



**XXI SNPTTE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0  
23 a 26 de Outubro de 2011  
Florianópolis - SC

**GRUPO II  
GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS- GPT**

**PROJETO E VERIFICAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS AERODINÂMICAS DE TRÊS PERFIS AERODINÂMICOS  
VOLTADOS À GERAÇÃO EÓLICA NAS CONDIÇÕES DE VENTO DO NORDESTE BRASILEIRO**

**Júlio Xavier Vianna Neto (\*)  
LACTEC**

**Luciano Fedalto  
LACTEC**

**Luiz Alberto Jorge Procopiak  
LACTEC**

**Odilon Antonio Camargo do Amarante  
CAMARGO-SCHUBERT**

**Pedro Bezerra de Carvalho Neto  
CHESF**

**Paulo Cesar de Souza Câmara  
CHESF**

**RESUMO**

Um dos pontos cruciais no projeto de aerogeradores é a escolha dos perfis aerodinâmicos que formarão as pás que captarão a energia cinética dos ventos. Este artigo relata o desenvolvimento de três perfis aerodinâmicos para pás de aerogeradores, denominados série BR W, considerando regimes de vento e as condições ambientais no nordeste brasileiro. Com base no estudo minucioso das características de vento do nordeste, foram definidas algumas das características necessárias a um perfil para operação nestas condições. Os perfis BR W projetados demonstraram, através de simulações numéricas, que são superiores aos perfis hoje utilizados pela indústria de aerogeradores.

**PALAVRAS-CHAVE**

Perfil aerodinâmico, Energia eólica, Aerogerador, Condições de vento, Nordeste brasileiro

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Um dos pontos cruciais no projeto de aerogeradores é a escolha dos perfis aerodinâmicos que formarão as pás que captarão a energia cinética dos ventos. Esta escolha é feita tendo como objetivo principal a minimização das perdas de energia do escoamento sobre cada um dos perfis, em cada uma das diferentes seções da pá. Esta minimização demanda, por sua vez, que as características dos ventos operacionais (velocidade, direção, presença de rajadas, etc.) sejam detalhadamente conhecidas, bem como as demais condições locais que possam afetar o desempenho dos perfis, tais como presença de salinidade no vento, areia, insetos e outros pequenos animais, e queimadas próximas. Este trabalho apresenta os resultados obtidos no projeto de P&D CHESF-ANEEL: "Desenvolvimento de Perfil de Pás de Aerogeradores Adaptados às Condições de Vento do Nordeste".

Um perfil aerodinâmico é mostrado na Figura 1, onde as forças de arrasto e sustentação, resultantes do escoamento ao longo do perfil, estão expressas através de seus coeficientes  $C_D$  e  $C_L$ , respectivamente. O ângulo de ataque,  $\alpha$ , entre a direção do escoamento e a linha da corda, também está representado na Figura 1. A visualização destes conceitos facilita o entendimento do que será abordado neste artigo.

O projeto de perfis aerodinâmicos vem sendo estudado desde o início do século passado. Nesta época o projeto era principalmente intuitivo, ou seja, faziam-se alterações em um determinado perfil e estudavam-se os seus efeitos em túnel de vento. Isto era necessário, pois não haviam ferramentas matemáticas, físicas ou computacionais que permitissem um cálculo mais apurado das características de sustentação e arrasto de um perfil.

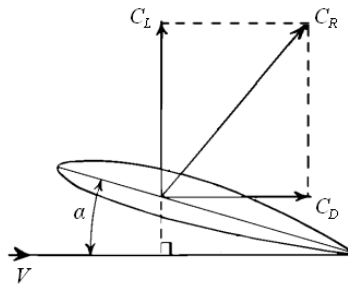


Figura 1 – Forças atuantes em um perfil devido a um escoamento.

O projeto de perfis com características específicas de alta sustentação, por exemplo, ou de equipamentos de alta sustentação (como *flaps* e *slats*) é ainda mais recente. Smith (1975) traz um interessante resumo histórico do desenvolvimento da aerodinâmica de alta sustentação.

