with a code for the resolution of the Navier-Stokes equations conceived by the French laboratory INRIA: NSC2KE, which was used as database for the artificial intelligence network. The neural network was built on Matlab, using the Neural Network Toolbox. The process is described and the compromise cost/representativity evaluated. The results were validated for a given geometry with different fly conditions. However, building the complete neural network needs a CFD database bigger than the one which was created for this work.

Keywords: Aerodynamics. Navier-Stokes Equations. CFD. NSC2KE. Finite-Volume Galerkin. Neural Network. Artificial Intelligence.

# SUMÁRIO

<b>I- Introdução.....</b>	<b>13</b>
1. Motivações do projeto.....	13
2. Justificativas .....	16
3. Objetivo concreto.....	17
<b>II- Esquema global do projeto .....</b>	<b>18</b>
1. Etapa 1: Escolha e definição dos parâmetros geométricos de entrada .....	18
2. Etapa 2: Geração do banco de dados de amostras obtido por métodos computacionais de alta-fidelidade: CFD. ....	18
3. Etapa 3: Treinamento e avaliação da rede neural. ....	18
4. Diagrama global de definição do processo.....	18
<b>III- Parametrização da geometria dos aerofólios .....</b>	<b>20</b>
1. Teoria geral da função de geometria .....	20
2. Parâmetros usados.....	25
3. Estudo do comportamento dos parâmetros para casos reais.....	28
4. Criação da base de perfis.....	32
<b>IV- Determinação dos coeficientes aerodinâmicos por CFD .....</b>	<b>34</b>
1. O código NSC2KE .....	34
2. Pré-processamento: geração da malha.....	35
3. O NMIX.....	36
4. Estudo da influência dos parâmetros de set-up nos resultados do RAE2822	39
<b>V- A rede neural .....</b>	<b>43</b>
1. Especificações da rede neural.....	43
2. Características de uma rede neural.....	44
3. Treinamento e simulações das amostras do banco de dados.....	47
4. Estudo da influência dos parâmetros de voo.....	55
<b>VI- Discussões .....</b>	<b>60</b>
1. Melhorias propostas .....	60
2. Conclusão.....	61
<b>VII- Referências.....</b>	<b>63</b>
<b>VIII- Anexos .....</b>	<b>64</b>
1. Programa Matlab de geração de aerofólio, com polinômio de Bernstein de ordem 3.....	64
2. Função inversa de cálculo dos coeficientes dos polinômios de Bernstein a partir das coordenadas do aerofólio .....	65
3. Aplicação da função da Boeing de ordem 3 em aerofólios transônicos reais.	68
4. Banco de dados de 300 amostras .....	70
5. Modelo de arquivos de entrada do NMIX .....	77
6. Função de geração dos arquivos de entrada do NMIX .....	79
7. Comando Matlab do “Neural Network Toolbox” .....	80
8. Banco de dados de 75 amostras .....	81

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplos de aviões com asas e perfis de asas bem diferentes .....	13
Figura 2: Características geométricas principais de um aerofólio .....	14
Figura 3: Exemplo de estudo CFD de um escoamento transônico ao redor de um perfil .....	15
Figura 4: Descrição da geometria de um aerofólio .....	20
Figura 5: Classes geométricas fundamentais .....	23
Figura 6: Influência dos componentes do polinômio de Bernstein de segundo ordem na geometria ..	24
Figura 7: Exemplo de aerofólio “típico” gerado no Matlab pela função de parametrização geométrica de ordem 3 .....	25
Figura 8: Aerofólios com parâmetros da função de forma: $k_{up}=[1 \ 1 \ 1]$ $k_{lo}=[k_{up}(1) \ 0.2 \ 0.1 \ 0.3]$	26
Figura 9: Aerofólios com parâmetros da função de forma: $k_{up}=[0.8 \ 0.2 \ 1.8 \ 1.2]$ e $k_{lo}=[k_{up}(1) \ 0.3 \ 0.1 \ 0.3]$ .....	26
Figura 10: Aerofólios com parâmetros da função de forma: $k_{up}=[0.4 \ 0.2 \ 0.8 \ 0.1]$ e $k_{lo}=[k_{up}(1) \ -0.3 \ -0.1 \ -0.4]$ .....	26
Figura 11: Aerofólios com parâmetros da função de forma: $k_{up}=[0.2 \ 0 \ 0.4 \ 1]$ e $k_{lo}=[k_{up}(1) \ -0.3 \ -0.1 \ -0.4]$ .....	27
Figura 12: “Aerofólio” com arqueamento muito “negativo” no intradorso .....	27
Figura 13: Comparação entre as coordenadas reais e calculadas a partir dos coeficientes da função da Boeing de ordem 3 para 2 aerofólios transônicos .....	29
Figura 14: Distribuição das 300 amostras no domínio de definição da função .....	33
Figura 15: Célula de volume finito em dimensão dois .....	34
Figura 16: Malha gerada no Bamg, sem refinamento .....	35
Figura 17: Primeira malha pouco refinada gerado no BAMG .....	36
Figura 18: Malha do BAMG depois de 4 refinamentos (e um total de 6000 iterações) .....	37
Figura 19: Perfil RAE2822 .....	39
Figura 20: 1ª Malha do RAE2822 para o caso (2,2000, 6) .....	40
Figura 21: 2ª refinamento da malha do RAE2822 depois de 2000 iterações para o caso (2,2000,6) ..	41
Figura 22: $C_p$ .....	41
Figura 23: Evolução do $c_L$ em função das iterações .....	42
Figura 24: Estrutura simplificada de uma rede neural .....	44
Figura 25: Funcionamento de um neurônio com R variáveis de entrada .....	44
Figura 26: Função “tansig” do Neural Network Toolbox do Matlab .....	45
Figura 27: Função “logsig” do Neural Network Toolbox do Matlab .....	45
Figura 28 Função “purelin” do Neural Network Toolbox do Matlab .....	45
Figura 29: Camada de neurônios .....	46
Figura 30: Erro absoluto do $c_L$ para as 187 amostras treinadas para vários tipos de rede .....	48
Figura 31: Erro absoluto do $c_D$ para as 187 amostras treinadas para vários tipos de rede .....	49
Figura 32: Erro absoluto do $c_{MLE}$ para as 187 amostras treinadas para vários tipos de rede .....	49
Figura 33: Erro absoluto do $c_L$ para as 93 amostras de validação para vários tipos de rede .....	50
Figura 34: Erro absoluto do $c_D$ para as 93 amostras de validação para vários tipos de rede .....	51
Figura 35: Erro absoluto do $c_{MLE}$ para as 93 amostras de validação para vários tipos de rede .....	51
Figura 36: Comparação entre o $c_L$ calculado por método CFD e por redes neurais com parâmetros variáveis para as amostras de validação .....	52
Figura 37: Comparação entre o $c_D$ calculado por método CFD e por redes neurais com parâmetros variáveis para as amostras de validação .....	53
Figura 38: Comparação entre o $c_{MLE}$ calculado por método CFD e por redes neurais com parâmetros variáveis para as amostras de validação .....	53
Figura 39: Erro absoluto do $c_L$ para algumas das redes modeladas, medido para as amostras de treinamento .....	54
Figura 40: RAE2822: Comparação dos resultados para as amostras de validação .....	57
Figura 41: C5A: Comparação dos resultados para as amostras de validação .....	57
Figura 42: RAE5112: Comparação dos resultados para as amostras de validação .....	58
Figura 43: Comparação dos resultados para as amostras de validação .....	58

## LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1: Parâmetros calculados para cada um dos aerofólios reais selecionados .....</i>	<i>29</i>
<i>Tabela 2: Erros relativos e absolutos para as novas geometrias calculadas .....</i>	<i>30</i>
<i>Tabela 3: Variação dos 8 parâmetros de geometria da função da Boeing avaliados em 18 casos.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabela 4: Restrições aplicadas aos parâmetros geométricos de entrada da rede neural.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabela 5: Resultados de túnel de vento para o RAE2822.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabela 6: Resultados experimentais obtido pelo NMIX para o perfil RAE2822 .....</i>	<i>40</i>
<i>Tabela 7: Parâmetros de entrada da rede neural: 8 variáveis de geometria e 2 parâmetros de voo ..</i>	<i>43</i>
<i>Tabela 8: Observação do erro absoluto médio e máximo para algumas redes neurais treinadas .....</i>	<i>54</i>

## I- Introdução

### 1. Motivações do projeto

Esse projeto surgiu através da análise de estudos aerodinâmicos. Para cada nova aeronave, o projeto da sua asa é fundamental para o seu desempenho. Esse é específico e depende das características de cada avião. Podemos citar alguns critérios importantes para esse estudo como o alcance, o número de passageiros, a funcionalidade da aeronave (militar, comercial, executiva), etc., que vão definir as especificações de carga máxima, volume de combustível necessário, velocidade, ...

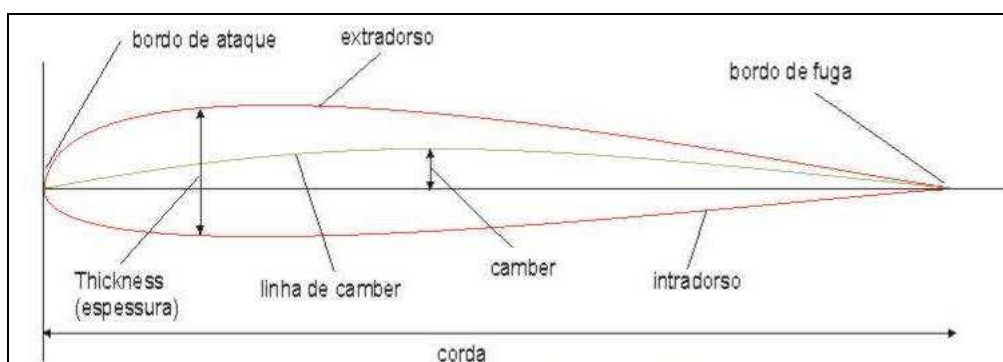


*Figura 1: Exemplos de aviões com asas e perfis de asas bem diferentes*

A partir da observação da asa, já podemos notar diferenças nos perfis dessas, no olho. Por exemplo, o EMB 145 (a) tem um perfil de asa bem mais encurvado e bem mais grosso na frente do intradorso (parte de baixa da asa), em comparação com o A380 (d) e o Lineage (c). As asas desses dois possuem uma espessura maior ao longo da envergadura, sendo aviões comerciais e/ou executivos voando em regime transônico. Porém, podemos observar que a asa do A380 (d) é mais longa (avião maior) e carrega duas naceles enquanto o Lineage (c) só carrega uma. Isso implica uma diferença estrutural e consequentemente de forma dos perfis da asa. Quanto ao Concorde (b), ele tem um perfil de asa otimizado para vôos

supersônicos. E o avião do Santos Dumont (e) possui um único perfil de espessura 0 bem diferentes das formas vistas nos aviões atualmente.

As características aerodinâmicas de um avião dependem majoritariamente das suas asas. E todo projeto tridimensional começa por um estudo bidimensional, pois, a geometria do aerofólio influencia a eficiência aerodinâmica. A figura abaixo apresenta algumas características geométricas importantes na definição de um aerofólio e das suas especificações aerodinâmicas.



*Figura 2: Características geométricas principais de um aerofólio*

Podemos citar, por exemplo, alguns efeitos da geometria:

➤ A diminuição da espessura relativa do perfil:

- Reduz o arrasto
- Permite voar em regime transônico

Mas, de outro lado, gera conseqüências negativas:

- Diminui o valor do Mach crítico (Mach a partir do qual o escoamento ao redor do perfil passa do regime subsônico a transônico)
- Diminui o  $c_{Lmax}$  (importante para pouso e decolagem)
- Necessita de perfis mais reforçados estruturalmente
- Diminui a capacidade de combustível (os tanques de combustíveis podem ser localizados dentro da asa para otimizar o espaço)

➤ O aumento do raio do bordo de ataque

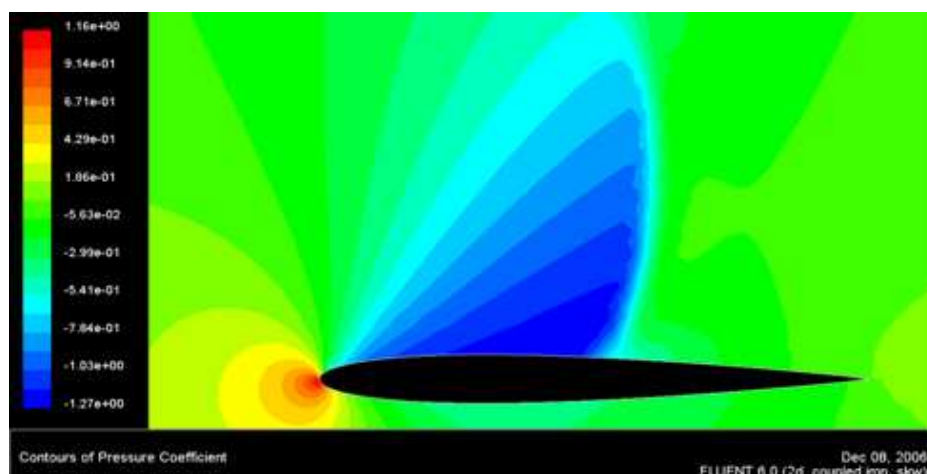
- Aumenta o  $c_{Lmax}$

Mas:

- Diminui a espessura relativa e gera as conseqüências em cima descritas.

Podemos notar que o aumento da força de sustentação implica também o aumento do arrasto. Assim, o compromisso do engenheiro aerodinâmico é maximizar a razão sustentação/arrasto em velocidade de cruzeiro, definindo assim o alcance da aeronave, respeitando as suas especificações.

Hoje, os métodos de resolução de dinâmica dos fluidos computacionais permitem, a partir da geometria do perfil e das condições de voo, determinar as características do escoamento e os coeficientes aerodinâmicos de sustentação ( $c_L$ ), arrasto ( $c_D$ ) e momento no bordo de ataque ( $c_{Mle}$ ). A figura abaixo mostra o campo de pressão ao redor de o perfil NACA0012 calculado pelo Fluent, um software de “Computational Fluid Dynamics” (ou CFD).



*Figura 3: Exemplo de estudo CFD de um escoamento transônico ao redor de um perfil*

Isso permitiu reduzir os custos experimentais pela diminuição dos números de protótipos necessários e acelerou consideravelmente as fases de projeto e de concepção de um novo aparelho.

No entanto, não existem ainda solução simples e barata do ponto de visto computacional para resolver o problema inverso: dados os coeficientes aerodinâmicos e a condição de voo, determinar a forma ótima do perfil. Vários estudos já foram feitos, usando os algoritmos de otimização conhecidos, mas elas se confrontam sempre a um mesmo problema: a geometria do aerofólio é em geral definida ponto por ponto e esses algoritmos são métodos iterativos. Eles necessitam então especificações robustas de definição de perfis a fim de evitar a construção de um aerofólio apresentando oscilações na sua geometria. A suavidade da solução final vai depender das restrições implementadas que podem se revelar muito complexas, implicando um custo computacional elevado. Essas restrições são por

exemplo uma limitação no gradiente entre 2 pontos, a ausência de ponto de inflexão, etc. Assim, é difícil determinar o perfil ótimo que corresponderia às especificações iniciais levando em conta se o resultado obtido é realístico ou não.

Por isso, foi identificada a necessidade de usar uma função suave para definir a geometria e com isso, determinar os coeficientes aerodinâmicos ( $c_L$ ,  $c_D$ ,  $c_{Mle}$ ) com métodos de baixo custo computacional, podendo servir de base à resolução do problema inverso.

## 2. Justificativas

O objetivo desse trabalho é implementar um processo que permitiria melhorar a robustez do problema inverso sem aumentar consideravelmente o custo computacional. Ele se limita então à determinação dos  $c_L$ ,  $c_D$ ,  $c_{Mle}$  em função da geometria do perfil. Seria o primeiro passo para meta-modelagem.

O princípio é determinar para o cálculo dos coeficientes aerodinâmicos de um perfil, um método não iterativo. A geometria dos perfis será definido por uma função suave dependendo de poucos parâmetros para poder melhorar a robustez do problema inverso, evitando assim fenômenos de oscilações, como foi explicado acima. Para ser validado, esse método tem que apresentar as vantagens seguintes, em comparação com CFD:

- Ser mais rápido, a fim de garantir um custo computacional menor.
- Ter uma precisão suficiente.
- Levar em conta a viabilidade dos perfis estudados.
- Poder ser exportado ou integrado num processo para um possível estudo de problema de otimização inverso.

Além disso, o estudo bidimensional é somente uma parte do processo de definição de uma aeronave, como foi explicado inicialmente. E uma função de baixo custo computacional (comparado com CFD) que determine os coeficientes aerodinâmicos de cada perfil ao longo da asa tridimensional pode ser implementado num processo global de estudo aerodinâmico da aeronave, ou mesmo ser usado como parte de um estudo multidisciplinar.

Esse projeto responde então a necessidades identificadas na área aerodinâmica e de maneira mais geral, aeronáutica.



### 3. Objetivo concreto

Foi escolhido um meta-modelo de rede neural para atender as exigências do problema. Uma rede neural é um modelo de cálculo esquematizado nos neurônios do ser humano.

O funcionamento da rede neural tem que ser dividida em duas partes:

- Um período de aprendizagem durante a qual a rede é treinada, analisando os dados obtidos por os métodos clássicos de CFD.
- A utilização da rede: depois da aprendizagem, ela será capaz de determinar as especificações correspondendo a uma dada geometria de aerofólio.

Embora a necessidade de criar um banco de dados de amostras e de treinar a rede implica um custo computacional importante, na fase de utilização, o resultado desejado pode ser obtido de maneira muito mais rápida.

A coleta dos dados de CFD foi feita usando o solver NSC2KE e o gerador de malha BAMG, detalhados mais adiante. Essa coleta de dados se revelou longa devido à quantidade importante de amostras necessárias.

Do mesmo modo, o período de aprendizagem também pode tomar um certo tempo para rede neural convergir, devido ao tamanho do banco de dados que será analisado. Essa aprendizagem foi efetuada selecionando perfis realísticos a fim de justamente levar em conta unicamente resultados viáveis.

## II- Esquema global do projeto

O projeto pode ser dividido em três etapas bem distintas.

### 1. Etapa 1: Escolha e definição dos parâmetros geométricos de entrada

Primeiro, é necessário definir quais são as características de definição da geometria de um aerofólio. Pois, poderíamos defini-lo pelas coordenadas de  $m$  pontos no extradorso e  $n$  pontos no intradorso, mas precisaria entre 150 e 200 parâmetros de entrada para poder definir a forma do perfil de maneira precisa. Um número de variáveis de entrada tão grande seria inviável para treinar a rede. Pois, necessitaria um número de amostras tão grande que o custo computacional ganho pelo uso da rede não iria compensar o tempo perdido a gerá-las. Além disso, não atenderia as exigências do problema, predefinidas precedentemente. Foi então escolhida uma função desenvolvida por Brenda M. Kulfan e John E. Bussoletti, ambos da Boeing, apresentada mais adiante e que permite justamente definir a evolução geométrica do aerofólio a partir de poucos parâmetros.

### 2. Etapa 2: Geração do banco de dados de amostras obtido por métodos computacionais de alta-fidelidade: CFD.

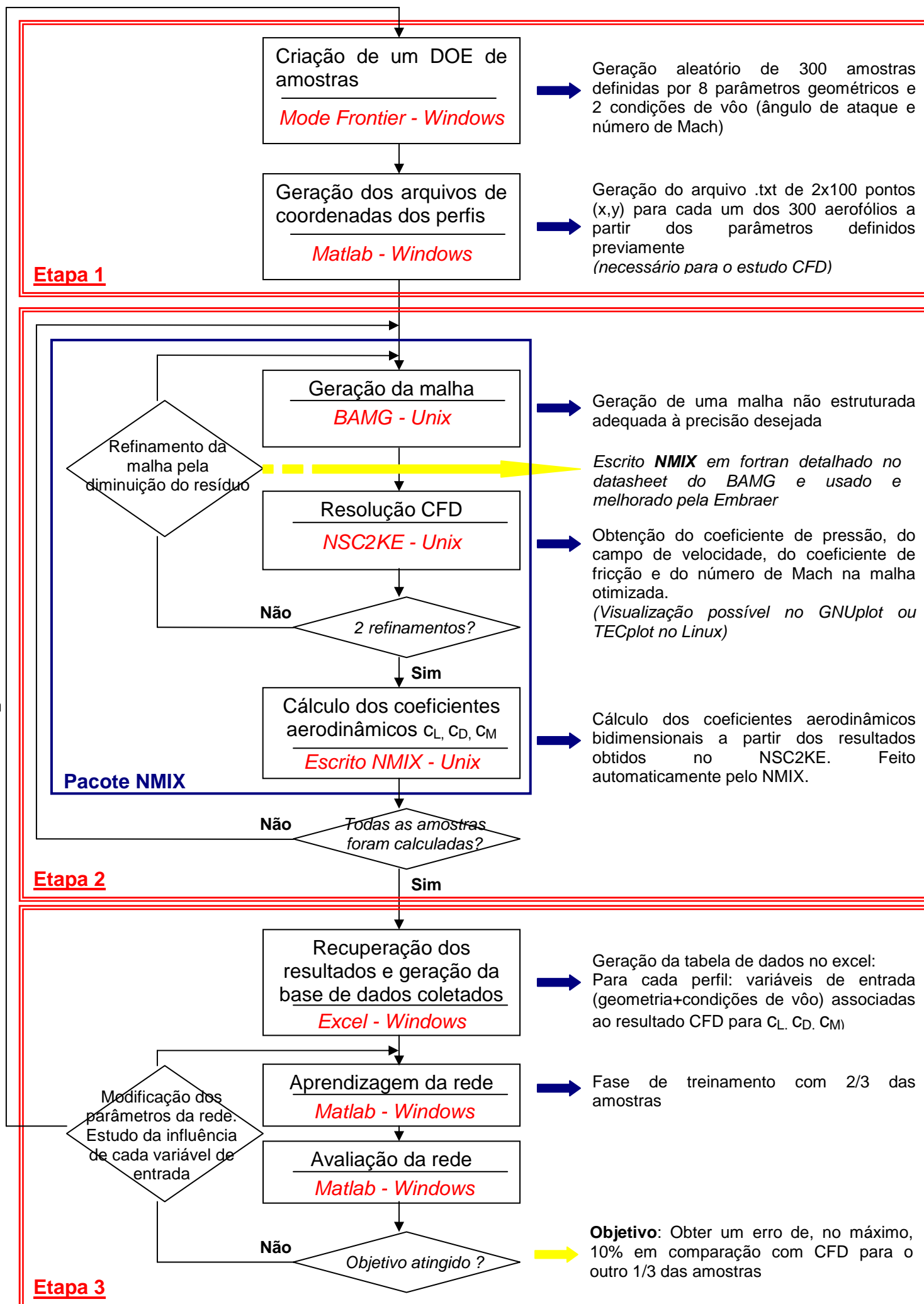
Nessa segunda etapa, o trabalho foca na realização de um processo de criação de banco de dados contendo as variáveis de entrada (geometria do aerofólio e condições de voo) e os parâmetros de saída (coeficientes aerodinâmicos  $c_L$ ,  $c_D$ ,  $c_{Mle}$ ) obtidos por método de CFD.

### 3. Etapa 3: Treinamento e avaliação da rede neural.

Essa etapa corresponde à geração e à avaliação da rede neural. Essa foi implementada no Matlab, usando o “Neural Network Toolbox”.

### 4. Diagrama global de definição do processo

O diagrama da página seguinte apresenta as inter-relações entre cada etapa e sub-etapa, permitindo assim ter uma visão global do projeto.



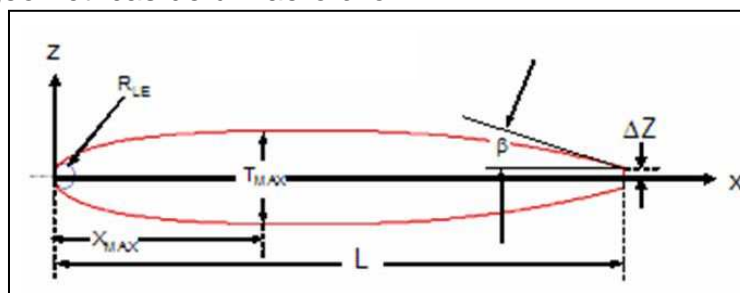
### III- Parametrização da geometria dos aerofólios

Para gerar as amostras, é necessário um painel de aerofólios que varre uma grande quantidade de “formas” distintas. Por isso, existem bancos de dados de aerofólios. Poderíamos por exemplo utilizar o programa Javafoil: ele contém vários dados geométricos de perfis NACA; o usuário indica o número de pontos desejados e ele calcula as coordenadas 2D. Portanto, ele não é conveniente para o nosso trabalho, pois a rede neural tem que “avaliar”, entre outras coisas, a influência da forma do perfil nos coeficientes aerodinâmicos. Por isso, é necessário achar “poucos parâmetros” que, quando variam, permitem gerar várias geometrias diferentes.

#### 1. Teoria geral da função de geometria

Assim, foi escolhida a utilização de uma função desenvolvida e apresentada por Brenda M. Kulfan e John E. Bussoletti da Boeing em 2001. O objetivo dessa representação matemática era justamente criar um aerofólio a partir de “poucos” parâmetros de entrada que varrem um amplo espaço de possibilidades para a aerodinâmica.

Antes de detalhar mais essa função, é necessário definir quais são as características geométricas de um aerofólio.



*Figura 4: Descrição da geometria de um aerofólio*

Como já foi citado, a geometria do perfil pode ser caracterizada pelas coordenadas do extradorso e do intradorso, mas pode também ser representada por alguns parâmetros mostrados na figura acima e que já foram identificados como devendo ser considerado num estudo aerodinâmico. São:

- O comprimento de corda “c”: todos os perfis considerados nesse estudo foram adimensionados, e  $c=1$ .

- o raio do bordo de ataque: influencia nas características do estol da asa. Ocorre fenômeno de estol quando o avião atinge o ângulo de ataque máximo de vôo.
- A espessura do bordo de fuga  $\Delta z$ .
- O ângulo  $\beta$  de fechamento da “cauda” do perfil: com o  $\Delta z$ , eles determinam se o escoamento sofre separação, afetando o arrasto.
- A espessura relativa e a posição  $x_e$  da máxima espessura
- O arqueamento e a posição  $x_a$  do máximo arqueamento
- A curvatura ao longo do extradorso e do intradorso: a priori, não existe nenhum dado “evidente” que permite definir a evolução da geometria entre o bordo de ataque e o bordo de fuga.

A descrição matemática de um aerofólio, que vale também para qualquer outro corpo com funcionalidade aerodinâmica de uma aeronave (leme, profundor, empenagem, flap, wingleet...) é uma função contínua, mas não analítica devido á derivada infinita no nariz do perfil e ás correspondentes altas variações de curvatura na superfície.

Assim, a expressão geral proposta por Brenda M. Kulfan e John E. Bussoletti <sup>1</sup> é:

$$\frac{z}{c} = \sqrt{\frac{x}{c}} \left(1 - \frac{x}{c}\right) \left( \sum_{i=0}^N A_i \left(\frac{x}{c}\right)^i \right) + \frac{x}{c} \frac{\Delta z_{TE}}{c}$$

$\sqrt{\frac{x}{c}}$  garante a forma circular do nariz;  $\left(1 - \frac{x}{c}\right)$  é necessário para obter uma forma pontuda no bordo de fuga; o termo em  $\Delta z_{TE}$  permite controlar a sua espessura; e  $\left( \sum_{i=0}^N A_i \left(\frac{x}{c}\right)^i \right)$  é uma função de forma que descreve de maneira única a geometria do aerofólio entre os bordos de ataque e de fuga.

Assim, a expressão geral da geometria foi dividida em duas funções: a função de classe e a função de forma.

---

<sup>1</sup> KULFAN, B.M, BUSSOLETTI, J.E, “**Fundamental**” **Parametric Geometry Representations for Aircrafts Component Shapes**, 11th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, 6 - 8 September 2006, Portsmouth, Virginia

Para a função de forma, ou “shape function”:  $S(x) = \left( \sum_{i=0}^N A_i \left( \frac{x}{c} \right)^i \right)$

As condições de contorno em  $x=0$  e  $x=1$  impõem:  $S(0) = \sqrt{2 \frac{R_{LE}}{c}}$  e

$$S(1) = \tan \beta + \frac{\Delta z_{TE}}{c}$$

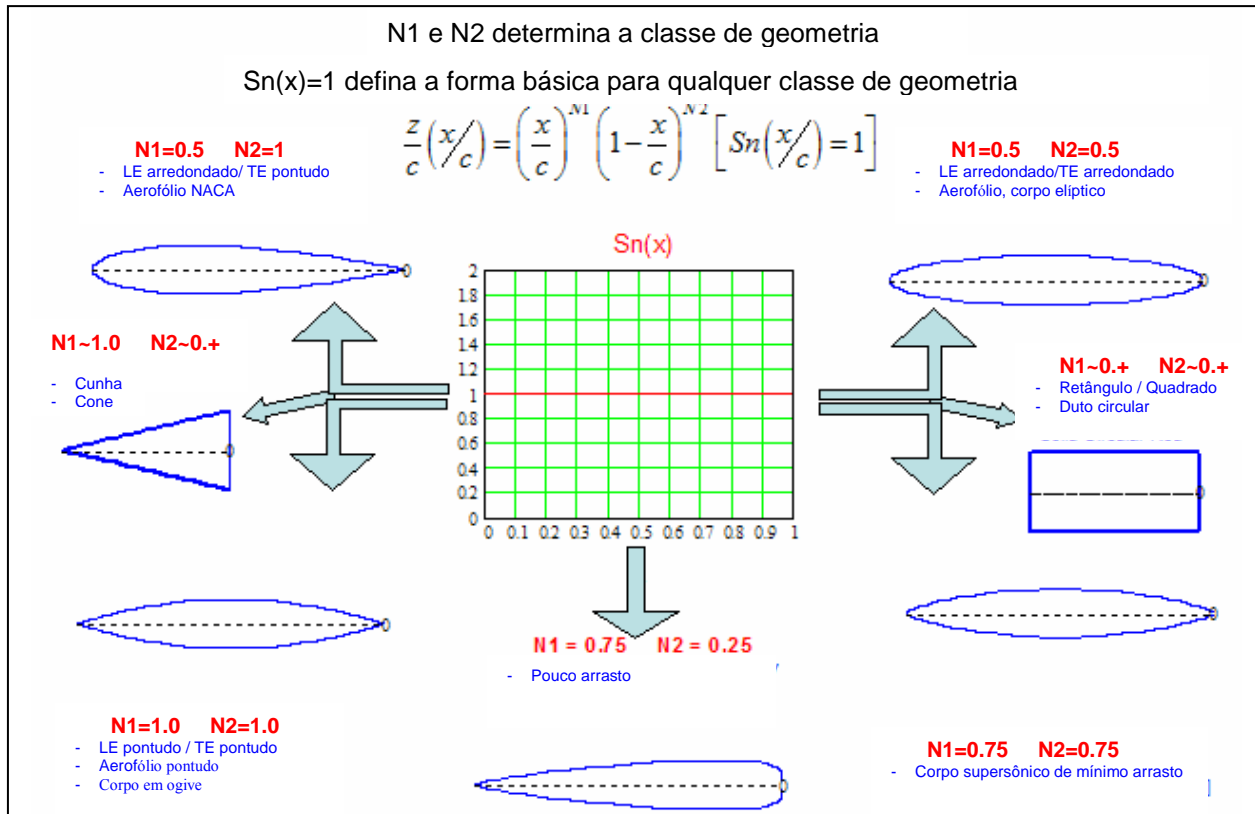
A função  $S(x)$  permite controlar os parâmetros do bordo de ataque e de fuga, além de definir a curvatura geral do aerofólio e assim, a espessura máxima e a posição dessa. Com a equação de definição, é fácil deduzir a função de forma de qualquer aerofólio já existente: Kulfan e Bussoletti mostraram que para o NACA0012, ela é quase uma reta. Assim, nota-se que essa função de forma é bem mais simples de estudar que a geometria em si.

