

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ESTUDO DO POTENCIAL EÓLICO EM DOM PEDRITO/RS ATRAVÉS DO  
SOFTWARE WASP

por

Artur Viacava Kappel

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Agosto de 2023

Kappel, Artur Viacava  
ESTUDO DO POTENCIAL EÓLICO EM DOM PEDRITO/RS  
ATRAVÉS DO SOFTWARE WASP / Artur Viacava Kappel. --  
2023.  
28 f.  
Orientador: Alexandre Vagtinski de Paula.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2023.

1. WASP. 2. Densidade de Potência . 3. Potencial  
Eólico. I. de Paula, Alexandre Vagtinski, orient. II.  
Titulo.

Artur Viacava Kappel

ESTUDO DO POTENCIAL EÓLICO EM DOM PEDRITO/RS ATRAVÉS DO  
SOFTWARE WASP

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Ignácio Iturrioz  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Alexandre Vagtinski de Paula

Comissão de Avaliação:

Prof. Alexandre Vagtinski de Paula (Presidente)

Profa. Adriane Prisco Petry

Profa. Letícia Jenisch Rodrigues

Porto Alegre, Agosto de 2023

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que estiveram comigo durante esta longa caminhada e que me apoiaram de alguma forma, amigos, família e professores. Agradeço aos meus pais por me ensinarem a importância da educação e do conhecimento.

Agradecimento especial ao Professor Orientador Alexandre de Paula por me orientar ao longo de todo esse trabalho.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2023**

**ESTUDO DO POTENCIAL EÓLICO EM DOM PEDRITO/RS ATRAVÉS  
DO SOFTWARE WASP**

**Kappel, Artur Viacava**

00288795@ufrgs.br

***Resumo.** Fontes de energias renováveis são o futuro, seja para suprir as novas demandas ou para tornar a geração de energia mais limpa. Fazer levantamento de potencial eólico em novas regiões é o passo inicial para que novos projetos sejam construídos. O trabalho abrange um estudo de potencial eólico para a região de Dom Pedrito, localizado no Rio Grande do Sul, Brasil. O estudo é realizado utilizando o software WasP, com os dados de medição dos ventos do Instituto de Meteorologia (INMET), para as alturas de 100, 150 e 200 metros e abrange uma região de 2.305 km<sup>2</sup>. A região se mostrou promissora para as alturas de 150 e 200 metros com uma densidade de potência média de 320 W/m<sup>2</sup> e 430 W/m<sup>2</sup>, respectivamente. Já para a altura de 100 metros o resultado não foi satisfatório. Além de ter resultados quantitativos significativos a região também é promissora por possuir terreno pouco complexo e com baixa rugosidade e também por estar próximo de linhas de transmissão de energia já existentes.*

***Palavras-chave:** WASP, densidade de potência,, potencial eólico*

**STUDY OF WIND POTENTIAL IN DOM PEDRITO/RS THROUGH THE WASP SOFTWARE**

***Abstract.** Renewable energies are the future, whether to meet new demands or to make energy generation cleaner. Surveying wind potential in new regions is the initial step for new projects to be built. So, the work covers a study of wind potential for the region of Dom Pedrito, located in Rio Grande do Sul, Brazil. The study is carried out using the WASP software with wind measurement data from the Instituto de Meteorologia (INMET), for heights of 100, 150 and 200 meters and covers a region of 2,305 km<sup>2</sup>. The region showed promise for heights of 150 and 200 meters with an average power density of 320 W/m<sup>2</sup> and 430 W/m<sup>2</sup>, respectively. As for the height of 100 meters, the result was not satisfactory. In addition to having significant quantitative results, the region is also promising because it has a terrain that is not very complex and with low roughness and also because it is close to existing power transmission lines.*

***Keywords:** WASP, power density, wind potential*

## NOMENCLATURA

### Símbolos

$z$	Altura	[m]
$z_r$	Altura de referência	[m]
$V(z_r)$	Velocidade do vento na altura de referência	[ms <sup>-1</sup> ]
$n$	Coeficiente de extrapolação	
$h$	Altura	[m]
$V^*$	Velocidade de fricção	[ms <sup>-1</sup> ]
$z_0$	Comprimento de rugosidade	[m]
$k$	Constante de Von Kármán	
$P$	Potência	[W]
$V$	Velocidade do escoamento	[ms <sup>-1</sup> ]
$\rho$	Massa específica	[kgm <sup>-3</sup> ]
$A$	Área	[m <sup>2</sup> ]
$P_{ext}$	Potência extraída	[W]
$C_p$	Coeficiente de Potência	
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária	
INMET	Instituto de Meteorologia	
WAsP	<i>Wind Atlas Analysis and Application Program</i>	
DP	Densidade de Potência	
CLA	Camada Limite Atmosférica	
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>	

## Sumário

1.	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Objetivo .....	2
2.	FUNDAMENTAÇÃO .....	2
2.1	Camada limite atmosférica.....	2
2.2	Potencial Eólico.....	3
2.3	Potência extraída .....	3
2.4	Topografia .....	3
2.5	Rugosidade .....	4
2.6	Distribuição Estatística de Weibull .....	5
2.7	WAsP .....	5
2.8	Global Wind Atlas.....	6
3.	METODOLOGIA .....	6
3.1	Seleção do Local .....	6
3.2	Coleta de dados .....	7
3.2.1	Velocidade dos ventos .....	7
3.2.2	Topografia.....	8
3.2.3	Rugosidade.....	8
3.3	Simulação .....	8
3.3.1	Análise dos Ventos .....	8
3.3.2	Análise do terreno .....	9
3.3.3	<i>Resource Grid</i> .....	9
4.	RESULTADOS .....	9
4.1	Terreno .....	9
4.2	Velocidade dos ventos.....	10
4.3	Densidade de Potência .....	11
5.	CONCLUSÕES .....	14
5.1	Sugestões para trabalhos futuros .....	15

## 1. INTRODUÇÃO

A eletricidade tem um papel fundamental na sociedade moderna e está presente em todas as esferas do desenvolvimento humano. A tendência é que a dependência da energia elétrica cresça ao longo dos anos e o consumo aumente de 546 TWh em 2019 para 762 TWh em 2030 (MME, 2019) no Brasil. Para que se possa manter o equilíbrio ambiental, em um cenário de aumento de consumo de energia elétrica, é necessário que sejam exploradas fontes renováveis para geração de energia. Além deste desafio, o Brasil apresenta uma significativa dependência no processo de geração de eletricidade a partir das hidrelétricas. De fato, 56,8% de toda a geração elétrica do país provém dessa fonte (EPE, 2021). Essa situação resulta em dificuldades durante os períodos de seca, quando os reservatórios de água atingem níveis baixos. Isso leva a uma escassez na geração de energia e, conseqüentemente, a um aumento nos preços para o consumidor. Diante disso, torna-se crucial para a economia brasileira a implementação de novas fontes de energia.

A análise do potencial eólico desempenha um papel fundamental na busca por fontes de energia limpa e sustentável. O desenvolvimento de energia eólica tem sido amplamente discutido na literatura. Archer e Jacobson (2005) investigaram o potencial eólico mundial para a altura de 80 metros e concluíram que a capacidade de produção mundial é de 1,6 TW. Filgueiras e Silva (2003), apontam a região Nordeste do Brasil como a mais promissora em relação a geração de energia eólica. O Rio Grande do Sul possui 103 GW de potencial eólico *onshore* a 100 metros de altura (CAMARGO SCHUBERT, 2014). As principais áreas são as regiões do Litoral Sul, Escudo Rio-Grandense, Coxilha Santana, Planalto das Missões, Serra Gaúcha e Costa ao Redor da Lagoa dos Patos além do potencial eólico *offshore*. Segundo Driemer, 2016, o estado possui na altura de 125 metros e 150 metros potencial estimado maior do que a capacidade instalada no Brasil em aerogeradores no ano de 2012.

Estudos foram realizados ao longo de todo o Rio Grande do Sul demonstrando o potencial eólico da região. Tuchtenhagen, 2019, estudou sobre o potencial eólico *offshore* da região sul do Brasil e chegou à conclusão que a região apresenta grande potencial eólico com valores de densidade de potência superiores a 1000 W/m<sup>2</sup>. Dutra et al., 2013, fizeram uma análise do potencial eólico da região das Missões e do noroeste do estado. Através de dados do Atlas Eólico do Rio Grande do Sul de 2002, averiguaram que a região possuía área com potencial aproveitável, porém fragmentada, mas estudos mais profundos deveriam ser feitos na região. Cunha et al., 2012, comparam modelos de simulação numérica dos ventos em Dom Pedrito, chegando a resultados máximos de 9,5 m/s para altura de 100 metros utilizando WRF (*Weather Research and Forecasting*) e de 17 m/s para altura de 100 metros utilizando o WindStation.

Além disso, Rennkamp e Perrot (2016) analisam que o Brasil possui boa expectativa na transição para energia eólica devido à parceria entre empresas públicas e privadas. Essa parceria tem se mostrado crucial. Em 2004 foi criado o PROINFA, Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica, que baixou o risco de desenvolvimento dessas novas tecnologias através de incentivos fiscais. Esse incentivo trouxe empresas internacionais para atuar no desenvolvimento de tecnologia no Brasil. Em 2022 o país expandiu 8235,1 MW de potência, nesse total 2922,5MW são provenientes de energia eólica (ANEEL, 2023). Em 2021 o país figurava como o sexto maior país em potencial instalado e o terceiro país que mais aumentou sua capacidade nesse mesmo ano com um salto de 3,8 GW de capacidade instalada (ABEEÓLICA, 2021).

Campos, 2016, realizou uma comparação utilizando o software WAsP e o CFD (*Computational Fluid Dynamics*) e concluiu que o WAsP deve ser utilizado com cautela levando em consideração a topografia do terreno e a altura, pois a diferença de densidade de potência entre os dois métodos chegou a 42,9%. Porém, ele alerta para a curva de aprendizado muito grande e dificuldade de usar o método CFD.

