SELEÇÃO E ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA PRELIMINAR DE TURBINAS EÓLICAS

Rafael H. Todaro*, Fernanda D. V. Gueter, Giovanna Agarelli, Gustavo T. Pessoa, Joseph Y. Saab Jr**

Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul – SP

* e-mail: rafael.todaro@maua.br
** e-mail: saab@maua.br

RESUMO: Com base no forte crescimento da utilização de energia eólica renovável no Brasil e da indústria voltada ao seu apoio, procurou-se desenvolver uma ferramenta de análise preliminar, capaz de auxiliar leigos e especialistas do ramo nos primeiros passos da análise de viabilidade técnico-econômica de um projeto de energia eólica. A ferramenta proposta pretende ser baseada na *web*, ter acesso público gratuito e um banco de dados que pode ser alimentado diretamente pelos fabricantes dos equipamentos. A ferramenta é capaz de identificar os tipos de turbinas eólicas (eixo vertical ou horizontal), os modelos específicos, e a quantidade de equipamentos que melhor atenderiam a demanda de uma determinada instalação, restrita aos equipamentos disponíveis no banco de dados. A metodologia empregada na seleção preliminar e recomendação decorrente é baseada nos critérios de (i) conversão obtida, (ii) perfil estimado do vento na região, (iii) eficiência de conversão, (iv) custo global estimado e (v) impacto ambiental considerando o CO_2 equivalente na produção e reciclagem do equipamento ao final da sua vida útil. O banco de dados expansível interage com algoritmos de decisão implementados em um ambiente virtual automatizado. Os dados de entrada necessários para uso da ferramenta são poucos e tipicamente disponíveis na fase de avaliação inicial de um projeto: (a) potência desejada, (b) local de instalação e o seu respectivo potencial eólico. Como resultado, o método fornece ao usuário um *ranking* que apresenta as dez melhores opções presentes no banco de dados, sendo a primeira a que possui a melhor relação técnico-econômico-ambiental. Com o intuito de validar e verificar preliminarmente o modelo de análise, o campus de São Caetano do Sul do Instituto Mauá de Tecnologia foi utilizado como um estudo de caso.

Palavras-chave: Energia eólica, análise técnico-econômica, turbina eólica, seleção de turbinas eólicas.

1. INTRODUÇÃO

Historicamente, constata-se que o mundo experimentou considerável crescimento da demanda energética acompanhada de significativo aumento populacional a partir da Primeira Revolução Industrial. Os principais insumos energéticos utilizados neste período estavam limitados à

tecnologia disponível e à facilidade de obtenção, fatos que revelam que o emprego de fontes renováveis de energia e o incentivo à prática de sustentabilidade não eram considerados. Desde então, a adesão às formas alternativas de conversão de energia teve início gradual e mostrou-se necessária por meio de iniciativas mundiais que tornaram o uso de fontes renováveis indispensável e nutrido por uma crescente oferta de investimentos (BURTON, 2011; REICHENBACH, 2012).

A falta de fontes alternativas produz um cenário em que os combustíveis fósseis ocupam a liderança na matriz energética mundial, fato notado durante muitos anos e que perdura atualmente. Como resultado desta realidade, surgem sérios problemas ambientais devido a emissão de poluentes sólidos - como fuligem e material particulado - e na produção de gases de efeito estufa (GEE) em elevadas concentrações, circunstâncias que agravam os efeitos de aquecimento da atmosfera, segundo Irena (2013). Diante deste contexto, o avanço tecnológico em fontes de energia renovável surge como alternativa para atender a demanda por energia elétrica de uma população mundial em crescimento, simultaneamente à minimização de impactos ambientais, além da não dependência de fontes energéticas de origem fóssil.

O balanço energético mundial ilustrado na Figura 1 mostra que a matriz pautada na queima de combustíveis convencionais tem reagido positivamente no que tange o embate entre o comportamento ascendente da demanda por energia junto ao crescimento populacional e a inserção das fontes renováveis de energia na matriz energética. Dados do World Bank (2014) revelam que no período de 1974 a 2011 houve um aumento populacional de 75% seguido de 250% de aumento da demanda por eletricidade, tendo o emprego de energias renováveis evoluído de 0,1% para 4%. Os dados mostram ainda que em 2030 são esperados aumentos de 17% em população e 67% em demanda energética, sendo 26% da matriz energética constituída de fontes renováveis. As linhas cronológicas expressas na Figura 2 evidenciam claramente a evolução da relação inversamente proporcional existente entre o uso de fontes renováveis com relação às não renováveis, o que corrobora o comportamento observado nos dados do World Bank (2014).

Contudo, a busca pelo desenvolvimento de novas tecnologias para obtenção de eletricidade através de fontes renováveis é uma realidade atual e converge para um contexto em que os combustíveis alternativos possuem forte tendência a serem os líderes da matriz energética mundial a curto prazo. Tal contexto tem como principais motivações a não dependência de recursos finitos como fontes de energia e o uso de fontes que possam ser mais viáveis sob o ponto de vista ambiental. De acordo com Irena (2013), para que a última motivação apresentada seja exequível, o estudo e desenvolvimento de tecnologias renováveis de alta eficiência é imprescindível.

Considerando o cenário nacional, uma das formas capazes de atender à necessidade de produzir energia alternativa com alta eficiência ainda detém participação muito tímida na matriz energética: a energia eólica.

Figura 1 - Balanço energético mundial e crescimento populacional. Fonte: World Bank (2014).

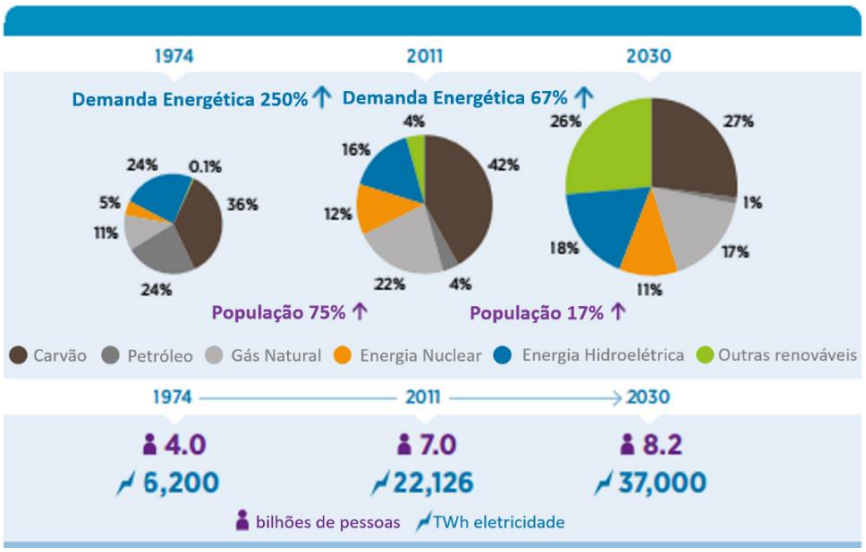
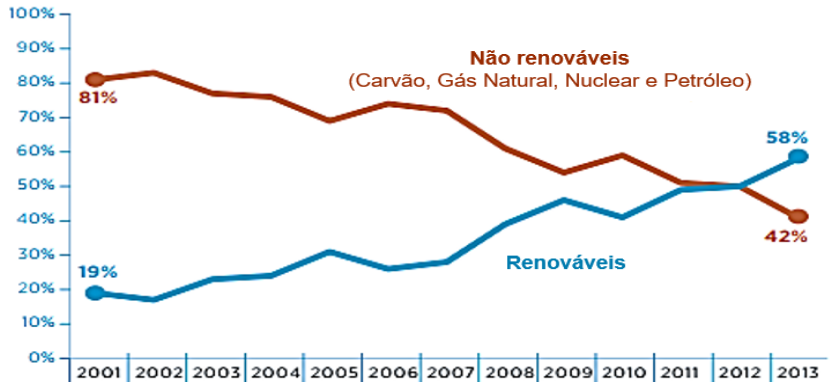


