



## **Grupo de Estudo de Geração Eólica, Solar e Armazenamento-GES**

### **Análise do efeito da turbulência do vento na operação de um aerogerador de pequeno porte em área urbana**

**MATHEUS LEHMKUHL(1); FABRICIO YUTAKA KUWABATA TAKIGAWA(2); YOSHIAKI SAKAGAMI(3)**  
**IFSC(1);IFSC(2);IFSC(3)**

#### **RESUMO**

Os empreendimentos relacionados à micro e mini geração eólica se encontram estagnados com potência instalada correspondente a cerca de 1,2% do total, em contraste com os grandes empreendimentos de geração eólica no país. Um dos principais motivos é a dificuldade na instalação de aerogeradores em centros urbanos, devido a limitação de espaço e ao fluxo de vento turbulento, que influencia diretamente na geração de energia elétrica da máquina. Neste sentido, o presente trabalho propõe analisar a influência da turbulência do vento na estimação de energia de um pequeno aerogerador, localizado em um centro urbano, considerando diversas metodologias encontradas na literatura.

#### **PALAVRAS-CHAVE**

Microgeração, Aerogerador de eixo vertical, Ambiente urbano, Turbulência, Dados meteorológicos

#### **1.0 - INTRODUÇÃO**

A produção de energia eólica mundial vem apresentando crescimento considerável nos últimos anos. Segundo o GWEC (2018) (1), o crescimento em capacidade instalada em energia eólica no mundo foi de cerca de 52.492 GW, correspondendo a um cumulativo total, até dezembro de 2017, de 539.123 GW. Para efeito de comparação, segundo o Banco de Informações de Geração da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o Brasil totaliza cerca de 164 GW de potência instalada, considerando todas as fontes de energia. Este crescimento também tem sido refletido em aerogeradores para baixos ventos, que segundo a Associação Mundial de Energia Eólica (WWEA) espera-se que a capacidade instalada em 2020 chegue a 1,9 GW, com um crescimento de no mínimo 12% ao ano (2).

No Brasil, a mini e micro Geração Distribuída (GD) está regulamentada pela Resolução Normativa (RN) 482/2012 e RN 687/2015, que possibilitou que Unidades Consumidoras (UCs) passassem a gerar energia elétrica para compensar o seu consumo. No entanto, a micro e mini geração eólica se encontra estagnada, com potência correspondente a cerca de 1,2% do total, em contraste com os grandes empreendimentos de geração eólica no país.

Adicionalmente, a instalação de pequenos aerogeradores depende de diversas condições específicas, relacionadas a velocidade do vento, ao nível de urbanização do local e as políticas de investimentos do país (3)-(4). Em centros urbanos existem diversos desafios, devido principalmente à característica do vento nestes ambientes que são descritos como turbulentos e com flutuações rápidas. Essa característica advém de fatores como a alta rugosidade superficial do local, a interação entre os fluxos de ventos e os obstáculos existentes, assim como, as instabilidades atmosféricas causadas por fontes de calor locais. Porém, o conhecimento

(\*) A. Mauro Ramos, n° 950 – sala 314-B - Bloco Central – CEP 88.020-300 Florianópolis, SC, – Brasil  
Tel: (+55 48) 3211-6042 – Fax: (+55 XX) XXXX-XXXX – Email: matheus.l@aluno.ifsc.edu.br



existente sobre como a turbulência afeta a produtividade de turbinas ainda é limitado, contribuindo para diversas incertezas em estudos envolvendo esta área, conforme ilustrado em (5)-(6).

Em condições urbanas, os aerogeradores de eixo vertical são os mais indicados, visto que os mesmos têm a vantagem de operar onde há uma maior variabilidade da direção de vento. Nessa condição, a sua geração de energia tem poucas perdas, pois não há a necessidade de se alinhar com o vento predominante. Porém, elas continuam sujeitas à turbulência do vento e uma grande variabilidade na magnitude do vento pode causar diferenças significativas no desempenho do aerogerador. Neste sentido, com base em trabalhos técnicos existentes na literatura, busca-se analisar a influência da turbulência do vento na estimação de energia de um pequeno aerogerador, localizado em um centro urbano.

Desta forma, é proposta uma análise das metodologias encontradas para a modelagem da turbulência, denominadas de Modelo de Turbulência Normal (MTN) (7) e de Modelo da Lei da Potência com três parâmetros (MLPTP) (8), em conjunto com os dados meteorológicos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC), Câmpus Florianópolis. Vale destacar que em diversos trabalhos (6), o parâmetro da turbulência é considerado constante. Posteriormente, estima-se a geração do aerogerador considerando a turbulência, os dados do aerogerador e os parâmetros da função de densidade de probabilidade de Weibull para os dados meteorológicos.

Este artigo está organizado conforme descrito na sequência. A Seção 2.0 descreve o conceito de turbulência e a Seção 3.0 aborda a metodologia e as principais etapas empregadas. Posteriormente, a Seção 4.0 apresenta a análise dos resultados obtidos e, por fim, as principais conclusões encontram-se na Seção 5.0.

## 2.0 - TURBULÊNCIA

Turbulência refere-se a flutuações da velocidade do vento em pequenas escalas de tempo e espaço, causada principalmente por dois fatores (9): o atrito do vento com a superfície, que é acentuada devido aos obstáculos do terreno; e causas termais, podendo fazer as massas de ar se moverem verticalmente com as variações de densidade de ar. A associação de ambientes urbanos com a complexidade morfológica dos terrenos, expõe um obstáculo para os pequenos aerogeradores, conforme pode ser observado no perfil vertical do vento da Figura 1 (esquerda). Por outro lado, a Figura 1 (direita) exhibe flutuações reais na velocidade e na direção do vento para o período de um dia (24h), medido pela estação meteorológica do IFSC.