Para a função de classe, ou “class function”:  $C\left(\frac{x}{c}\right) = \left(\frac{x}{c}\right)^{N_1} \left(1 - \frac{x}{c}\right)^{N_2}$

Esta generaliza o método para uma larga variedade de geometrias. Para o aerofólio, tipicamente que  $N_1=0.5$  e  $N_2=1$ .

a. *Variação dos parâmetros da função de classe*

Kulfan e Bussoletti estudaram a influência dos coeficientes  $N_1$  e  $N_2$  na geometria de um perfil. A figura abaixo mostra os casos extremos de geometria para a função de forma mais simples que existe: a função unitária.



*Figura 5: Classes geométricas fundamentais*

Alguns casos, como o triângulo ou o retângulo, são extremos e não entram no contexto de estudo da geometria de aerofólio, mas variações pequenas de  $N_1$  e  $N_2$  ao redor de 0.5 e 1 respectivamente definem novas formas de nariz e de cauda num perfil.

b. *Variação dos parâmetros da função de forma*

A função unitária já permite criar aerofólios realísticos. No entanto, ela não é suficiente para controlar os parâmetros de bordo de ataque e de fuga definidos pelas condições de contorno já citada anteriormente. Por isso, ela foi decomposta em dois componentes que permitem variar separadamente os valores em  $x = 0$  e  $x = 1$ :

$$S(x) = S_1(x) + S_2(x) = x + (1 - x) = 1$$

( $S(x)$  foi adimensionalizada para facilitar a notação matemática.)

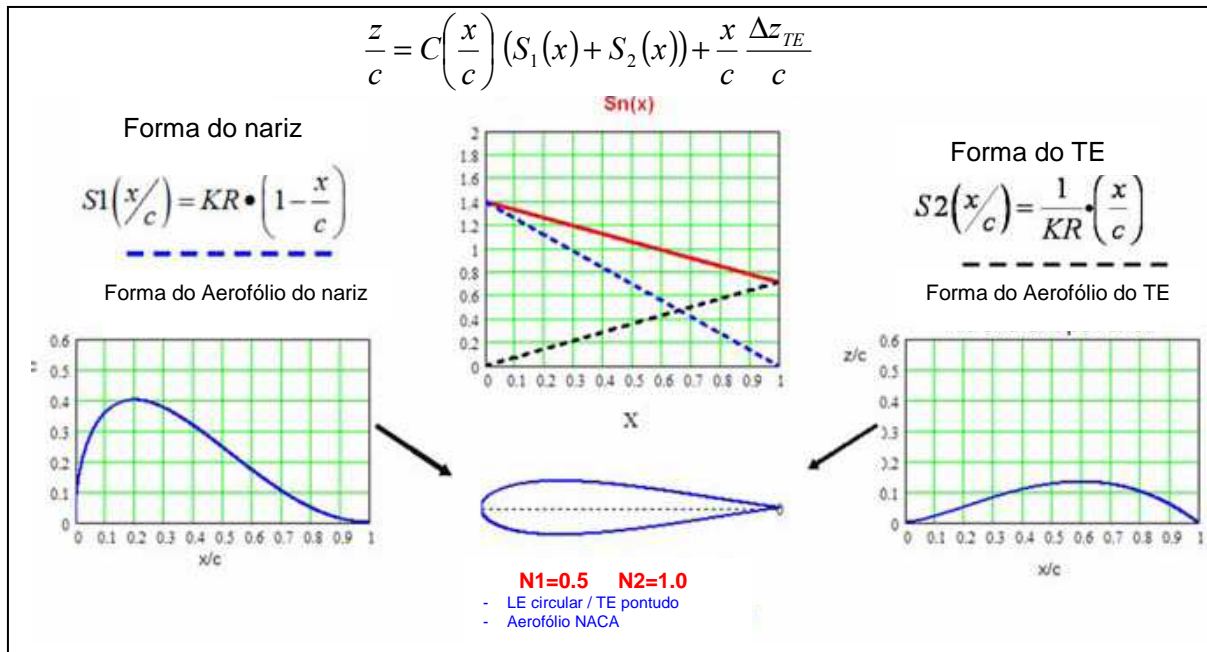


Figura 6: Influência dos componentes do polinômio de Bernstein de segundo ordem na geometria

Os componentes  $S_1$  e  $S_2$  têm uma influência respectivamente na parte dianteira e traseira do perfil. Pois,  $S_1$  tende a 0 em  $x = 1$  e  $S_2$  em  $x = 0$ . Multiplicando cada componente por um coeficiente variável, pode-se assim impor o comportamento da função de geometria nos bordos de ataque e de fuga. Portanto, não permite controlar ainda o comportamento da curvatura dos aerofólios. Foram então introduzidos os polinômios de Bernstein, cuja especificação é que eles são iguais à unidade para qualquer ordem:

$$BP_n(x) = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} x^i (1-x)^{n-i} = 1$$

Ao aumentar a ordem do polinômio da função de forma, aumenta-se também o número de componentes de forma e assim a precisão e a variedade dos perfis (mas também o número de parâmetros). Somente o primeiro termo define o raio do bordo de ataque, assim como somente o último termo define o ângulo do bordo de fuga. Além disso, é fácil notar que o máximo da função de forma será localizado em  $\left(\frac{x}{c}\right)_{S_{\max}} = \frac{i}{n}$ . Na definição da geometria, esse máximo depende também das

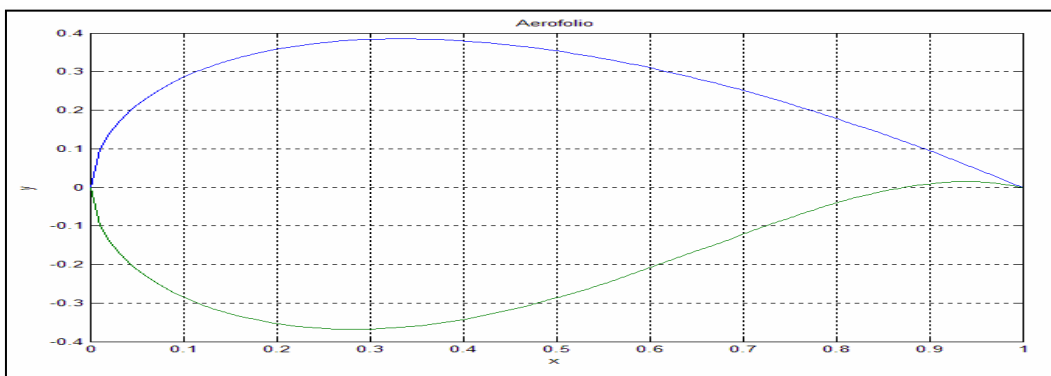
características da função de classe:  $\left(\frac{x}{c}\right)_{z_{\max}} = \frac{N_1 + i}{N_1 + N_2 + n}$ .

Pode-se assim controlar tanto as extremidades como o arqueamento ou a espessura do aerofólio, assim como as posições dos seus máximos em  $x$ .



## 2. Parâmetros usados

Para esse projeto, foi utilizada a função com polinômios de Bernstein de ordem 3. A figura abaixo representa um aerofólio gerado a partir desses. Pode-se notar que esse aerofólio tem uma boa representatividade, comparando com como é imaginado um perfil. Os estudos de comparação realizados por Kulfan e Bussoletti demonstraram que um aerofólio realístico teria que ser definido no mínimo por um polinômio de ordem 8. Portanto, o objetivo desse trabalho se limita a comparar e avaliar os resultados obtidos para uma dada geometria definida por essa função. Assim, só será avaliado o cálculo feito pela rede neural considerando poucos parâmetros de entrada. Uma vez realizado esse trabalho, será fácil acrescentar o número de parâmetros de entrada e a ordem do polinômio de definição da geometria a fim de acrescentar o painel de aerofólios modeláveis e tornar o problema mais realista. Bastará acrescentar o número de amostras constituindo a base de treinamento da nova rede.



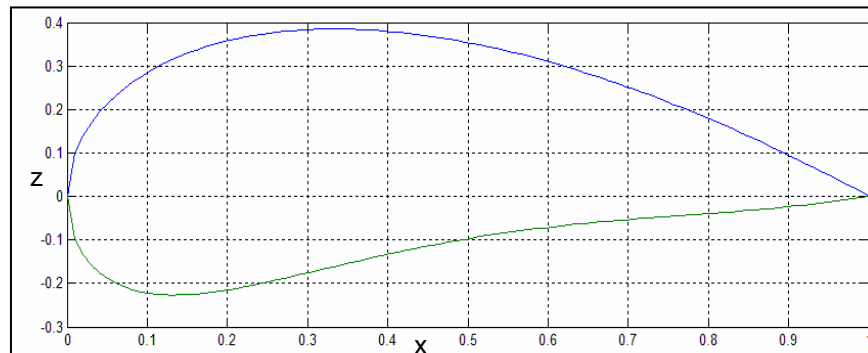
*Figura 7: Exemplo de aerofólio “típico” gerado no Matlab pela função de parametrização geométrica de ordem 3*

Obtemos assim uma função com dez parâmetros de entrada que definem a geometria do aerofólio:

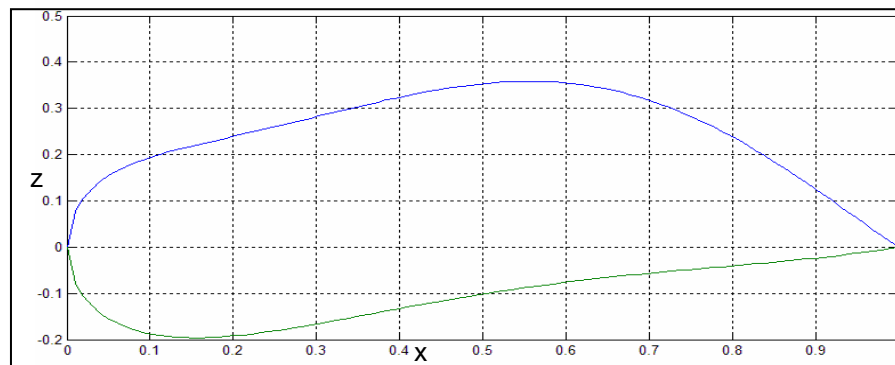
- O  $\Delta z$  do bordo de fuga
- 2 parâmetros da função de classe:  $N_1$  e  $N_2$
- 4 parâmetros correspondendo aos pesos de cada componente do polinômio de Bernstein de ordem 3 que definem as coordenadas do extradorso:  $k_{up}(1)$ ,  $k_{up}(2)$ ,  $k_{up}(3)$ ,  $k_{up}(4)$ .
- 4 parâmetros que correspondem aos pesos de cada componente do polinômio de Bernstein de ordem 3 que definem as coordenadas do intradorso:  $k_{lo}(1)=k_{up}(1)$ ,  $k_{lo}(2)$ ,  $k_{lo}(3)$ ,  $k_{lo}(4)$ .

Adicionando todas essas variáveis, resultaria em 11 parâmetros. Portanto, existe uma condição de continuidade em  $x = 0$  que implica que o peso do primeiro componente dos polinômios do intradorso e do extradorso sejam iguais. Pois, o raio do nariz do perfil deve ficar constante.

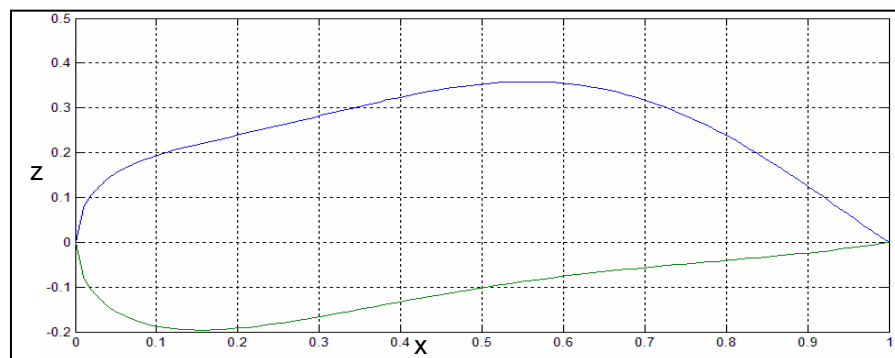
Essa função foi programada no Matlab, calculando 100 pontos para o intradorso e 100 para o extradorso do perfil<sup>2</sup>. As figuras 8, 9, 10, 11 e 12 apresentam alguns perfis obtidos variando os valores dos parâmetros de entrada. Para todos os perfis, a função de classe foi mantida constante:  $N_1=0.5$ ,  $N_2=1$ ,  $\Delta z=0$ .



*Figura 8: Aerofólios com parâmetros da função de forma:  
 $k_{up}=[1 \ 1 \ 1 \ 1]$  e  $k_{lo}=[k_{up}(1) \ 0.2 \ 0.1 \ 0.3]$*

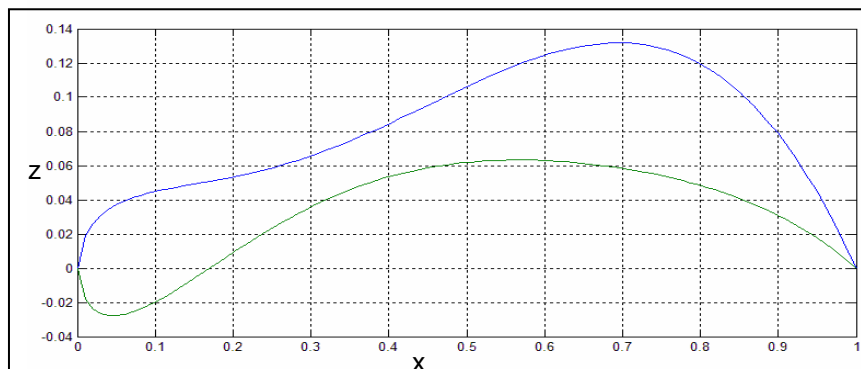


*Figura 9: Aerofólios com parâmetros da função de forma:  
 $k_{up}=[0.8 \ 0.2 \ 1.8 \ 1.2]$  e  $k_{lo}=[k_{up}(1) \ 0.3 \ 0.1 \ 0.3]$*



*Figura 10: Aerofólios com parâmetros da função de forma:  
 $k_{up}=[0.4 \ 0.2 \ 0.8 \ 0.1]$  e  $k_{lo}=[k_{up}(1) \ -0.3 \ -0.1 \ -0.4]$*

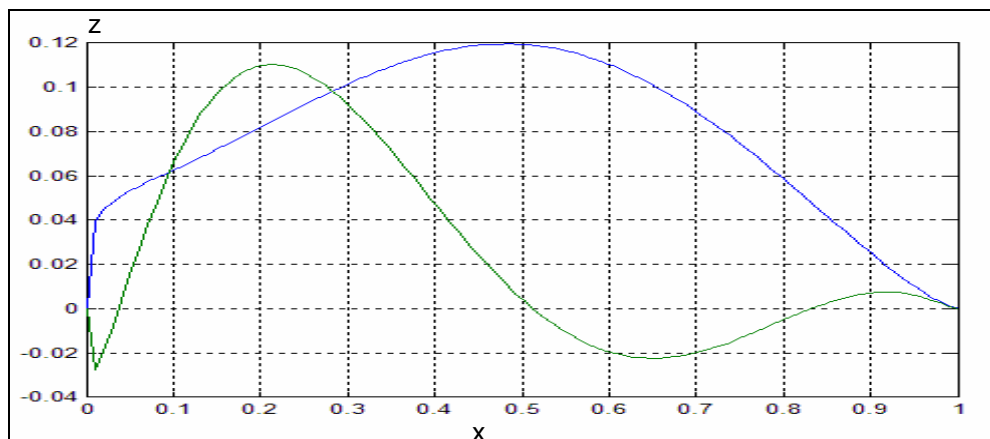
<sup>2</sup> Programa disponível no anexo 1 p.62



*Figura 11: Aerofólios com parâmetros da função de forma:  
 $k_{up}=[0.2 \ 0 \ 0.4 \ 1]$  e  $k_{lo}=[k_{up}(1) \ -0.3 \ -0.1 \ -0.4]$*

Pode-se notar que algumas figuras não são representativas da realidade e relembando o objetivo, a rede neural tem que poder levar em conta a viabilidade dos perfis estudados, embora o polinômio da função de geometria seja limitado à ordem 3. Por isso, devem ser definidos critérios de aceitação da geometria. Observando as variações, podemos pensar em alguns critérios básico.

O primeiro e o mais óbvio dos critérios seria imposto na coordenada z:  $z_{up} > z_{lo}$ , para evitar situações como a da figura 12 onde o intradorso do aerofólio intercepta o extradorso.



*Figura 12: “Aerofólio” com arqueamento muito “negativo” no intradorso*

Deve-se impor um critério também na curvatura: a oscilação forte da figura 11 não pode ser aceitável: assim, tem que ser definido um máximo na variação do gradiente ao longo do perfil.

Pela definição da função, pode ser anotado que cada coeficiente de  $k_{up}$  influencia em partes diferentes da extradorso. Pois, o  $k_{up}(2)$  (ou  $k_{lo}(2)$ ) influencia bastante a curvatura na região mais próxima ao bordo de ataque enquanto o  $k_{up}(3)$  (ou  $k_{lo}(3)$ ) influencia mais na região próxima ao bordo de fuga. Assim, mais o

$k_{up}(2)$  (ou  $k_{lo}(2)$ ) é alto, mais o  $k_{up}(3)$  (ou  $k_{lo}(3)$ ) pode ser alto: As variações aceitáveis do  $k_{up}(3)$  tendem a ser limitadas pelo valor do  $k_{up}(2)$  (ou  $k_{lo}(2)$ ).

Tentando limitar o  $k_{up}(2)$ , foi observado que ele pode variar bastante nos valores positivos (entre 0 e 2). Quando ele possui valor negativo, o extradorso tem um arqueamento relativamente acentuado por dentro. Por simetria, seria o caso do  $k_{lo}(2)$  da figura 11. Porém, no intradorso pode se autorizar um arqueamento mais côncavo, por isso, o  $k_{lo}(2)$  pode possuir valores negativos até um limite inferior a definir.

Apareceu a necessidade de definir quantitativamente esses critérios. Para defini-los analiticamente, precisaria fazer um estudo teórico das derivadas primeiras e segundas da função. Porém, foi privilegiado um estudo experimental para esse caso.

### 3. Estudo do comportamento dos parâmetros para casos reais

Para esse estudo, foram selecionados 15 perfis transônicos dentro de um banco de dados de aerofólios<sup>3</sup>. Foram desconsiderados os perfis de helicópteros.

O primeiro passo foi o cálculo dos coeficientes dos polinômios de Bernstein para cada perfil. Para isso, foi usada uma função inversa utilizando ferramentas de otimização do Matlab. Essa função está disponível no anexo 2.a) e 2.b) p.63-64. Tem que ser precisado que, para poder calcular os parâmetros de cada geometria, as coordenadas têm que ser ordenadas numa certa ordem: do bordo de fuga, passando pelo extradorso, até o bordo de ataque e descendo pelo intradorso até voltar ao bordo de fuga. Além disso, o número de pontos e as coordenada em  $x$  do extradorso têm que ser iguais aos do intradorso. Por isso, foi necessário reordenar os arquivos de geometria dos perfis recuperados no banco de dados de aerofólios citado em cima. A lógica seguida para essa reordenação está especificada no anexo 2.c) p.65

Nessa função, os parâmetros  $N1$  e  $N2$  da função de classe são fixados respectivamente a 0,5 e 1.

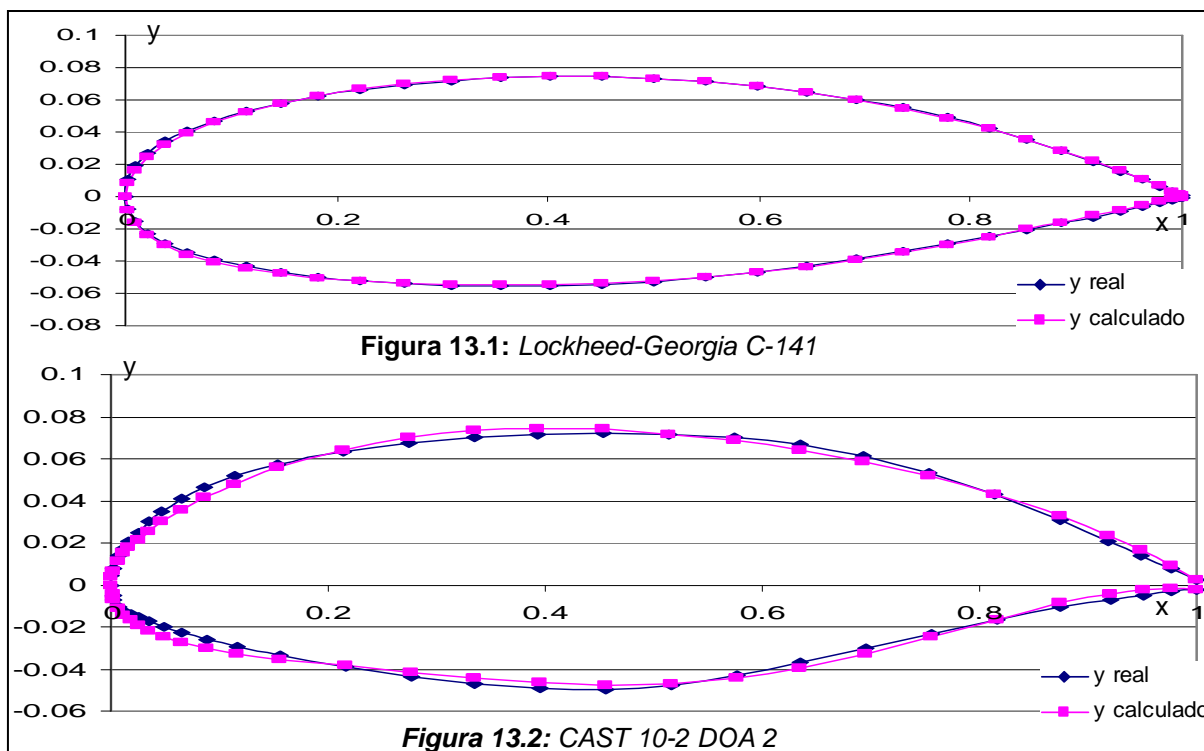
---

<sup>3</sup> Tabelas de coordenadas (x,y) disponíveis no **UIUC Airfoil Data Site**, disponível em <http://www.ae.uiuc.edu/m-selig/ads.html>

	3º ordem							
	k <sub>up</sub> (1)	k <sub>up</sub> (2)	k <sub>up</sub> (3)	k <sub>up</sub> (4)	k <sub>lo</sub> (2)	k <sub>lo</sub> (3)	k <sub>lo</sub> (4)	delta_z
Lockheed-Georgia C-141	0,16884	0,18308	0,21625	0,28651	0,09564	0,19758	0,12479	0,00055
Lockheed-Georgia C-5A	0,14584	0,15797	0,18707	0,26897	0,16017	0,22443	0,08248	0,00130
CAST 10-2/DOA 2	0,13236	0,22860	0,16211	0,30667	0,02110	0,29768	-0,04755	0,00250
McDonnell/Douglas DSMA-523 with sharp trailing edge	0,19037	0,07539	0,16956	0,29414	0,02774	0,40485	-0,35929	0,00031
McDonnell/Douglas DSMA-523 with blunt trailing edge	0,18547	0,08478	0,15976	0,29914	0,06018	0,32421	-0,24194	0,00031
Grumman/Gulfstream GIII	0,13786	0,20970	0,09443	0,17711	0,07712	0,20015	0,15200	0,00018
Boeing KC-135	0,16593	0,35815	0,13551	0,20633	0,09971	0,25910	0,03210	0,00000
NLR NLR-7301	0,28503	0,12807	0,34602	0,20510	0,02967	0,46332	-0,21992	0,00055
NPL FROM ARC CP 1372	0,14114	0,06122	0,20849	0,14779	0,16013	0,17050	-0,03417	0,00000
RAE 2822	0,12315	0,15780	0,19956	0,20094	0,17468	0,18282	-0,06325	0,00000
RAE(NPL) 5212	0,15857	0,21811	0,17273	0,25278	0,05274	0,21857	-0,09470	0,00000
RAE(NPL) 5213	0,15740	0,16348	0,15498	0,15971	0,01129	0,21179	-0,12489	0,00000
RAE 5214	0,15887	0,14643	0,15653	0,16043	0,00723	0,21507	-0,12520	0,00000
RAE 5215	0,16078	0,12844	0,17084	0,16543	-0,00931	0,24091	-0,18635	0,00380
RAE6-9CK	0,12315	0,15780	0,19956	0,20094	0,17468	0,18282	-0,06325	0,00000

*Tabela 1: Parâmetros calculados para cada um dos aerofólios reais selecionados*

A fim de avaliar a precisão dessa função inversa, foram recalculadas as coordenadas dos aerofólios a partir dos parâmetros achados, usando a função do anexo 1. A figura 13 apresenta a sobreposição entre a geometria inicial real e a geometria recalculada para 2 dos 15 perfis da tabela de cima. Todos os perfis podem ser visualizados no anexo 3 p.66.



*Figura 13: Comparação entre as coordenadas reais e calculadas a partir dos coeficientes da função da Boeing de ordem 3 para 2 aerofólios transônicos*

Pode se observar que vários perfis são aproximados bem grosseiramente. A tabela abaixo apresenta o erro médio relativo e absoluto resultando da aproximação geométrica feita a partir da função da Boeing.

	Erro médio		Erro absoluto máximo	$ y _{\max}$ real
	relativo	absoluto		
Lockheed-Georgia C-141 (figura 13.1)	3,47 %	0,00073	0,00283	0,074
Lockheed-Georgia C-5A (figura 13.2)	2,34 %	0,00039	0,00245	0,066
CAST 10-2/DOA 2	11,43 %	0,00232	0,00524	0,072
McDonnell/Douglas DSMA-523 with sharp trailing edge	6,39 %	0,00115	0,00398	0,055
McDonnell/Douglas DSMA-523 with blunt trailing edge	28,57 %	0,00139	0,00805	0,055
Grumman/Gulfstream GIII	5,17 %	0,00112	0,00439	0,061
Boeing KC-135	12,37 %	0,00294	0,00757	0,092
NLR NLR-7301	17,30 %	0,00206	0,00687	0,088
NPL FROM ARC CP 1372	27,29 %	0,00254	0,00000	0,058
RAE 2822	5,11 %	0,00032	0,00116	0,063
RAE(NPL) 5212	156,01 %	0,00183	0,00594	0,073
RAE(NPL) 5213	48,41 %	0,00198	0,00627	0,061
RAE 5214	47,62 %	0,00205	0,00641	0,058
RAE 5215	124,56 %	0,00205	0,00646	0,058
RAE6-9CK	5,11 %	0,00032	0,00116	0,063
Embraer 190 root	7,19 %	0,00151	0,00475	0,079
Embraer 190 tip	106,29 %	0,00077	0,00282	0,058
Embraer 190 kink	13,13 %	0,00052	0,00222	0,058

*Tabela 2: Erros relativos e absolutos para as novas geometrias calculadas*

Para 7 perfis dentro dos 18, o erro passa dos 25%, 3 deles passando dos 100%. Esse erro tem duas explicações:

- A função inversa utilizada usa uma função de otimização e por isso não é exata. A aproximação pode então ser ruim em alguns pontos.
- Escolhemos limitar o trabalho a uma aproximação de ordem 3. Para definir melhor os perfis, seria necessário aumentar a ordem da função da Boeing, a fim de aumentar as possibilidades de variações da curvatura.

Além disso, observando o erro absoluto médio, pode-se notar que na maioria dos casos, ele não excede 0,002 e os maiores erros absolutos não correspondem aos maiores erros relativos. Se comparar o máximo erro absoluto com o  $|y|_{\max}$ , esse valor é em média de 10% do  $|y|_{\max}$ .

Assim, a forma global dos aerofólios é conservada. Isso pode ser observada nas figuras do anexo 3 onde são sobrepostas as geometrias iniciais e calculadas dos 15 perfis. Pois, a função inversa de cálculo dos parâmetros tenta aproximar o melhor possível a forma dos perfis e os desvios são devidos ao fato que alguns dos

aerofólios apresentam altas variações de curvatura e não podem ser aproximados por uma função de ordem 3, como já foi dito em cima.

A nova geometria constitui um aerofólio “aceitável” para o projeto. Foi então estudado a variação de cada um dos 8 parâmetros da função da Boeing ( $8=10-2$  porque  $N_1$  e  $N_2$  foram fixados).

	3° ordem							
	k_up(1)	k_up(2)	k_up(3)	k_up(4)	k_lo(2)	k_lo(3)	k_lo(4)	delta_z
Valor mínimo	0,12286	0,06122	0,09443	0,14779	-0,00931	0,17050	-0,35929	0,00000
Valor máximo	0,28503	0,35815	0,34602	0,30667	0,17468	0,46332	0,15200	0,00380
Média	0,16270	0,16138	0,18225	0,22339	0,08251	0,25840	-0,08055	0,00072
Variação à média	0,02719	0,04734	0,03127	0,04338	0,05165	0,06153	0,10735	0,00075
% de variação	16,71%	29,33%	17,16%	19,42%	62,60%	23,81%	133,27%	104,19%

*Tabela 3: Variação dos 8 parâmetros de geometria da função da Boeing avaliados em 18 casos*

A tabela 3 mostra que os parâmetros possuem uma boa variação ao redor da média, provando assim que eles podem varrer um intervalo de valores definido se baseando nos valores mínimo e máximo achados para os perfis reais aproximados.

Finalmente, os seguintes critérios foram escolhidos para se limitar a perfis aceitáveis:

	3° ordem							
	k_up(1)	k_up(2)	k_up(3)	k_up(4)	k_lo(2)	k_lo(3)	k_lo(4)	delta_z
Min variação	0,10	0,05	0,05	0,10	-0,05	0,15	-0,40	0,000
Max variação	0,30	0,40	0,40	0,35	0,20	0,50	0,20	0,004

*Tabela 4: Restrições aplicadas aos parâmetros geométricos de entrada da rede neural*

Atenção: foi também considerado um segundo tipo de restrição: o não-cruzamento do intradorso com o extradorso sempre foi verificada nas amostras geradas aleatoriamente.