Figura 2 - Linhas cronológicas de uso e tipos de energia na matriz energética mundial. Fonte: Irena (2013).

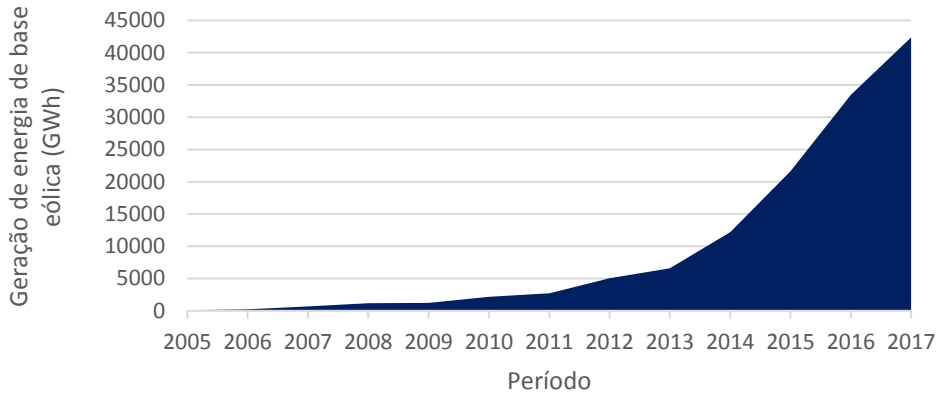


1.1. A ENERGIA EÓLICA NO BRASIL

De acordo com o relatório de Balanço Energético Nacional de 2015, ano base 2014, a geração de energia eólica como fonte renovável passa a ser representativa a partir de 2005, ano em que a conversão total resultou em apenas 93 GWh. Dados mais recentes publicados pela EPE revelam

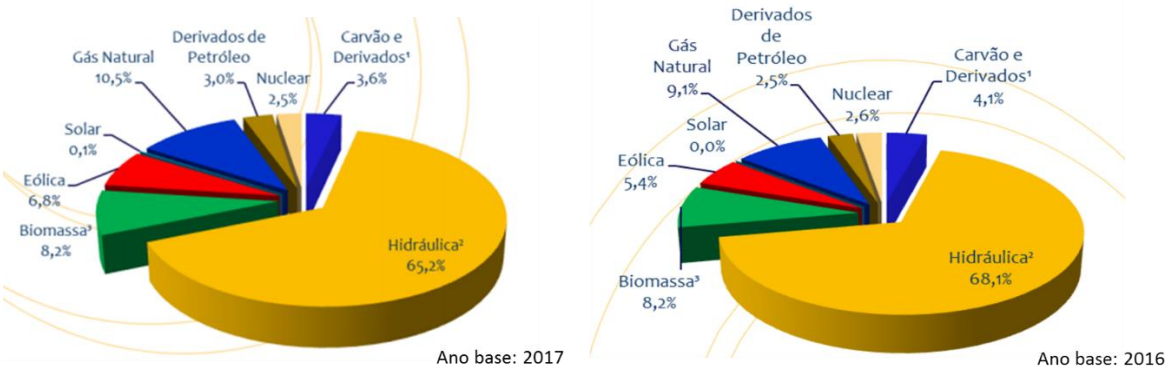
que a taxa com a qual a conversão de energia primária por meio de turbinas eólicas está presente na matriz energética nacional, por ano, é cada vez mais acentuada. A Figura 3 mostra o perfil da geração de energia elétrica proveniente de fonte eólica no período de 2005 a 2017.

Figura 3 - Geração de energia elétrica de base eólica no Brasil, em GWh. Fonte: Adaptado de EPE (2018)



Como forma de verificar a influência da crescente geração de energia eólica na matriz energética nacional, a Figura 4 apresenta uma comparação entre os dois últimos balanços energéticos do Brasil. Os gráficos mostram que a produção de eletricidade por fonte eólica representava 5,4 % da totalidade da matriz energética brasileira no ano de 2016, passando para 6,8% em 2017, números que revelam o aumento de 26,5% em apenas um ano. Mediante este cenário, é válido afirmar que esta forma de conversão de energia é uma forte candidata a ocupar mais espaço na geração de energia em âmbito nacional e é conveniente de ser incentivada, uma vez que atende de forma satisfatória aos objetivos prometidos nas convenções mundiais, simultaneamente ao fato de apresentar bons rendimentos se for empregada de forma otimizada.

Figura 4 - Comparação entre a distribuição energética nacional dos anos base 2017-2016. Fonte: Adaptado de EPE (2018)



A energia eólica empregada para alimentar as redes de transmissão nacionais é a de grande escala, caracterizada pelo emprego de turbinas de grande porte localizadas em regiões de alto potencial eólico, principalmente as linhas costeiras do Nordeste e da região Sul.

Segundo Stanckovic; Campbell; Harries (2009), estas máquinas são inviáveis de serem instaladas em centros urbanos, devido à falta de espaço para construção, ao elevado ruído e à reduzida velocidade do vento. Apesar das desvantagens de instalação das turbinas de grande porte em regiões urbanas, os autores destacam que nestas regiões as turbinas de pequeno e médio porte podem ser utilizadas e indicam como principais exemplos desta instalação as aplicações mostradas por Northern (2012). Contudo, Stanckovic; Campbell; Harries (2009) destacam que as turbinas devem ser corretamente selecionadas a fim de evitar problemas no suprimento da demanda de energia.

Fica evidenciado, portanto, que o uso de turbinas eólicas é recomendado e é interessante de ser incentivado quando munido de sistemas eficientes para realizar a conversão de energia. No caso das turbinas eólicas, uma forma de extrair a máxima quantidade de potência consiste na seleção adequada do modelo frente ao potencial eólico presente no local de instalação. Motivado por tais aspectos, o presente trabalho busca auxiliar leigos e especialistas da área na escolha das melhores opções de turbinas eólicas presentes no mercado que possam atender a uma determinada demanda de forma eficiente, isto é, a partir do máximo aproveitamento do potencial eólico disponível e mantendo o melhor compromisso entre o custo do equipamento, a potência desejada e alguns aspectos ambientais importantes.