A partir da década de 1960, o desenvolvimento dos perfis aerodinâmicos se acelerou grandemente pela utilização de tecnologias computacionais. Nesta mesma época, desenvolveram-se os dois métodos de cálculo do perfil: os métodos direto e inverso. Em Allen (1945) estes dois métodos são revisados de forma bastante completa. Uma atualização do método inverso é feita por Strand (1973), na qual é baseada este trabalho.

Nos métodos diretos, obtém-se, a partir de um perfil com forma conhecida, os valores das características aerodinâmicas tais como os coeficientes de sustentação, arrasto e momento de arfagem. Em Abbott e von Doenhoff (1959) há uma revisão bastante completa destes métodos diretos, os quais não são adequados para os desenvolvimentos aqui realizados, pois temos como dados de entrada as condições gerais do vento e as características aerodinâmicas desejadas para o perfil. Nos métodos inversos se obtém o perfil a partir da distribuição de velocidades ou pressão desejada, sendo portanto mais adequados às necessidades do presente projeto.

A idéia básica que está sendo adotada neste trabalho é a de se obter um perfil de velocidades (ou pressão) e a partir deste se obter a forma do perfil (método inverso de projeto de aerofólios). Entretanto, esta distribuição de velocidades deve satisfazer a três critérios básicos:

- O fluxo se mantém subsônico, e portanto incompressível e não separado em qualquer ponto do perfil;
- A forma do perfil deve ser fisicamente possível, isto é, os critérios de Kutta e Kutta-Joukowski são obedecidos e a fabricação do perfil é possível, especialmente levando-se em conta a sua desmoldagem na produção em materiais compostos;
- Maximização do coeficiente de sustentação.

Os dados de entrada de um projeto de um perfil aerodinâmico podem variar grandemente de um projeto para outro. Entretanto, o ponto central é o mesmo. Ou seja, a identificação e controle de características importantes ao desempenho do aerofólio. As características mais utilizadas nesta prática são:

- Relação sustentação/arrasto ( $L/D$ );
- Arrasto turbulento (para perfis laminares);
- Sensibilidade ao aumento do número de Mach (efeitos de compressibilidade) – negligenciáveis no caso de perfis para aerogeradores;
- Sensibilidade ao aumento no número de Reynolds;
- Efeitos e estruturas de alta sustentação (*flaps*, *ailerons* e *slats*, se houverem);
- Tolerância à ondulação ou rugosidade da superfície.

As características desejadas do aerofólio devem então ser desdobradas em parâmetros de projeto a partir da criteriosa análise física de cada característica. Percebe-se com isto que o processo de projeto a ser seguido é:

- Estabelece-se funções-objetivo, ou seja, as características desejadas do perfil;
- Desdobra-se estas funções em parâmetros de projeto;
- Calcula-se o perfil a partir destes parâmetros;

- Verifica se o perfil projetado atende às funções objetivos;
- Alteram-se os parâmetros de projeto para se obter um novo perfil e repetem-se os passos anteriores até que o perfil atenda às funções-objetivo estabelecidas no primeiro passo.

## 2.0 - CONDIÇÕES DE VENTO NO NORDESTE BRASILEIRO

A presente seção aborda uma análise dos regimes de vento e as condições ambientais no nordeste brasileiro e sua influência no projeto de turbinas eólicas (e particularmente no projeto das pás/perfis aerodinâmicos). Isto inclui também a análise dos regimes médios e extremos de vento e a classificação das áreas do nordeste conforme as Classes de Turbinas IEC 61400-1, intensidade de turbulência dentro de parques eólicos, influências da densidade do ar, umidade relativa, salinidade e particulado areoso. Deve ser considerado também a influência dos fatores ambientais na degradação superficial da rugosidade das pás e seu efeito nas características aerodinâmicas dos perfis de pás eólicas.

