

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CÂMPUS CORNÉLIO PROCÓPIO  
DIRETORIA DE GRADUAÇÃO E EDUCAÇÃO PROFISSIONAL  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

DIEGO BRAZ DA SILVA

**ANÁLISE DE RECURSOS ENERGÉTICOS EM MICROREDES  
INTELIGENTES**

CORNÉLIO PROCÓPIO

2017

**DIEGO BRAZ DA SILVA**

**ANÁLISE DE RECURSOS ENERGÉTICOS EM MICROREDES  
INTELIGENTES**

Proposta para Trabalho de Conclusão de  
Curso em Engenharia Elétrica, do  
Departamento Acadêmico de Engenharia  
Elétrica, da Universidade Tecnológica  
Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Renan Durand

**CORNÉLIO PROCÓPIO**

**2017**



**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
**Campus Cornélio Procópio**  
**Departamento de Engenharia Elétrica**  
**Curso de Engenharia Elétrica**



## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Diego Braz da Silva**

### **ANÁLISE DE RECURSOS ENERGÉTICOS EM MICROREDES INTELIGENTES**

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 13:30hs do dia 27/11/2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof(a). Dr(a). Fábio Renan Durand - Presidente (Orientador)

---

Prof(a). Dr(a). Paulo Rogério Scalassara - (Coorientador)

---

Prof(a). Dr(a). Murilo da Silva - (Membro)

---

Prof(a). Dr(a). Emerson Ravazzi Pires da Silva - (Membro)

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Fabio Renan Durand, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

Aos meus colegas de sala.

Gostaria de deixar registrado também, o meu agradecimento a minha família que me deu o maior apoio durante todos esses anos dessa jornada.

E agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a realização dessa grande conquista.

## RESUMO

Este trabalho tem como proposta analisar a arquitetura de uma microrrede, bem como o seu modelamento, para duas cidades com perfis climáticos diferentes. A cidade de Natal, Rio Grande do Norte, que possui grande quantidade de insolação solar e alta velocidade de seus ventos durante o ano todo e São Martinho da Serra, Rio Grande do Sul, que possui média insolação solar e ventos fracos durante o ano. O modelo escolhido consiste em 3 unidades geradoras de energia, sendo elas: painéis fotovoltaicos, aero geradores e geradores a diesel, esse último com a função de garantir que a carga demanda seja sempre atendida. O sistema também possui um banco de baterias, com a função de armazenar o excedente de energia gerada e suprir a carga em momentos de baixa geração.

**Palavras-chave:** Microredes, energias renováveis, banco de baterias, análise.

## ABSTRACT

This work has the project to analyze an architecture of a microgrid, as well as its model, for two cities with different climatic profiles. A city is Natal, Rio Grande do Norte, which has large amounts of solar insolation and high speed of its winds, and São Martinho da Serra, Rio Grande do Sul, which has means of solar insolation and weak winds during the year. The model chosen has 3 energy generating units, being: photovoltaic panels, aero generators and diesel generators, the latter with a function of ensuring that a service load always met. The system also has a battery bank, with a function of storing the surplus energy generated and supplying a load in times of low generation.

**Keywords:** Microgrid, renewable energies, battery bank, analysis.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1 - Arquitetura da micro rede.....</b>	<b>13</b>
<b>Figura 2 - Vista dos geradores fotovoltaicos da Usina Solar de Tauá.....</b>	<b>15</b>
<b>Figura 3 - Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaico.....</b>	<b>16</b>
<b>Figura 4 -Turbinas eólicas de eixo horizontal.....</b>	<b>19</b>
<b>Figura 5 - Perfil de carga.....</b>	<b>24</b>
<b>Figura 6 - Resultados da Validação de dados de Natal em 2015.....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 7 - Velocidade e direção do vento de Natal, janeiro de 2015. ....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 8 - Resultados da Validação de dados de São Martinho da Serra em 2015. .....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 9 - Velocidade e direção do vento de São Martinho da Serra, janeiro de 2015.....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 10 - Fluxograma do algoritmo.....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 11 - Potência média gerada dos painéis fotovoltaicos em Natal.....</b>	<b>35</b>
<b>Figura 12 - Potência gerada em um dia dos painéis fotovoltaicos em Natal. ...</b>	<b>35</b>
<b>Figura 14 - Potência média em um dia dos painéis fotovoltaicos em São Martinho da Serra. ....</b>	<b>36</b>
<b>Figura 13 - Potência média gerada dos painéis fotovoltaicos em São Martinho da Serra. ....</b>	<b>36</b>
<b>Figura 15 - Potência média gerada pelos aero geradores em Natal.....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 16 - Potência gerada em um dia pelos aero geradores em Natal. ....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 17 - Potência média gerada pelos aero geradores em São Martinho da Serra. ....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 18 - Potência gerada em um dia pelos aero geradores em São Martinho da Serra. ....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 19 - Consumo do gerador a diesel em um dia na cidade de Natal. ....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 20 - Consumo do gerador a diesel em um dia na cidade de São Martinho da Serra. ....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 21 - Descarga da bateria em um dia na cidade de Natal .....</b>	<b>42</b>
<b>Figura 22 - Descarga da bateria em um dia na cidade de São Martinho da Serra .....</b>	<b>42</b>
<b>Figura 23 - Porcentagem da energia provida pelos Painéis fotovoltaicos, aero geradores, geradores a diesel e banco de baterias durante um ano na cidade de Natal.....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 24 - Porcentagem da energia provida pelos Painéis fotovoltaicos, aero geradores, geradores a diesel e banco de baterias durante um ano na cidade de São Martinho da Serra.....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 25 - Potência total gerada em Natal 2015. ....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 26 - Potência total gerada em São Martinho da Serra 2015. ....</b>	<b>45</b>

## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	9
1.1. SISTEMA ELÉTRICO DE ENERGIA .....	9
1.2. PROBLEMA .....	10
1.3. JUSTIFICATIVA .....	10
1.4. OBJETIVOS .....	11
1.4.1. Objetivo Geral .....	11
1.4.2. Objetivos Específicos .....	11
<b>2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b> .....	12
2.1 GERAÇÃO DISTRIBUIDA .....	12
2.2 MICROREDES .....	12
2.2.1 Unidades de geração .....	14
2.2.1.1 Energia solar .....	14
2.2.1.1.1 Modelamento PV .....	17
2.2.1.2 Energia eólica .....	18
2.2.1.2.1 Modelamento do Aero Gerador .....	19
2.2.1.3 Geradores a Diesel .....	20
2.2.1.3.1 Modelamento gerador a diesel .....	21
2.2.1.4 Armazenamento de energia .....	21
2.2.1.4.1 Modelamento da bateria .....	22
2.2.1.5 Consumidores .....	23
2.2.2 Operações em microrredes .....	24
2.3 SMART GRID .....	25
2.3.1 Segurança em Smart Grid .....	25
<b>3. MÉTODO DE PESQUISA</b> .....	27
3.1 LOCALIDADES .....	27
3.2 ANÁLISE DOS DADOS DISPONÍVEIS .....	28
3.3 FUNCIONAMENTO DO ALGORITMO .....	31

3.3 ESTRATEGIA DE GESTÃO DE ENERGIA .....	32
<b>4 RESULTADOS</b> .....	<b>34</b>
4.1 PAINES FOTOVOLTAICOS .....	34
4.2 AERO GERADORES.....	37
4.3 GERADOR A DIESEL .....	40
4.4 BATERIAS.....	41
4.5 ANALISE DOS RESULTADOS.....	43
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	<b>47</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>48</b>

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. SISTEMA ELÉTRICO DE ENERGIA

A energia elétrica é a principal fonte de energia da sociedade desde o século XIX. Ela é usada como fonte de iluminação, transporte e força motriz para diversos setores industriais. Entretanto, nem todos têm acesso a essas comodidades e benefícios gerados pelo uso dessa energia, seja por estarem situados em regiões mais afastadas dos grandes centros populacionais ou por condições econômicas. O custo para atender estes locais pode inviabilizar a instalação de redes elétricas, pelo alto valor de investimento a ser realizado e pelos altos custos operacionais se comparados à grandes centros urbanos (LEÃO, 2009). Entretanto, os recursos energéticos renováveis de energia como a energia eólica e a energia solar, são abundantes em todo o globo, sendo consideradas como energia limpa e são de fácil acesso. Neste contexto, fontes de energia renováveis formando um sistema de microrede HMGS (*Hybrid Micro Grid System*), são uma excelente solução com um baixo custo para atender locais isolados (BORHANAZAD et al., 2014).

Para um melhor desempenho da rede, normalmente são acrescentados outros elementos como geradores a diesel e sistemas de armazenamento de energia para horários de excedente de produção ou falta de energia das fontes renováveis. Todos esses elementos se ligam através de uma rede, de modo que os componentes possam ser colocados em qualquer local ou propriedade, tornando o sistema facilmente expansível (BORHANAZAD et al., 2014).

Assim é possível a concepção de diferentes arquiteturas de microrredes, como proposto por KEDARE (2009), onde é proposto uma combinação de um sistema de baterias e geradores eólicos, usando um design apropriado para otimizar o espaço. O sistema também inclui auto cargas CA (Corrente Alternada) e CC (Corrente Contínua) para alimentar as cargas. BORHANAZAD et al. (2014) propuseram dois métodos híbridos para pequenos sistemas de energia *off-grid* que consistem em painéis fotovoltaicos, turbinas de vento e micro fontes hídricas.

As HMGS precisam ser devidamente avaliadas no seu estado inicial para escolher da melhor forma os componentes de seus elementos, amenizando os possíveis impactos socioeconômicos e ambientais. Assim, os conhecimentos de

todos os fatores que influenciarão o desempenho do sistema e um dimensionamento preciso é o principal desafio do seu desenvolvimento (BORHANA ZAD et al., 2014).

## 1.2. PROBLEMA

Atualmente, existem muitas pesquisas e estudos sobre as microrredes sendo propostas arquiteturas e modelos distintos. Desta forma, considerando a evolução do entendimento dos elementos que compõem as microrredes, ainda existem vários aspectos que necessitam de investigação em função da integração destes elementos. Neste sentido, verifica-se que além das fontes de geração e consumo de energia, as microrredes são compostas de elementos de controle, supervisão, comunicação e gerenciamento, com intuito de tornar as microrredes inteligentes. Assim, a modelagem da integração das fontes de recursos energéticos com os demais elementos da microrrede, bem como a simulação do funcionamento da microrrede, de acordo com a disponibilidade das fontes de recursos energéticos, são de extrema importância para o desenvolvimento das microrredes.

## 1.3. JUSTIFICATIVA

A principal justificativa de estudo é o fato que microrredes beneficiam-se de fontes alternativas de energia, que possuem menor impacto ambiental e maior eficiência por estar próxima a carga gerando menores perdas. A geração distribuída também permite um melhor dimensionamento das fontes geradoras para melhor atender a carga demandada já estabelecida. Desta forma, o estudo na área de microrredes e redes inteligentes, poderá ser um caminho para conseguir uma maior eficiência energia para as redes públicas.

## 1.4. OBJETIVOS

Este tópico tem o propósito de apresentar o objetivo geral do trabalho, bem como os objetivos específicos que serão alcançados ao longo do estudo.

### 1.4.1. Objetivo Geral

O objetivo geral desse trabalho é a modelagem de uma microrede, utilizando o conceito de redes inteligentes, considerando as características das fontes de recursos energéticos. Desta forma, busca-se realizar a simulação do processo de geração, consumo e armazenamento de energia, de acordo com modelos que considerem o maior número de particularidades das fontes de recursos energéticos utilizadas, tendo em vista o impacto destas fontes nos projeto de microredes.

### 1.4.2. Objetivos Específicos

- Implementar, simular e analisar os modelos matemáticos de fontes geradoras de energia como o gerador a diesel, turbina eólica e painel fotovoltaico considerando a integração nos modelos de microredes;
- Implementar, simular e analisar os modelos matemáticos de fontes consumidoras e sistemas de armazenamento de energia considerando a integração nos modelos de microredes;
- Implementar, simular e analisar os modelos matemáticos considerando geração, consumo e armazenamento de energia integrados ao conceito de microredes.