2. OBJETIVOS

O presente estudo tem como objetivo produzir um sistema de análise técnico-econômica de turbinas eólicas que auxilie o usuário na escolha de um aerogerador capaz de suprir uma determinada demanda de energia. Este sistema determinará a quantidade, o tipo e o modelo mais adequado de turbina para determinado local de instalação, de acordo com parâmetros de entrada fornecidos, a saber:

- Taxa de conversão desejada (potência desejada).
- Local da instalação e o seu respectivo potencial eólico (na falta da distribuição real, o potencial eólico poderá ser caracterizado estatisticamente pela distribuição de Weibull).

O objetivo imediato consiste em mapear os equipamentos disponíveis no mercado e criar um banco de dados para ser utilizado em um sistema de análise, que contemplará ferramentas de validação de informações técnicas e será dividido em dois grupos: Turbinas de eixo horizontal (HAWT) e Turbinas de eixo vertical (VAWT). Tal validação versa em comparar a capacidade de

produção de uma determinada turbina eólica declarada pelo fabricante do equipamento com a capacidade estimada por meio do método *Blade Element Momentum* (BEM). Uma revisão completa e detalhada sobre o método é encontrada em Hansen (2008).

O objetivo mais amplo é elaborar um método de cálculo que avalie a potência real entregue pelo equipamento de acordo com o potencial eólico do local escolhido.

Depois de concluído, o sistema deverá fornecer as seguintes informações:

- O tipo de equipamento mais apropriado, se este é uma turbina eólica de eixo vertical ou de eixo horizontal;
- Os modelos existentes no mercado correspondentes ao tipo escolhido, e suas respectivas dimensões, visando comparar o custo total de ciclo de vida da turbina, com enfoque no investimento inicial, na manutenção e reciclagem. Os equipamentos serão organizados na forma de *Ranking*, sendo o primeiro da lista o conjunto que possuir melhor equilíbrio técnico-econômico- ambiental.

A ferramenta que este trabalho reporta é a consecução de ambos os objetivos propostos e será voltada aos usuários interessados em fazerem uma pré-análise de viabilidade de um projeto simples. Com o intuito de validar e verificar o modelo utilizado para compor a ferramenta, o campus de São Caetano do Sul do Instituto Mauá de Tecnologia foi tratado como um estudo de caso.

3. MÉTODO E O PROCESSO DE *SITING* UTILIZADOS NA SELEÇÃO DE TURBINAS EÓLICAS

Para que a instalação de turbinas eólicas seja feita de modo adequado e otimizado, o local onde se pretende instalar os equipamentos deve ser devidamente pesquisado e avaliado para verificar se os objetivos técnicos do projeto serão atendidos. Em paralelo, a busca pelo alcance do melhor equilíbrio técnico-econômico-ambiental é imprescindível. O conjunto formado por ambos os procedimentos de pesquisa e análise do local, considerando as conveniências intrínsecas ao projeto, é nomeado como *Siting.*

No entanto, não há uma única metodologia que permite identificar a melhor escolha do local e do(s) tipo(s) de turbina eólica que deve(m) ser utilizada(s). Diversas metodologias de *Siting* são encontradas na literatura. Os trabalhos de Stankovic; Campbell; Harries (2009), EWEA (2009) e Burton *et al.* (2011) reúnem os principais tópicos que devem ser considerados.

De acordo com EWEA (2009), o processo de *Siting* pode ser dividido em 3 etapas, a saber:

- Seleção do Local: compreende em selecionar o sítio da instalação e reunir todas as informações relevantes que possam auxiliar etapas técnicas do projeto. Nesta etapa, realizam-se medições de velocidade do vento em pontos de interesse, com o objetivo de estimar o potencial eólico da região;
- Estudo do Local: etapa referente a obtenção de um modelo representativo do fluxo de vento, considerando o perfil topográfico da região. Nesta etapa os estudos de viabilidade técnico-econômica são iniciados;
- Seleção da Turbina e Otimização: consiste em reunir as informações obtidas através da seleção e do estudo do local e predizer os modelos de turbinas que podem ser utilizados de forma efetiva.

Para atingir os objetivos prometidos no presente trabalho, todas as etapas do processo de *Siting* elucidadas em EWEA (2009) foram cumpridas detalhadamente e são partes integrantes da metodologia empregada pelos autores. Fluxogramas contendo informações mais detalhadas sobre cada uma das etapas são mostrados por Todaro *et al.* (2017).

No estudo apresentado, foram realizadas seis etapas para que o procedimento de *Siting* ora descrito pudesse entregar resultados otimizados, confiáveis e fiéis à realidade. Tais etapas são: especificação da potência nominal requerida pelo usuário; levantamento de perfil de ventos específico; determinação inicial dos tipos de turbinas possíveis de acordo com as existentes no banco de dados; estimativa de dados técnicos (opcional); validação da performance via método BEM (opcional) e análise do custo total de ciclo de vida das possíveis soluções de instalação.

3.1. ESPECIFICAÇÃO DA POTÊNCIA NOMINAL REQUERIDA PELO USUÁRIO

Etapa referente à especificação da potência nominal que cada turbina deverá gerar. Esta informação deve ser obtida com muito rigor, a fim de evitar que a instalação proposta opere em sobrecarga ou seja incapaz de suprir a demanda solicitada.

3.2. LEVANTAMENTO DO PERFIL DE VENTOS ESPECÍFICO

Para a seleção da família de aerofólios de melhor eficiência, é necessário conhecer a faixa de velocidade da carga de ventos que serve a região escolhida para a instalação da(s) turbina(s). A maneira mais precisa de obter esta informação é coletar a frequência de vento no local, por meio da instalação de um anemômetro na posição onde o eixo da turbina pode estar posicionado.

Entretanto, obter o perfil de ventos com precisão satisfatória e fiel à realidade, é uma opção que demanda muito tempo.

Uma forma alternativa à primeira é consultar, por meio das coordenadas geográficas do local, o site do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (CRESESB) no endereço eletrônico: http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=atlas_eolico. Neste site são obtidos os dados de velocidade média de vento e os índices *k* e *c* necessários para o cálculo da frequência de ventos pelo método de Weibull. Devido à não disponibilidade de dados confiáveis, o presente trabalho adotou este procedimento para estimar o perfil de ventos que serve a região estudada pelos autores. Hansen (2008) apresenta uma revisão completa sobre o método de cálculo que pode ser adotado para estimar o perfil de ventos utilizando a distribuição de Weibull.

3.3. DETERMINAÇÃO INICIAL DOS TIPOS DE TURBINAS POSSÍVEIS DE ACORDO COM AS EXISTENTES NO BANCO DE DADOS

Nesta etapa, é considerado que a turbina a ser implantada deva ser selecionada pelo critério da maior potência nominal gerada para o perfil de vento da região, utilizando os dados da curva de potência fornecida pelos fabricantes. Todas as curvas estão contidas no banco de dados, alimentado com os dados de catálogos técnicos de máquinas já existentes no mercado.

