

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ENGENHARIA DE ENERGIA

ANÁLISE DE PRODUÇÃO DE ENERGIA HORÁRIA DE FONTES SOLAR FOTOVOLTAICA E  
EÓLICA DE MICRO GERAÇÃO

por

Pedro Gomes Spohr

Monografia apresentada à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia de Energia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro de Energia.

Porto Alegre, dezembro de 2016



**Universidade Federal do Rio Grande do Sul**  
**Escola de Engenharia**  
**Engenharia de Energia**

**ANÁLISE DE PRODUÇÃO DE ENERGIA HORÁRIA DE FONTES SOLAR FOTOVOLTAICA E  
EÓLICA DE MICRO GERAÇÃO**

por

Pedro Gomes Spohr

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

Profa. Dra. Adriane Prisco Petry  
Coordenadora do Curso de Engenharia de Energia

Orientadora: Profa. Dra. Adriane Prisco Petry

Banca examinadora:

Profa. Dra. Adriane Prisco Petry DEMEC / UFRGS

Prof. Dr. Arno Krenzinger DEMEC / UFRGS

Prof. Dr. Alexandre Vagtinski de Paula DEMEC / UFRGS

Porto Alegre, 9 de dezembro de 2016.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha orientadora, a Professora Adriane Petry, por todo o auxílio e interesse ao ouvir minhas hipóteses e minhas perguntas.

Agradeço à empresa Hidropan, que em parceria com a UFRGS, possibilitou inúmeros estudos envolvendo energia eólica, e que trarão benefícios à toda sociedade brasileira.

Agradeço aos meus amigos e à minha família, que sempre me tiraram da zona de conforto mental, e me ajudaram a levantar questionamentos sobre mim e o mundo.

E por último, e mais importante, agradeço aos meus pais, que sempre estiveram ao meu lado, incentivando os meus estudos, acadêmicos ou não, e me possibilitando uma maior educação e sensibilidade, para com o mundo e as pessoas.

Spohr, P. **Análise de Produção de Energia Horária de Fontes Solar Fotovoltaica e Eólica de Micro Geração**. 2016. 32f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

## RESUMO

O presente trabalho propõe um estudo sobre a produção de energia elétrica horária de fontes solar fotovoltaica e eólica, ao criar o perfil de geração de um dia típico de cada estação do ano. Foram usados dados velocidade do vento e temperatura de uma torre anemométrica instalada em uma parceria da UFRGS e a HIDROPAN, na cidade de Panambi, Rio Grande do Sul. Os dados para as simulações solares foram retirados do CRESESB, e então alimentados no Software PVsyst. O sistema de geração possui 4,8 kW instalados, sendo 2,4 kW eólicos e 2,4 kW solares. Ao fim do estudo pode-se perceber que há uma correlação entre a velocidade do vento e a irradiação solar no local, além de mostrar as diferentes variações dos dias típicos e da participação de cada fonte de energia na produção do sistema.

**PALAVRAS-CHAVE:** Micro geração; Fotovoltaico; Eólico; Perfil de Geração; Geração ~~Distribuída~~Distribuída

Spohr, P. **Analysis of Hourly Energy Production of Solar Photovoltaic and Wind Power Generation**. 2016. 32p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

## ABSTRACT

The present paper proposes a study on the production of hourly electric energy from solar photovoltaic and wind sources, while creating the generation profile of a typical day of each season of the year. Wind speed and temperature data were collected from an anemometric tower installed in a partnership between UFRGS and HIDROPAN, in the city of Panambi, Rio Grande do Sul. Data for the solar simulations were taken from CRESESB and then fed into PVsyst Software. The generation system has 4.8 kW installed, being 2.4 kW wind and 2.4 kW solar. At the end of the study, one can see that there is a correlation between the wind velocity and the solar irradiation at the site, besides showing the different variations of the typical days and the participation of each energy source in the production of the system.

**KEYWORDS:** Micro generation; Photovoltaic; Wind Power; Generation Profile; Distributed Generation.

## **SUMÁRIO**

RESUMO	IV
ABSTRACT	IV
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	2
3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA	2
4. FUNDAMENTAÇÃO TÉRICA	3
4.1. GERAÇÃO FOTOVOLTAICA	3
4.2. GERAÇÃO EÓLICA	5
4.3. GERAÇÃO DISTRIBUIDA	8
5. SISTEMA DE GERAÇÃO	9
5.1 SISTEMA EÓLICO	9
5.2 SISTEMA FOTOVOLTAICO	10
6. ANÁLISE DOS DADOS	12
6.1 ANÁLISE DO VERÃO	13
6.2 ANÁLISE DO OUTONO	13
6.3 ANÁLISE DO INVERNO	14
6.4 ANÁLISE DA PRIMAVERA	15
7. SIMULAÇÃO DE PRODUÇÃO DE ENERGIA DO DIA TIPICO EM CADA ESTAÇÃO	16
8. CONCLUSÕES	21
8.1 TRABALHOS FUTUROS	22
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	23
10. APÊNDICE	24

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos o mundo vem se deparando com o aumento dos problemas ambientais como enchentes, secas, mudanças abruptas de temperatura, poluição, entre outros fenômenos que decorrem do uso excessivo dos recursos naturais e da maneira indiscriminada que são utilizados. O aquecimento global está entre estes problemas ambientais e a sua discussão tem levado a questionamentos sobre os meios produtivos do sistema vigente, assim como as próprias estruturas do sistema, e quais tecnologias poderiam ser utilizadas para mitigar o impacto que é causado à natureza. O fator de maior peso nesses questionamentos atuais é a energia, como obtê-la, transportá-la, distribuí-la e consumi-la, e, então, estudá-la a fim de diminuir os efeitos da aceleração do aquecimento global.

As fontes de energia mais utilizadas em todo planeta são os combustíveis fósseis como petróleo, gás natural e carvão sendo estes responsáveis por cerca de 80% da produção de energia no globo (RESENHA ENERGÉTICA BRASILEIRA, 2015). Contudo, este panorama vem mudando com a adesão de fontes alternativas ~~de energia~~ na matriz energética. Em vários países vem ocorrendo uma mudança muito importante na conscientização e na implantação de programas governamentais para o estímulo do desenvolvimento destas fontes alternativas, e renováveis, desta maneira aumentando a eficiência no uso dos recursos naturais. O Brasil é um país que sempre esteve ~~à~~ frente nesta discussão, pois por seu tamanho continental, possui diversos biomas e morfologias que provêm uma vasta gama de recursos. A matriz elétrica do país é notável pois, desde seu início, a participação da energia hídrica sempre foi muito grande, atualmente de cerca de 64% (BE ~~MN~~, 2015), ~~número até menor~~ número menor do que a ~~real~~ sua participação média, acontecendo por secas prolongadas ao longo ~~de~~ este ano. Todavia, a energia hídrica vem se provando não ser tão inofensiva ao meio ambiente como se imaginava, pois, áreas muito grandes são alagadas para a construção dos seus reservatórios além da modificação da vazão dos rios. Com isso, o Brasil passou também a investir em outras alternativas energéticas, como a energia eólica e a solar fotovoltaica.

Estas novas opções vêm tomando força nos últimos anos, com o seu desenvolvimento tecnológico e aumentando as suas eficiências, mas também com o auxílio do governo federal, que vem promovendo políticas de incentivo ao desenvolvimento e à massificação destas tecnologias pelo país. A primeira medida foi o PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica) que estabeleceu uma diretriz de implantações de usinas de grande porte com incentivos fiscais para tal. Posteriormente, foram implantadas normas que regulamentam uma nova forma de geração que vem sendo promovida pelo mundo a mini e micro geração distribuída. Esta nova modalidade de geração de energia tem como ideia tornar os consumidores finais também geradores, fazendo que, assim, a energia tenha que percorrer um menor circuito entre a geração e consumo. Com esta pulverização da geração, o consumidor consegue maior independência e segurança, além de promover uma mudança real, contudo ainda pequena, das cadeias produtivas do sistema. A Resolução Normativa (REN 687/2015) feita pela ANEEL, estabelece o funcionamento da geração distribuída no país, permitindo, assim, que esta modalidade se torne uma opção real para o consumidor.

Para a geração distribuída as fontes eólica e solar são as opções quede melhor adequamção, pois não utilizam combustíveis e trabalham de forma autônoma. Contudo, esta autonomia é vista também como um empecilho para uma maior penetração destas tecnologias. Ao longo de um dia a energia proveniente do sol varia, assim como a velocidade do vento e conseqüentemente a energia disponível, ou seja, elas estão a mercê dos fatores climáticos, podendo não estar

disponíveis no momento esperado. A variação da geração durante o dia adiciona mais um grau de complexidade ao despacho de energia, que varia conforme a demanda ao longo de um dia. Para que a energia da micro geração distribuída possa ser aproveitada da melhor maneira possível, será necessário um investimento na modernização do sistema de distribuição e no estudo da produção horária de energia de cada uma destas fontes. O presente trabalho tem o intuito de contribuir para a compreensão destes sistemas, como a sua produção varia ao longo de um dia, analisando um sistema de geração híbrido, solar fotovoltaico e eólico de micro geração.

## 2. OBJETIVOS

O trabalho tem como finalidade traçar o perfil de geração de energia, hora à hora, de um sistema híbrido de micro geração de 4,8 kW. O sistema foi projetado tendo uma turbina eólica, responsável por 50% da potência instalada, e um conjunto de painéis fotovoltaicos responsáveis pelos 50% restantes. O sistema é idealizado para a cidade de Panambi, no estado do Rio Grande do Sul, onde está situada uma torre anemométrica cujas medições são usadas neste estudo.

Para a realização desta análise, os dados de velocidade do vento e de temperatura serão tratados de forma a que representem a média horária para se traçar o perfil de um dia típico de geração, dividindo-se em quatro dias típicos, representando as quatro estações do ano. Após este tratamento dos dados, a simulação da produção de energia elétrica a partir da fonte eólica será realizada, hora à hora, para cada estação do ano. Terminadas as simulações do sistema eólico, será feita a simulação do sistema solar, que com o auxílio do *Software PVsyst* e dos dados de insolação do CRESESB, e em seguida o tratamento do resultado para a análise posterior. O estudo busca compreender como o perfil de geração de sistemas híbridos varia com o passar das horas e ao longo do ano, a fim de promover uma correlação que possa propulsionar o desenvolvimento da micro geração.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para a realização deste estudo foi necessária uma pesquisa sobre as diferentes abordagens deste tipo de problema, sendo revisados alguns ~~de~~ trabalhos acerca do assunto. No trabalho de Diedrich (2013) foi proposto um sistema fotovoltaico conectado à rede propondo-se a gerar 90% do consumo anual de uma residência, que consome 600 kWh/ano. A partir do software RADIASOL2 projetou-se o sistema, provando consistência ao que foi proposto. Porém, analisados os meses em separado, mostrou-se as dificuldades de geração em meses de menor insolação.