Por situar-se numa área de grande insolação e varrida pelos ventos alísios (e em parte pela sinótica do centro de alta pressão do atlântico – ver Figura 2), o nordeste brasileiro apresenta características de regime de ventos bastante peculiares, conforme evidenciado nos mapas do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. Os parâmetros predominantes para a classificação dos sítios no nordeste são a velocidade média anual do vento e a intensidade de turbulência. Os ventos extremos previstos para a região nordeste situam-se bem abaixo dos ventos no sul e sudeste do Brasil, resultando nos seguintes valores e classificação, de acordo com a Norma IEC 61400-1:

- A velocidade básica do vento ( $V_0$ ) no nordeste atinge pouco mais de 30 m/s; ao passo que no sul, atinge entre 45 e 50 m/s;
- As máximas velocidades de referência ( $V_{ref}$ ) calculadas para a região atingem quase 32 m/s a 100 metros de altura, o que classificaria estes sítios na Classe III;
- Os sítios com maiores rajadas máximas ( $V_{e50}$ ) no nordeste atingem cerca de 40-42 m/s a 100 metros de altura, situando-se no limiar superior da Classe IV ( $V_{e50IV} = 42$  m/s).

De modo conservativo, estes sítios seriam então classificados na Classe III. Desse modo, os critérios de velocidade de referência ( $V_{ref}$ ) e ventos extremos ( $V_{ref}$ ,  $V_{e50}$ ) classificariam praticamente toda a região nordeste na Classe III; contudo, a velocidade média anual ( $V_{média}$ ) leva a classificação de muitas áreas para as Classes I e II. As melhores áreas da região nordeste apresentam ventos com velocidade média anual acima de 8,5 m/s já na altura de 50 metros, classificando-se na Classe I. Adjacente a estas áreas ocorrem sítios com velocidades entre 7,5 e 8,5 m/s, classificados na Classe II, e assim sucessivamente até a Classe IV.

Ao longo do litoral do Rio Grande do Norte, Ceará, Piauí e parte do Maranhão estendem-se grandes áreas classificadas nas Classes I e II. Nas serras e elevações do relevo nordestino também existem grandes áreas situadas nas Classes I e II, destacando-se a Chapada Diamantina no interior da Bahia.

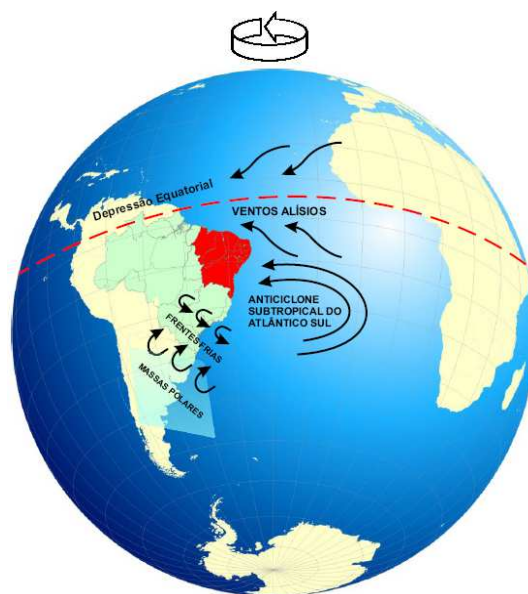


Figura 2 – Grandes escalas atmosféricas atuantes no regime de ventos brasileiro e nordestino.

Conforme já mencionado, a classificação das áreas não considerou a intensidade de turbulência do vento, por requerer medições específicas e que são bastante afetadas por variáveis de terreno e obstáculos na microescala. A experiência com medições anemométricas realizadas nos locais das principais usinas eólicas habilitadas ao PROINFA/MME (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia), situadas em sua maioria ao longo do litoral nordestino, indica que a intensidade de turbulência nessas áreas enquadra-se na Categoria B ( $I < 16\%$ ). Em áreas mais continentais e de relevo complexo, como é o caso das áreas das chapadas e serras nordestinas, a intensidade de turbulência tende a ser maior. Contudo, a turbulência dentro dos parques eólicos é mais elevada, atingindo, no caso analisado, mais que o dobro do valor de turbulência medido na torre anemométrica.