3.4. ESTIMATIVA DE DADOS TÉCNICOS

Etapa entendida como opcional, porém recomendada, busca refinar a seleção das máquinas indicadas no passo anterior através da inserção informações técnicas que possibilitem a geração teórica da curva de potência da turbina, tais como: formato dos aerofólios usados, corda e torção das pás em função do raio e distribuição dos aerofólios. Diante disso, os dados disponibilizados no catálogo dos fabricantes poderiam ser validados e, a partir desta condição, a confiabilidade da seleção técnica seria maior.

Por se tratar de uma questão tecnológica e de detalhamento construtivo, poucos fabricantes fornecem estas variáveis, as quais podem ser obtidas após a aquisição do equipamento por meio de cálculos estimados de projeto. No entanto, caso o desenvolvimento de um aerogerador próprio seja oportuno, vários parâmetros técnicos podem ser estimados a partir da escolha dos perfis das suas pás. A base de dados do National Renewable Energy Laboratory (NREL), no site *http://wind.nrel.gov/airfoils/* apresenta esta possibilidade de acordo com o tipo e família de rotor de interesse.

3.5. VALIDAÇÃO DA PERFORMANCE VIA MÉTODO BEM

Etapa concluinte da anterior, consiste em obter a curva de potência teórica de uma turbina eólica a partir do conhecimento de dados técnicos complementares àqueles já publicados pelos fabricantes. A execução deste passo acontece através do uso do software de uso livre *QBlade*, responsável por levantar a curva de potência de um aerogerador a partir de simulações numéricas do respectivo aerofólio frente a um escoamento de ar padrão. Como resultado deste procedimento, a validação dos dados técnicos disponibilizados via catálogo pode ser realizada por comparação aos dados obtidos via simulação computacional.

3.6. ANÁLISE DO CUSTO TOTAL DE CICLO DE VIDA DAS POSSÍVEIS SOLUÇÕES DE INSTALAÇÃO

Etapa referente à análise do custo total de ciclo de vida das turbinas selecionadas. Para isto, são considerados os seguintes aspectos:

- o montante de energia gerada pelo parque eólico ao longo do ano;
- a tarifa de energia elétrica da rede e as taxas de conversão dos equipamentos;
- o rendimento das máquinas;
- a autonomia gerada pela acumulação de energia fora dos horários de pico.

4. DESENVOLVIMENTO

Tendo em vista o modelo de *Siting* proposto e a metodologia adotada, a próxima etapa do trabalho corresponde o desenvolvimento da metodologia de análise técnico-econômica, dividida em quatro fases.

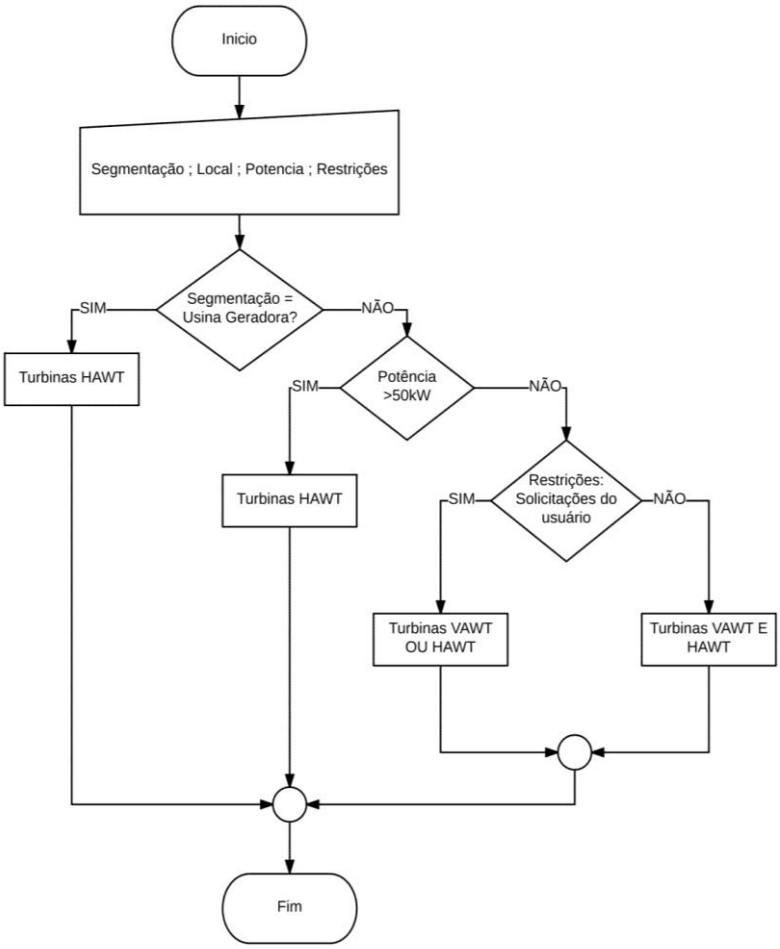
4.1. ESCOLHA DO TIPO DE TURBINA (FASE 0)

Sendo a etapa inicial da metodologia de seleção de turbinas, é necessário determinar o seu tipo: HAWT e/ou VAWT. O fluxograma ilustrado pela Figura 5 mostra todos os passos entendidos como necessários para fazer esta seleção. Inicialmente, o usuário do método deve fornecer as seguintes informações:

- Classe de consumo de destino da geração: Geração, Industrial, Comercial ou Residencial.
- Local a ser instalada a turbina: Rural, Urbano, Costeiro.
- Potência real que deve ser gerada;
- Eventuais restrições – critério(s) de escolha subjetivo.

Se a classe de consumo for de geração ou para potências requeridas maiores que 50 kW, a lógica do fluxograma direciona a escolha diretamente para turbinas HAWT, devido a capacidade de geração limitada de potência das turbinas VAWT. Caso negativo para as duas opções prévias, a análise concentrar-se-á nas restrições e solicitações impostas pelo usuário, podendo resultar em uma seleção de ambos os tipos VAWT e HAWT, ou apenas um dos mesmos, conforme indica a Figura 5.

Figura 5 - Fluxograma da Fase 0. Fonte: Todaro *et al.* (2017).



4.2. SELEÇÃO DO MODELO DA TURBINA PELO CRITÉRIO DA POTÊNCIA (FASE 1)

A segunda etapa da metodologia de seleção de turbinas via análise técnica, compreende a escolha limitada dos modelos de acordo com os existentes no banco de dados. Para esta etapa foi elaborado um fluxograma geral ilustrado na Figura **5**. O banco de dados em questão é formado por curvas de potência de turbinas eólicas dos fabricantes Siemens, Enercon, Vestas, Nordex, Enersud, Tecsis e Eletrovento e é apresentado por Todaro *et al.* (2017).