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1 GERAÇÃO DISTRIBUIDA

Denomina-se geração distribuída, a geração de energia elétrica descentralizada no local ou próximo as unidades de consumo, como exemplo, em proximidades de áreas residências e indústrias com pequenas centrais de geração. A eficiência das centrais de geração é normalmente concebida apenas para atender as necessidades de energia dos consumidores que estão conectados diretamente ao sistema ou em suas proximidades para tentar otimizar ao máximo a produção de energia, pois quanto maior e mais diversificada a quantidade de cargas no sistema, maior será a complexidade necessária para atender as mesmas. Também existem as redes ilhadas, que são pequenas redes que possuem geração e consumo em uma menor escala que estão em locais remotos, não conectados as redes de eletricidades pública (BARBOZA FILHO, 2014).

A maior vantagem na geração distribuída é a redução das perdas por transporte, conhecida por efeito Joule, se comparado com grandes centrais de geração convencionais. Outro fator importante, é o aumento da estabilidade e confiabilidade do sistema, pois o sistema possui uma quantidade reduzida de perdas e uma geração diversificada (BARBOZA FILHO, 2014).

### 2.2 MICROREDES

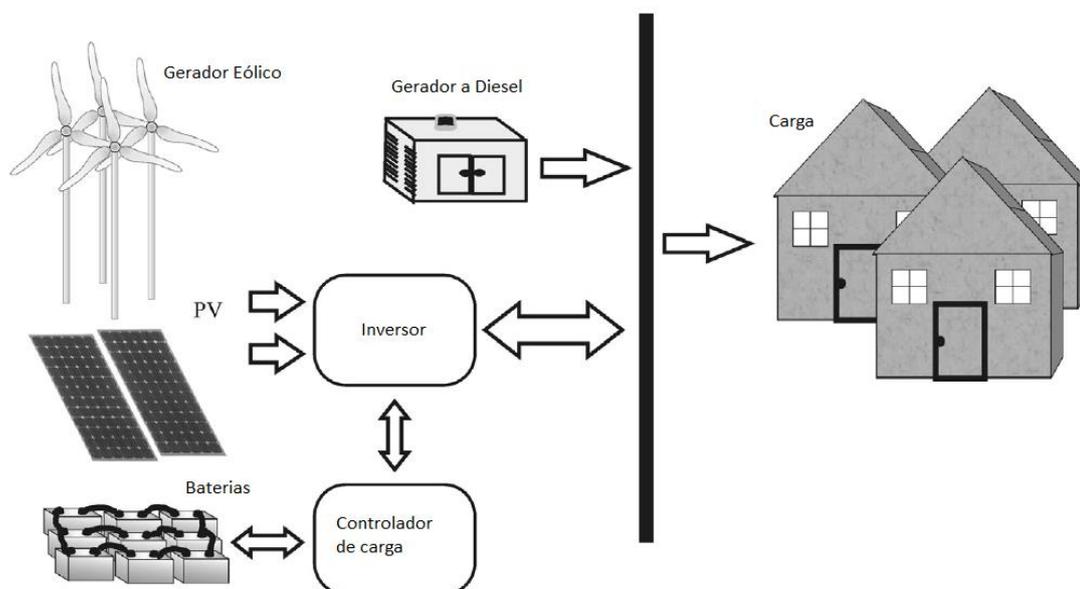
Durante anos a geração e distribuição de energia foi feita para atender preferencialmente grandes consumidores, como indústrias e grandes cidades. Vários fatores como a confiabilidade do fornecimento de energia, aspectos ambientais e restrições econômicas forçaram os fornecedores de energia e usuários finais a recorrer a outras formas de fornecimento de energia fora da rede principal. Criando-se assim, dentro da geração distribuída, o conceito de microredes (DA SILVA, 2014).

As microredes são capazes de integrar as fontes de energia renováveis, reduzir custos e melhorar a confiabilidade do fornecimento. Além disso, elas podem ser usadas para servir como reserva de energia para fortalecer a rede em períodos de pico de carga. A diminuição dos custos com usinas de geração renováveis, tais

como sistemas fotovoltaicos e energia eólica, sistemas eficientes de armazenamento de energia e a disponibilidade de uma infraestrutura de comunicação de longo alcance acessível, contribuem para que as microrredes sejam viáveis e rentáveis (BARBOZA FILHO, 2014).

Uma microrrede é um sistema integrado de energia com unidades de geração descentralizadas, armazenamento de energia e uma grande quantidade de equipamentos elétricos como consumidores. Segundo essa definição, pode-se ter várias formas de produção, armazenamento e conectividade de rede bem como tamanhos diferentes. Conseqüentemente, as microrredes podem se distinguir muito uma da outras. A Figura 1 mostra uma estrutura típica, bem como, seus principais componentes (POMILIO, 2002).

**Figura 1 - Arquitetura da micro rede**



**Fonte: Adaptado de BORHAANAZAD et al. (2014 p.5)**

## 2.2.1 Unidades de geração

Como já dito anteriormente, existem alguns elementos que compõem uma microrede. Um dos seus elementos mais importantes e atrativos é o uso de fontes de energia renováveis como unidades geradoras. Essas fontes podem ser provenientes de diferentes meios, tais como: painéis fotovoltaicos, energia eólica, energia solar na forma de aquecimento e biocombustível. Também é comum utilizar geradores a diesel para providenciar maior segurança a rede em caso de falhas (PINHO, 2014).

### 2.2.1.1 Energia solar

A energia solar ser utilizada em cima de telhados de prédios, apartamentos, casas ou até mesmo em grandes parques de geração de energia, possui uma larga escala de implementação em diferentes locais. No período de 35 anos atrás, o estado de tecnologia era impensável para o uso pela população, sendo somente utilizada em viagens espaciais. Hoje, a energia solar é uma ocorrência diária, sendo utilizadas em sistemas de aquecimento em telhados, sistemas de iluminação e até mesmo como grande centrais de geração de energia (DIENSTMANN, 2009).

Um sistema de energia solar, ou fotovoltaico, faz com que seja possível converter a luz solar diretamente em eletricidade. Esta conversão é denominada efeito fotovoltaico, isto é, a interação entre a luz solar irradiada e um material semicondutor dopado. Isto conduz a libertação de elétrons, que são removidos por meio de contatos metálicos. A corrente gerada pode ser utilizada através de um inversor juntamente com um transformador de corrente. O principal elemento de um gerador solar é a célula solar ou fotovoltaica. Elas consistem normalmente de silício de elevada pureza e tem um comprimento médio de 10-20cm. Várias células solares são combinadas para formar uma unidade elétrica, ou módulo solar. A Figura 2 mostra uma usina de painéis fotovoltaicos em Tauá (PINHO, 2014).

**Figura 2 - Vista dos geradores fotovoltaicos da Usina Solar de Tauá.**

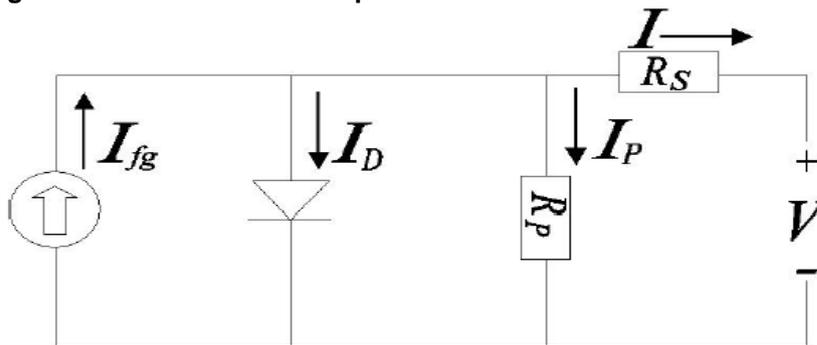


**Fonte: PINHO (2014)**

Existem inúmeros modos de representar uma célula fotovoltaico, sendo que na grande maioria dos casos é utilizado o modelo de 1 diodo. Este modelo pode sofrer variações, mudando assim alguns parâmetros para o modelo adaptar-se da melhor maneira ao caso de estudo (BÜHLER, 2007).

No modelo de 1 diodo, a radiação incidente sobre as células fotovoltaicas gera uma corrente elétrica pelo efeito fotovoltaico. Para esse modelo, a célula é representada por um gerador de corrente contínua. Um diodo representa a junção PN que é responsável pela corrente de saturação reversa e pelo fator de idealidade. A resistência dos materiais das células e nas ligações geram uma queda de tensão que é representada por uma resistência em série  $R_s$  e para representar uma fuga de corrente, é adicionado um resistor em paralelo  $R_p$  (BÜHLER, 2007). A Figura 3 ilustra o circuito elétrico equivalente para uma célula fotovoltaica para o modelo de 1 diodo.

Figura 3 - Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaico



Fonte: BÜHLER (2007)

Assim, é possível obter a equação que relaciona a corrente gerada ( $I$ ) com as correntes de fuga ( $I_p$ ), corrente do diodo ( $I_D$ ) e a corrente elétrica foto gerada ( $I_{fg}$ ).

$$I = I_{fg} - I_D - I_p \quad (1)$$

Como Pierret (1996) deduziu, a corrente do diodo é definida em função das tensões em seus terminais por:

$$I_D = I_0 \left\{ \exp \left[ \frac{e(V+IR_S)}{mk_B T} \right] - 1 \right\} \quad (2)$$

Sendo,  $I_0$  a corrente de saturação reversa,  $e$  é a carga do elétron,  $m$  é o fator de idealidade do diodo,  $K_B$  é a constante de Boltzmann,  $T$  é a temperatura,  $V$  é a tensão e  $R_S$  é a resistência em série.

Assim, é possível substituir a Equação (2) na Equação (1) e com as devidas considerações quanto a corrente que flui pelo resistor paralelo, tem-se a Equação (3) que relaciona a corrente elétrica gerada na célula fotovoltaica em função da tensão em seus terminais e de sua temperatura.

$$I = I_{fg} - I_0 \left\{ \exp \left[ \frac{e(V+IR_S)}{mk_B T} \right] - 1 \right\} - \frac{V+IR_S}{R_p} \quad (3)$$

### 2.2.1.1.1 Modelamento PV

Nesta seção serão abordados os aspectos que serão considerados no modelamento matemático dos painéis fotovoltaicos e as principais considerações que serão utilizadas.

Para calcular a potência fornecida por um conjunto de painéis fotovoltaicos em determinado momento  $t$  é necessário saber a eficiência dos painéis fotovoltaicos ( $\eta$ ), a área total ocupada pelo conjunto dos painéis em  $m^2$  ( $A$ ) e a insolação incidente naquele local em  $kW/m^2$  ( $I_i$ ). Assim, obtém-se a seguinte fórmula (COELHO, 2015).

$$P_{PV}(t) = \eta_{PV} \cdot A_{PV} \cdot I_i(t) \quad (4)$$

Entretanto, a radiação solar tem um comportamento instável, devido as mudanças do clima como o sombreamento, temperatura e a luz solar. De modo geral, os sistemas solares usam dados de observação da radiação direta, dados que são formas de medição indireta derivados de dados de temperatura, humidade e outros fatores ambientais. Também poderá utilizar dados da radiação solar média de uma região. Essas abordagens podem acarretar em erros durante longos períodos por não levar em consideração os fatores climáticos que influencia a radiação solar.

Nesse trabalho será considerado um modelo proposto por TAEHONG (2015). Esse modelo leva em consideração a variabilidade do clima para um modelo que utiliza dados de radiação média. Esse modelo tem por base o modelo de céu simples (KANG, 2013) que se caracteriza pelos parâmetros de irradiação solar de pico ( $S_{max}$ ), o tempo do nascer do sol ( $t_{rise}$ ), e o tempo do pôr do sol ( $t_{set}$ ) da seguinte maneira:

$$I_{simple\ sky} = \begin{cases} 0, & t \leq t_{rise} \\ S_{max} \cdot \text{sen} \left( \frac{\pi(t-t_{rise})}{t_{set}-t_{rise}} \right), & t_{rise} < t < t_{set} \\ 0, & t \geq t_{set} \end{cases} \quad (5)$$

Esse modelo é formado por uma única onda senoidal e não considera os efeitos da variação do clima. A adição de múltiplas ondas senoidais com diferentes magnitudes,

são consideradas para representar os efeitos da variação do clima (TAEHONG, 2015).

$$I_{cloudy\ sky} = S_{max} sen\left(\frac{\pi(t-t_{rise})}{t_{set}-t_{rise}}\right) \left(1 - a_1 * \left[sen\left(b_1 * \frac{\pi(t-t_{rise})}{t_{set}-t_{rise}}\right)\right]^{c_1} - a_2 * \left[sen\left(b_2 * \frac{\pi(t-t_{rise})}{t_{set}-t_{rise}}\right)\right]^{c_2}\right), t_{rise} < t < t_{set} \quad (6)$$

Onde  $a_1$  e  $a_2$  são as quantidades da variação solar;  $b_1$  e  $b_2$  são as frequências das alterações do clima e  $c_1$  e  $c_2$  são as taxas da variação do clima. Os índices 1 e 2, representam respectivamente longos e curtos períodos de variações de tempo.