#### 4. Criação da base de perfis

Para gerar a base de aerofólios, foi usado o software *ModeFrontier*.

O ModeFrontier é uma ferramenta de otimização da empresa Esteco comercializado pela ESSS no Brasil. Ele permite também integrar vários softwares a fim de programar um processo onde interagem vários domínios (concepção geométrica, CFD, estruturas e custo de fabricação, por exemplo). Inicialmente, era previsto aproveitar essa possibilidade e integrar o processo de geração das amostras. Teriam então interagidos o Matlab no Windows, o BAMG (gerador de malha), NSC2KE (solver CFD) no Unix e de novo o Matlab no Windows. Porém, ao começar um estágio na Embraer, outros recursos foram disponíveis para desenvolver esse projeto, particularmente o NMIX (escrito de integração do BAMG e do NSC2KE no Unix) e a acessibilidade aos clusters Unix para rodar os casos. Finalmente, o ModeFrontier foi usado como um gerador de DOE (Design Of Experiments) para a geração da base de perfis.

Cada amostra é caracterizada por **10 parâmetros**:

- 8 parâmetros geométricos cujas limitas de variações foram definidas na página anterior. Os coeficientes e o  $\Delta z$  foram respectivamente definidos com uma precisão de  $10^{-2}$  e  $10^{-4}$ .
- 2 parâmetros de vôo:
  - O número de Mach: entre 0.5 e 0.9, limitado a regime transônico (precisão de  $10^{-2}$ )
  - O ângulo de ataque: entre  $-1^\circ$  e  $3^\circ$  (precisão de  $10^{-1}$ )

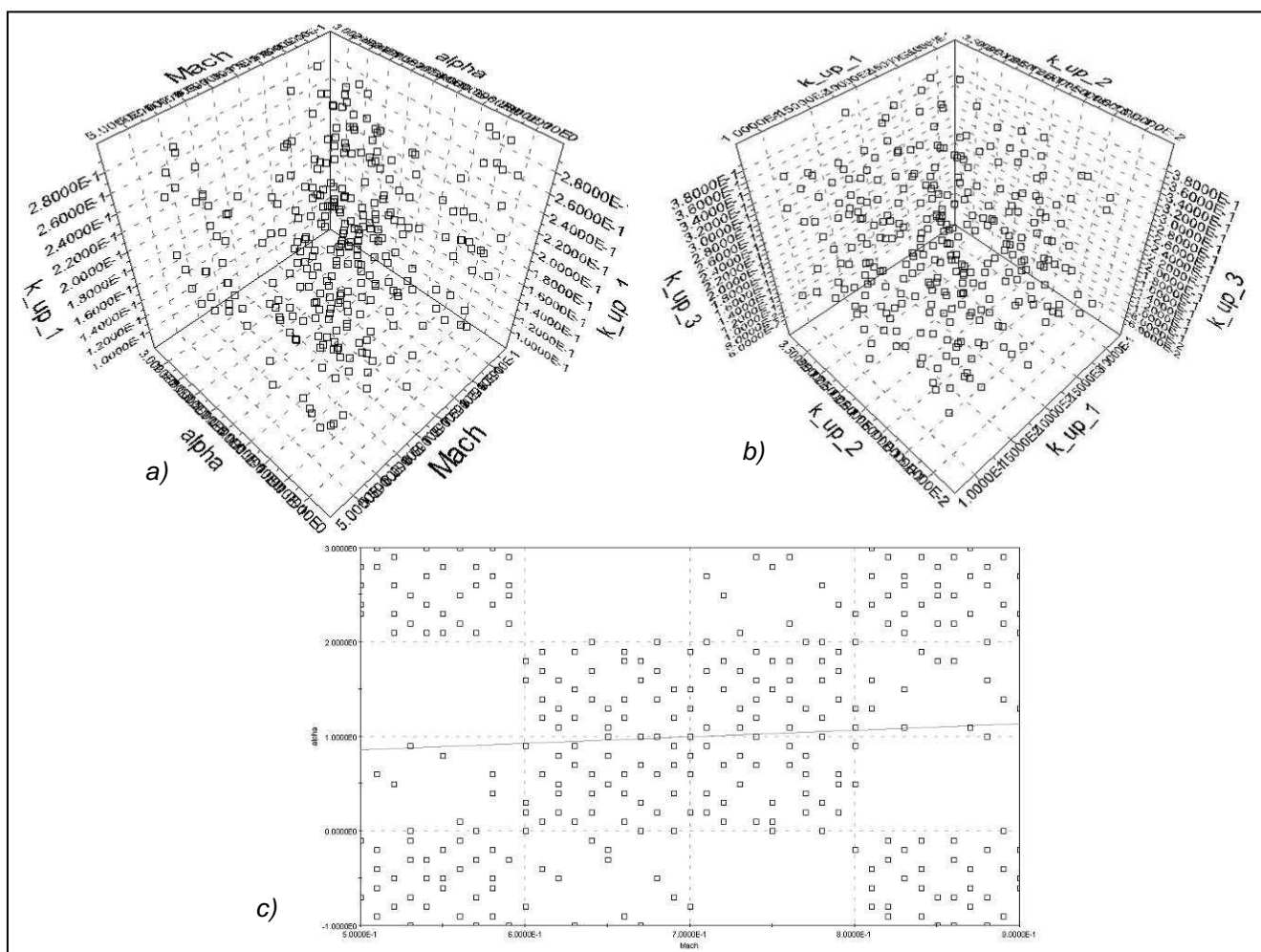
Um DOE de 300 amostras foi gerado a partir do algoritmo *Sobol* caracterizado por a sua capacidade a cobrir o mais uniformemente possível o domínio de definição de uma função.<sup>4</sup> As seguintes figuras permitem visualizar a repartição das amostras em função de alguns parâmetros. Pode-se observar que, em particular para figura b), as amostras são bem espalhadas. Porém, alguns espaços do domínio de definição das condições de vôo (figura c)) não contêm nenhuma amostra. A varredura do domínio de definição é importante. Mas tem que precisar que esses espaços correspondem a variações de  $\alpha$  de  $1^\circ$  e variações de Mach de 0,1. A rede

---

<sup>4</sup> Tabela disponível no anexo 4 p.68



neural tem que poder definir uma relação mesmo faltando alguns valores, o regime do escoamento sendo o mesmo.



**Figura 14:** Distribuição das 300 amostras no domínio de definição da função:

- a) de  $\alpha$ , Mach e  $k_{up}(1)$
- b) de  $k_{up}(1)$ ,  $k_{up}(2)$  e  $k_{up}(3)$
- c) de  $\alpha$  e Mach

Os perfis cujo intradorso e extradorso se cruzam foram rejeitados automaticamente durante o estudo CFD, por ser incalculáveis. Em 300 amostras aleatórias, 280 foram viáveis enquanto 20 foram excluídas. A notar que já tinha sido observada a forma de alguns perfis antes de começar as rodadas da etapa seguinte a fim de fazer uma primeira avaliação “visual”.

Assim, para os parâmetros definidos, 94% dos aerofólios são aceitáveis, o que valida essas restrições.

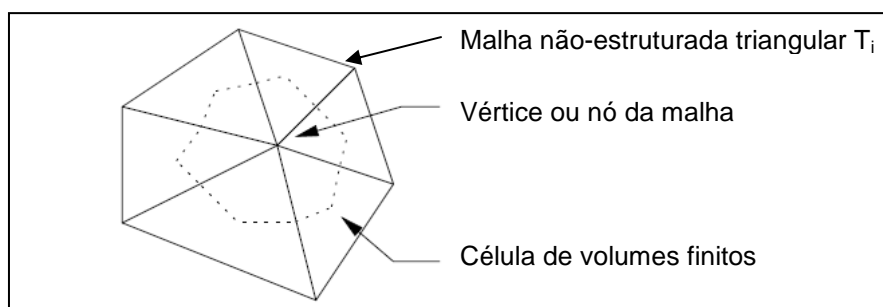
A próxima etapa agora é o cálculo dos coeficientes aerodinâmicos por método CFD.

## IV- Determinação dos coeficientes aerodinâmicos por CFD

Num primeiro momento, precisa selecionar um programa que permitirá calcular esses coeficientes para um grande número de amostras a fim de gerar a base de treinamento da rede. Por isso, é importante selecionar um programa com baixo custo computacional, ou seja, poucas iterações necessárias para obter um resíduo baixo e/ou um tempo de processamento baixo para cada iteração. Por isso, foi selecionado o solver NSC2KE, associado ao gerador de malha BAMG.

### 1. O código NSC2KE

O solver NSC2KE foi desenvolvido em 1994 pelo laboratório de automação francês INRIA: “Institut National de Recherche en Informatique et Automatique”. Programado em Fortran, ele permite resolver as equações de Euler e Navier-Stokes usando o método de Volumes Finitos-Galerkin para o cálculo de escoamento 2D ou axisimétrico em malhas não-estruturadas.<sup>5</sup> Na figura 15, pode-se visualizar uma célula de volume finito dentro de uma malha bidimensional.



*Figura 15: Célula de volume finito em dimensão dois*

Além disso, ele possui um modelo de turbulência  $k-\epsilon$  que pode ser integrado às equações de Navier-Stokes. A parte convectiva das equações é simulada usando o método de volumes finitos. A simulação da parte viscosa é baseada no método de elementos finitos. Assim, são usadas interpoladores de Galerkin para determinar o termo de difusão.

O NSC2KE determine, para cada nó da primeira malha superficial, o coeficiente de pressão e o coeficiente de fricção ao longo do aerofólio assim que a distribuição de pressão, o campo de velocidade, e o resíduo em pressão em cada nó do volume de estudo.

<sup>5</sup> Técnicas de resolução numéricas do NSC2KE detalhadas na referência: MOHAMMADI, B., **Fluid Dynamics Computation with NSC2KE – An User-Guide – Release 1.0**, INRIA, Maio 1994, disponível em: <http://pauillac.inria.fr/cdrom/www/nsc2ke/fra.htm>

Esse código vem sendo utilizado pela Embraer. Pois, para o cálculo do escoamento num perfil, ele possui um custo computacional menor que o Fluent, por exemplo, ou qualquer outro software comercial. Esse baixo custo computacional pode ser explicado também pelo fato do NSC2KE ser limitado a modelos 2D ou axisimétrico.

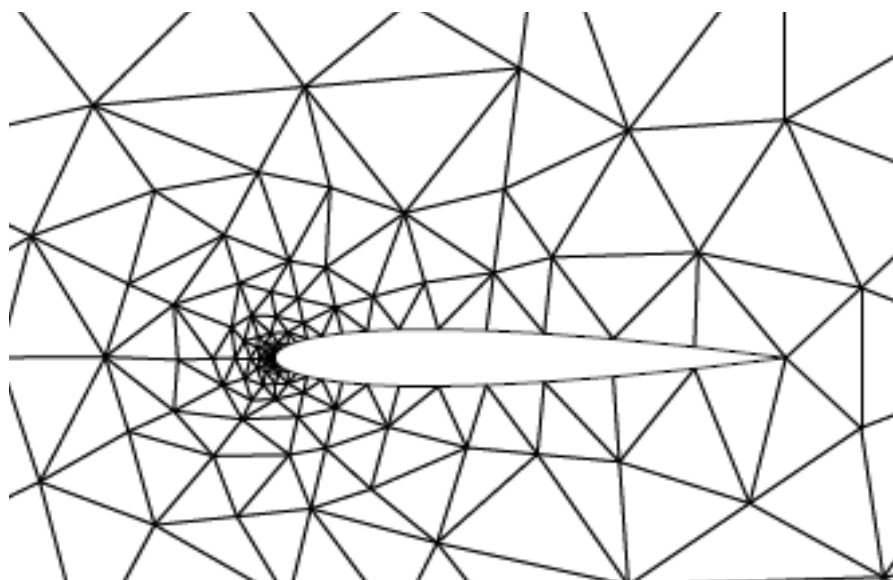
Assim, para perfis de aerofólios, o NSC2KE é perfeitamente adequado.

## 2. Pré-processamento: geração da malha

Para ser compilado, o NSC2KE precisa na entrada de um arquivo \*.amdba gerado somente por dois outros códigos da INRIA: o BAMG e o EMC2. Portanto, o gerador de malha teve que ser escolhido entre esses dois. Os dois são códigos Fortran que rodam em estações Unix.

O EMC2 possui uma interface gráfica para o usuário poder controlar a geração da malha enquanto o Bamg é diretamente controlado via comando do terminal.

Considerando a necessidade de integração dos códigos entre eles para a geração do “loop” de refinamento da malha, o Bamg era o único adequado.



*Figura 16: Malha gerada no Bamg, sem refinamento.*

Para todas as malhas geradas nesse trabalho, como a da figura 16, o “infinito” foi delimitado por um campo ao longe circular de raio 200, todos os perfis sendo adimensional.

### 3. O NMIX

O NMIX é um script em Fortran desenvolvido na Embraer. Ele integra o BAMG e o NSC2KE e calcula, a partir dos resultados dos coeficientes de pressão e de fricção obtido pelo solver, os coeficientes aerodinâmicos. Ele possui duas vantagens para o nosso problema. Ele permite:

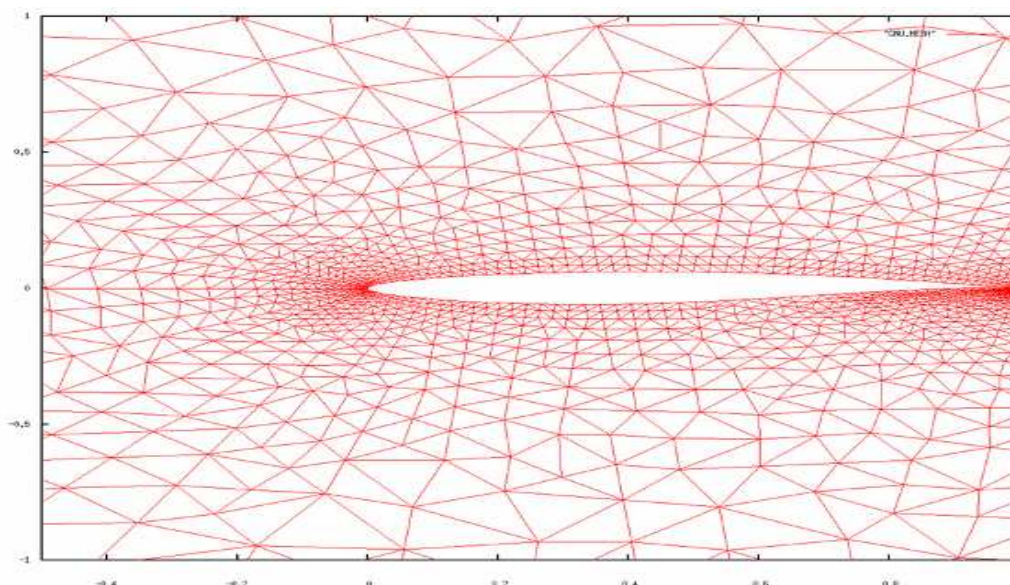
- Refinar a malha automaticamente para aumentar a precisão do resultado.
- Rodar vários casos um depois do outro lendo um arquivo de entrada.

Essa integração é importante para o projeto porque seria inviável ter que rodar os 300 casos um a um.

#### *a. Processo de refinamento da malha*

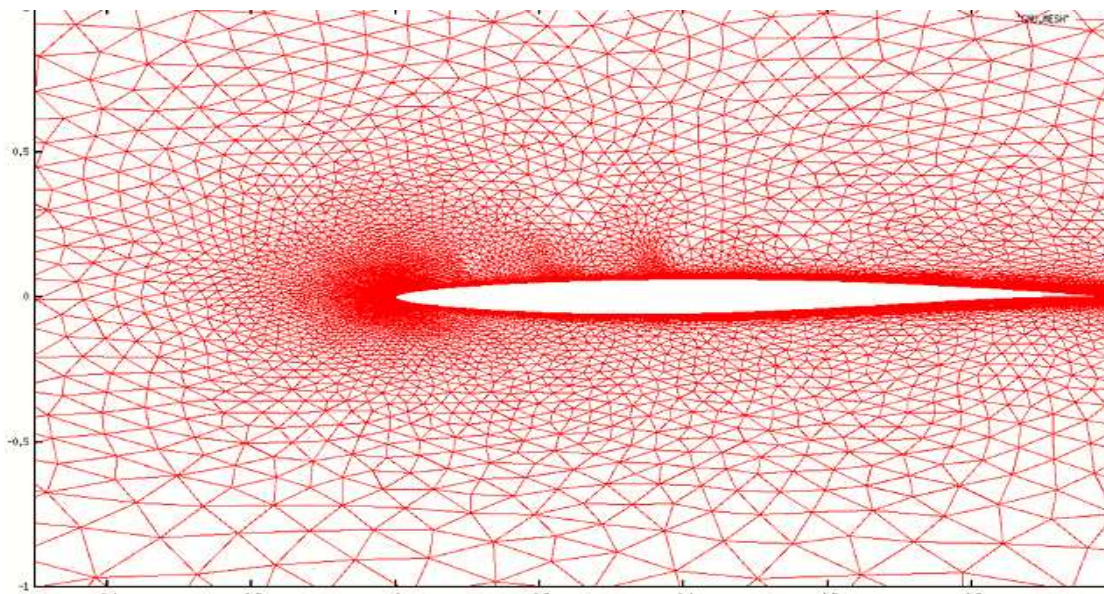
Ele é inspirado no script disponível no manual do BAMG<sup>6</sup> e foi desenvolvido pela Embraer para uso interno.

A partir da leitura do arquivo de geometria de um aerofólio, uma primeira malha grosseira é gerada. O solver NSC2KE vai rodar  $n$  iterações (número especificado pelo usuário) e calcular o gradiente de pressão entre cada elemento da malha. Nos domínios onde os gradientes são maiores que um certo limite calculado automaticamente no escrito do NMIX, a malha será refinada pelo BAMG.



*Figura 17: Primeira malha pouco refinada gerado no BAMG*

<sup>6</sup> HECHT, F., **BAMG: Bidimensional Anisotropic Mesh Generator**, draft version v0.58, INRIA, Outubro 1998, disponível em: <http://pauillac.inria.fr/cdrom/www/Bamg/fra.htm>



*Figura 18: Malha do BAMG depois de 4 refinamentos (e um total de 6000 iterações)*

As figuras 17 e 18 permitem comparar a diferença de refinamento entre a primeira e a quarta malha gerada pelo BAMG, no caso de um refinamento todas as 2000 iterações. Esse refinamento permite aumentar a precisão do cálculo. Por isso, é necessário determinar o número de refinamentos (e o número de iterações) para obter um bom compromisso entre a precisão do resultado e o custo computacional. Pois, o custo computacional é um parâmetro importante considerando o número de casos a rodar. Esse estudo está apresentado a seguir, no subparágrafo 4. dessa parte.

#### *b. Integração das 300 rodadas*

O NMIX foi desenvolvido com objetivo de poder rodar uma geometria em varias condições de vôo diferentes. Mas é possível também rodar várias geometrias para todas as condições de vôo especificadas. Assim, modificando um pouco o script, é possível rodar cada geometria associada aos seus parâmetros de vôo determinados durante a geração aleatória do banco de dados de perfis.<sup>7</sup>

---

<sup>7</sup> Disponível no anexo 4 p.68

### c. Arquivos de entrada

Para rodar o NMIX, o usuário precisa definir vários parâmetros repartidos em 4 tipos de arquivos de entrada.

- O *data.run*<sup>8</sup>: contém as especificações de set-up da rodada global: por exemplo as equações a resolver (Navier-Stokes no caso do regime transônico), o modelo de turbulência utilizado (Spalart-Allmaras), o tamanho do farfield (raio de 200 para uma corda de 1), etc.
- O *data.lst*: contém as condições de voo a serem rodadas para cada perfil especificados no *data.profs* assim que o número de refinamento, o número de iterações por refinamento e o coeficiente de multiplicação final, parâmetros estudados no subparágrafo 4. O número de Reynolds é fixado a  $5,7 \cdot 10^6$  para todas as amostras.
- O *data.profs*: contém a definição dos perfis: nome de arquivo de geometria, path, ...
- Os *arquivos de geometria*: são arquivos *.dat* contendo, na primeira linha, o número total de pontos (199 para os perfis do banco de dados: 100 pontos no intradorso e 100 no extradorso, o bordo de ataque sendo contado uma vez só) e as coordenadas (x,z) na seguinte ordem: saindo do bordo de fuga, subindo no extradorso até o bordo de ataque, descendo pelo intradorso até voltar ao bordo de fuga.

Foi necessário criar um script no Matlab para a geração desses arquivos de entrada correspondendo ao nosso banco de dados: 300 arquivos *.dat* de geometria e 3 arquivos *data*.<sup>9</sup>

---

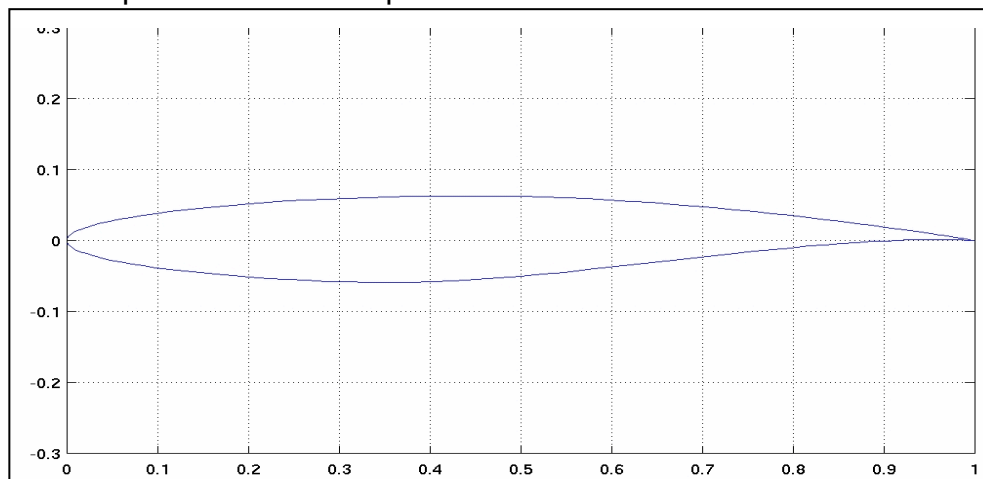
<sup>8</sup> Um exemplo desse arquivo está disponível no anexo 5 p.75

<sup>9</sup> Script disponível no anexo 6 p.77



#### 4. Estudo da influência dos parâmetros de set-up nos resultados do RAE2822

A fim de definir o melhor valor dos parâmetros para ter um “baixo” custo computacional com uma boa precisão, foram estudadas várias possibilidades de rodadas com o perfil RAE2822 e os resultados foram comparados com testes feitos em túneis de vento para esse mesmo perfil.



*Figura 19: Perfil RAE2822*

As condições de vôos adotadas pelo estudo foram:

- $Re = 5,7 \cdot 10^6$
- $M = 0,676$
- $\alpha = 2,4$

Os resultados obtidos em túnel de vento para essas condições são:

$C_L$	$C_D$	$C_{MLE}$
0,73096	0,01212	-0,09010

*Tabela 5: Resultados de túnel de vento para o RAE2822*

A precisão desejada se limita ao primeiro número. Os três parâmetros testados são:

- O número de refinamento (coluna 1 da tabela da página seguinte)
- O número de iterações entre cada refinamento (coluna 2)
- O coeficiente de multiplicação do refinamento final (coluna 3)

O número total de iterações exprima-se em função desses parâmetros:

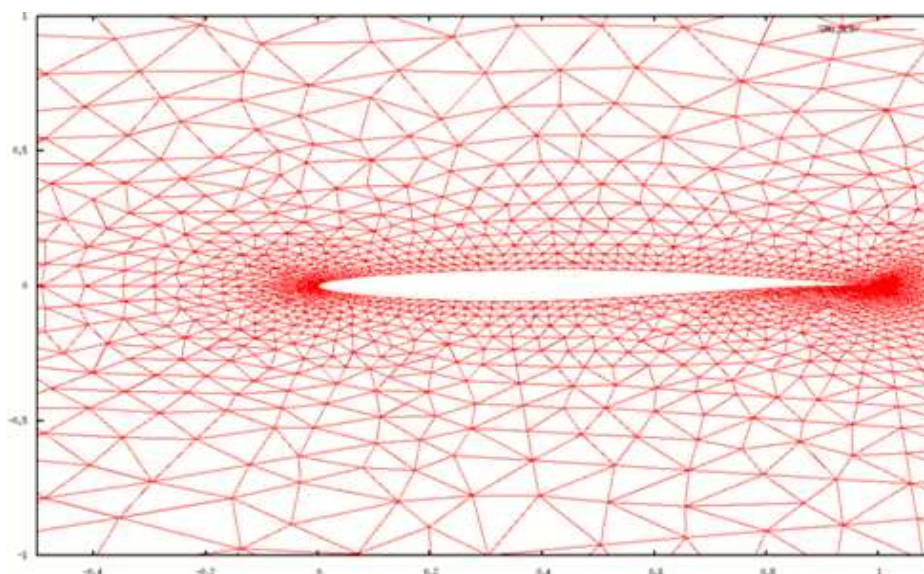
$$\text{Num\_iter\_total} = (\text{Num\_refinamento} - 1) * \text{Num\_iter} + \text{coef\_ref\_f} * \text{Num\_iter}$$

A tabela da página seguinte apresenta os resultados obtidos.

N° adapt	set-up			Coeficientes aerodinâmicos			Erro absoluto		
	it	* final	tempo (min)	clt	cdt	cmt	clt	cdt	cmt
4	4	4	0	0,02850	0,02843	-0,01111	0,70246	0,01604	0,07899
1	500	1	1	0,24685	0,08458	-0,09370	0,48411	0,07246	0,00360
2	500	3	5	0,65756	0,01197	-0,06447	0,07340	0,00015	0,02563
3	500	4	13	0,55955	0,00439	-0,06662	0,17141	0,00773	0,02348
2	1000	2	6	0,68052	0,01609	-0,09257	0,05044	0,00397	0,00247
2	1000	4	11	0,69231	0,01399	-0,09082	0,03865	0,00187	0,00072
4	1000	4	29	0,65269	0,01017	-0,08622	0,07827	0,00195	0,00388
2	2000	4	17	0,70326	0,01391	-0,09291	0,02770	0,00179	0,00281
4	2000	4	39	0,66690	0,00934	-0,08640	0,06406	0,00278	0,00370
3	2000	5	34	0,59680	0,01077	-0,07336	0,13416	0,00135	0,01674
2	2000	6	23	0,70342	0,01392	-0,09300	0,02754	0,00180	0,00290
4	2000	6	55	0,66787	0,00927	-0,08637	0,06309	0,00285	0,00373
10	500	6	71	0,64557	0,01027	-0,08533	0,08539	0,00185	0,00477
4	3000	4	59	0,66625	0,00948	-0,08642	0,06471	0,00264	0,00368

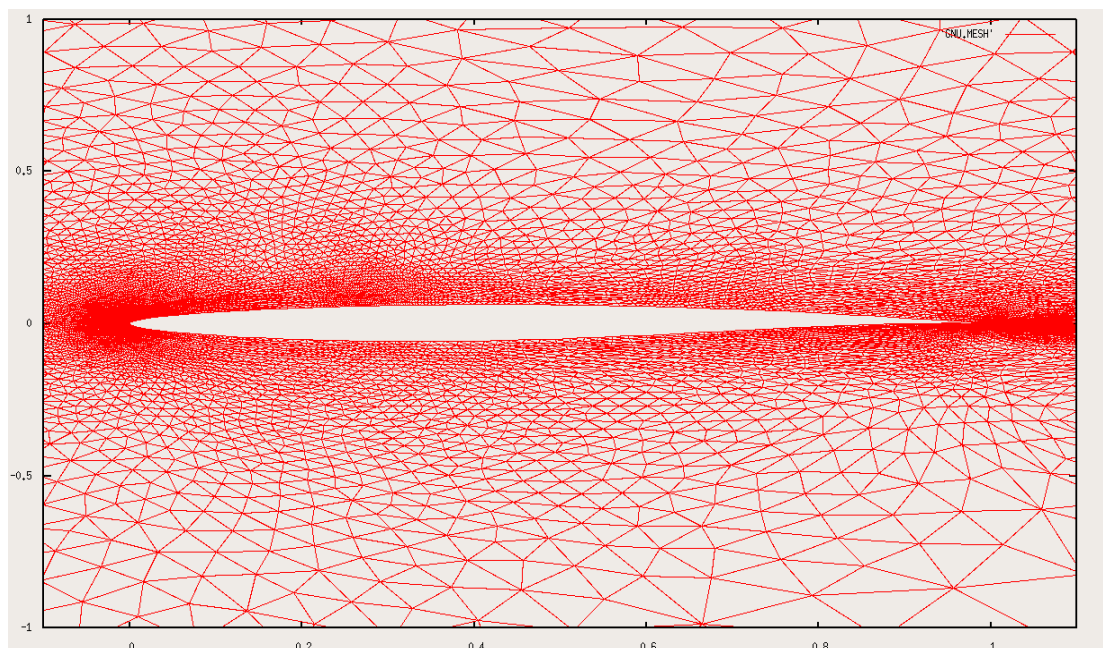
*Tabela 6: Resultados experimentais obtido pelo NMIX para o perfil RAE2822*

Bons resultados foram obtidos para as combinações (2,2000,4)=10 000 iterações e (2,2000,6)= 14 000 iterações. A diferença de custo computacional entre esses 2 resultados é apenas de 6 minutos. Assim, para garantir uma boa precisão para as 300 outras rodadas, foi escolhida a segunda solução com custo computacional um pouco maior, mas com mais iterações para garantir a convergência. As figuras 20 e 21 apresentam as 2 malhas utilizadas para o cálculo no caso selecionado. Pode-se observar, comparando as figuras 18 e 21, que o maior refinamento ocorre na segunda vez. Entre a segunda e a quarta, a diferença entre as malhas é muito menor, o refinamento sendo localizado majoritariamente na malha superficial.