Inicialmente, o usuário do método deve entrar com os valores das variáveis seguintes variáveis:

- Tipo de turbina (TT): HAWT e/ou VAWT;

- Coordenadas geográficas do local de instalação da turbina ou turbinas, latitude (LAT) e longitude (LONG), para poder traçar o perfil de ventos da região;
- Altura real do rotor (HHR) e o tipo do local (LOCAL), para ser possível a correção da camada limite sobre o perfil de escoamento do vento;
- Potência de projeto ($P_{projeto}$), a qual será a requerida pelo usuário;
- Número de turbinas a serem instaladas ($n_{turbinas}$), para alocar a potência real a ser gerada por cada turbina em específico, caso o usuário saiba previamente o número de turbinas estabelecido.

Após serem especificadas as variáveis acima, são obtidos o perfil, as velocidades média e de maior frequência de ventos e a frequência anual em horas, referentes à região a ser instalada a turbina, conforme sugere o tópico 3.2. Como terceiro passo, parte-se para o cálculo da energia anual e potência estimada corrigida, considerando o perfil de ventos e a frequência anual em horas anteriormente obtidos. Em seguida, é feita a determinação do número ideal de turbinas necessário para se obter a potência real requerida pelo usuário, por meio de uma lógica iterativa (se a potência real requerida for igual à potência nominal de cada turbina a ser instalada)

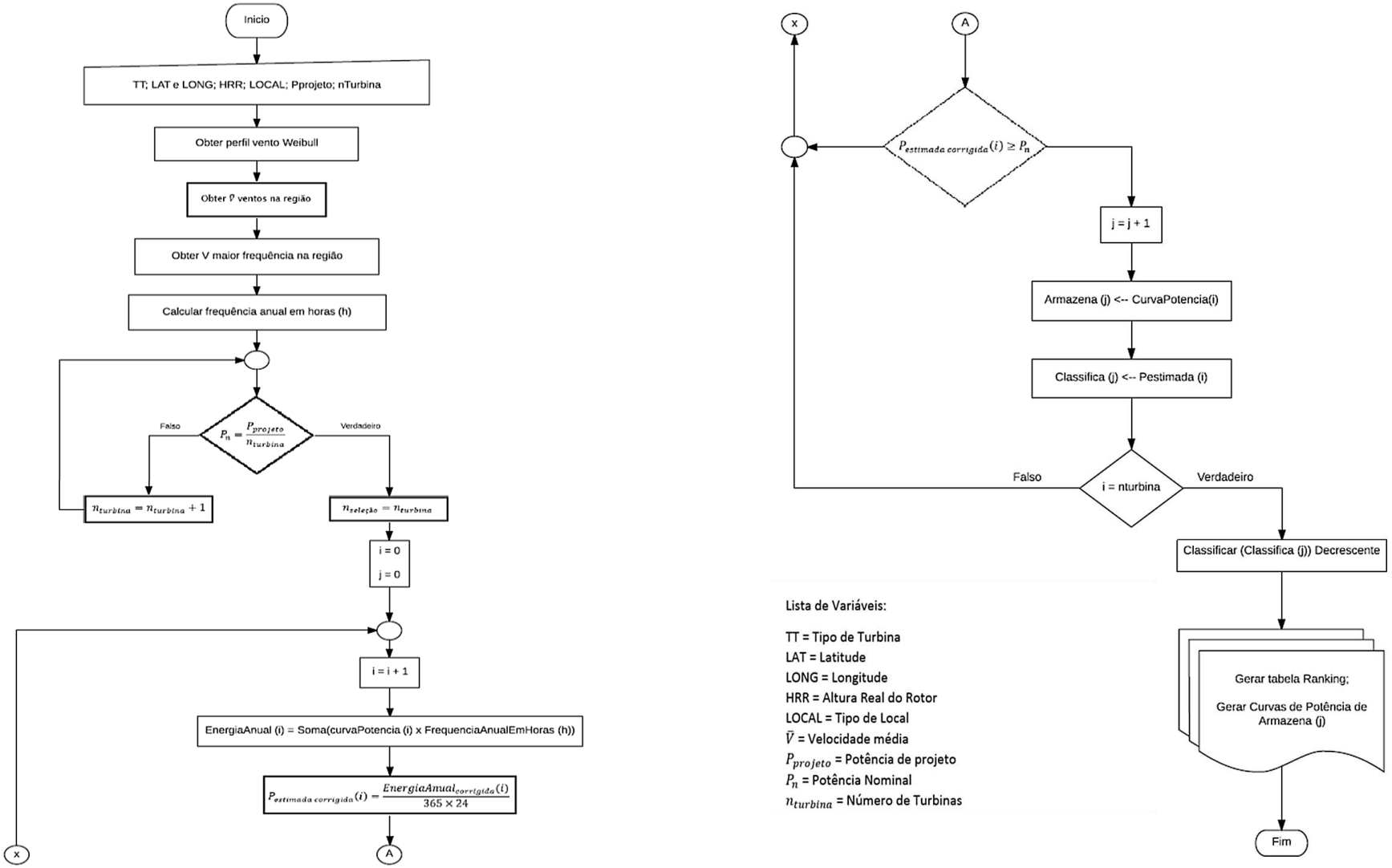
Para cada modelo de turbina previamente selecionado tem-se uma potência e energia anual estimadas e organizadas em ordem decrescente de potência, operação que resulta na obtenção do *ranking* das melhores turbinas, em quesitos técnicos. Posteriormente, gera-se um gráfico com as curvas de potência das dez melhores turbinas classificadas. Esse critério utilizado encontra-se estruturado conforme lógica apresentada na Figura 6.

4.3. VALIDAÇÃO PELO MÉTODO BEM (FASE 2)

Como terceira etapa da metodologia de seleção do ranking de turbinas via análise técnica, valida-se opcionalmente a performance de cada turbina selecionada via método BEM, como garantia de veracidade dos dados registrados no banco de dados. Tal validação é feita por meio da comparação entre as curvas de potência das turbinas selecionadas obtidas via *software* QBlade com as curvas de potências fornecidas pelos seus respectivos fabricantes. Se as curvas apresentarem coeficiente de performance na velocidade média muito próximo (grau de refino definido pelo usuário) ao teórico fornecido pelos fabricantes na mesma velocidade, então o *ranking* de seleção criado na Fase 1 apresenta qualidade no serviço de seleção; se não, deve-se atentar o usuário de eventuais perdas de potência durante operação da turbina a ser selecionada.

Este passo ocorrerá caso seja requisitado pelo usuário do método, ou haja a necessidade de validar um ou mais equipamentos.

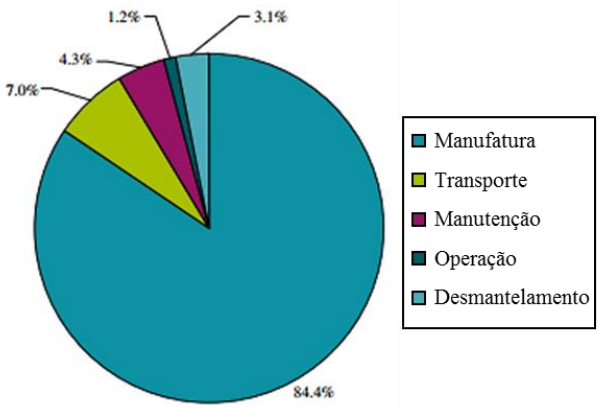
Figura 6 - Fluxograma da Fase 1. Fonte: Todaro *et al*. (2017).