### 2.2.1.2 Energia eólica

O uso da energia eólica provavelmente começou a milhares de anos pela construção de barcos a vela, onde a energia eólica era utilizada como energia cinética do vento para permitir locomoção. Os primeiros moinhos de vento foram construídos na Pérsia, no século VII, cuja construção e princípio de ação era semelhante aos os séculos posteriores. A primeira usina de geração de energia elétrica foi criada nos anos de 1887-1888 nos EUA por Charles F. Brush. O sistema é composto por um de eixo horizontal com 144 pás de rotos com um diâmetro de 17 m que gerava 12 kW de potência. (POMILIO, 2002).

Durante a Segunda Guerra mundial, foi na Dinamarca que pela primeira vez os sistemas de duas e três pás foram construídos, muito semelhantes com as turbinas eólicas hoje existentes. O uso da energia eólica só foi despertado durante a crise do petróleo de 1973, onde foram criados os modelos que são utilizados até hoje, com turbinas com diâmetros de 80m e potência nominal de 2,5 MW (POMILIO, 2002).

Existem várias formas de construção de uma turbina eólica, sendo que hoje a forma mais eficaz é a de eixo horizontal, em que o vento sopra frontalmente pelas pás rígidas, assim é gerado um empuxo nas pás e o giro. As turbinas de duas pás são mais eficientes, mas acabam sendo mais instáveis e propensas a turbulência, tornando assim o modelo de 3 pás o mais utilizado. Na Figura 4, é mostrado um parque eólico constituído por turbinas de eixo horizontais (POMILIO, 2002).

**Figura 4 -Turbinas eólicas de eixo horizontal.**



Fonte: POMILIO (2002)

#### 2.2.1.2.1 Modelamento do Aero Gerador

A energia mecânica de rotação das turbinas eólicas é gerada através de captura de parte da energia cinética dos ventos que passam pelas hélices do rotor. Essa energia mecânica aciona o gerador elétrico e transforma parte dessa energia em energia elétrica (RÜNCOS *et al*, 2000). A potência elétrica gerada em watts é uma função da velocidade ao cubo do vento, e é dada pela Equação (7).

$$P = \frac{1}{2} \eta_{ag} \cdot C_p \cdot \gamma \cdot (\pi R^2) \cdot v^3 \quad (7)$$

Sendo que  $\eta_{ag}$  representa a eficiência do aero-gerador,  $C_p$  representa o coeficiente aerodinâmico de potência do rotor, o termo  $\gamma$  representa a massa específica do ar,  $R$  representa o raio do rotor da turbina em metros e  $V$  a velocidade dos ventos em metros por segundo.

Ventos com velocidade muito baixa, não são fortes o bastante para gerar energia. Assim, ventos que forem menor do que a velocidade de corte inicial  $V_{ci}$ , não gerarão energia. A medida que a velocidade dos ventos aumenta acima da velocidade de corte, a potência fornecida pelo gerador tende a crescer equivalente ao cubo da velocidade do vento até a velocidade atingir sua velocidade nominal  $V_r$ , para qual o gerador foi projetado gerando uma potência nominal  $P_r$ . A velocidade do vento poderá aumentar até uma velocidade de corte final  $V_{co}$ , onde o gerador deverá ser desligado, pois essas velocidades podem danificar o aparelho.

Matematicamente, o comportamento da geração de energia eólica pode ser expressado como:

$$P_w = \begin{cases} 0 & v(t) \leq V_{ci} \text{ ou } v(t) \geq V_{co} \\ P_r \frac{v^3(t) - V_{ci}^3}{V_r^3 - V_{ci}^3} & V_{ci} < v(t) < V_r \\ P_r & V_r < v(t) < V_{co} \end{cases} \quad (8)$$

Onde  $v(t)$  é a velocidade do vento do tempo  $t$ .

### 2.2.1.3 Geradores a Diesel

Um gerador a diesel nada mais é que um motor a diesel que move um gerador de energia elétrica. Assim, dispositivos elétricos podem ser operados em locais onde não há eletricidade. Um gerador a diesel permite a utilização de equipamentos elétricos em qualquer localização, sendo que comumente eles também são usados como geradores de emergência em hospitais, frigoríficos, ou qualquer outro processo ou local onde a falta de energia elétrica pode ocasionar grandes prejuízos (LIMA, DA SILVA, 2012).

O funcionamento de um gerador a Diesel é semelhante a um motor elétrico. O campo magnético é definido como sendo a armadura do motor, que nada mais é que um eletroímã, em princípio. Uma vez que uma corrente elétrica flui através do enrolamento, a polaridade do imã é alterada. E, então, a cada meia volta, a polaridade muda de novo, de modo que ocorre uma rotação uniforme. Este princípio também funciona inversamente. Isto é, quando o motor elétrico é rotacionado mecanicamente, uma corrente elétrica é gerada. Então, essa energia gerada poderá ser usada para operar outro equipamento elétrico. Um gerador a diesel é, em princípio, um motor elétrico acionado por um motor a diesel (LIMA, DA SILVA, 2012).

O rendimento do motor a Diesel está entre 36 a 41% para combustíveis comerciais com poder calorífico típico de 10500 kcal/kg. O consumo específico está em torno de 0,26 litros por KW/h gerado em regime de carga a partir de dos 70% de sua capacidade nominal, sendo que o gerador não deve operar com cargas inferiores a 30% de sua capacidade nominal (LIMA, DA SILVA, 2012).

### 2.2.1.3.1 Modelamento gerador a diesel

O gerador a diesel desempenhará o papel de atender as cargas em horário de pico caso ocorra o esgotamento da bateria, deixando assim o sistema mais confiável e seguro. O gerador a diesel deverá ser dimensionado para que seu consumo de combustível seja o mais eficiente possível para poder abastecer o sistema da rede inteligente. A eficiência do consumo de combustível pode ser calculada da seguinte maneira (BORHANAZAD et al., 2014):

$$q(t) = a.P(t) + b.P_r \quad (9)$$

Onde  $q(t)$  é o consumo de combustível (L/h),  $P(t)$  é a potência gerada (kW),  $P_r$  é taxa de potência, já os parâmetros  $a$  e  $b$  são constantes (L/kW), que representam os coeficientes de consumo de combustível e usualmente são aproximados para 0,246 e 0,08415 respectivamente (AZOUMAH, 2011).

### 2.2.1.4 Armazenamento de energia

O armazenamento de energia desempenha um importante papel na estabilização das microrredes utilizando a energia armazenada de maneira racional para atender as demandas de pico. No entanto, essas duas funções requerem tecnologias diferentes de armazenamento de energia (K.E.M.A., 2014).

Sistemas de estabilização de microrredes devem poder reagir muito rapidamente a perturbações e, ao mesmo tempo, a várias vezes se necessário. Isso leva a uma elevada saída de potência, mas pouco armazenamento de energia. Frequentemente as fontes de energia renováveis necessitam de um intervalo de tempo para poderem atender diretamente a demanda de energia, por essa razão, o sistema também deve ser capaz, de por algumas horas, armazenar a energia suficiente para atender essa lacuna, entre os tempos de alta produção de energia e os períodos de alto consumo de pico (K.E.M.A., 2014; DA SILVA, 2014).

### 2.2.1.4.1 Modelamento da bateria

Para determinar o tamanho e a capacidade do banco bateria, é necessária uma análise dos requisitos de carga e descarga da bateria. A energia total gerada pelos geradores fotovoltaicos  $P_{PV}$  e turbinas eólicas  $P_w$  por hora é dado por:

$$P_g(t) = P_{PV}(t) + P_w(T) \quad (10)$$

Em um determinado momento  $t$ , a necessidade demandada pela carga (PI), poderá ser maior ou menos do que a energia total gerada  $P_g$ , podendo assim não ser possível suprir a potência necessária. Com isso, o estado da carga da bateria SOC (*State of Charge*), poderá ser resumido da seguinte maneira (COELHO, 2015):

- Caso, exista um excesso de energia sendo gerada que será armazenada no banco de baterias; o SOC será obtido da seguinte maneira:

$$SOC(t) = SOC(t - 1) \cdot (1 - \sigma) + \left( P_g(t) - \frac{P_l(t)}{\eta_{inv}} \right) \cdot \eta_{bc} \quad (11)$$

onde  $\sigma$  é a taxa de auto descarga por hora,  $\eta_{inv}$  é a eficiência do inversor e  $\eta_{bc}$  é a eficiência do carregamento da bateria.

Como o máximo de energia armazenada no banco de baterias não pode exceder o estado de carga máximo ( $SOC_{max}$ ), SOC deverá ser sempre igual ou menos do que  $SOC_{max}$ . Assim o  $SOC_{max}$  deverá receber o valor nominal do banco de baterias ( $C_b$ ).

$$SOC(t) \leq SOC_{max} \quad (12)$$

- Caso,  $P_g(t) \leq \frac{P_l(t)}{\eta_{inv}}$ , existirá uma falta de energia e o sistema de armazenamento deverá suprir a carga. Nesse caso, o SOC será obtido da seguinte maneira:

$$SOC(t) = SOC(t - 1) \cdot (1 - \sigma) - \left( \frac{P_l(t)}{\eta_{inv}} - P_g(t) \right) / \eta_{bd} \quad (13)$$

Onde  $\eta_{bd}$  é a eficiência de descarga da bateria.

Como medida para alongar a vida útil da bateria, o SOC deverá satisfazer a condição do estado de carga mínima da bateria ( $SOC_{min}$ ). Assim, o seguinte quesito deverá ser satisfeito no descarregamento da bateria:

$$SOC(t) \geq SOC_{max} \quad (14)$$

O  $SOC_{min}$  é definido pela profundidade máxima de descarga da bateria (DOD) por:

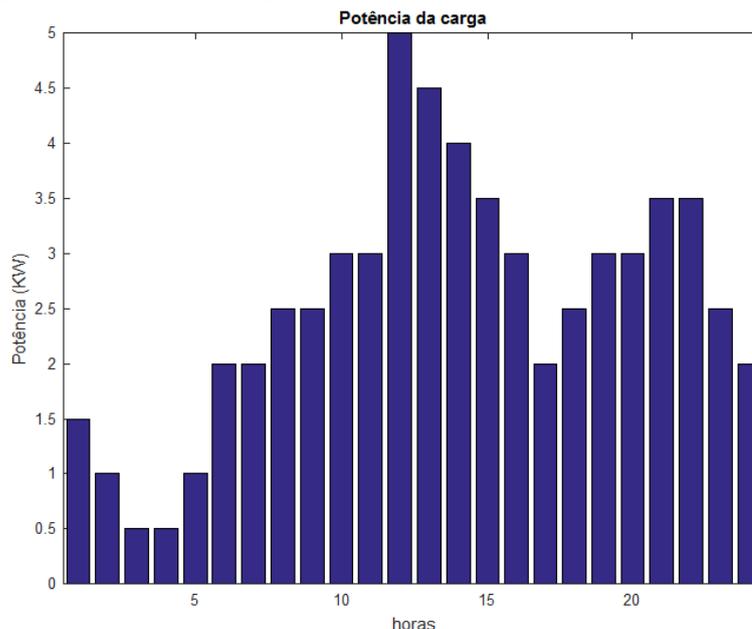
$$SOC_{min} = (1 - DOD) \cdot C_b \quad (15)$$

#### 2.2.1.5 Consumidores

Para definir o método de controle a ser utilizado em uma determinada estrutura, é necessário saber com exatidão o tipo de carga a ser atendida. As cargas podem ser agrupadas de acordo com a localização (locais ou distribuídas), importância (críticas ou não-críticas) ou tipo de energia usada (quentes ou frias, as primeiras aproveitam energia térmica de algum processo de geração, as segundas apenas usam energia elétrica (SOUZA, 2014).

O perfil da carga a ser atendida influencia diretamente no dimensionamento e modelagem das baterias. Além disso, os horários de pico e o comportamento dos consumidores afetam a confiabilidade do sistema, o dimensionamento dos componentes e o preço da eletricidade. Um perfil de carga horária de uma área típica rural é mostrado na Figura 5. A carga tem um pico máximo de 5 KW e representa uma casa rural comum, possuindo geladeiras, luzes, TV, e outros aparelhos domésticos.