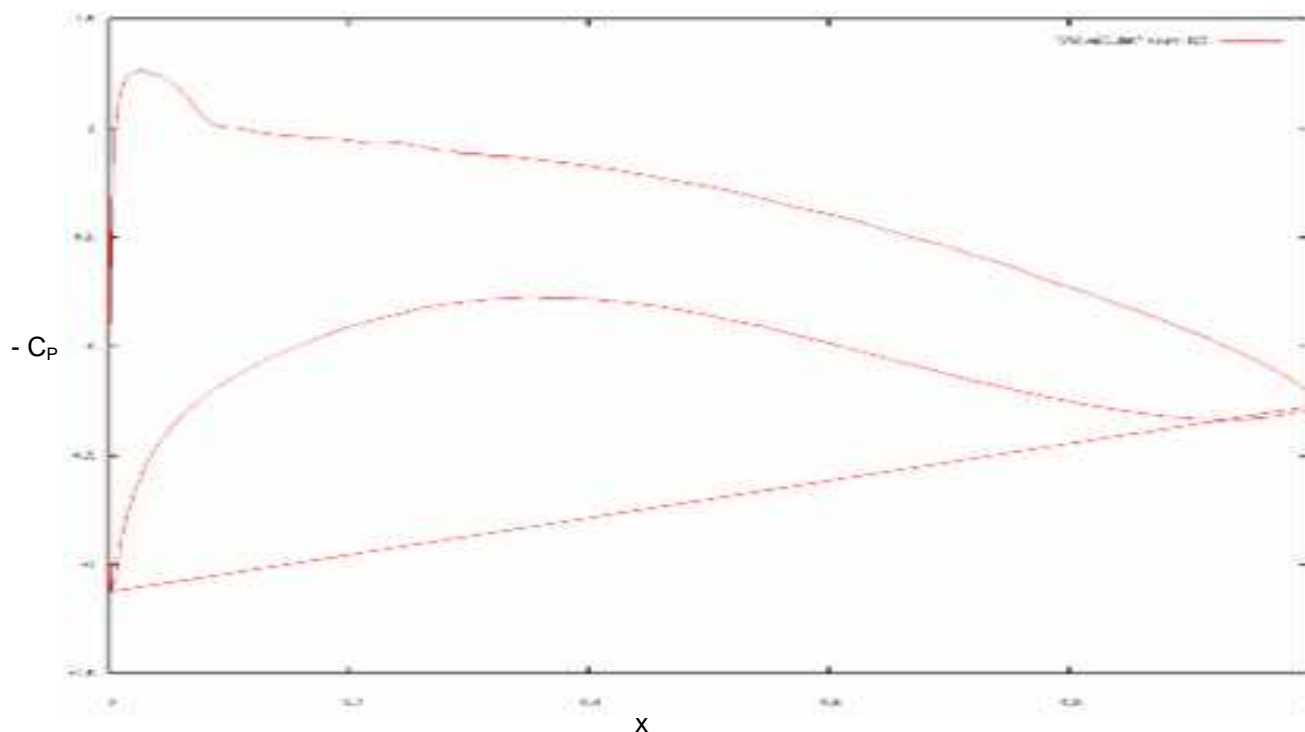
*Figura 20: 1ª Malha do RAE2822 para o caso (2,2000,6)*



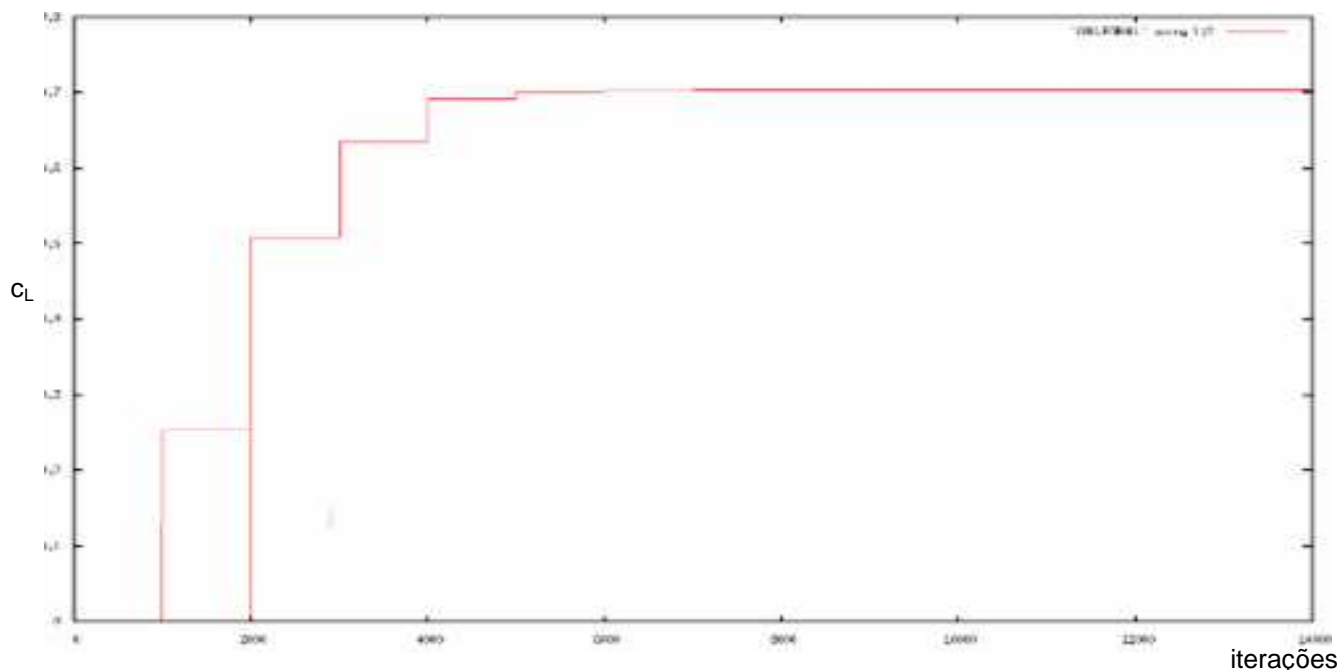


*Figura 21: 2<sup>ndo</sup> refinamento da malha do RAE2822 depois de 2000 iterações para o caso (2,2000,6)*

Foram verificadas a curva de distribuição de pressão no perfil (Figura 22), assim que a convergência da solução para confirmação (Figura 23): O resíduo em  $c_L$  vale:  $|dc_L| = 0,00011$



*Figura 22:  $C_p$*



*Figura 23: Evolução do  $c_L$  em função das iterações*

O arquivo de set-up *data.lst* foi então criado usando os parâmetros selecionados no estudo e os 300 aerofólios gerados foram rodadas. As rodadas foram efetuadas num dos clusters Unix da Embraer.

Em média, uma amostra demora entre 20 e 30 minutos para rodar. Assim, foram necessarias aproximadamente 125 horas para obter os resultados. Teoricamente, esses resultados poderiam ser obtidos em um pouco mais de 5 dias. Porém, 300 amostras necessitam um espaço em disco bastante grande. E devido as limitações encontradas, foi necessário dividir o conjunto de rodadas em várias para recuperar e apagar os resultados dos perfis que já tinham sido calculados a fim de deixar o espaço para os próximos. Assim, o tempo necessário se aproximou mais de duas semanas (ou 8 dias úteis na Embraer).

Das 300 amostras iniciais, 280 produziram resultados enquanto 20 perfis foram rejeitados. Assim, dispõe-se de um banco de dados de 280 amostras para modelar e simular a rede neural.

## V- A rede neural

A rede neural foi modelada no Matlab, usando a ferramenta integrada “Neural Network Toolbox”. Ela permite treinar, visualizar, simular e avaliar a rede e propõe vários algoritmos de treinamento e de adaptações.

Antes de apresentar os resultados obtidos, serão mostradas as características teóricas importantes de uma rede neural e o funcionamento do “Neural Network Toolbox”, aplicada a este caso específico.

### 1. Especificações da rede neural

O modelo da rede neural pode ser considerado como uma caixa preta caracterizada por suas variáveis de entrada e de saída. A tabela seguinte apresenta os 10 parâmetros de entrada e as restrições previamente determinadas e explicadas neste relatório.

<b>Variáveis de geometria</b>	k_up(1)	de 0,1 a 0,3
	k_up(2)	de 0,05 a 0,4
	k_up(3)	de 0,05 a 0,4
	k_up(4)	de 0,1 a 0,35
	k_lo(2)	de -0,05 a 0,2
	k_lo(3)	de 0,15 a 0,5
	k_lo(4)	de -0,4 a 0,2
	$\Delta z$	de 0 a 0.004
<b>Parâmetros de voo</b>	Ângulo de ataque $\alpha$	de -1 a 3°
	Número de Mach	de 0,5 a 0,9

Tabela 7: Parâmetros de entrada da rede neural: 8 variáveis de geometria e 2 parâmetros de voo

As 3 **variáveis de saída** são:

- O coeficiente de sustentação bidimensional:  $c_L$ ,
- O coeficiente de arrasto bidimensional:  $c_D$ ,
- O coeficiente de momento no bordo de ataque (leading edge):  $c_{Me}$

## 2. Características de uma rede neural

O funcionamento de uma rede neural é inspirado no modelo do neurônio (humano ou não). Ela é criada e otimizada a partir de métodos de aprendizagem. Internamente, a sua estrutura é dividida em dois níveis. Uma rede neural contém uma sucessão de camadas. Cada camada é composta de  $N$  neurônios. Eles pegam as suas entradas nas saídas dos neurônios da camada anterior. A figura 24 esquematiza a estrutura de uma rede neural composta por 3 camadas e 3 neurônios em cada camada. O número de camadas e de neurônios por camadas são características predefinidas pelo usuário.

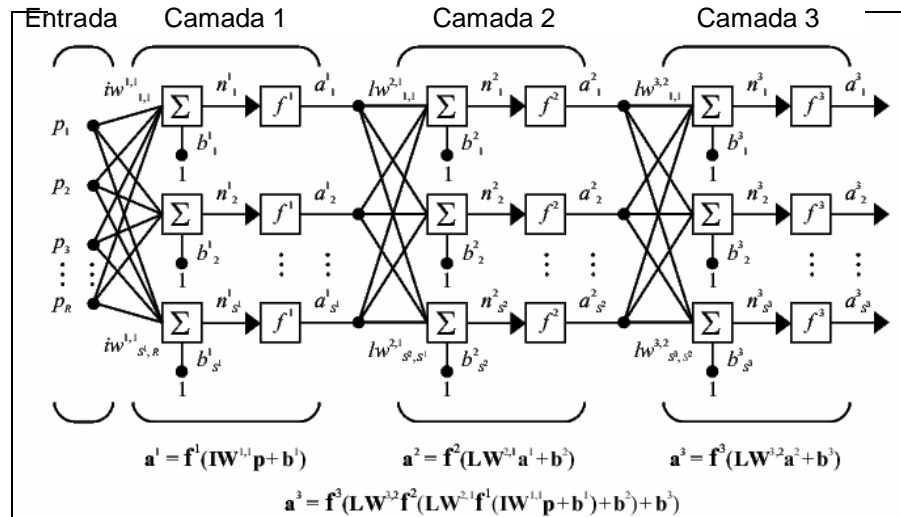


Figura 24: Estrutura simplificada de uma rede neural

Para entender melhor a figura 24, é isolado agora o funcionamento de um neurônio. Um neurônio pode ter várias variáveis de entrada, como já foi dito.

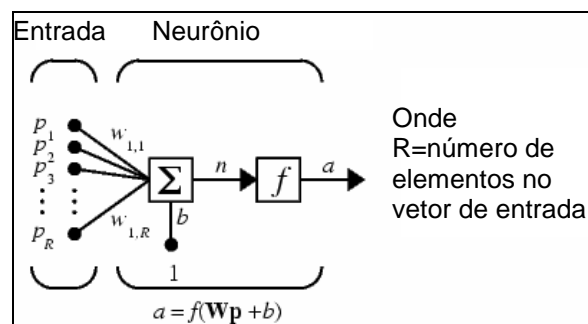


Figura 25: Funcionamento de um neurônio com  $R$  variáveis de entrada

Observando a figura 25, nota-se que cada variável de entrada tem um peso  $w_i$ . Esses pesos serão adaptados pela rede durante a fase de aprendizagem. Pode também ser introduzido um “offset”  $b$ , mas para este trabalho, o parâmetro não foi

considerado. Assim, a variável  $n$  de entrada da função  $f$  associada a um neurônio pode ser expressada, de maneira geral, como uma combinação linear ponderada das entradas:

$$n = w_{1,1}p_1 + w_{1,2}p_2 + \dots + w_{1,R}p_R + b$$

A função  $f$  associada a cada neurônio é também uma característica predefinida pelo usuário. Foram testadas, nesse trabalho, três funções diferentes representadas nas figuras 26, 27 e 28.

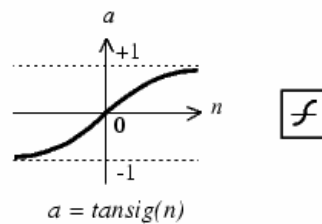


Figura 26: Função “tansig” do Neural Network Toolbox do Matlab

A função “tansig” garante que o valor da variável de saída do neurônio pertence ao intervalo  $[-1;1]$  para qualquer valor real das variáveis de entrada.

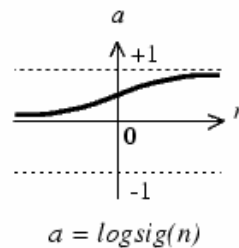


Figura 27: Função “logsig” do Neural Network Toolbox do Matlab

A função “logsig” garante que o valor da variável de saída seja positiva e no intervalo  $[0;1]$  para qualquer valor real das variáveis de entrada.

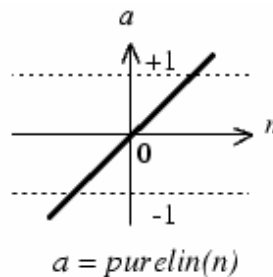


Figura 28 Função “purelin” do Neural Network Toolbox do Matlab

A função “purelin” é uma função linear. Ela não limita o valor de saída. Por isso, será utilizada em geral na última camada de uma rede neural, para não limitar as variáveis de saída da rede. No caso deste projeto, os coeficientes aerodinâmicos são, em geral, inclusos num intervalo  $[-1, 1]$ , o que permitiria usar a função “tansig”.

Porém não podemos excluir a possibilidade de um coeficiente ter um valor maior que 1 (ou menor que -1), pois dentro das amostras que foram rodadas em CFD, o máximo obtido para o  $c_L$  é de 1,01. Mas esse caso é raro (1 amostra em 280 rodadas), e foram efetuados também testes com a função “tansig” para camada de saída.

A função  $f$  é definida para uma camada inteira. Assim, todos os neurônios de uma mesma camada seguirão o mesmo tipo de formulação “tansig”, “logsig” ou “purelin”. Porém, o peso  $w$  de cada variável de entrada é calculado independentemente para cada neurônio, durante a fase de aprendizagem.

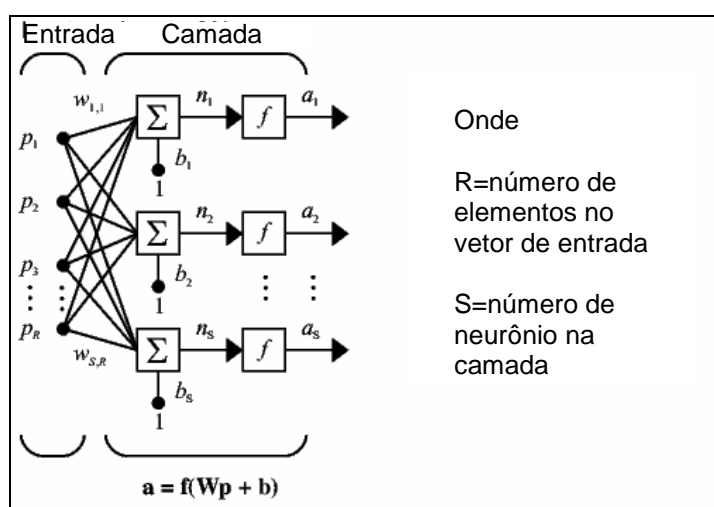


Figura 29: Camada de neurônios

A figura 29 representa uma camada da rede. As saídas dessa camada correspondem às entradas da camada seguinte da rede neural.

Além disso, as redes neurais são também caracterizadas pelo esquema de cálculo dos pesos que elas adotam, além do algoritmo de treinamento. Assim, foi sempre testado vários tipos de rede: foram consideradas as redes com “feed-forward backpropagation”, “cascade-forward backpropagation” e “Elman backpropagation”. Uma rede com “feed-forward backpropagation” permite, a partir das formulações não-lineares de cada camada, deduzir uma relação não-linear entre a entrada e a saída. A diferença entre o “cascade-forward propagation” é que esse último tipo de rede introduz também conexão (e pesos) entre duas camadas não consecutivas, por exemplo, entre a camada 1 e a camada 3, acelerando assim a convergência. Uma rede “Elman” tem uma formulação de pesos ainda diferentes das duas anteriores.

Afinal, a rede tem que ser treinada a partir de uma função de treinamento. A função de treinamento do “Neural Network Toolbox” usada foi a função “train” de base.

Antes de treinar uma rede neural, algumas especificações têm que ser pré-definidas. Recapitulando aqui, são: o número de camadas, o número de neurônios por camada, a função de formulação de cada neurônio e o tipo de rede. Além disso, tem que ser escolhido o algoritmo de treinamento.

Os comandos Matlab utilizados são disponíveis no anexo 7 p.78. Foi escolhido como “goal” um valor de  $10^{-9}$ , não excedendo 1000 iterações, sendo o limite de custo computacional fixado para o estudo.

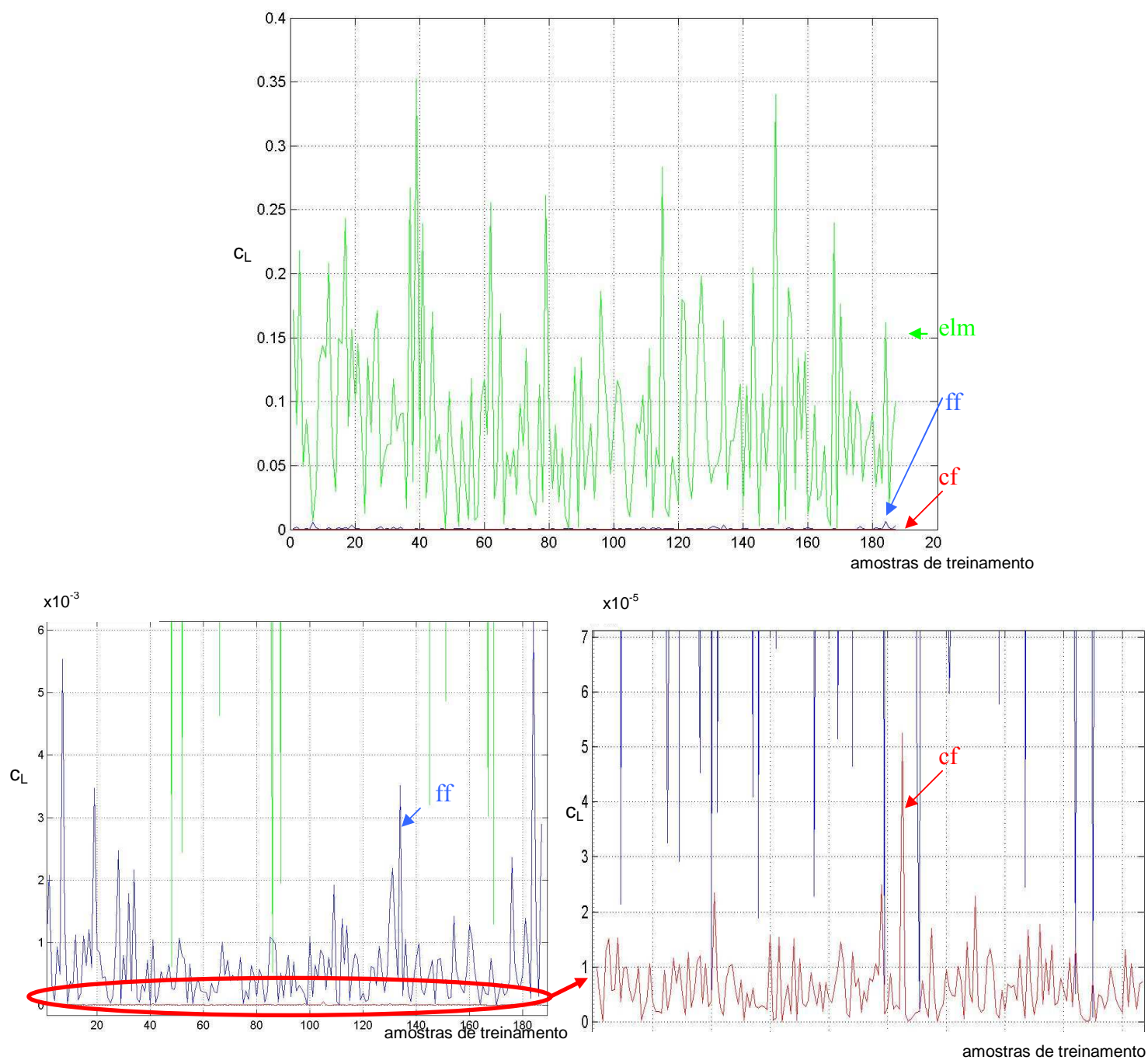
### 3. Treinamento e simulações das amostras do banco de dados

No primeiro teste, o conjunto das 280 amostras rodadas em CFD foi dividido em 2: um primeiro conjunto de 187 amostras foi usado para o treinamento da rede enquanto um segundo, de 93 amostras, serviu para avaliação da rede.

Assim, para cada rede treinada, foram observada o erro relativo e absoluto para as amostras de treinamento e para as amostras de validação. O objetivo seria de obter um erro de, no máximo, 10%, para todas as amostras em todas as variáveis de saída. O processo de treinamento de uma rede é pouco demorado (alguns minutos num computador pessoal), e depende do algoritmo escolhido.

#### *a. Estudo do tipo de aproximação usada pela rede*

Foram testados os 3 tipos de rede citados à cima (feed-forward=ff, cascade-forward=cf e Elman=elm) para vários casos com números de neurônios e de camadas diferentes. De maneira geral, sempre foi observada um comportamento similar. Por isso, será analisado nesse relatório só o comportamento de uma rede neural com 4 camadas, cada uma tendo respectivamente 20, 5, 8 e 3 neurônios. A notar que a última camada sempre tem que ter um número de saída igual ao número de variável de saída da rede. As funções de formulação usadas foram “tansig”, “logsig”, “tansig”, logsig”. Mas deve ser levado em conta que testes foram feitos para várias outros valores e que o resultado geral sempre permite chegar a mesma conclusão.



**Figura 30:** Erro absoluto do  $c_L$  para as 187 amostras treinadas para vários tipos de rede



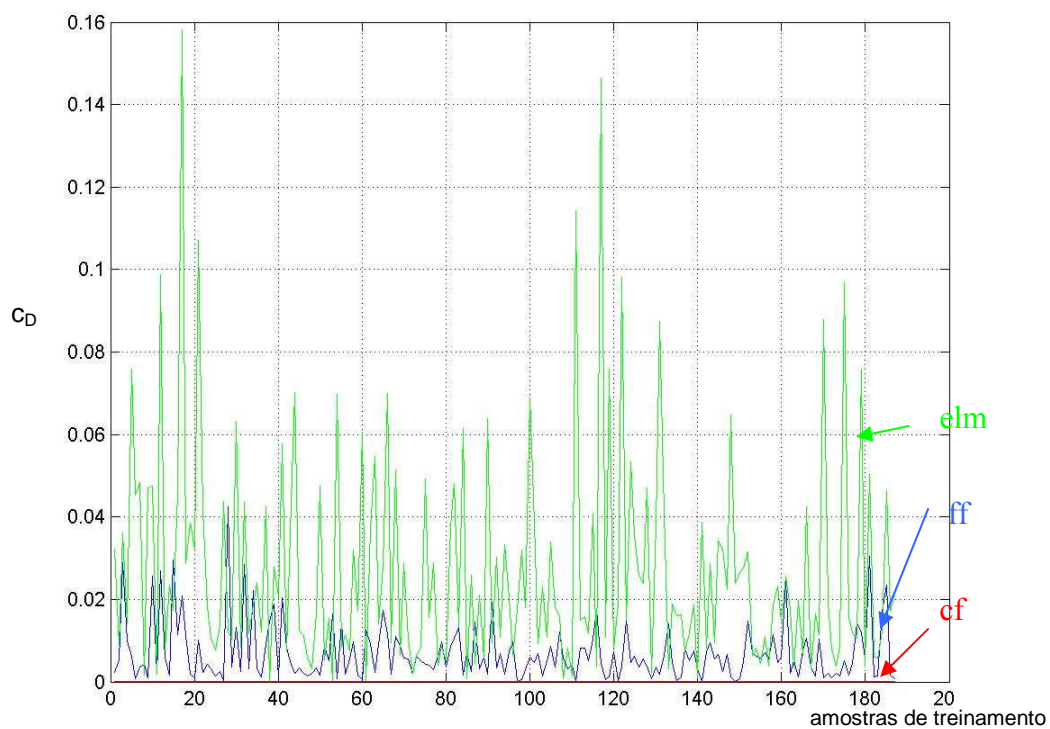


Figura 31: Erro absoluto do  $c_D$  para as 187 amostras treinadas para vários tipos de rede

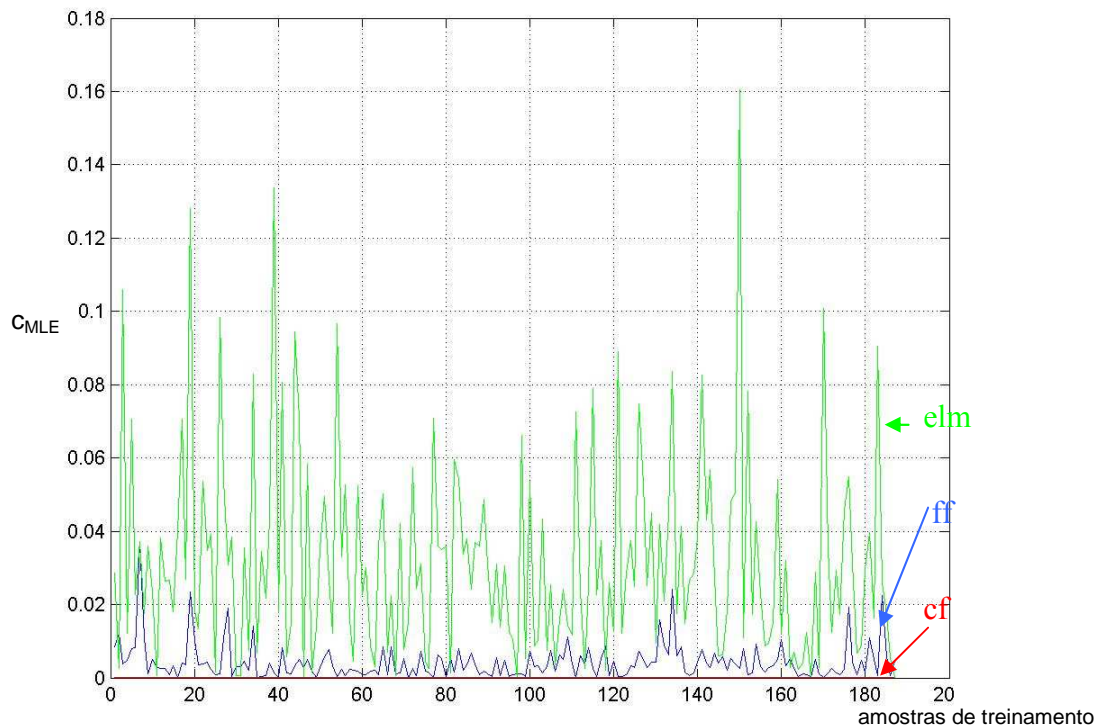


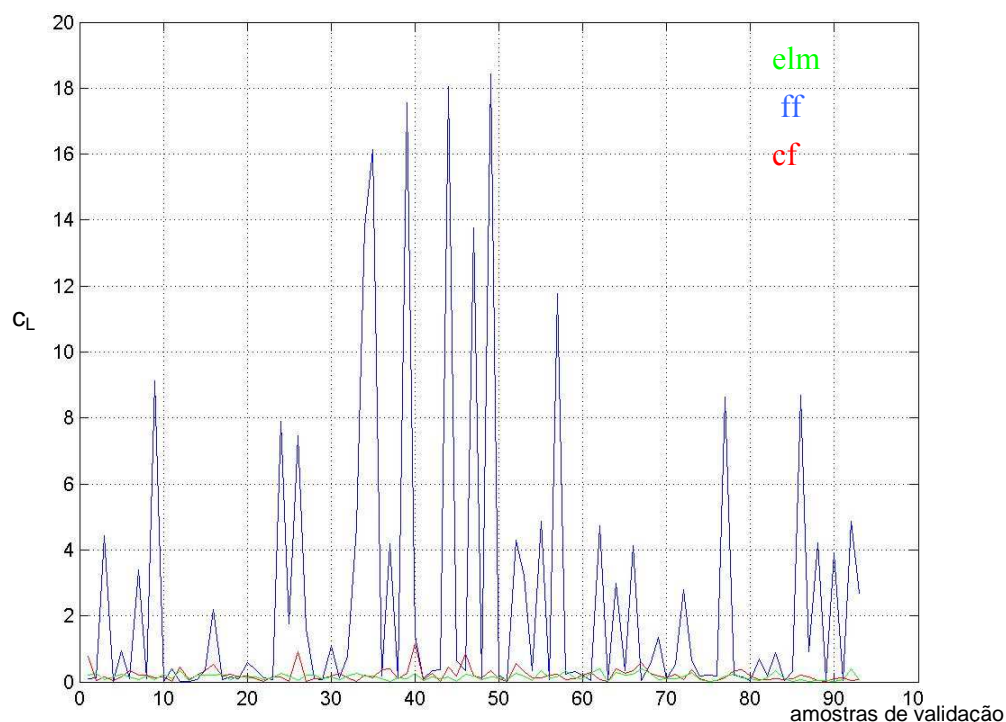
Figura 32: Erro absoluto do  $c_{MLE}$  para as 187 amostras treinadas para vários tipos de rede

Durante a fase de treinamento, o algoritmo cf convergiu até o “goal” escolhido em poucas iterações: entre 5 e 10, enquanto os algoritmos ff e elm não conseguiram chegar a convergência no limite de 1000 iterações. Além disso, o elm tem um custo computacional muito maior do que os outros 2.

