



**CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA**

**AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA  
QUE PODE SER GERADA PELO FLUXO DOS VENTOS EM  
ESTAÇÃO DO METRÔ DE SÃO PAULO**

Autor: Alexandre Victor Santos Mascarenhas

Orientador: Professor Júlio César

**SÃO PAULO - SP**

**2021**

**ALEXANDRE VICTOR SANTOS MASCARENHAS**

**AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA QUE PODE  
SER GERADA PELO FLUXO DOS VENTOS EM ESTAÇÃO DO  
METRÔ DE SÃO PAULO**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado  
para obtenção do título de Engenheiro  
Eletricista na Universidade Cruzeiro do Sul.

Orientador: Prof. Julio Cesar

**SÃO PAULO - SP**

**2021**

## RESUMO

Cada vez mais a sociedade se depara com a necessidade de encontrar soluções para as demandas energéticas que só crescem com o passar dos anos junto com a modernização tecnológica de diversas áreas. Assim, formas de otimizar e aumentar a eficiência do uso energético é uma das grandes preocupações, da mesma forma que encontrar soluções alternativas para a geração de energia elétrica por meio de fontes renováveis. Este projeto tem o objetivo de estudar e avaliar a capacidade que os ventos que são gerados devido a diferença de pressão que surge devido a passagem dos trens nos túneis do Metrô de São Paulo. Por necessitar de uma grande quantidade de energia elétrica para seu funcionamento, empresas que operam no ramo do transporte público sobre trilhos, como é o caso do metrô, estão constantemente procurando alternativas e inovações para suas demandas energéticas a fim de diminuir seus custos e melhorar a eficiência de seus sistemas. O projeto se propõe a avaliar a capacidade de geração de energia elétrica no mezanino da estação São Joaquim da Linha 1 - Azul do Metrô de São Paulo. A fim de obter estimativas e possibilitar o estudo em possíveis soluções para microgeração de energia elétrica por meio da energia eólica. Para tanto, um dispositivo capaz de transformar a energia mecânica dos ventos em energia elétrica e medir a potência gerada foi desenvolvido para este fim.

**Palavras-chave:** Energia eólica. Geração de energia. Metrô. Transporte público sobre trilhos.

## ABSTRACT

Society is increasingly faced with the need to find solutions for energy demands that only grow over the years together with the technological modernization of various areas. Thus, ways to optimize and increase the efficiency of energy use is a major concern, as is finding alternative solutions for the generation of electricity from renewable sources. This project aims to study and evaluate the capacity of the winds that are generated due to the pressure difference that arises due to the passage of trains in the São Paulo Metro tunnels. Because they need a large amount of electricity for their operation, companies operating in the field of public transport on rails, such as the subway, are constantly looking for alternatives and innovations for their energy demands in order to reduce their costs and improve the efficiency of their systems. The project aims to assess the capacity for generating electricity in the mezzanine level of the São Joaquim station on Line 1 - Azul of the São Paulo Metrô. In order to obtain estimates and enable the study of possible solutions for microgeneration of electrical energy through wind energy. For this purpose, a device capable of transforming the mechanical energy of winds into electrical energy and measuring the generated power was developed for this purpose.

**Keywords:** Eolic energy. Power generation. Subway. Public transport on rails.

## SUMÁRIO

1. Introdução	7
1.1 Justificativa	7
1.2 Objetivo do Trabalho	7
1.3 Alcances e Limitações	7
1.4 Metodologia de Estudo	8
1.5 Cronograma	8
2. Revisão da Literatura	9
2.1 Fundamentação Teórica	9
2.1.1 Geração Distribuída	9
2.1.2 Geração de energia distribuída de Pequeno porte	9
2.1.3 Energia Eólica	10
2.1.4 Geração de Energia Elétrica	10
2.2 Trabalhos Relevantes Realizados na Área	12
3. Estudo de caso	12
3.1 Situação problema	12
3.2 Etapas do Desenvolvimento do Estudo de Caso	13
3.2.1 Desenvolvimento do dispositivo	13
3.2.2 Cálculos realizados	17
3.2.2.1 Cálculo da Potência	17
3.2.2.2 Cálculo das conversões dentro do Arduino	18
3.2.3 Desenhos	19
4. Resultados obtidos	20
4.1 Validação e Calibração em bancada	20
4.2 Medições e testes em campo	22
4.3 Discussão	23
5. Conclusão e Proposta de Trabalhos Futuros	23
5.1 Conclusão	23
5.2 Propostas de Trabalhos Futuros	23
6. Referências bibliográficas	24



## 1. Introdução

### 1.1. Justificativa

A busca por energias renováveis está cada vez maior em todo o mundo, sendo imprescindível, que empresas de grande porte mudem os hábitos comuns e passem a cada vez mais procurar novas formas de melhorar a utilização e geração da energia da qual se utilizam.

Empresas de transporte público sobre trilhos, como a Companhia do Metropolitano de São Paulo, não ficam de fora deste cenário. Por ser uma empresa que possui uma alta demanda de Energia Elétrica, onde a principal atividade realizada, que é o movimento dos trens, é também a que mais exige energia elétrica. Isso sem contar os demais sistemas auxiliares de estação que também fazem uso desta forma de energia, e que mesmo não estando relacionados diretamente com a movimentação dos trens, são essenciais para a devida prestação do serviço oferecido.

As questões relacionadas com essa necessidade de outras formas de geração e aproveitamento da energia elétrica são diversas, indo desde uma questão econômica, o que pode ser decisivo na viabilidade ou não, da prestação do serviço por parte das operadoras de transporte sobre trilhos, até questões ambientais e cunho social.