**Figura 5 - Perfil de carga.**



Fonte: Adaptado de BORHAANAZAD et al. (2014 p.5)

### 2.2.2 Operações em microrredes

Uma microrrede consiste de uma rede de distribuição em baixa tensão com unidades de pequena geração de energia (abaixo de 100 KW), dispositivos de armazenamento de energia e seus consumidores. Estes sistemas podem estar ligados diretamente a rede de distribuição em média tensão ou estarem operando isoladamente da rede principal, em caso de alguma falha na rede principal. As microrredes funcionam em dois modos distintos (DE SOUZA, 2014):

- Modo normal: A microrrede está conectada em uma rede de distribuição de média tensão e os valores de referência de frequência e de tensão são fornecidas pela distribuidora de energia (PEÇAS LOPES et al, 2006).
- Modo de emergência: A microrrede não está conectada a uma rede elétrica. Isso pode ser devido a problemas na rede de media tensão ou por se tratar de uma rede em um local isolado (também chamada por modo de ilha). Os valores de tensão e de frequência são fornecidos por um inversor que funciona como um conversor de tensão (PEÇAS LOPES et al, 2006).

## 2.3 SMART GRID

Uma rede elétrica convencional é classificada como rede inteligente se possuir tecnologias de comunicação, instrumentação, controle e automação bem como componentes de tecnologia da informação. Como resultado, as redes inteligentes conseguem adquirir os estados da rede em tempo real, de maneira a controlar e regular as redes de modo que a capacidade total da mesma possa ser utilizada em sua totalidade (POMILIO, 2002).

A rede inteligente leva a uma melhor utilização da infraestrutura das redes convencionais, amenizando as consequências de suas constantes necessidades de expansão ou melhorando a estabilidade da rede na mesma capacidade. Em termos das redes de distribuição, a forma de distribuição é melhorada a ponto de poder ser estendida a outros locais e poder intervir localmente de uma forma mais otimizada. Assim, além de garantir o abastecimento dos consumidores locais, é possível abastecer consumidores regionais sem perca dos níveis de segurança de operação da rede (POMILIO, 2002).

Isto também significa que os diferentes parâmetros que foram fixados em uma rede convencional são mutáveis. Então por exemplo, a capacidade (dentro das capacidades térmicas dos cabos) pode ser aumentada nas redes inteligentes, ou o fluxo de sentidos (em função da situação da alimentação de entrada) em uma única seção de linha individual (POMILIO, 2002).

### 2.3.1 Segurança em Smart Grid

O uso do termo Segurança em tecnologia da informação, bem como em engenharia elétrica, pode parecer inicialmente igual, mas o termo é utilizado de maneira diferente em ambas as áreas e, portanto, requer um olhar adequado para ambas ciências (POMILIO, 2002).

Em engenharia elétrica o termo segurança está mais ligado a prevenção de acidentes. Assim, por consequência, temos um grande problema. Enquanto que para a engenharia elétrica, o termo segurança é mais ligado a segurança de pessoas, para a tecnologia da informação, segurança está mais ligada ao aspecto de segurança da informação. Ou seja, ela tem um foco maior na proteção dos dispositivos eletrônicos, que por possuírem vida útil e condições de operação, devem

ser tratados de maneira diferentes para tentar atender os dois requisitos de segurança (ALOUL et al, 2012).

As redes inteligentes possuem principais objetivos em termos de segurança da informação, que são os de confidencialidade, integridade e disponibilidade (ALOUL, 2012).

- Confidencialidade – Proteção contra a aquisição de informações não autorizadas.
- Integridade – A integridade da contagem, assim como, o processo dos dados por aparelhos de medição (preços, custos acumulados, taxas) devem ser bem protegidos para que os fornecedores de energia possam interpretá-los da melhor maneira possível, pois estes dados constituem a base para relatórios financeiros.
- Disponibilidade – A disponibilidade é a capacidade do sistema manter seu serviço de forma ininterrupta frente a uma falha. Por exemplo, no caso de redes inteligentes, uma falha no link de comunicação que cause uma indisponibilidade no controle da rede, terá alguma outra forma de comunicação como, por exemplo, trocas de dados via internet.

### 3. MÉTODO DE PESQUISA

Neste capítulo é apresentada a metodologia empregada na simulação de microrredes, sendo rapidamente explicada a escolha das localidades, bem como a confiabilidade com relação aos dados considerados sobre disponibilidade energética em cada localidade. Neste sentido, é ilustrado o algoritmo que foi proposto para controlar a simulação do processo de geração, consumo e armazenamento de energia.

#### 3.1 LOCALIDADES

Os territórios brasileiros não apresentam grandes variações entre a quantidade de horas entre o dia e a noite, devido à grande parte de sua extensão ser localizada perto da linha do equador. A região nordeste possui a maior média em horas de insolação diária, o que a torna a região com maior potencial de geração de energia solar (A.N.E.L., 2005).

O potencial eólico brasileiro gera muitas divergências entre os especialistas e as instituições no quesito viabilidade. As estimativas nos últimos anos mostravam um baixo potencial energético, entretanto, com o avanço tecnológicos em equipamentos e em medições, novos estudos mostram promissor a exploração comercial desse tipo de energia no Brasil. O Nordeste também possui o maior potencial energético eólico, principalmente na parte norte de seu litoral (A.N.E.L., 2005).

Nesse trabalho, as cidades escolhidas para serem analisadas foram as cidades de Natal no Rio Grande do Norte e São Martinho da Serra em Rio Grande do Sul no ano de 2015. Ambas foram escolhidas por possuírem dados sólidos, como velocidade do vento e de insolação solar. Também são cidades distantes e possuem perfis climáticos muito distintos, tornando interessante a comparação de seus resultados.

Os dados foram fornecidos pela rede SONDA, (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais) um projeto criado a partir do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Esses dados passaram por processos de validação para garantir sua confiabilidade que serão discutidos a seguir.

### 3.2 ANALISE DOS DADOS DISPONÍVEIS

Existem muitos fatores que podem afetar a confiabilidade de dados medidos por equipamentos automáticos. Tempestades, mau funcionamento ou outros tipos de acidentes podem modificar as medições e tornando-as incorretas. O processo que controla a qualidade dos dados é composto por 4 etapas sequenciais, começando com filtros mais abrangentes e terminando com filtros mais refinados. A aprovação de cada etapa é necessária para a continuidade do processo. Caso o dado não seja aprovado, o processo é interrompido e o dado será considerado como suspeito. A Tabela 1 ilustra o funcionamento do processo (S.O.N.D.A., 2016).

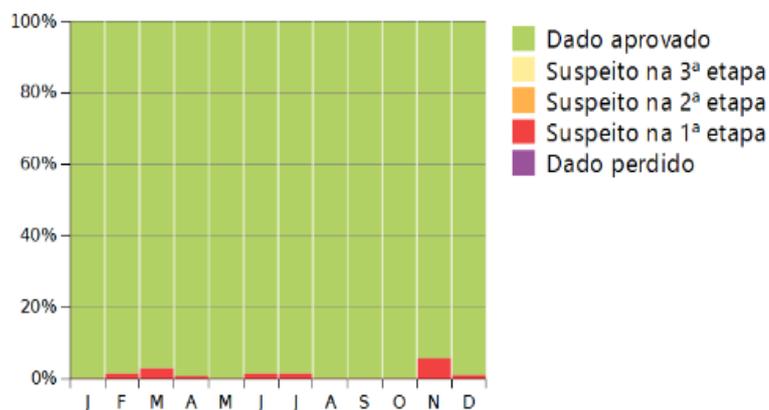
**Tabela 1- Processo de validação dos dados meteorológicos**

Etapas	Variáveis Anemométricas	Variáveis Meteorológicas	Variáveis Radiométricas
1	Algoritmo 1 Dado suspeito quando fisicamente impossível		
2	Algoritmo 2 Dado suspeito quando o evento é extremamente raro		
3	Algoritmo 3 Dado suspeito quando apresenta uma evolução temporal não condizente com o esperado para a variável.		Algoritmo 3 Dado suspeito quando inconsistente com medidas apresentadas por outras variáveis da mesma estação.
4	Algoritmo 4 Dado suspeito quando inconsistente com medidas apresentadas por outras variáveis da mesma estação.	Algoritmo 4 ( <i>ainda não aplicado</i> ) Dado suspeito caso a medida esteja inconsistente quando comparada com estimativas de modelos computacionais.	

Fonte: SONDA

As Figuras 6 e 7 mostram os resultados da validação dos dados Meteorológicos da cidade de Natal e a velocidade do vento a 10 metros da estação de natal no mês de Janeiro de 2015. Da mesma maneira, as Figuras 8 e 9 são apresentadas para a cidade de São Martinho da Serra.

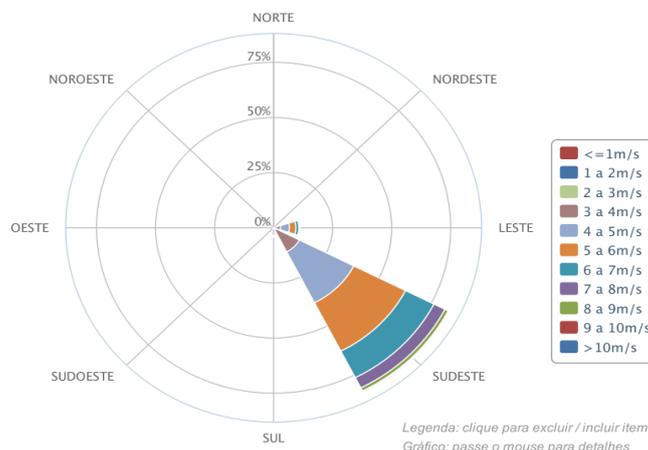
**Figura 6 - Resultados da Validação de dados de Natal em 2015.**  
**VELOCIDADE DO VENTO**



Fonte: SONDA

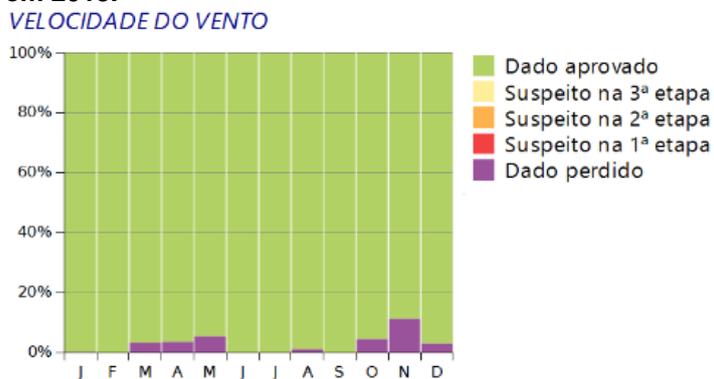
**Figura 7 - Velocidade e direção do vento de Natal, janeiro de 2015.**

