

RAFAEL GIL FERQUES

**SISTEMA COMPUTACIONAL PARA DIMENSIONAMENTO DE  
SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA UTILIZANDO  
REDES NEURAIS ARTIFICIAIS**

CASCVEL  
PARANÁ - BRASIL  
FEVEREIRO – 2017

RAFAEL GIL FERQUES

**SISTEMA COMPUTACIONAL PARA DIMENSIONAMENTO DE  
SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA UTILIZANDO  
REDES NEURAIS ARTIFICIAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia de Energia na Agricultura da Universidade Estadual do Oeste do Paraná em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Energia na Agricultura.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira

Coorientador: Prof. Dr. Ricardo Lessa

CASCADEL  
PARANÁ – BRASIL  
FEVEREIRO - 2017

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**

F367s Ferques, Rafael Gil  
Sistema computacional para dimensionamento de sistemas de  
geração de energia eólica utilizando redes neurais artificiais. /  
Rafael Gil Ferques — Cascavel, PR: UNIOESTE, 2017.  
87 p.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira  
Coorientador: Prof. Dr. Ricardo Lessa  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do  
Paraná.  
Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Energia na  
Agricultura, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas.  
Bibliografia.

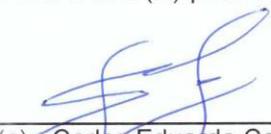
1. Energia eólica. 2. Algoritmos genéticos. 3. Energia – Fontes  
renováveis. I. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. II.  
Título.

CDD 21.ed. 333.794

## RAFAEL GIL FERQUES

Sistema computacional para dimensionamento de sistemas de geração de energia eólica, utilizando redes neurais artificiais

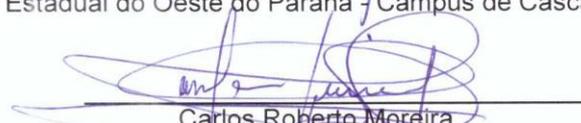
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, linha de pesquisa Fontes Renováveis e Racionalização de Energia Na Agroindústria e Agricultura, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:

  
Orientador(a) - Carlos Eduardo Camargo Nogueira

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

  
Jair Antonio Cruz Siqueira

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

  
Carlos Roberto Moreira  
Faculdade Assis Gurgacz (FAG)

Cascavel, 23 de fevereiro de 2017

FERQUES, Rafael Gil. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, fevereiro de 2017. **SISTEMA COMPUTACIONAL PARA DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA UTILIZANDO REDES NEURAIS ARTIFICIAIS**. Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira.

## RESUMO

O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de uma aplicação computacional para dimensionamento de sistemas de geração de energia eólica em instalações *On-Grid* e *Off-Grid* de pequeno porte, utilizando-se um processo amigável e interativo ao usuário. Para isso foram utilizados os conceitos de inteligência artificial em conjunto com algoritmos genéticos, para verificação da viabilidade técnica e econômica da implantação do sistema de geração eólica. Ainda, implementar um banco de dados integrado, contendo especificações técnicas e custos de componentes de um sistema eólico. A codificação da aplicação foi feita por meio das linguagens *Java*, *C*, *C++* e o banco de dados em linguagem *MySQL*. Para o desenvolvimento das redes neurais e algoritmos genéticos, foi utilizado a biblioteca *Encog*. Com os dados de vento, demanda, consumo energético e tipo de configuração desejada, o aplicativo realiza o dimensionamento do sistema eólico e em seguida, com o uso da inteligência artificial, verifica o melhor cenário para o projeto. Na sequência é apresentado um relatório com as informações físicas e financeiras. Os cálculos utilizados para o dimensionamento foram conforme Pinho *et al.* (2008), CRESESB (2014) e em Albano (2009). O aplicativo mostrou-se eficaz no dimensionamento e análise econômica de sistemas eólicos de pequeno porte, permitindo de forma rápida e simples a simulação de sistemas *On-Grid* e sistemas *Off-Grid*.

**PALAVRAS-CHAVE:** Energia eólica, algoritmos genéticos, aplicativo computacional, fontes renováveis.

FERQUES, Rafael Gil. *State University of Western Paraná, February 2017.*  
**COMPUTATIONAL SYSTEM FOR DIMENSIONING OF WIND ENERGY  
GENERATION SYSTEMS USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS.** Advisor:  
Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira.