Em todos os casos são necessárias medições específicas no local de cada usina, de modo a quantificar a velocidade média e a intensidade de turbulência efetiva dentro do parque, através de análises de *micrositing* e simulação da interferência aerodinâmica de turbinas.

A nova edição da Norma IEC 61400-1 (Wind Turbines. Part 1: Design Requirements, Third Edition, 2005-08) excluiu a classificação de turbinas da Classe IV, excluindo também a velocidade média do sítio como parâmetro básico de classificação (mas permanecendo como parâmetro de projeto) e introduziu 3 categorias de turbulência (a segunda edição apresentava apenas duas), especifica ainda a intensidade de turbulência efetiva ( $I_{eff}$ ) a ser considerada no cálculo das cargas de fadiga e carregamentos extremos. O valor de turbulência efetiva leva em consideração a interferência entre turbinas (esteira aerodinâmica) e um fator de correção para terrenos complexos.

### 3.0 - CARACTERÍSTICAS DOS PRINCIPAIS PERFIS EXISTENTES PARA AEROGERADORES

Coloca-se na Tabela 1 abaixo um resumo geral das influências de cada característica sobre o desempenho de um aerofólio, com o objetivo de mostrar a interação entre os diversos fatores e características de um aerofólio. A rugosidade superficial é um fator determinante no desempenho do aerofólio. Para a aplicação específica em pá de aerogerador, sabe-se que deve ser evitada a configuração de perfil agressivamente laminar, para evitar a acentuada sensibilidade à rugosidade que sempre ocorre na operação, causada pela salinidade, maresia, insetos e partículas em suspensão.

Tabela 1 – Relação entre as características de um aerofólio (linhas) e seus parâmetros de projeto (colunas).

	Linha média	Linha de arqueamento	No. de Reynolds	Rugosidade	Razão de espessuras	Coefficiente de Sustentação de Projeto
Ângulo de ataque de sustentação nula	★	★		▲	▲	
Inclinação da curva de sustentação			●	■	★	
Máxima sustentação		■	■	★	■	
Condição da Superfície	▲					★
Arrasto mínimo em superfícies lisas		■	★		■	
Relação L/D	■	★	▲	■	★	★
Efeitos de rugosidade sobre o arrasto	▲	▲	■			
Variação do momento de arfagem	■	▲			■	

Um dos resultados mais interessantes na análise das características dos perfis é a relação entre elevadas razões L/D e sensibilidade à rugosidade, ou seja, os perfis utilizados em geração eólica ou tem razões de sustentação e arrasto elevada ou tem uma baixa sensibilidade a rugosidade. Este compromisso de projeto pode ter o seguinte desdobramento: baixa sensibilidade à rugosidade implica em uma menor manutenção, haja vista que mesmo apresentando incrustações ou degeneração nas características da superfície do perfil, o aerogerador não perderá muito desempenho; entretanto, se tiver um coeficiente de sustentação tão maior que os custos de manutenção do

aerogerador sejam cobertos com a quantidade de energia gerada com o perfil liso, então é preferível aplicar o perfil mesmo com alta sensibilidade à rugosidade.

No projeto de P&D CHESF-ANEEL denominado “Desenvolvimento de Perfil de Pás de Aerogeradores Adaptados às Condições de Vento do Nordeste” se fez uma comparação entre os principais perfis utilizados em pás de aerogeradores de diversos institutos de pesquisa nesta área: NACA, RISØ, FFA, NREL e a Universidade de Stuttgart (perfis FX – Wortmann e AH – Althaus). Mostrou-se também uma série de simulações realizadas com estes perfis, utilizando o software XFLR5, para a obtenção numérica das curvas polares destes perfis.