Assim, se faz necessário, o máximo aproveitamento dos recursos do qual as operadoras se utilizam, de forma a minimizar o desperdício de energia, e otimizar os gastos.

### 1.2. Objetivo do Trabalho

Este trabalho tem o objetivo de iniciar um estudo sobre a capacidade que os deslocamentos de ventos que ocorrem nas estações do Metrô de São Paulo, devido a passagem do trem na mesma, têm de gerar energia elétrica.

### 1.3. Alcances e Limitações

O trabalho se limita a fazer um levantamento aproximado em uma estação do Metrô de São Paulo, de quanto é possível gerar em média por dia, e algumas possíveis configurações, nas quais a captação dos ventos seria mais eficiente.

## 1.4. Metodologia de Estudo

Para realização do trabalho foram adotadas as seguintes etapas, durante o processo de obtenção dos dados:

- Pesquisa bibliográfica em livros, páginas e artigos científicos da área;
- Desenvolvimento e Montagem de um protótipo, capaz de medir a potência elétrica gerada, a partir de um fluxo mínimo de ventos;
- Estudo em campo, para definição da melhor estação do Metrô de São Paulo para a realização das medições;
- Calibração do protótipo para se adequar às intensidades encontradas em campo;
- Medição da potência gerada pelos ventos na estação;

## 1.5. Cronograma

Para o desenvolvimento deste projeto o cronograma a ser seguido é apresentado na tabela 1.

Atividade	Duração (dias)	Data de término de cada atividade
Pesquisa bibliográfica em livros, páginas e artigos científicos da área	20	10/09/2021
Desenvolvimento do protótipo	10	30/09/2021
Validação e calibração do protótipo	3	03/10/2021
Ensaio em campo	2	05/10/2021
Análise dos dados obtidos	11	16/10/2021

Tabela 1 - Cronograma das atividades

Fonte: O autor

Ele foi elaborado ponderando as etapas do projeto e dando maior ênfase no desenvolvimento do protótipo.

## 2. Revisão da Literatura

### 2.1. Fundamentação Teórica

Os principais conceitos teóricos necessários para compreensão do desenvolvimentos deste projeto são apresentados a seguir:

#### 2.1.1. Geração Distribuída

De acordo com o (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2014), geração distribuída é a geração de energia, localizada nas proximidades do consumidor final e que podem ou não gerar excedentes energéticos comercializáveis para o consumidor.

Existe geração de energia distribuída com diferentes tamanhos e objetivos. Podendo segundo (Cruz, 2015), a potência do sistema ser classificado como: Grande; Médio ou Pequeno porte. Sendo que cada uma dessas possui seus objetivos e público alvo específico.

Neste projeto, o interesse maior é nas de pequeno porte, que são geralmente voltadas para os consumidores residenciais e comerciais.

#### 2.1.2. Geração de energia distribuída de Pequeno porte

Definimos aqui de acordo com a REN 482/12 (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2012a), que o conceito de microgeração distribuída é: Uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 100 kW e que utilize fontes com base em energia 22 hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

A energia eólica sendo uma fonte renovável e podendo ser instalada nas proximidades do consumidor, se encaixa no conceito de microgeração de energia distribuída. E é ela que será o objetivo de estudo deste trabalho.

### 2.1.3. Energia Eólica

De acordo com (PORTAL ENERGIA, 2019), a energia eólica diz respeito à transformação da energia do vento em energia útil, é uma forma de obter energia de forma renovável e limpa, uma vez que, não produz poluentes. A energia eólica é uma fonte de energia que está permanentemente ao dispor do Homem. O vento consiste num fluxo de gases em grande escala, proporcionando variações significativas ao longo do ano. Este movimento do ar em decorrência do aquecimento irregular da atmosfera pela radiação solar pode ser transformado em energia útil. Este processo é conhecido como energia eólica e é usado para produzir energia mecânica através de moinhos de vento, produzir eletricidade ou impulsionar os veleiros através de velas. A energia eólica é renovável, limpa e é uma alternativa aos combustíveis fósseis, estando permanentemente disponível em qualquer região no Mundo.

O Brasil por possuir um amplo território geográfico, possui um grande potencial de geração de energia elétrica através da energia eólica. A exploração comercial da energia eólica no Brasil começou em 1992, quando foi instalado o primeiro aerogerador em Fernando de Noronha (PE). A matriz atual conta com 298 usinas eólicas instaladas e coloca o País como líder do setor no mercado sul-americano. A produção diária média é de 2,9 megawatts médios, o suficiente para abastecer 13 milhões de pessoas. A energia eólica representa 3,5% da matriz energética brasileira. A meta do Ministério das Minas e Energia é chegar a 11% até 2023 (TODA MATÉRIA, 2020).

### 2.1.4. Geração de Energia Elétrica

A geração elétrica funciona convertendo a energia cinética contida nas massas de ar em movimento (vento) em energia mecânica com uma turbina eólica, também denominadas aerogeradores. A energia mecânica da rotação da turbina aciona um gerador de energia elétrica por um eixo, sendo então convertida em eletricidade por meio de indução eletromagnética que gera a corrente alternada (CBIE, 2020). Na figura 1 estão representadas as principais partes de uma turbina eólica e as direções de movimento.