4.4. ANÁLISE FINANCEIRA (FASE 3)

A análise financeira do custo de aquisição foi estruturada através de uma estimativa dos custos de manufatura, operação, manutenção, descarte e transporte das turbinas eólicas presentes na etapa de análise técnica. Como critério inicial da predição, observou-se que o custo de manufatura representa a maior parcela do custo total de uma turbina eólica, aproximadamente 85%, mediante análise da Figura 7. Assim, adotaram-se os gastos referentes ao processo de manufatura como variáveis base para a metodologia de cálculo.

Figura 7 - Participação percentual dos custos presentes em uma turbina eólica. Fonte: Adaptado de Guezuraga (2010).



A metodologia de predição de custos consiste na utilização de um modelo de ajuste como ferramenta para a obtenção das parcelas dos custos de operação, manutenção, descarte e transporte, a partir do custo de manufatura. O percentual que cada uma das operações citadas ocupa do total de aquisição de uma turbina eólica é apresentado na Figura 7.

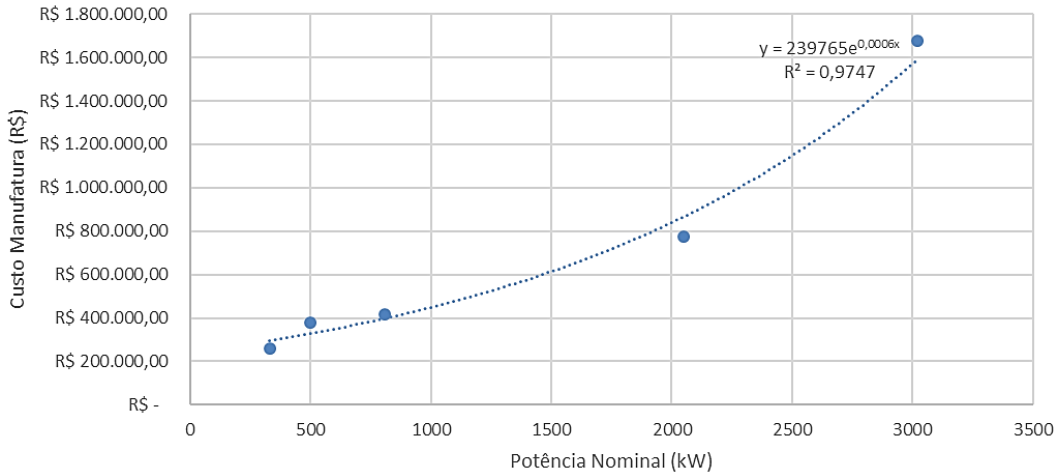
O caminho utilizado para obter o modelo financeiro, consiste em utilizar a massa de dióxido de carbono emitido durante todo o ciclo de vida do aerogerador para estimar a massa de cada material que compõe o seu conjunto. Diante disto, tendo o conhecimento do valor de cada material constituinte, estima-se o preço de manufatura de cada unidade. Os dados de emissão de CO_2 médios e de custo, ambos por quilograma de material, podem ser extraídos da biblioteca do *software* CES Edupack.

O trabalho de Demir (2013) foi utilizado como fonte provedora de informações referentes aos percentuais de materiais constituintes de cinco modelos distintos de turbina eólica. A partir destas proporções, a massa e o custo total médio do processo de fabricação de cada uma das cinco turbinas conhecidas foram estimados. Deste modo, considerando as informações publicadas por Guezuraga (2010), o custo total das unidades citadas por Demir (2013) foram previstos.

Contudo, o resultado desta análise financeira é apresentado na Figura 8. Considerando válidas as hipóteses de conversão adotadas, o gráfico mostra que o custo de manufatura aumenta exponencialmente com relação à potência nominal da turbina e fornece a função melhor ajustada aos pontos referentes à cinco turbinas estudadas. A Equação 1 apresenta o modelo de ajuste obtido.

$$y = 239765\, e^{0{,}0006x} \quad (1)$$

Figura 8 - Modelo de Manufatura de turbinas eólicas de acordo com a potência nominal. Fonte: Todaro *et al*. (2017)



Todas as etapas empregadas na obtenção do modelo financeiro proposto são detalhadamente comentadas e justificadas no trabalho de Todaro *et al.* (2017).

5. RESULTADOS

Os principais resultados obtidos por meio da aplicação da metodologia de seleção e análise técnico-econômica, baseada em aspectos de cunho ambiental e em dados do processo de *Siting*, serão apresentados na seguinte ordem: levantamento do perfil de ventos específico ao local de instalação das turbinas, critérios de seleção do tipo de turbina, cálculo da quantidade necessária de aerogeradores e *ranking* das dez melhores alternativas técnico-econômicas. Para o estudo de caso, a potência útil que o sistema eólico deve ser capaz de gerar está definida em 16 kW.

5.1. LEVANTAMENTO DO PERFIL DE VENTOS ESPECÍFICO

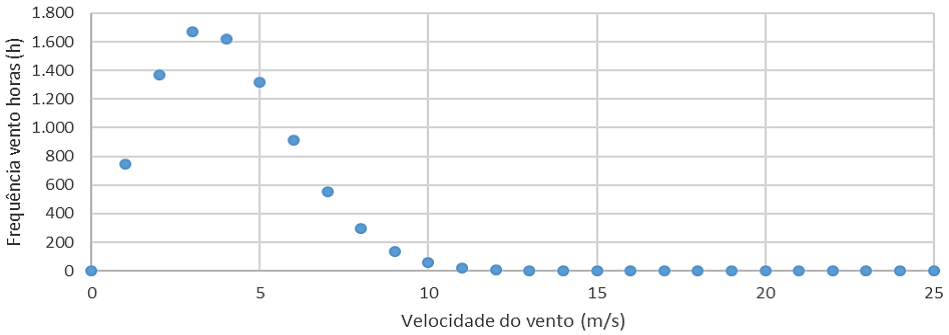
Para obter o perfil de ventos do local estudado, o campus de São Caetano do Sul do Instituto Mauá de Tecnologia, utilizou-se a referência da CRESESB citada no tópico 3.2. Como parâmetros de entrada, a latitude e a longitude do local foram adotadas. As variáveis de saída foram os

parâmetros *c* e *k*, responsáveis por alimentar o modelo de distribuição de Weibull. O perfil de ventos estimado refere-se a uma condição em que o centro do rotor está 50 m distante do solo. A Tabela 1 apresenta todos os valores numéricos dos parâmetros mencionados e a Figura 9 mostra o perfil de distribuição de ventos obtida pelo modelo de distribuição proposto, o qual retorna que a velocidade de maior frequência ao longo de um ano é estimada em 3,00 m/s e registrada durante 1672,75 horas neste período.

