

# INVESTIGAÇÃO SOBRE A REDUÇÃO DA VELOCIDADE DE INÍCIO DE OPERAÇÃO (*CUT-IN SPEED*) EM TURBINAS EÓLICAS DE PEQUENO DIÂMETRO PARA APLICAÇÃO EM MÓDULOS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Vincenzo Trajano Roberto Loly<sup>1</sup>; Joseph Youssif Saab Junior<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Aluno de Iniciação Científica do Instituto Mauá de Tecnologia (EEM/CEUN-IMT);

<sup>2</sup> Professor Titular do Instituto Mauá de Tecnologia (EEM/CEUN-IMT).

**Resumo.** *O escopo do projeto é o estudo da aerodinâmica de rotores de pequeno diâmetro, analisando a influência dos parâmetros geométricos relevantes na geração de torque - torção geométrica, corda, afilamento, aerofólio, índice de solidez e ângulo de passo -, visando a possível redução da velocidade de início de operação (cut-in speed). Uma melhoria neste importante parâmetro permitiria implementar turbinas eólicas de pequeno porte em sistemas eólicos puros ou híbridos, capazes de atender as necessidades de pequenas residências remotas e apoiar a inclusão digital dos seus moradores.*

## Introdução

A despeito do fato de que a energia eólica é mais eficiente em grande escala, visto que o torque e o coeficiente de potência tornam-se maiores com grandes diâmetros (Saab Jr., 2016), somente o desenvolvimento de um equipamento eficiente de pequena escala, baixo custo de aquisição e manutenção poderia possibilitar a adoção ampla da energia eólica em residências, no regime de geração distribuída (International Energy Initiative - Brasil, 2017), permitindo acesso à eletricidade a famílias de baixa renda estabelecidas em regiões com bons ventos, porém sem acesso ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Isso permitiria à essas famílias ter acesso a serviços públicos online e a inclusão digital de suas crianças através do acesso à informação e do ensino à distância, que ganhou impulso e perdeu rejeição em meio à crise sanitária provocada pela Covid-19.

É fato constatável, seja por medições anemométricas diretas do vento ou pelo exame da distribuição monocaudal de Weibull (Hansen, 2008) usada como modelo estatístico para a distribuição do vento, que as velocidades mais frequentes são aquelas mais próximas de zero. Além disso, o vento forma camada limite sobre o solo, o que acrescenta dificuldade à captação da sua energia em baixa altura sobre o solo (GIPE, 2004).

A combinação das três dificuldades descritas (pequeno diâmetro, baixa velocidade de vento e baixa altura sobre o solo), estabelece uma barreira tecnológica para o desenvolvimento de turbinas eólicas de eixo horizontal de pequeno diâmetro para uso em sistemas de energia distribuída.

No entanto, com as tecnologias atuais de baixo consumo, como iluminação led, processadores eficientes e baterias eficientes e de baixo custo para armazenagem local, seria possível, em tese, prover uma parcela sensível da demanda elétrica de uma família de baixa renda que more em região apropriada, com o emprego de uma turbina eólica de pequeno diâmetro e capacidade de capturar a energia de ventos de baixa velocidade.

Utilizando dados oficiais do Procel (PROCEL, 2021), é possível estimar a demanda mensal de uma pequena residência equipada com um chuveiro elétrico (4.500 W), um ferro elétrico (1.500 W), um forno de micro-ondas (25 L), uma geladeira (1 porta) e seis lâmpadas (11 W), como sendo ao redor de 123,5 kWh.

Um simples exercício com micro geradores eólicos e número reduzido de horas de vento diárias sugere, conforme mostrado na Tabela 1 abaixo, que é possível produzir localmente percentuais significativos da carga elétrica estimada.