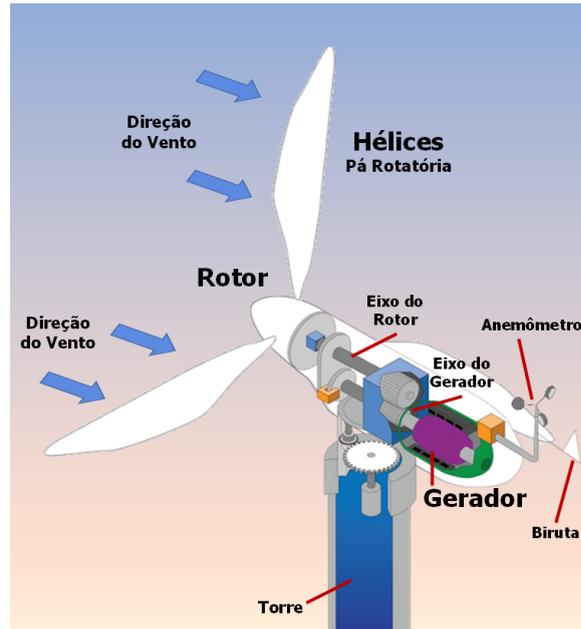


Figura 1 - Esquema de partes de um turbina eólica  
 Fonte: (Reprodução Internet com Elaboração CBIE)

Para se ter uma ideia de como a geração de energia elétrica no Brasil através da energia eólica tem crescido ao longo dos últimos 20 anos, o gráfico da figura 2 mostra inclusive que no ano de 2008 foi atingida uma produção de energia equivalente a 8 usinas de Itaipu. Entre os diversos motivos para tal crescimento, podemos citar, o fato de ser uma energia limpa e renovável, a “abundância” de ventos no Brasil, entre outras.

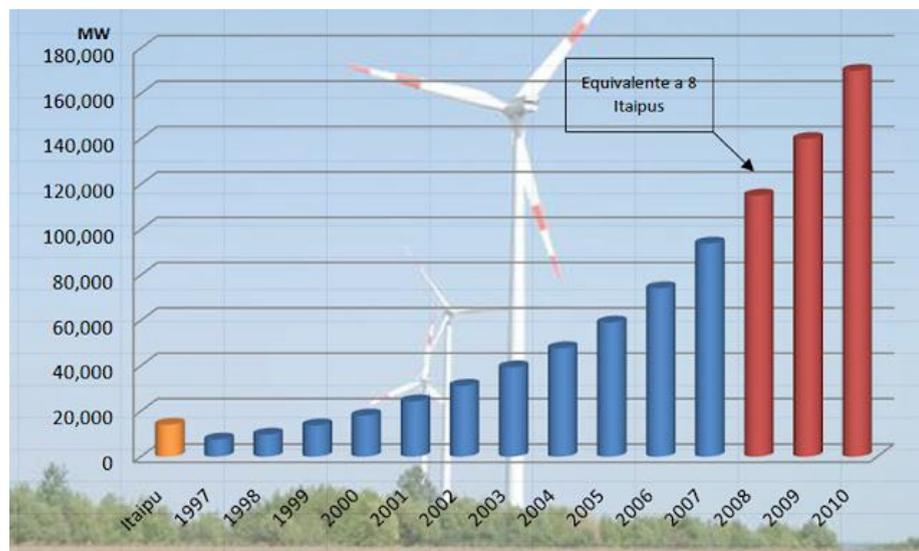


Figura 2 - Geração de energia elétrica no Brasil a partir de Energia Eólica  
 Fonte: (PRESERVAR É INDISPENSÁVEL, 2012)

## 2.2. Trabalhos Relevantes Realizados na Área

Muito tem se falado sobre a geração de energia elétrica através da força dos ventos, uma vez que se trata de uma fonte inesgotável de energia, e por ser ela, uma energia limpa e renovável. Porém, se tratando de microgeração em estações de metrô, existe uma carência de trabalhos relacionados.

## 3. Estudo de caso

### 3.1. Situação problema

Com o objetivo de aproveitar ao máximo os recursos disponíveis para a geração de energia elétrica. Este projeto tem a pretensão de estimar a quantidade de energia elétrica que seria possível gerar com o fluxo dos ventos que circulam em uma estação de metrô, devido à diferença de pressão que é causada pela passagem do trem no túnel.

Para isso, a empresa na qual será feito o presente estudo é a Companhia do Metropolitano de São Paulo (Metrô de São Paulo), que é a empresa responsável pelo planejamento, projeto, construção e operação do sistema de transporte metroviário na Região Metropolitana de São Paulo. Para a realização das medidas necessárias para estimar a quantidade de energia gerada, a estação escolhida foi a estação “São Joaquim”, que faz parte da Linha 1 - Azul de metrô implantada na cidade de São Paulo, e foi inaugurada em 17 de fevereiro de 1975.

A medida da capacidade de geração de energia elétrica, será feita através de um dispositivo que será desenvolvido especificamente para este trabalho, mas que poderá ser usado no futuro para a realização de outras estimativas como esta. O dispositivo a ser desenvolvido deve ser capaz de relacionar alguma grandeza referente aos ventos que passam por ele, com uma grandeza elétrica capaz de estimar a capacidade de geração de energia elétrica.

### 3.2. Etapas do Desenvolvimento do Estudo de Caso

Nos próximos subcapítulos serão detalhados os passos para o desenvolvimento do dispositivo capaz de fazer a aquisição dos dados que serão tratados a fim de obter uma estimativa da capacidade de geração de energia elétrica através dos ventos, assim como as etapas de teste e medidas em campo.

### 3.2.1. Desenvolvimento do dispositivo

Foi desenvolvido um protótipo capaz de estimar a potência da energia elétrica gerada a partir do fluxo de vento local. O protótipo é baseado nos geradores eólicos verticais, onde o gerador fica posicionado perpendicularmente ao fluxo de vento, e assim, ao girar suas hélices, e conseqüentemente o rotor do motor, é gerado uma diferença de potencial no estator, proporcional a velocidade de rotação das hélices. Na figura 3, é possível ver os principais componentes que formam uma turbina eólica, assim como as etapas nas quais ocorrem as transformações de energia.