VELOCIDADE E DIREÇÃO DO VENTO A 10 METROS (%)  
 ESTAÇÃO DE NATAL - JANEIRO DE 2015



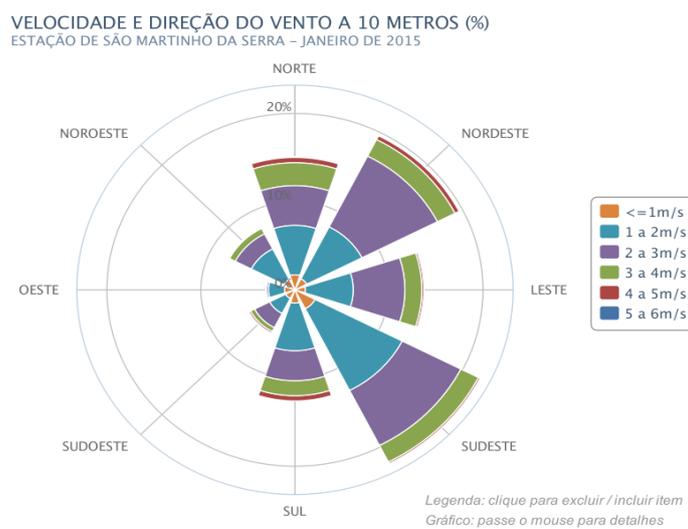
Fonte: SONDA

**Figura 8 - Resultados da Validação de dados de São Martinho da Serra em 2015.**  
**VELOCIDADE DO VENTO**



Fonte: SONDA

**Figura 9 - Velocidade e direção do vento de São Martinho da Serra, janeiro de 2015.**

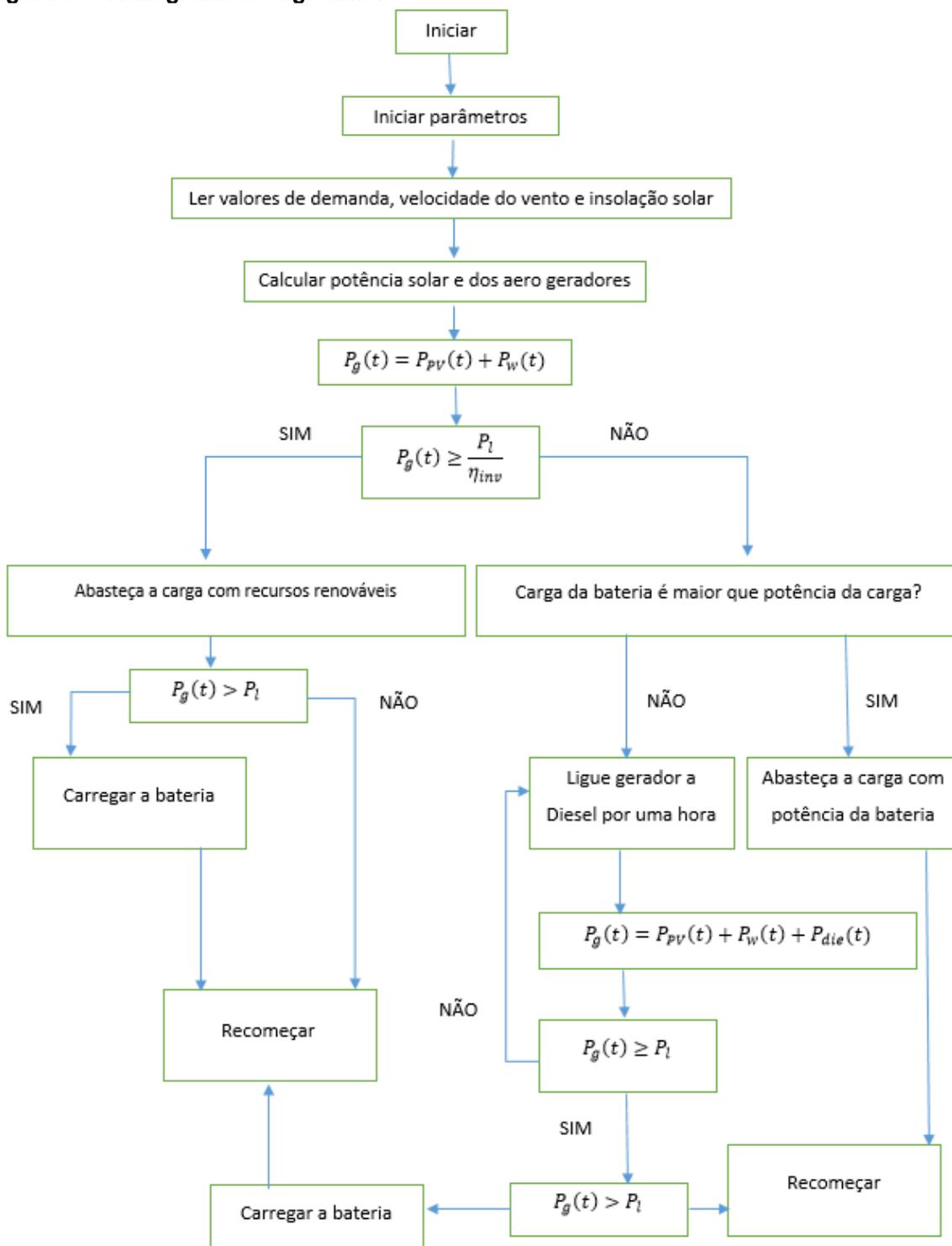


Fonte: SONDA.

### 3.3 FUNCIONAMENTO DO ALGORITMO

Nesta seção será explicado o funcionamento do algoritmo proposto. A Figura 10 mostra o fluxograma do seu funcionamento.

Figura 10 - Fluxograma do algoritmo.



Fonte: Autoria própria

Os parâmetros de entrada são definidos de acordo com a configuração da rede e seus componentes. Estão englobados aqui valores como eficiência do aereo gerador, quantidade de painéis fotovoltaicos, dados de característica do banco de baterias, dentre outros. O programa segue seu ciclo de funcionamento para todos os valores de entrada referente a um ano e por fim calcula a quantidade de energia que foi fornecida para a carga por cada elemento da rede.

### 3.3 ESTRATEGIA DE GESTÃO DE ENERGIA

A imprevisibilidade dos recursos renováveis leva a complexas estratégias de gerenciamento de energia para as HMGS, principalmente para o aspecto de fornecer uma fonte de energia confiável e segura coincidindo com a demanda de carga, já que a capacidade dos geradores não pode ser aumentada imediatamente para responder a um imediato aumento de carga. Também existe a possibilidade de um excedente de geração de eletricidade, maior mesmo do que a capacidade de armazenamento. Neste caso, se faz necessário desligar o sistema de geração de energia.

Desse modo, uma estratégia de gestão de energia se torna um critério importantíssimo para conceber esse tipo de sistema. Levando em contas as possibilidades de funcionamento do sistema, os seguintes casos serão considerados na estratégia de simulação para aplicar a gestão de energia:

- A energia gerada pelas fontes renováveis é suficiente para abastecer os consumidores e o excesso de energia produzida é armazenada no banco de baterias;
- A energia gerada pelas fontes renováveis é suficiente para abastecer os consumidores, mas esse excesso é superior a capacidade de armazenamento do banco de baterias. Então, o excedente é consumido por uma carga de despejo;
- A energia gerada pelas fontes renováveis não é suficiente para abastecer a carga. Neste caso, a prioridade será em utilizar a energia armazenada pelo banco de baterias;

- A energia gerada pelas fontes renováveis não é suficiente para abastecer a carga e o banco de baterias está esgotado. Assim, o gerador a diesel será utilizado para alimentar a carga e carregar o banco de baterias.

## 4 RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados da modelagem de cada componente da microrrede e um estudo de casos para as cidades de Natal, Rio Grande do Norte e São Martinho da Serra, Rio Grande do Sul, bem como uma comparação dos resultados de ambas.

### 4.1 PAINES FOTOVOLTAICOS

Os valores das constantes atribuídas para o modelo de TAEHONG e as características do painel fotovoltaico utilizado são mostradas na Tabela 2. O painel escolhido é da SunEdison por possuir boa resistência e por apresentar boa eficiência. Esses valores foram definidos de acordo com as características de cada localidade e com o modelo apresentado por TAEHONG. Nesse trabalho a cidade de Natal será caracterizada como uma cidade de grande quantidade e grande qualidade de incidência solar, por possuir condições de sol constantes e céu aberto durante quase todo o dia. A cidade de São Martinho da Serra será considerada caracterizada como uma cidade que possui média quantidade e média qualidade de incidência solar, por possuir dias parcialmente nublados e condições de céu que variam durante parte do dia.

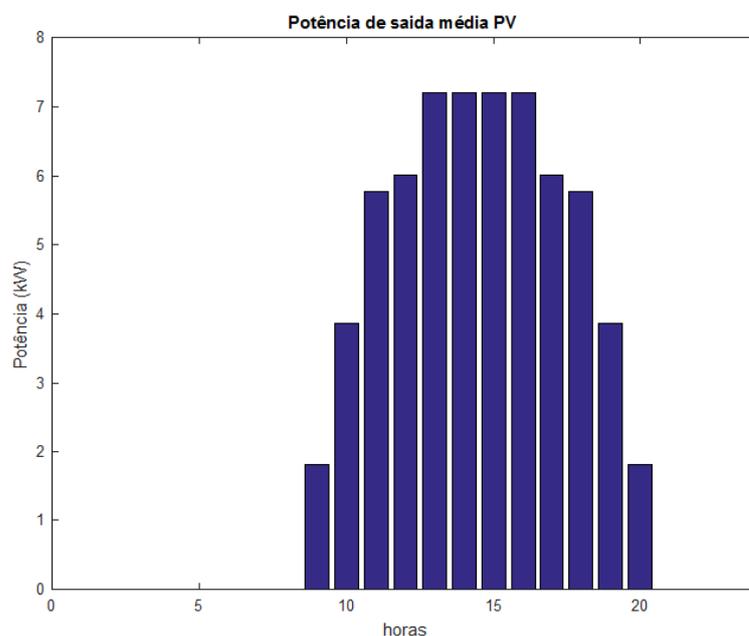
**Tabela 2-Valores atribuídos das constantes do Painel Fotovoltaico.**

Atributos	Natal	São Martinho da Serra
Smax	1,27	1,26
a1	0.3	0.2
a2	0,1	0,6
b1	6	8
b2	64	60
c1	2	3
c2	2	3
t <sub>rise</sub>	8:00 h	8:00 h
t <sub>set</sub>	21:00 h	21:00 h
<b>Características do Painel</b>		
Dimensão do Painel (mm)	1.000x990x50	
Peso do Modulo	19,3	
Tipo de Célula	Mono-cristalina	
Eficiência	14-21%	
Tipo de Material	Silício	

Fonte: Autoria própria.

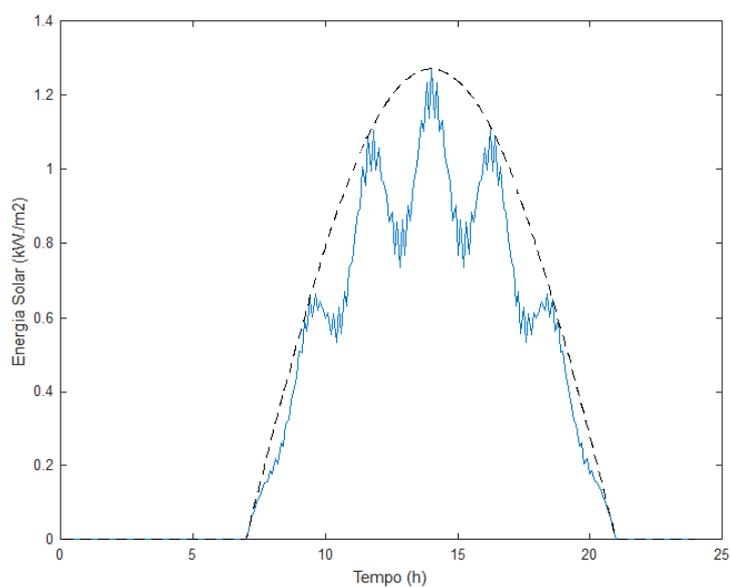
As Figuras 11 e 12 mostram a potência média e potência gerada pelos painéis fotovoltaicos em um dia para a cidade de Natal. As Figuras 13 e 14 mostram a potência média e potência gerada pelos painéis fotovoltaicos em um dia para a cidade de São Martinho da Serra. Esse modelo foi extrapolado para os 365 dias do ano representado assim a insolação solar anual de ambas as cidades e estipulou-se um conjunto de painéis fotovoltaicos para ambas as cidades com metros quadrados de área.

**Figura 11 - Potência média gerada dos painéis fotovoltaicos em Natal.**



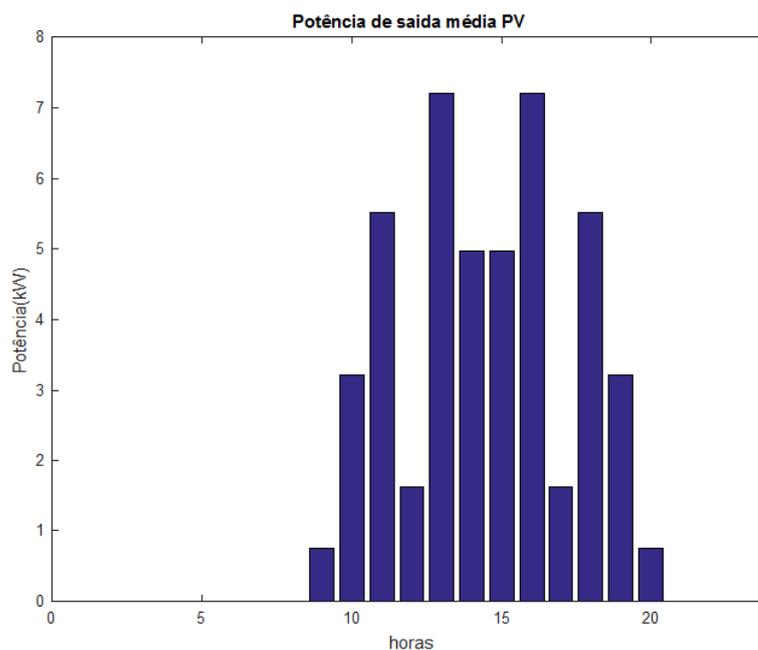
Fonte: Autoria própria.