Tabela 1 – Produção mensal de eletricidade convertida via microgeradores eólicos

Potência média efetiva (W)	Operação ao dia (h)	Dias de operação no mês	kWh/mês	Necessidades com base em 123,5 kWh/mês (%)
100			18	15
200			36	29
300	6	30	54	44
400			72	58
500			90	73

Nota-se que 73% desta carga elétrica mensal poderia ser suprida por um micro gerador eólico produzindo 500 W de potência média efetiva líquida, operando durante 6 horas por dia. Por outro lado, se o chuveiro elétrico fosse substituído por uma ducha alimentada por um painel de aquecimento solar, a carga elétrica remanescente poderia ser suprida por um microgerador de apenas 300 W. Já o uso de um microgerador de 400 W ou mais poderia produzir uma sobra de pelo menos 20,5 kWh mensais.

A principal barreira tecnológica então resume-se à possibilidade de projetar um rotor de pequeno diâmetro capaz de aproveitar velocidades de vento relativamente baixas para converter seu movimento em eletricidade durante algumas horas do dia.

## Material e Métodos

Com o intuito de avaliar a influência dos parâmetros de projeto na geração de torque por um rotor de pequeno diâmetro, foi realizado um estudo de sensibilidade das variáveis que influenciam a geração de torque, sendo elas: torção geométrica, corda, afilamento, aerofólio, índice de solidez e ângulo de passo. O estudo compreendeu a investigação das alterações produzidas no torque de um rotor de referência, sendo este da microturbina eólica Fab Lab IMT (Saab Jr & Melero Jr, 2018) quando as variáveis descritas eram sistematicamente alteradas.

O resultado de cada alteração era verificado com o auxílio da aplicação do método Blade Element Momentum – BEM (Hansen, 2008), embutido dentro do ambiente de projeto e simulação de turbinas eólicas desenvolvido na T.U. Berlin, denominado QBlade (Pechlivanoglou, Marten, G., N., & Wendler, 2009), (Marten D. , Extension of an Aerodynamic Simulator for Wind Turbine Blade Design and Performance Analysis, 2010), (Marten & Wendler, Qblade Guidelines v0.6, 2013), (Marten D. , Qblade Short Manual V0.8, 2014), (Marten D. , 2016). Como o escopo é voltado para a produção de torque inicial, ou seja, em baixa velocidade de vento, o estudo de sensibilidade foi realizado através da análise do valor do coeficiente de torque inicial (velocidade zero) e da sua derivada parcial no início do movimento em relação a cada um dos parâmetros (P), ou seja, quando a razão entre a velocidade tangencial e a velocidade do vento tende a zero (TSR → 0).

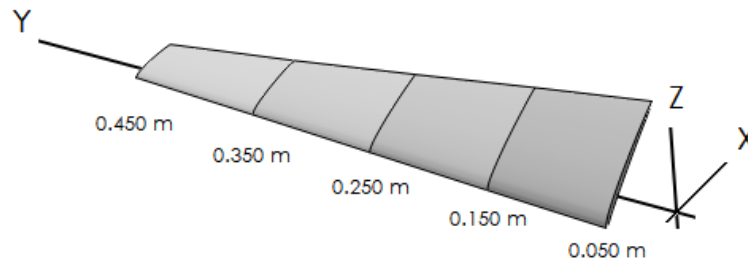
$$\left(\frac{\partial C_m}{\partial P}\right)_{TSR \rightarrow 0} \quad (1)$$

O  $C_m$  foi computado através de simulações adimensionais no software QBlade, que incorpora o algoritmo. O QBlade dispõe ainda de modelos de correção para os efeitos tridimensionais e de rotação das pás, porém esses não foram acionados, mantendo o número de variáveis do problema restrito àquelas selecionadas como mais relevantes para o estudo do problema.

## Condições e geometria

A geometria de referência (Saab Jr & Melero Jr, 2018) está ilustrada na Figura 1 e suas condições de projeto e operação serão descritas na sequência.

Figura 1: Geometria ilustrativa da pá da Turbina Eólica Fab Lab IMT



Fonte: (Saab Jr & Melero Jr, 2018)

A descrição da pá e seus parâmetros dinâmicos estão especificados abaixo, nas tabelas 2,3,4.