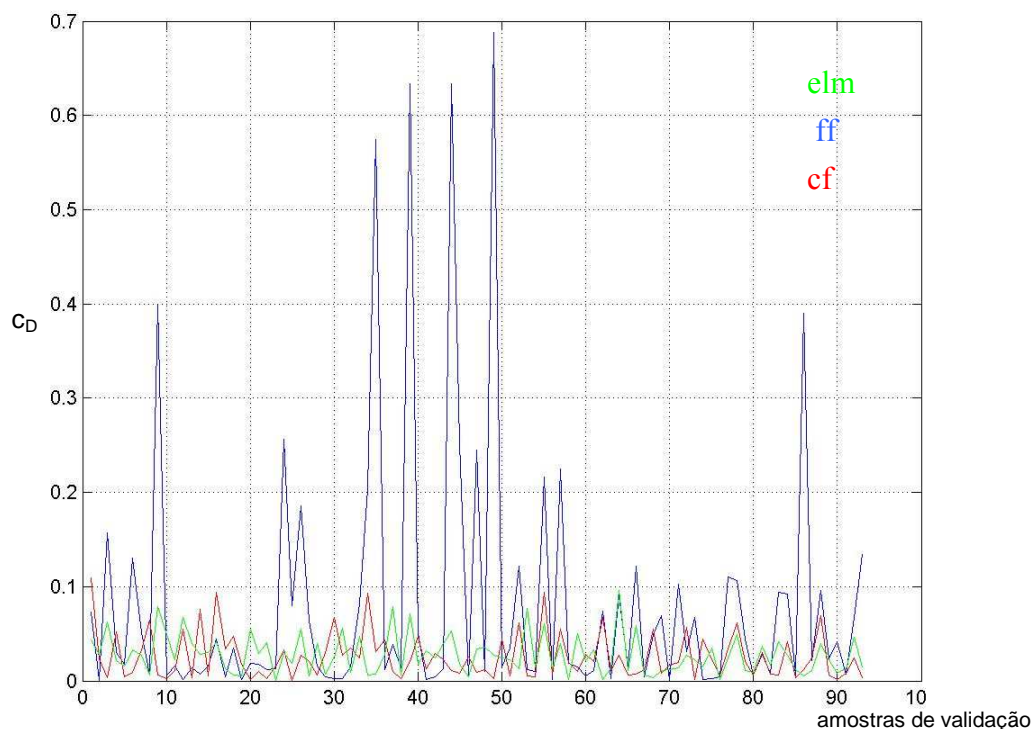
Analizando então o erro absoluto entre as variáveis calculadas pela rede e pelo método CFD (figuras 30, 31 e 32) para as amostras que serviram para o treinamento, o elm apresenta um erro bem maior que os dois outros algoritmos. Como seria esperado já que ele conseguiu convergir, a melhor aproximação dos coeficientes aerodinâmicos foi feita pelo cf. Comparando só para o  $c_L$  (os 3 gráficos da figura 30), o elm tem uma precisão da ordem de  $10^{-1}$ , o ff de  $10^{-3}$  e o cf de  $10^{-5}$ .

Assim, além de ter um custo computacional menor, conclui-se que o cf tem precisão maior, pelo menos comparando as amostras que serviram para o treinamento da rede.

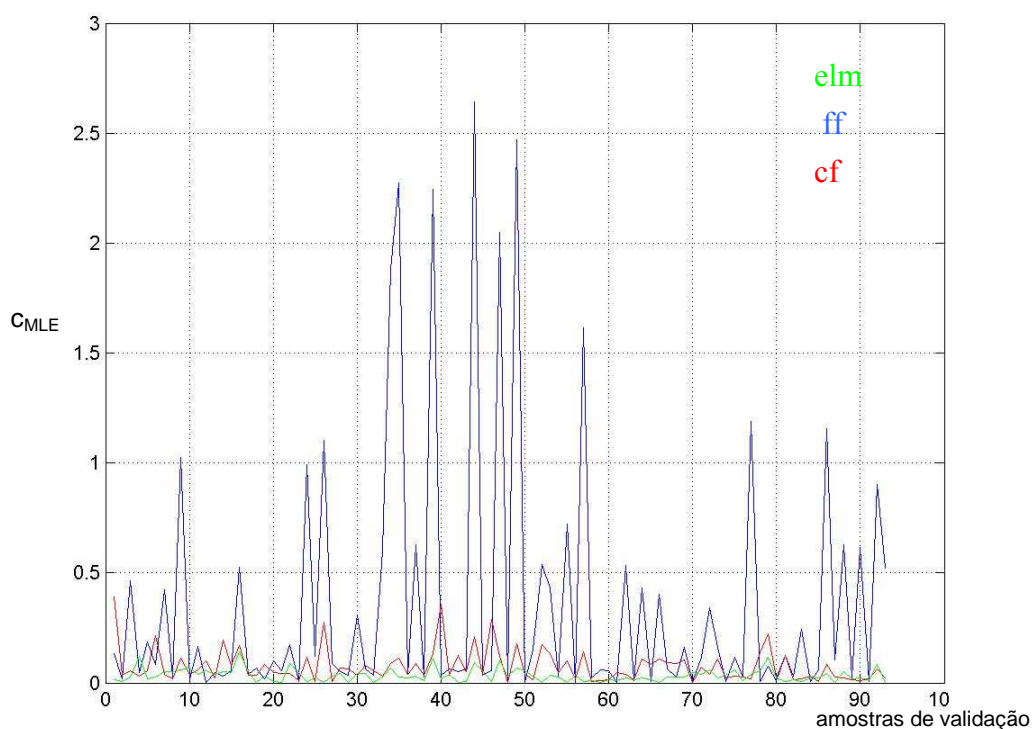
Simulando a rede com as 93 amostras que não foram usadas no treinamento, obtemos os gráficos das figuras 33, 34 e 35 para os 3 coeficientes aerodinâmicos  $c_L$ ,  $C_D$ ,  $C_{Mle}$ .



*Figura 33: Erro absoluto do  $c_L$  para as 93 amostras de validação para vários tipos de rede*



**Figura 34:** Erro absoluto do  $c_D$  para as 93 amostras de validação para vários tipos de rede



**Figura 35:** Erro absoluto do  $c_{MLE}$  para as 93 amostras de validação para vários tipos de rede

Nas 3 figuras, a aproximação feita pelo algoritmo ff produz um erro absoluto muito maior do que as outras enquanto as curvas do elm e do cf têm a mesma ordem de grandeza. A aproximação feita por esses 2 últimos algoritmos é muito parecida, mesmo se a aproximação é um pouco melhor para o elm. Porém, o ganho

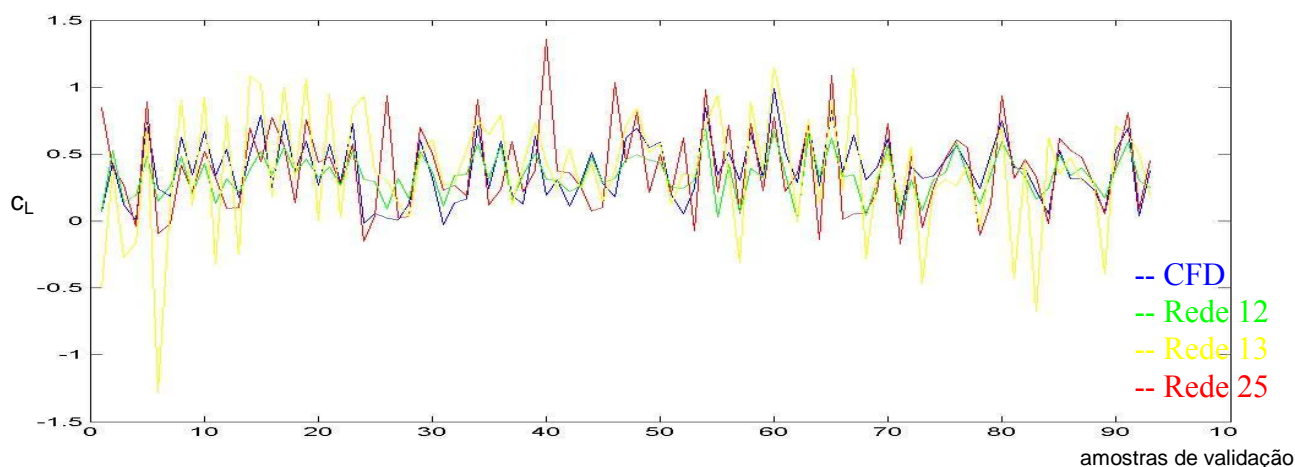
obtido na aproximação dessas outras amostras é muito pouco comparado com a falta de precisão na aproximação das amostras de treinamento.

Assim, de maneira geral, pode-se concluir que o algoritmo de aproximação cf é mais eficiente, pois além de ter um custo computacional menor do que os algoritmos elm e ff, é o único a convergir. Este também produz a melhor aproximação quando a rede é simulada com as mesmas amostras de treinamento. Por isso, foi decidido usar o algoritmo cf ou de “cascade-forward propagation” para tentar obter uma rede “boa”, ou seja, com uma aproximação gerando um erro de até 10%, tanto para as amostras de treinamento como para as de validação.

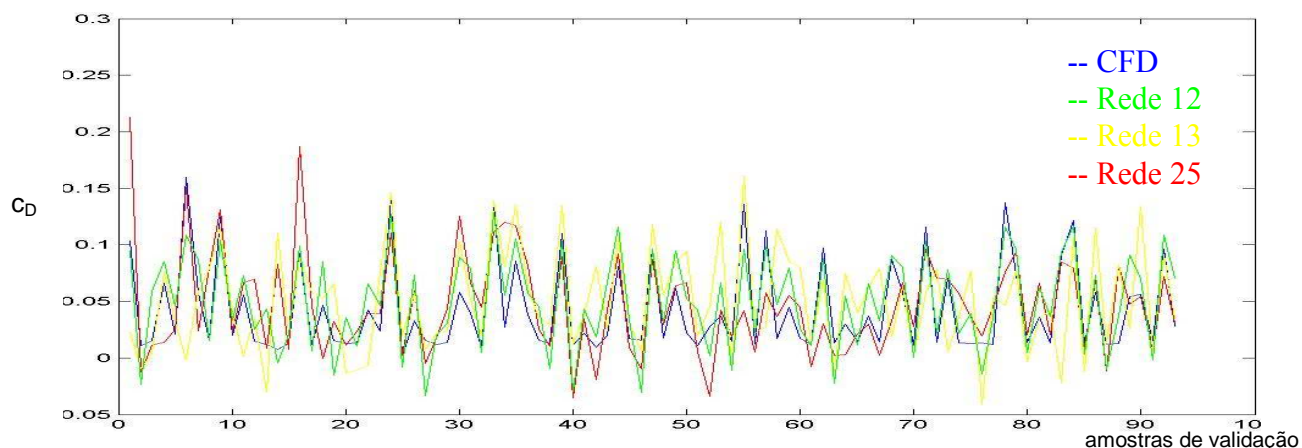
### *b. Estudo dos parâmetros de camadas e de neurônios*

Escolhido o tipo de aproximação, o estudo foi focado na influência da variação do número de camadas e de neurônios, assim como das funções de formulação para melhorar a rede.

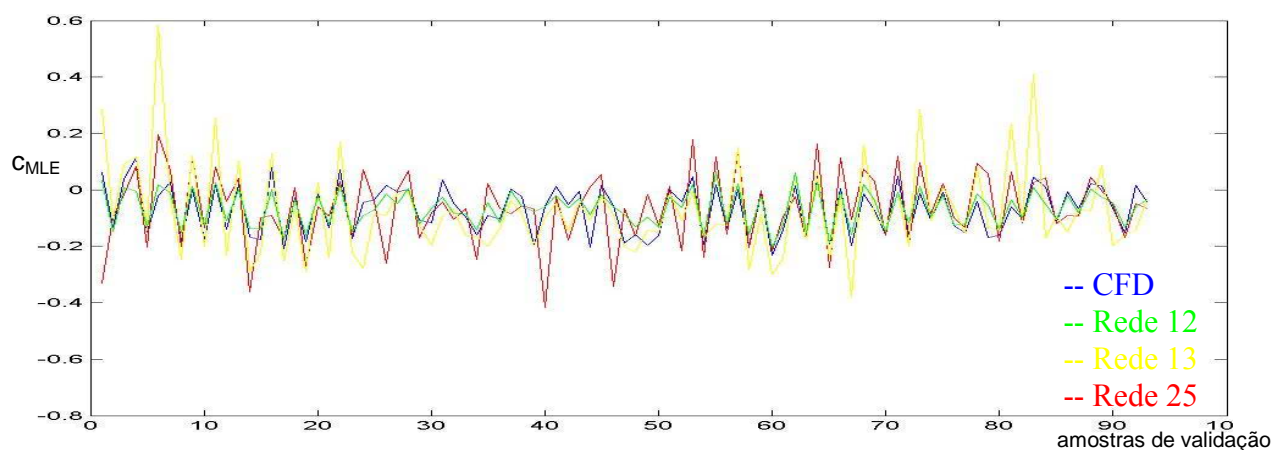
Assim, foram feitos vários testes nos parâmetros da rede para tentar definir quantas camadas são necessárias para modelar o problema, assim como número de neurônios por camada. Uma vez esse número otimizado, foram alteradas as funções de formulação associadas a cada camada, para tentar melhorar a rede, e de novo reajustado o número de camadas e de neurônios por camada. Esse trabalho é desgastante porque é necessário treinar muitas redes a fim de se encontrar a melhor. Alguns resultados são apresentados abaixo.



*Figura 36: Comparação entre o  $c_L$  calculado por método CFD e por redes neurais com parâmetros variáveis para as amostras de validação*



*Figura 37: Comparação entre o  $c_D$  calculado por método CFD e por redes neurais com parâmetros variáveis para as amostras de validação*



*Figura 38: Comparação entre o  $c_{MLE}$  calculado por método CFD e por redes neurais com parâmetros variáveis para as amostras de validação*

Comparando o resultado obtido para algumas redes modeladas com o resultado esperado do CFD, pode-se observar nas figuras 36, 37 e 38 que as curvas dos coeficientes calculados pelas redes não coincidem com as curvas dos coeficientes calculados por CFD. A tabela 8 da página seguinte apresenta o erro absoluto médio e máximo obtido para algumas das redes modeladas. Esse erro absoluto representa sempre um erro relativo de mais de 100%, para a aproximação de qualquer coeficiente, conhecendo a ordem de grandeza do  $c_L$ ,  $c_D$ ,  $c_{MLE}$ . Algumas redes são melhores, como as 7, 12 e 17 para o  $c_L$ . Pois, elas variam até um máximo de 0.33, que corresponderia ao menor máximo achado. Aliás, pode-se observar que essas 3 redes possuíam resultados idênticos, até no cálculo de cada um dos coeficientes. Embora ser diferentes, o fato de ter uma formulação “Purelin” para cada camada produz o mesmo resultado. Além disso, nota-se que para os 3 coeficientes, essa formulação, qualquer que seja o número de camada e de neurônios, é a melhor aproximação calculado, em termo de erro máximo. Porém,



essa formulação apresenta dificuldades para convergir, durante a fase de treinamento. Simuladas com as amostras de treinamento, as redes 7, 12 e 17 (idênticas), não apresenta uma boa aproximação, em comparação as outras (figura 39).

Rede	Número de neurônio por camada e formulação						Erro abs. médio			Erro abs. Maximo		
	Cam. 1	Cam. 2	Cam. 3	Cam. 4	Cam. 5	Cam. 6	$c_L$	$c_D$	$c_{MLE}$	$c_L$	$c_D$	$c_{MLE}$
7	20	4	9	3			0.13	0.021	0.032	0.33	0.051	0.120
	P	P	P	P								
12	20	8	5	3			0.13	0.021	0.032	0.33	0.051	0.120
	P	P	P	P								
13	20	8	5	3			0.26	0.034	0.078	1.52	0.161	0.605
	P	T	T	P								
14	20	8	5	3			0.24	0.016	0.068	0.85	0.085	0.277
	P	L	L	P								
17	10	20	3				0.13	0.021	0.032	0.33	0.051	0.120
	P	P	P									
18	20	10	8	5	3		0.89	0.042	0.353	8.56	0.404	3.827
	P	L	L	P	P							
19	10	60	3				0.37	0.035	0.090	1.42	0.145	0.331
	T	T	T									
20	60	3					0.20	0.034	0.081	0.61	0.157	0.319
	T	P										
23	60	20	3				0.18	0.044	0.069	0.62	0.196	0.218
	T	L	P									
25	20	5	8	3			0.21	0.026	0.076	1.17	0.109	0.392
	T	L	T	P								
27	8	5	5	5	5	3	0.09	0.012	0.033	0.61	0.055	0.225
	P	P	P	L	L	P						

Tabela 8: Observação do erro absoluto médio e máximo para algumas redes neurais treinadas

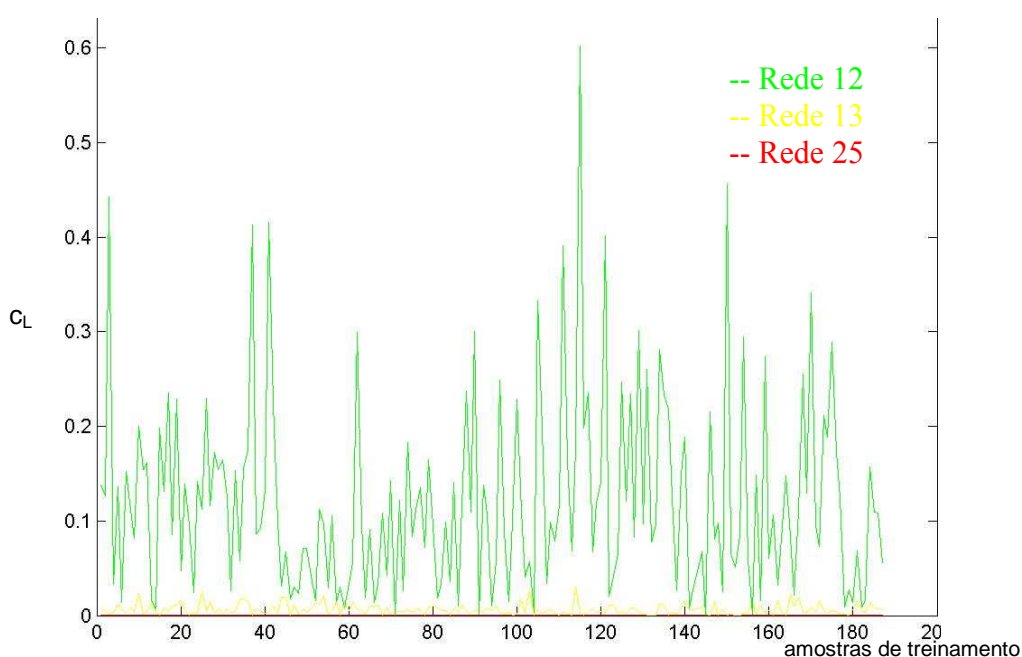


Figura 39: Erro absoluto do  $c_L$  para algumas das redes modeladas, medido para as amostras de treinamento

A “melhor” rede poderia ser a 27, tanto em termo de erro médio como de erro máximo, considerando que as redes “purelin” não conseguem convergir na fase de treinamento.

No entanto, essas aproximações não são precisas o suficiente para serem validadas. Pois, no caso da rede 27, por exemplo, o erro relativo em  $c_L$  apresenta erros até 9000%, com um valor médio de 100%. Considerando esses resultados, pode-se notar que a rede não consegue deduzir uma relação entre as variáveis de entrada e de saída, portanto obtêm-se duas conclusões:

O número de amostras treinadas não foi suficiente.

- Deveria ser gerado um novo conjunto de amostras bem maior.
- Deveria ser estudada também a necessidade de cada camada da rede e a influência de cada variável de entrada para cada neurônio. Para isso, deveriam ser gerados também uns conjuntos de amostras específicas fixando sucessivamente cada variável de entrada e estudando o resultado.

As variáveis escolhidas para a fase de treinamento representam um conjunto muito aleatório.

- Para isso, deveriam ser geradas também novas amostras escolhidas com lógica (e não aleatoriamente) para permitir a rede neural entender o efeito de cada variável de entrada nas variáveis de saída. Retoma-se ao que foi escrito no segundo ponto acima e é a esta pista que será dada um maior enfoque para se buscar um melhor resultado.

#### 4. Estudo da influência dos parâmetros de vôo

Um estudo sobre a influência das variáveis de entrada foi realizado. Para isso, foram rodadas novas amostras, fixados os parâmetros de geometria e varrendo o espaço de possibilidades para as condições de vôo ( $\alpha$  e  $M$ ). 3 perfis, o C5A, o RAE2822 e o RAE5212, foram selecionados, e foram rodadas 25 casos diferentes de condição de vôo, para cada perfil:

- 5 casos para  $\alpha$ : -1, 0, 1, 2, 3
- 5 casos para  $M$ : 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9

Constitui então um conjunto de 75 amostras, varrendo todas as possibilidades para  $\alpha$  e  $M$ . Essas amostras estão disponíveis no anexo 8 p.79.

*a. Variação de  $\alpha$*

Foram consideradas somente as amostras com  $M=0.5$ : são 15 amostras nas 75 rodadas. 12 foram utilizadas para treinar uma rede, 3 para a validação. Como o número de amostras utilizadas foi baixo, ele não permite concluir sobre o resultado, mas permite fornecer uma idéia do comportamento da rede.

Para as amostras de treinamento, a aproximação é da ordem de  $10^{-5}$ , correspondendo a um erro de menos de 0.2%.

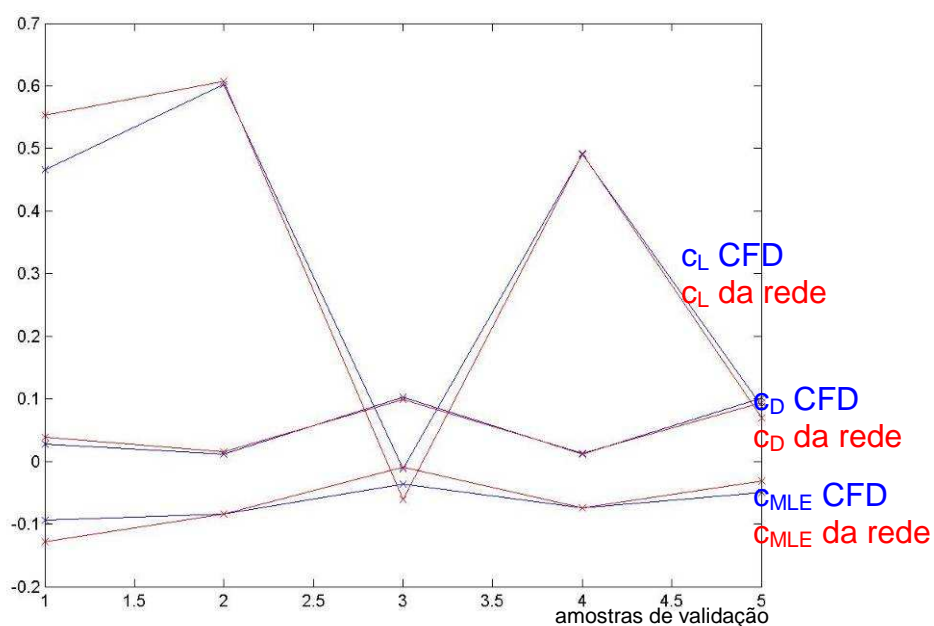
O erro de aproximação observado para as 3 amostras de validação escolhidas é de, no máximo, 4% para o  $c_L$ , 25% para o  $c_D$  e 45% para o  $c_{MLE}$ . Embora esses valores excedessem a meta de 10% fixada, as aproximações já são bem melhores.



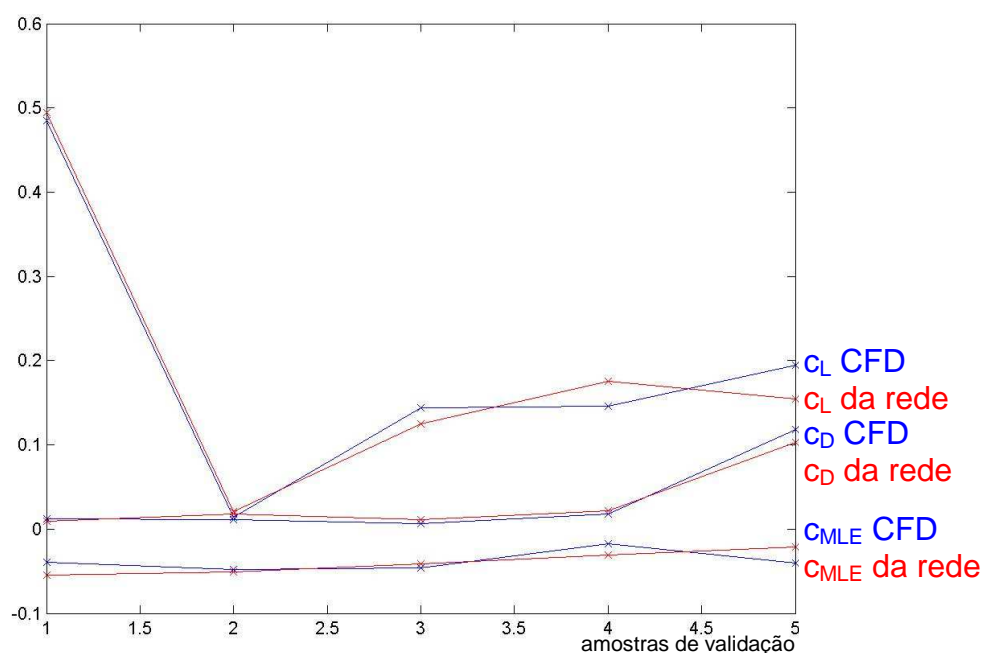
*b. Variação de  $\alpha$  e  $M$*

Num segundo caso, foi considerado o conjunto das 75 amostras: ele foi dividido aleatoriamente em 2: 63 amostras de treinamento e 12 amostras de validação.

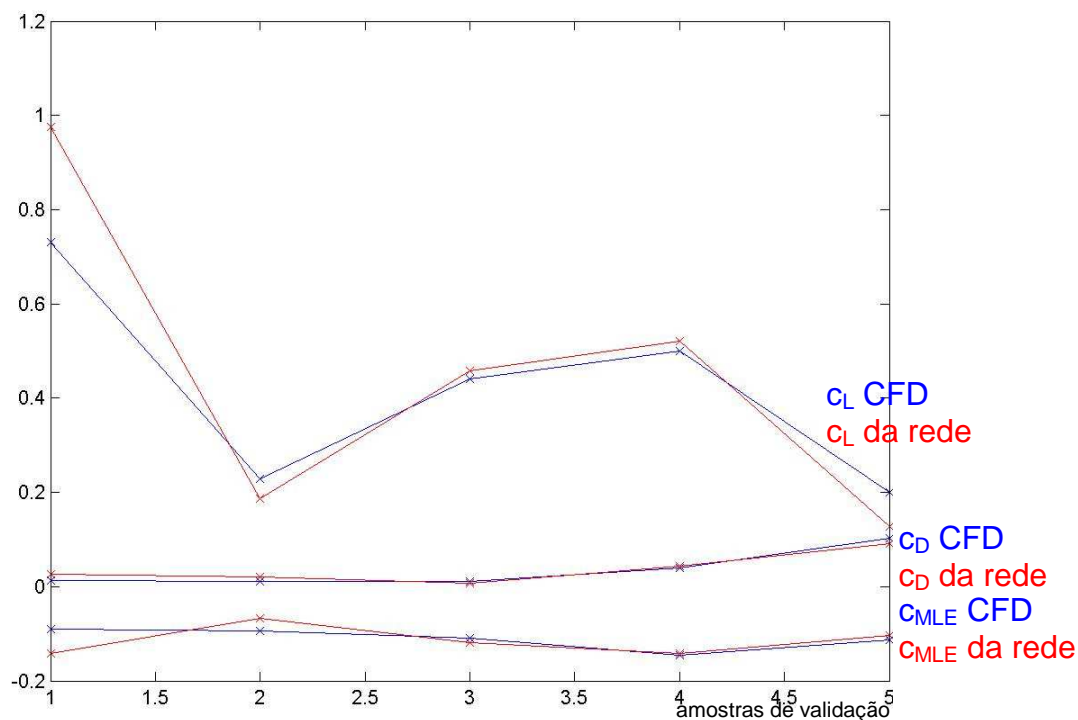
Foram testadas várias redes. Algumas deram resultados melhores para  $c_L$ , outras para  $c_D$ , e outras para o  $c_{MLE}$ . Porém, na maioria dos casos, a aproximação feita para as amostras de validação é boa em comparação aos resultados que obtidos anteriormente, para as 93 amostras aleatórias.



**Figura 40:** RAE2822: Comparação dos resultados para as amostras de validação

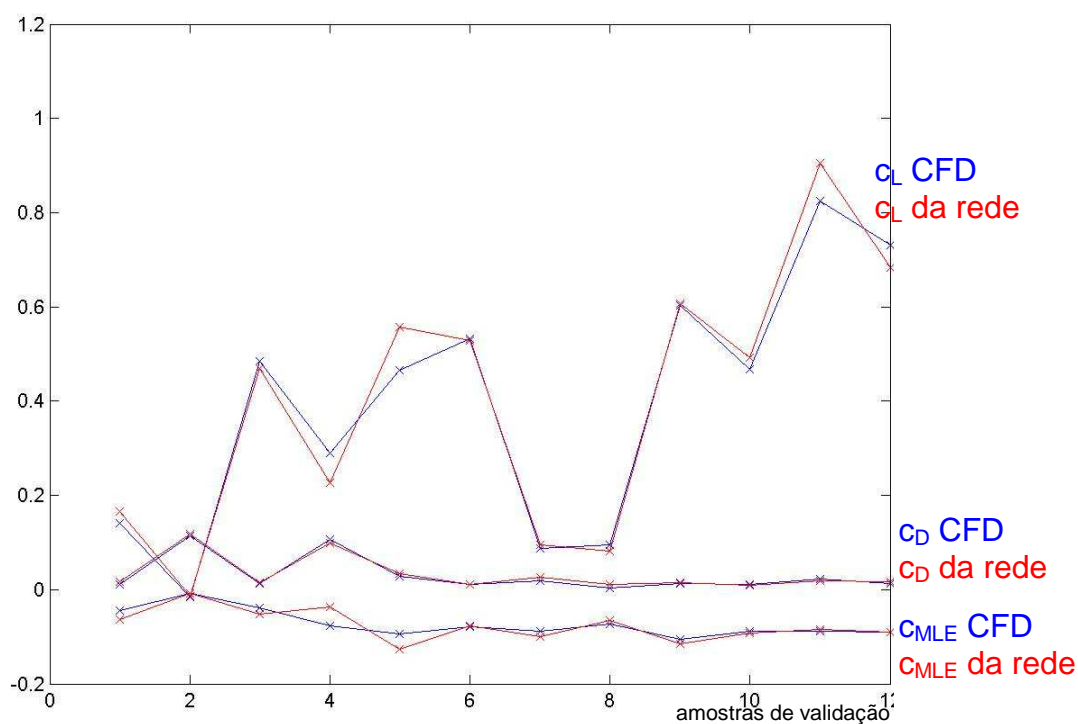


**Figura 41:** C5A: Comparação dos resultados para as amostras de validação



*Figura 42: RAE5112: Comparação dos resultados para as amostras de validação*

Para os 3 perfis selecionados, a rede consegue modelar as variações de  $\alpha$  e  $M$  e fornecer uma boa aproximação dos coeficientes aerodinâmicos. A figura 43 apresenta o resultado obtido para uma rede treinada com os 3 perfis acima.



*Figura 43: Comparação dos resultados para as amostras de validação*

A rede neural da figura 43 é composta de 4 camadas, com respectivamente 10, 8, 5 e 3 neurônios por camadas. Para estas foram atribuídas as funções de formulação “tansig”, “purelin”, “tansig” e “purelin”. Pode-se observar que a rede consegue aproximar de maneira mais precisa os resultados. Esta aproximação resulta num erro médio de 9% para o  $c_L$ , 39% para o  $c_D$  e 18% para o  $c_{MLE}$ . Porém, os  $c_D$  e  $c_{MLE}$  tendo valores menor, qualquer oscilação pequena aumenta consideravelmente a porcentagem de erro. Assim, essa aproximação é validada.