**Figura 12 - Potência gerada em um dia dos painéis fotovoltaicos em Natal.**



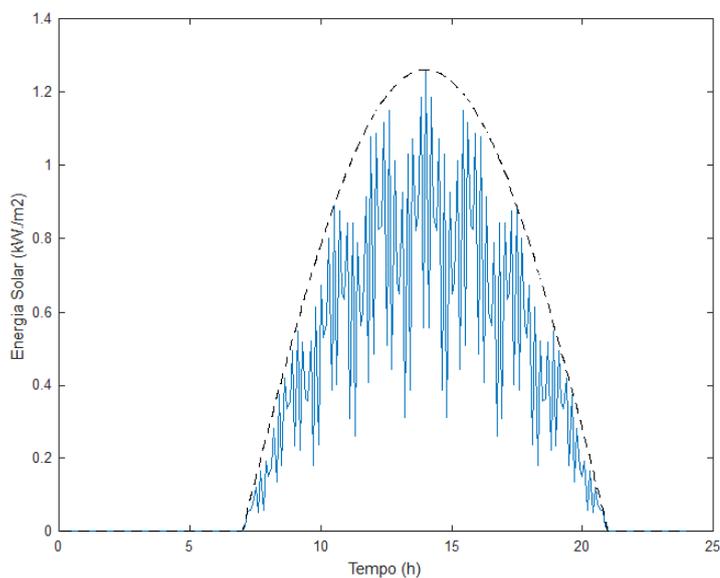
Fonte: Autoria própria

**Figura 13 - Potência média em um dia dos painéis fotovoltaicos em São Martinho da Serra.**



Fonte: Autoria própria.

**Figura 14 - Potência média gerada dos painéis fotovoltaicos em São Martinho da Serra.**



Fonte: Autoria própria.

A cidade de natal apresentou uma maior quantidade de energia gerada em seus geradores fotovoltaicos se comparada a cidade de São Martinho da Serra. A curva de potência gerada na cidade de Natal, não possui tantas variações ao longo do dia, se comparada com a da cidade de São Martinho da

Serra. Esse comportamento ocorre pelo perfil climático das cidades. Ao ser considerada uma cidade com média quantidade e qualidade de incidência solar nesse trabalho, a produção de energia elétrica da cidade de São Martinho da Serra é afetada pelo sombreamento das nuvens, gerando assim uma menor quantidade de energia gerada.

Observou-se que a quantidade de potência elétrica gerada pelo sistema fotovoltaico na cidade de Natal é em média 27% maior do que a potência elétrica na cidade de São Martinho da Serra em um mesmo período de tempo.

#### 4.2 AERO GERADORES

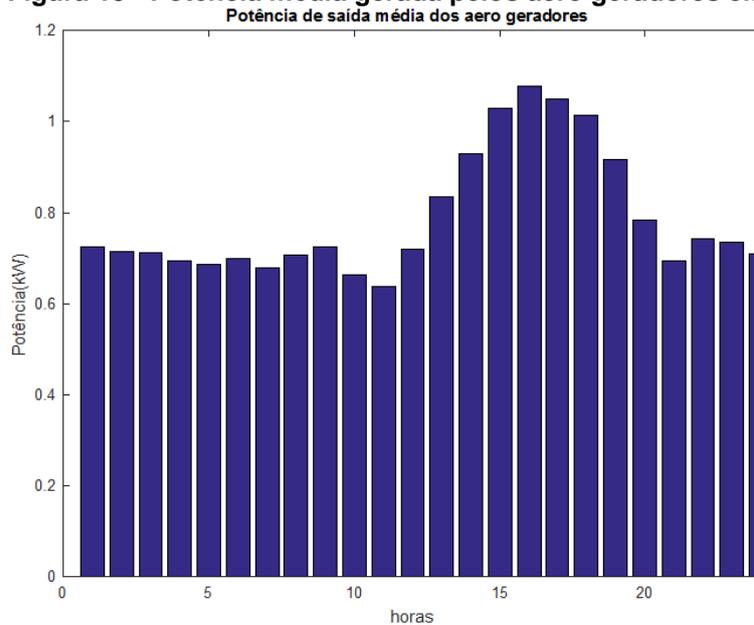
Nesse trabalho foi considerado o aero gerador “ZEYU FD-2KW”, pois o seu tamanho é compatível com os dados utilizados nesse trabalho da velocidade do vento, que são de baixa altitude (cerca de 20 metros). Suas características são mostradas na Tabela 3. A escolha desse aero gerador foi baseada por sua capacidade de funcionar com uma pequena velocidade inicial de trabalho sem perda na eficiência da transformação da energia.

**Tabela 3 - Características do aero gerador.**

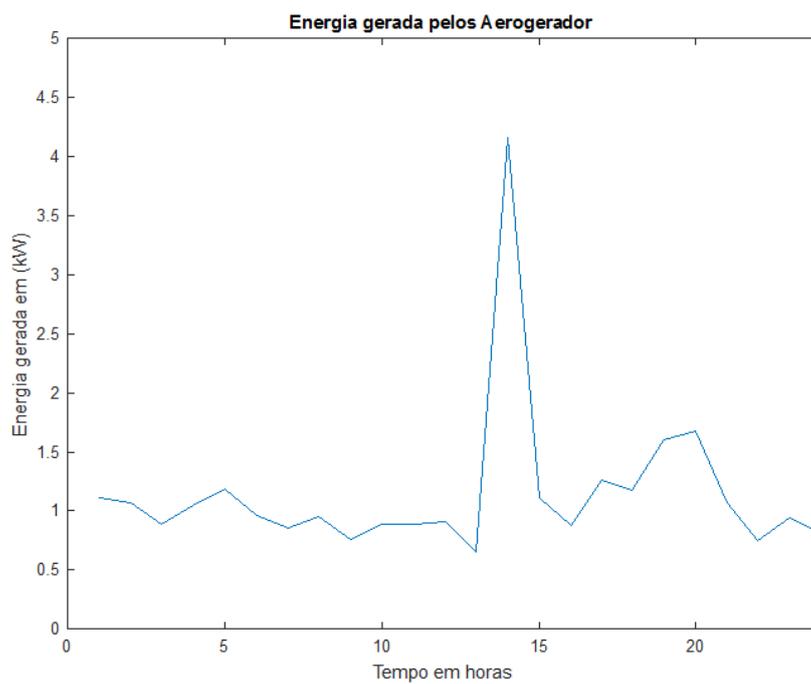
Característica	Valor
Diâmetro das pás (m)	4
Área varrida (m <sup>2</sup> )	50,24
Eficiência	0,95
Velocidade de corte (m/s)	25
Velocidade inicial de trabalho (m/s)	3
Velocidade nominal (m/s)	8
Potencial Nominal (kW)	2
Potência Máxima (kW)	2,5

Fonte: Autoria própria

As Figuras 15 e 16 mostram a potência a potência média e potência gerada pelos aero geradores em um dia para as cidades de Natal e as Figuras 17 e 18 mostram a potência média e potência gerada pelos painéis fotovoltaicos em um dia para as cidades de São Martinho da Serra.

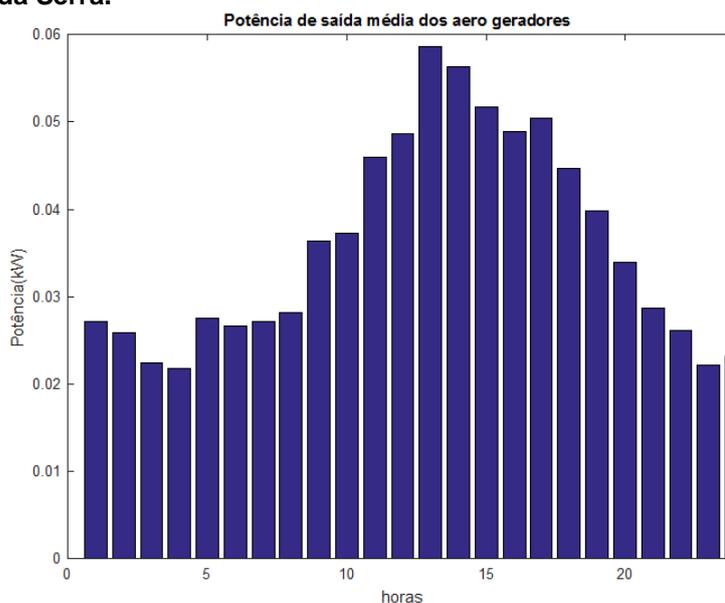
**Figura 15 - Potência média gerada pelos aero geradores em Natal.**

Fonte: Autoria própria.

**Figura 16 - Potência gerada em um dia pelos aero geradores em Natal.**

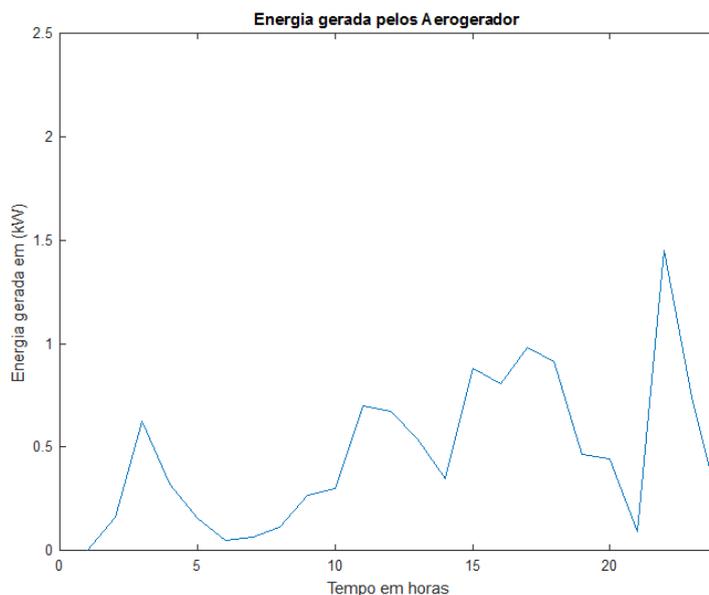
Fonte: Autoria própria.

**Figura 17 - Potência média gerada pelos aero geradores em São Martinho da Serra.**



Fonte: Autoria própria.

**Figura 18 - Potência gerada em um dia pelos aero geradores em São Martinho da Serra.**



Fonte: Autoria própria.

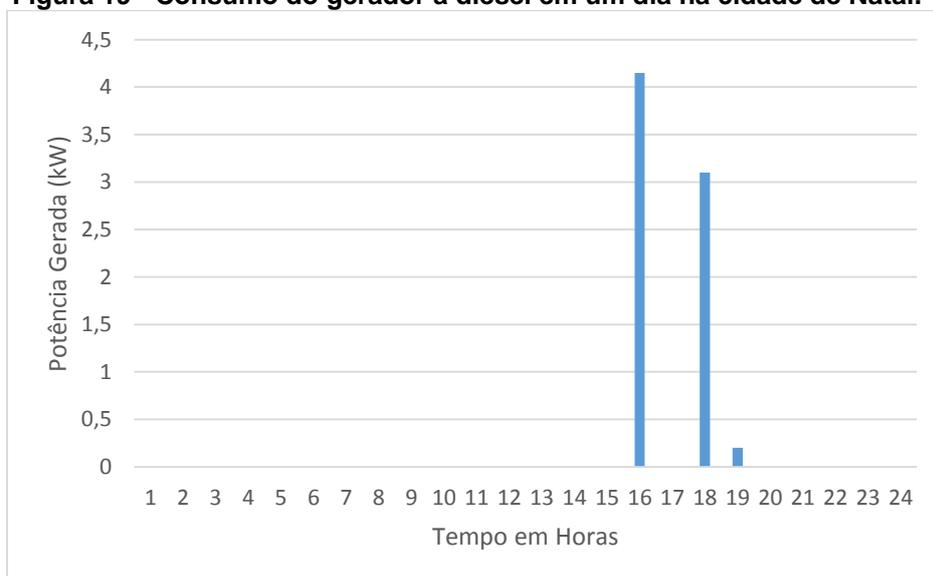
Nessa parte, vemos que novamente a cidade de Natal teve um desempenho melhor na geração de energia elétrica pelo sistema de aero geradores. Por Natal estar situada em uma região com alta velocidade de vento na região do Nordeste, a mesma conseguiu gerar uma potência em média 98% maior do que a da cidade de São Martinho da Serra. As velocidades de pico encontradas na cidade

de região de São Martinho da Serra, são aproximadamente iguais as velocidades médias da cidade de Natal, o que mostra o grande potencial desta em gerar energia eólica.