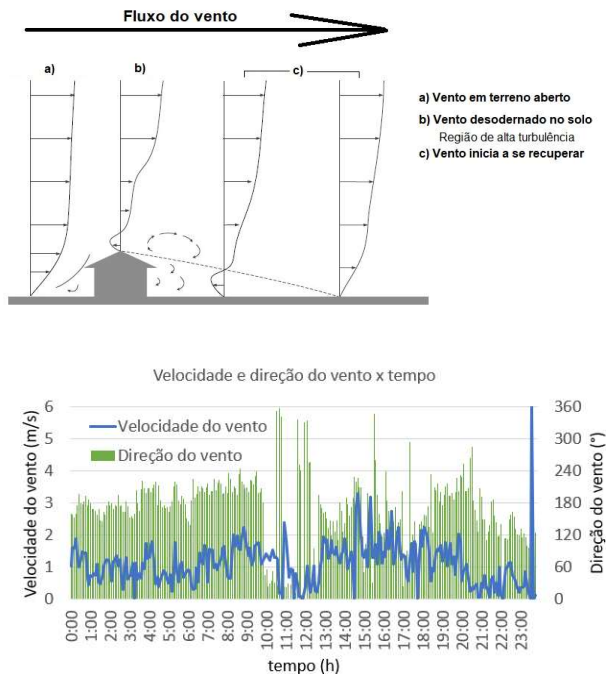


FIGURA 1 - Perfil vertical do vento na presença de obstáculos [9] e medições de velocidade e direção do vento.

Neste sentido, pode-se observar que a turbulência do vento pode impactar na operação de aerogeradores, principalmente em aspectos mecânicos e energéticos. E esse impacto é adicionado pela complexidade do terreno, que pode produzir cisalhamento de vento incomum, afetando o nível de turbulência e por consequência, a produção de energia. Outro parâmetro que influencia a geração de energia e impacta na curva de potência, são as flutuações na velocidade do vento, caracterizadas como intermitentes e que resultam em cargas transitórias nas pás da turbina e fadiga das mesmas, podendo afetar na confiabilidade dos equipamentos, manutenção e vida útil da máquina (10).

A métrica utilizada para quantificar os efeitos da turbulência é por meio da Intensidade de Turbulência ( $IT$ ) (9), descrita na Eq. (1), para cada estágio de tempo.

$$IT_t = \frac{\sigma(v)_t}{\bar{v}_t} \quad (1)$$

Sendo que:

$IT_t$  Intensidade de turbulência para o estágio  $t$ ;

$\sigma(v)_t$  Desvio padrão da velocidade do vento para o estágio  $t$  (m/s);

$\bar{v}_t$  Velocidade do vento média para o estágio  $t$  (m/s).

### 3.0 - METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho está separada em seis principais etapas, ilustrada no fluxograma da Figura 2. A Etapa 1 consiste em replicar as metodologias de regressão de  $IT$  existentes na literatura para o ambiente urbano do estudo. Após isto, efetua-se as Etapas 2, 3 e 4, que objetiva abordar, por meio de regressões, a curva de potência do aerogerador (original e com os valores de  $IT$  calculados). Na Etapa 5 obtém-se os parâmetros da distribuição de Weibull e, por fim, estima-se a energia gerada do aerogerador na Etapa 6.

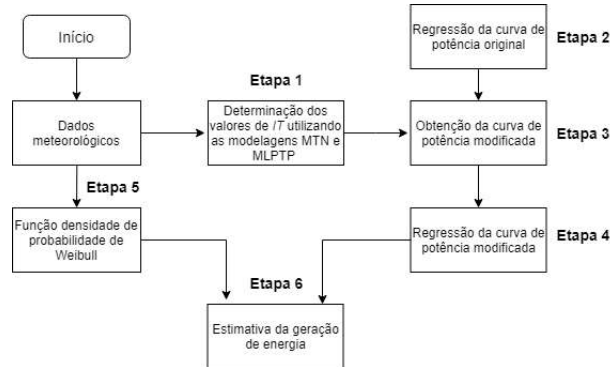


FIGURA 2 - Metodologia utilizada no artigo.

### 3.1 Etapa 1

A primeira etapa consiste na determinação das curvas de  $IT$ , para o caso do IFSC, aplicando as modelagens MTN e MLPTP. Nesta etapa também se propõe uma adaptação da modelagem de MTN para ambientes urbanos. Porém, inicialmente apresenta-se as medidas de erros que visam quantificar a representação das curvas.

#### 3.1.1 Erros

Com o objetivo de quantificar os ajustes aplicados nas modelagens foram selecionados dois indicadores: Média Quadrática dos Erros (MQE) e Média Percentual Absoluta dos Erros (MPAE), ilustrados na Eq. (2). Outros indicadores podem ser aplicados, cada um com características próprias (11).

$$MQE = \frac{1}{n} \sum_{v=1}^n (IT(v) - \hat{IT}(v))^2 \quad (2)$$

$$MPAE = \frac{1}{n} \sum_{v=1}^n \frac{|IT(v) - \hat{IT}(v)|}{IT(v)} \cdot 100$$

Tal que:

$IT(i)$  Valor observado de  $IT$ ;

$\hat{IT}(i)$  Valor estimado de  $IT$ .