Tabela 2 – Características geométricas da pá

Seção da pá	Posição radial (m)	Corda (m)	Torção ( $\beta^\circ$ )	Aerofólio
1	5,00E-02	1,00E-01	4,17E+01	Coanda 1
2	1,50E-01	8,75E-02	3,10E+01	
3	2,50E-01	7,50E-02	2,04E+01	
4	3,50E-01	6,25E-02	9,74E+00	
5	4,50E-01	5,00E-02	-9,05E-01	

Tabela 3 – Parâmetros geométricos do rotor e velocidade do vento de projeto

Parâmetros	Valor
Velocidade de vento de projeto (m/s)	10
Diâmetro do Rotor (m)	0,9
Diâmetro do Cubo (m)	0,1
Comprimento das pás (m)	0,4
Corda da raiz (m)	0,1
Corda da ponta (m)	0,05
Distribuição de corda	linear

Tabela 4 – Parâmetros dinâmicos básicos

Parâmetros	Valor
TSR <sup>2</sup> esperado (adim.)	4
Velocidade tangencial esperada (m/s)	40
Velocidade angular esperada (rad/s)	88,9
Rotação esperada (Hz)	14

Como a velocidade local resultante máxima esperada no rotor foi estimada em 41,24 m/s (Mach  $\approx$  0,1) pelos autores, o escoamento foi considerado incompressível.

## Parâmetros de simulação

Os parâmetros fixados para resolução do passo radial na aplicação do método BEM empregado estão declarados abaixo para efeito de reprodutibilidade das simulações realizadas.

Tabela 5 – Parâmetros de simulação

Parâmetros	Valor
Número de coroas circulares	120
Critério de convergência	1E-03
Número máximo de iterações	1000
Fator de relaxamento	0,35

## Resultados

### Análise de sensibilidade da torção geométrica na pá

A análise foi realizada para cada seção da pá, aplicando-se uma variação de  $\pm 20\%$  no ângulo de torção ( $\beta$ ) correspondente, enquanto as demais seções permaneciam com a mesma torção original, permitindo isolar a influência de cada seção na geração do torque de partida. As alterações foram sempre aplicadas com relação à geometria de referência.

Tabela 6 – Sensibilidade da torção geométrica

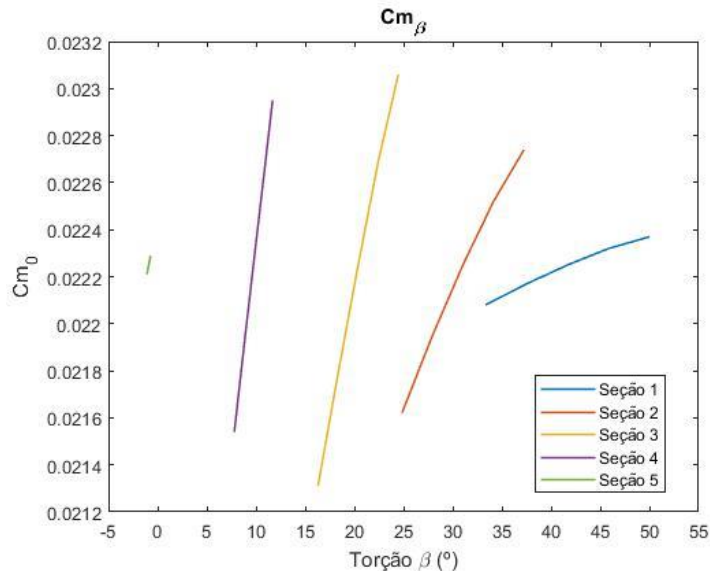
$\beta$ (°)	Variação (%)	$Cm_0$	$\frac{\partial Cm_0}{\partial \beta}$
Seção 1			
33,35	-20	0,02208	2,25E-05
37,52	-10	0,02217	1,83E-05
41,69	0	0,02225	ref
45,86	+10	0,02232	1,63E-05
50,03	+20	0,02237	1,22E-05
Seção 2			
-24,84	-20	0,02162	1,08E-04
27,94	-10	0,02195	9,59E-05
31,04	0	0,02225	ref
34,15	+10	0,02252	8,55E-05
37,25	+20	0,02274	7,28E-05
Seção 3			
-16,31	-20	0,02131	2,36E-04
18,35	-10	0,02179	2,24E-04
20,39	0	0,02225	ref
22,43	+10	0,02269	2,15E-04
24,47	+20	0,02306	1,83E-04
Seção 4			
7,80	-20	0,02154	3,68E-04
8,77	-10	0,02190	3,62E-04
9,74	0	0,02225	ref
10,72	+10	0,02260	3,63E-04
11,69	+20	0,02295	3,53E-04