## **ABSTRACT**

*The objective of this work was the development of a computational application for the design of wind power generation systems in small-scale On-Grid and Off-Grid installations, using a user friendly and interactive process. For this, the concepts of artificial intelligence were used in conjunction with genetic algorithms, to verify the technical and economic viability of the implantation of the wind power generation system. Also, implement an integrated database, containing technical specifications and component costs of a wind system. The encoding of the application was done through the languages Java, C, C++ and the database in MySQL language. For the development of the neural networks and genetic algorithms, it was used to the Encog library. With wind data, demand, energy consumption and type of configuration desired, the application performs the sizing of the wind system and then, using artificial intelligence, verifies the best scenario for the project. Following is a report with the physical and financial information. The calculations used for the design were according to Pinho et al. (2008), CRESESB (2014) and Albano (2009). The application has proven effective in scaling and economical analysis of small wind systems, allowing fast and simple simulation of On-Grid systems and Off-Grid systems.*

**KEYWORDS:** *Wind Power, genetic algorithm, computer application, renewable sources.*

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	Evolução da energia eólica no Brasil em MW .....	6
<b>Figura 2</b>	Fluxo de ar através da área das pás da turbina .....	10
<b>Figura 3</b>	Principais tipos de sistemas eólicos .....	14
<b>Figura 4</b>	Turbina de eixo horizontal (a) e turbina de eixo vertical (b).....	15
<b>Figura 5</b>	Direção do vento para turbinas em <i>upwind</i> e <i>downwind</i> .....	16
<b>Figura 6</b>	Características da máquina assíncrona .....	20
<b>Figura 7</b>	Diagrama de um aerogerador à velocidade constante .....	22
<b>Figura 8</b>	Diagrama de um aerogerador de indução com escorregamento variável ..	23
<b>Figura 9</b>	Diagrama de um aerogerador de indução com conversor de frequência ...	24
<b>Figura 10</b>	Diagrama básico de um aerogerador de indução de dupla alimentação (DFIG) .....	24
<b>Figura 11</b>	Aprendizagem supervisionada .....	33
<b>Figura 12</b>	Rede neural acoplada a um algoritmo genético .....	36
<b>Figura 13</b>	Visão geral da arquitetura do sistema para integração de rede neural ...	39
<b>Figura 14</b>	Tela principal sistema DIMEE .....	47
<b>Figura 15</b>	Tela início da simulação sistema DIMEE .....	48
<b>Figura 16</b>	Tela seleção aerogerador - Opções .....	49
<b>Figura 17</b>	Tela seleção aerogerador - Modelos .....	49
<b>Figura 18</b>	Tela simulação sistema <i>On-Grid</i> .....	50
<b>Figura 19</b>	Tela simulação sistema <i>Off-Grid</i> .....	51
<b>Figura 20</b>	Tela dados elétricos – Tipos de conexão a rede elétrica.....	52
<b>Figura 21</b>	Tela dados elétricos – Consumo de energia .....	52
<b>Figura 22</b>	Tela série de histórico de consumo elétrico .....	53
<b>Figura 23</b>	Tela Cálculo da demanda.....	54
<b>Figura 24</b>	Tela simulador elétrico - Equipamentos .....	54
<b>Figura 25</b>	Tela simulador elétrico - Período.....	55
<b>Figura 26</b>	Tela dados de vento – Opção velocidade do vento.....	55
<b>Figura 27</b>	Tela velocidade do vento - Série temporal .....	56
<b>Figura 28</b>	Tela velocidade do vento – Velocidade média do vento, fatores C e K....	56
<b>Figura 29</b>	Tela dados de vento – Descrição do terreno.....	57
<b>Figura 30</b>	Tela dados financeiros .....	57
<b>Figura 31</b>	Tela dados financeiros – Custo de instalação .....	58
<b>Figura 32</b>	Tela dados financeiros - Taxa mínima de atratividade .....	58
<b>Figura 33</b>	Tela dados elétricos – Simulação sistema <i>Off-Grid</i> .....	59
<b>Figura 34</b>	Tela de <i>login</i> administração.....	59
<b>Figura 35</b>	Tela do painel de controle .....	60
<b>Figura 36</b>	Tela do painel de controle - Aerogeradores .....	60
<b>Figura 37</b>	Tela aerogeradores - Listagem .....	61
<b>Figura 38</b>	Tela aerogeradores - Gráfico da curva de geração de energia .....	62
<b>Figura 39</b>	Tela aerogeradores - Cadastro novo aerogerador .....	64
<b>Figura 40</b>	Tela do painel de controle - Baterias .....	65
<b>Figura 41</b>	Tela baterias - Listagem .....	66
<b>Figura 42</b>	Tela baterias – Cadastro nova bateria.....	67
<b>Figura 43</b>	Tela do painel de controle - Inversores .....	67
<b>Figura 44</b>	Tela inversores - Listagem .....	68