#### 4.0 - PROJETO DOS PERFIS BR-W

A execução do projeto de três perfis aerodinâmicos para as pás de um aerogerador foi solicitada ao Eng. Aeronáutico e M.C. Francisco Leme Galvão (Galvão 2006), o qual possui uma vasta experiência no projeto de perfis para aeronaves (principalmente planadores) e que possui um processo de análise e síntese de perfis simplificado (Galvão, 2005) em um software por ele desenvolvido. Os perfis foram desenvolvidos de forma a maximizar o seu desempenho para a extração de potência eólica, dentro dos requisitos gerais a seguir:

- Os perfis serão aplicáveis às estações correspondentes a 80%, 60% e 30% do raio das pás de um aerogerador de 3 pás, 80 m de diâmetro e velocidade máxima na ponta da pá inferior a 70 m/s;
- As condições ambientais de operação serão típicas da costa do nordeste brasileiro, ou seja, com ventos médios de 16 Kts (8 m/s) e nível de turbulência elevada da ordem de 5 a 15%;
- Nas condições acima se pode prever um número de Reynolds médio de operação dos perfis da ordem de 5 milhões (de 3 a 6) sendo que os valores finais vão depender do projeto final das pás (dimensões das cordas);
- Os perfis deverão ter espessuras relativas de aproximadamente 12%, 18% e 24% para permitir um projeto estrutural eficiente.

O projeto dos perfis foi feito com base nos dados experimentais de perfis aeronáuticos (Abbott e von Doenhoff, 1959) e utilizando o método de projeto e análise simplificado de perfis desenvolvido pelo próprio autor do projeto, Galvão (2005).

Como características aerodinâmicas importantes para os perfis de pás de aerogeradores foram considerados o valor do coeficiente de sustentação máxima ( $CL_{max}$ ), um comportamento suave da curva  $CL \times \alpha$  (ângulo de ataque) após o estol, e o parâmetro  $L/D$  máximo do perfil. Para que não haja uma degradação pronunciada da potência gerada ao longo da vida útil do aerogerador devido ao aumento de rugosidade na superfície de suas pás (incrustações de insetos, partículas, erosão, etc.) essas características devem ser consideradas tanto para os perfis na condição “lisa” como na condição de “rugosidade padrão”.

Os resultados na forma de contornos e parâmetros de desempenho para os três perfis BR W 12, BR W 15, e BR W 21 projetados e analisados empregando-se o método simplificado desenvolvido por Galvão (2005), são apresentados nas Figuras 3 e 4.

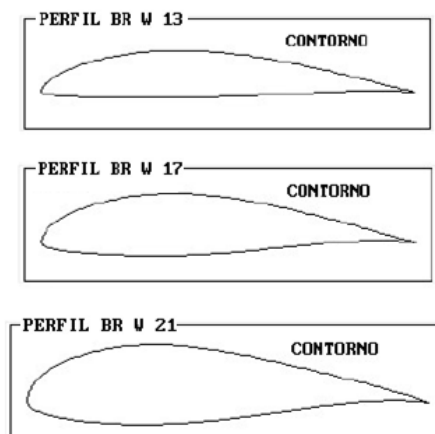


Figura 3 – Contornos dos perfis desenvolvidos.

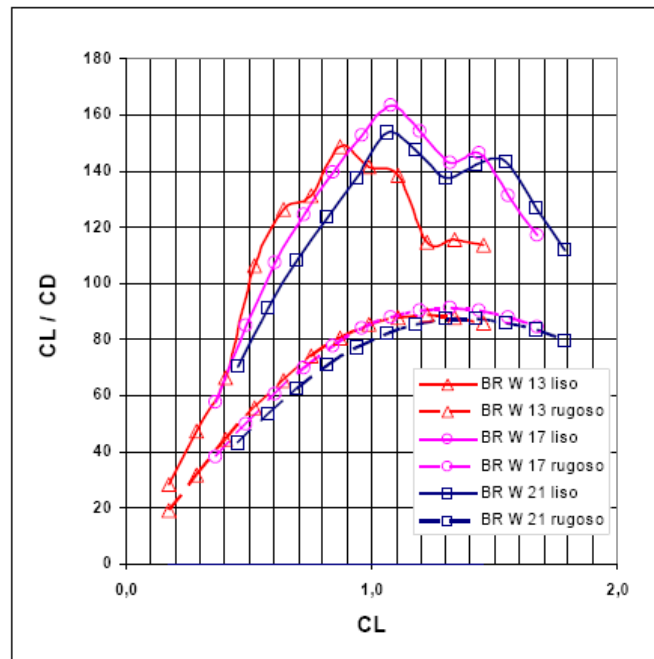


Figura 4 – Parâmetros de Desempenho dos três perfis BR W XX.