O trabalho de Boone (2013), foca-se na micro geração residencial conectada à rede com o intuito de compensação do consumo, fazendo uso de uma análise técnica e econômica. Foram criados perfis de geração, usando-se diversas fontes renováveis, e para cada um desses perfis ~~foi estudada~~ a viabilidade técnico-econômica, levando em consideração a tarifa branca e a REN 482/2012 aplicadas na época., ~~que sofreu alterações no seu regimento.~~ Nos cenários propostos, o retorno financeiro foi limitado, tendo-se conferido o alto custo da energia elétrica produzida, tornando as opções solar fotovoltaica e eólica muito suscetíveis a falhas,

tendo-se em vista as tarifas elétricas empregadas na época e a funcionalidade do modelo de compensação de energia elétrica, diferentes das atuais.

Possebon (2016), que estudou um sistema solar fotovoltaico por métodos experimentais na cidade de Porto Alegre, traçou a curva do perfil de um dia típico de geração solar do mês de junho. O seu estudo mostrou como as variações em média no perfil de geração não são elevadas, dependendo do clima da região, mas podem sofrer com mudanças abruptas pontuais. Demonstrou também, numa análise financeira, que o sistema é viável economicamente até mesmo no período de menor insolação.

Na tese de Beluco (2001) é proposto um sistema de geração híbrido, hídrico e solar, demonstrando que sistemas híbridos podem apresentar complementariedade entre as fontes, usando índices que quantificam a complementariedade destes sistemas. O estudo mostrou também como os sistemas se comportam e os riscos de falhas a que estão submetidos, além de uma vasta análise sobre o comportamento de cada sistema isoladamente.

Roca (2015) ~~estudou a mesma região do trabalho aqui proposto aqui,~~ projetando um parque eólico de grande porte, além da subestação necessária. Foi feito o *micrositing* da região e assim compreendendo ~~o~~ melhor compreendido o comportamento do vento. Por fim, comparou os resultados obtidos com ~~dos~~ dados reais da torre anemométrica com os dados interpolados dos Atlas Eólicos do Estado, 2002 e 2014, observando uma discrepância de 36,5% no pior dos casos.

Gasparin e Krenzinger (2016) analisaram o desempenho de sistemas fotovoltaicos posicionando-os em inclinações variadas ~~e~~ em diversas cidades do Brasil. Dentro deste estudo, uma das cidades escolhidas foi Santa Maria, cidade próxima de Panambi, onde tendo as condições climáticas são muito parecidas com a cidade deste estudo. Para ~~a cidade de~~ Santa Maria, a inclinação que melhor resultado obteve foi de 20°.

Petry e Mattuella (2007) apresentam a metodologia de análise de potencial eólico utilizando o *software* livre *Alwin*, além de fazer o embasamento teórico que o software utiliza em seus cálculos. Mostraram como são realizados os cálculos referentes às distribuições de ventos, usando distribuições probabilísticas de Rayleigh e Weibull, além das correlações da velocidade do vento em relação a altura e rugosidade do solo.

## 4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para a realização deste estudo foi necessária uma fundamentação básica dos conceitos que regem o funcionamento dos sistemas de geração de energia escolhidos. Como são dois tipos de sistemas que usam fontes de energia diferentes, uma é a irradiação solar e a outra é a força dos ventos, o funcionamento deles será explicado separadamente para melhor elucidação.

### 4.1. Geração Fotovoltaica

Os desenvolvimentos das tecnologias de geração de energia elétrica solar fotovoltaica baseiam-se num efeito da física chamado efeito fotovoltaico, que converte diretamente a radiação solar em energia elétrica em uma escala atômica.



O efeito fotovoltaico ocorre quando um fóton é absorvido por um material, no interior da sua estrutura molecular, possibilitando a locomoção de um elétron.

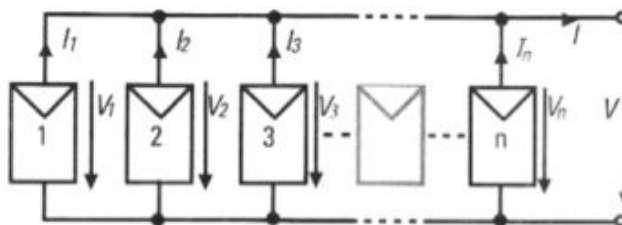
As células fotovoltaicas, são constituídas da junção de dois matérias semicondutores, formando duas regiões diferentes, do tipo N e do tipo P. ~~Quantos esses são expostos à luz, a radiação solar é absorvida pelo material semicondutor que tenha duas regiões distintas, do tipo N e do tipo P.~~ Estas duas regiões, são caracterizadas por serem dopagens do silício puro, sendo a região N com elétrons em excesso, e a região P com lacunas em excesso. Ao receber a irradiação solar ~~Um elétron, da região, ao receber um fóton, ele se~~ N, se desliga da sua ligação covalente, e vira um elétron livre deixando uma lacuna no seu local de origem. O movimento destes elétrons gera uma perturbação no campo elétrico dentro do material, fazendo que, ~~seja possível o aparecimento surgimento~~ de uma tensão elétrica. Esta tensão pode ser aproveitada, ao se conectar terminais em cada uma dessas regiões e um condutor elétrico entres os terminais, fazendo que surja uma corrente contínua. Para melhor desempenho e facilidade de uso, estas células são conectadas entre si, de maneira que a tensão e a corrente tenham um valor maior, valores mais comuns à operação de equipamentos elétricos. Este conjunto de células fotovoltaica se denomina módulo ~~fotovoltaico~~. fotovoltaico. (Hecktheuer, 2001)

~~Apesar dos módulos gerarem mais energia, tensão e corrente~~ Os módulos são conectados, o seu uso é acompanhado de em associações em série e em paralelo, para que possam ter magnitude ~~e~~ suficiente para a demanda carga. Contudo, antes de chegar à carga, há alguns equipamentos que auxiliam e melhoram o funcionamento do sistema, como o controlador de carga, que mantém os módulos no melhor ponto de operação para as condições do momento. As baterias fotovoltaicas, ~~que~~ podem ser usadas, ~~ou não~~, para armazenar a energia dos módulos, caso o sistema seja desconectado da rede elétrica (~~off~~ off-grid). E por último, o inversor, ~~equipamento~~ que além de transformar a corrente de contínua (CC) em ~~corrente~~ alternada (CA), ~~além de elevar elevaa a~~ tensão até a tensão de uso, seja dos equipamentos ou da rede elétrica, ~~a qual pode estar conectada~~ (on-grid).

- Associação em Paralelo:

A associação dos módulos em paralelo faz com que a tensão elétrica seja igual em todos os módulos, enquanto a corrente se soma, conforme a Figura 1.

Figura 1 – Arranjo Paralelo.

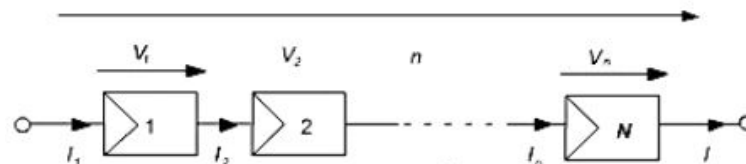


Fonte: Miranda, 2014.

- Associação em Série

Na associação serie, os papéis se invertem. Neste tipo de agrupamento a corrente elétrica é igual em todos os módulos, e a tensão dos módulos se somam. Conforme a Figura 2.

Figura 2 – Arranjo Serie

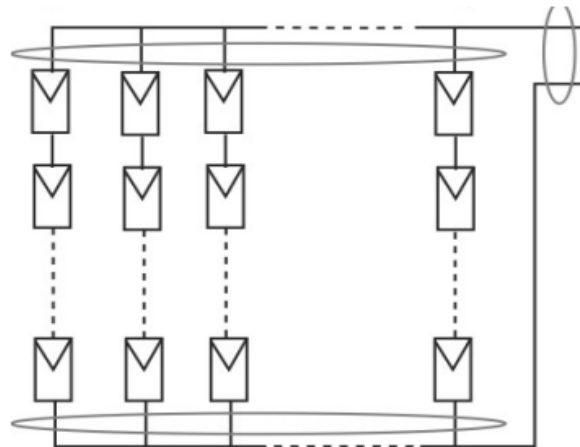


Fonte: Miranda, 2014.

- Associação mista

A associação mista consiste numa junção híbrida das duas anteriores, fazendo **assim**, com que o sistema possa ter níveis de tensão e corrente maiores, sendo este o arranjo mais comum. A Figura 3 mostra como este arranjo é feito.

Figura 3 – Arranjo Misto



Fonte: Miranda, 2014.

#### 4.2. Geração Eólica

A energia eólica é uma das primeiras tecnologias de uso dos recursos naturais para a produção, **sendo através que dos** moinhos de vento, **que** foram criados há milhares de anos. Apesar de se conhecer a tecnologia há muito tempo, só recentemente ela tem tido a atenção merecida, com o desenvolvimento de novas técnicas e materiais que possibilitam uma maior eficiência das turbinas eólicas.

Para gerar a energia, o vento é o principal fator, sendo não só a sua velocidade o fator de importância, mas também a constância dessa velocidade e a

sua direção. Todos estes fatores influenciam na produção de energia, como visto na Equação 1 que apresenta a expressão para a potência disponível. ~~disponível.~~

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

A Equação 1 descreve a potência disponível no vento para a turbina eólica, sendo  $P$  a potência em Watts,  $\rho$  a massa específica do ar em  $\text{kg}/\text{km}^3$ ,  $A$  a área da seção transversal do rotor, e  $V$  a velocidade do vento em m/s. Contudo~~m/s.~~ Contudo, o rendimento da turbina eólica, referente ao desempenho aerodinâmico das pás, às transmissões mecânicas e ao sistema de geração elétrico, é definido como  $C_p$ , sendo este, característico de cada turbina. A obtenção do  $C_p$ , em meios teóricos se limita a 0,593. Este resultado é a relação entre a energia máxima que pode ser extraída do escoamento do vento que passa pela turbina, com a energia extraída. No caso real, o  $C_p$  é menor do que 0,5, na maior parte dos casos~~vezes~~, visto que se incluem perdas por atrito mecânico, perdas por aerodinâmica, e perdas por ineficiências elétricas (Molly, 1990).

A energia produzida é obtida ~~pela~~ conforme a Equação 2, que define a energia produzida pela potência na turbina, definida anteriormente.

$$E = P t C_p \quad (2)$$

$E$  é a energia gerada em kWh,  $P$  é a potência da máquina em kW,  $t$  é o tempo de funcionamento em horas, e o  $C_p$  é a eficiência definida anteriormente.