<b>Figura 45</b>	Tela inversores – Cadastro novo inversor .....	69
<b>Figura 46</b>	Tela do painel de controle – Controlador de Carga .....	70
<b>Figura 47</b>	Tela controlador de carga - Listagem .....	70
<b>Figura 48</b>	Tela controlador de carga – Cadastro novo controlador.....	71
<b>Figura 49</b>	Tela do painel de controle – Tensão de equipamentos .....	72
<b>Figura 50</b>	Tela tensão - Listagem .....	73
<b>Figura 51</b>	Tela tensão equipamentos – Cadastro nova tensão .....	73
<b>Figura 52</b>	Tela do painel de controle – Equipamentos elétricos .....	73
<b>Figura 53</b>	Tela equipamentos elétricos - Listagem .....	74
<b>Figura 54</b>	Tela equipamento elétrico – Cadastro novo equipamento .....	75
<b>Figura 55</b>	Tela do painel de controle – Conteúdos .....	75
<b>Figura 56</b>	Tela edição conteúdo .....	76
<b>Figura 57</b>	Relatório simulação <i>On-Grid</i> .....	78
<b>Figura 58</b>	Relatório simulação <i>Off-Grid</i> .....	80

## ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Objetivos .....	3
1.1.1	Objetivo geral .....	3
1.1.2	Objetivos específicos: .....	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1	Histórico e cenário atual da energia eólica.....	4
2.2	Comercialização da energia no Brasil.....	7
2.3	Parques eólicos e potência eólica disponível e utilizável .....	8
2.3.1	Distribuição de <i>Weibull</i> .....	11
2.4	Sistemas de controle aerodinâmico .....	13
2.5	Componentes de um sistema eólico .....	14
2.6	Classificação dos geradores eólicos .....	21
2.7	Aplicações do sistema eólico .....	26
2.8	Aspectos econômicos de projetos eólicos.....	27
2.9	Redes neurais estruturas e aplicações .....	30
2.10	Arquitetura de uma RNA.....	31
2.10.1	Aprendizagem .....	32
2.11	Algoritmos genéticos.....	34
3	MATERIAL E MÉTODOS .....	37
3.1	Desenvolvimento do <i>software</i> .....	37
3.2	Modelagem de RNA.....	39
3.3	Método de dimensionamento dos sistemas de geração eólica .....	40
3.3.1	Capacidade de carga diária total .....	41
3.3.2	Número de aerogeradores.....	42
3.3.3	Corrente máxima dos aerogeradores.....	43
3.3.4	Número de controladores de carga .....	43
3.3.5	Capacidade do banco de baterias .....	44
3.3.6	Número de baterias.....	44
3.3.7	Número de inversores .....	45
3.3.8	Observações gerais .....	46
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	47
4.1.	Sistema DIMEE .....	47
4.2.	Simulação .....	48
4.3.	Administração .....	59
4.4.	Simulação eólica <i>On-Grid</i> .....	76
4.5.	Simulações eólica <i>Off-Grid</i> .....	78
5.	CONCLUSÕES .....	81
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	82
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	83

## 1 INTRODUÇÃO

A energia eólica é a energia obtida pelo movimento do vento, que gira um conjunto de hélices conectadas a um gerador de eletricidade. Para Lopes (2011), a quantidade de energia produzida é diretamente proporcional ao tamanho de suas hélices, e do regime de ventos do local.

Como fonte alternativa de energia, a energia eólica destaca-se, pois apresenta vantagens, como tempo reduzido de construção do parque eólico, não emissão de gases de efeito estufa, possibilidade de uso do terreno para outros fins (agricultura e pecuária) a construção é modular, facilidade de expansão, aplicação em sistemas híbridos (solar-eólica), dentre outras.

Atualmente estão instalados 141,6 GW na União Europeia, com capacidade total acumulada de 147,8 GW para toda a Europa. A energia eólica responde por 44,2% de toda a capacidade de instalação de energia, ultrapassando as hidrelétricas como a terceira maior fonte de geração de energia da União Europeia, correspondendo a 15,6% da capacidade total de energia até o final de 2015 (GWEC, 2015). Ainda em termos de capacidade instalada, estima-se que, até 2020, a Europa terá 100 GW (ANELL, 2008). No Brasil a capacidade eólica deverá atingir 15,2 GW até 2019, representando 4,21% da capacidade instalada e 5,54% da matriz energética nacional (ABEEólica, 2016).

De acordo com a ANEEL (2016), o Brasil é privilegiado em termos de disponibilidade de recursos naturais renováveis para o aproveitamento energético, destacando-se, entre eles, os recursos hídricos, a biomassa, a fotovoltaica e a eólica e está entre os países com maior percentual de energia eólica em sua matriz energética.

Considerando que existem, no Brasil, várias regiões com grande potencial de aproveitamento eólico, e para garantir o crescimento dessa fonte de energia, o desenvolvimento de novas tecnologias e investimentos são essenciais, e torna-se de grande interesse criar meios que facilitem a implantação de sistemas eólicos de forma significativa, para atingir a máxima eficiência da utilização e transferência da energia a partir do vento. Para isso o processo de dimensionamento eólico é de grande interesse para projetos onde, além da busca de redução de custos na

aquisição de energia, haja a preocupação para maior eficiência na transformação de energia.