### 4.3 GERADOR A DIESEL

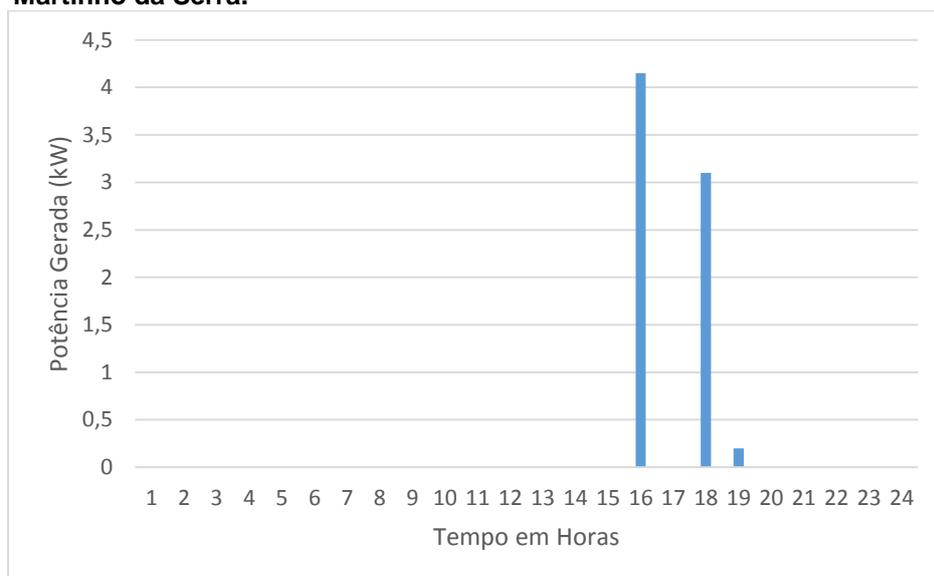
O gerador nesse estudo tem o papel de providenciar segurança e confiabilidade para a carga. Para isso, sempre que a energia total produzida for inferior do que a demanda e o banco de baterias não possuir energia necessária para abastecer a carga, o gerador ira utilizar combustível para suprir essa demanda. Se essa energia for superior a energia demanda, o excedente ira ser utilizado para carregar a bateria. Nas simulações foi utilizado um gerador com potência nominal de 4 KW. Seu consumo de combustível é aproximadamente 1,3 L/h. As Figuras 19 e 20 mostram o consumo de gerador a diesel durante o primeiro dia da simulação para as cidades de Natal e São Martinho da Serra, respectivamente.

**Figura 19 - Consumo do gerador a diesel em um dia na cidade de Natal.**



**Fonte: Aatoria própria.**

**Figura 20 - Consumo do gerador a diesel em um dia na cidade de São Martinho da Serra.**

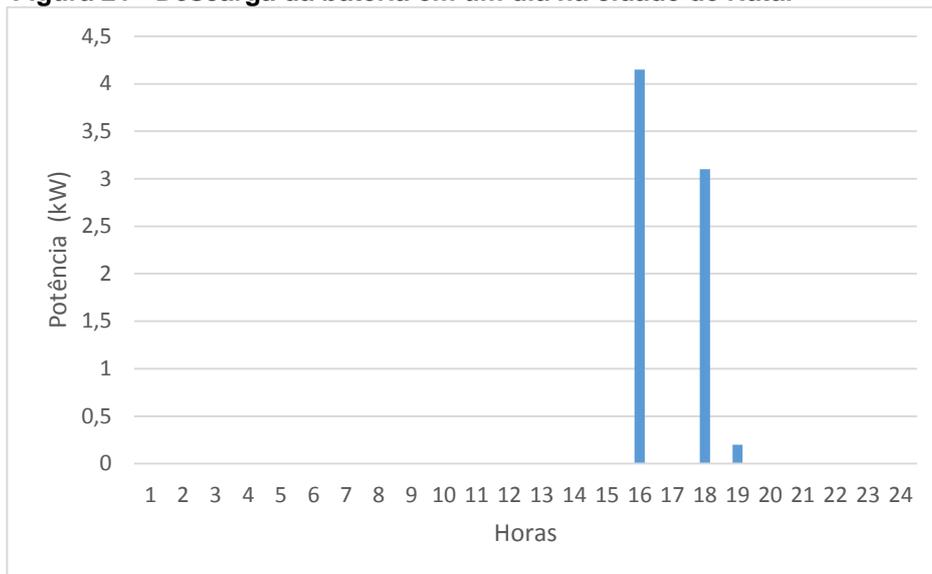


**Fonte: Autoria própria.**

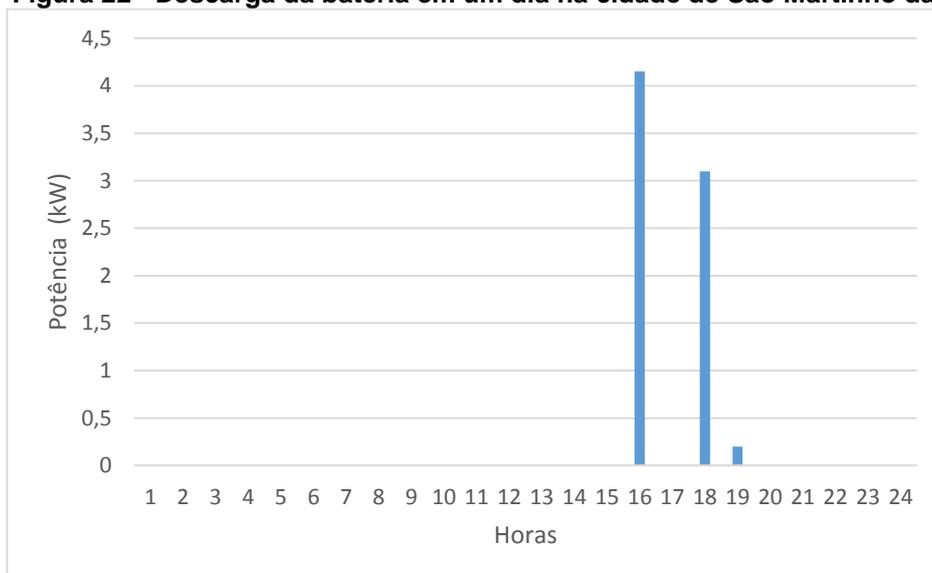
O consumo do gerador a diesel foi cerca de 2,25 vezes maior na cidade de São Martinho da Serra do que na cidade de Natal. Em ambas as cidades o gerador é mais utilizado no começo e no final dos dias, pois se tratam de intervalos onde não há produção de energia solar, que se mostrou a principal provedora de energia do sistema. A carga também influenciou nesse resultado, pois os horários onde há alta demanda, também coincidem com o horário de baixa energia gerada.

#### 4.4 BATERIAS

Nesse trabalho foi escolhido um banco de baterias com a capacidade de 40 kW, considerando-se que a carga a ser atendida é de pequeno porte. A Figura 21 e 22 mostram o estado de descarga da bateria em um período de um dia para as cidades de Natal e São Martinho da Serra, respectivamente. Os períodos noturnos, onde não à geração de energia solar e a demanda é muito alta, são os momentos onde o banco de baterias mais atuam.

**Figura 21 - Descarga da bateria em um dia na cidade de Natal**

**Fonte: Autoria própria.**

**Figura 22 - Descarga da bateria em um dia na cidade de São Martinho da Serra**

**Fonte: Autoria própria.**

Observa-se aqui que a bateria em ambas as cidades é utilizada nos horários de pico, principalmente entre os horários das 15:00 e 20:00 horas. Pelo potencial de geração de energia elétrica da cidade de Natal ser superior do que a cidade de São Martinho da Serra, percebe-se que o banco de baterias armazena mais energia para ser utilizada posteriormente na cidade de Natal. O período onde não há descarga da bateria, decorre por ela estar carregando ou pelo sistema estar gerando a mesma energia demandada pela carga.

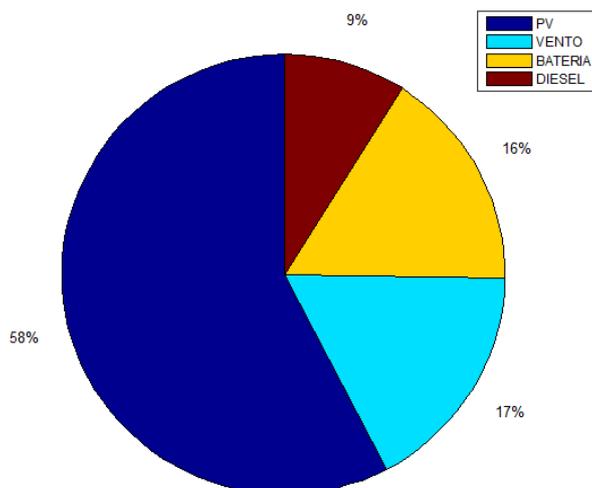
#### 4.5 ANALISE DOS RESULTADOS

As cidades de Natal e São Martinho da Serra são utilizadas nesse estudo durante um período de um ano para avaliar seu potencial na utilização dos seus recursos renováveis. A simulação mostra a proporção de energia demanda de cada uma das fontes adequada para cada localidade.

A cidade de Natal obteve excelente resultados de geração através de fontes de recursos renováveis. Sua alta constância de irradiação solar e seu alto valor de velocidade dos ventos, proporciona uma pequena dependência de recursos fósseis, podendo assim produzir energia barata e limpa. A porcentagem de energia fornecida para a cidade de Natal, pelos PV, turbinas eólicas, gerador a diesel e baterias são representados na Figura 23.

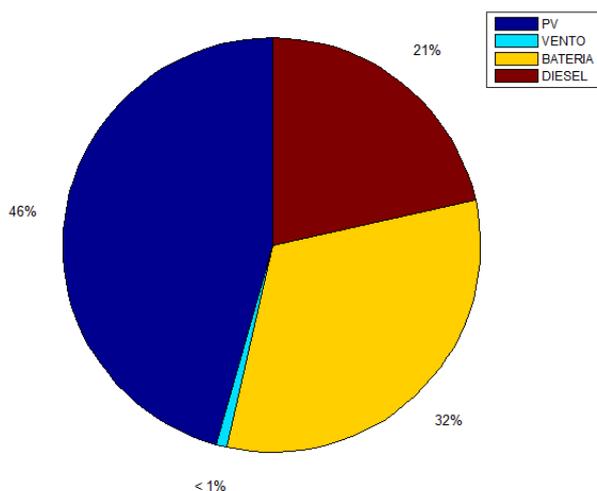
A cidade de São Martinho da Serra possui uma capacidade de geração de energia solar parecida com a de Natal, entretanto, a produção de energia eólica é muito inferior devido à baixa velocidade dos ventos na região. Observa-se também que ela possui uma necessidade muito maior na utilização dos geradores a diesel para poder suprir a carga demanda. A Figura 24 representa a porcentagem de energia fornecida pelos PV, turbinas eólicas, gerador a diesel na cidade de São Martinho da Serra.

**Figura 23 - Porcentagem da energia provida pelos Painéis fotovoltaicos, aero geradores, geradores a diesel e banco de baterias durante um ano na cidade de Natal.**



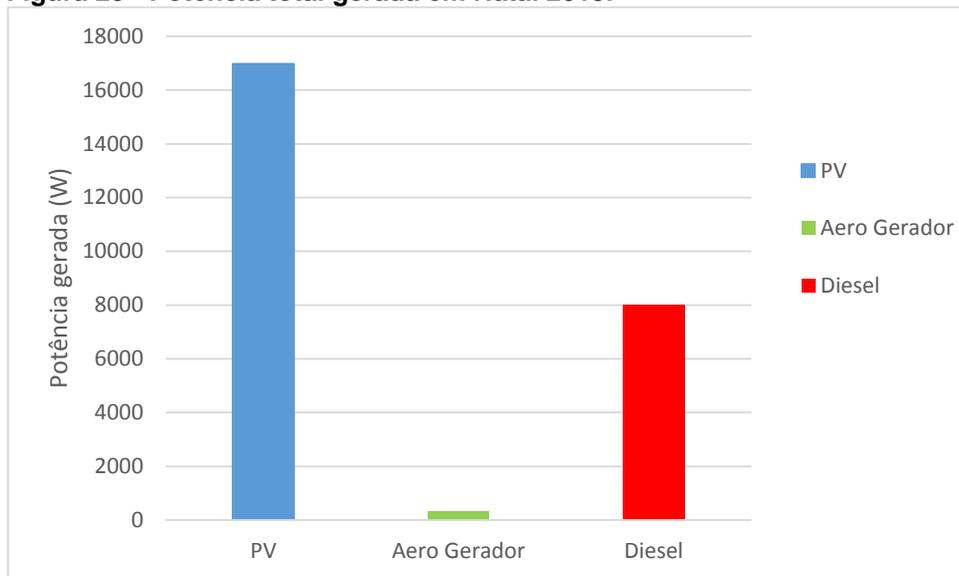
Fonte: Autoria própria.