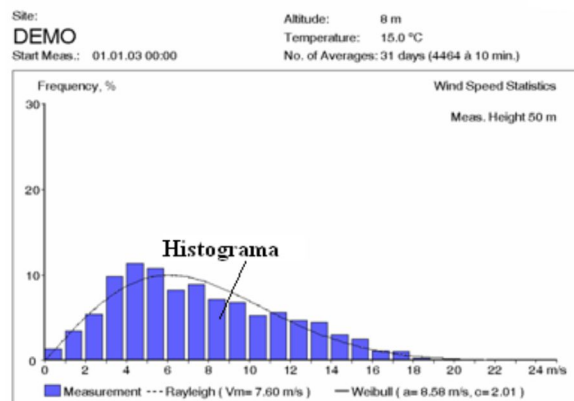
As turbinas eólicas extraem a energia do vento através da interação entre a massa de ar e as pás rotativas, que definem a área de interceptação  $A$ , estas por sua vez giram em torno de um eixo conectado à um gerador elétrico. Outro fator de grande importância para o funcionamento da turbina é a massa específica do ar  $\rho$ , sendo diretamente proporcional com a potência. Apesar do funcionamento da turbina eólica parecer simples, há detalhes que definem os ângulos das pás, o número de pás, a velocidade de rotação, até mesmo em que direção ~~e~~ está o eixo da turbina (vertical ou horizontal).

A componente da velocidade do vento, que aparece ao cubo na equação que descreve a potência relacionada a energia cinética do vento, precisa de um tratamento estatístico detalhado, pois a velocidade do vento, assim como outros fenômenos meteorológicos, é difícil de se prever. Dito isso, os tratamentos de dados sobre a velocidade do vento serão esclarecidos nos próximos sub tópicos.

- Distribuição de Velocidade:

Sendo um escoamento de ar turbulento, o vento tem uma variação rápida da sua velocidade, e assim, para se obter um valor de referência sobre o vento do local, é usada a média aritmética dos dados computados. Contudo, usar somente a média para estudar o comportamento do vento numa região é pouco significativo, perdendo-se muita informação, como por exemplo os máximos e mínimos, além da frequência que cada velocidade ocorre. Para isso, foram trazidas da estatística duas curvas de distribuição de probabilidade ~~que~~ que se encaixavam com o histograma de um estudo eólico, a curva de Rayleigh e a curva de Weibull. ~~E~~ E estas distribuições são utilizadas para a extrapolação dos dados a partir da velocidade média e de outros dois fatores. Este comportamento pode ser visto na Figura 4, vinda do estudo sobre software *Alwin* como exemplo de uso.

Figura 4 – Histograma de Distribuição de Velocidade do Vento.



Fonte: Petry, 2007.

É possível notar que a curva traçada se assemelha muito do histograma apresentado, sendo esta técnica de aproximação usada em larga escala. Para a realização deste trabalho, a distribuição de probabilidade utilizada é a de Weibull, por se ter maior precisão na descrição ao incluir a informação acerca do desvio padrão da amostra medida. Para obtenção da frequência que uma velocidade do vento ocorre, é necessário o emprego de dois fatores que descrevem a distribuição. A equação 3 mostra isto.

$$F(V) = \frac{c}{a} \left(\frac{V}{a}\right) e^{-\left(\frac{V}{a}\right)^c} \quad (3)$$

$F$  é a frequência em que a velocidade ocorre,  $V$  é a velocidade em m/s,  $a$  é o fator de escala em m/s, e  $c$  é o fator de forma, sendo este um número adimensional. O parâmetro  $a$ , fator de escala, define a escala da distribuição, e está diretamente relacionado com a velocidade média do vento, sendo comumente atribuído o valor aproximado conforme a Equação 4.

$$a = \frac{\bar{v}}{0,9} \quad (4)$$

Apesar de haver outras formulações para a obtenção de  $a$ , escolheu-se esta abordagem, pois os outros métodos aumentam a complexidade do cálculo, utilizando a função Gama, e se chega basicamente ao mesmo resultado, tendo um erro associado, que para este tipo de sistema físico, é muito baixo. Também, para obtenção do parâmetro  $c$ , fator de forma, emprega-se o valor pela Equação 5.

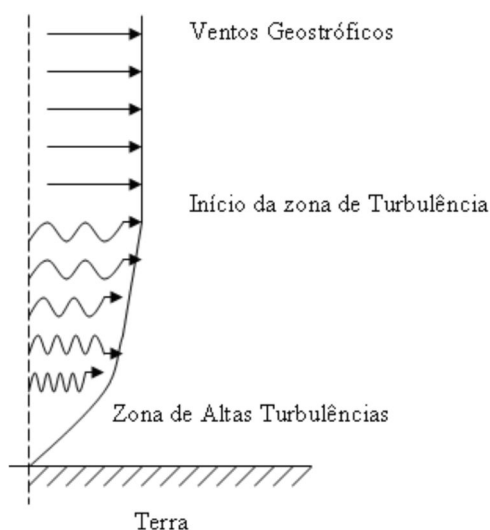
$$c = \left(\frac{\delta}{\bar{v}}\right)^{-1,086} \quad (5)$$

Com estas equações é possível obter os parâmetros de Weibull e, assim, a sua distribuição para uma amostra de medições, compactando-as em três informações: velocidade média, fator de escala e fator de forma.

- Correção Velocidade em Função da Altura:

Como o vento é um escoamento de ar, ele obedece às leis da dinâmica de fluidos. Conseqüentemente o vento sofre perturbações quando se aproxima de uma superfície, seja o chão, árvores ou construções. Estas perturbações são propagadas pelo escoamento pela viscosidade do ar, e pelo fluxo de calor da atmosfera, dando origem a um perfil de atuação da rugosidade do terreno sob o vento, sendo este perfil chamado de Camada Limite Atmosférica (Hirata Araújo, 2000). A Camada Limite Atmosférica pode variar muito de local para local, podendo chegar a níveis de 1000 m de altura, dependendo da rugosidade e topografia do terreno, das mudanças de temperatura, da estratificação atmosférica, entre outros, impactando a velocidade do vento com intensidade diferente a medida que se distancia do solo. A Figura 5 exemplifica este efeito.

Figura 5 – Esquema das zonas da Camada Limite Atmosférica.



Fonte: Twele Gasch, 2002

Para se obter a velocidade do vento a uma certa altura de interesse, é necessária a correção desta velocidade, caso as medições feitas não sejam na altura de interesse, ~~desta velocidade~~, e para isso, ~~novamente~~, existem dois procedimentos matemáticos distintos. O método de melhor resultado é a Lei Logarítmica, que é descrita pela seguinte Equação 6.

$$V(z) = \frac{U_*}{k} \ln \left[ \frac{z}{z_0} \right] \quad (6)$$

$V(z)$  é a velocidade do vento na altura  $z$  em m/s,  $z$  é a altura de interesse em m,  $z_0$  é o comprimento de rugosidade em m,  $k$  é a constante de Karman, e  $U_*$  é a velocidade de fricção em m.

### 4.3. Geração Distribuída

No Brasil, uma nova modalidade de geração de energia elétrica vem ganhando espaço na matriz, a chamada Geração Distribuída, que consiste na inclusão de diversas fontes de energia, como a eólica, a solar fotovoltaica, a cogeração e as pequenas centrais hidrelétricas, próximas aos consumidores finais. A Geração Distribuída tem crescido nos últimos anos, em todo mundo, por questões ambientais ao usar fontes renováveis, e por questões técnicas, ao reduzir a necessidade de investimento em grandes usinas e linhas de transmissão.

No Brasil, a geração distribuída teve impulso com a Resolução Normativa 482/2012 e estabelece como a geração distribuída opera no país. Posteriormente, esta resolução foi atualizada pela Resolução Normativa 687/2015. Estas definiram o sistema de compensação de energia elétrica, em que os consumidores finais passam a fazer parte do sistema elétrico como membros ativos, gerando e injetando energia na rede. O sistema funciona quando os consumidores instalam algum sistema de produção de energia em sua casa, prédio, fábrica, ou loja, entre outros, e o excedente de energia elétrica é injetado na rede de distribuição. Esta energia é contabilizada e ao fim do mês abatida da fatura de energia elétrica. Caso se produza uma quantidade maior de energia do que o consumo dentro de um mês, essa energia é creditada para os próximos meses, tendo validade de até 60 meses a partir da sua geração.

A configuração do consumidor pode variar, sendo pessoas físicas e jurídicas capazes de aderir a este modelo de integração, além de ser possível gerar energia e abater de duas contas, de mesmo titular, entre outras possibilidades. Para efeitos técnicos, o que realmente pesa é a classificação quanto a potência instalada do sistema, havendo dois tipos de classificação, e, por conseguinte, suas restrições e obrigatoriamente. Para sistemas com potência instalada menor, ou igual, a 75 kW, ~~neste sistema~~ a unidade consumidora precisa seguir as normas de cada concessionária para fazer a conexão do seu sistema de geração com a rede. Contudo, não tem que arcar com nenhuma modificação da rede. Para potências maiores que 75 kW e menores a 5 MW (e exclusivamente para fontes hídricas, 3 MW), as unidades consumidoras precisam, além das normas das concessionárias, estudos de impacto com a rede e podem ter que arcar com custos e modificações da rede de distribuição para que o seu sistema possa se conectar sem prejuízo aos demais consumidores.

## 5. SISTEMA DE GERAÇÃO

O sistema de geração de energia elétrica proposto utiliza duas fontes renováveis, solar e eólica, pois são as mais utilizadas no mercado de micro geração distribuída.

### 5.1 SISTEMA EÓLICO

Para a geração eólica foi escolhida uma turbina de 2,4 kW, eixo horizontal, do modelo *Skystream 3*. A turbina foi escolhida por ter baixo custo e bom desempenho, não havendo análise financeira neste estudo. As características técnicas estão listadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Ficha técnica Skystream 3.7

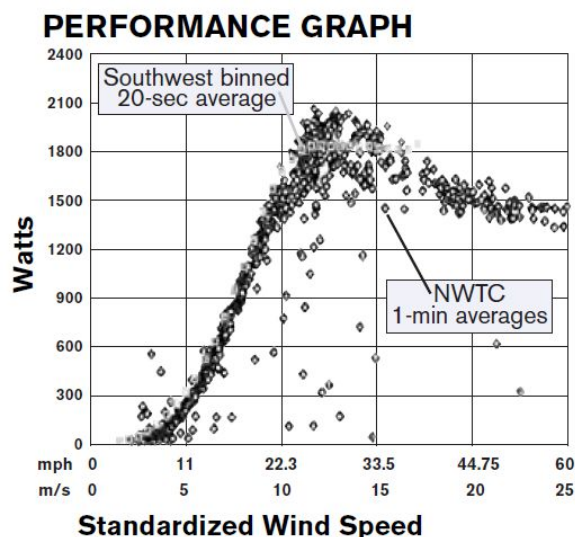
Características	Técnicas
Marca	Skystream

<b>Modelo</b>	3.7
<b>Potência de Pico</b>	2,4 kWp
<b>Diâmetro do Rotor</b>	3,72 m
<b>Nº de Pás</b>	3
<b>Velocidade de Partida</b>	3,5 m/s
<b>Velocidade Nominal</b>	9 m/s
<b>Controle de Potência</b>	Stall
<b>Direcionamento ao Vento</b>	Passivo
<b>Peso</b>	77 kg
<b>Altura de Instalação</b>	18 m

Fonte: Skystream, 2006.