Para Lima (2009), um sistema eólico pode ser utilizado em três aplicações distintas, sistemas isolados, sistemas híbridos e sistemas interligados à rede, e devem ser dimensionados e instalados conforme as condições climáticas, geográficas e demandas existentes, pois necessita de uma unidade de controle de potência, e em certos casos uma unidade de armazenamento.

A conversão de energia mecânica em elétrica é explicada pelo princípio da conservação da energia aplicado ao funcionamento de um gerador, que depende da velocidade do vento.

Os geradores, mecanicamente estão compostos principalmente pelo estator e o rotor, com configurações diferentes que irão operar baseados nas mesmas leis eletromagnéticas, mas com características mecânicas e elétricas diferentes em relação ao rotor (WILDI, 2013).

Supondo que esse gerador gire na mesma velocidade do campo magnético, e relacionando a velocidade do rotor com a frequência elétrica, gera-se energia elétrica a uma frequência de 60 ou 50 Hz. Por isso, quanto maior o número de polos do gerador menor deve ser a velocidade da máquina para manter a frequência.

A potência elétrica fornecida pelo vento que faz girar uma turbina é proporcional à terceira potência da velocidade do vento. Quando se calcula dados de velocidade do vento, pequenos erros representam grandes desvios na previsão de potência eólica disponível, o que acarretará em incertezas no investimento e qualidade do serviço.

Assim, este trabalho propõe criar um sistema computacional, para dimensionamento de sistemas eólicos de pequeno porte, bem como quantificar os aerogeradores e os demais componentes do sistema, utilizando um banco de dados integrado.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver um sistema computacional multiplataforma, utilizando redes neurais artificiais, sob os termos da Licença Pública Geral *GNU*<sup>1</sup> para realização de dimensionamento de sistemas eólicos *Off-Grid* e *On-Grid* de pequeno porte.

### 1.1.2 Objetivos específicos:

- Dimensionar os aerogeradores e demais componentes do sistema de geração eólica para as configurações *On-Grid* e *Off-Grid*;
- Aplicar os conceitos de inteligência artificial para o desenvolvimento de um algoritmo genético, empregando os conceitos de redes neurais artificiais integrados aos métodos heurísticos, a fim de gerar um constante melhoramento no algoritmo e verificar as melhores condições para escolha de equipamentos;
- Criar um banco de dados com as especificações técnicas e os custos dos componentes de um sistema eólico;
- Prover meios de armazenamento dos dados de retorno do sistema e facilidade ao seu acesso;
- Realizar uma análise econômica para os sistemas dimensionados;
- Implementar uma interface amigável e altamente intuitiva para realizar todas as operações descritas anteriormente.

---

<sup>1</sup> <http://www.gnu.org/licenses/licenses.html#GPL>

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Histórico e cenário atual da energia eólica

Energia eólica é, basicamente, aquela obtida da energia cinética (movimento) gerada por massas de ar provocadas pelas diferenças de temperatura na superfície do planeta. Sua aplicação se dá desde a antiguidade, mas sem um período preciso, pois era utilizado na movimentação de barcos em atividade econômica, como também no bombeamento de água e moagem de grãos, sendo atualmente a aplicação mais importante deste meio (ANEEL, 2008).

A aplicação de energia eólica para geração de eletricidade iniciou-se na Dinamarca em 1980, em pequenas companhias de equipamentos agrícolas com fabricação própria, com capacidade de geração entre 30 a 55 kW (MARTINS; GUARNIERI; PEREIRA, 2008).

A capacidade instalada de energia eólica no mundo em 1990 era inferior a 2.000 MW, em 1994 de 3.734 MW, divididos entre Europa (45,1%), América (48,4%), Ásia (6,4%) e outros países (1,1%). Em 1998 chegou a 10.000 MW, e no final de 2002 ultrapassou os 32.000 MW de capacidade instalada (ANEEL, 2008). A capacidade mundial instalada de energia eólica aumentou 1155% entre 1997 e 2007, passando de 7.500 para 93.800 MW (*WWEA*<sup>2</sup>). A capacidade instalada total mundial de aerogeradores voltados à produção de energia elétrica atingiu 74223 MW ao final de 2006, com crescimento de mais de 20% em relação a 2005. Em 2005, apenas 55 países adotavam algum tipo de incentivo às fontes renováveis, esse número saltou para 118 países em 2011 (REN21, 2016). Nesse mesmo ano a capacidade eólica em operação no mundo chegou a 238 GW (GWEC, 2015).