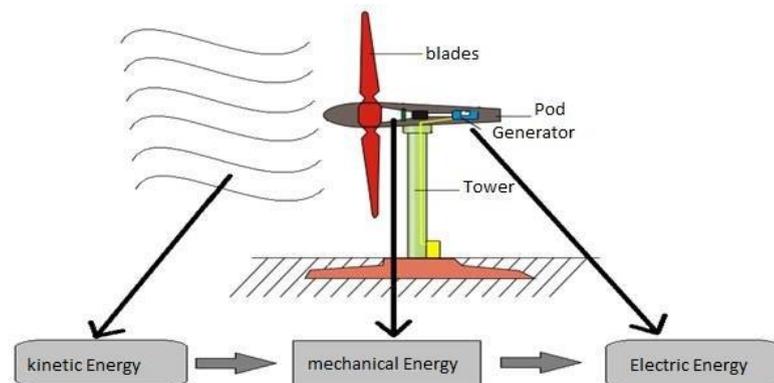


Figura 3 - Princípio de funcionamento de uma turbina eólica horizontal.

Fonte: (BOUBENIA, 2019)

Para simular uma turbina eólica, foi utilizado um “fan” comumente usado para resfriamento em equipamentos eletrônicos, que neste caso foi o modelo JF0825S1M representado na figura 4.



Figura 4 - Fan utilizado como turbina eólica para a geração da energia elétrica

Fonte: (<https://www.elecok.com/pt/jamicon-jf0825s1m-12v-0-15a-2wires-cooling-fan.html>)

Cujas principais características técnicas são:

- Tensão nominal: DC 12V
- Corrente nominal: DC 0.15A
- Taxa de rotação: 1800 ~ 2600 RPM

Para a aquisição dos dados, no caso a tensão analógica que é produzida no estator do motor, foi utilizado a plataforma de hardware “Arduino” mostrado na figura 5, que por possuir baixo custo, entradas analógicas capazes de converter o sinal de tensão em dados digitais, e por possuir um interface simples de programação, é amplamente utilizado no desenvolvimento de protótipos. O hardware é baseado no microcontrolador ATMEGA1280 da ATMEL.



Figura 5 - Arduino Mega. Utilizado para aquisição e tratamento dos dados coletados

Fonte: (<https://www.arduino.cc/en/pmwiki.php?n=Main/ArduinoBoardMega>)

Na figura 6 é mostrado um fluxograma das etapas necessárias desde a captação do vento pelo *fan* até a visualização dos valores correspondentes em potência elétrica em display LCD, posteriormente é feito um detalhamento das etapas.

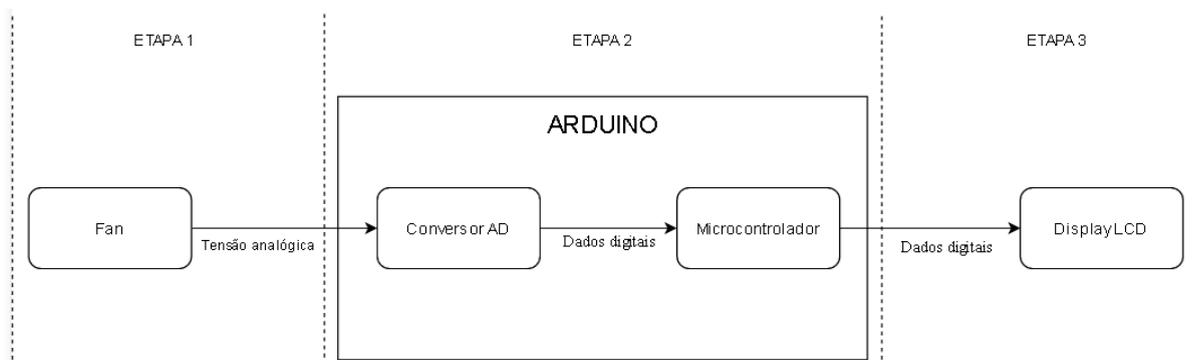


Figura 6 - Fluxograma das etapas necessárias.

Fonte: O autor

Etapa 1 - O fluxo de vento exerce uma força nas pás do fan o que faz com que elas comecem a girar. Devido aos fatos das pás estarem acopladas ao rotor de um motor, ao girar as pás, o rotor também gira. E como consequência da Lei de Faraday do Eletromagnetismo, onde é enunciado que uma variação do fluxo magnético em circuito, será induzida uma força eletromotriz (Tensão elétrica) neste. Essa tensão elétrica é proporcional a variação do fluxo no tempo conforme a equação 1.

$$V = d\varphi/dt \quad (\text{Equação 1})$$

Onde  $V$  é a tensão elétrica induzida,  $\varphi$  é o fluxo do campo magnético e  $t$  é o tempo. Esta tensão elétrica vai então para o Conversor Analógico-Digital (Conversor AD) do Arduino.

Etapa 2 - O Arduino Mega utilizado, possui 16 entradas analógicas. Essas entradas analógicas são entradas que são ligadas ao conversor Analógico Digital do microcontrolador, e tem a capacidade de converter o sinal analógico da tensão elétrica em um sinal digital correspondente. No caso do Arduino Mega, o conversor AD possui resolução de 10 bits e entrada analógica de 0 a 5V. Isso significa que uma tensão dentro do range de 0 a 5V na entrada do conversor terá uma saída digital correspondente e linear no range de 0 a 1023. Ou seja, se for colocada uma tensão de 2.5V na entrada do conversor AD, a saída digital terá o valor digital de 512.