A curva de potência desta turbina também é fornecida pelo fabricante, como visto na Figura 6.

Figura 6. Curva de Potência da Turbina SkyStream.



Fonte: Skystream, 2006.

## 5.2 SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO

Para a geração de energia solar, foi escolhido o painel de 265 W da Canadian Solar, modelo CS6K- 265P, e o sistema que consiste em 9 módulos conectados em série somando 2,38 kW de potência instalada. O sistema tem uma inclinação de 30° em relação ao solo, com orientação Norte. Levando em consideração que a cidade de Panambi está a uma latitude de 28,29°, a inclinação do sistema é de boa aproximação. As características técnicas estão presentes na Tabela 2.

Tabela 2 – Ficha Técnica do Módulo Fotovoltaico.

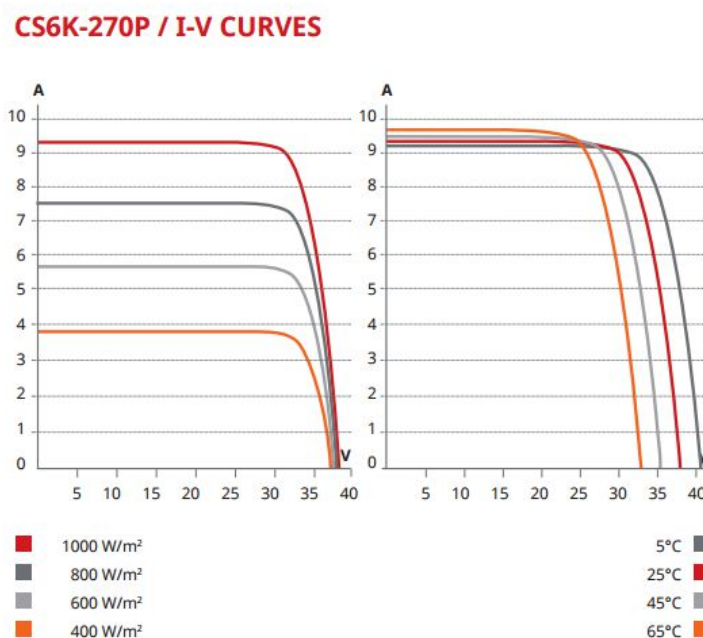
<b>Características</b>	<b>Técnicas</b>
<b>Marca</b>	Canadian Solar
<b>Modelo</b>	CS6K – 265P
<b>Potência de Pico</b>	265 Wp
<b>Tensão de Máxima Potência (<math>V_{mpp}</math>)</b>	30,6 V
<b>Corrente de Máxima Potência (<math>I_{mpp}</math>)</b>	8,66 A

<b>Corrente de Curto Circuito (<math>I_{sc}</math>)</b>	9,23 A
<b>Tensão de Circuito Aberto (<math>V_{oc}</math>)</b>	37,6 V
<b>Coefficiente de Temperatura de Máxima Potência</b>	-0,40%/°C
<b>Peso</b>	23 kg
<b>Comprimento</b>	1,650 m
<b>Largura</b>	0,992 m
<b>Área do Módulo</b>	1,637 m <sup>2</sup>

Fonte: Canadian, 2015.

A curva de potência do módulo também é fornecida pelo fabricante, como pode ser vista na Figura 7.

Figura 7. Curva de Potência do Módulo Canadian.



Fonte: Canadian, 2015.

Outro equipamento de fundamental importância para o sistema de geração fotovoltaico é o inversor, ~~cuja função é transformar a corrente contínua, que é gerada nos módulos, em corrente alternada para o uso tanto interno à residência, ou para a conexão com a rede de distribuição elétrica.~~ Para o sistema, foi escolhido o inversor da marca SMA, modelo SunnyBoy 2500, com capacidade para potências de até 2,5kW. Os demais dados estão na Tabela 3.

Tabela 3 – Características do inversor SunnyBoy 2500

<b>Sunny Boy 2500</b>	
<b>ENTRADA</b>	
<b>Potência máxima</b>	2700 W
<b>Tensão máxima</b>	600 V <sub>cc</sub>
<b>Faixa de tensão do MPPT</b>	224 - 480 V <sub>cc</sub>



<b>Tensão nominal</b>	220 Vcc
<b>Corrente máxima</b>	12,0 A
<b>Número de MPPTs</b>	1
<b>SAÍDA</b>	
<b>Potência nominal</b>	2,5 kW
<b>Corrente máxima AC</b>	12,5 A
<b>Tensão AC de saída da rede</b>	230 V
<b>Frequência da rede</b>	60Hz
<b>Fator de potência (cos <math>\phi</math>)</b>	1
<b>Eficiência máxima</b>	92,1 %

Fonte: SMA Solar Technology AG.

## 6. ANÁLISE DOS DADOS

Este capítulo discorre sobre o tratamento dos dados, tanto de vento quanto de irradiação. Contudo, é importante ser dito que alguns dados deste tratamento serão omitidos para manter o sigilo dos dados brutos. Estes dados estão, em parte, protegidos por sigilo acordado na parceria com a HIDROPAN, empresa de Panambi que, ~~em parceria com a UFRGS,~~ instalou uma torre anemométrica na região, torre esta que fornece os dados do vento. Dito isso, os valores foram obtidos de 3 anos de medições, sendo os dados em si ~~retirados~~ extraídos de um destes anos.

~~O A~~ tratamento-análise dos dados de vento foi feito ~~de~~ da seguinte forma: fez-se a média da velocidade e da temperatura para cada hora do ano, levando-se em consideração que o sistema de monitoramento mede continuamente e a cada 10 min gera uma média dessas medições, havendo assim 6 registros por hora. ~~A~~ após isso, o ano foi dividido em 4 estações, e foi calculado a média de velocidade e temperatura para cada hora do dia, além do desvio padrão de ambas, formando o dia típico de cada estação.

Depois desta organização, fez-se a obtenção da rugosidade do solo, usando a Equação 6, dividindo a velocidade numa altura pela velocidade a uma altura diferente, obtendo-se ~~o~~ então a rugosidade, para tratamento dos dados. Ao obter-se a rugosidade para cada estação, pode-se enfim calcular a velocidade na altura de projeto. Após este tratamento, fez-se a obtenção dos parâmetros de Weibull para cada hora de cada dia típico.

A irradiação da cidade foi obtida do Site do CRESESB, sendo os dados dispostos mensalmente e optados pelos do plano horizontal. A temperatura média mensal foi obtida da estação meteorológica da região, dados estes apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Dados de Irradiação e Temperatura Média.

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
<b>Irradiação diária média [kWh/m<sup>2</sup>.dia]</b>	5,86	5,83	5,19	4,19	3,36	2,64	2,83	3,36	4,33	5,5	6,14	6,36
<b>Temperatura média</b>	24,5	24	24	20,5	16	15,5	14	16	17,5	20	22	23,5

Estes dados serviram como entrada para o software PVsyst ~~-,~~ software de simulação de sistemas de energia solar mais utilizado ~~-,~~ por devido à sua qualidade. Como a análise final dos sistemas é de produção horária e o único dado sobre irradiação da cidade é a irradiação média diária, foi usada função do software de sintetizar dados horários, já que possui em seu código base todas as formulações da rotação da terra em relação ao sol, assim podendo prever com precisão a irradiação média de uma hora de um dia. Vale ressaltar que o erro neste cálculo está associado às questões climáticas, como chuvas de verão, que são comuns mais ao fim dos dias. Contudo, como as janelas de observações são de estações, estes efeitos são suavizados ao se levar em consideração a média dos cerca de 90 dias.

### 6.1. Análise do Verão

Após esse processo de tratamento estatístico dos dados de vento, foram obtidos os parâmetros de Weibull, além da velocidade média e a temperatura média, para cada hora do dia típico. Aqui serão apresentados apenas o resultado da velocidade do vento, para não se estender demasiadamente, enquanto os outros dados estarão dispostos no Apêndice I.

Os resultados da velocidade média dos ventos no verão estão dispostos na Tabela 5 a seguir.

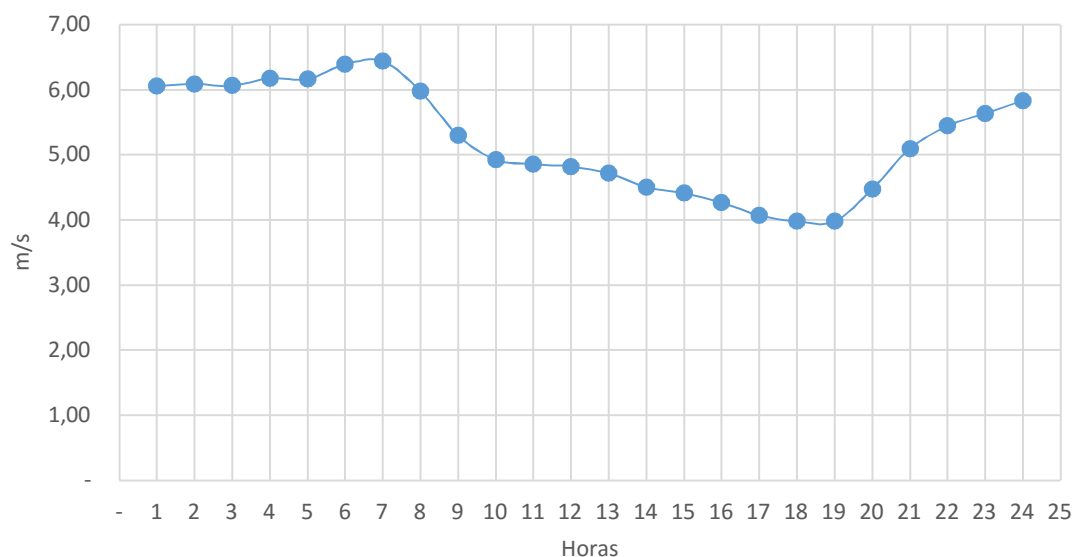
Tabela 5 – Velocidade do Vento no Verão

<b>HORA</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
<b>VELOCIDADE [m/s]</b>	6,06	6,09	6,06	6,17	6,16	6,39	6,44	5,97	5,29	4,92	4,86	4,82
<b>HORA</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>
<b>VELOCIDADE [m/s]</b>	4,71	4,50	4,41	4,27	4,07	3,98	3,98	4,48	5,09	5,44	5,64	5,83

Fonte: Autor

É possível perceber que a velocidade do vento tem grande variação durante o dia, tendo o seu resultado máximo às 7 h da manhã ~~em torno de~~ 6,44 m/s, ~~enquanto cerca de doze horas depois, ocorre e~~ o seu mínimo as 18 h e 19 h ~~-,~~ a ~~uma velocidade de~~ 3,98 m/s. O comportamento ao longo do dia típico do verão pode ser melhor visualizado ~~no~~, a Figura 8.