Finalmente, o processo pode ser considerado como parcialmente validada, pois conseguiu-se obter uma aproximação razoável dos coeficientes variando 2 parâmetros de entrada da rede, os outros sendo fixados. As 75 amostras rodadas foram adicionadas a base de treinamento inicial constituída de 187 amostras, aumentando assim o número de amostras para 262. No entanto 3 perfis fixados não foram significativos para a rede poder obter uma precisão maior para o resultado da base de validação de 93 amostras.

Se baseando no intervalo de definição escolhido para cada variável de entrada:

- $k_{up}(1)$  teria que ser definido pelo menos para 3 valores,
- $k_{up}(2)$ : 4
- $k_{up}(3)$ : 4
- $k_{up}(4)$ : 3
- $k_{lo}(2)$ : 3
- $k_{lo}(3)$ : 4
- $k_{lo}(4)$ : 6
- $\Delta z$ : 4
- Condições de vôo: 25

Assim, o número total de amostras “possíveis” seria de 1 036 800. Percebe-se que 300 amostras de treinamento constituem um número bem baixo para uma rede com 10 variáveis de entrada com essa variação, mesma repartidas uniformemente no domínio de definição. Porém, o processo em si pode ser validado, sendo verificada para a variação de uns parâmetros, em casos particulares.

## VI- Discussões

### 1. Melhorias propostas

O processo foi validado, embora a rede não tenha sido modelada. O estudo poderia ter continuidade, gerando-se um maior número de amostras escolhidas da melhor maneira possível através de um estudo mais preciso da influência de cada parâmetro geométrico.

Poderia também ser adicionado o número de Reynolds como variável de entrada tendo assim 3 condições de voo.

Além disto, foram realizadas várias aproximações ao longo deste trabalho que não poderiam ser aceitas com a finalidade de utilizar-se deste processo em um projeto real de aeronave.

Sobre a função de geometria, não foi possível obter uma função que permite, a partir das coordenadas do perfil, definir os parâmetros geométricos com precisão. Porém, essa imprecisão na função também é devida a baixa ordem da função de geometria escolhida. Aumentando a ordem para 8, invés de 3, por exemplo, essa precisão seria melhor e permitiria obter um maior número de perfis possíveis.

Poderia também ser realizado um estudo teórico da influência de cada parâmetro na geometria a fim de definir um domínio de definição melhor, invés de basear-se em um estudo de perfis existentes. Esta definição de critérios de um perfil pode ser realizada por uma outra rede neural, por exemplo, que permitiria criar uma fronteira de Pareto de perfis realísticos.

Esse trabalho limitou-se também ao regime transônico. Poderia ser realizado também o mesmo estudo em regimes subsônico e supersônico, implicando na geração de novas amostras, novos perfis, etc.

## 2. Conclusão

O presente trabalho é uma primeira etapa para a resolução do problema inverso de otimização de geometria de aerofólios dado as especificações aerodinâmicas. Ele também pode ser integrado a um processo global e multidisciplinar de projeto de uma aeronave. Por isso, foi avaliado o meta-modelo por rede neural frente ao método CFD.

Foi inicialmente identificada a necessidade de se utilizar uma função de geometria suave que permitiria definir um grande número de aerofólios, com poucas variáveis. Por isso, foi utilizada uma função desenvolvida na Boeing por Bussioletti e Kulfan. Foi escolhida uma ordem 3, sendo bastante representativa para um perfil, embora um perfil real necessita-se de uma ordem maior para ser definido com precisão. Contudo o presente estudo consiste em validar um processo e não a realidade. Foi estudada a variação possível de cada um dos 8 parâmetros geométricos e foram então definidos aleatoriamente 300 perfis, a fim de cobrir um espaço amplo do domínio pré-definido pelo estudo.

Essas 300 amostras constituíram um banco de dados a serem rodadas pelo método CFD. O solver escolhido foi o NMIX, uma união do BAMG, um gerador de malha e do NSC2KE, um solver CFD. Baseando-se no perfil RAE2822, foram feitas comparações entre resultados de túnel de vento e de CFD obtido pelo NMIX a fim de determinar o número de refinamentos de malha e de iterações necessárias para um resultado suficientemente preciso. Assim, foram escolhidos 2 refinamentos de malha, com 2000 iterações a cada refinamento, o último contando 12000 iterações. Para cada amostra, obteve-se então 14000 iterações realizadas pelo solver. A resolução de uma amostra demora, em média, de 20 a 30 minutos num cluster da Embraer. Esse processo foi repetido 300 vezes a fim de gerar todas as amostras necessárias à realização do banco de dados.

Foi então modelada a rede neural, com intuito de obter uma boa precisão para cada um dos coeficientes. Porém, o número de amostras rodadas não foi o suficiente para possibilitar que a rede deduzisse uma função precisa dos coeficientes em função das 10 variáveis de entrada. Foi calculado que existe mais de  $10^6$  casos possíveis para as variáveis de entrada. Foi fixada então a geometria para 3 perfis transônicos conhecidos e foi estudado o processo para as 2 variáveis de entrada correspondendo às condições de voo.

Finalmente o processo em si foi validado, porém, não foi construída uma rede capaz de modelar o comportamento aerodinâmico de qualquer perfil. Deveriam ser geradas mais amostras para cobrir mais possibilidades dentro do domínio de definição das variáveis geométricas.

## VII- Referências

1. <http://www.mathworks.com/products/neuralnet/>, acessado em Março de 2007
2. MOHAMMADI, B., **Fluid Dynamics Computation with NSC2KE – An User-Guide – Release 1.0**, INRIA, Maio 1994, disponível em: <http://pauillac.inria.fr/cdrom/www/nsc2ke/fra.htm>, acesso em Março de 2007
3. FREY, P., SAIAC, J.-H., et al, **Simulation numérique en géométries complexes : apport des techniques d’adaptation de maillages. Applications aux calculs de mécanique des fluides**, 30 de Março de 2005
4. SALTEL, E., HECHT, F., **EMC<sup>2</sup> Un logiciel d’édition de maillages et de contours bidimensionnels**, INRIA, Outubro 1995, disponível em: <http://pauillac.inria.fr/cdrom/www/emc2/fra.htm>, acesso em Março de 2007
5. HECHT, F., **BAMG: Bidimensional Anisotropic Mesh Generator**, draft version v0.58, INRIA, Outubro 1998, disponível em: <http://pauillac.inria.fr/cdrom/www/Bamg/fra.htm>, acesso em Abril de 2007
6. ANDERSON, J.D. Jr, **Fundamentals of Aerodynamics**
7. KULFAN, B.M, BUSSOLETTI, J.E, **“Fundamental” Parametric Geometry Representations for Aircrafts Component Shapes**, 11th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, 6 - 8 September 2006, Portsmouth, Virginia
8. Mode Frontier informations, disponível em <http://www.esteco.com/products.jsp>, acesso em Junho de 2007
9. **UIUC Airfoil Data Site**, disponível em <http://www.ae.uiuc.edu/m-selig/ads.html>, acesso em Agosto de 2007
10. Neural Network Toolbox documentation, disponível em <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/nnet/index.html>, acesso em Outubro de 2007

## VIII- Anexos

### 1. Programa Matlab de geração de aerofólio, com polinômio de Bernstein de ordem 3

Esse programa cria um perfil adimensional com  $n = 100$  pontos dependendo de 10 parâmetros:  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $\Delta z$ , 4 coeficientes polinomiais para coordenadas “upper” da superfície, e 3 coeficientes para coordenadas “lower”. Pois o primeiro coeficiente dos polinômios “upper” e “lower” tem que ser o mesmo, por continuidade: vimos que ele define o raio do nariz do perfil.

```
clear all
N1=0.2;
N2=0.8;
delta_z=0.0025;
n=70;
x=linspace(0,1,n);
C=(x.^N1).*(1-x).^N2;
S=ones(1,n);

k_up=[0.125 0.3 0.3 0.3];

S0=k_up(1)*(1-x).^3;
S1=k_up(2)*3*((1-x).^2).*x;
S2=k_up(3)*3*(1-x).*x.^2;
S3=k_up(4)*x.^3;
S=S0+S1+S2+S3;
z_up=C.*S+x*delta_z;

k_lo=[k_up(1) 0.2 0.1 -0.3];

S0_lo=k_lo(1)*(1-x).^3;
S1_lo=k_lo(2)*3*((1-x).^2).*x;
S2_lo=k_lo(3)*3*(1-x).*x.^2;
S3_lo=k_lo(4)*x.^3;
S_lo=S0_lo+S1_lo+S2_lo+S3_lo;
z_lo=-(C.*S_lo+x*delta_z);

plot(x,z_up,x,z_lo)
```



## 2. Função inversa de cálculo dos coeficientes dos polinômios de Bernstein a partir das coordenadas do aerofólio

### a) fitBPO.m

```
function [x,delta_z_te] = fitBPO(N_B,points)
%Adjusts the KULFAN-BUSSOLETTI parameters to fit an airfoil given by a list
%of points
% Developed by Bernardo Reis Dreyer de Souza
% bernardo.souza@embraer.com.br
% Embraer SA - VED/DTE/GL7/SF3

global x_u x_l z_u z_l C_u C_l delta_z_te N_B N_v Ns

% Defining Constants
N_nose = 0.5;      % Class function Exponents
N_aft = 1.0;
%N_B = 9;          % Bernstein Polynomial order
N_v = 2*(N_B + 1) - 1; % Number of Variables

%%
N = length(points);
Ns = (N-1)/2 + 1;

points = points/max(points(:,1)); % Points coordinates normalization

p_u = points(1:Ns,:);
p_u = sortrows(p_u);

p_l = points(Ns:end,:);
p_l = sortrows(p_l);

delta_z_te = p_u(end,2);

%%
x_u = p_u(:,1);
z_u = p_u(:,2);

x_l = p_l(:,1);
z_l = p_l(:,2);

% Class function
C_u = (x_u.^N_nose).*(1-x_u).^N_aft;
C_l = (x_l.^N_nose).*(1-x_l).^N_aft;

%Initial guess for coefficients
x0 = 0.2*ones(1,N_v);

A_u = zeros(1,N_B+1); % Upper Surface parameters
A_l = zeros(1,N_B+1); % Lower Surface Parameters

S_u = zeros(1,Ns);
S_l = zeros(1,Ns);

%% Calling Optimization function
options = optimset('TolFun',1.0e-9);
[x,resnorm,residual,exitflag,output] = lsqnonlin(@errorfun,x0)
```

```

%% Plotting Result
for i = 1:N_B+1
    A_u(i) = x(i);
end

A_l(1) = x(1);

for i = N_B+2 : N_v
    A_l(i - N_B) = x(i);
end

S_u = zeros(Ns,1);
S_l = zeros(Ns,1);

for i = 0:N_B
    S_u = S_u + A_u(i+1)*mfun('binomial',N_B,i)*(x_u.^i).*((1-x_u).^(N_B-i));
end

for i = 0:N_B
    S_l = S_l + A_l(i+1)*mfun('binomial',N_B,i)*(x_l.^i).*((1-x_l).^(N_B-i));
end

z_u_pol = C_u.*S_u + x_u*delta_z_te;

z_l_pol = -(C_l.*S_l+x_l*delta_z_te);

figure
plot(x_u,z_u,'-or',x_l,z_l,'-or',x_u,z_u_pol,'b',x_l,z_l_pol,'b')
grid
axis equal

```

## b) errorfun.m

```

function F = errorfun(x)
%Calculates the errors in the fit of a list of points through a Bernstein
%Polynomial
% Developed by Bernardo Reis Dreyer de Souza
% bernardo.souza@embraer.com.br
% Embraer SA - VED/DTE/GL7/SF3

global x_u x_l z_u z_l C_u C_l delta_z_te N_B N_v Ns

A_u = zeros(1,N_B+1);    % Upper Surface parameters
A_l = zeros(1,N_B+1);    % Lower Surface Parameters

S_u = zeros(1,Ns);
S_l = zeros(1,Ns);

for i = 1:N_B+1
    A_u(i) = x(i);
end

A_l(1) = x(1);

for i = N_B+2 : N_v
    A_l(i - N_B) = x(i);
end

```

```

S_u = zeros(Ns,1);
S_l = zeros(Ns,1);

for i = 0:N_B
    S_u = S_u + A_u(i+1)*mfun('binomial',N_B,i)*(x_u.^i).*((1-x_u).^(N_B-i));
end

for i = 0:N_B
    S_l = S_l + A_l(i+1)*mfun('binomial',N_B,i)*(x_l.^i).*((1-x_l).^(N_B-i));
end

z_u_pol = C_u.*S_u + x_u*delta_z_te;
z_l_pol = -(C_l.*S_l+x_l*delta_z_te);
F = [z_u - z_u_pol ; z_l - z_l_pol];

```

### c) reorder.m

*Nota: O “data” corresponde ao arquivo de geometria .txt contendo as coordenadas (x,y) exportado dentro do Matlab.*

```

for i=1:data(1,1)
    data_run(data(1,1)+1-i,1)=data(i+1,1);
    data_run(data(1,1)+1-i,2)=data(i+1,2);
end

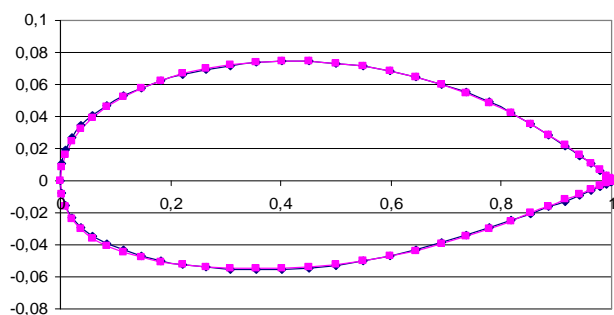
for i=1:(data(1,1)-1)
    data_run(data(1,1)+i,1)=data(data(1,1)+2+i,1);
    data_run(data(1,1)+i,2)=data(data(1,1)+2+i,2);
end

data_run(2*data(1,1)-1,2)=-data_run(1,2);

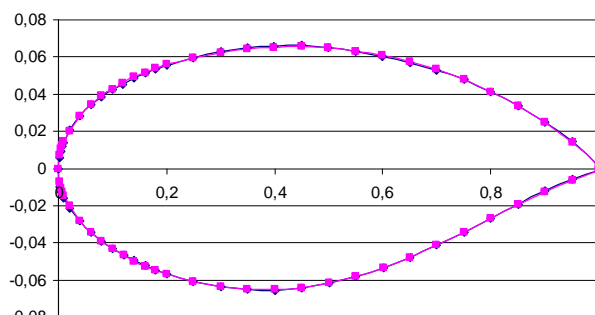
```

### 3. Aplicação da função da Boeing de ordem 3 em aerofólios transônicos reais

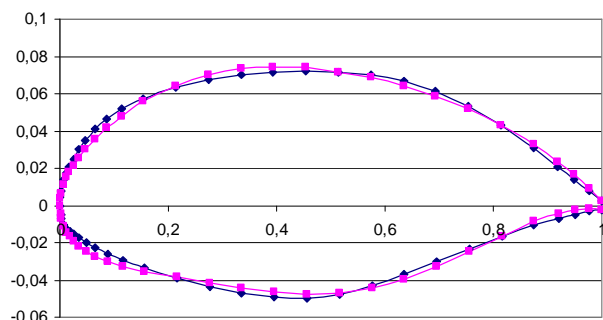
—◆— y real  
—■— y calculado



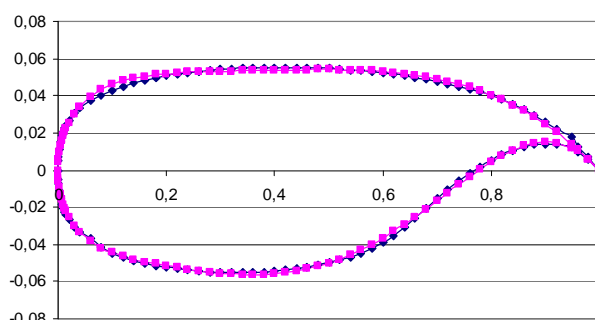
**Lockheed-Georgia C-5A**



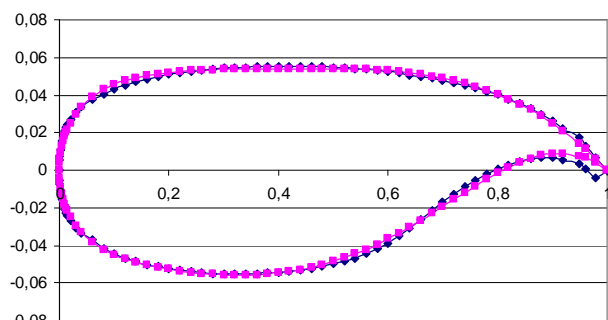
**Lockheed-Georgia C-141**



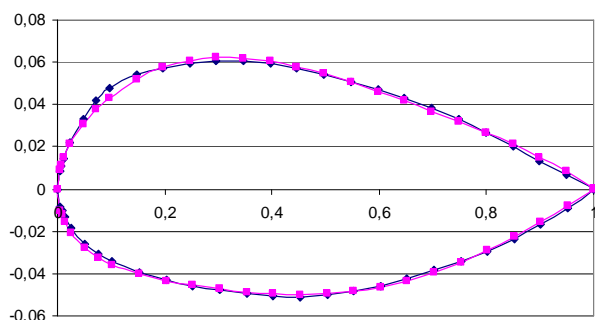
**CAST 10-2 DOA 2**



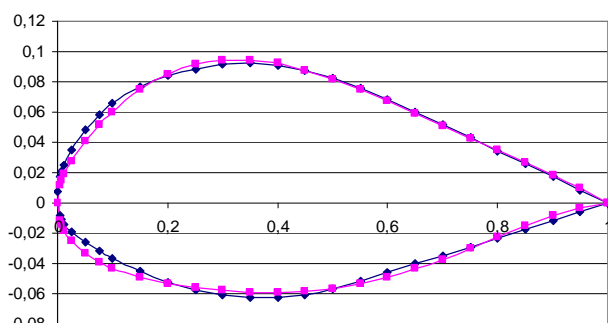
**McDonnell-Douglas DSMA-523 sTE**



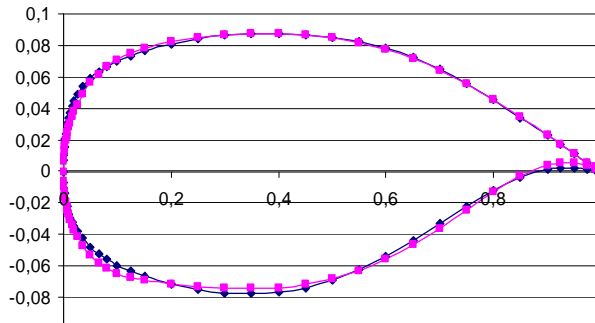
**McDonnell-Douglas DSMA-523 bTE**



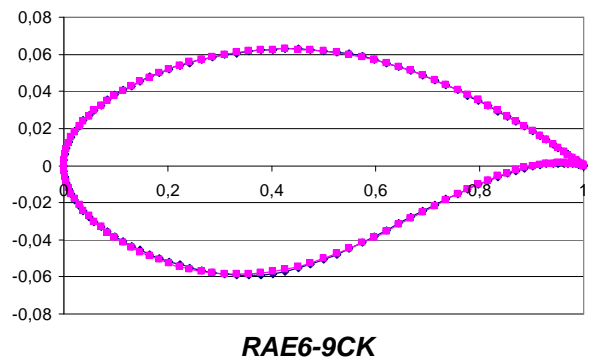
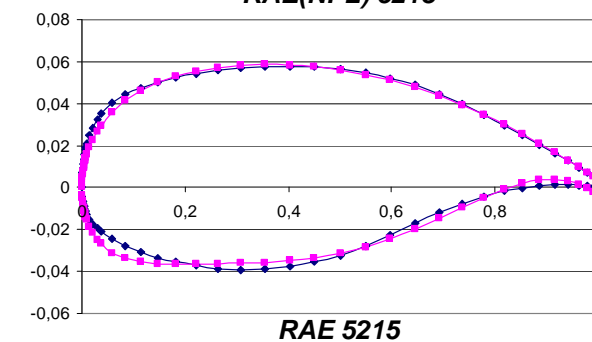
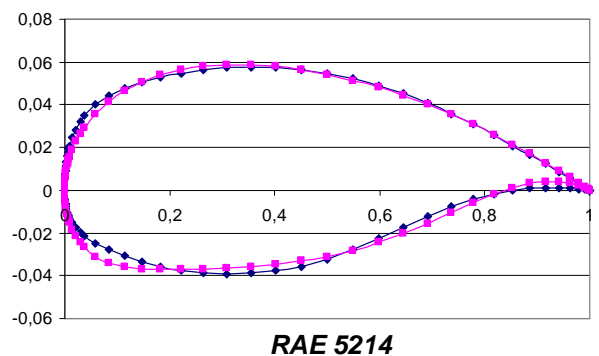
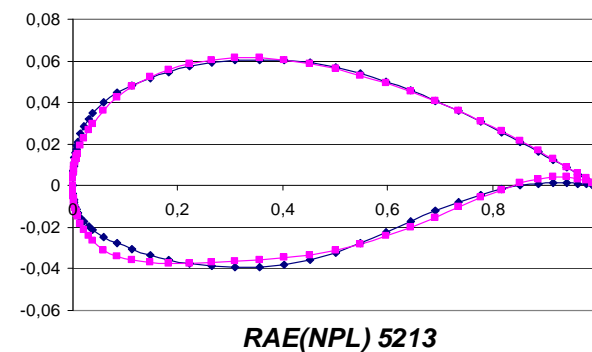
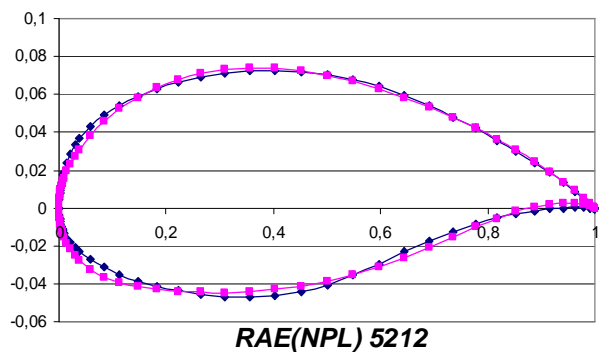
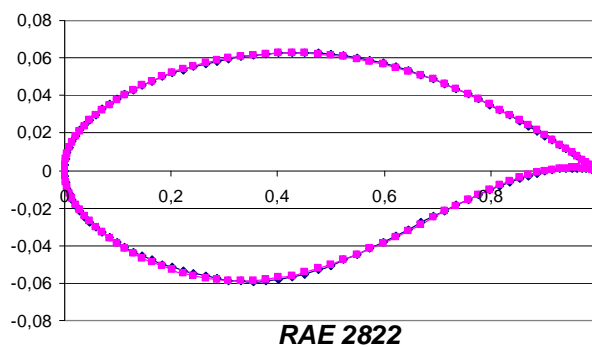
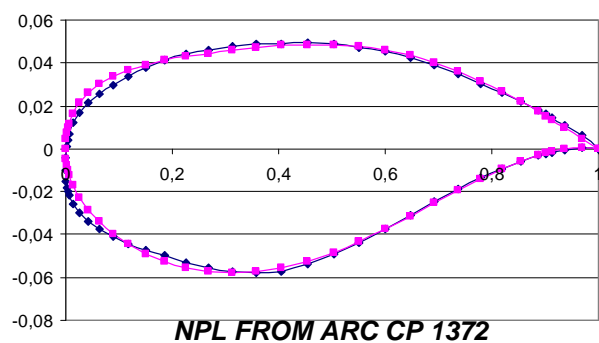
**Grumman-Gulfstream GIII**



**Boeing KC-135**



**NLR NLR-7301**



#### 4. Banco de dados de 300 amostras

*Perfis não calculados:*

Cruzamento do intradorso e do extradorso na região próxima do bordo de fuga

<ID>	k up_1	k up_2	k up_3	k up_4	k low_2	k low_3	k low_4	Delta_z	alpha	Mach	clt	cdt	cmt
0	0,20	0,23	0,23	0,23	0,08	0,33	-0,10	0,0020	1,00	0,70	0,48963	0,01405	-0,07836
1	0,15	0,14	0,14	0,16	0,01	0,24	-0,25	0,0010	0,00	0,60	0,40026	0,01083	-0,10564
2	0,25	0,32	0,32	0,29	0,14	0,42	0,05	0,0030	2,00	0,80	-0,26366	0,09101	0,13307
3	0,23	0,18	0,18	0,19	0,04	0,28	-0,18	0,0015	0,50	0,65	0,46781	0,01211	-0,09307
4	0,12	0,36	0,36	0,32	0,17	0,46	0,13	0,0035	2,50	0,85	-0,00903	0,20607	0,07864
5	0,28	0,09	0,09	0,13	-0,02	0,19	-0,33	0,0005	-0,50	0,55			
6	0,17	0,27	0,27	0,26	0,11	0,37	-0,02	0,0025	1,50	0,75	0,26252	0,02992	-0,04468
7	0,29	0,38	0,25	0,31	0,16	0,44	0,09	0,0012	2,30	0,83	-0,04132	0,17205	0,06296
8	0,19	0,20	0,07	0,18	0,03	0,26	-0,21	0,0033	0,20	0,62	0,39026	0,01138	-0,0859
9	0,24	0,29	0,34	0,24	0,09	0,35	-0,06	0,0002	1,30	0,73	0,34887	0,03371	-0,08594
10	0,13	0,11	0,16	0,11	-0,04	0,17	-0,37	0,0023	-0,80	0,52			
11	0,16	0,25	0,38	0,27	0,12	0,39	0,01	0,0007	1,70	0,78	0,01076	0,05728	-0,00238
12	0,27	0,07	0,20	0,14	-0,01	0,21	-0,29	0,0028	-0,30	0,57	0,41103	0,01206	-0,11924
13	0,11	0,34	0,29	0,34	0,19	0,48	0,17	0,0017	2,80	0,88	0,24195	0,24318	-0,02154
14	0,21	0,16	0,11	0,21	0,06	0,30	-0,14	0,0038	0,70	0,67	0,4165	0,0125	-0,07264
15	0,19	0,10	0,35	0,15	0,08	0,22	-0,27	0,0019	-0,20	0,58	0,47617	0,01697	-0,14197
16	0,30	0,28	0,17	0,28	-0,05	0,40	0,03	0,0039	1,90	0,79	0,13493	0,05996	-0,0145
17	0,14	0,19	0,26	0,22	0,15	0,31	-0,12	0,0008	0,90	0,69	0,45934	0,01241	-0,09496
18	0,25	0,37	0,08	0,35	0,02	0,49	0,19	0,0029	2,90	0,89	0,40544	0,2384	-0,0763
19	0,27	0,15	0,30	0,18	0,18	0,27	-0,20	0,0003	0,40	0,64	0,41774	0,01271	-0,10242
20	0,17	0,33	0,12	0,31	0,05	0,45	0,11	0,0024	2,40	0,84	-0,00768	0,12836	0,12448
21	0,22	0,06	0,39	0,12	0,12	0,18	-0,35	0,0014	-0,70	0,53			
22	0,11	0,24	0,21	0,25	-0,01	0,36	-0,04	0,0034	1,40	0,74	0,4453	0,01917	-0,06437
23	0,21	0,35	0,15	0,33	0,03	0,47	0,15	0,0006	2,70	0,87	0,31103	0,20117	-0,02223
24	0,10	0,17	0,33	0,20	0,16	0,29	-0,16	0,0026	0,60	0,66	0,4695	0,01235	-0,11977
25	0,26	0,26	0,06	0,27	-0,03	0,38	0,06	0,0016	1,60	0,76	0,26986	0,04541	0,00106
26	0,15	0,08	0,24	0,14	0,10	0,20	-0,31	0,0037	-0,40	0,56	0,40355	0,00844	-0,1348
27	0,13	0,30	0,10	0,23	0,00	0,34	-0,08	0,0011	1,10	0,71	0,50611	0,01822	-0,0668
28	0,23	0,12	0,28	0,10	0,13	0,16	-0,39	0,0032	-0,90	0,51			
29	0,18	0,39	0,19	0,30	0,07	0,43	0,07	0,0001	2,20	0,82	-0,03158	0,11654	0,09189
30	0,29	0,21	0,37	0,17	0,20	0,25	-0,23	0,0021	0,10	0,61	0,45884	0,01368	-0,12384
31	0,24	0,26	0,30	0,13	0,15	0,30	0,04	0,0010	2,50	0,86	-0,01274	0,14754	0,05079
32	0,14	0,08	0,12	0,26	0,02	0,48	-0,26	0,0031	0,40	0,66	0,35522	0,011	-0,08709
33	0,30	0,35	0,39	0,20	0,09	0,21	0,20	0,0000	1,40	0,76	-0,11824	0,06859	-0,01232
34	0,19	0,17	0,21	0,33	-0,04	0,39	-0,11	0,0021	-0,60	0,55	0,30147	0,00776	-0,09761
35	1	0,40	0,34	0,16	0,12	0,16	0,12	0,0005	2,00	0,71	0,22041	0,05506	-0,01793
36	0,22	0,22	0,16	0,29	-0,01	0,34	-0,19	0,0026	-0,10	0,50	0,4135	0,012	-0,10684
37	0,16	0,31	0,25	0,10	0,18	0,25	-0,03	0,0016	3,00	0,81	0,37837	0,09374	-0,11144
38	0,27	0,13	0,07	0,23	0,05	0,43	-0,34	0,0036	0,90	0,60	0,484	0,01318	-0,0861
39	0,15	0,20	0,10	0,34	-0,03	0,41	-0,15	0,0003	-0,90	0,58	0,21365	0,00948	-0,0846
40	0,26	0,38	0,28	0,21	0,10	0,23	0,16	0,0023	1,20	0,78	-0,33993	0,07414	0,04414
41	0,10	0,11	0,19	0,28	0,04	0,50	-0,30	0,0013	0,20	0,68	0,38302	0,01064	-0,10804
42	0,20	0,29	0,37	0,15	0,17	0,32	0,06	0,0033	2,20	0,89	0,18935	0,20966	-0,07971