## 1.1 Objetivo

Como pode ser visto, há poucos trabalhos estudando o potencial eólico da região de Dom Pedrito utilizando dados de medições *in loco*, apesar do estado do Rio Grande do Sul ter um bom potencial eólico. Com isso em mente, o objetivo do trabalho é analisar o potencial eólico de Dom Pedrito, Rio Grande do Sul, através da densidade de potência calculada para a região. A partir de dados coletados da estação automática do INMET, Instituto de Meteorologia, instalada na localidade será realizada a simulação. O *software* WASP será utilizado para as simulações.

Os resultados obtidos nas simulações serão comparados com os valores de densidade de potência obtidos no *Global Wind Atlas*, programa que disponibiliza uma série de dados sobre potencial eólico do mundo inteiro.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO

### 2.1 Camada limite atmosférica

Segundo Robert W. Fox et al., (2018) a camada limite é uma região do escoamento em que a velocidade varia de zero, na região diretamente em contato com a superfície parada, até a velocidade prevista na teoria do escoamento não viscoso. No regime dos ventos terrestres a camada limite, conhecida como camada limite atmosférica, compreende da superfície, onde o vento sofre influência da rugosidade do terreno, até a altura dos ventos geostróficos, que não sofre influência do terreno (HIRATA; ARAUJO, 2000)

Segundo Cabral (2015) a camada limite atmosférica não possui uma delimitação exata, mas sim uma faixa de transição, de um ambiente com escoamentos turbulentos significativos para a atmosfera livre. Porém, Stull (1998) diz que a camada limite atmosférica pode variar de centenas de metros até quilômetros. Então, a CLA, camada limite atmosférica, influencia o vento que atinge as pás do aerogerador, por consequência influencia na capacidade de geração de um parque eólico. A Figura 1 mostra uma representação da camada limite atmosférica.

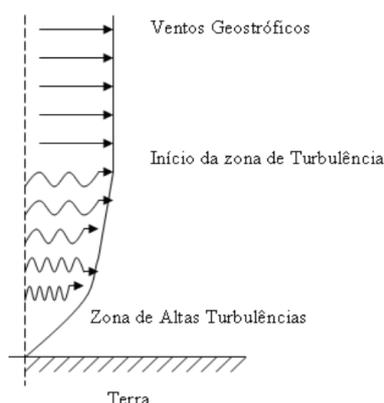


Figura 1- Representação Camada Limite Atmosférica adaptado de Gasch; Twele (2002)

Ao analisar a Figura 1 pode ser visto que em contato com o solo o vento não tem velocidade, e quanto mais próximo do solo maior a turbulência do escoamento, até chegar na camada de ventos geostróficos.

De acordo com Stull (1998) há duas maneiras de modelar o regime dos ventos na CLA, sendo eles o modelo logarítmico e exponencial.

O modelo exponencial é representado pela Equação 1:

$$V(z) = V(z_r) \left( \frac{z}{z_r} \right)^n \quad (1)$$

em que  $z$  é altura da velocidade a ser determinada [m],  $z_r$  é a altura de referência [m],  $V(z_r)$  é a velocidade do vento na altura de referência [m/s], e  $n$  é o coeficiente de extrapolação. Idealmente é necessário medir a velocidade do vento em duas alturas diferentes para determinar o valor de  $n$ .

O modelo logarítmico é descrito pela Equação 2:

$$V_h = \frac{V^*}{k} \ln \left( \frac{h}{z_0} \right) \quad (2)$$

em que  $h$  é a altura da velocidade a ser determinada,  $V^*$  é a velocidade de fricção [m/s],  $z_0$  é o comprimento de rugosidade [m] e  $k$  a constante de von Kármán, normalmente com o valor de 0,4 [adimensional]. O valor de  $z_0$  pode ser aproximados pela equação de Lettau (LETTAU, 1969) ou por bibliografias específicas

## 2.2 Potencial Eólico

A capacidade de produzir energia através do vento provém da conversão de energia cinética das massas de ar. A energia cinética é um fenômeno físico plenamente difundido e consolidado, assim como a potência que é uma grandeza física definida como a razão de energia produzida em um intervalo de tempo. Para um escoamento incompressível, a potência é representada pela Equação 3:

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (3)$$

em que  $P$  é a potência em [W],  $V$  é a velocidade do escoamento [m/s],  $\rho$  é a massa específica do fluido, neste caso o ar [kg/m<sup>3</sup>], e  $A$  área do escoamento [m<sup>2</sup>].

Ao dividir a Equação 3 pela área se chega a uma equação independente da área. Com esse nova equação se estabelece a densidade de potência (DP) de um local.

## 2.3 Potência extraída

Quando há transformação ou extração de energia sempre há perdas, seja na forma de calor, ruído ou outros fenômenos. Para relatar essa perda, a equação de potência é multiplicada pelo coeficiente de potência ( $C_p$ ), resultando na equação de potência extraída.

$$P_{ext} = C_p \cdot \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (4)$$

O máximo de potência que pode ser extraída dos ventos é de 59,3% . Esse valor é conhecido como Máximo de Betz.

## 2.4 Topografia

A topografia é de suma importância para a definição do potencial eólico de uma região, uma vez que a interação do vento com o relevo do terreno pode causar mudanças abruptas na velocidade dos ventos. Essas mudanças podem ser benéficas, uma vez que a velocidade pode

aumentar em alguns pontos, ou maléficas, já que podem causar regiões de grande turbulência e descolamento da camada limite ou até mesmo mudar o perfil da CLA, como mostra a Figura 2.



Figura 2 - Representação da influência da topografia no vento (CALDAS, 2010)

As áreas de maior velocidade, geralmente em cumes ou planaltos, podem ser até melhores para a instalação de aerogeradores (LEITE, 2005). A Figura 2 demonstra isso, há uma zona de aceleração nos pontos mais altos dos morros.

Uma maneira de saber se um terreno é complexo ou não é utilizar o índice RIX (*Ruggedness Index*). O índice RIX de um determinado lugar é definido como a extensão de um terreno circundante que é mais íngreme que uma inclinação crítica (MORTENSEN; TINDAL; LANDBERG, 2008). Usualmente a inclinação crítica é no valor de 0,3 [adimensional]. Valores de RIX próximos de 0% indicam um terreno plano, enquanto que valores de 30% indicam um terreno complexo (SLETSJØE, 2020).

## 2.5 Rugosidade

Como mostrado anteriormente, a rugosidade é um parâmetro crítico para extrapolar a velocidade do vento na altura de medição para a altura do cubo do aerogerador. Por sua vez, a geração de energia é proporcional ao cubo da velocidade dos ventos, como apresentado na Equação 4. Como na maioria das vezes a medição de velocidade na altura do rotor não é viável, é necessário recorrer à Equação 1 ou Equação 2 para extrapolar a velocidade. Com isso, pequenos erros na medição da rugosidade propagam grandes erros no resultado da energia produzida (MASTERS *et al.*, 2010). Para definir a rugosidade utiliza-se tabelas, como a Tabela 1. Existem vários tipos de tabelas na literatura que definem os valores de rugosidade para cada tipo de terreno. Para o trabalho será utilizado a tabela abaixo.

Tabela 1- Tabela de rugosidade (DTU, 2014)

Zo físico [m]	Características da superfície do terreno
>1	Floresta Alta
1,00	Cidade
0,80	Floresta
0,50	Suburbios
0,30	Cortina quebra-vento
0,20	Muitas árvores e/ou arbustos
0,10	Campo com aparência fechada
0,05	Campo com aparência aberta
0,03	Campo com poucas árvores ou prédios
0,02	Área de aeroporto com prédios e árvores
0,01	Área de pistas de aeroportos
0,008	Gramma cortada
0,005	Solo descoberto

## 2.6 Distribuição Estatística de Weibull

São imprescindíveis medições dos ventos no local de um parque eólico ao longo de pelo menos um ano, com registros a cada hora do dia, para uma estimativa satisfatória. Para obter previsões mais sólidas, é possível diminuir o intervalo entre cada medição para segundos e aumentar o período de medição para mais de um ano. Devido à natureza randômica da velocidade dos ventos, é fundamental possuir uma função de densidade de probabilidade. A distribuição de Weibull é a escolha predominante para as medições dos ventos. De acordo com Justus et al (1976), essa família de curvas se ajusta de forma adequada às medições de velocidade do vento. A fórmula da distribuição de Weibull é apresentada na Equação 5, e suas diversas formas são ilustradas na Figura 3.

$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k} \quad (5)$$

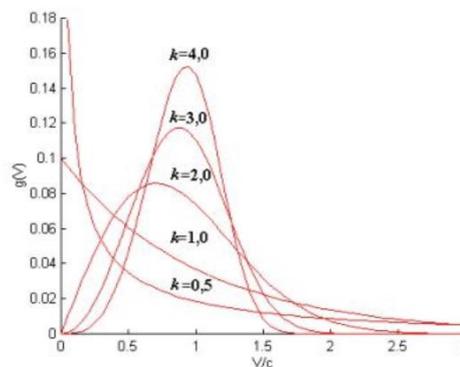


Figura 3 - Distribuição de Weibull para diferentes k (MOSS, 2001)

O fator  $k$  está diretamente ligado ao desvio padrão. O fator  $c$ , conhecido como fator de escala, está ligado à velocidade média. O fator  $k$  pode assumir qualquer valor, mas existem alguns valores especiais que definem distribuições estatísticas conhecidas. Quando  $k$  igual a 1 a distribuição é exponencial; caso  $k$  igual a 2 fica conhecido como distribuição de Rayleigh; caso  $k$  igual a 3,5 é uma distribuição normal.