Ainda no arduino, depois de convertido o valor da tensão elétrica da entrada para um sinal digital correspondente, é necessário fazer um cálculo, que será descrito no próximo subcapítulo para se ter o valor da potência elétrica correspondente.

Etapa 3 - Se trata da visualização dos resultados em um display LCD igual ao da figura 5.



Figura 7 - Display LCD utilizado para visualizar os resultados dos cálculos

Fonte: (<https://www.benselectronics.nl/16-x-2-hd44780-lcd-display.html>)

### 3.2.2. Cálculos realizados

O principal cálculo a ser realizado pelo dispositivo, é o que permite relacionar o valor de potência elétrica gerada pelo fluxo do vento. Para chegar a essa relação, naturalmente, existem várias etapas, pois o que é de fato medido é a tensão que é gerada no fan pela rotação de seu rotor causada pela força do vento em suas hélices.

#### 3.2.2.1. Cálculo da Potência

Para o cálculo da potência, partiremos da 1ª lei de Ohm, conforme a equação 2.

$$V = R * I \quad (\text{Equação 2})$$

Onde V é a tensão elétrica, R a resistência elétrica e I a corrente elétrica. No caso, a grandeza que é gerada pelo fan é a tensão elétrica, porém se fosse colocada diretamente no conversor AD, não seria possível a princípio obter a potência. Uma vez que o cálculo da potência elétrica é dada pela equação 3.

$$P = V * I \quad (\text{Equação 3})$$

Onde P é a potência elétrica, V a tensão elétrica e I a corrente elétrica.

Da equação 3, é possível notar que se faz necessário um valor de corrente elétrica conhecido para chegar no valor de potência gerada.

A estratégia a ser adotada é a de colocar um resistor em paralelo com a saída de geração de tensão do fan. Assim, com um valor conhecido de resistência elétrica, e de tensão elétrica, podemos trabalhar com as equações e chegar na seguinte relação para a potência:

$$\begin{aligned} V &= R * I \\ \Rightarrow I &= V/R \end{aligned} \quad (\text{Equação 4})$$

Substituindo equação 4 na equação 2,

$$\begin{aligned} P &= V * I \\ \Rightarrow P &= V^2/R \end{aligned} \quad (\text{Equação 5})$$

De onde é possível apenas com a valor da tensão que chega no conversor AD do Arduino, e com o valor da resistência conhecida que foi colocada em paralelo, obter a potência gerada.

### 3.2.2.2. Cálculo das conversões dentro do Arduino

Uma vez que já sabemos a devida relação entre Potência, Tensão e Resistência (equação 5), vamos partir para a implementação destes cálculos dentro do arduino.

Conforme descrito no item 3.2.1 o conversor AD do Arduino Mega é de 10 bits, o que permite obter 1024 valores diferentes a depender do valor de tensão na entrada, sendo que para 5V na entrada, o valor digital será de 1023 e para 0V na entrada o valor digital será de 0. De posse desses valores é possível calcular a mínima variação necessária de tensão na entrada a fim de modificar um *bit* no conversor AD. Para tanto, basta dividir o *range* de tensão de entrada pela resolução de 10 bits do conversor:

$$\Delta V_{min} = 5/1023 \simeq 4.9mV$$

Isto quer dizer que é necessário uma variação mínima de aproximadamente 4,9 mV de tensão na entrada do conversor AD para modificar um bit. Com essa relação já possível dentro do Arduino saber qual o valor de tensão que está sendo aplicada na entrada, basta multiplicar o valor digital (que estará entre 0 e 1023) por 0,0049. Porém, para calcular a potência, ainda é necessário o valor da resistência, conforme a equação 4. Para tanto será utilizado um resistor de 100Ω.

Ou seja, a equação a ser aplicada dentro do Arduino para obtenção da potência em watts, com base no valor digital que é convertido é:

$$P \simeq (valorAD * 0.0049)^2/100 \quad (\text{Equação 6})$$

Onde, valorAD é o valor digital convertido pelo conversor AD, indo de 0 a 1023.

### 3.2.3. Desenhos

Na figura 8 está representado o esquema elétrico de ligação do resistor na saída do fan e na entrada no conversor AD do arduino.

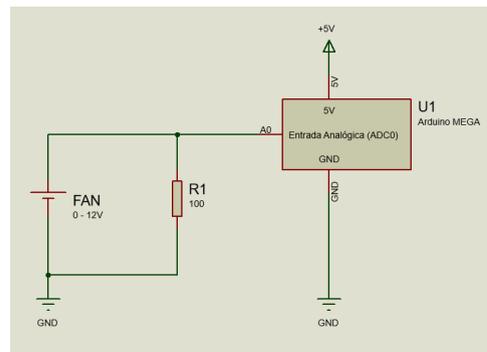


Figura 8 - Esquema elétrico

Fonte: O autor

A visualização dos resultados dos cálculos para obtenção da potência, será feita por meio do display LCD. Para o projeto foi utilizado um display LCD que permite a comunicação via protocolo *I2C (Inter-Integrated Circuit)*, isso é possível devido ao CI PCF8574 que permite ao display LCD que a princípio possui apenas comunicação serial, se comunique via *I2C*. A vantagem de usar a comunicação *I2C* é a alta taxa de transferência e facilidade de implementação, tanto de software como de hardware.

Na figura 9 o diagrama completo de ligação do dispositivo.