Figura 8. Dia Típico do Verão



O comportamento encontrado evidencia que nos períodos noturnos a velocidade do vento é maior, e durante o dia, enquanto há sol, a velocidade do vento diminui gradativamente.

## 6.2. Análises do Outono

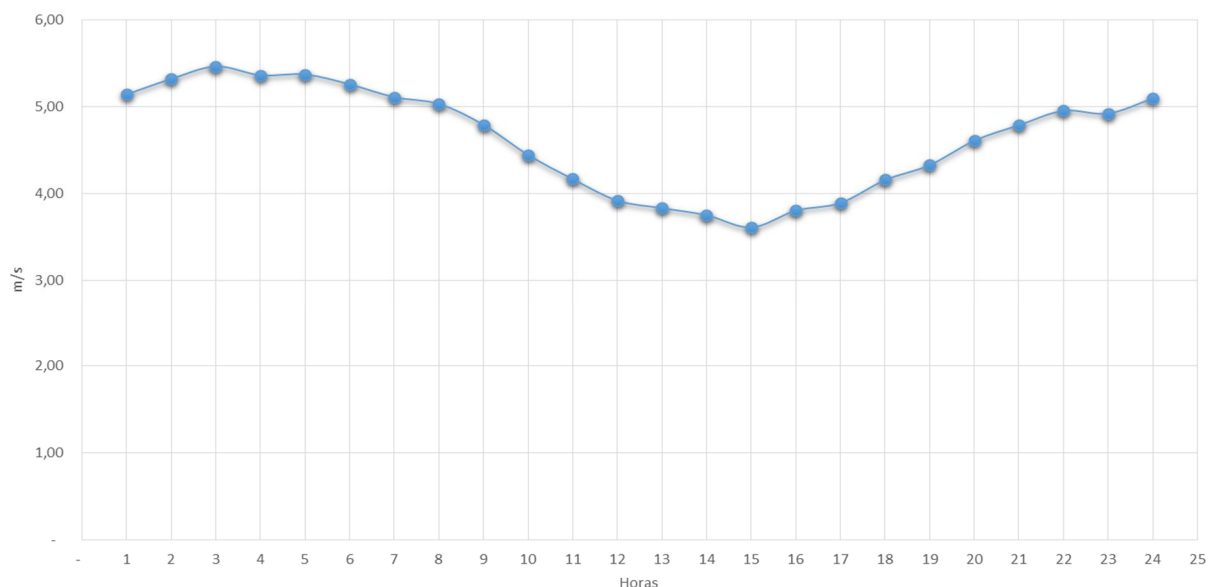
A análise dos dados resultou na Tabela 6, que traz a velocidade média dos ventos no outono.

Tabela 6 – Velocidade do Vento no Outono

HORA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
VELOCIDADE [m/s]	5,14	5,32	5,47	5,37	5,38	5,26	5,11	5,03	4,79	4,45	4,17	3,92
HORA	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
VELOCIDADE [m/s]	3,84	3,75	3,61	3,81	3,90	4,16	4,33	4,61	4,79	4,96	4,93	5,10

Neste caso, a velocidade média do dia típico do outono é 4,63 m/s, e durante o dia a velocidade máxima ocorre às 5 h da manhã, enquanto a velocidade mínima ocorre às 15 h. O comportamento ao longo do dia típico do outono pode ser melhor visualizado na Figura 9.

Figura 9. Dia Típico do Outono



Acima Mostra-se ver que o comportamento no outono é similar ao do verão, havendo menores valores durante o dia de que durante a noite. Contudo, esta variação é muito mais suave, sem haver picos abruptos como no verão.

### 6.3 Análise do Inverno

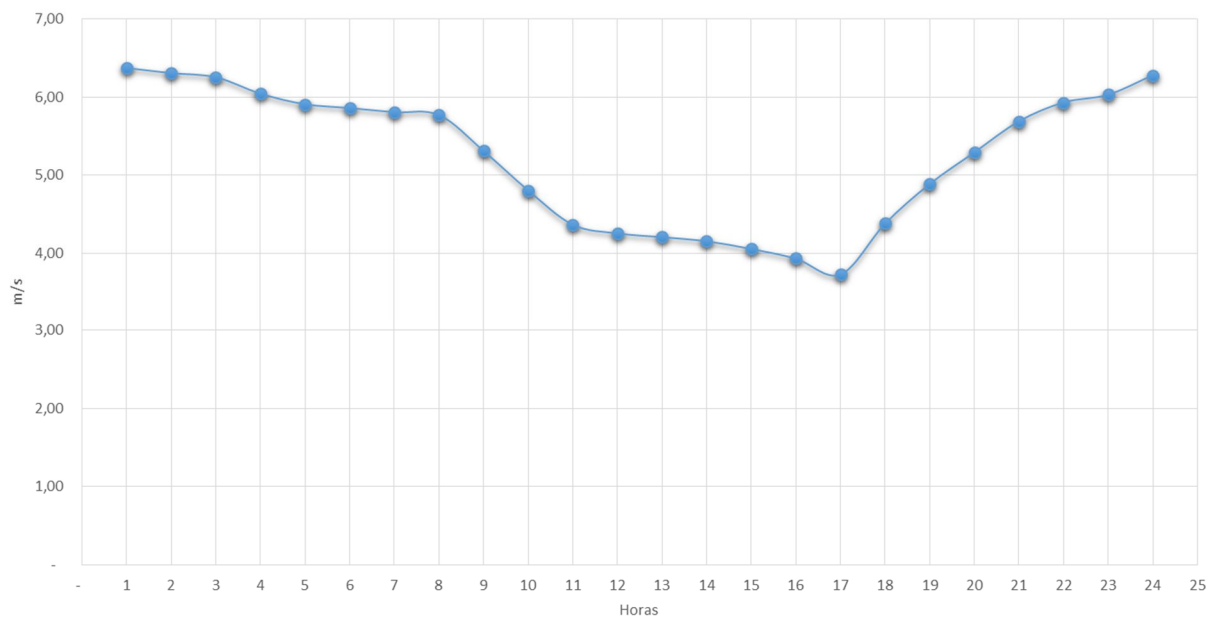
A análise dos dados resultou na Tabela 7, que traz a velocidade média horária dos ventos no inverno.

Tabela 7 – Velocidade do Vento no Inverno

HORA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
VELOCIDADE [m/s]	6,37	6,31	6,25	6,04	5,91	5,86	5,81	5,77	5,31	4,81	4,37	4,26
HORA	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
VELOCIDADE [m/s]	4,21	4,16	4,06	3,93	3,73	4,38	4,89	5,29	5,69	5,93	6,03	6,28

A velocidade média do dia típico do inverno aumenta em relação ao outono, ficando em 5,23 m/s. Já a velocidade máxima ocorre à 1 h da manhã, enquanto a velocidade mínima ocorre às 17 h. O comportamento ao longo do dia típico do inverno pode ser melhor visualizado no gráfico a baixo, a Figura 10.

Figura 10. Dia Típico do Inverno



O comportamento do inverno se assemelha ao do verão, tendo apresentando picos novamente, acentuado como visto às 17 h. O período em que há sol se mantém, sendo o de menores velocidades, enquanto durante a noite o vento tem suas maiores velocidades.

#### 6.4 Análise da Primavera

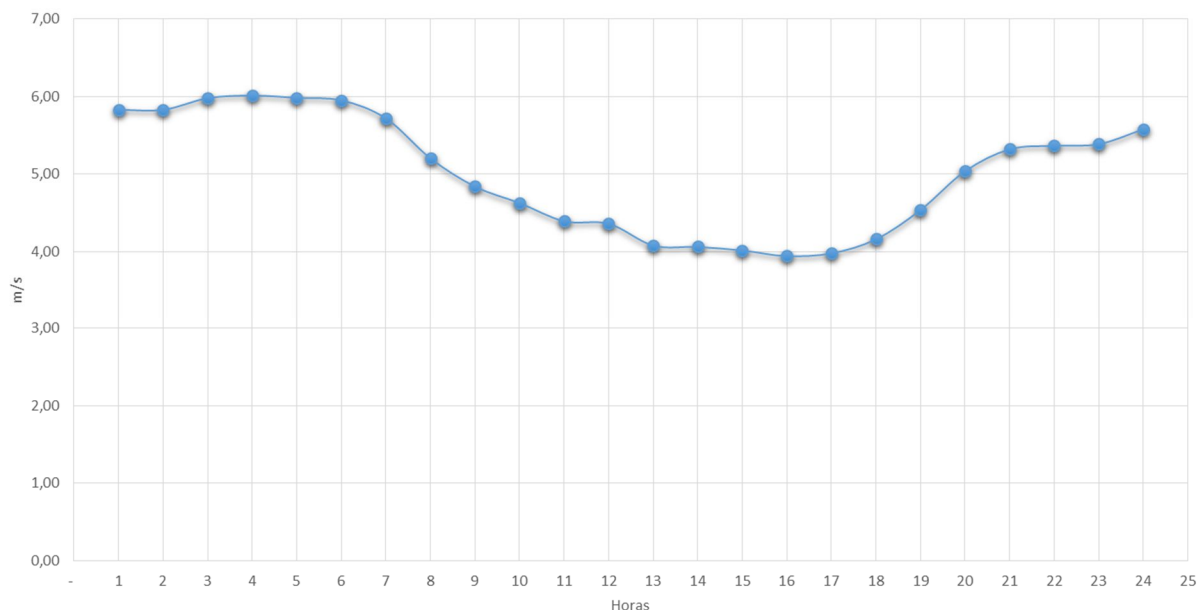
A análise dos dados resultou na Tabela 8, que traz a velocidade média horária dos ventos na primavera.

Tabela 8 – Velocidade do Vento no Primavera

HORA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>VELOCIDADE [m/s]</b>	5,83	5,83	5,98	6,02	5,99	5,95	5,72	5,20	4,84	4,63	4,39	4,36
HORA	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
<b>VELOCIDADE [m/s]</b>	4,08	4,06	4,02	3,95	3,98	4,16	4,54	5,04	5,32	5,37	5,39	5,58

A velocidade média do dia típico da primavera se mantém igual em relação ao inverno ficando em 5,23 m/s. Já a velocidade máxima ocorre às 4 h da manhã, enquanto a velocidade mínima ocorre às 16 h. O comportamento ao longo do dia típico da primavera pode ser melhor visualizado na Figura 11.