**Figura 24 - Porcentagem da energia provida pelos Painéis fotovoltaicos, aero geradores, geradores a diesel e banco de baterias durante um ano na cidade de São Martinho da Serra.**



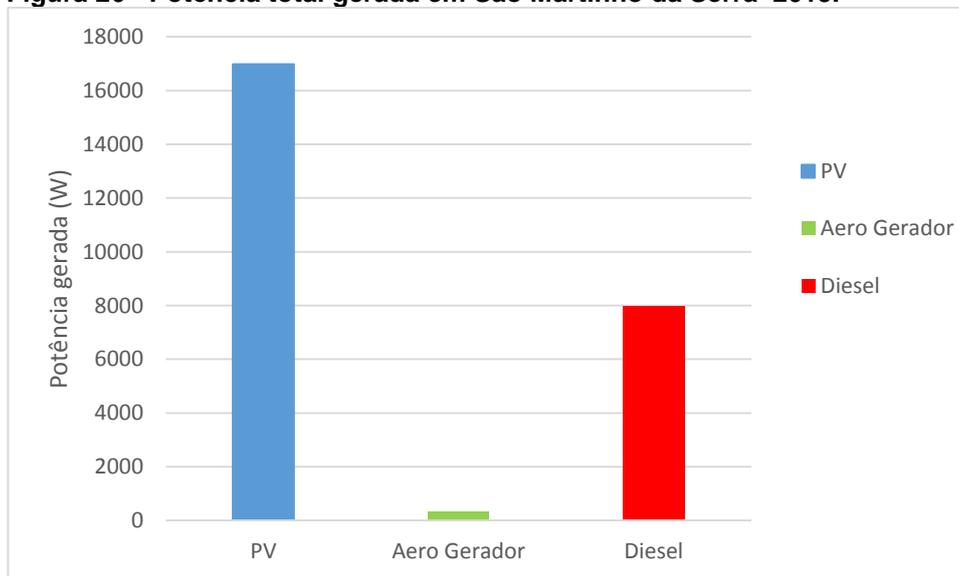
Fonte: Autoria própria.

Para o ano de 2015, viu-se que o sistema seria capaz de produzir um total de 33727kW para a cidade de Natal, onde 23247kW seriam providos pelos painéis fotovoltaicos, 6885kw dos aero geradores e mais 3539kW dos geradores a diesel. A Figura 25 demonstra esse total produzido.

**Figura 25 - Potência total gerada em Natal 2015.**

**Fonte: Autoria própria.**

Já a cidade de São Martinho da Serra teve um total de energia produzida bem menor. Seriam produzidos para o ano de 2015 aproximadamente 25267KW, onde 16978kW seriam providos pelos painéis fotovoltaicos, 311kW dos aero geradores e mais 7978kW dos geradores a diesel. A Figura 26 demonstra esse total produzido.

**Figura 26 - Potência total gerada em São Martinho da Serra 2015.**

**Fonte: Autoria própria.**

Nessa análise, a cidade de Natal apresentou resultados promissores para a instalação de uma microrede. O sistema de geradores a base de energia renováveis, fotovoltaica e aero geradores, conseguiu fornecer em média 91% da energia

demandada pela carga. A diferença necessária para suprir as cargas, será efetuada pelos geradores a diesel, fazendo assim com que o sistema esteja ativo todo o tempo. Os painéis fotovoltaicos foram os principais fornecedores de energia para o sistema, contabilizando mais da metade da energia produzida para o sistema. A grande quantidade e qualidade de incidência solar na cidade de Natal, torna a mesma uma excelente escolha para o investimento em painéis fotovoltaicos.

A geração provida dos aero geradores na cidade de Natal, foi satisfatória para a análise da instalação de uma microrede na mesma. Mesmo que a energia gerada pelos aero geradores tenha sido menor do que 20%, sua importância permanece, pois ela traz maior confiabilidade para o sistema por prover energia ao longo de todo o dia, sendo uma importante peça para o abastecimento das cargas e por abastecer o banco de baterias nos horários de baixa demanda.

Já a cidade de São Martinho da Serra, mostrou resultados ruins na análise feita para a cidade. Mesmo possuindo uma qualidade e quantidade média de insolação solar, a cidade de São Martinho da Serra apresentou resultados satisfatórios de geração de energia pelos painéis fotovoltaicos. Quase 50% da energia demanda no sistema foi provida pelos mesmos e entretanto, essa baixa eficiência somada à baixa capacidade de geração dos aero geradores, torna ineficaz o sistema apresentado. A capacidade dos aero geradores, não representou nem 1% da energia necessária, mostrando o baixíssimo potencial de energia eólica da cidade de São Martinho da Serra.

E ainda, para atender a 21% da demanda da carga, foi utilizado energia dos geradores a diesel, que não é uma energia limpa, indo de contrário a um dos principais benefícios das microredes que é a própria utilização de energias renováveis.

## 5 CONCLUSÃO

É indispensável o uso da energia elétrica para o desenvolvimento e suprimento das necessidades básicas da sociedade. Ela pode melhorar o padrão de vida, educação, saúde e a economia local, tornando assim seu acesso fundamental para tais desenvolvimentos. A implementação de micro redes em locais isolados, como zonas rurais ou afastadas dos grandes centros, pode ser considerada uma solução promissora para atender tais localidades.

Este trabalho apresenta uma forma de estabelecer quantitativamente a dependência da carga de cada fonte de energia para um sistema híbrido de micro rede, mantendo a potência da carga contínua e sem interrupção de fornecimento. A arquitetura formada por painéis fotovoltaicos, aero geradores, gerador a diesel e banco de baterias, tem esse objetivo.

Os valores dos dados meteorológicos das duas cidades Brasileiras, Natal no Rio Grande do Norte e São Martinho da Serra no Rio Grande do Sul, são utilizados para testar o método empregado. A Cidade de São Martinho da Serra possui uma baixa geração de energia eólica, portanto, utilizar-se de uma energia oriunda do gerador a diesel. Entretanto, a cidade de Natal mostrou possuir um grande potencial de produção de energias renováveis podendo ser um bom local para a implementação de uma HMGS.

O dimensionamento proposto pode ser utilizado como ponto de partida para estudos de otimização ou implementação de outros tipos de arquitetura de HMGS. Uma análise do custo de energia é uma sugestão para trabalhos futuros, podendo assim, se aprofundar no quesito de viabilidade na instalação de HMGS nas localizações aqui estudadas.

## REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Aneel 2<sup>o</sup> edição, Brasília, 2005.

AZOUMAH Y, et al. **Sustainable electricity generation for rural and peri-urban populations of sub-Saharan Africa: the “flexy-energy” concept**. Energy Policy 2011.

BARBOZA FILHO, Wilson Pereira. **GERAÇÃO DISTRIBUÍDA: VANTAGENS E DESVANTAGENS**, 2 Simpósio de estudos e pesquisas em ciências ambientais na Amazonia, 2014. Disponível em: <[http://www.feam.br/images/stories/arquivos/mudnacaclimatica/2014/artigo\\_gd.pdf](http://www.feam.br/images/stories/arquivos/mudnacaclimatica/2014/artigo_gd.pdf)>. Acesso em: 24 set. 2015

BORHANAZAD, Hanieh et al. **Optimization of micro-grid system using MOPSO**. Renewable Energy, Pensilvânia, Filadélfia, 2014.

BÜHLER, Alexandre José. **Determinação de parâmetros fotovoltaicos a partir de ensaios de curvas características sem iluminação**. 2007, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <<ftp://ftp.solar.ufrgs.br/teses/buhler.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2015.

COELHO, L. S., ASKARZADEH, A. **A novel framework for optimization of a grid independent hybrid renewable energy system: A case study of Iran**. Science Direct, 2015.

DIENSTMANN, Gustavo. **Energia solar uma comparação de tecnologias**. Disponível. 2009, Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/24308/000736300.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 04 out. 2015

KAMG, B.O., TA<, K.-S. **A new characterization and classification method for daily sky conditions based on ground-based solar irradiance measurement data**. *Sol. Energy*, 2013.

KEDARE, Roy A. **Application of design space methodology for optimum sizing of windbattery systems**. Appl Energy, 2009.

Keuring van Elektrotechnische Materialen te Arnhem. **Microgrids – Benefits, Models, Barriers and Suggested Policy Initiatives for the Commonwealth of Massachusetts**, 2014. Disponível em: <<http://nyssmartgrid.com/wp-content/uploads/Microgrids-Benefits-Models-Barriers-and-Suggested-Policy-Initiatives-for-the-Commonwealth-of-Massachusetts.pdf>>. Acesso em: 12 out. 2015

LEÃO, Ruth Saraiva Pastôra. **GTD – Geração, transmissão e distribuição de energia elétrica**. 2009, Apostila. Disponível em: <<http://www.clubedaeletronica.com.br/Eletricidade/PDF/Livro%20GTD.pdf>>. Acesso em: 24 set. 2015

LIMA, M. R. S.; DA SILVA, R. A. **Motor diesel para geradores elétricos**. 2012, Trabalho de conclusão de curso. Disponível em: <<http://www.fatecsantoandre.com.br/lima--silva.pdf>>. Acesso em: 06 out. 2015

MARTINS, Nuno Luís Paulino. **Sistema integrado de produção e armazenamento de energia a partir de fontes renováveis**. 2007, Dissertação de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa. Disponível em: <<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395137556060/dissertacao.pdf>>. Acesso em: 08 out. 2015

PEÇAS LOPES, J. A.; MOREIRA, C. L.; MADUREIRA, A. G. **Defining control Strategies for MicroGrids Islanded Operation**. 2006, IEEE Transactions on Power Systems. Disponível em: <<http://www.microgrids.eu/documents/317.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2015

PIERRET, Robert F. **Semiconductor Device Fundamentals**. United States of America, Addison-Wesley, 1996.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. 2014, Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual\\_de\\_Engenharia\\_FV\\_2014.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf)>. Acesso em: 04 out. 2015

POMILIO, José Antenor. **Eletrônica de Potência para Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica**. Campinas, SP, Universidade Estadual de Campinas, 2013.

RÜNCOS, F. et al. **Geração de energia eólica – Tecnologias atuais e futuras**. Disponível em: <<http://catalogo.weg.com.br/files/wegnet/WEG-geracao-de-energia-eolica-tecnologias-atuais-e-futuras-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2015.

DA SILVA, Rafael António Vieira **Gestão Colaborativa em Micro-Redes Inteligentes**. 2014, Dissertação de mestrado, Escola Superior de Tecnologia e de Gestão Instituto Politécnico de Bragança. Disponível em: <[https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/11783/1/Documento%20Final\\_Rafael.pdf](https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/11783/1/Documento%20Final_Rafael.pdf)>. Acesso em: 24 set. 2015

SONDA, Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais. **Validação de dados**. Disponível em: <<http://sonda.ccst.inpe.br/infos/validacao.html>>. Acesso em: 09 out. 2016.

SONDA, Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais. **Estação de Natal**. Disponível em: <<http://sonda.ccst.inpe.br/infos/validacao.html>>. Acesso em: 06 out. 2016.

SONDA, Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais. **Estação de São Martinho da Serra**. Disponível em: <<http://sonda.ccst.inpe.br/infos/validacao.html>>. Acesso em: 06 out. 2016.

DE SOUZA, Wanderson. **Técnicas de controle aplicadas na unidade de interface de uma microgrid com o sistema elétrico de distribuição em um cenário de carga desbalanceada**. 2014. 277 f. Tese (Doutorado) – Programa de pós-graduação em engenharia elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, 2014. Disponível em: <<http://www.ppgee.ufmg.br/defesas/440D.PDF>>. Acesso em: 22 set. 2015.

TAEHONG, S., SANG, Y. Y., KYUNG, C. K. **A Mathematical Model of Hourly Solar Radiation in Varying Weather Conditions for a Dynamic Simulation of the Solar Organic Rankine Cycle**. Energies. Basel, Suíça, 2015.