## 2.7 WAsP

Segundo Mortensen et al. (1993) o WAsP, *Wind Atlas Analysis and Application Program*, é um programa de computador que extrapola verticalmente e horizontalmente os dados de vento e é capaz de calcular os efeitos de obstáculos, rugosidade e topografia no vento. O software já se mostrou capaz de dar previsões climatológicas de maneira precisa em lugares com montanhas pequenas e com pouca inclinação (BOWEN; MORTENSEN, 1996). A modelagem do WAsP lineariza as equações de movimento, diminuindo o custo computacional, porém, de acordo com Bowen *et al*, 1996, pode superestimar a velocidade dos ventos em locais complexos.

A linearização das equações é feita baseada na teoria de *Jackson-Hunt*. Essa teoria divide a camada limite do escoamento em duas partes: a região próxima ao solo, onde a viscosidade é relevante e a região afastada do solo, onde o escoamento é considerado invíscido (JACKSON; HUNT, 1975). Na camada próxima ao solo os termos de segunda ordem da equação de movimento são desconsiderado; é apenas considerado uma relação entre as tensões cisalhantes com o solo e o perfil de velocidades (JACKSON; HUNT, 1975).

O programa precisa de dados de velocidade dos ventos, com medições ao longo de no mínimo um ano, topografia e rugosidade da região de estudo. Então, o software é capaz de

calcular a distribuição de Weibull e rosa dos ventos em diferentes alturas. Além disso, é capaz de fazer análises de densidade de potência, complexidade de terreno e energia anual gerada.

## 2.8 Global Wind Atlas

O Global Wind Atlas é um software livre desenvolvido para ajudar engenheiros e investidores a identificar áreas com ventos para geração de energia em praticamente qualquer lugar do mundo, para realizar cálculos preliminares (GLOBAL WIND ATLAS INTRODUCTION, [s. d.]). O programa utiliza a técnica de resolução de escala, ou seja, transforma dados de vento de larga escala em dados de vento de microescala (GLOBAL WIND ATLAS METHODOLOGY, [s. d.]). Basicamente existem dois passos de redução de escala que feitos pelo *software*. O primeiro utiliza um modelo de mesoescala para capturar modelos de fluxos adicionais, geralmente na ordem de grandeza de quilômetros e dezenas de quilômetros. O segundo utiliza modelos de microescala, que calcula o efeito da orografia nos dados de vento. Os principais efeitos calculados nesse modelo são o aumento da velocidade devido à orografia e rugosidade, a mudança de direção devido à orografia e mudança no perfil vertical da velocidade devido à rugosidade (DAVIS, 2023). Os dados de larga escala são retirados do projeto ERA-5 uma base de dados *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*, com medições de 2008 a 2017.

## 3. METODOLOGIA

### 3.1 Seleção do Local

A primeira etapa do projeto é a definição do local. Como o trabalho possui o intuito de utilizar dados do Instituto de Meteorologia (INMET), é necessário escolher uma cidade que possui uma estação meteorológica perto. Além disso, é preciso escolher uma região que tenha um bom potencial eólico. Uma maneira de saber uma região de bom potencial eólico é utilizando os resultados do Atlas Eólico do Rio Grande do Sul, apresentado na Figura 4, que foi desenvolvido pelo Governo do Estado do Rio Grande do Sul para mapear áreas de potencial eólico a serem exploradas.

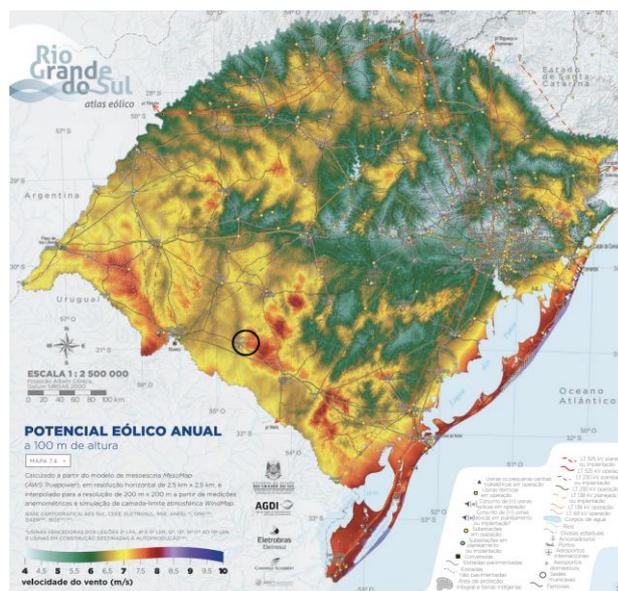


Figura 4 - Potencial eólico anual do Rio Grande do Sul para altura de 100 metros (CAMARGO SCHUBERT, 2014)

A Figura 4 mostra o Atlas Eólico do Rio Grande do Sul para a altura de 100 metros. Cores mais vermelhas significam melhor potencial eólico anual, e cores mais verdes menor potencial, como mostra a legenda. Ao analisar a localização das estações meteorológicas e as regiões com maior potencial eólico se chegou a conclusão que uma boa área de estudo é a região da cidade de Dom Pedrito. Na Figura 4 acima está circulada a região da cidade de Dom Pedrito, a localidade de estudo do trabalho.

Além dos pontos destacados a região apresenta outro ponto que corrobora para sua escolha, a infraestrutura. A Figura 5 mostra as redes de transmissões próximas à cidade.

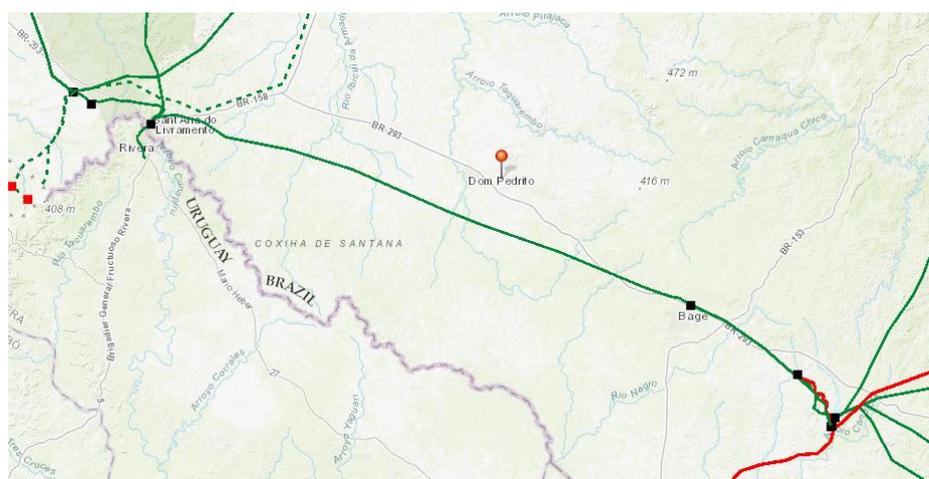


Figura 5 - Linhas de transmissão próximas a Dom Pedrito (EPE, 2016)

A cidade, marcada na figura acima, fica situada perto de uma região que já possui linhas de transmissão de energia elétrica. Linhas verdes apresentam linhas de transmissão de 230 kV, enquanto que linhas vermelhas indicam linhas de transmissão de 500 kV. As linhas pontilhadas são expansões que estão sendo realizadas. A área de estudo possui 2.305 m<sup>2</sup>. As coordenadas dos vértices da área de estudo e da estação meteorológica estão na Tabela 2.

Tabela 2 - Coordenadas dos vértices da área de estudo e da estação meteorológica.

	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>
Superior Esquerdo	30°44'06.70" S	55°06'50.46" O
Superior Direito	31°02'39.25" S	55°06'50.45" O
Inferior Direito	31°02'39.27" S	54°24'40.12" O
Inferior Esquerdo	30°44'06.47" S	54°24'40.13" O
Estação	31°00'08.99" S	54°37'04.96" O

## 3.2 Coleta de dados

### 3.2.1 Velocidade dos ventos

Após a definição do local foi coletado os dados da velocidade dos ventos na estação meteorológica de Dom Pedrito. O INMET mede a velocidade dos ventos de hora em hora. A estação está posicionada a 15 metros de altura. A fim de ter uma boa amostragem, para que os resultados sejam satisfatórios, os dados foram coletados do ano de 2017 a junho de 2023, excluindo o ano de 2021, que não possui dados catalogados.

### 3.2.2 Topografia

A topografia da região escolhida foi analisada utilizando os dados disponibilizados pela EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) e obtidos através de arquivos SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*). As cartas utilizadas foram SH-21-Z-B e SH-21-Z-D (EMBRAPA, 2006). As duas cartas foram unidas utilizando o *software* QGIS. Após unilas foram geradas as curvas de níveis da região com resolução de 10 metros. O valor mínimo das linhas são 110 metros e máximo 330 metros.

### 3.2.3 Rugosidade

O bioma predominante na região de estudo é o Pampa, que possui flora característica de gramíneas e arbustos baixos, além de apresentar um terreno pouco acidentado. Ademais, boa parte do da região possui área de plantio. Esses dois tipos de terreno possuem baixa rugosidade.

Os dados de rugosidade foram obtidos utilizando o *software* Google Earth Pro, juntamente com WASP Map Editor. O *software* Earth Pro possui imagens de satélite do mundo inteiro e nele é possível desenhar polígonos. Os polígonos foram desenhados ao redor de áreas com maior rugosidade em regiões com árvores e em torno da cidade de Dom Pedrito, como mostra a Figura 6. As outras regiões ou são áreas de plantio ou arbustos e gramíneas.