Figura 11. Dia Típico da Primavera



Durante a primavera, o comportamento da velocidade do vento volta a se assemelhar ao outono, tendo-se uma curva mais suave, com menos picos e oscilações. Vale comentar, que apesar do inverno e da primavera terem a mesma velocidade média, o inverno tem maior amplitude de velocidades.

Terminadas estas análises, é notável a semelhança do perfil das estações ~~no~~ verão e ~~no~~ inverno, e das estações na primavera e ~~no~~ outono, visto que apesar de opostas no decorrer do ano, elas temelas têm as mesmas características. O verão e o inverno são ambas as estações onde ocorre o solstício, e por isso, as horas de sol, e, por conseguinte a temperatura, tem maiores oscilações durante o dia. No caso do outono e da primavera, por serem estações onde ocorre o equinócio, as horas são iguais entre dia e noite, havendo menores discrepâncias de temperatura, e como consequência, maior suavidade nas transições.

## 7. SIMULAÇÃO DE PRODUÇÃO DE ENERGIA DO DIA TÍPICO EM CADA ESTAÇÃO

As simulações de geração de energia solar foram realizadas com o Software *PVsys*, que resultou na produção do dia típico de cada mês do ano. Então, agrupou-se da mesma maneira que os dados de vento, descritos no capítulo anterior.

~~Estes dados, de cada mês, estarão dispostos no Anexo II.~~

No caso do sistema eólico, o sistema foi simulado com o uso das Equações (1) e (2), além da correção da massa específica pela temperatura, correção esta calibrada usando o software *Alwin*. Para estes cálculos foi usado o software *Matlab*, como plataforma matemática, utilizando as equações listadas e seus ajustes.

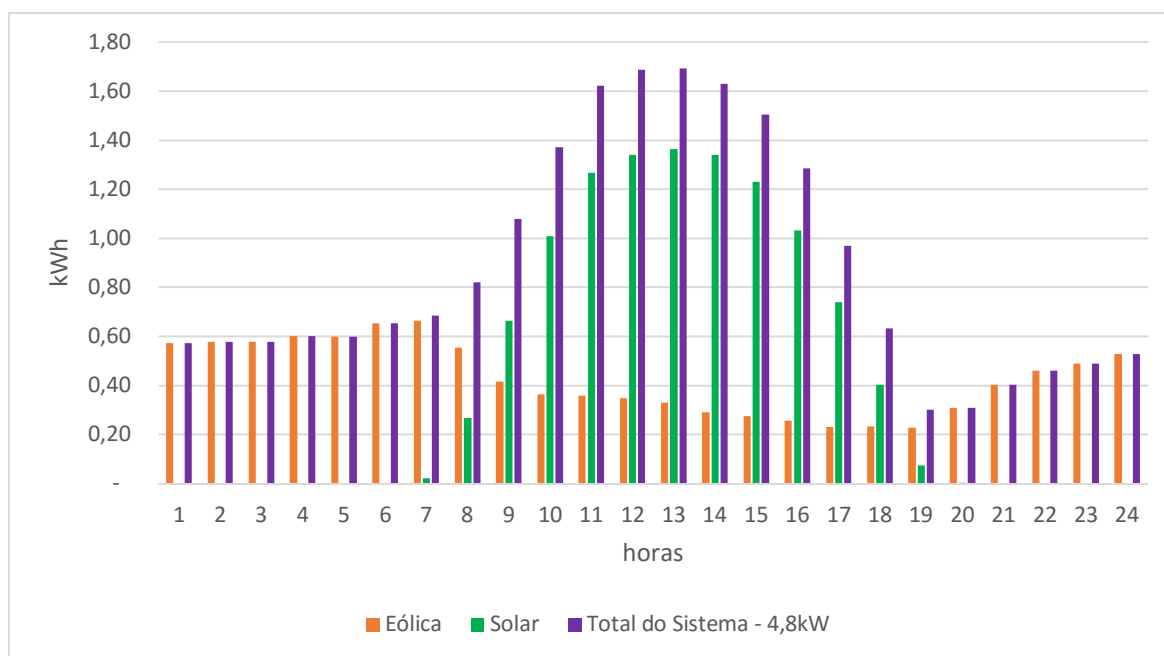
Os resultados do verão seguem na Tabela 9, que divide a produção horária por fonte de energia, em kWh, eólica e solar, e o total de produção destas fontes durante a estação.

Tabela 9 – Produção de Energia do Verão.

Verão	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
EÓLICO[kWh]	0,572	0,577	0,575	0,601	0,597	0,651	0,663	0,554	0,416	0,362	0,356	0,346
SOLAR[kWh]	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,020	0,266	0,662	1,008	1,264	1,340
TOTAL[kWh]	0,572	0,577	0,575	0,601	0,597	0,651	0,684	0,820	1,077	1,370	1,621	1,686
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
EÓLICO[kWh]	0,327	0,290	0,274	0,255	0,230	0,231	0,227	0,307	0,403	0,460	0,489	0,526
SOLAR [kWh]	1,363	1,339	1,229	1,030	0,738	0,400	0,072	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL [kWh]	1,691	1,629	1,503	1,285	0,968	0,632	0,299	0,307	0,403	0,460	0,489	0,526

A produção, ao final do dia, de energia elétrica, foi de 10,288 kWh e 10,732 kWh, respectivamente, enquanto a produção total chegou a 21,021 kWh. Este resultado demonstra como, não só pela questão de potência instalada ser igual, as duas fontes de energia têm participação parecida dentro do sistema híbrido, sendo que a turbina eólica foi responsável por 48,94 % da produção e os módulos fotovoltaicos responsáveis por 51,06%. O outro fator decisivo que pode ser visto é quando a disponibilidade de energia é maior, e como estas fontes se relacionam, na figura 12.

Figura 12. Produção de Energia no Verão



Pode-se notar que por mais que a participação das duas fontes foi muito próxima de 50%, a maneira com que elas atuam é distinta. O sistema eólico tem a sua geração distribuída ao longo do dia, mantendo a sua maior participação no período da noite. Já o sistema solar, tem a sua produção concentrada durante o dia, pois há sol, com o seu pico por volta do meio dia. Vale notar que assim que a

produção média de energia solar começa, a de energia eólica diminui. Outro ponto de interesse que pode ser levantado é que às 19 h<sub>7</sub> há a menor geração de energia, coincidindo com o fim da produção de energia solar, com a menor produção eólica, podendo ter relação com a questão da temperatura, visto que existe uma inércia térmica que mantém aquecido o ar mesmo quando não há irradiação solar, atrasando a retomada da velocidade do vento nas primeiras horas da noite.

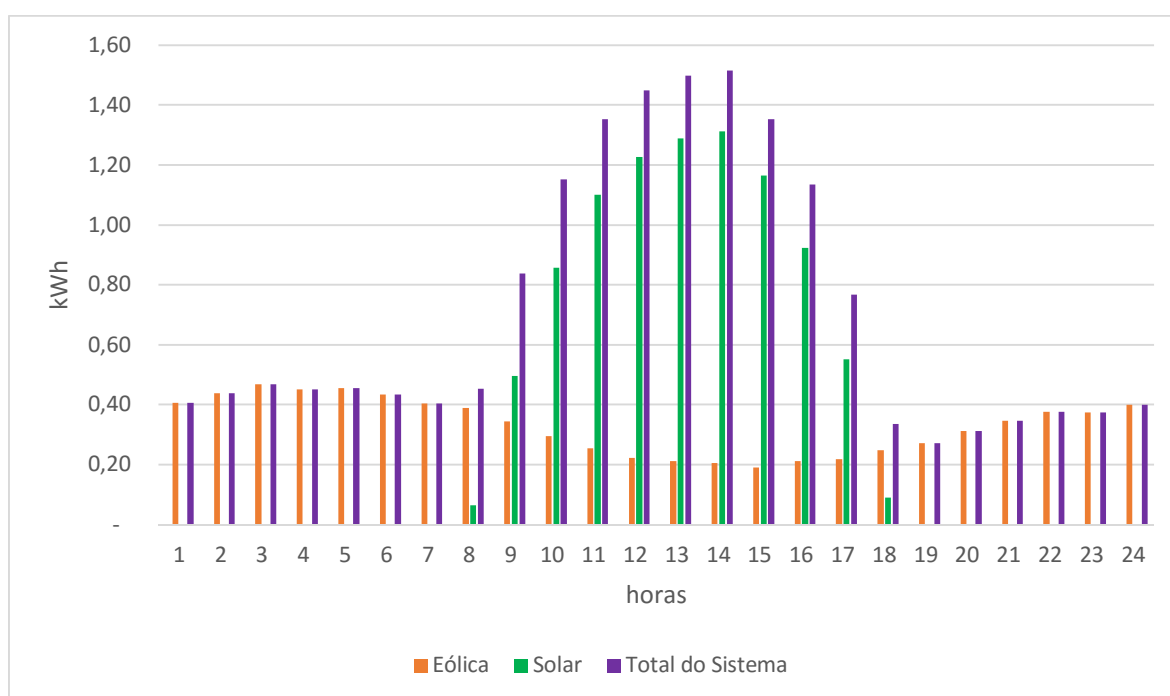
Os resultados das simulações de produção de energia do outono seguem na Tabela 10, sob o mesmo modelo da anterior.

Tabela 10 – Produção de Energia do Outono.

Outono	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
EÓLICO[kWh]	0,404	0,437	0,466	0,449	0,454	0,433	0,403	0,388	0,343	0,295	0,253	0,222
SOLAR[kWh]	0	0	0	0	0	0	0	0,064	0,494	0,856	1,100	1,226
TOTAL[kWh]	0,404	0,437	0,466	0,449	0,454	0,433	0,403	0,452	0,837	1,151	1,353	1,448
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
EÓLICO[kWh]	0,211	0,204	0,188	0,211	0,216	0,246	0,270	0,311	0,345	0,375	0,372	0,398
SOLAR[kWh]	1,287	1,311	1,164	0,923	0,550	0,088	0	0	0	0	0	0
TOTAL[kWh]	1,498	1,515	1,353	1,134	0,766	0,334	0,270	0,311	0,345	0,375	0,372	0,398

Ao se somar a produção total de energia eólica do dia típico chega-se a um valor de 7,894 kWh, enquanto a produção de energia solar fica em 9,064 kWh, obtendo-se um total do sistema de 16,958 kWh. Nesta estação é possível notar um descolamento maior entre as duas fontes, em termo de participação na produção da energia, sendo 46,55% da eólica e 53,45% da solar. Ao relacionar o outono ao verão, tem-se uma redução significativa da produção total de energia, ficando em torno de 80,7% do total produzido no verão. Para visualizar com mais clareza a distribuição da produção, segue a Figura 13.