Portanto, se os valores estimados estão próximos dos valores reais, o valor de MQE vai ser pequeno, e quando o erro aumenta, também aumenta o valor de MQE (12). Por outro lado, MPAE representa a média percentual dos erros absolutos de cada medida em função do seu valor estimado.

#### 3.1.2 MTN

Um dos modelos comumente utilizados para determinação da turbulência é o MTN para pequenos aerogeradores, descrito pela norma IEC 61400-2 (7), ilustrado na Eq. (3). Tal modelo é dependente da velocidade do vento, de um parâmetro de inclinação ( $a$ ), e do valor de  $IT$  esperado a uma velocidade do vento de 15 m/s ( $IT_{ref}$ ), estabelecido de acordo com a classe da turbina (7). Este modelo foi primeiramente elaborado para grandes aerogeradores e, posteriormente, adaptado para pequenas turbinas eólicas.

$$IT = IT_{ref} \frac{\left(a + \frac{15}{v_{cubo}}\right)}{(a+1)} \quad (3)$$

Tal que:

$V_{cubo}$  É a velocidade do vento média, na altura do cubo do aerogerador, para um período de 10 minutos.

O valor de  $IT_{ref}$  e  $a$  são definidos conforme a Tabela 1 de acordo com a classe de vento, que define qual turbina é adequada para as condições normais de vento de um local. Por exemplo, para uma velocidade média de vento na altura do cubo do aerogerador ( $V_{ave}$ ) de 6 m/s, com velocidades de rajadas extremas de vento que podem ocorrer durante 50 anos ( $V_{ref}$  de 30 m/s, a classe da turbina eólica é a IV e os valores de  $IT_{ref}$  e  $a$  são 0,18 e 2, respectivamente (7) e (13).

TABELA 1 - Valores especificados segundo a norma IEC [13].

Classe da turbina eólica	I	II	III	IV	S
$V_{ref}$ (m/s)	50	42,5	37,5	30	Valores especificados pelo designer
$V_{ave}$ (m/s)	10	8,5	7,5	6	
$IT_{ref}$	0,18	0,18	0,18	0,18	
$a$	2	2	2	2	

Com o objetivo de propor uma melhoria no método, neste trabalho é proposto um ajuste nos parâmetros do MTN utilizando como critério de ajuste os erros MQE e MPAE, conforme fluxograma da Figura 3 (esquerda). Pode-se observar na Figura 3 (direita) a influência dos parâmetros do MTN, comparando com os valores estipulados na norma.

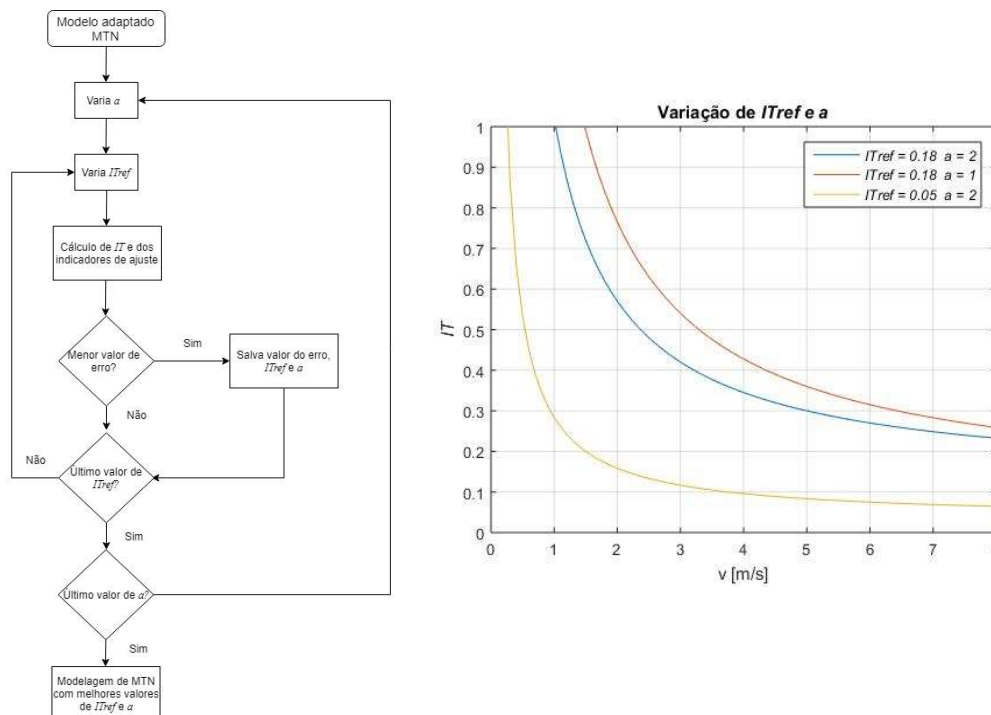


FIGURA 3 - Fluxograma para determinação do MTN ajustado e variação dos parâmetros  $IT_{ref}$  e  $a$ .

Pode-se observar que a redução do valor de  $IT_{ref}$  proporciona redução dos valores de  $IT$ , para os mesmos valores de velocidade, e fornece maiores valores de turbulência quando próximos à velocidade nulas, aumentando a inclinação da curva. Por outro lado, a redução do parâmetro  $a$ , ocasiona aumento nos valores de  $IT$ , para os mesmos valores de velocidade, reduzindo a inclinação da curva.