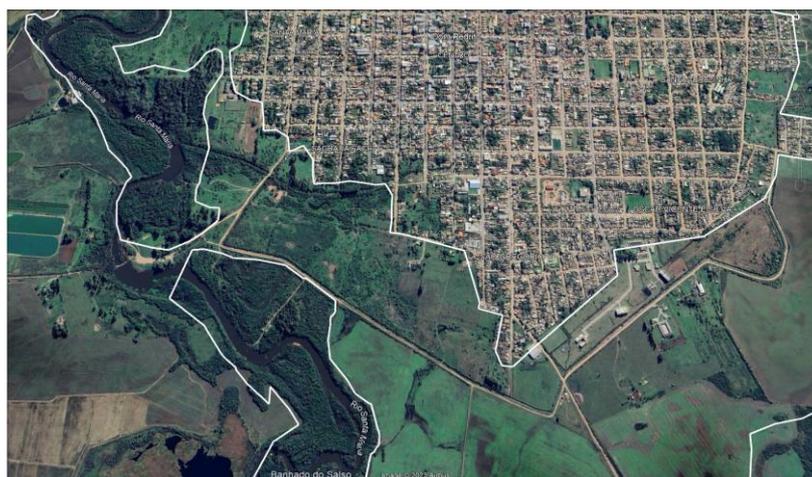


Figura 6 - Imagem do Google Earth PRO com os contornos de rugosidade

A figura acima mostra a demarcação das diferentes rugosidades do terreno utilizando o Earth PRO como base. Na imagem acima é possível ver que existem três terrenos distintos: a cidade, a região com bastante árvore e o campo. Para a rugosidade desses locais são utilizados as rugosidades da Tabela 1, sendo assim, os valores são: 1,0 m; 0,3 m e 0,03 m, respectivamente. Os polígonos desenhados no *Google Earth PRO* foram importados para o *software* WASP Map Editor e nele é possível definir a rugosidade interna e externa a cada contorno. Assim, foi possível definir a rugosidade do terreno.

## 3.3 Simulação

Coletado todos os dados é necessário fazer a modelagem utilizando o WASP.

### 3.3.1 Análise dos Ventos

O WASP se encarrega de calcular todas as variáveis necessárias em relação a velocidade dos ventos, como rosa dos ventos e distribuição de Weibull. Antes de realizar os cálculos o

software faz uma análise estatística dos dados, como o índice *Recovery percentage*, que é a divisão da quantidade de medições válidas esperadas e quantas foram encontradas para um determinado período. Para obter um melhor resultado é necessário que esse índice seja o mais próximo de 100%. Além disso, é preciso ter medições de um período de no mínimo um ano. Então, dos dados coletados entre 2017 e junho de 2023 se utilizou apenas os dados entre primeiro de janeiro de 2017 e 17 de dezembro de 2020, resultando em 25.354 medições com um *recovery percentage* de 96,47%. A Figura 7 apresenta os resultados dos cálculos com a os dados coletados na estação do INMET para esse período.

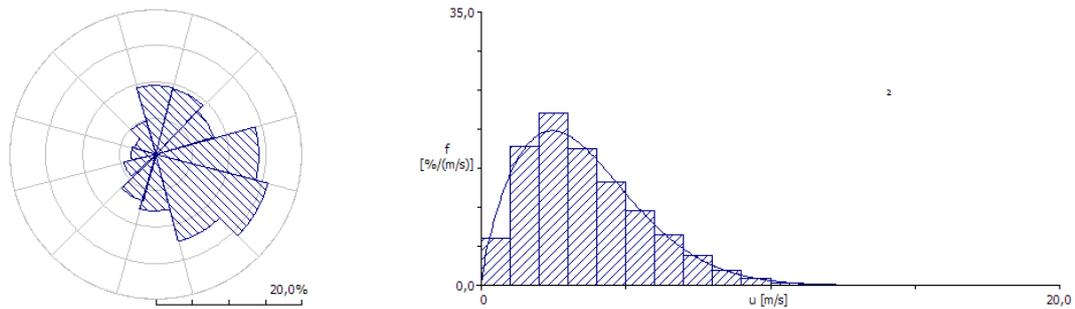


Figura 7 - Resultados dos dados coletados da estação do INMET

A Figura 7 mostra a rosa dos ventos e a distribuição de Weibull para os dados coletados. A velocidade média dos dados coletados é de 3,6 m/s. A velocidade dos ventos, no primeiro momento, é baixa, e não seria adequada para geração de energia elétrica. Porém, esse valor será extrapolado para alturas maiores no momento do cálculo da densidade de potência, resultando em velocidades maiores.

### 3.3.2 Análise do terreno

Com os dados de rugosidade e topografia basta adicionar os dois arquivos juntos utilizando o WAsP Map Editor, para que ambas as informações possam ser levadas para a simulação, uma vez que o software só aceita um arquivo de terreno por modelagem.

### 3.3.3 Resource Grid

Após todas essas etapas é possível calcular o *resource grid*. O *resource grid* resulta no mapa da região escolhida com diversas informações, dentre elas os valores de delta-RIX, RIX, velocidade dos ventos e densidade de potência. O programa calcula todas as informações para o terreno determinado e mostra os resultados distribuídos ao longo do mapa.

## 4. RESULTADOS

O WasP é capaz de calcular os resultados por setores. Cada setor representa uma posição da rosa dos ventos. No presente trabalho a rosa dos ventos foi dividida em doze setores. Além disso, o software é capaz de mostrar resultados para todos os setores agrupados. Os resultados obtidos para as características do terreno, velocidade dos ventos e densidade de potência serão discutidos nas seções subsequentes. Neles serão comentados os pontos mais importantes. Todos os resultados detalhados estão no Apêndice A.

### 4.1 Terreno

A Tabela 3 representa resultados de delta-RIX em relação ao terreno estudado para cada setor.

Tabela 3 - Resultados de delta-RIX

Setor [°]	Média	Mínimo	Máximo
Todos	1.70%	-0.60%	34.30%
0	-0.60%	-2.80%	52.20%
30	0.50%	-1.80%	50.20%
60	1.60%	-0.80%	49.50%
90	2.40%	0.00%	47.90%
120	2.30%	0.00%	48.70%
150	2.20%	0.00%	48.80%
180	2.20%	0.00%	54.00%
210	2.10%	0.00%	55.00%
240	2.10%	0.00%	52.70%
270	2.20%	0.00%	49.70%
300	0.90%	-1.20%	46.00%
330	2.10%	0.00%	49.40%

Percebe-se que o valor médio de delta-RIX é baixo, o que resulta em terreno suave. Porém, o valor máximo é alto, o que representa um terreno complexo naquele ponto. O valor desta variável ser baixo é muito importante, uma vez que o programa não lida bem com terrenos complexos. Entretanto, as regiões com valores de delta-RIX maiores que 30% ter seus resultados superestimados devido as limitações do programa.

#### 4.2 Velocidade dos ventos

O *software* calcula os valores de velocidade dos ventos para diferentes alturas e diferentes valores de rugosidade. Ele também calcula diferentes rosas dos ventos para cada altura. A Figura 8 mostra o valor de velocidade para diferentes alturas e em diferentes rugosidades na coordenada de medição.

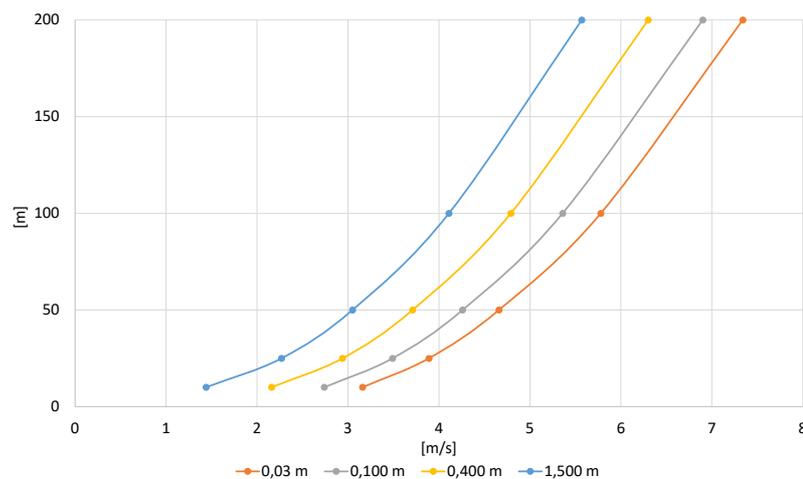


Figura 8 - Velocidade do vento para diferentes alturas e rugosidades.

Os resultados demonstram que quanto menor a rugosidade e maior a altura, maior é a velocidade do vento. O software considera como se o ponto pudesse ter qualquer valor de rugosidade para gerar a figura acima, não levando em consideração o valor passado como

parâmetro de rugosidade. Outro ponto importante é a rosa dos ventos e a distribuição de Weibull calculada para a localidade. A Figura 9 mostra a rosa dos ventos e a distribuição de Weibull para a localidade na altura de 200 metros no ponto da estação meteorológica.

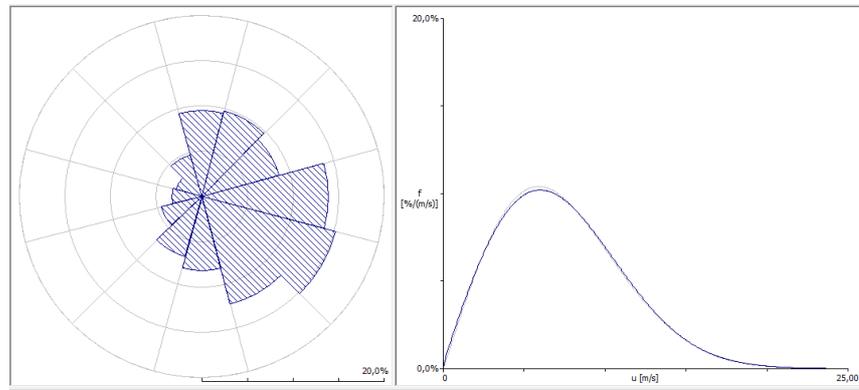


Figura 9 - Distribuição de Weibull calculada para altura de 200 metros.