Figura 13. Produção de Energia no Outono





Novamente, pode-se ver como o horário entre 18 e 19 horas ocorre o menor período de geração, devido ao início da noite e a baixa velocidade do vento. Contudo, esta transição é mais suave se comparada ao verão, pois a velocidade do vento não sofre tantas oscilações abruptas.

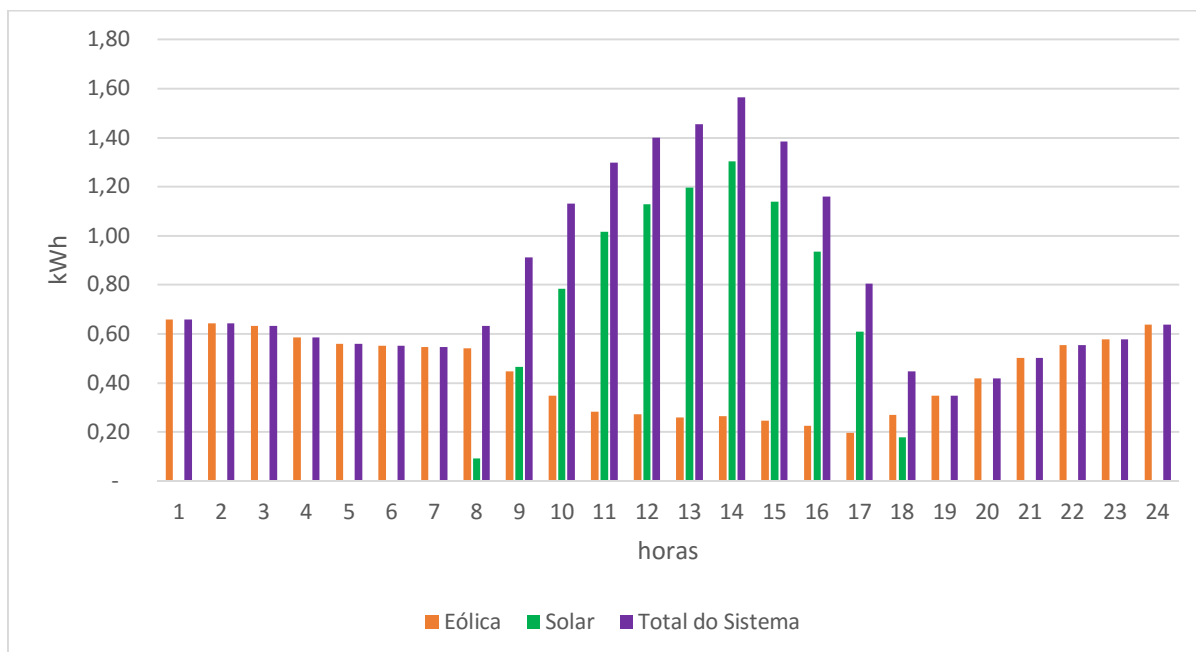
Para o inverno, os resultados obtidos estão dispostos na Tabela 11.

Tabela 11 – Produção de Energia do Inverno.

Inverno	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
EÓLICO[kWh]	0,658	0,643	0,632	0,585	0,559	0,551	0,545	0,541	0,446	0,347	0,281	0,272
SOLAR[kWh]	0	0	0	0	0	0	0,000	0,091	0,464	0,784	1,016	1,127
TOTAL[kWh]	0,658	0,643	0,632	0,585	0,559	0,551	0,546	0,632	0,910	1,131	1,297	1,399
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
EÓLICO[kWh]	0,258	0,263	0,245	0,223	0,196	0,269	0,346	0,417	0,500	0,552	0,576	0,636
SOLAR[kWh]	1,196	1,302	1,138	0,935	0,607	0,178	0	0	0	0	0	0
TOTAL[kWh]	1,454	1,564	1,383	1,159	0,802	0,447	0,346	0,417	0,500	0,552	0,576	0,636

No caso do inverno há uma inversão, agora, a geração eólica que tem maior produtividade, gerando no total do dia cerca de 10,54 kWh, enquanto a energia gerada pelo sistema solar ~~reduz significativamente, que reduziu significativamente, foi de para~~ 8,89 kWh, ~~e sendo a~~ produção total ~~deficou em~~ 19,378 kWh. Na comparação entre as fontes, fica mais claro como a energia eólica se sobrepôs, ficando responsável por 54,38% enquanto o sistema solar gerou 45,61% do total. Outra relação importante que foi mostrada é uma melhora significativa na produção total de energia, em relação ao outono, gerando na ordem de 14,3% a mais que o a estação anterior. A distribuição poderá ser melhor analisada na Figura 14.

Figura 14. Produção de Energia no Inverno



Neste caso, geração eólica, assim como no verão, sofre muitas oscilações abruptas. Contudo, elas acontecem nos mesmos horários onde a geração solar se inicia e cessa, fazendo que o comportamento da produção seja mais irregular.

Novamente, o horário das 19 h é onde ocorre o mínimo da produção de energia, mesmo com a maior participação do sistema eólico.

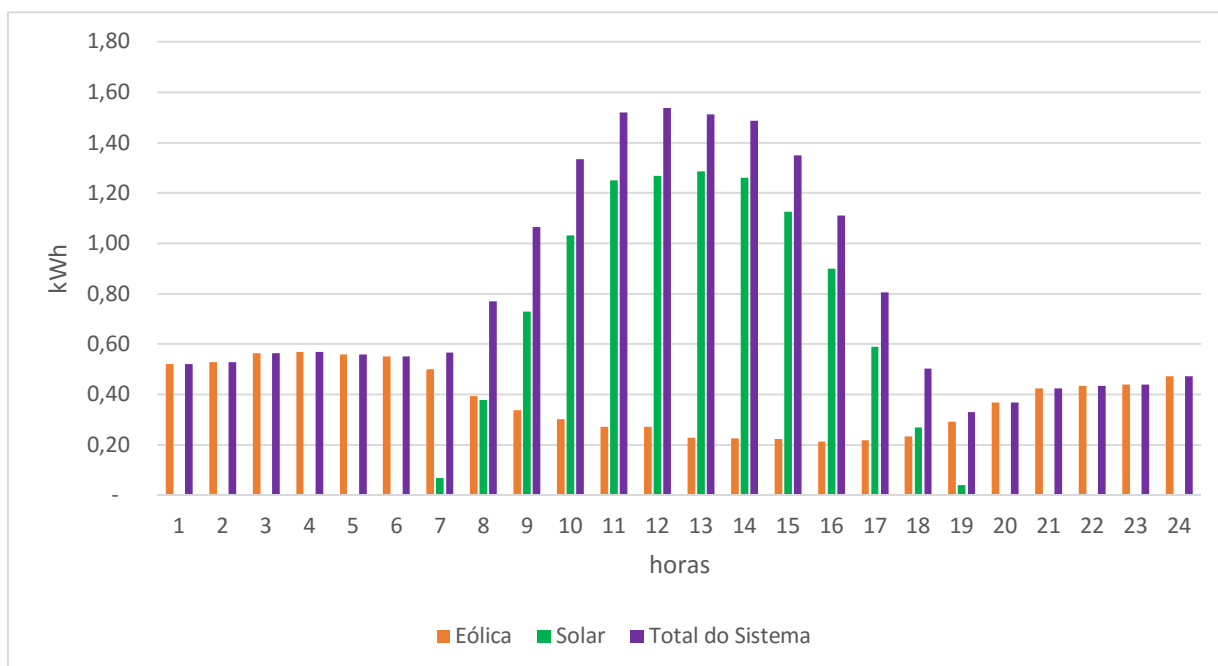
O último período de simulação é a primavera, cujos resultados estão dispostos na Tabela 12.

Tabela 12 – Produção de Energia na Primavera.

Primavera	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
EÓLICO[kWh]	0,521	0,528	0,562	0,567	0,559	0,550	0,498	0,393	0,335	0,300	0,269	0,270
SOLAR[kWh]	0	0	0	0	0	0	0,068	0,376	0,729	1,031	1,250	1,267
TOTAL[kWh]	0,521	0,528	0,562	0,567	0,559	0,550	0,566	0,769	1,064	1,332	1,519	1,537
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
EÓLICO[kWh]	0,227	0,226	0,222	0,212	0,216	0,233	0,291	0,367	0,422	0,432	0,438	0,471
SOLAR[kWh]	1,283	1,259	1,125	0,897	0,589	0,269	0,038	0	0	0	0	0
TOTAL[kWh]	1,511	1,485	1,347	1,109	0,805	0,501	0,329	0,367	0,422	0,432	0,438	0,471

Na primavera a produção de energia eólica soma 9,11 kWh, enquanto a produção de energia solar soma 10,182 kWh, e no sistema como um todo a soma 19,292 kWh. Nesta estação a participação das duas fontes volta a inverter, tendo o sistema solar a participação de 52,77% e a eólica de 47,22%. Importante salientar que a variação do inverno para a primavera foi muito baixa, cerca de 0,44%, ao mesmo tempo que as mudanças em torno da participação das fontes energéticas mudaram com certa importância, mesmo tendo-se a velocidade média do vento igual nas duas estações. Os fatores que podem ter sido decisivos para essa diferença é, a distribuição de Weibull dos ventos, que no inverno tem menor amplitude, e a temperatura do ambiente, visto que ela influencia diretamente na produção de energia. Segue a Figura 15.

Figura 15. Produção de Energia na Primavera



De maneira semelhante às outras estações, a primavera tem o horário de menor produção de energia localizado às 19 h. Contudo, esta condição é pouco

observada, pois não há, como no verão e no inverno, uma queda tão brusca. Outro fator possível de ser observado é como as mudanças são mais suaves, assim como no outono, estações de transição, onde a velocidade do vento é mais constante e não sofre tão rapidamente com a ação do sol.

## **8. CONCLUSÕES**

Após todas as simulações realizadas, é possível perceber como cada estação tem um comportamento único, e ao mesmo tempo similar as outras, podendo-se notar sazonalidades que influenciam de maneiras diferentes nas fontes de geração de energia.

Uma destas sazonalidades pode ser percebida ao se comparar o inverno e o verão. Os dois possuem um perfil de ventos muito similar, em termo de variação e em termos de picos e vales, contudo as suas participações dentro do sistema como um todo são diferentes. No inverno o sistema que tem maior participação é o eólico, tendo maior produção até pelas baixas temperaturas, enquanto no verão ocorre o inverso: a energia solar tem maior participação na matriz proposta, mesmo os perfis sendo similares.

No outono e na primavera os perfis de geração são bem mais suaves, apesar do outono apresentar a pior produção de energia, e de longe a pior produção de energia eólica, e a primavera ter uma produção de energia bem equilibrada. Os perfis de geração destas duas estações são muito similares, tendo a produção de energia eólica com poucos picos, e uma transição dos períodos de dia e noite mais atenuados.