A Associação Europeia de Energia Eólica estabeleceu metas, e indicou que até 2020, a energia eólica poderá suprir 10% de toda a energia elétrica no mundo. Em termos de capacidade instalada, estima-se que, até 2020, a Europa terá 100.000 MW (ANEEL, 2008). China, Alemanha, EUA, Brasil, Índia, Canadá, Reino Unido, França e Turquia, foram os países que mais aumentaram a capacidade de energia eólica instalada em 2014 (GWEC, 2015).

---

<sup>2</sup> <http://www.wwindea.org/>

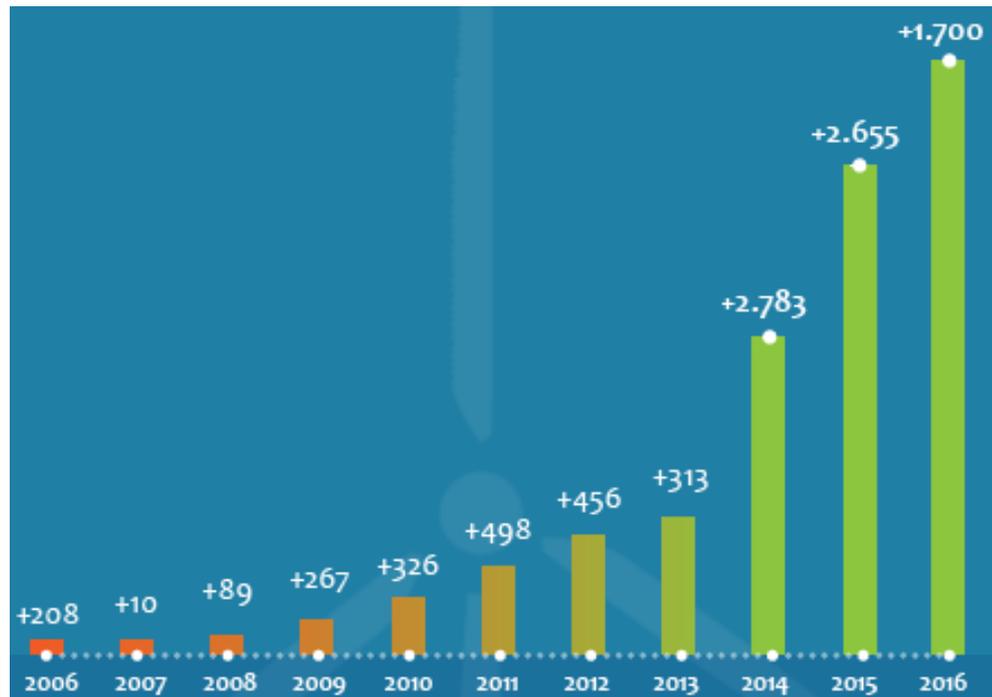
Atualmente estão instalados 141,6 GW na União Europeia, com capacidade total acumulada de 147,8 GW para toda a Europa. A energia eólica responde por 44,2% de toda a capacidade de instalação de energia, ultrapassando as hidrelétricas como a terceira maior fonte de geração de energia da União Europeia, correspondendo a 15,6% da capacidade total de energia até o final de 2015 (GWEC, 2015).

No Brasil, havia registro de 92 empreendimentos eólicos autorizados pela ANEEL, em 2003, e seu crescimento é constante nos últimos anos. Em 2013 foram contratados 4,7 GW de projetos eólicos, e em 2014, 2,3 GW - todos a serem implantados até 2019, quando a capacidade eólica brasileira deverá atingir 15,2 GW. Essa capacidade aumentou cerca de 60% em 2015, passando de 6 GW para 9,8 GW (ABEEólica, 2016), representando 4,21% da capacidade instalada no país e 5,54% da matriz energética nacional, as quais 73,08% estão localizadas no nordeste, e em segundo lugar está a região sul (ANEEL, 2015). Em 2016, capacidade de construção no Brasil é de 8,62 GW, isso representa redução de CO<sub>2</sub> de 16.864.332 T ano<sup>-1</sup>, com 390 usinas instaladas e capacidade de instalação de 9,8 GW (ABEEólica, 2016).

Para Lopes (2011), o Brasil possui um dos maiores potenciais eólicos do planeta, embora o vento seja responsável por 0,03% de 92 mil MW instalados no país.

Segundo a *EIA* - Agência Internacional de Energia nos países europeus e da Ásia, verificou-se crescimento das energias renováveis, principalmente da eólica. O aumento da geração de energia eólica em 2015 foi igual à quase metade do crescimento global de energia elétrica. Isso foi possível a fatores como a reestruturação industrial, a melhoria na eficiência energética e o crescimento de energias renováveis, como a eólica (GWEC, 2015).

De acordo com a ANEEL (2016), o Brasil está entre os países com maior percentual de energia eólica em sua matriz energética. Essa representação consiste em cerca de 6,15% do total da matriz. Estima-se um crescimento na utilização de energia eólica, passando de 1.700 MW no ano de 2016 para 5.959 MW no ano de 2018, conforme apresentado na **Figura 1**, sendo que, os estados do nordeste brasileiro possuem maior representatividade nesta geração, conforme detalhado na **Tabela 1**.