A predominância da direção do vento está na direção de 120° e 90°, que representa quase 30% de todo vento medido. Então, os ventos provenientes dessas direções gerariam a energia elétrica durante 30% do tempo caso um parque eólico fosse instalado na localidade. A velocidade média para altura é 7,34 m/s. Percebe-se que houve um grande aumento na velocidade média quando comparados com os valores médios de medição.

### 4.3 Densidade de Potência

Os resultados das três simulações para todos os setores estão demonstrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultado de densidade de potência para altura de 100, 150 e 200 metros para todos os setores

Altura [m]	Média [W/m <sup>2</sup> ]	Mínimo [W/m <sup>2</sup> ]	Máximo [W/m <sup>2</sup> ]
100	200	82	441
150	320	180	524
200	430	288	622

É possível perceber que a altura de 100 metros não possui grande densidade de potência ao longo do terreno, apresentando o valor de 200 W/m<sup>2</sup>. Há uma significativa melhora para a altura de 150 metros com o aumento na média para 320 W/m<sup>2</sup>. O melhor resultado é obtido na altura de 200 metros, como esperado, com média de 430 W/m<sup>2</sup>. Para averiguar os resultados obtidos eles são comparados com a densidade de potência retirados do *Global Wind Atlas*. A Tabela 5, a seguir, demonstra os resultados.

Tabela 5 - Resultados de densidade de potência retirados do *Global Wind Atlas*

Altura [m]	Média [W/m <sup>2</sup> ]
100	398
150	620
200	861

Percebe-se que a diferença dos resultados médios de densidade de potência entre a simulação e o *Global Wind Atlas* gira em torno de 50% para todas as alturas. Os resultados

simulados foram menores que os resultados retirados do *software*. Essa diferença pode ocorrer devido as diferentes formas de medição dos ventos. Para o trabalho a medição foi realizada no local a altura de 15 metros, para o *software* foram utilizados dados de medições de larga escala. As diferenças nos métodos de medição podem levar a essa discrepância entre os resultados. Como dito anteriormente, o *Global Wind Atlas* realiza duas reduções de escala em seus dados, essas reduções podem gerar essa diferença entre os dois métodos. Outro ponto é a diferença entre altura de medição e altura de simulação no presente trabalho. A diferença de altura faz com que o WasP tenha que extrapolar os dados verticalmente. Ao extrapolar os dados o *software* pode inserir desvios nos resultados, especialmente em grandes diferenças de altura. É difícil saber qual o resultado está mais correto. Estudos mais aprofundados devem ser realizados para analisar a qualidade dos dados do *Global Wind Atlas*.

Como a área do terreno é muito grande utilizar a média pode resultar em uma percepção errada e gerar resultados discrepantes. Por isso, é interessante analisar o resultado ao longo de toda área para encontrar regiões de interesse, com pontos de maior densidade de potência. Segundo Grubb e Meyer (1993) para que o potencial eólico seja aproveitável é necessário densidade maior de  $500 \text{ W/m}^2$ . Os resultados da Tabela 4 mostram que apenas as alturas de 150 e 200 metros possuem regiões com valores mais altos que o de referência. A Figura 10 e Figura 11 mostram os resultados de densidade de potência calculada ao longo do terreno para as alturas de 150 e 200 metros, respectivamente. A análise da região a 100 metros é omitida pois não há nenhum ponto em que a densidade de potência seja maior que  $500 \text{ W/m}^2$ . A Figura 12 demonstra os resultados de densidade de potência ao longo do terreno retirados do *Global Wind Atlas*

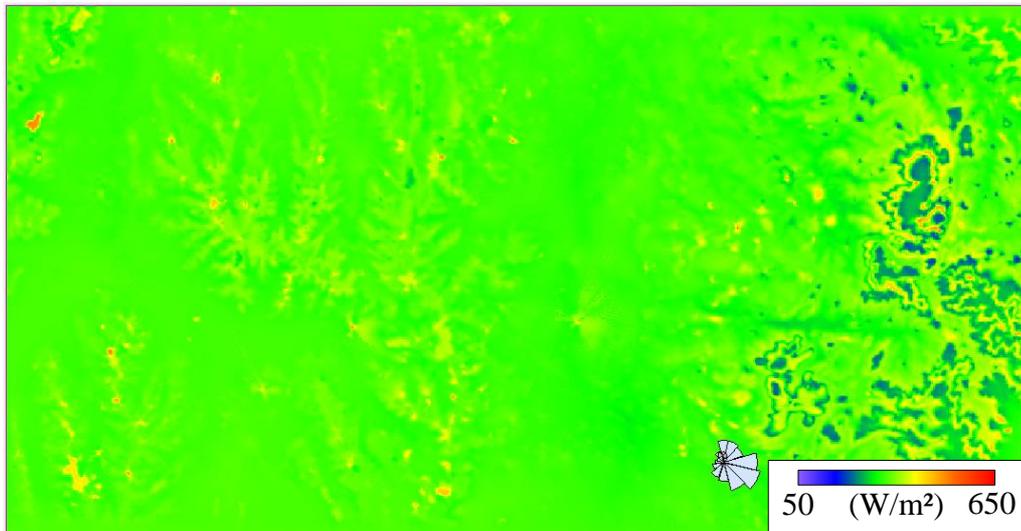


Figura 10 - Densidade de potência para altura de 150 metros. Valores entre  $50 \text{ W/m}^2$  e  $650 \text{ W/m}^2$ .

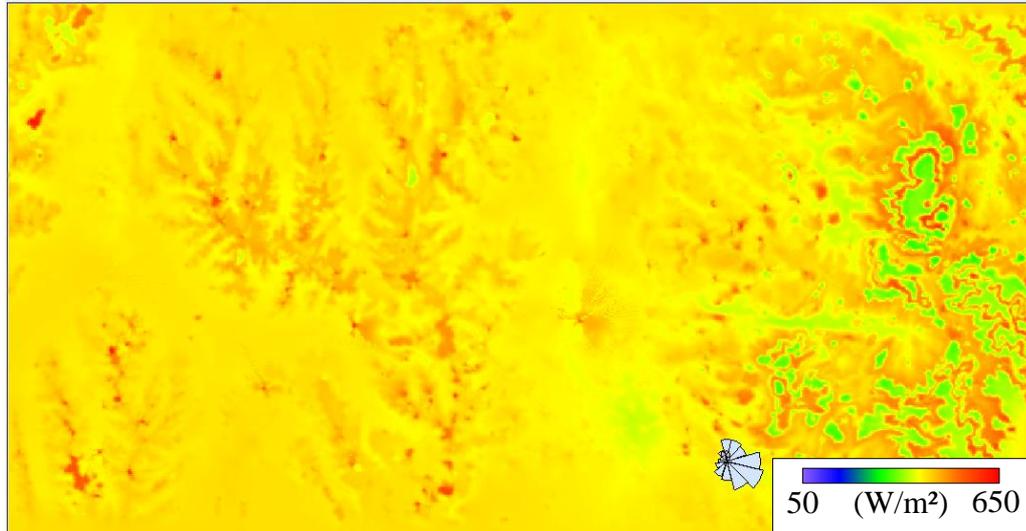


Figura 11 - Densidade de potência para altura de 200 metros. Valores entre 50 W/m<sup>2</sup> e 650 W/m<sup>2</sup>.

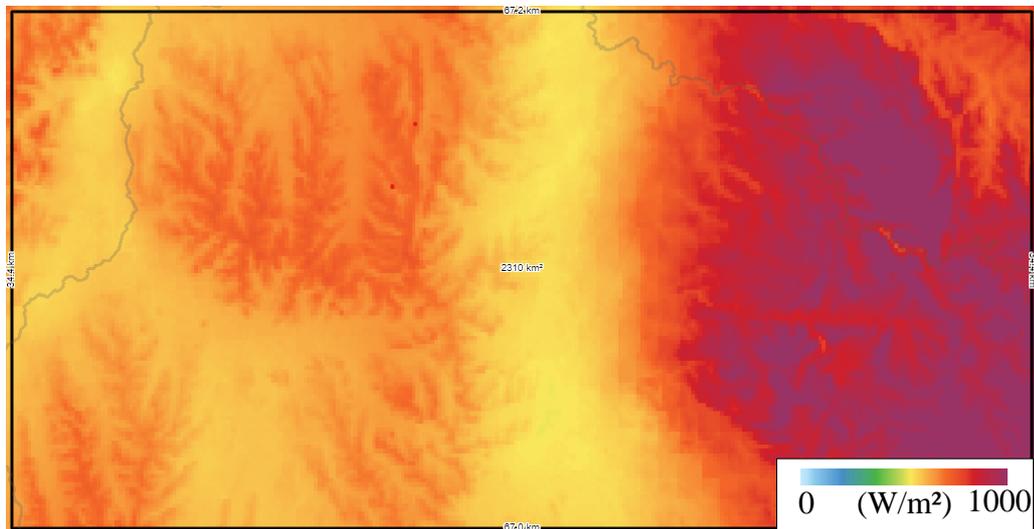


Figura 12 - Densidade de potência para altura de 200 metros obtida do *Global Wind Atlas*

Para altura de 150 metros e 200 metros há alguns pontos de interesse espalhados ao longo do terreno, em que a densidade de potência chega ao valor máximo de 650 W/m<sup>2</sup>. Essas regiões estão representadas na Figura 13 e podem ser utilizadas para produzir energia elétrica, uma vez que possuem valores acima do de referência. Na Figura 11, pontos escuros representam densidade de potência acima de 1000 W/m<sup>2</sup>, cores mais claras valores de 600 W/m<sup>2</sup>, ou seja, esse é o valor mínimo para a região. É possível perceber, novamente, a diferença entre os resultados de densidade de potência, que podem ser explicados pelo motivos citados anteriormente. Quando comparamos a Figura 11 e a Figura 12 nota-se que há uma certa semelhança espacial na distribuição de densidade de potência entre a simulação e o dados retirados do *Global Wind Atlas*. Percebe-se que as regiões apresentadas na Figura 13 também existem nos dados obtidos, apesar na diferença entre os valores obtidos. Isso demonstra que a simulação foi adequadamente realizada, em que um possível motivo para a diferença de valores encontrados pode ser devido aos métodos de medição das velocidades do vento.

