

**29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**  
**10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO**  
**METROFERROVIÁRIOS**



**29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**  
**10º PRÊMIO DE TECNOLOGIA & DESENVOLVIMENTO**  
**METROFERROVIÁRIOS**

**CATEGORIA 2**

**APROVEITAMENTO DO POTENCIAL EÓLICO O SISTEMA METROVIÁRIO DE**  
**SÃO PAULO – UM ESTUDO PRELIMINAR**

**INTRODUÇÃO**

De acordo com estudo da ABRACEEL (Associação Brasileira de Comercializadores de Energia Livre) publicado em fevereiro de 2022, o custo da energia elétrica no período entre 2015 e 2021 sofreu um aumento médio por ano de 16,3% contra uma inflação média de 6,3% (ABRACEEL, 2022), tornando a busca por eficiência energética um

**29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**  
**10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO**  
**METROFERROVIÁRIOS**



desafio permanente para a saúde operacional e financeira de qualquer atividade econômica.

Além disto, no âmbito da operação e expansão do sistema metroviário, considerações a respeito do impacto ambiental produzido e sua mitigação por meio do uso de energias limpas e sustentáveis agregam valores positivos, os quais se refletem tanto na imagem da companhia para os passageiros, como também numa percepção mais bem qualificada para a captação de recursos, junto a agentes financeiros e potenciais investidores.

A energia eólica é a energia cinética proveniente do movimento de massas de ar. Os primeiros registros de seu uso remontam à Antiguidade, na Pérsia, por volta de 200 a.C., conforme fontes históricas, onde sabe-se que a energia eólica era utilizada para moagem de grãos e bombeamento de água. Como fonte primária para conversão em energia elétrica, é na segunda metade do século XIX, na Dinamarca, que se tem registro dos primeiros aerogeradores para fornecimento de energia elétrica em áreas rurais (Fadigas, 2011).

Após a II Guerra Mundial com o crescimento da disponibilidade de combustíveis fósseis e, conseqüentemente, a redução dos preços, a energia eólica como fonte primária para obtenção de energia elétrica deixa de ser atrativa economicamente, fazendo com que seu uso ficasse mais concentrado nos ambientes de pesquisa e desenvolvimento tecnológico, até que, com as crises do petróleo ocorridas na década de 70, somadas às preocupações ambientais e climáticas, o interesse por ela fosse retomado. No Brasil, é

**29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**  
**10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO**  
**METROFERROVIÁRIOS**



em 1992 no arquipélago de Fernando de Noronha que se tem a primeira turbina eólica instalada, acoplada a um gerador com potência de 75 kW.

No sistema metroviário, a energia eólica está presente de forma natural, em razão da existência de ventos em áreas abertas ao longo das linhas, estando também presente de forma induzida, isto é, através do sistema de ventilação forçada nos túneis e pela própria movimentação dos trens em trechos subterrâneos e em trechos a céu aberto. Considerando ser esta uma energia disponível no sistema, dispensada ao ambiente, levantou-se a hipótese de aproveitamento desta energia, mediante um estudo preliminar que justificasse sua viabilidade.

## **DIAGNÓSTICO**

Para avaliar a possibilidade de aproveitamento da energia eólica dentro do sistema metroviário é preciso conhecer qual o potencial eólico de trechos nas linhas previamente escolhidos. Estes trechos, preferencialmente, devem ser locais com circulação de ar forçada pelo movimento dos trens ou pelo sistema de ventilação existente nos túneis, com disponibilidade de espaço livre para eventualmente acomodar um sistema aerogerador.

Na linha 3 do metrô de São Paulo, por exemplo, alguns locais elegíveis (mas não únicos) para aproveitamento deste potencial eólico seriam o poço de ventilação a Oeste da estação Deodoro (aspecto interno nas figuras 1 e 2 a seguir), acessível no canteiro

**29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**  
**10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO**  
**METROFERROVIÁRIOS**

central da avenida General Olímpio da Silveira e a saída de emergência 957 no túnel entre as estações Belém e Bresser, acessível pelo pátio Engenheiro São Paulo da CPTM.