<ID>	k_up_1	k_up_2	k_up_3	k_up_4	k_low_2	k_low_3	k_low_4	Delta_z	alpha	Mach	clt	cdt	cmt
43	0,28	0,06	0,14	0,25	0,07	0,45	-0,38	0,0018	0,70	0,63	0,4587	0,01631	-0,09652
44	0,18	0,24	0,32	0,12	0,20	0,27	-0,07	0,0039	2,70	0,83	-0,10222	0,08301	0,08273
45	0,23	0,15	0,05	0,31	0,01	0,36	-0,22	0,0008	-0,30	0,53	0,30596	0,01107	-0,09154
46	0,12	0,33	0,23	0,18	0,14	0,18	0,08	0,0028	1,70	0,73	0,35986	0,03113	-0,0503
47	0,26	0,30	0,20	0,12	0,01	0,26	-0,09	0,0009	2,60	0,85	0,34477	0,13452	-0,1746
48	0,16	0,12	0,38	0,25	0,14	0,44	-0,40	0,0030	0,60	0,64	0,62163	0,01319	-0,16819
49	0,21	0,39	0,11	0,19	-0,05	0,17	0,06	0,0019	1,60	0,74	0,33812	0,04891	-0,06751
50	0,10	0,21	0,29	0,32	0,08	0,35	-0,24	0,0040	-0,50	0,54	0,48008	0,01158	-0,1566
51	0,18	0,34	0,06	0,22	-0,02	0,22	0,14	0,0014	1,10	0,80	0,20116	0,05414	-0,03136
52	0,29	0,16	0,24	0,35	0,11	0,40	-0,17	0,0035	-1,00	0,59	0,22781	0,01352	-0,10649
53	0,13	0,25	0,15	0,16	0,05	0,31	-0,01	0,0004	2,10	0,90	0,297	0,12251	-0,08531
54	0,24	0,07	0,33	0,29	0,18	0,49	-0,32	0,0024	0,00	0,69	0,3046	0,01373	-0,11151
55	0,14	0,14	0,40	0,30	0,10	0,33	-0,20	0,0017	-0,20	0,51	0,4704	0,01151	-0,14932
56	0,25	0,32	0,22	0,17	-0,03	0,15	0,10	0,0037	1,80	0,72	0,46984	0,04182	-0,06744
57	0,20	0,05	0,31	0,24	0,16	0,42	-0,36	0,0007	0,80	0,62			
58	0,30	0,23	0,13	0,11	0,03	0,24	-0,05	0,0027	2,90	0,82	0,51551	0,13443	-0,1646
59	0,22	0,10	0,26	0,27	0,19	0,47	-0,28	0,0001	0,30	0,67	0,31022	0,01398	-0,09173
60	0,12	0,28	0,08	0,14	0,06	0,29	0,02	0,0022	2,30	0,87	0,16264	0,09635	0,02477
61	0,28	0,19	0,35	0,33	0,13	0,38	-0,13	0,0012	-0,70	0,57	0,28026	0,01292	-0,10987
62	0,17	0,37	0,17	0,20	0,00	0,20	0,18	0,0032	1,30	0,77	0,15711	0,03957	-0,01623
63	0,27	0,32	0,12	0,28	0,12	0,35	-0,11	0,0016	2,20	0,53	0,58699	0,01358	-0,06381
64	0,16	0,14	0,30	0,15	-0,01	0,17	0,19	0,0036	0,10	0,74	0,13972	0,01081	-0,02095
65	0,21	0,23	0,21	0,34	0,18	0,44	-0,27	0,0006	1,20	0,63	0,54644	0,0139	-0,10839
66	0,11	0,05	0,39	0,21	0,05	0,26	0,04	0,0026	-0,90	0,84	-0,30822	0,05268	-0,01895
67	0,19	0,28	0,17	0,31	0,15	0,49	-0,34	0,0000	1,70	0,68			
68	0,29	0,10	0,35	0,18	0,02	0,31	-0,04	0,0021	-0,40	0,89	-0,08795	0,15618	-0,01183
69	0,14	0,37	0,08	0,25	0,09	0,40	-0,19	0,0011	2,70	0,58	0,70058	0,01375	-0,07348
70	0,24	0,19	0,26	0,12	-0,04	0,22	0,11	0,0031	0,60	0,79	0,23663	0,04087	-0,05468
71	0,12	0,12	0,28	0,20	0,07	0,24	0,06	0,0008	-0,60	0,81	-0,00971	0,01973	-0,05624
72	0,23	0,30	0,10	0,33	0,20	0,42	-0,30	0,0029	1,40	0,61	0,59797	0,0137	-0,10152
73	0,18	0,21	0,37	0,13	0,00	0,15	0,15	0,0018	0,40	0,71	0,25646	0,0136	-0,04497
74	0,28	0,39	0,19	0,26	0,13	0,33	-0,15	0,0039	2,40	0,50	0,71574	0,01342	-0,09149
75	0,20	0,17	0,32	0,10	-0,03	0,19	0,08	0,0013	0,90	0,76	0,35171	0,02133	-0,05883
76	0,10	0,35	0,14	0,23	0,10	0,37	-0,23	0,0034	3,00	0,56	0,78843	0,01486	-0,09937
77	0,25	0,08	0,23	0,17	0,04	0,28	-0,08	0,0003	-0,10	0,86	-0,02646	0,07717	-0,00542
78	0,15	0,26	0,05	0,30	0,17	0,46	-0,38	0,0024	1,90	0,66	0,68325	0,01553	-0,10435
79	0,23	0,38	0,38	0,24	-0,02	0,38	-0,25	0,0004	2,80	0,57	0,94042	0,01709	-0,14033
80	0,13	0,20	0,20	0,11	0,11	0,20	0,06	0,0025	0,80	0,77	0,24091	0,0175	-0,02885
81	0,29	0,29	0,29	0,30	0,04	0,47	-0,40	0,0015	1,80	0,67	0,77198	0,03262	-0,14363
82	0,18	0,11	0,11	0,17	0,17	0,29	-0,10	0,0035	-0,20	0,88	0,19448	0,09187	-0,07068
83	0,10	0,24	0,24	0,34	0,01	0,43	-0,32	0,0020	1,30	0,62	0,76303	0,01322	-0,16384
84	0,21	0,06	0,06	0,21	0,14	0,25	-0,02	0,0040	-0,80	0,82	-0,12388	0,04263	0,02208
85	0,16	0,33	0,33	0,27	-0,05	0,34	-0,17	0,0009	2,30	0,52	0,85387	0,01407	-0,13854
86	0,26	0,15	0,15	0,14	0,08	0,16	0,13	0,0030	0,30	0,72	0,10294	0,01615	-0,00277
87	0,17	0,09	0,22	0,19	0,19	0,32	-0,06	0,0012	-0,50	0,90	-0,03389	0,12792	0,02903
88	0,27	0,27	0,40	0,32	0,06	0,50	-0,36	0,0032	1,50	0,70	0,66839	0,03886	-0,16873
89	0,12	0,18	0,13	0,13	0,13	0,23	0,10	0,0002	0,50	0,80	0,07637	0,01736	0,01484
90	0,22	0,36	0,31	0,26	0,00	0,41	-0,21	0,0022	2,60	0,59	0,845	0,01609	-0,11457
91	0,30	0,22	0,09	0,16	0,09	0,18	0,17	0,0007	0,00	0,75	-0,01976	0,04378	0,00604
92	0,20	0,40	0,27	0,29	-0,04	0,36	-0,13	0,0027	2,10	0,54	0,80686	0,01501	-0,11856
93	0,25	0,13	0,18	0,22	0,16	0,27	0,02	0,0017	-1,00	0,85	0,12858	0,08881	-0,07256

<ID>	k_up_1	k_up_2	k_up_3	k_up_4	k_low_2	k_low_3	k_low_4	Delta_z	alpha	Mach	clt	cdt	cmt
94	0,14	0,31	0,36	0,35	0,03	0,45	-0,29	0,0038	1,00	0,65	0,69322	0,01833	-0,16094
95	0,18	0,17	0,23	0,24	0,05	0,50	0,07	0,0005	-0,70	0,88	0,15396	0,13145	-0,0603
96	0,28	0,35	0,05	0,11	0,18	0,32	-0,24	0,0025	1,40	0,68	0,4176	0,041	-0,07914
97	0,13	0,08	0,32	0,31	-0,02	0,41	-0,09	0,0015	0,30	0,78	0,14494	0,02096	-0,07274
98	0,23	0,26	0,14	0,18	0,11	0,23	-0,39	0,0036	2,40	0,58	0,94738	0,01552	-0,14122
99	0,26	0,13	0,36	0,34	-0,05	0,37	-0,01	0,0010	0,80	0,73	0,31758	0,01254	-0,0619
100	0,15	0,31	0,18	0,21	0,08	0,19	-0,31	0,0031	2,90	0,52	0,97966	0,01605	-0,15259
101	0,20	0,22	0,27	0,28	0,02	0,46	0,14	0,0000	-0,20	0,83	0,16276	0,08595	-0,0271
102	0,10	0,40	0,09	0,15	0,15	0,28	-0,16	0,0020	1,90	0,63	0,6048	0,01493	-0,07124
103	0,22	0,28	0,07	0,16	0,13	0,21	-0,35	0,0018	2,10	0,55			
104	0,11	0,10	0,25	0,29	0,00	0,39	-0,05	0,0038	0,10	0,75	0,26518	0,01269	-0,08582
105	0,27	0,37	0,16	0,10	0,19	0,30	-0,20	0,0008	1,10	0,65	0,44865	0,02556	-0,06897
106	0,17	0,19	0,34	0,23	0,06	0,48	0,10	0,0028	-1,00	0,86	0,05583	0,13915	-0,05502
107	0,14	0,33	0,21	0,13	0,16	0,25	-0,12	0,0002	1,60	0,60	0,55564	0,0122	-0,07824
108	0,24	0,15	0,39	0,26	0,03	0,43	0,18	0,0023	-0,40	0,81	-0,15209	0,06875	-0,0147
109	0,19	0,24	0,12	0,19	0,10	0,16	-0,28	0,0013	2,60	0,50	0,80626	0,01389	-0,11897
110	0,30	0,06	0,30	0,32	-0,03	0,34	0,03	0,0033	0,60	0,70	0,30079	0,01738	-0,05821
111	0,12	0,21	0,17	0,27	0,19	0,42	0,20	0,0014	-0,30	0,82	0,14826	0,08355	-0,00156
112	0,22	0,39	0,35	0,14	0,06	0,24	-0,10	0,0034	1,70	0,61	0,6889	0,0182	-0,10647
113	0,17	0,12	0,08	0,33	0,12	0,33	0,05	0,0004	0,70	0,72	0,17477	0,01135	-0,02207
114	0,28	0,30	0,26	0,20	-0,01	0,15	-0,26	0,0024	2,80	0,51	1	0,0164	-0,14796
115	0,25	0,07	0,13	0,30	0,09	0,38	-0,03	0,0009	0,20	0,77	0,08236	0,02266	-0,01743
116	0,15	0,25	0,31	0,17	-0,04	0,20	-0,33	0,0029	2,20	0,56	1	0,01502	-0,18119
117	0,30	0,16	0,22	0,24	0,15	0,47	0,12	0,0019	-0,80	0,87	0,14166	0,17828	-0,06866
118	0,20	0,34	0,40	0,11	0,02	0,29	-0,18	0,0040	1,20	0,66	0,63745	0,02867	-0,13506
119	0,29	0,23	0,33	0,22	0,01	0,18	-0,30	0,0001	3,00	0,54			
120	0,19	0,05	0,15	0,35	0,14	0,36	0,01	0,0022	1,00	0,74	0,18566	0,01317	-0,02466
121	0,24	0,32	0,24	0,15	0,07	0,27	-0,14	0,0011	2,00	0,64	0,68393	0,0194	-0,08475
122	0,13	0,14	0,06	0,28	0,20	0,45	0,16	0,0032	-0,10	0,84	0,4774	0,06911	-0,09263
123	0,16	0,36	0,28	0,12	0,04	0,31	-0,22	0,0016	1,50	0,69	0,68598	0,04004	-0,1402
124	0,26	0,18	0,10	0,25	0,17	0,49	0,09	0,0037	-0,60	0,90	0,02769	0,19553	0,04864
125	0,11	0,27	0,37	0,19	-0,02	0,22	-0,37	0,0006	2,50	0,59			
126	0,21	0,09	0,19	0,32	0,11	0,40	-0,07	0,0027	0,50	0,79	0,14507	0,02673	-0,02038
127	0,16	0,29	0,39	0,33	0,07	0,27	0,13	0,0013	0,30	0,75	-0,03447	0,02766	-0,03965
128	0,26	0,11	0,21	0,20	0,20	0,45	-0,18	0,0034	2,40	0,54	0,45828	0,01365	-0,04617
129	0,10	0,38	0,30	0,26	0,00	0,18	-0,03	0,0003	-0,70	0,85	-0,33057	0,09101	-0,03455
130	0,21	0,20	0,12	0,13	0,13	0,36	-0,33	0,0023	1,40	0,64			
131	0,29	0,34	0,25	0,23	-0,03	0,23	0,05	0,0008	-0,20	0,90	-0,03756	0,20524	-0,08795
132	0,18	0,16	0,07	0,10	0,10	0,41	-0,25	0,0028	1,90	0,70	0,48587	0,01872	-0,03138
133	0,24	0,25	0,34	0,30	0,03	0,32	0,20	0,0018	0,90	0,80	-0,02058	0,04883	-0,04094
134	0,13	0,07	0,16	0,17	0,16	0,50	-0,10	0,0039	2,90	0,59	0,34244	0,01299	-0,00082
135	0,25	0,14	0,19	0,15	0,11	0,34	-0,37	0,0000	1,10	0,62			
136	0,14	0,32	0,37	0,28	-0,02	0,16	-0,06	0,0021	-0,90	0,82	0,01492	0,07596	-0,18367
137	0,30	0,05	0,10	0,21	0,18	0,43	-0,22	0,0011	2,10	0,52	0,38962	0,01317	-0,03816
138	0,20	0,23	0,28	0,34	0,05	0,25	0,09	0,0031	0,10	0,72	0,25478	0,0162	-0,0733
139	0,12	0,09	0,05	0,18	0,15	0,48	-0,14	0,0016	2,60	0,57	0,30785	0,01205	-0,00058
140	0,22	0,27	0,23	0,31	0,02	0,30	0,16	0,0036	0,60	0,77	0,02388	0,02601	0,00573
141	0,17	0,18	0,14	0,12	0,08	0,39	-0,29	0,0005	1,60	0,67			
142	0,27	0,36	0,32	0,25	-0,05	0,21	0,01	0,0026	-0,40	0,87	-0,20131	0,19019	-0,03173
143	0,14	0,26	0,11	0,32	0,20	0,28	0,15	0,0007	0,70	0,76	0,1237	0,01832	-0,00111
144	0,24	0,08	0,29	0,19	0,07	0,46	-0,16	0,0027	2,80	0,55	0,58517	0,01367	-0,05949



<ID>	k_up_1	k_up_2	k_up_3	k_up_4	k_low_2	k_low_3	k_low_4	Delta_z	alpha	Mach	clt	cdt	cmt
145	0,19	0,35	0,20	0,25	0,14	0,19	-0,01	0,0017	-0,30	0,86	-0,2764	0,13003	0,05046
146	0,29	0,17	0,38	0,12	0,01	0,37	-0,31	0,0037	1,80	0,66	0,85595	0,01983	-0,12843
147	0,22	0,40	0,15	0,29	0,11	0,15	-0,08	0,0012	-0,80	0,81	-0,13697	0,09575	-0,05974
148	0,11	0,22	0,33	0,16	-0,02	0,33	-0,39	0,0032	1,20	0,61	0,86927	0,01365	-0,18435
149	0,27	0,31	0,06	0,35	0,17	0,24	0,07	0,0002	0,20	0,71	0,13157	0,02274	-0,02867
150	0,16	0,13	0,24	0,22	0,04	0,42	-0,24	0,0022	2,30	0,50	0,63771	0,01359	-0,09829
151	0,25	0,19	0,31	0,11	-0,01	0,40	-0,27	0,0020	2,00	0,68	0,77961	0,02111	-0,10168
152	0,15	0,37	0,13	0,24	0,12	0,22	0,03	0,0040	0,00	0,89	0,00898	0,14353	-0,05964
153	0,20	0,10	0,40	0,17	0,06	0,49	-0,12	0,0009	3,00	0,58	0,57864	0,01345	-0,05648
154	0,10	0,28	0,22	0,30	0,19	0,31	0,18	0,0030	1,00	0,78	0,00011	0,03942	0,03603
155	0,18	0,06	0,36	0,21	0,03	0,44	-0,20	0,0004	2,50	0,53	0,65249	0,01329	-0,09911
156	0,28	0,24	0,18	0,34	0,16	0,26	0,11	0,0025	0,50	0,73	0,10314	0,02055	-0,01859
157	0,12	0,15	0,27	0,14	-0,04	0,35	-0,35	0,0014	1,50	0,63			
158	0,23	0,33	0,09	0,27	0,09	0,17	-0,05	0,0035	-0,60	0,84	-0,12475	0,10764	-0,02376
159	0,30	0,11	0,14	0,29	0,13	0,22	-0,17	0,0002	1,20	0,69	0,5185	0,03176	-0,08981
160	0,20	0,29	0,32	0,16	0,00	0,40	0,14	0,0023	-0,90	0,89	-0,10566	0,16977	-0,03077
161	0,25	0,20	0,05	0,23	0,20	0,31	-0,32	0,0012	2,20	0,59	0,65417	0,01411	-0,08465
162	0,15	0,38	0,23	0,10	0,07	0,49	-0,02	0,0033	0,20	0,79	-0,4002	0,07035	0,18599
163	0,17	0,15	0,09	0,26	0,17	0,27	-0,40	0,0018	2,70	0,54	0,83734	0,01505	-0,13774
164	0,28	0,33	0,27	0,13	0,04	0,45	-0,09	0,0038	0,70	0,74	0,17209	0,04564	-0,07084
165	0,12	0,06	0,18	0,32	0,10	0,18	-0,25	0,0007	1,70	0,64	0,76693	0,01364	-0,162
166	0,23	0,24	0,36	0,19	-0,03	0,36	0,06	0,0028	-0,40	0,84	-0,30026	0,08773	0,05051
167	0,11	0,36	0,34	0,11	0,05	0,47	0,02	0,0010	0,40	0,77	-0,00127	0,07695	-0,00071
168	0,21	0,18	0,16	0,24	0,18	0,29	-0,28	0,0030	2,50	0,56	0,74649	0,01403	-0,11254
169	0,16	0,27	0,25	0,18	-0,01	0,38	0,17	0,0000	-0,60	0,87	-0,01833	0,1077	-0,01679
170	0,26	0,09	0,07	0,31	0,12	0,20	-0,13	0,0020	1,40	0,66	0,49343	0,02164	-0,07871
171	0,24	0,31	0,29	0,21	-0,04	0,33	0,10	0,0005	-0,10	0,82	-0,2712	0,07838	0,01247
172	0,13	0,13	0,11	0,34	0,09	0,15	-0,21	0,0025	1,90	0,61	0,79487	0,01322	-0,15383
173	0,29	0,40	0,38	0,14	0,02	0,42	-0,05	0,0015	0,90	0,71	0,10754	0,0591	-0,05647
174	0,19	0,22	0,20	0,27	0,15	0,24	-0,36	0,0036	3,00	0,51	0,97847	0,01641	-0,16207
175	0,21	0,05	0,26	0,35	0,00	0,17	-0,19	0,0016	1,80	0,60	0,81745	0,0138	-0,16264
176	0,10	0,23	0,08	0,22	0,13	0,35	0,12	0,0037	-0,20	0,80	0,13272	0,03014	-0,00177
177	0,26	0,14	0,35	0,28	0,06	0,26	-0,34	0,0006	2,80	0,50	1	0,01569	-0,17491
178	0,15	0,32	0,17	0,15	0,19	0,44	-0,04	0,0027	0,80	0,70	0,15314	0,01563	0,00328
179	0,13	0,19	0,40	0,25	0,03	0,30	-0,26	0,0001	2,30	0,55	0,87905	0,01431	-0,16798
180	0,23	0,37	0,22	0,12	0,16	0,48	0,04	0,0021	0,30	0,75	-0,277	0,06463	0,05062
181	0,18	0,10	0,31	0,32	-0,04	0,21	-0,11	0,0011	1,30	0,65	0,70127	0,01331	-0,14942
182	0,28	0,28	0,13	0,19	0,09	0,39	0,19	0,0032	-0,70	0,86	0,11516	0,15444	-0,07937
183	0,19	0,39	0,06	0,14	0,18	0,46	-0,07	0,0009	0,50	0,73	0,01851	0,03898	0,0355
184	0,30	0,21	0,24	0,27	0,05	0,28	-0,38	0,0029	2,60	0,52	1	0,01676	-0,16227
185	0,14	0,30	0,15	0,20	0,11	0,37	0,08	0,0019	-0,50	0,83	0,12721	0,0765	-0,04006
186	0,25	0,12	0,33	0,33	-0,02	0,19	-0,23	0,0039	1,60	0,62	0,91855	0,01537	-0,18466
187	0,27	0,25	0,19	0,17	0,08	0,41	0,15	0,0014	-1,00	0,88	0,0208	0,17576	-0,04521
188	0,17	0,07	0,37	0,30	-0,05	0,23	-0,15	0,0034	1,00	0,68	0,73766	0,01387	-0,17678
189	0,22	0,34	0,10	0,10	0,14	0,50	0,06	0,0004	0,00	0,78	0,03146	0,07889	0,04434
190	0,11	0,16	0,28	0,23	0,01	0,32	-0,30	0,0024	2,10	0,57	0,81843	0,0136	-0,15229
191	0,22	0,21	0,32	0,18	0,17	0,43	-0,01	0,0008	1,50	0,72	0,16324	0,01347	0,00848
192	0,12	0,39	0,14	0,31	0,04	0,25	-0,32	0,0028	-0,60	0,51	0,60246	0,01269	-0,16938
193	0,27	0,12	0,23	0,11	0,10	0,34	0,14	0,0018	2,50	0,82	0,08777	0,07097	0,05558
194	0,17	0,30	0,05	0,24	-0,03	0,16	-0,16	0,0038	0,40	0,62	0,57397	0,01165	-0,11467
195	0,14	0,08	0,27	0,15	0,14	0,38	0,06	0,0013	3,00	0,87	0,20925	0,10693	0,0833

<ID>	k_up_1	k_up_2	k_up_3	k_up_4	k_low_2	k_low_3	k_low_4	Delta_z	alpha	Mach	clt	cdt	cmt
196	0,25	0,26	0,09	0,28	0,01	0,20	-0,24	0,0033	1,00	0,67	0,75471	0,02516	-0,13406
197	0,19	0,17	0,36	0,21	0,20	0,47	-0,09	0,0003	2,00	0,77	0,13181	0,05287	0,01363
198	0,30	0,35	0,18	0,34	0,07	0,29	-0,39	0,0023	-0,10	0,56	0,71996	0,01498	-0,1762
199	0,18	0,23	0,16	0,23	-0,04	0,18	-0,13	0,0015	0,20	0,64	0,5265	0,01118	-0,11706
200	0,29	0,05	0,34	0,10	0,09	0,36	0,18	0,0036	2,20	0,85	0,07232	0,10347	0,06165
201	0,13	0,32	0,07	0,29	0,02	0,27	-0,28	0,0005	-0,80	0,54	0,43266	0,01078	-0,13325
202	0,23	0,14	0,25	0,16	0,15	0,45	0,03	0,0026	1,20	0,74	0,12304	0,01516	0,03874
203	0,26	0,37	0,12	0,33	0,06	0,32	-0,35	0,0000	-0,30	0,59			
204	0,15	0,19	0,30	0,20	0,19	0,50	-0,05	0,0020	1,70	0,79	0,00302	0,06605	0,11474
205	0,21	0,28	0,21	0,26	-0,01	0,23	-0,20	0,0010	0,70	0,69	0,73806	0,02098	-0,1494
206	0,10	0,10	0,39	0,13	0,12	0,41	0,10	0,0031	2,70	0,90	0,23995	0,15981	-0,02131
207	0,28	0,18	0,08	0,20	0,03	0,48	-0,03	0,0012	1,60	0,78	0,18493	0,0573	0,02848
208	0,17	0,36	0,26	0,33	0,16	0,30	-0,34	0,0032	-0,50	0,58	0,62688	0,01571	-0,18148
209	0,23	0,09	0,17	0,14	-0,03	0,39	0,12	0,0001	2,60	0,88	0,34389	0,12518	0,00191
210	0,12	0,27	0,35	0,27	0,10	0,21	-0,18	0,0022	0,60	0,68	0,66705	0,01992	-0,1751
211	0,15	0,13	0,22	0,11	0,00	0,35	0,20	0,0006	2,10	0,83	0,33895	0,05583	0,01916
212	0,25	0,31	0,40	0,24	0,13	0,17	-0,11	0,0027	0,10	0,63	0,53606	0,01467	-0,14014
213	0,10	0,22	0,13	0,17	0,06	0,44	0,05	0,0017	1,10	0,73	0,17661	0,01194	0,01827
214	0,20	0,40	0,31	0,30	0,19	0,26	-0,26	0,0037	-1,00	0,53	0,5036	0,00752	-0,16733
215	0,11	0,29	0,24	0,28	0,08	0,19	-0,22	0,0004	0,80	0,65	0,79189	0,01284	-0,17734
216	0,21	0,11	0,06	0,15	-0,05	0,37	0,08	0,0024	2,90	0,86	0,24905	0,09239	0,07869
217	0,16	0,38	0,33	0,35	0,15	0,28	-0,37	0,0014	-0,20	0,55	0,75048	0,01203	-0,20951
218	0,27	0,20	0,15	0,22	0,02	0,46	-0,07	0,0035	1,80	0,76	0,37291	0,04689	-0,02705
219	0,24	0,34	0,38	0,32	0,18	0,24	-0,30	0,0019	-0,70	0,50	0,5967	0,0151	-0,18492
220	0,14	0,16	0,20	0,19	0,05	0,42	0,01	0,0040	1,30	0,70	0,26732	0,01289	-0,01366
221	0,29	0,25	0,29	0,25	0,11	0,15	-0,15	0,0009	0,30	0,60	0,57455	0,01342	-0,13476
222	0,19	0,07	0,11	0,12	-0,02	0,33	0,16	0,0029	2,40	0,81	0,2863	0,0424	0,07265
223	0,13	0,38	0,21	0,22	-0,04	0,38	-0,35	0,0019	0,00	0,67	0,72817	0,02362	-0,17295
224	0,24	0,20	0,39	0,35	0,09	0,20	-0,04	0,0039	2,00	0,88	-0,01508	0,14389	-0,0439
225	0,18	0,29	0,12	0,15	0,03	0,47	-0,19	0,0008	-1,00	0,57	0,05551	0,00224	-0,03522
226	0,29	0,11	0,30	0,28	0,16	0,29	0,11	0,0029	1,00	0,78	0,01871	0,03298	0,01694
227	0,21	0,24	0,08	0,12	0,06	0,42	-0,12	0,0003	-0,50	0,52	0,00967	0,01544	-0,00672
228	0,11	0,06	0,26	0,25	0,19	0,24	0,19	0,0024	1,50	0,72	0,1304	0,01164	0,00181
229	0,26	0,33	0,17	0,18	-0,01	0,33	-0,27	0,0013	0,50	0,62	0,60684	0,01388	-0,10806
230	0,16	0,15	0,35	0,31	0,12	0,15	0,04	0,0034	2,60	0,83	0,31758	0,05838	-0,1169
231	0,28	0,08	0,37	0,26	0,14	0,31	0,07	0,0006	1,30	0,80	-0,02673	0,03933	0,03622
232	0,17	0,26	0,19	0,13	0,01	0,49	-0,23	0,0026	-0,80	0,60	0,1337	0,00966	-0,04701
233	0,22	0,17	0,28	0,33	0,08	0,22	-0,08	0,0016	2,30	0,90	0,1622	0,13625	-0,09634
234	0,12	0,35	0,10	0,20	-0,05	0,40	-0,38	0,0036	0,20	0,70	0,71375	0,02698	-0,15988
235	0,20	0,22	0,23	0,30	0,11	0,17	0,06	0,0011	2,80	0,85	0,24177	0,08581	-0,08985
236	0,30	0,40	0,05	0,17	-0,02	0,35	-0,31	0,0031	0,80	0,65	0,59664	0,03818	-0,10416
237	0,15	0,13	0,32	0,23	0,17	0,26	0,15	0,0001	1,80	0,75	0,19236	0,01542	0,00272
238	0,25	0,31	0,14	0,10	0,04	0,44	-0,15	0,0021	-0,30	0,54	0,12729	0,01264	-0,02379
239	0,16	0,32	0,29	0,18	0,10	0,37	-0,33	0,0002	0,90	0,63			
240	0,27	0,14	0,11	0,31	-0,03	0,19	-0,02	0,0022	2,90	0,84	0,63618	0,11032	-0,19785
241	0,11	0,23	0,38	0,11	0,17	0,46	-0,17	0,0012	-0,10	0,53	0,1934	0,01157	-0,05803
242	0,22	0,05	0,20	0,24	0,04	0,28	0,13	0,0033	1,90	0,74	0,3081	0,02183	0,01278
243	0,30	0,27	0,34	0,14	0,20	0,50	-0,25	0,0017	-0,60	0,58	0,10861	0,00953	-0,05268
244	0,19	0,09	0,16	0,27	0,07	0,32	0,05	0,0038	1,40	0,79	0,28067	0,02016	-0,00531
245	0,24	0,36	0,25	0,21	0,13	0,41	-0,40	0,0007	0,40	0,69			
246	0,14	0,18	0,07	0,34	0,00	0,23	-0,10	0,0028	2,40	0,89	0,51076	0,08128	-0,20254