Tabela 1 - Dados utilizados na obtenção do perfil de distribuição de ventos segundo Weibull. Fonte: Todaro *et al*. (2017)

Dados de entrada do local	
Coordenadas geográficas	Valor
Latitude	23º38'
Longitude	46º34'
Site	http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=atlas_eolico
Dados do vento a 50m de Altura	
Perfil de Distribuição de Vento	Weibull
Fator c	4,56
Fator k	2,08

Figura 9 - Gráfico da predição de frequência de ocorrência do vento em função de sua velocidade no local escolhido para estudo. Fonte: Todaro *et al*. (2017)



É importante destacar que as informações provenientes da predição de Weibull foram calculadas considerando a altura de 50 m entre o centro do rotor e o solo. No caso do Instituto Mauá de Tecnologia, as turbinas seriam instaladas com tal distância igual a 35m, fato que motivou a realização de cálculos adicionais para recalcular as variáveis utilizadas por meio de fatores de correção, conforme é sugerido por Hansen (2008). Segundo o autor, esta correção é importante devido aos efeitos que altitude propicia à perda de potência gerada e pelo fato da rugosidade do terreno de instalação do equipamento também ser um fator de grande importância no montante energético gerado.

Após a aplicação dos fatores de correção, a moda da velocidade do vento passa a ser 2,60 m/s. Todo o procedimento relativo às correções propostas por Hansen (2008) é mostrado em detalhes por Todaro *et al*. (2017).

5.2. CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DO TIPO DE TURBINA

Gerada a curva de distribuição de frequências da velocidade do vento, atrelada à potência desejada, é possível selecionar no banco de dados as curvas de potência das turbinas possíveis de serem empregadas, conforme metodologia proposta nas seções 4.1 e 4.2. Para orientar as decisões existentes no fluxograma apresentado na Figura **5**, os dados da EWEA (2012) são utilizados. A Figura 10 reúne informações sobre a frequência de uso das turbinas HAWT e VAWT que são notadas com base na potência desejada. Além do tipo de rotor, EWEA (2012) inclui recomendações quanto ao número de pás e o tipo de turbina HAWT (*upwind* e *downwind*).

Figura 10 - Critérios de seleção de tipo de turbina (HAWT ou VAWT) para uma determinada potência. Fonte: Adaptado de EWEA (2012)

Legenda				
Frequência estimada de ocorrência				
0%	0% a 25%	25% a 50%	50% a 75%	75% a 100%

Tabela de Pequeno Porte				
Dados Qualitativos				
Faixas de Potência	P < 1kW	1 kW < P < 7 kW	7 kW < P < 50 kW	50 kW < P < 100 kW
Número de pás				
2				
3				
>3				
Tipo de rotor				
VAWT				
HAWT				
Para HAWT				
Upwind				
Downwind				

Como resultado da análise da Figura 10, para a potência de 16 kW estipulada, ambos os tipos de turbinas HAWT ou VAWT apresentaram probabilidade de escolha, faixas de 75% a 100% e 0% a 25%, respectivamente. Assim, fica determinado que o usuário do método pode optar pelo tipo de turbina para instalação. No entanto, é importante destacar que a metodologia proposta no presente trabalho é capaz de elencar as melhores turbinas sob o ponto de vista técnico e econômico para qualquer tipo de rotor, independentemente de critérios subjetivos por parte do usuário.

5.3. QUANTIDADE NECESSÁRIA DE AEROGERADORES

Para determinar o número de turbinas necessário para suprir a demanda mínima de 16 kW imposta ($P_{projeto}$), foi estipulada a potência de 3000 kW como referência (P_n) - maior valor possível de potência nominal gerada por uma turbina do tipo HAWT existente no banco de dados elaborado. A Equação 2 foi utilizada para realizar o cálculo e retornou o valor unitário de turbinas.

$$P_n = \frac{P_{projeto}}{n_{turbinas}} \tag{2}$$

Determinada a quantidade de turbinas, a energia anual e potência geradas para cada modelo de turbina do banco de dados foram calculadas, considerando os dados do perfil de ventos estimados pela distribuição de Weibull, apresentados na seção 5.1. Também foram calculados o custo econômico total para cada turbina, assim como o seu impacto ambiental, considerando a quantidade de CO_2 emitida durante o ciclo de vida das mesmas.

5.4. *RANKING*

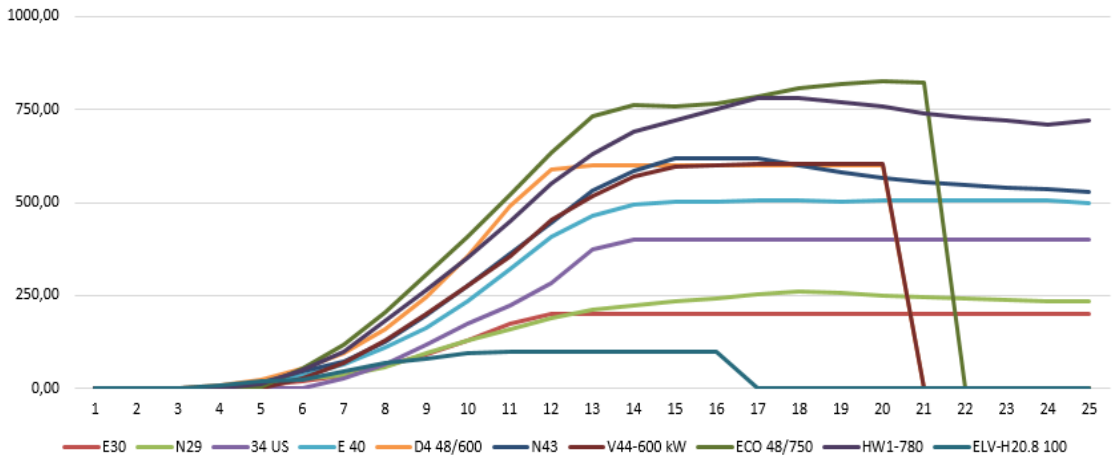
Adotou-se uma classificação mista para a geração do *ranking*, este delimitado pelas 10 melhores turbinas de acordo com o critério técnico-econômico. Tal classificação considerou como prioridade a variável econômica "Custo Total", de cada turbina; como segunda variável, de cunho técnico, definiu-se a "Potência Total" gerada de cada turbina; e por fim, adotou-se convenientemente a emissão de CO_2 como terceiro quesito, este ambiental.

Por fim, o banco de dados foi classificado em ordem decrescente, gerando-se o ranking de classificação técnico-econômico, direcionado ao estudo de caso do Instituto Mauá de Tecnologia, conforme exposto na Figura 11. A Figura 12 mostra as curvas de potência das dez melhores turbinas classificadas. O critério utilizado teve como base a lógica do fluxograma ilustrado na Figura 6.

Figura 11 - Ranking técnico-econômico das dez melhores turbinas, para o Instituto Mauá de Tecnologia, com geração média anual mínima de 16 kW. Fonte: Todaro *et al*. (2017).