**Figura 1** Evolução da energia eólica no Brasil em MW  
**Fonte:** ANEEL (2016)

**Tabela 1** Participação dos estados na produção de energia eólica  
**Fonte:** ANEEL (2016)

Estado	Potência em MW	Quantidade de Usinas
Bahia	5.135,8	223
Rio Grande do Norte	4.873,5	181
Ceará	2508,3	104
Rio Grande do Sul	2092,6	94
Piauí	1887,5	68
Pernambuco	878,6	38
Maranhão	264,3	10
Santa Catarina	241,5	16
Paraíba	159,0	16
Sergipe	34,5	1
Rio de Janeiro	28,0	1
Paraná	2,5	1
Minas Gerais	1,56	1
São Paulo	0,22	1

As tecnologias de energia renovável são intensivas em capital, pois a maior parte do investimento concentra-se na fase inicial do projeto, correspondendo a 75% do investimento total de um parque eólico (TOURKOLIAS; MIRASGEDIS, 2011).

Características socioeconômicas de muitas regiões, como desemprego, falta de alternativas de desenvolvimento econômico e altas taxas de migração da população ativa, tornam vantajoso o investimento nessas tecnologias. Segundo Nguyen (2007), devido a essas características, a construção de usinas demanda mão de obra, gerando potencial para a capacitação e emprego de populações rurais em diversas localidades.

## **2.2 Comercialização da energia no Brasil**

Em 2004, o Governo Federal criou as bases para o modelo do setor energético brasileiro, baseando nas Leis 10.847 e 10.848, de 15 de março de 2004 e no Decreto 5.163, de 30 de julho de 2004 (MELO; SANTOS; YAMAMOTO, 2016).

Para isso foram criados dois mercados comerciais de energia, como componentes do novo modelo do setor elétrico, um ambiente de contratação regulada (ACR), no qual um conjunto de distribuidores compra eletricidade de geradoras em leilões públicos, com preços definidos; e um ambiente de contratação livre (ACL), no qual os consumidores e produtores de eletricidade negociam livremente os seus contratos bilaterais. Esse mercado oficial de energia elétrica, operando por leilões públicos com contratos de longo prazo (15 e 30 anos), é importante instrumento de consolidação do processo de liberalização da indústria de fornecimento de energia no Brasil, reduzindo riscos de investidores, e estimulando a eficiência econômica, com sinais corretos do custo de expansão do sistema por meio da concorrência, alimentados por estudos de planejamentos feitos pelo governo (ABEEólica, 2016).

O ACL inclui os consumidores do mercado livre que têm direito de escolher o seu fornecedor de energia pagando uma taxa pelo uso do sistema de distribuição ou de transmissão, com contratos bilaterais e definições de cláusulas de preço, quantidade, duração e cobertura. Este mercado foi criado no Brasil há mais de dez anos. O direito de ser um consumidor livre foi especificado na Lei 9.074/1995, alterada pela Lei 9.648/1998 e complementada pela Resolução da ANEEL 264/1998

e ficou determinado por esta lei que o mercado deveria ser, gradativamente, liberado para que os grandes consumidores pudessem se tornar livres.

A responsabilidade pela distribuição de energia é do sistema elétrico, cuja operação é coordenada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, considerando assim os contratos no Brasil como instrumentos financeiros (MELO; SANTOS; YAMAMOTO, 2016)

As diferenças entre a produção e consumo e a quantidade contratada são liquidadas no mercado à vista, definidas de acordo com o preço local denominado Preço de Liquidação das Diferenças (PLD). A operação no mercado à vista e o processo de liquidação financeira são responsabilidades da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica.

### **2.3 Parques eólicos e potência eólica disponível e utilizável**

O primeiro parque eólico instalado na Região Sul do Brasil, foi em Palmas, no Paraná, instalado em 1999, composto de cinco turbinas de 500 kW, totalizando 2,5 MW de potência instalada e foram fabricadas pela *Wobben Windpower*. Em 2002, foi construído em Santa Catarina, o primeiro parque eólico deste estado, localizado na cidade de Bom Jardim da Serra, com potência instalada de 600 kW. Em 2003, mais um parque eólico foi construído em Santa Catarina, na cidade de Horizonte, com uma potência instalada de 2,4 MW. Em todos os parques utilizou-se turbinas eólicas E-40 de 600 kW produzidas pela *Wobben Windpower*, que foi a primeira produtora independente de energia elétrica, com origem eólica, autorizada pela ANEEL (WOB BEN WINDPOWER, 2016).