**Figura 1 – Veneziana sobre a via, trecho DEO-BFU, para o poço de alívio Oeste**

**Fonte: Elaboração Própria**



**Figura 2 – Saídas de ventilação após as venezianas**

**Fonte: Elaboração Própria**

**29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**  
**10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO**  
**METROFERROVIÁRIOS**



Por definição, o potencial eólico é o fluxo de energia devido ao movimento de massas de ar, ou seja, a potência por unidade de área desenvolvida pelo movimento dessas massas.

Sendo  $E_c$  a energia cinética atribuída ao movimento das massas:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

$$P = \frac{dE_c}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \right)$$

Onde:

P -> potência;

m -> a massa de ar deslocado;

v -> a respectiva velocidade.

Considerando velocidade constante no tempo, para o deslocamento das massas de ar:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \right) = \frac{1}{2} \cdot v^2 \cdot \frac{dm}{dt}$$

Tal que:

$$\frac{dm}{dt}$$

representa o fluxo de massa.

Este fluxo de massa de ar, pode ser obtido considerando-se que esta massa com densidade  $\rho$  atravessa um cilindro de seção transversal de área "A" a uma taxa  $dx/dt$ , onde  $dx$  é o elemento de comprimento longitudinal.

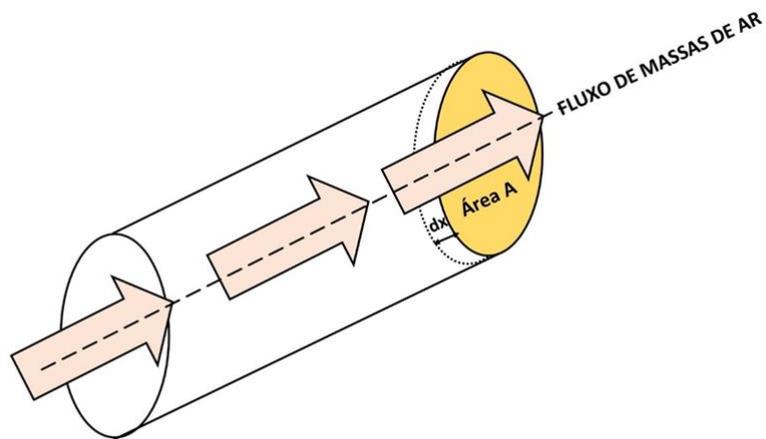


Figura 3 – Representação do fluxo de massas de ar

Fonte: Elaboração Própria

$$\frac{dm}{dt} = \rho \cdot A \cdot \frac{dx}{dt} = \rho \cdot A \cdot v$$

E, portanto:

$$P = \frac{1}{2} \cdot v^2 \cdot \frac{dm}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$$

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 = k \cdot v^3$$

Onde conclui-se que o potencial eólico de um local é proporcional ao cubo da velocidade das massas de ar em deslocamento (Silva, 2017).

**29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**  
**10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO**  
**METROFERROVIÁRIOS**



## **ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Com o auxílio de um anemômetro digital efetuou-se as medidas de velocidade dos ventos nos locais pré-estabelecidos (poço de ventilação a oeste da estação Deodoro e a saída de emergência 957), durante uma hora em cada local no período de pico da tarde.

**Tabela 1 – Medição da velocidade dos ventos**

<b>Local</b>	<b>v mín</b>	<b>v máx</b>
<b>Saída 957</b>	6 m/s ou 21,6 km/h	12,7 m/s ou 45,7 km/h
<b>Poço de Alívio (oeste - DEO)</b>	3 m/s ou 10,8 km/h	5,2 m/s ou 18,7 km/h

As velocidades maiores na saída 957 justificam-se pela presença de um sistema de ventilação forçada anexa a esta saída de emergência, enquanto no poço de ventilação a oeste da estação Deodoro, os sistemas de ventilação forçada estão mais distantes.