Seção 5			
1,086	-20	0,02221	2,35E-04
-0,996	-10	0,02223	1,86E-04
-0,905	0	0,02225	ref
-0,815	+10	0,02227	2,53E-04
-0,724	+20	0,02229	2,20E-04

Nota-se que, partindo de um ângulo 20% menor que o original e indo progressivamente até um ângulo 20% maior que o original, a derivada  $\partial C m_0 / \partial \beta$  permanece sempre positiva, porém com inclinações cada vez menores no intervalo. Um valor máximo ou mínimo não é alcançado no intervalo de teste da sensibilidade. Pode-se concluir que é seguro incluir o ângulo de torção geométrica (twist) nas seções da pá no estudo de alteração geométrica que será realizado futuramente, no entanto: (i) os incrementos de torque somente serão verificados para incrementos positivos com relação ao ângulo original e, (ii) as taxas de ganho serão decrescentes com o aumento do ângulo para a mesma seção.

Esse “espaço” para melhoria explica-se pelo fato da pá da Turbina Eólica Fab Lab IMT ter sido desenhada para um TSR da ordem de 4, enquanto que no presente estudo estamos focando apenas no torque de partida, quanto  $\lambda \rightarrow 0$ .

Figura 2: Sensibilidade da torção geométrica



Fonte: Arquivo do autor

Observa-se que as maiores taxas de ganho e magnitude de  $C m_0$  ocorrem no aumento do ângulo de torção nas seções distantes da raiz.

#### Análise de sensibilidade da corda

A análise foi feita para cada seção isoladamente, aplicando-se uma variação de  $\pm 20\%$  na corda correspondente, assim investigando a influência de cada seção na geração do torque de partida.

Tabela 7 – Sensibilidade da corda

C (m)	Variação (%)	$C m_0$	$\frac{\partial C m_0}{\partial C}$
Seção 1			
0,080	-20	0,02195	1,52E-02
0,090	-10	0,02210	1,46E-02

0,100	0	0,02225	ref
0,110	+10	0,02240	1,49E-02
0,120	+20	0,02254	1,43E-02
Seção 2			
0,070	20	0,02123	5,92E-02
0,079	-10	0,02175	5,71E-02
0,088	0	0,02225	ref
0,096	+10	0,02275	5,75E-02
0,105	+20	0,02324	5,55E-02
Seção 3			
0,060	-20	0,02100	9,08E-02
0,068	-10	0,02168	7,57E-02
0,075	0	0,02225	ref
0,083	+10	0,02294	9,21E-02
0,090	+20	0,02358	8,47E-02
Seção 4			
0,050	-20	0,02121	8,45E-02
0,056	-10	0,02174	8,20E-02
0,063	0	0,02225	ref
0,069	+10	0,02277	8,29E-02
0,075	+20	0,02327	8,05E-02
Seção 5			
0,040	-20	0,02197	2,80E-02
0,045	-10	0,02211	2,71E-02
0,050	0	0,02225	ref
0,055	+10	0,02239	2,82E-02
0,060	+20	0,02253	2,73E-02

O aumento da área contribui positivamente para geração de torque, mantendo um comportamento parecido à sensibilidade da torção geométrica, onde na mesma seção, o aumento da corda resulta em  $Cm_0$  maiores e as taxas decrescendo, contudo, neste caso, a taxa de ganho do aumento da corda é maior, mostrando que este parâmetro tem caráter mais sensível e prioritário.