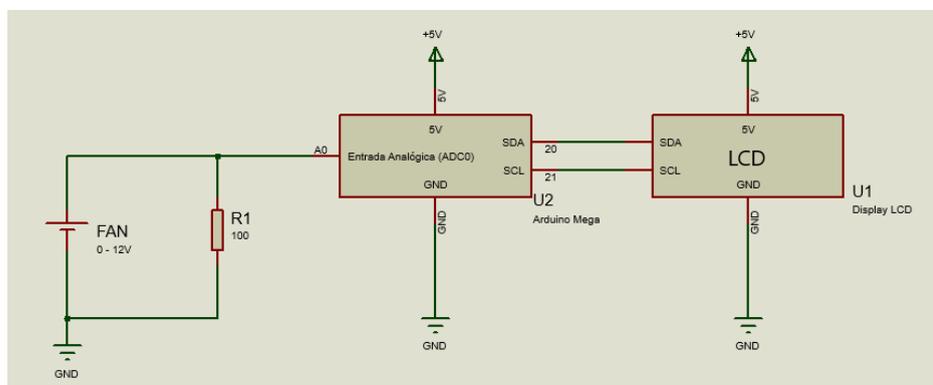


Figura 9 - Esquema final de ligação do dispositivo

Fonte: O autor

O dispositivo montado pode ser visto na figura 10.

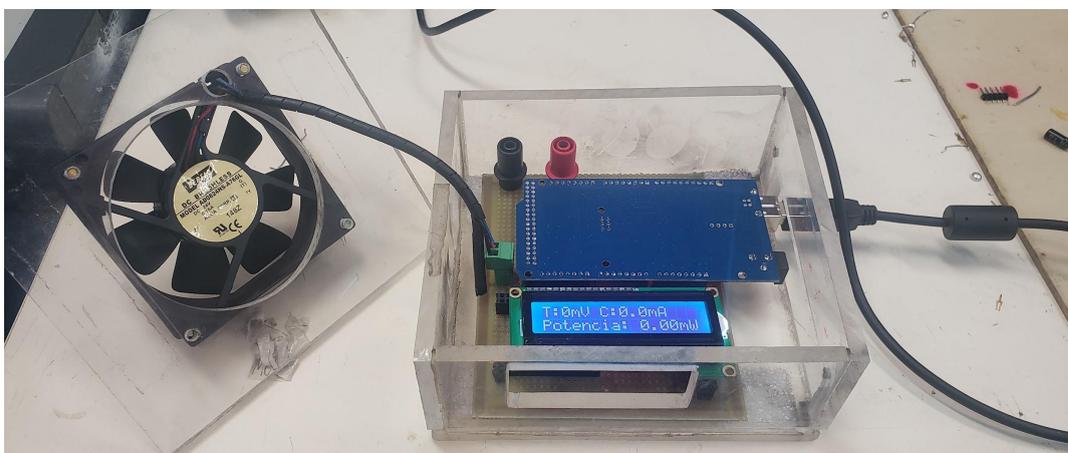


Figura 10 - Dispositivo montado

Fonte: O autor

## 4. Resultados obtidos

### 4.1. Validação e Calibração em bancada

Para validar e calibrar o dispositivo, foram efetuados alguns testes em bancada. Na entrada do dispositivo foi ligada uma fonte de tensão CC, e variou-se de 0V a 5V, a fim de obter a relação com a potência calculada. Os resultados obtidos estão dispostos na tabela 2.

Tensão de entrada (V)	Potência (mW)
0.1	0.12
0.2	0.46
0.3	0.88
0.4	1.68
0.5	2.52
1.0	9.60
1.5	22.20
2.0	42.03
2.5	62.45
3.0	93.03
3.5	121.66

4.0	165.65
4.5	203.40
5.0	249.00

Tabela 2 - Valores de potência para diferentes velocidades de rotação

Fonte: O autor

Com estes valores foi possível gerar um gráfico de Potência x Tensão, como mostra a figura 11.

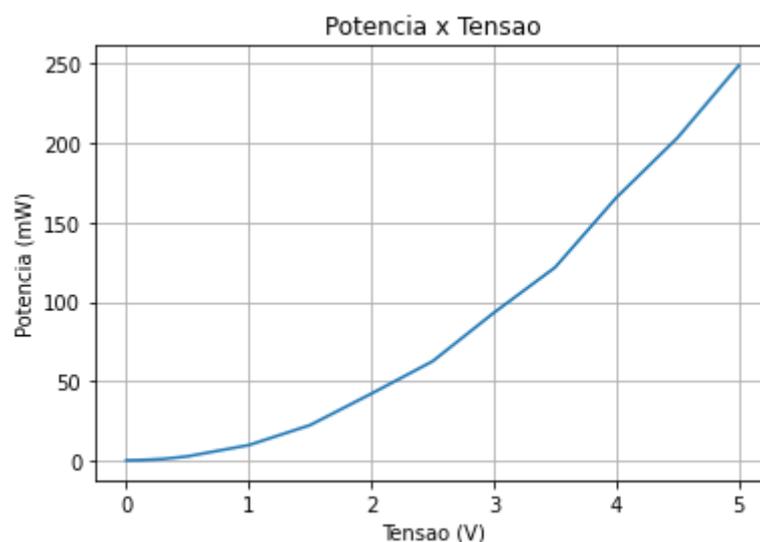


Figura 11 - Gráfico da potência x Tensão dos valores calculados pelo dispositivo

Fonte: O autor

Onde a curva se aproxima de uma hipérbole, como era de se esperar por ser uma equação quadrática (equação 5).

#### 4.2. Medições e testes em campo

Em campo, foram feitas as medições dos valores obtidos de potência, em função do fluxo dos ventos na estação São Joaquim da Linha 1 - Azul do Metrô de São Paulo.