Índice	Fabricante	Modelo	Tipo	nturbinas_recalc	Custo total (R$)	Potência total (kW)	Emissão CO2 (kg)
1	Eletrovento	ELV-H20.8 100	HAWT	1	R$ 301.648,39	22,89	13.124,30
2	ENERCON	E30	HAWT	1	R$ 320.301,28	19,63	13.935,86
3	NORDEX	N29	HAWT	1	R$ 330.055,91	20,04	14.360,27
4	DWT Danish Wind Tech Windane	34 US	HAWT	1	R$ 361.138,69	16,15	15.712,64
5	ENERCON	E 40	HAWT	1	R$ 383.470,26	35,32	16.684,25
6	DeWind	D4 48/600	HAWT	1	R$ 407.182,73	51,98	17.715,95
7	NORDEX	N43	HAWT	1	R$ 407.182,73	40,53	17.715,95
8	VESTAS	V44-600 kW	HAWT	1	R$ 407.182,73	34,36	17.715,95
9	Ecotècnia	ECO 48/750	HAWT	1	R$ 445.528,88	56,31	19.384,34
10	HEAG	HW1-780	HAWT	1	R$ 453.621,01	50,97	19.736,42

Figura 12 - Curvas de potência das 10 melhores turbinas, para o Instituto Mauá de Tecnologia, com geração média anual mínima de 16 kW. Fonte: Todaro *et al*. (2017).



De acordo com o *ranking* apresentado na Figura 11, a turbina de melhor viabilidade técnico-econômica para o Instituto Mauá de Tecnologia, campus São Caetano do Sul, é do fabricante Eletrovento, modelo ELV-H20.8 100, de custo estimado em R$301.648,39, com potência gerada de 22,89 kW e impacto ambiental correspondente a 13.124,30kg de CO2 equivalentes.

6. CONCLUSÕES

A metodologia de seleção técnico-econômica de turbinas eólicas desenvolvida neste trabalho resultou em um *ranking* que apresenta os dez melhores modelos de turbina, presentes no banco de dados, para uma determinada aplicação. Para avaliar a aplicabilidade real do método o campus do Instituto Mauá de Tecnologia, localizado em São Caetano do Sul, foi utilizado como estudo de caso.

O enriquecimento do banco de dados, por meio do acréscimo de novas curvas de potência, mostrou-se como principal ponto de melhoria contínua da metodologia de seleção desenvolvida.

A utilização do método BEM para validação das curvas de potência declaradas pelos fabricantes das turbinas foi considerada como uma ótima ferramenta de melhoria aplicada, pelo fato de garantir confiabilidade nas informações técnicas de cada modelo.

A obtenção de dados técnicos, financeiros e ambientais relativos aos equipamentos que compõe o banco de dados foi identificada como uma etapa de grande importância do trabalho, uma vez que a confiabilidade destes dados é condição *sine qua non* para eficácia da metodologia desenvolvida.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BURTON, T., JENKINS, N., SHARPE, D., & BOSSANYI, E. (2011). **Wind Energy Handbook (2nd ed.)**. Chicester: J. Wiley & Sons.

DEMIR, N., TASKIN, A. **Life cycle assessment of wind turbines in Pinarbasi – Kayseri.** Journal of Cleaner Production, ELSEVIER, v. 54, Págs. 253-263, 2013.

EPE, E. D. (2015). **Balanço Energético Nacional 2015: ano base 2014.** Ministério de Minas e Energia, Rio de Janeiro.

EPE, E. D. (2018). **Balanço Energético Nacional 2018: ano base 2017.** Ministério de Minas e Energia, Rio de Janeiro.

EWEA. **Global Wind Energy: Solid Growth in 2012.** Disponível em: https://windeurope.org/about-wind/statistics/global/global-wind-statistics-2012/. Acesso em: 23 out. 2016.

EWEA. **Wind Energy Today.** Disponível em: https://windeurope.org/about-wind/wind-energy-today/. Acesso em: 23 out. 2016.

GUEZURAGA, B.; ZAUNER, R.; PÖLZ, W. **Life cycle assessment of two different 2 MW class wind turbines.** *Renewable Energy*, ELSEVIER, v. 34, Págs. 667-673, 2009.

HANSEN, M. (2008). **Aerodynamics of Wind Turbines** (Second Edition ed.). London: Earthscan.

NORTHERN POWERSYSTEMS. **Siting a Wind Turbine: Issues to consider.** Disponível em: <https://www.nvenergy.com/renewablesenvironment/renewablegenerations/images/GregPrice-WindTurbineSiting.pdf>. Acesso em 10 nov. 2016.

REICHENBACH, Bruno Albert *et al*. **Potencial eólico do campus de São Caetano do Sul da Escola de Engenharia Mauá.** Orientador: SAAB JR., Joseph Y. São Caetano do Sul, SP: CEUN-EEM, 2012. 100 p.

STANKOVIC, S.; CAMPBELL, N.; HARRIES, A. **Urban Wind Energy**. Londres: Earthscan, 2009.

TODARO, Rafael Hauckewitz *et al*. **Seleção e Análise Técnico-Econômica de Turbinas Eólicas.** Orientador: SAAB, Joseph Youssif. São Caetano do Sul, SP: CEUN/EEM, 2017. 87 p.

WORLD DATABANK, World Bank, 2014. Disponível em: <http://databank.worldbank.org/data/views/reports/ tableview.aspx?isshared=true)>. Acesso em 29 de Set. 2016.

TECHNICAL-ECONOMIC SELECTION AND ANALYSIS OF WIND TURBINES

Rafael H. Todaro[*], Fernanda D. V. Gueter, Giovanna Agarelli, Gustavo T. Pessoa, Joseph Y. Saab Jr[**]

Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul – SP

[*] e-mail: rafael.todaro@maua.br
[**] e-mail: saab@maua.br

ABSTRACT: Based on the growing interest on the wind energy in Brazil, a preliminary analysis and selection tool was developed, capable of assisting both laypeople and specialists in the field during the first steps of the technical-economical viability studies for a new wind energy project. The proposed tool was conceived to be web-based, have free public access and a database that can be fed directly by the equipment manufacturers. The tool should be able to identify the types of wind turbines (vertical or horizontal axis), the specific models, and the number of equipment that would best meet the demand of a particular installation, restricted to the equipment available in the database. The methodology used in the preliminary selection and resulting recommendation is based on the criteria of (i) energy conversion, (ii) wind profile at the site, (iii) conversion efficiency, (iv) estimated overall cost, and (v) environmental impact considering the equivalent CO_2 emitted during production and recycling of equipment at the end of its lifecycle. The expandable database interacts with decision algorithms implemented in an automated virtual environment. The input data required to use the tool are few and typically available in the initial assessment phase of a project: (a) desired energy conversion target, (b) installation site and its respective wind potential. As for the output, the method provides the user with a rank of the ten best options, among those present in the database, the first one having the best technical-economic-environmental tradeoff. In order to make an initial verifications of the analysis model, the São Caetano do Sul campus of the Mauá Institute of Technology (IMT) was used as a case study.

***Keywords**: Wind energy, technical-economic analysis, wind turbine, selection of wind turbines.*