### 3.1.3 MLPTP

Uma alternativa para o modelo MTN é o MLPTP (8). Este modelo se baseia na curva de tendência do parâmetro de  $IT$ , buscando uma curva que abranja os valores reais com o menor erro possível. Este modelo é descrito na Eq. (4).

$$IT = \alpha \cdot \hat{v}^\beta + c \quad (4)$$

Sendo que:

$\alpha$ ,  $\beta$  e  $c$  são parâmetros de ajuste baseados nas observações de  $IT$ .

### 3.2 Etapa 2, 3 e 4

Na segunda etapa foi realizada a regressão polinomial da curva de potência original, conforme [6], utilizando o método dos mínimos quadrados. Neste trabalho, foi escolhido um polinômio de 14ª ordem visto que não houve diferenças significativas dos erros a partir desse polinômio de 14ª ordem.

Posteriormente, a etapa 3 objetiva analisar a influência que a turbulência do local pode ocasionar na produção energética do aerogerador. Neste sentido, a partir de dados de turbulência e da curva de potência do aerogerador é possível normalizar a curva de potência original a fim de que seja considerada a turbulência do local. Esta aproximação é baseada na suposição que a potência gerada pode ser formulada em termos de uma potência equivalente média (14), ilustrada na Eq. (5).

$$\hat{P}_{IT}(v) = \int_0^{\infty} P_{IT=0}(v) f_n(v) dv \quad (5)$$

Tal que:

$\hat{P}_{IT}(v)$  Potência média estimada, com inserção da turbulência;

$P_{IT=0}(v)$  Curva de potência ideal, com turbulência zero;

$f_n(v)$  Distribuição gaussiana do vento, com a inserção de  $IT$ .

No caso deste trabalho, considerou-se a curva de potência com turbulência zero igual à curva de potência especificada pelo fabricante. E, para inserção da turbulência na distribuição gaussiana do vento,  $f_n(v)$ , substituiu-se o desvio padrão presente na fórmula da distribuição pelo produto de  $IT$  e  $\hat{v}$ , baseado de (1), resultando na Eq. (6).

$$f_n(v) = \frac{1}{\hat{v} IT \sqrt{\pi}} e^{\left(\frac{-(v-\hat{v})^2}{2(\hat{v} IT)^2}\right)} \quad (6)$$

A Figura 4 (esquerda) ilustra o efeito da turbulência na distribuição gaussiana, considerando a velocidade média com valor de 1 m/s e a Figura 4 (direita) exhibe a influência da turbulência na alteração da curva de potência de um aerogerador. Pode-se concluir que quanto maior for o valor de  $IT$ , maior vai ser o aumento da potência gerada em baixas velocidades e menor o aumento da potência para velocidades maiores.

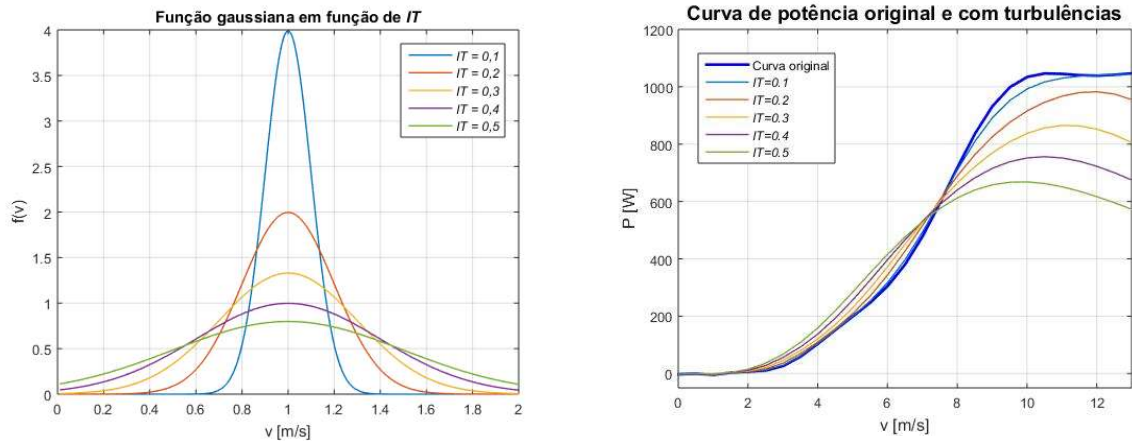


FIGURA 4 - Distribuição gaussiana alterando o valor de  $IT$  e influência da turbulência na modificação da curva de potência.

Vale destacar que a curva de potência com turbulência foi obtida, baseado em (6), variando a velocidade média de (6) a cada 0,5 m/s e calculando a potência média com turbulência para estes valores de velocidade. Posteriormente, na Etapa 4 (de maneira idêntica a Etapa 2) efetua-se a regressão polinomial da curva de potência para os pontos de potência média da curva de potência alterada.

### 3.3 Etapa 5

A Etapa 5 tem como objetivo utilizar os dados meteorológicos e obter a distribuição de Weibull de dois parâmetros (15), sendo a mesma definida pela Eq. (7).

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (7)$$

Sendo que:

- $k$  Parâmetro de forma;
- $c$  Parâmetro de escala (m/s);
- $v$  Velocidade instantânea do vento (m/s).

Para estimar os parâmetros da distribuição de Weibull e obter o comportamento da distribuição da velocidade do vento para o local, utilizou-se o Método dos Momentos (16), de acordo com a Eq. (8).

$$k = \left(\frac{\sigma_v}{\hat{v}}\right)^{-1,091} \quad e \quad c = \frac{\hat{v}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (8)$$

### 3.4 Etapa 6

O cálculo da estimativa de energia, por meio da potência média, foi obtido empregando a distribuição de energia do local e a curva de potência especificada pelo fabricante (13), considerando a turbulência, como ilustrado na Eq. (9).

$$\hat{P}(v) = \int_0^{\infty} P_{IT}(v) f(v) dv \quad (9)$$

Sendo que:

- $\hat{P}(v)$  Potência estimada média (W).