Através das turbinas eólicas, a energia cinética contida no vento é convertida em energia mecânica pelo giro das pás do rotor e transformada em energia elétrica pelo gerador (MARTINS, GUARNIERI, PEREIRA, 2008).

O aproveitamento da força dos ventos é feito pela conversão da energia cinética. A energia disponível para uma turbina eólica é essa energia cinética associada a uma coluna de ar que se descola em velocidade uniforme e constante  $v$  (m/s) (PINTO, 2013), pois o ar possui massa e se movimenta em forma de vento, calculando-se assim sua energia cinética:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

Em que:

E = energia cinética em (Joules);

m = massa do ar (kg);

v = velocidade do vento (m/s).

Como é a potência que classifica a turbina eólica, e não a energia cinética, e a potência varia com o passar do tempo, pode-se calcular a potência por meio da taxa de variação da função, logo, a potência P disponível pelo vento é a derivada da energia cinética para aquele intervalo de tempo:

$$P = \left( \frac{dE}{dt} \right) \frac{(mv^2)}{2} \quad (2)$$

Em que:

P = potência disponível do vento (W);

t = tempo (s);

m = fluxo de massa de ar (kg/s);

Quando uma massa de ar (m) passa através de uma área em determinado intervalo de tempo (t), pois substitui-se m por  $\rho$ :

$$m = \rho A \frac{dE}{dt} = \rho A v \quad (3)$$

Em que:

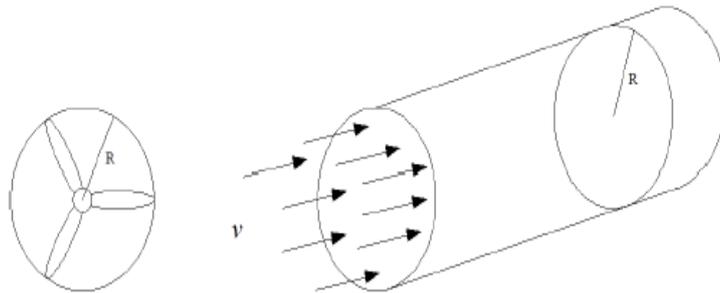
$\rho$  = massa específica do ar ou densidade absoluta do ar (kg/m<sup>3</sup>);

A = área de varredura pelo vento (m<sup>2</sup>);

Para assim ter a potência disponível no vento. É uma equação que fornece o fluxo da potência eólica, ou como, a quantidade de energia por uma dada área:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad \text{ou} \quad \frac{P}{A} = \left( \frac{1}{2} \right) \rho v^3 \quad (4)$$

A densidade eólica é proporcional à densidade do ar. Para condições padrões (15 °C, nível do mar), a densidade do ar vale 1,225 kg/m<sup>3</sup>. O fluxo de ar através da área compreendida pelas pás da turbina pode ser verificado na **Figura 2**.



**Figura 2** Fluxo de ar através da área das pás da turbina  
**Fonte:** SOHN (2014)

Considerando a atmosfera como um gás seco, a relação entre mudança de pressão e mudança na altura para determinado elemento no campo gravitacional é:

$$dp = -\rho g dz \quad (5)$$

Em que:

$p$  = pressão atmosférica local (Pa);

$\rho$  = densidade absoluta do ar em função da altitude  $z$  (kg/m<sup>3</sup>);

$z$  = altura (m);

$g$  = aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>).

O sinal negativo indica que a altura,  $z$ , é medida positivamente no modo ascendente e que  $p$  diminui positivamente na direção de  $z$  (PINTO, 2013).

A velocidade do vento após passar pela turbina é menor que a velocidade de incidência, pois não é possível extrair toda a energia cinética contida na massa de ar que flui pelas pás da turbina. A potência mecânica extraída é reduzida por um fator denominado coeficiente de potência  $C_p$  com valor de 0,593, que é fornecido pela

potência mecânica dividida pela potência disponível ( $16/27 \approx 0,59$ ) (ACKERMANN, 2012).

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \quad (6)$$

Em 1920, o físico alemão Albert Betz, provou que a máxima potência extraída por uma turbina ideal sob condições do vento é 59,26% ou 16/27 da potência disponível nos ventos – Limite de Betz. Na prática, as turbinas modernas possuem um coeficiente de potência máximo na faixa de 52 a 55% (ACKERMANN, 2012). Na realidade o  $C_p$  é menor do que 0,593.

A potência disponível no vento é diretamente proporcional ao cubo da velocidade desse vento. Isso significa que se o vento aumentar sua velocidade em apenas 10%, a potência disponível aumentará em 33%. A Equação 4 também informa que a potência do vento é proporcional à área varrida pelo rotor da turbina eólica. Para uma turbina de eixo horizontal *HAWT – Horizontal Axis Wind Turbine* – convencional, a área é  $A = (\pi/D)^2$ , logo a potência do vento é proporcional ao quadrado do diâmetro da pá. Duplicar o diâmetro da pá é aumentar a potência disponível em quatro vezes. Uma turbina de eixo vertical *VAWT – Vertical Axis Wind Turbine* – é a área varrida aproximadamente  $\frac{2}{3}$  da área do comprimento máximo do rotor e a altura é igual à extensão das pás (PINTO, 2013).