Uma vez que o fluxo de vento fica intenso quando há passagem do trem na estação (chegada ou saída), devido ao “vácuo” que se cria pelo deslocamento de ar que o trem causa. Foram feitas 10 medições em 10 momentos diferentes, levando em conta 10 passagens de trem na estação.

Como a variação da tensão de saída do fan é grande, pois o fluxo de vento não é constante na estação, no software do dispositivo foi feita uma rotina para calcular a média entre 1000 medidas, sendo que a taxa de aquisição do conversor estava em 1 ksp/s (1000 amostras por segundo), e para melhor visualização do valor da potência gerada, no display LCD é mostrado sempre o maior valor, zerando-o a cada 10 segundos.

O local da estação escolhido para fazer as medições foi o mezanino, mostrado na figura 12.

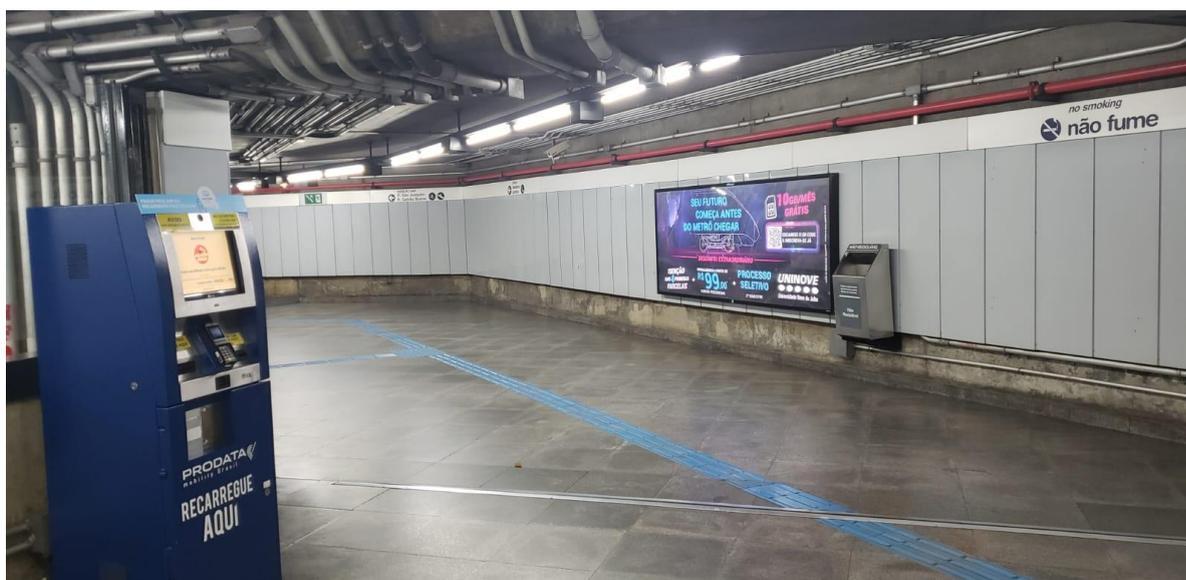


Figura 12 - Mezanino da Estação São Joaquim da Linha 1 - Azul do Metrô de São Paulo

Fonte: O autor

E os resultados foram os mostrados na tabela 3.

Medição	Potência (mW)
1	9.56
2	8.89
3	10.98
4	12.55
5	8.79
6	8.52
7	10.42
8	9.56

9	6.65
10	10.65

Tabela 3 - Valores obtidos em campo com o protótipo

Fonte: O autor

A figura 13 mostra um momento em que está sendo feita uma medida em campo da potência gerada pelo fluxo de vento. Na figura está marcado o valor de 8.79 mW, que foi o maior valor nos 10 segundos de medições de determinada passagem de trem.

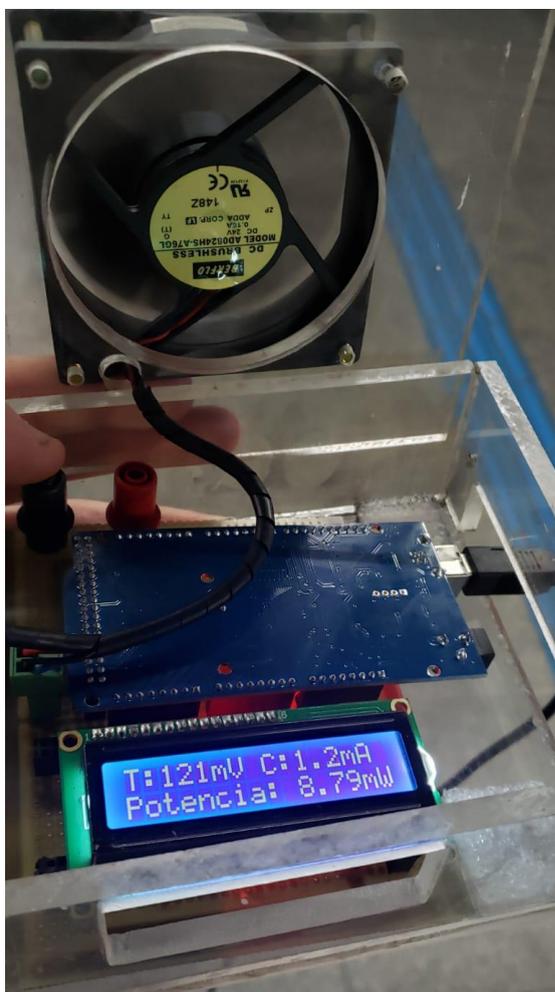


Figura 13 - Dispositivo medindo em tempo real a tensão gerada pelo fluxo de vento na estação

Fonte: O autor

### 4.3. Discussão

Uma forma de considerar a variação dos valores obtidos que constam na tabela 3, é através da média.

$$P_{med} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} P_{medidos} = 9.66 \text{ mW}$$

Para as nossas análises vamos considerar este resultado sem casas decimais, ficando portanto o valor aproximado:

$$P_{med} \simeq 10 \text{ mW}$$

De posse deste valor de potência máxima alcançado quando da passagem de um trem na estação, é possível fazer algumas análises, extrapolando este resultado a possíveis cenários.