#### 4.0 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise consiste em aplicar a metodologia descrita no artigo aos dados obtidos (velocidade e a direção do vento) da estação meteorológica do IFSC no período compreendido entre os anos de 2009 a 2011 e a um aerogerador comercial de eixo vertical, com rotor H-Darrieus de 1.000 W e velocidade média de 10 m/s.

##### 4.1 Etapa 1

O IFSC está localizado no centro de Florianópolis, próximo ao Morro da Cruz (altitude de 285 metros) e com diversas residências em suas proximidades. O IFSC, a estação meteorológica (anemômetro com uma altura de 10 metros) e as construções ao redor da estação estão ilustrados na Figura 5.

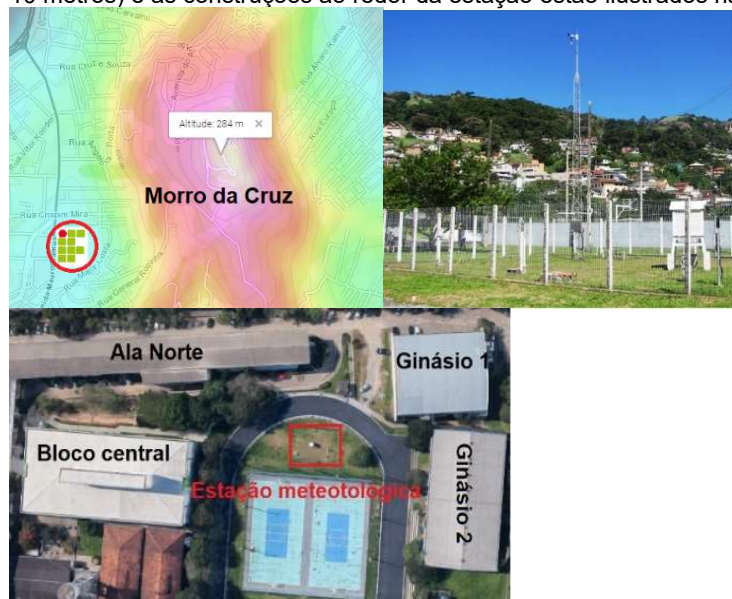


FIGURA 5 - Carta topográfica das proximidades do IFSC, estação meteorológica e arredores.

Com base nos dados do IFSC, calculou-se a  $IT$  em função da velocidade média, para períodos de 10 minutos e de uma hora, de maneira similar a (8), ilustrados na Figura 6.

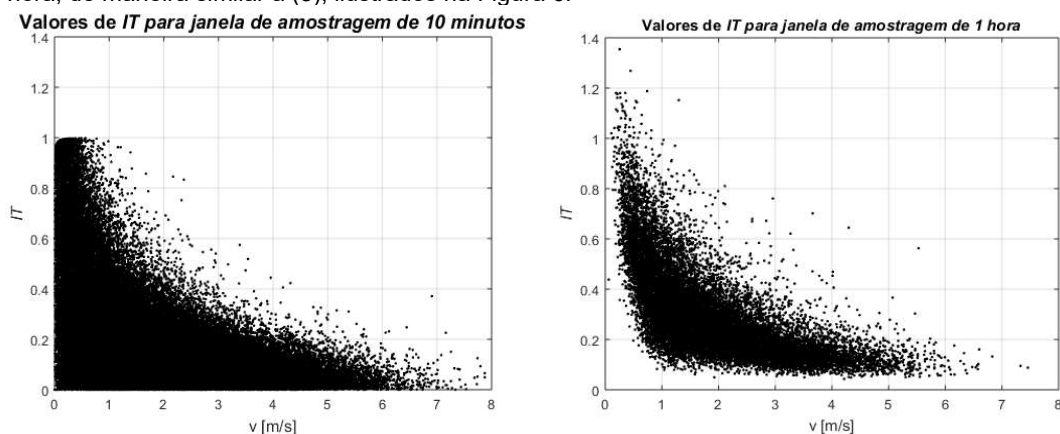


FIGURA 6 - Valores de  $IT$  para janelas de amostragem de 10 minutos e 1 hora.

Pode-se observar que na janela de amostragem de 10 minutos (direita), os maiores valores de  $IT$  encontram-se em velocidades baixas, menores que a velocidade de partida do aerogerador considerado no trabalho (2 m/s), podendo influenciar na modelagem da turbulência. Logo, para o estudo em questão, considerou-se a realização dos cálculos pertinentes usando períodos de uma hora (esquerda). Ainda pode-se observar que a maior parte de



ocorrência de velocidade de vento possui intensidades baixas, inferiores a 3 m/s. Por outro lado, observa-se que no período de 2009 a 2011, as maiores ocorrências de  $IT$  foram na faixa de 0,15 a 0,30, sendo que aproximadamente 42,25% dos dados de  $IT$  se encontram nesta faixa. Logo, a tendência da modelagem é ser influenciada principalmente por esta faixa de valores.

Na Figura 7 estão apresentados os modelos MTN com os valores estabelecidos pela norma e os modelos com parâmetros resultantes de regressão dos coeficientes (MLPTP, MTN MPAE e MTN MQE). Pode-se atentar que o fato de utilizar erros distintos para o critério de escolha dos parâmetros do MTN, resulta em curvas e parâmetros também distintos.