#### *Análise de sensibilidade do afilamento*

Com a premissa da redução de variáveis nas análises, o afilamento será abordado de maneira a manter a área total será mantida enquanto a distribuição de corda alterada progressivamente até total inversão das cordas na raiz e ponta.

Tabela 8 – Sensibilidade do afilamento

$\Lambda$	$Cm_0$	$\frac{\partial Cm_0}{\partial \Lambda}$
0,50	0,02225	ref
0,67	0,02265	2,39E-03
0,88	0,02274	4,14E-04
1,14	0,02297	8,73E-04
1,50	0,02312	4,12E-04
2,00	0,02328	3,33E-04

Com a inversão progressiva do afilamento, nota-se que distribuir as cordas de maneira a crescerem conforme se afastam da raiz, contribui favoravelmente para o aumento do torque, contudo a taxa do ganho mantém um comportamento predominantemente decrescente.

Concentrar as maiores porções de área nas regiões de maiores velocidades tangenciais através da distribuição das cordas é uma maneira mais eficiente para gerar o torque, sob uma perspectiva puramente física, contudo somente com a análise de senilidade, não é possível obter as vantagens e desvantagens dessa alternativa ao modelo tradicional de pá, ou seja, modelar e compreender o trade-off.

### *Análise dos aerofólios*

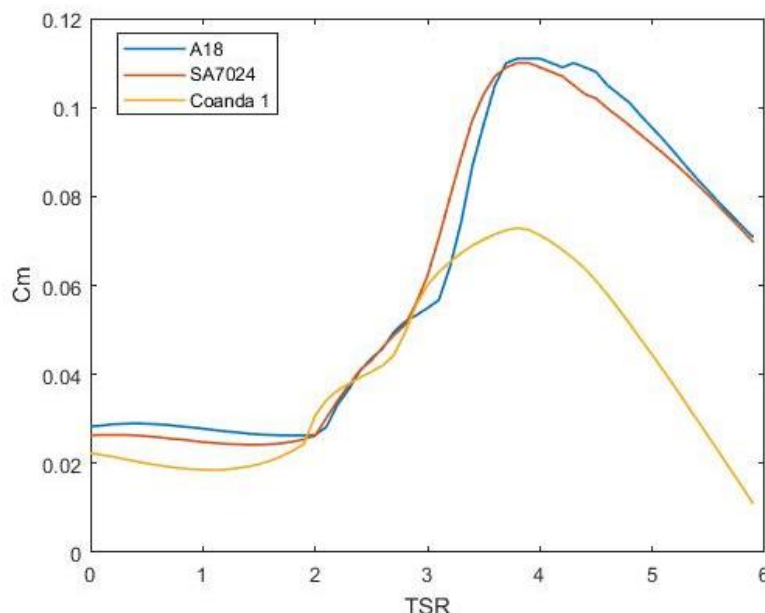
A análise visa comparar aerofólios para baixo Reynolds e relação CL/CD superiores ao Coanda 1, portanto as pás serão comparadas em suas torções geométricas ótimas (todas otimizadas para TSR 4), enquanto os outros parâmetros geométricos serão mantidos.

Tabela 9 – Análise dos Aerofólios

Aerofólio	$C_{m_0}$
A18	0,0283
SA7024	0,0263
Coanda 1	0,0225

A mudança de aerofólio causa um crescimento significativo no torque de partida, mesmo em pás otimizadas para TSR superiores, evidenciando uma mudança de grande valor para o objetivo do projeto.

Figura 3: Curva do coeficiente de torque x TSR para os aerofólios



Fonte: Arquivo do autor

### *Análise de sensibilidade do índice de solidez*

Aumentar o número de pás (B) até o limite do rotor da microturbina FabLab do IMT, isto é, o máximo número de pás onde não há interferência geométrica da raiz entre pás, para obter a propagação da influência e sua taxa de ganho.