Tomando como referência a densidade do ar (Wikipedia, 2023) igual a  $1,2041\text{kg/m}^3$ , sob pressão atmosférica de 1,01 kPa, a  $20^\circ\text{C}$ , obteve-se os seguintes potenciais eólicos<sup>1</sup>:

**Tabela 2 – Potenciais Eólicos**

<b>Local</b>	<b>Mín</b>	<b>Máx</b>
<b>Saída 957</b>	130 W/m <sup>2</sup>	1233 W/m <sup>2</sup>
<b>Poço de Alívio (oeste -DEO)</b>	16 W/m <sup>2</sup>	85 W/m <sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> Sabe-se que a densidade do ar varia com a pressão, temperatura entre outros fatores. No entanto, para este estudo preliminar, optou-se por um valor de referência.

**29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**  
**10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO**  
**METROFERROVIÁRIOS**



Numa projeção bem simples, tomando por base o menor potencial obtido neste estudo, considerando uma eficiência de 60% do potencial eólico para conversão em energia elétrica (Fadigas, 2011), em um aerogerador de 1 m<sup>2</sup> de área útil, a energia convertida no mês seria algo em torno de 6,8 kWh.

## **CONCLUSÕES**

Apesar de não se ter construído um conjunto maior de medidas que permitisse uma análise mais profunda, entende-se que os resultados obtidos são animadores por não invalidarem a hipótese de aproveitamento do potencial eólico do sistema metroviário neste estudo ainda preliminar, apontando, a partir dos menores valores de potencial calculados, que a energia eólica contida nos ventos do sistema metroviário pode vir a se constituir numa opção interessante como fonte suplementar de energia para o sistema, dada a sua disponibilidade e sua natureza ecologicamente limpa (no ambiente urbano).

A replicação deste estudo em outros trechos do sistema metroviário, com um conjunto de medidas mais amplo, permitiria uma estimativa mais precisa do montante de energia disponível para conversão, abrindo novas perspectivas e desafios, com possíveis consequência positivas para as atuais linhas de metrô em operação e para o desenvolvimento tecnológico das linhas futuras.

**29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**  
**10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO**  
**METROFERROVIÁRIOS**



Por último e não menos importante, os envolvidos neste trabalho agradecem ao Departamento de Manutenção de Sistemas (DO/GMT/MTS) da Companhia do Metropolitano de São Paulo pelo incentivo e apoio para a sua realização.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ABRACEEL – Associação Brasileira dos Comercializadores de Energia (2022). *Estudo Impacto da Energia Elétrica no IPCA*. Disponível em:

[https://abraceel.com.br/wp-content/uploads/post/2022/02/Impacto-da-Energia-El%C3%A9trica-no-IPCA\\_V6-2.pdf](https://abraceel.com.br/wp-content/uploads/post/2022/02/Impacto-da-Energia-El%C3%A9trica-no-IPCA_V6-2.pdf) ; acesso em 24/05/2023.

DENSIDADE DO AR. Wikipedia, 2023. Disponível em:

[https://pt.wikipedia.org/wiki/Densidade\\_do\\_ar](https://pt.wikipedia.org/wiki/Densidade_do_ar) ; acesso em 26/05/2023.

FADIGAS, Eliane A. Faria Amaral. *Energia Eólica*. Barueri, SP: Manole, 2011.

SILVA, Dennis Fillipe Pinto. *Determinação do Potencial Eólico no Farol de Santana no Município de Humberto de Campos/MA*. Monografia - Centro de Ciências Agrárias e Ambientais, Universidade Federal do Maranhão. Chapadinha, MA, p.39. 2017.

Disponível em

<https://rosario.ufma.br/jspui/bitstream/123456789/1407/1/DennisSilva.pdf> ; acesso em 13/05/2023.