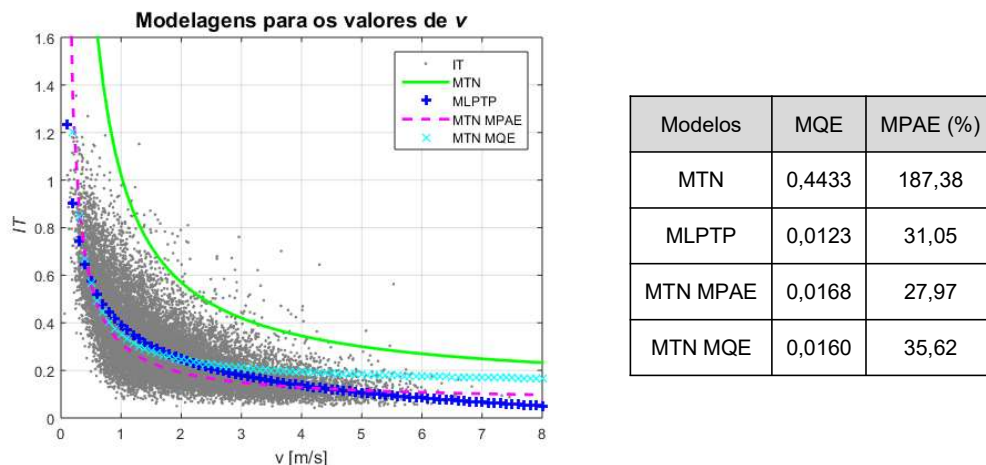


FIGURA 7 - Modelos propostos de  $IT$  aplicados e respectivos erros.

Conforme ilustrado na Figura 7, as curvas apresentam formatos diferentes, sendo que o modelo MLPTP descreve melhor a turbulência entre valores de velocidade de 1 a 2 m/s e as adaptações do MTN reproduzem melhor a turbulência para velocidades inferiores a 1 m/s. No caso de valores maiores de velocidade, a modelagem de MTN utilizando o critério MPAE representa com mais exatidão os valores de  $IT$  calculados, comparado com os demais métodos. Vale destacar que os valores dos parâmetros obtidos para cada ano (2009 a 2011) são muito próximos quando analisados individualmente ou como um único período.

#### 4.2 Etapa 2, 3 e 4

A Figura 8 (esquerda) apresenta a curva original do aerogerador e a curva obtida por meio de um polinômio de 14ª ordem (MPAE de 3,24%), resultante da Etapa 2. Posteriormente à etapa de regressão, inseriu-se cada modelo de  $IT$  na curva de potência. Para tanto, definiu-se cada nova curva de potência como um caso, sendo: Caso base (curva original sem turbulência); Caso 1 (MTN segundo IEC); Caso 2 (MLPTP) e Caso 3 (MTN MPAE) e Caso 4 (MTN MQE), calculando a potência média para passos de velocidade de 0,5 m/s. E, por fim, foi efetuada a regressão das potências médias obtidas na Etapa 3, a fim de descrever as curvas para cada valor de velocidade em um polinômio de 14ª ordem (curva com turbulência), apresentada na Figura 8 (direita). Nas figuras estão destacadas a faixa de velocidade entre 2 e 6 m/s, visto que é a região de praticamente a totalidade dos dados de velocidade medidos pela estação do IFSC.

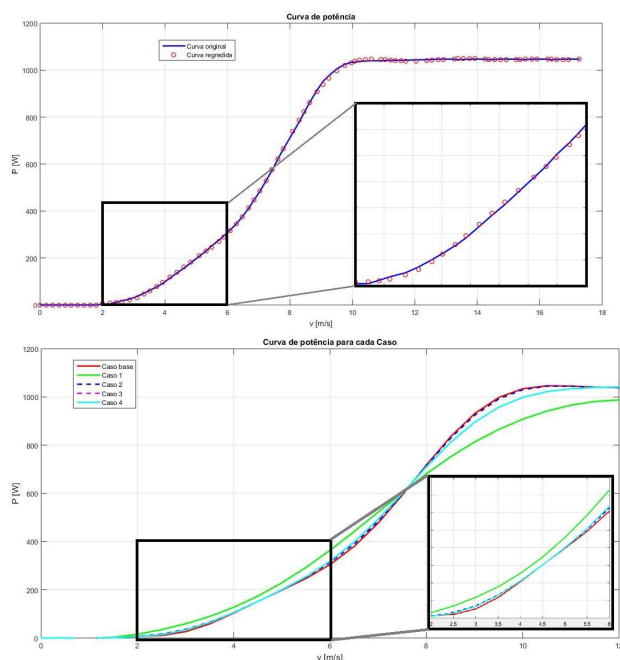


FIGURA 8 - Curva P<sub>xv</sub> original e com regressão e P<sub>xv</sub> para os diversos casos com turbulência.

Na Figura 8 (direita) percebe-se que em diversas faixas de velocidade as curvas dos Casos 2, 3 e 4 estão sobrepostas, significando que possuem valores de  $IT$  muito próximos nessa região. Para velocidades superiores a 8 m/s, nota-se uma diferença entre as curvas 2 e 3 devido aos formatos da mesma, podendo este aspecto ser observado também na Figura 7. Por outro lado, a curva MTN original superestima valores de  $IT$  (Caso 1), resultando em uma modificação na curva de potência inclusive em valores inferiores à velocidade de partida especificada pelo fabricante. Comparando os Casos 3 e 4, ambos MTN com critérios diferentes de escolha, as curvas estão sobrepostas possuindo valores muito próximos.