Tabela 10 – Sensibilidade do índice de solidez

B	$Cm_0$	$\frac{\partial Cm_0}{\partial B}$
2	0,0223	9,28E-03
3	0,0315	ref
4	0,0400	8,44E-03

O apresenta um acréscimo considerável conforme aumenta o número de pás no rotor, mas a solidez ( $\sigma$ ) é reflexo direto das características da pá.

#### *Análise de sensibilidade do ângulo de passo*

O ângulo de passo é um incremento no ângulo de ataque da pá, ou seja, aumenta a mesma magnitude de ângulo em todas as seções simultaneamente. Nesse estudo será aplicado uma variação de  $\pm 3^\circ$ .

Tabela 11 – Sensibilidade do ângulo do passo

$\theta_p$	$Cm_0$	$\frac{\partial Cm_0}{\partial \theta_p}$
-3	0,01941	9,70E-04
-2	0,02038	9,50E-04
-1	0,02133	9,20E-04
0	0,02225	ref
1	0,02315	9,00E-04
2	0,02402	8,70E-04
3	0,02486	8,40E-04

A implementação do passo é coerente com os resultados da análise de twist, ou seja, o incremento de maneira a “aumentar” o ângulo de ataque, contribui para o aumento do torque, enquanto a taxa de ganho mantém o comportamento decrescente.

É perceptível que as variáveis que afetam a área da pá, exercem maior influência na geração de torque, pois apresentaram-se mais sensíveis nas análises, com taxas de ganho superiores e maior magnitudes atingidas nos valores  $Cm_0$ , portanto uma hierarquia dos parâmetros de projeto das pás e rotores pode ser feita, sendo ela apresentada nas tabelas abaixo.

Tabela 12 – Hierarquia das variáveis da pá

Variáveis	Posição
Aerofólio	1°
Corde	2°
Afilamento	3°
Torção geométrica	4°

Tabela 13 – Hierarquia das variáveis do rotor

Variáveis	Posição
Índice de solidez	1°
Ângulo de passo	2°



## Discussão

Como em todo projeto de engenharia, surge a necessidade de conciliação a partir do aumento de área das pás: esse aumento contribui negativamente nos aspectos estruturais, via aumento de massa e tensões de tração na raiz da pá, além de limitar o número de pás possível para o mesmo cubo do rotor (*hub*) sem interferência física.

Outro tradeoff que deverá ser investigado cuidadosamente no reprojeção do rotor é o aumento do valor do  $C_{m0}$  com o aumento da torção geométrica (*twist*), apesar do aumento observado no  $C_{m0}$  o melhor ajuste da pá para facilitar a partida irá afastar a pá do ponto de projeto, que normalmente ocorre à TSRs mais elevados, pois aproximará as seções do estol.

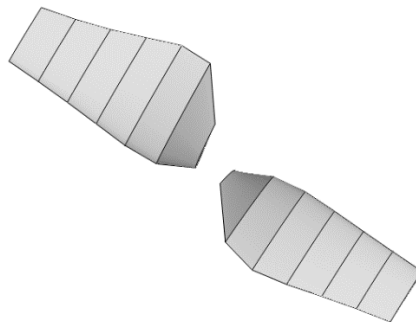
As análises realizadas sugerem que cubos (*hubs*) de maiores diâmetros seriam mais apropriados para se obter maiores índices de solidez sem interferência geométrica. Combinado com ajustes nos demais parâmetros nas direções indicadas pelo estudo de sensibilidade, parece ser possível projetar um rotor mais apropriado para converter energia eólica em menores velocidades de vento.

No entanto, restam questões importantes a serem esclarecidas, como quanto essa possível otimização de  $C_{m0}$  a baixos TSRs vai afetar a capacidade de conversão negativamente em velocidades mais altas e se o incremento de  $C_{m0}$  obtido será suficiente para vencer o binário eletromagnético do gerador que será acoplado ao micro gerador eólico. O movimento e a conversão de energia propriamente ditam somente ocorre quando o torque requerido (pelo gerador) é suplantado pelo torque disponível do rotor em baixa velocidades de vento.