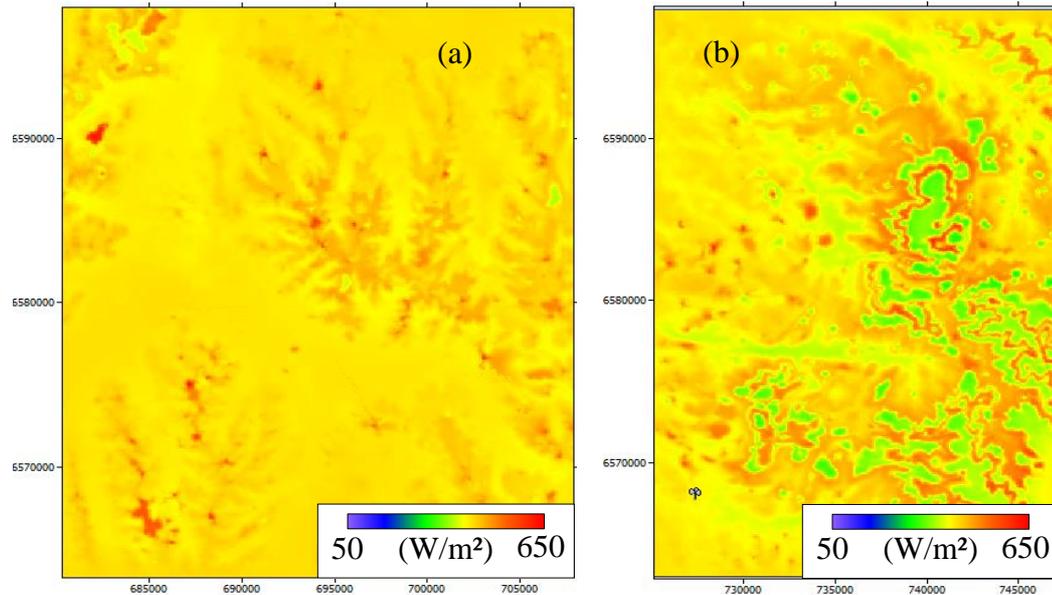


Figura 13 - Áreas de interesse (a) e (b) para altura de 200 metros.

Na região (a) existem pontos em que há grande potencial eólico distribuídos separadamente e também há, de maneira geral, boa distribuição de potencial. Essa região é promissora para instalação de aerogeradores. Seus resultados são promissores, porque além de apresentar esses valores a região é caracterizada por um terreno pouco complexo e o programa lida melhor com esse tipo de terreno. Na região (b) existe bastante variação na densidade de potência. Porém, há pontos de alta densidade que podem ser explorados para a produção de energia. Quando comparamos com a região (a), a região (b) apresenta mais pontos com valores elevados de densidade de potência. Entretanto, a região é caracterizada por um terreno muito complexo, o que pode produzir resultados superestimados devido às limitações do software.

## 5. CONCLUSÕES

Saber o potencial eólico de uma região é de extrema importância para que seja possível mapear e estudar novas possibilidades de implementação de parques eólicos. Utilizar dados de medições *in loco* é sempre a melhor saída quando comparado a utilizar dados de simulações em grande escala. Com isso em mente, o estudo é realizado utilizando a base de dados das estações meteorológicas automáticas do INMET. Essas estações coletam diversos dados meteorológicos de hora em hora, incluindo velocidade e direção dos ventos.

A região de Dom Pedrito parece ser muito promissora por vários aspectos. A cidade está localizada entre Santana do Livramento e Bagé, cidades que são interconectadas por linhas de transmissão de energia, ou seja, a região já está situada próxima de linhas de transmissão de energia, o que diminuiria os custos de instalação de um parque eólico. A região em que está situada a cidade possui uma flora caracterizada por gramíneas, arbustos baixos e pouca mata densa, que ajuda a aumentar a velocidade dos ventos, pois diminui a rugosidade do terreno. O terreno da região não é complexo, ou seja, não há terreno com inclinação acentuada e apresenta poucos picos e vales.

O estudo demonstra que na localidade estudada, que fica em torno da cidade de Dom Pedrito, tem uma boa densidade de potência a partir dos 150 metros. A 100 metros os resultados se demonstraram insuficientes, com pouca densidade de potência ao longo do terreno, resultando em uma densidade média de 200 W/m<sup>2</sup> e o máximo atingido foi 441 W/m<sup>2</sup>. Essa região não aparenta apresentar vantagens para a produção de energia eólica, uma vez que os valores não ultrapassam 500 W/m<sup>2</sup>. Para a altura de 150 metros e 200 metros o resultado médio ao longo

do terreno foi de 320 W/m<sup>2</sup> e 400 W/m<sup>2</sup>, respectivamente. A região de altura com 150 começa a ter alguns pontos de interesse que possuem valores maiores que 500 W/m<sup>2</sup>, apesar de não serem muitos. A partir de 200 metros há uma melhora significativa, praticamente todo o terreno tem densidade de potência maior que o valor de referência, porém há alguns pontos que o valor atinge o máximo.

Quando comparamos os resultados com os obtidos no *Global Wind Atlas*, quantitativamente os resultados foram muito diferentes. Os resultados obtidos na simulação foram 50% menores que os retirados do *software*. Esse valores são diferentes devido a diferença no método de medição dos ventos. A simulação utilizou dados de medição feitos no local, enquanto o programa utiliza dados de larga escala medidos por satélites. Qualitativamente a distribuição de densidade de potência ao longo do terreno se mostrou parecida, demonstrando que a simulação está correta. É possível perceber que tanto nos dois mapas há a presença das sub-regiões com mais densidade de potência.

Essas duas regiões se mostraram interessantes, pois nelas há pontos em que a densidade de potência atinge resultados maiores que 500 W/m<sup>2</sup> na altura de 150 e 200 metros. As sub-regiões apresentadas na Figura 13 apresentam potencial maior que o mínimo necessário com pontos que atingem 524 W/m<sup>2</sup> a 150 metros e 622 W/m<sup>2</sup> a 200 metros. Porém, a região (a) possui resultados mais satisfatórios devido ao fato de possuir um terreno menos complexo. Já a região possui mais pontos de interesse, com valores acima de 500 W/m<sup>2</sup>, entretanto seu terreno é mais complexo e pode ter seus resultados superestimados devido à limitação do programa.

### 5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Estudos mais profundos precisam ser realizados para verificar os resultados, como por exemplo, utilizar softwares que consigam lidar com terrenos complexos, especialmente para simular a região (b) apresentada na Figura 13, que apresentou resultados relevantes, mas possui um terreno bastante acidentado que podem levar a resultados superestimados. Para trabalhos futuros também seria interessante utilizar dados de torres de medição na as alturas de 100, 150 e 200 metros para obter resultados melhores e comparar com os resultados obtidos *Global Wind Atlas*. Uma vez que a diferença entre a altura de medição e a altura dos cálculos gera desvios no resultado calculado. Outro ponto interessante é selecionar e posicionar turbinas eólicas ao longo do terreno para calcular a energia gerada ao longo do ano com intuito ter maior previsibilidade de um parque eólico na região.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANEEL. **Brasil supera em 2022 os 8 GW de expansão na capacidade instalada**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2023/brasil-supera-em-2022-os-8-gw-de-expansao-na-capacidade-instalada>. Acesso em: 21 jul. 2023.
- ARCHER, Cristina L; JACOBSON, Mark Z. Evaluation of global wind power. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, [s. l.], v. 110, n. D12, 2005. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2004JD005462>.
- BOWEN, Anthony, J; MORTENSEN, Niels, G. EXPLORING THE LIMITS OF WAsP THE WIND ATLAS ANALYSIS AND APPLICATION PROGRAM. *Em:* , 1996. **European Union wind energy conference. Proceedings**. [S. l.: s. n.], 1996. p. 584–587.
- CABRAL, Isabela. **ESTIMATIVA DA ALTURA DA CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA COM USO DE REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS**. 2015. - Universidade Federal do Paraná , Curitiba, 2015.

CALDAS, Danilo. **Estudo do Potencial Eólico e Estimativa de Geração de Energia de um Projeto Eólico na cidade do Rio de Janeiro utilizando o WindPro e o WAsP.** [S. l.: s. n.], 2010.

CAMARGO SCHUBERT, E. A. **Atlas Eólico do Rio Grande do Sul.** [S. l.: s. n.], 2014.

Campos, R. C. **AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO POTENCIAL EÓLICO EM UM TERRENOCOMPLEXO POR CFD E WASP.** 2016. 23 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

Cunha, Cecilia & Romero de Moraes, Marcelo & Gameiro Lopes, Antonio. (2012). **Simulações numéricas do campo de vento em terreno complexo com os modelos WRF e WindStation: Resultados Preliminares.**

Davis, N. N., 2023: **The Global Wind Atlas: A High-Resolution Dataset of Climatologies and Associated Web-Based Application.** Bull. Amer. Meteor. Soc., 104, E1507–E1525, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0075.1>.

Dutra, J. C. D. N., Boff, V. Antônio, Silveira, J. S. T. da, & Ávila, L. V. (2013). **Uma Análise do Panorama das Regiões Missões e Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul sob o Prisma da Energia Eólica e Solar Fotovoltaica como Fontes Alternativas de Energia.** Revista Paranaense De Desenvolvimento - RPD, 34(124), 225–243. Recuperado de <https://ipardes.emnuvens.com.br/revistaparanaense/article/view/547>

DRIEMEIER, Luis Henrique. **Estudo sobre o impacto do avanço tecnológico no potencial eólico do rio grande do sul.** 2016. Porto Alegre, 2016.