<ID>	k_up_1	k_up_2	k_up_3	k_up_4	k_low_2	k_low_3	k_low_4	Delta_z	alpha	Mach	clt	cdt	cmt
247	0,23	0,12	0,13	0,26	0,02	0,25	0,17	0,0015	1,70	0,71	0,28069	0,01716	0,01573
248	0,13	0,30	0,31	0,13	0,15	0,43	-0,14	0,0035	-0,40	0,51	0,18118	0,01565	-0,05564
249	0,28	0,21	0,22	0,32	-0,05	0,16	0,02	0,0004	2,70	0,81	0,62011	0,09651	-0,18833
250	0,18	0,39	0,40	0,19	0,08	0,34	-0,29	0,0025	0,60	0,61	0,69156	0,01747	-0,15837
251	0,10	0,16	0,18	0,35	-0,01	0,21	-0,06	0,0010	2,20	0,86	0,5477	0,06171	-0,19462
252	0,20	0,34	0,36	0,22	0,12	0,39	-0,36	0,0030	0,10	0,66	0,58936	0,02245	-0,16224
253	0,15	0,07	0,09	0,29	0,05	0,30	0,09	0,0020	1,10	0,76	0,19681	0,01087	-0,0001
254	0,26	0,25	0,27	0,16	0,18	0,48	-0,21	0,0040	-0,90	0,56	0,054	0,02778	-0,04225
255	0,24	0,15	0,17	0,13	0,20	0,41	0,01	0,0020	2,90	0,74	0,24742	0,03722	0,0471
256	0,13	0,33	0,35	0,26	0,07	0,23	-0,30	0,0040	0,90	0,53	0,84694	0,01462	-0,19408
257	0,29	0,06	0,08	0,19	0,13	0,50	0,16	0,0010	1,90	0,84	0,34244	0,13605	0,01762
258	0,18	0,24	0,26	0,32	0,00	0,32	-0,15	0,0030	-0,10	0,64	0,51245	0,01246	-0,13666
259	0,11	0,10	0,12	0,22	0,10	0,45	0,08	0,0005	1,40	0,89	0,30186	0,11259	0,00028
260	0,21	0,28	0,30	0,35	-0,03	0,27	-0,22	0,0025	-0,70	0,69	0,65951	0,01727	-0,20009
261	0,16	0,19	0,21	0,16	0,16	0,36	-0,07	0,0015	2,40	0,79	0,32223	0,04487	-0,01353
262	0,26	0,37	0,39	0,29	0,03	0,18	-0,38	0,0035	0,40	0,58	0,98868	0,01698	-0,23125
263	0,17	0,31	0,33	0,31	-0,01	0,29	-0,11	0,0007	-0,40	0,61	0,51528	0,01242	-0,14178
264	0,28	0,13	0,15	0,18	0,12	0,47	0,20	0,0028	1,60	0,81	0,28838	0,0972	0,01453
265	0,12	0,40	0,24	0,24	0,05	0,20	-0,26	0,0017	0,60	0,51	0,73158	0,01306	-0,16066
266	0,22	0,22	0,06	0,11	0,18	0,38	0,04	0,0038	2,70	0,71	0,26068	0,03018	0,05371
267	0,30	0,35	0,28	0,27	0,02	0,16	-0,34	0,0012	0,10	0,56	0,82481	0,01476	-0,19124
268	0,20	0,17	0,10	0,14	0,15	0,34	-0,03	0,0033	2,20	0,76	0,36421	0,03733	0,00444
269	0,25	0,26	0,37	0,34	-0,05	0,25	-0,18	0,0002	-0,90	0,66	0,64094	0,01409	-0,19804
270	0,15	0,08	0,19	0,21	0,08	0,43	0,12	0,0022	1,10	0,87	0,30647	0,08743	-0,01381
271	0,27	0,18	0,25	0,14	0,07	0,33	-0,05	0,0001	2,00	0,78	0,40207	0,05833	-0,07292
272	0,17	0,36	0,07	0,27	0,20	0,15	-0,36	0,0021	0,00	0,57	0,61551	0,01117	-0,15874
273	0,22	0,09	0,34	0,20	0,01	0,42	0,10	0,0011	1,00	0,88	0,05901	0,11572	0,04831
274	0,11	0,27	0,16	0,33	0,14	0,24	-0,20	0,0031	-1,00	0,67	0,40334	0,01367	-0,15656
275	0,19	0,05	0,38	0,17	-0,02	0,46	0,18	0,0016	1,50	0,83	0,31738	0,07078	-0,01197
276	0,30	0,23	0,20	0,30	0,11	0,28	-0,13	0,0037	-0,50	0,62	0,33553	0,01304	-0,10487
277	0,14	0,14	0,29	0,10	0,04	0,37	0,03	0,0006	2,50	0,72	0,45709	0,01296	-0,00902
278	0,24	0,32	0,11	0,23	0,17	0,19	-0,28	0,0026	0,50	0,52	0,56228	0,01308	-0,12648
279	0,13	0,25	0,09	0,35	0,12	0,26	-0,24	0,0014	-0,80	0,70	0,41792	0,01173	-0,15084
280	0,23	0,07	0,27	0,22	-0,01	0,44	0,06	0,0034	1,30	0,90	0,24243	0,13763	-0,0404
281	0,18	0,34	0,18	0,28	0,19	0,17	-0,39	0,0003	0,20	0,60			
282	0,28	0,16	0,36	0,15	0,06	0,35	-0,09	0,0024	2,30	0,80	0,50098	0,0733	-0,16798
283	0,20	0,38	0,22	0,25	0,16	0,22	-0,32	0,0008	0,80	0,55	0,751	0,01394	-0,16036
284	0,10	0,20	0,40	0,12	0,03	0,40	-0,01	0,0029	2,80	0,75	0,39684	0,03628	-0,05938
285	0,26	0,29	0,13	0,31	0,09	0,31	-0,17	0,0019	-0,30	0,65	0,38894	0,01327	-0,10185
286	0,15	0,11	0,31	0,18	-0,04	0,49	0,14	0,0039	1,80	0,85	0,22635	0,0909	0,04489
287	0,12	0,35	0,36	0,16	0,01	0,45	-0,37	0,0009	-0,50	0,68			
288	0,22	0,17	0,18	0,29	0,14	0,27	-0,06	0,0030	1,60	0,88	0,05369	0,12176	0,01159
289	0,17	0,26	0,27	0,22	0,07	0,36	-0,21	0,0019	0,60	0,58	0,52638	0,01265	-0,11354
290	0,27	0,08	0,09	0,35	0,20	0,18	0,09	0,0040	2,60	0,78	0,31351	0,05824	-0,00587
291	0,25	0,30	0,23	0,19	0,04	0,40	-0,14	0,0014	0,00	0,53	0,31425	0,01254	-0,06711
292	0,14	0,12	0,05	0,32	0,17	0,22	0,17	0,0035	2,10	0,73	0,23804	0,01273	0,02139
293	0,30	0,39	0,32	0,12	-0,03	0,49	-0,29	0,0004	-1,00	0,63			
294	0,19	0,21	0,14	0,25	0,10	0,31	0,02	0,0024	1,10	0,83	0,06696	0,05424	0,0141
295	0,29	0,10	0,21	0,33	0,18	0,15	0,05	0,0017	2,90	0,76	0,53085	0,05604	-0,06301
296	0,18	0,28	0,39	0,20	0,05	0,33	-0,25	0,0037	0,80	0,55	0,69657	0,01513	-0,1518
297	0,23	0,19	0,12	0,27	0,12	0,24	-0,10	0,0006	1,80	0,86	0,03664	0,09644	0,01693

<ID>	k_up_1	k_up_2	k_up_3	k_up_4	k_low_2	k_low_3	k_low_4	Delta_z	alpha	Mach	clt	cdt	cmt
298	0,13	0,37	0,30	0,14	-0,01	0,42	-0,40	0,0027	-0,20	0,65			
299	0,16	0,14	0,07	0,24	0,09	0,29	-0,02	0,0001	1,30	0,81	0,37566	0,02798	-0,04322

Considerando só as amostras validas no cálculo:

<ID>	k_up_1	k_up_2	k_up_3	k_up_4	k_low_2	k_low_3	k_low_4	Delta_z	alpha	Mach	clt	cdt	cmt
Média	0,20	0,22	0,22	0,23	0,08	0,33	-0,08	0,0021	1,02	0,71	0,35	0,05	-0,07
Min	0,10	0,05	0,05	0,10	-0,05	0,15	-0,40	0,0000	-1,00	0,50	-0,40	0,00	-0,23
Max	0,30	0,40	0,40	0,35	0,20	0,50	0,20	0,0040	3,00	0,90	1,01	0,24	0,19

## 5. Modelo de arquivos de entrada do NMIX

### a. *data.run*

Arquivo de definição do set-up da rodada global

```
#
# input file for nsc2ke solver
#
Mesh graph output (0-no ; 1-yes) = 0
Euler/NS/Euler+Transp (0-Euler ; 1-NS ; 2-Euler+transp) = 1
Restart (0-no ; 1-yes) = 0
Restart case name = Restart.d
Symmetry (0-none ; 1-symmetry ; 2-axi-symmetry) = 0
Include nacelle type 2nd inlet/outlet (0-no ; 1-yes) = 0
Farfield radius  $r/(x_{max}-x_{min}) = 200$ 
Farfield number of points = 39
Run CFD++ at end (0-no ; 1-yes) = 0
CFD++ Turbulence Model (1-SST ; 2-RKE ; 3-SA) = 3
NMIX run scheme (0-mshserial&mcfddjob ; 1-msh&mcfddist ; 2-mshdist&mcfddjob) = 0
NSC2KE Solver Exec = nsc2ke.exe
BANG Mesher Exec = Bamg.exe
BANG Graphic Mesher Exec = Bamg-g.exe
```

### b. *data.lst*

Arquivo de definição das condições a serem rodadas para o perfil associado do data.profs – exemplo dado para 9 rodadas.

```
#
# List of cases to be run with nmix solver
#
# Re    ts    m    cldrv    cl    aoa    pfan/ps    mjet    tjet/t    nadapt    nit    lcycnit    lccttype    casename
5.7E+06 288.0  0.7    0        0.0    1      0.0        0.00    000.0    2        2000    6         0         1.d
5.7E+06 288.0  0.6    0        0.0    0      0.0        0.00    000.0    2        2000    6         0         2.d
5.7E+06 288.0  0.8    0        0.0    2      0.0        0.00    000.0    2        2000    6         0         3.d
5.7E+06 288.0  0.65   0        0.0    0.5    0.0        0.00    000.0    2        2000    6         0         4.d
5.7E+06 288.0  0.85   0        0.0    2.5    0.0        0.00    000.0    2        2000    6         0         5.d
5.7E+06 288.0  0.75   0        0.0    1.5    0.0        0.00    000.0    2        2000    6         0         7.d
5.7E+06 288.0  0.83   0        0.0    2.3    0.0        0.00    000.0    2        2000    6         0         8.d
5.7E+06 288.0  0.62   0        0.0    0.2    0.0        0.00    000.0    2        2000    6         0         9.d
5.7E+06 288.0  0.73   0        0.0    1.3    0.0        0.00    000.0    2        2000    6         0        10.d
```

### c. *data.profs*

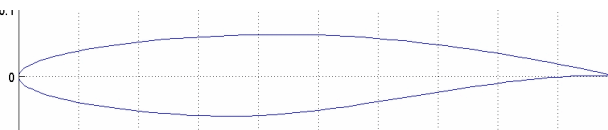
Arquivo de definição dos perfis/casos a serem rodados. – exemplo dado para 9 casos.

# LREF	DIM	DIR	PERFIS
1.0	0	Perfil	1.dat
1.0	0	Perfil	2.dat
1.0	0	Perfil	3.dat
1.0	0	Perfil	4.dat
1.0	0	Perfil	5.dat
1.0	0	Perfil	7.dat
1.0	0	Perfil	8.dat
1.0	0	Perfil	9.dat
1.0	0	Perfil	10.dat

*d. Exemplo do arquivo de geometria do RAE2822*

Arquivo de geometria .dat do **RAE2822**

129 pontos com as coordenadas (x,y)



129		0.000602	-0.003022
1.000000	0.000000	0.002408	-0.006047
0.999400	0.000121	0.005412	-0.009072
0.997590	0.000484	0.009607	-0.012098
0.994590	0.001084	0.014984	-0.015124
0.990390	0.001921	0.02153	-0.018150
0.985020	0.002986	0.029228	-0.021169
0.978470	0.004276	0.03806	-0.024177
0.970770	0.005781	0.048005	-0.027167
0.96194	0.007488	0.059039	-0.030129
0.952	0.009389	0.071136	-0.033052
0.94096	0.011470	0.084265	-0.035920
0.92886	0.013716	0.098396	-0.038718
0.91573	0.016109	0.1135	-0.041427
0.9016	0.018631	0.12952	-0.044025
0.8865	0.021264	0.14645	-0.046493
0.87048	0.023984	0.16422	-0.048803
0.85355	0.026774	0.1828	-0.050932
0.83578	0.029606	0.20215	-0.052854
0.8172	0.032459	0.22222	-0.054543
0.79785	0.035309	0.24295	-0.055973
0.77778	0.038130	0.2643	-0.057121
0.75705	0.040896	0.28622	-0.057964
0.7357	0.043585	0.30866	-0.058483
0.71378	0.046173	0.33155	-0.058663
0.69134	0.048638	0.35486	-0.058490
0.66844	0.050957	0.37851	-0.057959
0.64514	0.053111	0.40246	-0.057066
0.62149	0.055082	0.42663	-0.055816
0.59754	0.056854	0.45099	-0.054218
0.57337	0.058411	0.47547	-0.052287
0.54901	0.059745	0.5	-0.050046
0.52453	0.060844	0.52453	-0.047521
0.5	0.061703	0.54901	-0.044745
0.47547	0.062316	0.57337	-0.041756
0.450990	0.062682	0.59754	-0.038598
0.42663	0.062802	0.62149	-0.035313
0.40246	0.062679	0.64514	-0.031951
0.37851	0.062316	0.66844	-0.028560
0.35486	0.061721	0.69134	-0.025189
0.33155	0.060902	0.71378	-0.021886
0.30866	0.059868	0.7357	-0.018698
0.28622	0.058631	0.75705	-0.015666
0.2643	0.057202	0.77778	-0.012827
0.24295	0.055593	0.79785	-0.010212
0.22222	0.053817	0.8172	-0.007849
0.20215	0.051887	0.83578	-0.005757
0.1828	0.049815	0.85355	-0.003947
0.16422	0.047615	0.87048	-0.002420
0.14645	0.045299	0.8865	-0.001178
0.12952	0.042878	0.9016	-0.000206
0.1135	0.040365	0.91573	0.000510
0.098396	0.037767	0.92886	0.000995
0.084265	0.035097	0.94096	0.001276
0.071136	0.032364	0.950	0.001384
0.059039	0.029574	0.96194	0.001353
0.048005	0.026737	0.97077	0.001219
0.03806	0.023859	0.97847	0.001016
0.029228	0.020946	0.98502	0.000778
0.02153	0.018004	0.99039	0.000538
0.014984	0.015037	0.99459	0.000320
0.009607	0.012052	0.99759	0.000148
0.005412	0.009052	0.9994	0.000038
0.002408	0.006041	1	-0.000039
0.000602	0.003021		
0	0.000000		

## 6. Função de geração dos arquivos de entrada do NMIX

A entrada é o banco de dados de 300 linhas de amostras com 10 colunas de parâmetros (8 parâmetros de geometria, 2 de voo)

```
clear all
load('DOE_Sobol.txt');
amostras=DOE_Sobol;

m=length(amostras);
N1=0.5;
N2=1.0;
n=100;
total=2*n-1;
x=linspace(0,1,n);

for j=1:m
    delta_z=amostras(j,2);
    k(1)=amostras(j,3);
    k(2)=amostras(j,4);
    k(3)=amostras(j,5);
    k(4)=amostras(j,6);
    k_lo(1)=k(1);
    k_lo(2)=amostras(j,7);
    k_lo(3)=amostras(j,8);
    k_lo(4)=amostras(j,9);

    for i=1:n
        C(i)=x(i)^N1*(1-x(i))^N2;
        S0(i)=k(1)*(1-x(i))^3;
        S1(i)=k(2)*3*((1-x(i))^2)*x(i);
        S2(i)=k(3)*3*(1-x(i))*x(i)^2;
        S3(i)=k(4)*x(i)^3;

        S0_lo(i)=k_lo(1)*(1-x(i))^3;
        S1_lo(i)=k_lo(2)*3*((1-x(i))^2)*x(i);
        S2_lo(i)=k_lo(3)*3*(1-x(i))*x(i)^2;
        S3_lo(i)=k_lo(4)*x(i)^3;
    end

    S=S0+S1+S2+S3;
    z_up=C.*S+x*delta_z;
    S_lo=S0_lo+S1_lo+S2_lo+S3_lo;
    z_lo=-(C.*S_lo+x*delta_z);

    %Teste de verificacao do nao cruzamento das partes
    up e low do perfil
    x_thickness=find(z_lo==max(z_lo));
    max_thickness=z_up(x_thickness)-z_lo(x_thickness);

    if max_thickness>=0
        %flag de perfil OK
        fl(j)=1;
        %Criacao do arquivo .dat de geometria
        name=sprintf('%g.dat',j);
        fid=fopen(char(name),'w');
        fprintf(fid,'%g\n',total); %Total de pontos

        %Parte superior invertida
        for i=1:n
            fprintf(fid,'%g ',x(n-i+1));
            fprintf(fid,'%g\n',z_up(n-i+1));
        end
        %Parte inferior (sem o primeiro ponto de origem
        (comum as duas partes)
        for i=2:n
            fprintf(fid,'%g ',x(i));
            fprintf(fid,'%g\n',z_lo(i));
        end
        fclose(fid);
    else
        j
        fl(j)=0;
    end
end

%Criacao do data.lst
fid=fopen('data.lst','w');
fprintf(fid,'#\n# List of cases to be run with nmix
solver\n#\n# Re ts m cldrv
cl aoa pfan/ps mjet
tjet/t nadapt nit lcycnit
lcttype casename\n');

for j=1:m
    if fl(j)==1
        fprintf(fid,'5.7E+06 288.0 %g
0 0.0 ',amostras(j,11));

        % Número de Mach
        fprintf(fid,'%g 0.0 0.00 000.0 2
2000 6 0
',amostras(j,10)); % Alpha
        fprintf(fid,'%g.d\n',j);
        % Nome do caso (diretorio)
    end
end
fclose(fid);

%Criacao do data.profs
fid=fopen('data.profs','w');
fprintf(fid,'# LREF DIM DIR PERFIS\n');
for j=1:m
    if fl(j)==1
        fprintf(fid,'1.0 0 Perfil %u.dat\n',j);
    end
end
fclose(fid);

clear all
```

## 7. Comando Matlab do “Neural Network Toolbox”

```
close all
clear all
clc
```

```
load INP.txt      %N amostras com P variáveis de entrada para treinamento: N linhas*P colunas
INP_norm = INP';
load OUT.txt      %N amostras com P variáveis de saída para treinamento: N linhas*P colunas
OUT_CP = OUT';
```

*% Aqui, são 3 redes com tipo de aproximação diferente com 4 camadas, e 10, 5, 8 e 3 neurônios respectivamente em cada camada*

```
netCP_cf = newcf([0 0.004;0.1 0.3;0.05 0.4;0.05 0.4;0.1 0.35;-0.05 0.2;0.15 0.5;-0.4 0.2;-1 3;0.5 0.9],[10 5 8 3],{'tansig' 'logsig' 'tansig' 'purelin'});
netCP_ff = newff([0 0.004;0.1 0.3;0.05 0.4;0.05 0.4;0.1 0.35;-0.05 0.2;0.15 0.5;-0.4 0.2;-1 3;0.5 0.9],[10 5 8 3],{'tansig' 'logsig' 'tansig' 'purelin'});
netCP_elm = newelm([0 0.004;0.1 0.3;0.05 0.4;0.05 0.4;0.1 0.35;-0.05 0.2;0.15 0.5;-0.4 0.2;-1 3;0.5 0.9],[10 5 8 3],{'tansig' 'logsig' 'tansig' 'purelin'});
      %Delta_z      k_up_1 k_up_2 k_up_3      k_up_4      k_low_2      k_low_3
k_low_4 alpha Mach
```

*% Definição dos parâmetros de treinamento de cada rede: critério de convergência, número de iterações*

```
netCP_cf.trainParam.epochs = 1000000;
netCP_cf.trainParam.show = 5;
netCP_cf.trainParam.goal = 1e-9;
```

```
netCP_ff.trainParam.epochs = 1000000;
netCP_ff.trainParam.show = 5;
netCP_ff.trainParam.goal = 1e-9;
```

```
netCP_elm.trainParam.epochs = 1000000;
netCP_elm.trainParam.show = 5;
netCP_elm.trainParam.goal = 1e-9;
```

*% Treinamento das redes*

```
netCP_cf = train(netCP_cf,INP_norm,OUT_CP);
netCP_ff = train(netCP_ff,INP_norm,OUT_CP);
netCP_elm = train(netCP_elm,INP_norm,OUT_CP);
```

*% Simulação das redes. A simulação tem que ser feitas com amostras diferentes das de treinamento também*

```
SIM_CP_cf = sim(netCP_cf,INP_norm);
SIM_CP_ff = sim(netCP_ff,INP_norm);
SIM_CP_elm = sim(netCP_elm,INP_norm);
```

```
ErrCP_rel_cf = abs(OUT_CP - SIM_CP_cf) ./ abs(OUT_CP).*100;
ErrCP_rel_ff = abs(OUT_CP - SIM_CP_ff) ./ abs(OUT_CP).*100;
ErrCP_rel_elm = abs(OUT_CP - SIM_CP_elm) ./ abs(OUT_CP).*100;
```

```
ErrCP_abs_cf = abs(OUT_CP - SIM_CP_cf);
ErrCP_abs_ff = abs(OUT_CP - SIM_CP_ff);
ErrCP_abs_elm = abs(OUT_CP - SIM_CP_elm);
```

```
save NET_cf.mat netCP_cf
save NET_ff.mat netCP_ff
save NET_elm.mat netCP_elm
```



## 8. Banco de dados de 75 amostras

## Perfil C5A

<ID>	k_up_1	k_up_2	k_up_3	k_up_4	k_low_2	k_low_3	k_low_4	Delta_z	alpha	Mach	clt	cdt	cmt
1	0.08	0.15	0.16	0.19	0.27	0.16	0.22	0.0013	-1.00	0.50	0.02233	0.01130	-.04603
2	0.08	0.15	0.16	0.19	0.27	0.16	0.22	0.0013	0.00	0.60	0.14213	0.01089	-.04589
3	0.08	0.15	0.16	0.19	0.27	0.16	0.22	0.0013	1.00	0.70	0.27362	0.01151	-.04237
4	0.08	0.15	0.16	0.19	0.27	0.16	0.22	0.0013	2.00	0.80	0.29182	0.02291	-.02559
5	0.08	0.15	0.16	0.19	0.27	0.16	0.22	0.0013	3.00	0.90	0.29656	0.12423	-.05590
6	0.08	0.15	0.16	0.19	0.27	0.16	0.22	0.0013	0.00	0.50	0.14144	0.01062	-.04494
7	0.08	0.15	0.16	0.19	0.27	0.16	0.22	0.0013	1.00	0.60	0.26806	0.00964	-.04406
8	0.08	0.15	0.16	0.19	0.27	0.16	0.22	0.0013	2.00	0.70	0.39194	0.01194	-.03189
9	0.08	0.15	0.16	0.19	0.27	0.16	0.22	0.0013	3.00	0.80	0.40579	0.03474	-.02666
10	0.08	0.15	0.16	0.19	0.27	0.16	0.22	0.0013	-1.00	0.90	-.12424	0.11763	0.00906
11	0.08	0.15	0.16	0.19	0.27	0.16	0.22	0.0013	1.00	0.50	0.25669	0.01206	-.04133
12	0.08	0.15	0.16	0.19	0.27	0.16	0.22	0.0013	2.00	0.60	0.37704	0.01175	-.03741
13	0.08	0.15	0.16	0.19	0.27	0.16	0.22	0.0013	3.00	0.70	0.48668	0.01346	-.01526
14	0.08	0.15	0.16	0.19	0.27	0.16	0.22	0.0013	-1.00	0.80	-.04994	0.01786	-.03108
15	0.08	0.15	0.16	0.19	0.27	0.16	0.22	0.0013	0.00	0.90	-.01590	0.11474	-.00761
16	0.08	0.15	0.16	0.19	0.27	0.16	0.22	0.0013	2.00	0.50	0.36359	0.01204	-.03994
17	0.08	0.15	0.16	0.19	0.27	0.16	0.22	0.0013	3.00	0.60	0.49035	0.01264	-.03139
18	0.08	0.15	0.16	0.19	0.27	0.16	0.22	0.0013	-1.00	0.70	0.00526	0.01273	-.04979
19	0.08	0.15	0.16	0.19	0.27	0.16	0.22	0.0013	0.00	0.80	0.03934	0.01738	-.02530
20	0.08	0.15	0.16	0.19	0.27	0.16	0.22	0.0013	1.00	0.90	0.08708	0.11469	-.02131
21	0.08	0.15	0.16	0.19	0.27	0.16	0.22	0.0013	3.00	0.50	0.48466	0.01238	-.03897
22	0.08	0.15	0.16	0.19	0.27	0.16	0.22	0.0013	-1.00	0.60	0.01396	0.01130	-.04819
23	0.08	0.15	0.16	0.19	0.27	0.16	0.22	0.0013	0.00	0.70	0.14437	0.00649	-.04564
24	0.08	0.15	0.16	0.19	0.27	0.16	0.22	0.0013	1.00	0.80	0.14588	0.01816	-.01737
25	0.08	0.15	0.16	0.19	0.27	0.16	0.22	0.0013	2.00	0.90	0.19508	0.11841	-.04003

## Perfil RAE2822

<ID>	k_up_1	k_up_2	k_up_3	k_up_4	k_low_2	k_low_3	k_low_4	Delta_z	alpha	Mach	clt	cdt	cmt
1	0.0000	0.12	0.16	0.2	0.2	0.17	0.18	-0.06	-1.00	0.50	0.09721	0.00989	-.06921
2	0.0000	0.12	0.16	0.2	0.2	0.17	0.18	-0.06	0.00	0.60	0.24574	0.00966	-.07610
3	0.0000	0.12	0.16	0.2	0.2	0.17	0.18	-0.06	1.00	0.70	0.45698	0.01013	-.08790
4	0.0000	0.12	0.16	0.2	0.2	0.17	0.18	-0.06	2.00	0.80	0.46593	0.02730	-.09424
5	0.0000	0.12	0.16	0.2	0.2	0.17	0.18	-0.06	3.00	0.90	0.28937	0.10642	-.07706
6	0.0000	0.12	0.16	0.2	0.2	0.17	0.18	-0.06	0.00	0.50	0.23037	0.00992	-.07106
7	0.0000	0.12	0.16	0.2	0.2	0.17	0.18	-0.06	1.00	0.60	0.39282	0.01044	-.07840
8	0.0000	0.12	0.16	0.2	0.2	0.17	0.18	-0.06	2.00	0.70	0.60277	0.01145	-.08410
9	0.0000	0.12	0.16	0.2	0.2	0.17	0.18	-0.06	3.00	0.80	0.69212	0.04721	-.13924
10	0.0000	0.12	0.16	0.2	0.2	0.17	0.18	-0.06	-1.00	0.90	-.12336	0.10639	-.01546
11	0.0000	0.12	0.16	0.2	0.2	0.17	0.18	-0.06	1.00	0.50	0.36161	0.01090	-.07206
12	0.0000	0.12	0.16	0.2	0.2	0.17	0.18	-0.06	2.00	0.60	0.53278	0.01133	-.07881
13	0.0000	0.12	0.16	0.2	0.2	0.17	0.18	-0.06	3.00	0.70	0.76305	0.01388	-.07685
14	0.0000	0.12	0.16	0.2	0.2	0.17	0.18	-0.06	-1.00	0.80	0.08682	0.01943	-.08888
15	0.0000	0.12	0.16	0.2	0.2	0.17	0.18	-0.06	0.00	0.90	-.01153	0.10313	-.03654
16	0.0000	0.12	0.16	0.2	0.2	0.17	0.18	-0.06	2.00	0.50	0.49084	0.01125	-.07411
17	0.0000	0.12	0.16	0.2	0.2	0.17	0.18	-0.06	3.00	0.60	0.66498	0.01290	-.07718

18	0.0000	0.12	0.16	0.2	0.2	0.17	0.18	-0.06	-1.00	0.70	0.10979	0.01047	-0.08294
19	0.0000	0.12	0.16	0.2	0.2	0.17	0.18	-0.06	0.00	0.80	0.24791	0.02182	-0.09782
20	0.0000	0.12	0.16	0.2	0.2	0.17	0.18	-0.06	1.00	0.90	0.08839	0.10179	-0.04975
21	0.0000	0.12	0.16	0.2	0.2	0.17	0.18	-0.06	3.00	0.50	0.60972	0.01289	-0.07338
22	0.0000	0.12	0.16	0.2	0.2	0.17	0.18	-0.06	-1.00	0.60	0.09561	0.00294	-0.07218
23	0.0000	0.12	0.16	0.2	0.2	0.17	0.18	-0.06	0.00	0.70	0.28664	0.00922	-0.08541
24	0.0000	0.12	0.16	0.2	0.2	0.17	0.18	-0.06	1.00	0.80	0.42089	0.02628	-0.11584
25	0.0000	0.12	0.16	0.2	0.2	0.17	0.18	-0.06	2.00	0.90	0.17501	0.10135	-0.05405

### Perfil RAE5112

<ID>	k up_1	k up_2	k up_3	k up_4	k low_2	k low_3	k low_4	Delta_z	alpha	Mach	clt	cdt	cmt
1	0.0000	0.16	0.22	0.17	0.25	0.05	0.22	-0.09	-1.00	0.50	0.20912	0.00896	-0.08707
2	0.0000	0.16	0.22	0.17	0.25	0.05	0.22	-0.09	0.00	0.60	0.37405	0.01172	-0.09479
3	0.0000	0.16	0.22	0.17	0.25	0.05	0.22	-0.09	1.00	0.70	0.60409	0.01261	-0.10562
4	0.0000	0.16	0.22	0.17	0.25	0.05	0.22	-0.09	2.00	0.80	0.65551	0.05641	-0.16964
5	0.0000	0.16	0.22	0.17	0.25	0.05	0.22	-0.09	3.00	0.90	0.35776	0.11117	-0.15374
6	0.0000	0.16	0.22	0.17	0.25	0.05	0.22	-0.09	0.00	0.50	0.34404	0.01051	-0.08911
7	0.0000	0.16	0.22	0.17	0.25	0.05	0.22	-0.09	1.00	0.60	0.52032	0.01005	-0.09662
8	0.0000	0.16	0.22	0.17	0.25	0.05	0.22	-0.09	2.00	0.70	0.75200	0.01714	-0.10261
9	0.0000	0.16	0.22	0.17	0.25	0.05	0.22	-0.09	3.00	0.80	0.82261	0.07754	-0.20493
10	0.0000	0.16	0.22	0.17	0.25	0.05	0.22	-0.09	-1.00	0.90	-0.11335	0.11029	-0.05689
11	0.0000	0.16	0.22	0.17	0.25	0.05	0.22	-0.09	1.00	0.50	0.46792	0.01192	-0.08828
12	0.0000	0.16	0.22	0.17	0.25	0.05	0.22	-0.09	2.00	0.60	0.66023	0.01165	-0.09524
13	0.0000	0.16	0.22	0.17	0.25	0.05	0.22	-0.09	3.00	0.70	0.82557	0.02309	-0.08919
14	0.0000	0.16	0.22	0.17	0.25	0.05	0.22	-0.09	-1.00	0.80	0.23473	0.02180	-0.13712
15	0.0000	0.16	0.22	0.17	0.25	0.05	0.22	-0.09	0.00	0.90	-0.01764	0.10442	-0.07175
16	0.0000	0.16	0.22	0.17	0.25	0.05	0.22	-0.09	2.00	0.50	0.60655	0.01149	-0.09140
17	0.0000	0.16	0.22	0.17	0.25	0.05	0.22	-0.09	3.00	0.60	0.80189	0.01297	-0.09387
18	0.0000	0.16	0.22	0.17	0.25	0.05	0.22	-0.09	-1.00	0.70	0.25933	0.00948	-0.10326
19	0.0000	0.16	0.22	0.17	0.25	0.05	0.22	-0.09	0.00	0.80	0.39241	0.02973	-0.14491
20	0.0000	0.16	0.22	0.17	0.25	0.05	0.22	-0.09	1.00	0.90	0.06960	0.10085	-0.07950
21	0.0000	0.16	0.22	0.17	0.25	0.05	0.22	-0.09	3.00	0.50	0.73114	0.01291	-0.09034
22	0.0000	0.16	0.22	0.17	0.25	0.05	0.22	-0.09	-1.00	0.60	0.22811	0.01039	-0.09480
23	0.0000	0.16	0.22	0.17	0.25	0.05	0.22	-0.09	0.00	0.70	0.44049	0.01181	-0.10940
24	0.0000	0.16	0.22	0.17	0.25	0.05	0.22	-0.09	1.00	0.80	0.50055	0.03935	-0.14613
25	0.0000	0.16	0.22	0.17	0.25	0.05	0.22	-0.09	2.00	0.90	0.20038	0.10345	-0.11231