## Conclusões

Através do estudo de sensibilidade, foi possível identificar os parâmetros-chave, estabelecendo uma hierarquia entre eles, como também evidenciando possíveis providências que melhoram o torque do rotor em baixa rotação. Apenas como um exemplo de verificação das conclusões obtidas, o rotor de referência foi modificado com base nas indicações do estudo, resultando em um rotor com torque inicial superior e desempenho bastante superior ao da turbina eólica Fab Lab-IMT para baixas velocidades de vento, conforme ilustrado abaixo:

Figura 5: Geometria ilustrativa do novo rotor



Fonte: Arquivo do autor

Tabela 14 – Características da pá do novo rotor

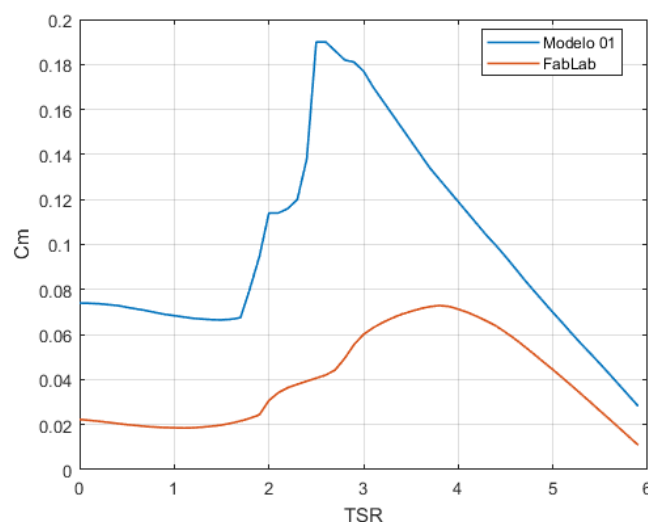
Seção da Pá	Posição radial (m)	Corda (m)	Torção (°)	Aerofólio
1	5,00E-02	2,22E-01	6,54E+01	
2	1,50E-01	3,55E-01	3,84E+01	
3	2,50E-01	3,30E-01	2,45E+01	A18
4	3,50E-01	2,80E-01	1,69E+01	

5	4,50E-01	2,34E-01	1,23E+01
6	5,50E-01	2,03E-01	9,11E+00
7	6,50E-01	1,76E-01	7,03E+00

Tabela 15 – Mudanças em relação ao rotor referência

Seção da Pá	C (%)	$\beta$ (%)	Aerofólio
1	+122	+56,9	
2	+306	+23,7	
3	+340	+20,2	
4	+348	+73,4	A18
5	+368	+1466	
6 (adicionada)	---	---	
7 (adicionada)	---	---	

Figura 6: Curva do  $C_m$  em função do TSR do novo rotor



Fonte: Arquivo do autor

Observa-se um aumento significativo no torque de partida, como também no desempenho para TSR maiores.

## Referências Bibliográficas

- Marten, D. (2015) *Qblade Quidelines v0.9*. Berlin, TU Berlin.
- Marten, D. (2016) *Qblade v0.95- Guidelines for Lifting Line Free Vortex Wake Simulations*. Berlin, TU Berlin.
- Hansen, M. (2008) *Aerodynamics of Wind Turbines*. 2<sup>nd</sup> edition. London, Earthscan.
- Saab Jr, J. Y., & Melero Jr, V. (2018). *Microturbina Eólica Fab Lab IMT*. São Caetano do Sul: IMT.
- Saab Jr., J. Y. (2016). *TRAILING-EDGE NOISE – DEVELOPMENT AND APPLICATION OF A NOISE PREDICTION TOOL FOR THE ASSESSMENT AND DESIGN OF WIND TURBINE AIRFOILS*. Acesso em 19 de July de 2017, disponível em <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3150/tde-14032017-140101/pt-br.php>