Como tanto na chegada como na partida do trem, existe essa geração de fluxo de vento, e o intervalo de duração desse fluxo é algo em torno de 10s, a cada passagem de trem pode ser considerado que haverá 20s de geração de energia elétrica pelos ventos, o que permite calcular qual a geração de energia em miliwatt-hora.

$$P_{gerada} = 10 \text{ mW} * \frac{1}{3} * \frac{1}{60} \simeq 0.06 \text{ mWh}$$

Portanto, a energia gerada pela passagem de um trem na estação é de aproximadamente 0.06 mWh. É uma quantidade muito pequena de energia gerada se for pensada isoladamente, porém, deve-se levar em conta a quantidade de passagens de trens nas estações e que a área utilizada para fazer esta captação do fluxo de vento era pequena.

Um outro ponto importante a ser levado em conta é o fato de que o fan utilizado para a geração de energia não foi feito para este propósito e portanto tem uma eficiência baixa para realizar esta tarefa.

Para se ter uma ideia melhor estendendo este resultado para um possível cenário real de geração, onde será considerado que um trem passa na estação a cada 2 minutos em média, podendo ser em qualquer um dos sentidos, que a estação opera 20 horas por dia e que poderia ser instalado cerca de 300 destes microgeradores em uma estação.

$$P_{dia} = 0.06 * 300 * 30 * 20 = 10.800 \text{ mWh}$$

$$P_{dia} \simeq 11 \text{ Wh} \quad (\text{Equação 7})$$

Ou seja, a estação teria uma capacidade de geração de energia elétrica de 11 Wh por dia.

## 5. Conclusão e Proposta de Trabalhos Futuros

### 5.1. Conclusão

Com os resultados obtidos em campo, foi possível ter uma primeira avaliação do potencial de geração de energia elétrica, através do fluxo de vento causado pela diferença de pressão que ocorre pela passagem dos trens no túnel. O que é de grande valia uma vez que abre as portas para ideias de como utilizar esta energia assim como incentivar mais pesquisas na área.

Os valores encontrados com o dispositivo utilizado neste projeto foram suficientes para mostrar que de fato existe um potencial eólico nas estações. Porém, os resultados mostraram que a potência gerada é bem pequena quando se pensa em usos práticos da mesma.

Como as medições que foram feitas em campo, possuem bastante limitações, devido ao fato de que os componentes utilizados para a pesquisa não eram componentes desenvolvidos para este fim, há de se levar em conta de que os valores obtidos são subestimados.

Assim, mesmo que os valores de potência encontrados neste trabalho sejam de pequena intensidade, pode-se pensar no uso a longo prazo, como por exemplo o carregamento de baterias. Uma vez que os dispositivos geradores ficariam 24 horas por dia 7 dias por semana captando a energia eólica dos fluxos de ventos e transformando-os em energia elétrica, essa energia gerada, poderia estar o tempo todo ligado a um banco de baterias e as carregando.

### 5.2. Propostas de Trabalhos Futuros

Uma vez que foi possível verificar a existência de uma microgeração de energia elétrica pela força dos ventos das estações, torna-se necessário estudos voltados a otimizar a eficiência do dispositivo de geração, para que a capacidade de geração seja ainda maior do que os valores encontrados neste trabalho, assim como as melhores maneiras e locais de

instalação dos dispositivos geradores, pois existem diversos fatores a serem considerados, como por exemplo, garantir a segurança dos usuários.

## 6. Referências bibliográficas

BOUBENIA, Ahmed. **Analysis of hybrid renewable energy systems integrating Power-To-Gas Concept: Performances optimization based on artificial intelligence techniques**. 2019/03/15. DO - 10.13140/RG.2.2.27952.61446

CBIE. **Como funciona a geração eólica?** 2020. Disponível em: <<https://cbie.com.br/artigos/como-funciona-a-geracao-eolica>>. Acesso em 16/10/2021.

CRUZ, D. T. **Micro e minigeração eólica e solar no Brasil: Propostas para desenvolvimento do setor** / D. T. Cruz -- versão corr. -- São Paulo, 2015. 155 p.

FERREIRA, H. T. **Energia eólica: barreiras à sua participação no setor elétrico brasileiro**. 2007. 117p. Dissertação de Mestrado - Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia. Universidade de São Paulo.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2022**. Brasília, p. 410. 2013.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2023**. Brasília, p. 434. 2014.

PORTAL ENERGIA. **Energia Eólica**. Portal Energia, 2019. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/energia-eolica/>>. Acesso em: 15/10/2021.

PRESERVAR É INDISPENSÁVEL. **Gráfico Sobre Energia Eólica...** Disponível em <[https://preservareindispensavel.blogspot.com/2012/11/grafico\\_3.html](https://preservareindispensavel.blogspot.com/2012/11/grafico_3.html)> . Acesso em: 16/10/2021

TODA MATÉRIA. **Energia Eólica.** 2020. Disponível em <<https://www.todamateria.com.br/energia-eolica/>>. Acesso em: 15/10/2021

VINDEL HERNÁNDEZ, TANNIA KARINA. **A proposal for the integration of distributed generation, through virtual power plant, to São Paulo State Electrical System.** 2015. 143 f. Master of Science Thesis - Energy Graduate Program, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.