De maneira geral, pode-se perceber que para velocidades baixas a turbulência provoca um aumento na geração de energia do aerogerador e para velocidades mais altas, um decréscimo na geração. Adicionalmente, a curva com MTN original apresenta maior discrepância em relação a curva original, isto devido a modelagem que superestima os valores de  $IT$ . Já as demais modelagens apresentam resultados próximos à curva, para velocidades baixas, com valores pouco superiores aos valores nominais da curva. E, para velocidades mais altas, a curva com  $IT$  se afasta da curva original.

#### 4.3 Etapa 5

Para efetuar a distribuição de Weibull, usou-se os dados de vento durante o período de 2009 a 2011, calculando os parâmetros utilizando a Eq. (8), obtendo  $k = 1,52$  e  $c = 2,02$ . A Figura 9 apresenta a distribuição resultante.

10 a 13 de novembro de 2019  
Belo Horizonte - MG

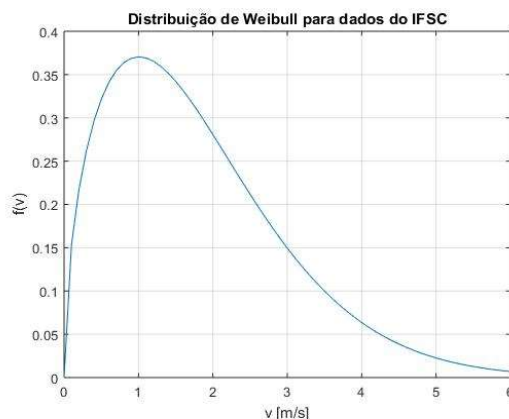


FIGURA 9 - Distribuição de Weibull para os dados de vento, no período de 2009 a 2011, do IFSC.

Pode-se observar que as velocidades com maior ocorrência estão abaixo da velocidade de partida do aerogerador, 2m/s, que irá influenciar na energia gerada pelo mesmo. Por outro lado, a ocorrência de velocidades acima de 6 m/s é mínima comparada às velocidades mais baixas.

#### 4.4 Etapa 6

Por fim, a partir da distribuição de Weibull e das curvas de potência modificadas, pode-se estimar a energia gerada para um determinado período. A Tabela 2 ilustra os resultados obtidos para cada caso.

TABELA 2 - Valores estimados de energia no ano para cada caso.

Caso Base	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
169,18 kWh	263,13 kWh	190,08 kWh	186,38 kWh	198,85 kWh

Conforme exposto na Figura 8 (direita), a metodologia da modelagem da turbulência influencia diretamente na produção de energia gerada pelo aerogerador. O Caso 1 apresenta o maior valor de geração de energia. Isto porque este proporciona à curva de potência original, um acréscimo de potência em valores de velocidade de vento inferiores a 7,5 m/s. Caso a predominância de ventos do local ocorresse para valores maiores que este, a tendência é que tal modelo proporcionasse um decréscimo na energia gerada. O mesmo efeito pode ser observado nos demais modelos, porém com menor intensidade. Este impacto é minimizado devido aos valores de  $IT$  serem menores para velocidades do vento e, devido à maior proximidade aos valores reais de  $IT$ , a discrepância entre energia gerada para a curva original e para curva considerando tais modelos é reduzida.

Por outro lado, observa-se os valores de energia estimada dos Casos 3 e 4, que apesar de usar a mesma modelagem, possuem valores distintos. Isto porque o critério do erro para escolha dos parâmetros afeta o formato da curva de turbulência e, conseqüentemente, a estimativa de produção de energia.

A modelagem apropriada da turbulência é um fator importante para estimativa de produção de energia, visto que pode interferir na produção de energia, dependendo no nível de turbulência. Para casos em que o ambiente possui níveis elevados de turbulência, a diferença entre energia gerada considerando e desconsiderando a turbulência pode ser ainda mais acentuada, dependendo dos valores de  $IT$  vinculados à velocidade e devido ao formato característico da curva de potência do aerogerador (3).

#### 5.0 - CONCLUSÃO

Estudos relacionados com a modelagem da turbulência e sua influência na operação de pequenos aerogeradores instalados em centros urbanos são escassos na literatura. Desta forma, o objetivo principal do artigo foi analisar a influência da turbulência do vento na operação de um aerogerador situado em ambiente urbanizado e sujeito às flutuações do vento. Neste sentido foram abordados os métodos propostos na literatura para a representação da turbulência (MTN e MLPTP) na estimação da geração de um aerogerador. Pode-se perceber que, apesar de ser feito para pequenos aerogeradores, o método MTN que possui valores pré-estabelecidos por norma, apresenta sua curva distante dos pontos médios de  $IT$ , não representando de maneira