DTU. **WAsP 11 Help Facility And On-line Documentation.** [S. l.: s. n.], 2014.

EMBRAPA. **Brasil em relevo.** [S. l.], 2006. Disponível em: <https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/relevobr/index.htm>. Acesso em: 28 jun. 2023.

EPE. **Matriz Energética e Elétrica.** [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2023/brasil-supera-em-2022-os-8-gw-de-expansao-na-capacidade-instalada>. Acesso em: 21 jul. 2023.

EPE. **Webmap EPE.** [S. l.], 2016. Disponível em: <https://gisepeprd2.epe.gov.br/WebMapEPE/>. Acesso em: 19 ago. 2023.

FILGUEIRAS, Alexandre; SILVA, Thelma Maria V.e. Wind energy in Brazil—present and future. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 7, n. 5, p. 439–451, 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032103000686>.

GASCH, Robert; TWELE, Jochen. **Wind Power Plants.** [S. l.]: Springer, 2002.

GLOBAL WIND ATLAS INTRODUCTION. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://globalwindatlas.info/en/about/introduction>. Acesso em: 10 ago. 2023.

GLOBAL WIND ATLAS METHODOLOGY. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://globalwindatlas.info/en/about/method>. Acesso em: 10 ago. 2023.

GRUBB, M J; MEYER, N I. Wind energy: Resources, systems, and regional strategies. [s. l.], 1993.

HIRATA, Miguel; ARAUJO, Maria Regina O.P. de. **Introdução ao Aproveitamento de Energia Eolica.** 2000. - UFRJ, Rio de Janeiro, 2000.

JACKSON, P.S; HUNT, J. C.R. **Turbulent Wind Flow over a Low Hill.** Quart J. R. Met. Soc. pp 929-955. 1975;

JUSTUS, C G; HARGRAVES, W R; YALCIN, Ali. Nationwide Assessment of Potential Output from Wind-Powered Generators. **Journal of Applied Meteorology (1962-1982)**, [s. l.], v. 15, n. 7, p. 673–678, 1976. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/26177565>.

LEITE, Jussara. **UM ESTUDO SOBRE A VIABILIDADE DO APROVEITAMENTO DA ENERGIA EÓLICA EM TRÊS LOCALIDADES, NO RS.** 2005. Porto Alegre, 2005.

LETTAU, H. Note on Aerodynamic Roughness-Parameter Estimation on the Basis of Roughness-Element Description. **Journal of Applied Meteorology (1962-1982)**, [s. l.], v. 8, n. 5, p. 828–832, 1969. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/26174682>.

MASTERS, Forrest J. *et al.* Toward objective, standardized intensity estimates from surface wind speed observations. **Bulletin of the American Meteorological Society**, [s. l.], v. 91, n. 12, p. 1665–1681, 2010.

MME. **2030 Plano Decenal de Expansão de Energia.** Ministério de Minas e Energia, 2019. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-490/PDE%202030\\_RevisaoPosCP\\_rv2.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-490/PDE%202030_RevisaoPosCP_rv2.pdf). Acessado em: 01/07/2023

MORTENSEN, N G *et al.* Wind atlas analysis and application program (WAsP). [s. l.], 1993.

MORTENSEN, N G; TINDAL, A ;; LANDBERG, L. **General rights Field validation of the ΔRIX performance indicator for flow in complex terrain.** 2008. [s. l.], 2008.

MOSS, H. **Panorama das Fontes Renováveis no Brasil.** In: CONGRESSO BRASIL – ALEMANHA, 1., 2001, Fortaleza. Anais... Fortaleza: [s.n.], 2001.

RENNKAMP BRITTA AND PERROT, Radhika. Drivers and Barriers to Wind Energy Technology Transitions in India, Brazil and South Africa. *Em:* BRAUCH HANS GÜNTHER AND OSWALD SPRING, Úrsula and Grin John and Scheffran Jürgen (org.). **Handbook on Sustainability Transition and Sustainable Peace** . Cham: Springer International Publishing, 2016. p. 775–791. *E-book*. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-43884-9\\_36](https://doi.org/10.1007/978-3-319-43884-9_36).

ROBERT W. FOX *et al.* **Introdução à mecânica dos fluidos.** 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

SLETSJØE, Haakon Jahr. **Complex terrain: from ruggedness index (RIX), towards physical parameterization.** 2020. - DTU, Dinamarca, 2020.

STULL, R. B. An Introduction to Boundary Layer Meteorology. [s. l.], 1998.

TUCHTENHAGEN, Patrícia Nunes. **Variabilidade do vento e potencial para energia eólica offshore no litoral Sul do Brasil.** 2019. 115f. Tese (Doutorado em Ciências Climáticas) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

## APÊNDICE A

Aqui estão listados todos os resultados obtidos na simulação de forma mais detalhada.

Tabela A.1 – Resultados para 200 metros

Setor [°]	Variável	Média	Min	Max
Todos	Densidade do ar	1,158 kg/m <sup>3</sup>	1,140 kg/m <sup>3</sup>	1,164 kg/m <sup>3</sup>
Todos	Delta-RIX	1,70%	-0,60%	34,30%
0	Delta-RIX	-0,60%	-2,80%	52,20%
30	Delta-RIX	0,50%	-1,80%	50,20%
60	Delta-RIX	1,60%	-0,80%	49,50%
90	Delta-RIX	2,40%	0,00%	47,90%
120	Delta-RIX	2,30%	0,00%	48,70%
150	Delta-RIX	2,20%	0,00%	48,80%
180	Delta-RIX	2,20%	0,00%	54,00%
210	Delta-RIX	2,10%	0,00%	55,00%
240	Delta-RIX	2,10%	0,00%	52,70%
270	Delta-RIX	2,20%	0,00%	49,70%
300	Delta-RIX	0,90%	-1,20%	46,00%
330	Delta-RIX	2,10%	0,00%	49,40%
Todos	Elevação	158,4 m	110,0 m	330,0 m
Todos	Velocidade Média	7,31 m/s	6,36 m/s	8,31 m/s
0	Velocidade Média	8,16 m/s	6,51 m/s	9,69 m/s
30	Velocidade Média	8,78 m/s	7,10 m/s	10,66 m/s
60	Velocidade Média	8,36 m/s	6,69 m/s	9,97 m/s
90	Velocidade Média	7,83 m/s	6,40 m/s	9,31 m/s
120	Velocidade Média	6,91 m/s	5,53 m/s	8,59 m/s
150	Velocidade Média	7,20 m/s	5,76 m/s	8,64 m/s
180	Velocidade Média	7,31 m/s	5,84 m/s	8,57 m/s
210	Velocidade Média	7,24 m/s	5,82 m/s	8,69 m/s
240	Velocidade Média	5,78 m/s	4,54 m/s	7,11 m/s
270	Velocidade Média	5,43 m/s	4,42 m/s	6,44 m/s
300	Velocidade Média	4,37 m/s	3,47 m/s	5,61 m/s
330	Velocidade Média	5,39 m/s	4,32 m/s	7,23 m/s
Todos	Densidade de Potência	430 W/m <sup>2</sup>	288 W/m <sup>2</sup>	622 W/m <sup>2</sup>
0	Densidade de Potência	490 W/m <sup>2</sup>	249 W/m <sup>2</sup>	813 W/m <sup>2</sup>
30	Densidade de Potência	592 W/m <sup>2</sup>	313 W/m <sup>2</sup>	1059 W/m <sup>2</sup>
60	Densidade de Potência	575 W/m <sup>2</sup>	295 W/m <sup>2</sup>	948 W/m <sup>2</sup>
90	Densidade de Potência	480 W/m <sup>2</sup>	261 W/m <sup>2</sup>	794 W/m <sup>2</sup>
120	Densidade de Potência	383 W/m <sup>2</sup>	198 W/m <sup>2</sup>	708 W/m <sup>2</sup>
150	Densidade de Potência	386 W/m <sup>2</sup>	198 W/m <sup>2</sup>	668 W/m <sup>2</sup>
180	Densidade de Potência	454 W/m <sup>2</sup>	232 W/m <sup>2</sup>	724 W/m <sup>2</sup>
210	Densidade de Potência	482 W/m <sup>2</sup>	251 W/m <sup>2</sup>	828 W/m <sup>2</sup>
240	Densidade de Potência	327 W/m <sup>2</sup>	156 W/m <sup>2</sup>	563 W/m <sup>2</sup>

270	Densidade de Potência	199 W/m <sup>2</sup>	107 W/m <sup>2</sup>	346 W/m <sup>2</sup>
300	Densidade de Potência	109 W/m <sup>2</sup>	55 W/m <sup>2</sup>	220 W/m <sup>2</sup>
330	Densidade de Potência	159 W/m <sup>2</sup>	82 W/m <sup>2</sup>	376 W/m <sup>2</sup>
0	Frequência do setor	9,40%	7,60%	11,40%
30	Frequência do setor	9,80%	7,80%	12,20%
60	Frequência do setor	8,80%	6,90%	11,70%
90	Frequência do setor	13,80%	11,20%	16,90%
120	Frequência do setor	15,10%	12,00%	18,50%
150	Frequência do setor	12,30%	9,80%	15,60%
180	Frequência do setor	8,20%	6,50%	10,70%
210	Frequência do setor	6,90%	5,50%	8,70%
240	Frequência do setor	4,60%	3,60%	6,00%
270	Frequência do setor	3,30%	2,70%	4,40%
300	Frequência do setor	3,00%	2,30%	4,00%
330	Frequência do setor	4,80%	3,80%	7,10%
Todos	Rugosidade	0,044 m	0,030 m	1,000 m