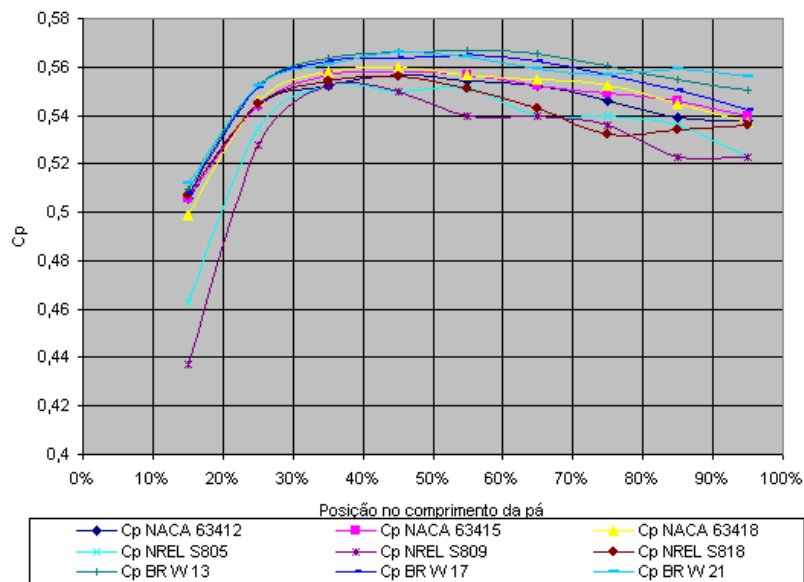


Figura 5 – Contornos dos perfis desenvolvidos.

A fim de se verificar o comportamento dos perfis da família BR W em pás de geradores eólicos, procedeu-se a uma série de simulações dos dados de sustentação e arrasto dos perfis BR W gerados pelo software XFLR5 em uma planilha de otimização de pás. Entretanto, os dados utilizados foram puramente teóricos. A partir disto foi traçado um comparativo entre os máximos valores de CP obtidos nos perfis NACA, NREL e BR W, ilustrado na Figura 5.

É possível verificar por estes dados que os perfis BR W, independentemente da estação estudada, possui um melhor aproveitamento da energia cinética do vento e, portanto, melhor coeficiente de potência que os perfis NACA e NREL.

O último passo foi a calibração do método aplicado através de ensaios em túnel de vento, sendo que os efeitos das paredes foram corrigidos, primeiro para perfis lisos, ou seja, como fabricados. Depois foram corrigidos para perfis rugosos com uma rugosidade padrão até 8%, para os ângulos de ataque de -4 a 24 graus variando de 2 em 2 graus para o perfil "liso" e de 4 em 4 graus para o perfil "rugoso". Estes ensaios permitiram obter as características aerodinâmicas bidimensionais, a seguir:

- Distribuição de pressões ao longo da corda (24 pontos no extradorso e 12 no intradorso)

- Coeficientes de sustentação (CL) e de momento (CM/4) obtidas a partir das distribuições de pressão
- Coeficientes de Arrasto (CD) medidos por meio de pente de tomadas de pressão total na esteira

Foram ensaiados os três perfis BR W e, para melhor calibrar o método, foi ensaiado ainda mais um perfil com coeficientes aerodinâmicos conhecidos. Isto permitiu encontrar e corrigir as imprecisões nos ensaios. O aerofólio escolhido foi o NACA 643-618 3D que possui características similares do BR W-17.

Os resultados dos ensaios também demonstram que os perfis BR-W têm um coeficiente de potência maior em todas as posições da pá, se comparados com os perfis estudados anteriormente, comprovando que a técnica utilizada pode gerar ganhos no projeto das pás.