Um detalhe que ocorreu em todas as simulações foi o ponto mínimo na produção de energia ocorrer as 19 h, havendo ligeiras variações. Este fato é de vital importância quando se compara este estudo à curva de demanda de energia elétrica, por se tratar do horário de pico. Sendo este o horário de maior consumo de energia e ao mesmo tempo o horário de menor produção de energia, este sistema pouco contribuiria para este problema que é enfrentado no setor energético, mantendo a necessidade de investimentos em usinas de geração tradicionais. Contudo, ao se introduzir este tipo de geração na sua matriz elétrica, além de educar os consumidores, agora geradores, sobre o consumo de energia consciente, os governos podem criar ferramentas para incentivar o consumo de energia em outros momentos do dia, diminuindo o consumo neste horário.

### **8.1. Trabalhos Futuros**

Ao fim deste estudo perceberam-se várias questões que ainda podem ser exploradas, uma delas é o redimensionamento das fontes de energia, para se obter um perfil de geração mais próximo do constante, visto que a produção de energia eólica é mais esparsa do que a produção de energia solar. Em outras palavras, se propõem que o sistema de geração eólico tenha a potência instalada duas vezes maior do que a potência instalada do sistema de geração solar.

Além disto, um novo estudo poderia comparar de maneira a empregar indicadores, como a forma deste perfil de geração se relaciona ao perfil de demanda diário de uma cidade, e como este perfil de demanda poderia ser influenciado, como por exemplo, no cálculo da demanda instantânea, que é realizado numa janela de

15 min. Após estes dois passos, seria válido fazer um estudo deste sistema sob a rede de distribuição usando esta simulação, e os estudos listados acima para poder simular o funcionamento da rede elétrica sob estas condições. Ao se fazer este estudo, pode-se entender a real participação que a geração distribuída pode ter para a rede elétrica, verificando as tensões na rede, a estabilidade, o fluxo de potência reativa, entre outros aspectos.

Por fim, um estudo econômico pode ser realizado visando avaliar se este sistema é viável financeiramente para o consumidor residencial, comercial, industrial e rural, visto que em cada um destes tipos são aplicadas tarifas diferentes, que variam pelo seu perfil de consumo.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica; **“Resolução Normativa Nº482/2012”**. Brasil, 2012.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica; **“Resolução Normativa Nº687/2015”**. Brasil, 2015.
- Boone, C; **“Despacho de Micro Geração em um Ambiente de Microrrede”**. Porto Alegre, 2013
- Belluco, A ; **“ Base para uma Metodologia de Dimensionamento de Aproveitamento Híbrido Baseado em Energias Hidrelétrica e Fotovoltaica”**, Porto Alegre, 2001
- CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica de Salvo Brito. **“Irradiação solar em Panabi RS.”** – disponível em <http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>. Acessado dia 13/09/2016
- Gasparin, F. P.; Krenzinger, A.; **“Desempenho de um Sistema Fotovoltaico em Dez Cidades Brasileiras com Diferentes Orientações do Painel”**. Brasil, 2016.
- Hecktheuer, L.A.; **“Análise de associação de módulos fotovoltaicos”**. Porto Alegre, 2001
- Hirata, M; Araujo, M. **“Introdução ao Aproveitamento de Energia Eólica”**. Rio de Janeiro, 2000
- Miranda, A. B. C. M.; **“Análise de Viabilidade Econômica de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede”**. Rio de Janeiro, 2014
- Pinho, J.T.; Galdino, M. A.; **“Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos”**. Rio de Janeiro, 2014.
- Petry, A; Mattuella, J; **“Análise de Potencial Eólico e Estimativa da Geração de Energia Empregando o “Software” Livre Alwin”**. Porto Alegre, 2007.
- Possebon, R; **“Avaliação do Desempenho de um Arranjo Fotovoltaico para uma Residência Típica do Sul do País”**. Porto Alegre, 2016.
- Roca, W; **“Dimensionamento de um Parque Eólico e sua Subestação, Comparando Ferramentas de CFD e Atlas Eólico ”**. Porto Alegre, 2015
- Twele, J; Gasch, R; **“Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation”**. Alemanha, 2002
- SMA Solar Technology AG. **“Datasheet Sunny Boy”**. Disponível em [http://www.elektropartners.nl/local\\_resources/file/SMA2500.pdf](http://www.elektropartners.nl/local_resources/file/SMA2500.pdf). Acesso em 03/10/2016.
- Canadian Solar. **“Datasheet Canadian CS6K – 260/265/270/275P”**. Disponível em [http://www.canadiansolar.com/fileadmin/user\\_upload/downloads/datasheets/v5.4/Canadian\\_Solar-Datasheet-CS6K-P-v5.4C2en.pdf](http://www.canadiansolar.com/fileadmin/user_upload/downloads/datasheets/v5.4/Canadian_Solar-Datasheet-CS6K-P-v5.4C2en.pdf) . Acessado em 03/10/2016
- Skystream Energy. **“Skystream 3.7 Owner’s Manual ”** Disponível em <http://pdf.wholesalesolar.com/wind%20pdf%20folder/skystreamOwnerManual.pdf> Acessado em 04/10/2016

## 10. APÊNDICE

### Apêndice I

Verão: Rugosidade = 0,03921 m

HORA	VELOCIDADE (100m)	VELOCIDADE (18m)	A	C	Temp.
1	7,8	6,1	6,7	3,3	23,5
2	7,8	6,1	6,8	3,4	23,2
3	7,8	6,1	6,7	3,2	22,9
4	7,9	6,2	6,9	3,3	22,6
5	7,9	6,2	6,8	3,4	22,4
6	8,2	6,4	7,1	3,6	22,2
7	8,2	6,4	7,2	3,4	22,1
8	7,6	6,0	6,6	3,3	22,0
9	6,8	5,3	5,9	3,0	22,4
10	6,3	4,9	5,5	2,5	23,3
11	6,2	4,9	5,4	2,4	24,4
12	6,2	4,8	5,4	2,4	25,3
13	6,0	4,7	5,2	2,4	26,0
14	5,8	4,5	5,0	2,5	26,6
15	5,6	4,4	4,9	2,6	27,0
16	5,5	4,3	4,7	2,5	27,1
17	5,2	4,1	4,5	2,4	27,0
18	5,1	4,0	4,4	2,1	26,7
19	5,1	4,0	4,4	2,2	26,3
20	5,7	4,5	5,0	2,1	25,6
21	6,5	5,1	5,7	2,3	24,9
22	7,0	5,4	6,0	2,5	24,4
23	7,2	5,6	6,3	2,8	23,9
24	7,5	5,8	6,5	3,0	23,7

Outono: Rugosidade = 0,6265 m

HORA	VELOCIDADE(100m)	VELOCIDADE(18m)	A	C	Temperatura [°C]
1	5,1	5,7	2,7	17,3	5,1
2	5,3	5,9	2,8	17,1	5,3
3	5,5	6,1	2,8	16,9	5,5
4	5,4	6,0	2,7	16,7	5,4
5	5,4	6,0	2,6	16,4	5,4
6	5,3	5,8	2,6	16,2	5,3
7	5,1	5,7	2,6	16,2	5,1

8	5,0	5,6	2,6	16,2	5,0
9	4,8	5,3	2,6	16,2	4,8
10	4,4	4,9	2,4	16,6	4,4
11	4,2	4,6	2,4	17,3	4,2
12	3,9	4,4	2,3	18,2	3,9
13	3,8	4,3	2,3	19,0	3,8
14	3,8	4,2	2,2	19,7	3,8
15	3,6	4,0	2,2	20,1	3,6
16	3,8	4,2	2,2	20,3	3,8
17	3,9	4,3	2,3	20,2	3,9
18	4,2	4,6	2,5	19,8	4,2
19	4,3	4,8	2,5	19,3	4,3
20	4,6	5,1	2,6	18,9	4,6
21	4,8	5,3	2,5	18,4	4,8
22	5,0	5,5	2,5	18,0	5,0
23	4,9	5,5	2,5	17,7	4,9
24	5,1	5,7	2,6	17,5	5,1

Inverno : Rugosidade = 0,796

HORA	VELOCIDADE (100m)	VELOCIDADE (18m)	A	C	Temperatura [°C]
1	9,8	6,4	7,1	3,4	17,5
2	9,7	6,3	7,0	3,3	17,2
3	9,6	6,3	6,9	3,2	16,9
4	9,3	6,0	6,7	3,0	16,5
5	9,1	5,9	6,6	2,9	16,3
6	9,0	5,9	6,5	2,8	16,1
7	9,0	5,8	6,5	2,6	16,0
8	8,9	5,8	6,4	2,5	16,0
9	8,2	5,3	5,9	2,5	16,0
10	7,4	4,8	5,3	2,6	16,4
11	6,7	4,4	4,9	2,4	17,3
12	6,5	4,3	4,7	2,2	18,2
13	6,5	4,2	4,7	2,4	19,1
14	6,4	4,2	4,6	2,1	19,7
15	6,2	4,1	4,5	2,2	20,1
16	6,0	3,9	4,4	2,3	20,4
17	5,7	3,7	4,1	2,4	20,3
18	6,7	4,4	4,9	2,8	19,8
19	7,5	4,9	5,4	3,0	19,3
20	8,2	5,3	5,9	3,2	18,9
21	8,8	5,7	6,3	3,2	18,7
22	9,1	5,9	6,6	3,3	18,4
23	9,3	6,0	6,7	3,3	18,2

24	9,7	6,3	7,0	3,3	17,9
----	-----	-----	-----	-----	------

Primavera: Rugosidade = 0,53

HORA	VELOCIDADE (100m)	VELOCIDADE (18m)	A	C	Temperatura [°C]
1	8,6	5,8	6,5	3,5	21,3
2	8,6	5,8	6,5	3,1	21,1
3	8,8	6,0	6,6	3,1	20,9
4	8,9	6,0	6,7	3,3	20,5
5	8,8	6,0	6,7	3,5	20,2
6	8,8	6,0	6,6	3,5	20,1
7	8,5	5,7	6,4	3,5	20,0
8	7,7	5,2	5,8	3,4	20,1
9	7,1	4,8	5,4	3,0	20,9
10	6,8	4,6	5,1	2,9	22,0
11	6,5	4,4	4,9	2,7	23,2
12	6,4	4,4	4,8	2,5	24,1
13	6,0	4,1	4,5	2,6	25,0
14	6,0	4,1	4,5	2,6	25,6
15	5,9	4,0	4,5	2,5	26,0
16	5,8	3,9	4,4	2,5	26,1
17	5,9	4,0	4,4	2,6	26,0
18	6,1	4,2	4,6	2,9	25,7
19	6,7	4,5	5,0	2,7	25,1
20	7,4	5,0	5,6	3,0	24,4
21	7,9	5,3	5,9	2,9	23,5
22	7,9	5,4	6,0	2,9	22,8
23	8,0	5,4	6,0	2,9	22,2
24	8,2	5,6	6,2	3,2	21,7