Tabela A.2 - Resultado para 150 metros

Setor [°]	Variável	Média	Min	Max
Todos	Densidade do ar	1,165 kg/m <sup>3</sup>	1,145 kg/m <sup>3</sup>	1,170 kg/m <sup>3</sup>
Todos	Delta-RIX	1,70%	-0,60%	34,30%
0	Delta-RIX	-0,60%	-2,80%	52,20%
30	Delta-RIX	0,50%	-1,80%	50,20%
60	Delta-RIX	1,60%	-0,80%	49,50%
90	Delta-RIX	2,40%	0,00%	47,90%
120	Delta-RIX	2,30%	0,00%	48,70%
150	Delta-RIX	2,20%	0,00%	48,80%
180	Delta-RIX	2,20%	0,00%	54,00%
210	Delta-RIX	2,10%	0,00%	55,00%
240	Delta-RIX	2,10%	0,00%	52,70%
270	Delta-RIX	2,20%	0,00%	49,70%
300	Delta-RIX	0,90%	-1,20%	46,00%
330	Delta-RIX	2,10%	0,00%	49,40%
Todos	Elevação	158,4 m	110,0 m	330,0 m
Todos	Velocidade Média	6,66 m/s	5,46 m/s	7,91 m/s
0	Velocidade Média	7,41 m/s	5,36 m/s	9,50 m/s
30	Velocidade Média	7,97 m/s	5,77 m/s	10,35 m/s
60	Velocidade Média	7,57 m/s	5,55 m/s	9,53 m/s
90	Velocidade Média	7,02 m/s	5,09 m/s	8,81 m/s
120	Velocidade Média	6,27 m/s	4,49 m/s	8,43 m/s
150	Velocidade Média	6,62 m/s	4,83 m/s	8,58 m/s
180	Velocidade Média	6,75 m/s	4,89 m/s	8,52 m/s

210	Velocidade Média	6,72 m/s	4,82 m/s	8,64 m/s
240	Velocidade Média	5,37 m/s	3,86 m/s	7,02 m/s
270	Velocidade Média	4,98 m/s	3,59 m/s	6,23 m/s
300	Velocidade Média	4,03 m/s	2,91 m/s	5,61 m/s
330	Velocidade Média	4,92 m/s	3,57 m/s	7,19 m/s
Todos	Densidade de Potência	320 W/m <sup>2</sup>	180 W/m <sup>2</sup>	524 W/m <sup>2</sup>
0	Densidade de Potência	363 W/m <sup>2</sup>	137 W/m <sup>2</sup>	760 W/m <sup>2</sup>
30	Densidade de Potência	443 W/m <sup>2</sup>	168 W/m <sup>2</sup>	969 W/m <sup>2</sup>
60	Densidade de Potência	425 W/m <sup>2</sup>	167 W/m <sup>2</sup>	822 W/m <sup>2</sup>
90	Densidade de Potência	344 W/m <sup>2</sup>	131 W/m <sup>2</sup>	682 W/m <sup>2</sup>
120	Densidade de Potência	284 W/m <sup>2</sup>	104 W/m <sup>2</sup>	659 W/m <sup>2</sup>
150	Densidade de Potência	295 W/m <sup>2</sup>	114 W/m <sup>2</sup>	645 W/m <sup>2</sup>
180	Densidade de Potência	347 W/m <sup>2</sup>	132 W/m <sup>2</sup>	687 W/m <sup>2</sup>
210	Densidade de Potência	372 W/m <sup>2</sup>	136 W/m <sup>2</sup>	783 W/m <sup>2</sup>
240	Densidade de Potência	244 W/m <sup>2</sup>	89 W/m <sup>2</sup>	500 W/m <sup>2</sup>
270	Densidade de Potência	148 W/m <sup>2</sup>	55 W/m <sup>2</sup>	304 W/m <sup>2</sup>
300	Densidade de Potência	81 W/m <sup>2</sup>	30 W/m <sup>2</sup>	208 W/m <sup>2</sup>
330	Densidade de Potência	118 W/m <sup>2</sup>	45 W/m <sup>2</sup>	359 W/m <sup>2</sup>
0	Frequência do setor	9,40%	7,00%	12,00%
30	Frequência do setor	9,80%	7,20%	13,40%
60	Frequência do setor	8,80%	6,20%	13,30%
90	Frequência do setor	13,80%	10,10%	18,40%
120	Frequência do setor	15,10%	10,80%	19,80%
150	Frequência do setor	12,30%	9,00%	16,80%
180	Frequência do setor	8,20%	6,10%	12,20%
210	Frequência do setor	6,90%	5,10%	9,60%
240	Frequência do setor	4,60%	3,30%	6,50%
270	Frequência do setor	3,30%	2,40%	4,80%
300	Frequência do setor	3,00%	2,10%	4,40%
330	Frequência do setor	4,80%	3,50%	8,00%
Todos	Rugosidade	0,044 m	0,030 m	1,000 m

Tabela A.3 - Resultados para 100 metros

<b>Setor [°]</b>	<b>Variável</b>	<b>Média</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>
Todos	Densidade do ar	1,170 kg/m <sup>3</sup>	1,151 kg/m <sup>3</sup>	1,176 kg/m <sup>3</sup>
Todos	Delta-RIX	1,70%	-0,60%	34,30%
0	Delta-RIX	-0,60%	-2,80%	52,20%
30	Delta-RIX	0,50%	-1,80%	50,20%
60	Delta-RIX	1,60%	-0,80%	49,50%
90	Delta-RIX	2,40%	0,00%	47,90%
120	Delta-RIX	2,30%	0,00%	48,70%
150	Delta-RIX	2,20%	0,00%	48,80%
180	Delta-RIX	2,20%	0,00%	54,00%
210	Delta-RIX	2,10%	0,00%	55,00%

240	Delta-RIX	2,10%	0,00%	52,70%
270	Delta-RIX	2,20%	0,00%	49,70%
300	Delta-RIX	0,90%	-1,20%	46,00%
330	Delta-RIX	2,10%	0,00%	49,40%
Todos	Elevação	158,4 m	110,0 m	330,0 m
Todos	Velocidade Média	5,75 m/s	4,26 m/s	7,33 m/s
0	Velocidade Média	6,36 m/s	3,83 m/s	9,22 m/s
30	Velocidade Média	6,83 m/s	3,91 m/s	10,00 m/s
60	Velocidade Média	6,44 m/s	3,69 m/s	8,96 m/s
90	Velocidade Média	5,86 m/s	3,17 m/s	8,38 m/s
120	Velocidade Média	5,37 m/s	2,78 m/s	8,14 m/s
150	Velocidade Média	5,81 m/s	2,94 m/s	8,47 m/s
180	Velocidade Média	5,97 m/s	3,64 m/s	8,49 m/s
210	Velocidade Média	6,00 m/s	3,38 m/s	8,63 m/s
240	Velocidade Média	4,79 m/s	2,76 m/s	6,91 m/s
270	Velocidade Média	4,34 m/s	2,33 m/s	6,19 m/s
300	Velocidade Média	3,56 m/s	1,88 m/s	5,58 m/s
330	Velocidade Média	4,25 m/s	2,15 m/s	7,07 m/s
Todos	Densidade de Potência	200 W/m <sup>2</sup>	82 W/m <sup>2</sup>	441 W/m <sup>2</sup>
0	Densidade de Potência	224 W/m <sup>2</sup>	49 W/m <sup>2</sup>	686 W/m <sup>2</sup>
30	Densidade de Potência	277 W/m <sup>2</sup>	52 W/m <sup>2</sup>	870 W/m <sup>2</sup>
60	Densidade de Potência	260 W/m <sup>2</sup>	49 W/m <sup>2</sup>	676 W/m <sup>2</sup>
90	Densidade de Potência	200 W/m <sup>2</sup>	31 W/m <sup>2</sup>	596 W/m <sup>2</sup>
120	Densidade de Potência	175 W/m <sup>2</sup>	24 W/m <sup>2</sup>	581 W/m <sup>2</sup>
150	Densidade de Potência	192 W/m <sup>2</sup>	25 W/m <sup>2</sup>	601 W/m <sup>2</sup>
180	Densidade de Potência	226 W/m <sup>2</sup>	51 W/m <sup>2</sup>	638 W/m <sup>2</sup>
210	Densidade de Potência	246 W/m <sup>2</sup>	44 W/m <sup>2</sup>	731 W/m <sup>2</sup>
240	Densidade de Potência	152 W/m <sup>2</sup>	29 W/m <sup>2</sup>	429 W/m <sup>2</sup>
270	Densidade de Potência	92 W/m <sup>2</sup>	14 W/m <sup>2</sup>	285 W/m <sup>2</sup>
300	Densidade de Potência	51 W/m <sup>2</sup>	7 W/m <sup>2</sup>	190 W/m <sup>2</sup>
330	Densidade de Potência	72 W/m <sup>2</sup>	9 W/m <sup>2</sup>	326 W/m <sup>2</sup>
0	Frequência do setor	9,40%	5,60%	14,00%
30	Frequência do setor	9,80%	6,10%	17,10%
60	Frequência do setor	8,90%	5,20%	18,80%
90	Frequência do setor	13,80%	8,10%	21,50%
120	Frequência do setor	15,10%	8,80%	23,00%
150	Frequência do setor	12,30%	7,00%	20,70%
180	Frequência do setor	8,20%	5,20%	16,30%
210	Frequência do setor	6,90%	4,30%	12,10%
240	Frequência do setor	4,60%	2,80%	9,10%
270	Frequência do setor	3,30%	1,90%	5,50%
300	Frequência do setor	3,00%	1,70%	5,60%
330	Frequência do setor	4,80%	2,70%	10,20%
Todos	Rugosidade	0,044 m	0,030 m	1,000 m