## 5.0 - CONCLUSÃO

O trabalho aqui descrito permitiu desenvolver e capacitar equipe na fase inicial, incluindo revisão bibliográfica do assunto, estudos de métodos numéricos em análise de fluxo e desenvolvimento e/ou aprimoramento de softwares para dimensionamento de perfis de aerogeradores. Foram estudadas as principais características dos perfis comerciais disponíveis, identificação de grandezas importantes no dimensionamento e projeto de novos perfis.

Entre os principais parâmetros, o coeficiente de arrasto do perfil e a relação de arrasto e sustentação do perfil caracterizaram-se como as principais grandezas. Com base nos parâmetros de projeto foi realizada a execução do projeto de três perfis. Os perfis então foram simulados da mesma maneira que os perfis NACA e NREL.

Os resultados da simulação demonstram uma superioridade dos perfis BR W sobre os demais pelos seguintes motivos:

- Menores ângulos de torção na pá são necessários para um melhor aproveitamento da energia cinética do vento;
- Os tamanhos de corda para máximo coeficiente de potência são menores que os anteriormente obtidos, podendo-se obter pás mais leves e com características estruturais melhores;
- Os coeficientes de sustentação obtidos são mais elevados e, portanto, mais próximos do estol;
- Os coeficientes de arrasto são menores, indicando mais uma vez um melhor aproveitamento da energia;
- Os coeficientes de potência dos três perfis BR W são maiores que os maiores coeficientes de potência (CP) obtidos pelos perfis NREL e NACA estudados.

Sendo assim pode-se afirmar que os perfis BR W têm especificações que são superiores aos perfis hoje utilizados pela indústria de aerogeradores. Este fato é corroborado também com as simulações numéricas e ensaios realizados, levando à realização de um projeto de pá eficiente e adaptado a condições específicas de vento do nordeste, conforme objetivo principal do Projeto de P&D - "Desenvolvimento de Perfil de Pás de Aerogeradores Adaptados às Condições de Vento do Nordeste".

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) SMITH, A. M. O. High Lift Aerodynamics; 37th Wright Brothers Lecture on Journal of Aircraft, v. 12, n. 6, pp. 501-530, 1975.
- (2) ALLEN, H. J. General Theory of Airfoil Section Having Arbitrary Shape or Pressure Distribution; NACA Report 833, National Advisory Committee for Aeronautics – NACA, 1945.
- (3) STRAND, T. Exact Method of Designing Airfoils with Given Velocity Distribution in Incompressible Flow; Journal of Aircraft, v. 10, n. 11, pp. 651-659, 1973.
- (4) ABBOTT, I. H., VON DOENHOFF, A. E., Theory of Wing Sections; Dover Publications Inc., New York, EUA, 1959.
- (5) INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, IEC System for Conformity Testing and Certification of Wind Turbines, Rules and Procedures; IEC 61400-1 (Wind Turbines – Part 1: Design Requirements), 3<sup>a</sup> ed., 2005.

- (6) AMARANTE, O. A. C., BROWER, M., ZACK, J. Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, MME/ELETROBRÁS/CEPEL, 2001.
- (7) GALVÃO, F. L. Wing Airfoil Simplified Design and Analysis; XIV Congresso e Exposição Internacionais da Tecnologia da Mobilidade, Society of Automotive Engineers – SAE, São Paulo, SP, 2005.
- (8) GALVÃO, F. L. Projeto de Três Perfis para Pás de Geradores Eólicos; Relatório No: FLG 2006 01, São José dos Campos, SP, 2006.

## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Júlio Xavier Vianna Neto

Nascido em Curitiba/PR em 25 de abril de 1986. Graduado em Engenharia Mecatrônica (Controle e Automação) pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná em 2010 e atualmente cursa o Mestrado em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Paraná. É pesquisador no LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, atuando em projetos na área de energia eólica. Possui experiência nas áreas de Controle de Processos, Sistemas de Potência, Processamento de Imagem, e Inteligência Artificial.