aproximada o comportamento real da turbulência no IFSC. No entanto, adaptando-se o método MTN, considerando os menores erros possíveis de MQE e MPAE, pode-se concluir que a alteração dos parâmetros do método MTN fez com que a curva representasse com mais precisão os valores de turbulência. Destaca-se ainda que a turbulência é um espectro de pequenos vórtices de grande a pequena escala e que os resultados obtidos na análise da turbulência ocorreram em médias horárias, diferente do intervalo recomendando pela norma (10 min leitura de 1s). No entanto, pode-se concluir que foi possível observar padrões de turbulência semelhantes e que os modelos de turbulência se ajustaram bem na escala de tempo de 1h. Outro ponto que merece destaque é que a modelagem da turbulência pode influenciar de maneira significativa na geração de energia por parte de um aerogerador. No sentido de quantificar esta influência na geração, selecionou-se um aerogerador comercial com baixa potência, comumente encontrado para aquisição e instalação em residências. No entanto, comparando a distribuição de Weibull para o local e as especificações do aerogerador, constata-se que a turbina não foi apropriada para o local, possuindo velocidade de partida e nominal acima dos valores de velocidade média do local. Por consequência, a geração de energia ocorreria apenas durante rajadas de vento, que tendem a ter curta duração no local de medição. Neste sentido, os autores ainda planejam analisar com mais exatidão o impacto que a turbulência ocasiona na geração de energia de um gerador eólico, instalando um aerogerador de porte mais reduzido (mais condizente com o local) ou utilizando dados reais de geração de aerogeradores instalados em outro local. Por fim, ressalta-se que estudos acerca de pequenos aerogeradores são relevantes e podem incentivar a inserção dessa modalidade de geração em diversas regiões do país, assim como, na complementariedade de recursos energéticos para o consumidor.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) GWEC. Global Wind Statistics 2017. Global World Council, Bruxelas, 2018.
- (2) WWEA. Small Wind World Report: 2017 Summary. 2017.
- (3) GRISER, B., SUNAK, Y., MADLENER, R. Economics of small wind turbines in urban settings: An empirical investigation for Germany. *Renewable Energy*, vol 78, p.334-350, 2015.
- (4) ROCHA, L.C.S., AQUILA, G., ROTELA JUNIOR, P., PAIVA, A.P., PAMPLONA, E.O., BALESTRASSI, P.P. A stochastic economic viability analysis of residential wind power generation in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol 90, p. 412-419, 2018.
- (5) SILVA, N.F. Energias renováveis na expansão do setor elétrico brasileiro: o caso da energia eólica. Synergia, 1 ed, Rio de Janeiro, 2015.
- (6) SUNDERLAND, K., WOOLMINGTON, T., BLACKLEDGE, J., CONLON, M. 2013. Small wind turbines in turbulent (urban) environments: A consideration of normal and Weibull distributions for power prediction. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol 121, p.70-81, 2013.
- (7) IEC. IEC 61400-2: Wind turbines – Part2: Small wind turbines. Geneva, p.1-32. 2013.
- (8) REN, G., LIU, F., WAN, J., LI, GUO, Y., YU, D. The analysis of turbulence intensity based on wind speed data in onshore wind farms. *Renewable Energy*, vol 123, p. 756-766, 2018.
- (9) BURTON, T., SHARPE, D., JENKINS, N., BOSSANYI, E. *Wind Energy Handbook*. John Wiley & Sons, 1 ed, 2001.
- (10) KC, A., WHALE, J., URMEE, T. Urban wind conditions and small wind turbines in the built environment: A review. *Renewable Energy*, vol 132, p. 268-283, 2019.
- (11) LYDIA, M., SURESH KUMAR, S., IMMANUEL SELVAKUMAR, A., EDWIN PREM KUMAR, G. A comprehensive review on wind turbine power curve modeling techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol 30, p. 452-460, 2014.
- (12) JAMES, G., WITTEN, D., HASTIE T., TIBSHIRANI, R. *An Introduction to Statistical Learning: With Applications in R*. 1 ed. New York: Springer, 2013.
- (13) MACHADO, R.C. GERAÇÃO DE CENÁRIOS HIDROEÓLICOS PARA O PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO ENERGÉTICA DE MÉDIO PRAZO VIA MODELO AUTOREGRESSIVO PERIÓDICO. 2016. 161f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.
- (14) PAGNINI, L.C., BURLANDO, M., REPETTO, M.P. Experimental power curve of small-size wind turbines in turbulent urban environment. *Applied Energy*, vol. 154, p.112-121, 2015.
- (15) JIANG, H., WANG, J., WU, J., GENG, W. Comparison of numerical methods and metaheuristic optimization algorithms for estimating parameters for wind energy potential assessment in low wind regions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol 69, p. 1199-1217, 2017.
- (16) ARSLAN, T., BULUT, Y.M., YAVUZ, A.A. Comparative study of numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol 40, p. 820-825, 2014.

## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Matheus Lehmkuhl nasceu em São José/SC (1995). Graduando em Engenharia Elétrica no Instituto Federal de Santa Catarina e possui técnico em Eletrotécnica (2018) pela mesma instituição. Participou do projeto de pesquisa da FAPESC/IFSC/Day Back, intitulado “Instalação e aferição de um sistema piloto de geração eólica para baixos ventos no IFSC”. Seus principais interesses são produção de energia eólica, micro e minigeração distribuída e regulação do mercado de energia elétrica.



Fabrício Yutaka Kuwabata Takigawa nasceu em São Paulo/SP (1981). Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Paulista Júlio de Mesquita Filho (2003), mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (2006 e 2010). Atualmente é professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. Tem experiência na área de sistemas de energia elétrica, com ênfase em sistemas hidrotérmicos, planejamento da operação energética e otimização matemática aplicada.



Yoshiaki Sakagami – Nascido em Recife-PE em 14 de abril de 1976, bacharel em Meteorologia pela USP em 2000, mestre e doutor em Eng. Mecânica pela UFSC em 2011 e 2017, respectivamente. É professor pelo IFSC desde 2009 e realiza pesquisas na área de energia eólica relacionadas a modelos de previsão numérica do tempo, micrometeorologia e análise de produção de aerogeradores em parques eólicos há 8 anos.