### 2.3.1 Distribuição de Weibull

Os registros de densidade de probabilidade são importantes quando descritos por expressões analíticas, isto é, a probabilidade da velocidade do vento ser igual a um determinado valor. A distribuição que mais se ajusta aos parâmetros do vento é chamada de distribuição de Weibull (WILLIS; SCOTT, 2000).

A expressão matemática da função da densidade da probabilidade de Weibull é:

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e \left[ -\left(\frac{v}{c}\right)^k \right] \quad (7)$$

Em que:

$k$  = fator de forma (adimensional);

$c$  = fator de escala (m/s).

Quando se conhece pouca coisa sobre o regime do vento, um bom ponto de partida é assumir  $k=2$ ; nesse caso a função de probabilidade se chama distribuição de Rayleigh, usada para estudos preliminares, quando se conhece apenas a velocidade média do vento para encontrar a sua frequência de distribuição (PINTO, 2013). Para cálculo de  $c$  e  $k$  dos parâmetros de Weibull, utiliza-se:

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (8)$$

$$\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) = \int_0^{\infty} y^{\frac{1}{k}} e^{-y} dy \quad (9)$$

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}}\right)^{-1,086} \quad 1 \leq k \leq 10 \quad (10)$$

Em que:

$\bar{v}$  = média das velocidades do vento (m/s);

$\sigma$  = desvio padrão;

$\Gamma$  = função gama

A velocidade do vento varia em escalas diurna, mensal e anual. Na maioria das vezes a variação da velocidade do vento chega a 10% entre o seu valor médio anual e a média de longo prazo, ou seja, o vento tende a determinado perfil de velocidade. Para a análise dos dados da velocidade do vento, usualmente se divide tais dados em intervalos de 1m/s, que são medidos em estações anemométricas, que registram a velocidade do vento em faixas predefinidas em minutos ou horas (PINTO 2013). Já a função da densidade de probabilidade da velocidade do vento

pode ser calculada para cada hora do dia típico no mês, utilizando-se dados de séries temporais.

## 2.4 Sistemas de controle aerodinâmico

Para Moreira Junior (2009), os sistemas de controle servem para o equilíbrio do sistema eólico, o que impedirá colapsos envolvendo esforços mecânicos excessivos, causando danos à unidade eólica, limitando a velocidade do rotor da turbina.

Conforme Sohn (2014), os métodos para limitar a energia extraída do vento, para valores acima do nominal, são: i) controle estol (*stall*), ii) controle de passo (*pitch*), e iii) controle *stall* ativo. Os métodos de controle geralmente usados nas unidades eólicas de velocidade fixa e variável são controle *stall*, controle de *pitch*, e controle *stall* ativo e controle de *pitch*, respectivamente (ACKERMANN, 2012).

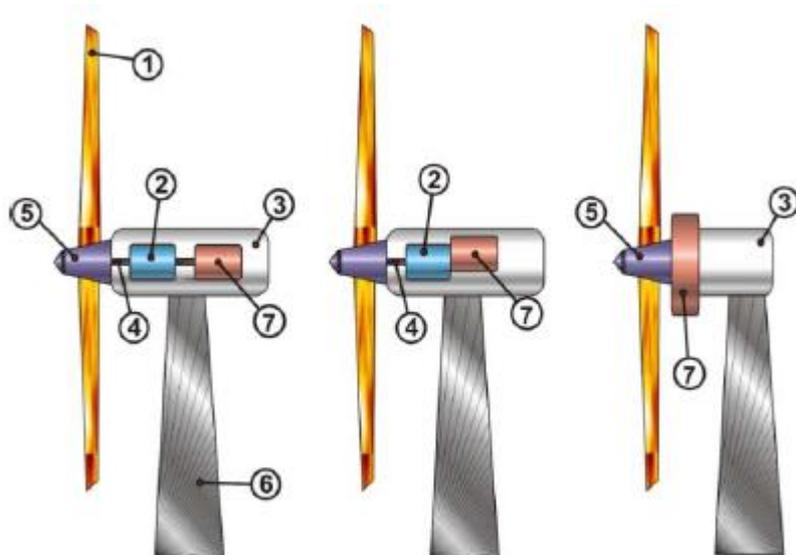
i) Controle estol (*stall*): é um método de controle que utiliza as propriedades geométricas das pás para limitar a força do vento, ou seja, controle por perda aerodinâmica. As pás são fixas rigidamente ao rotor da turbina, com ângulo  $\beta$  constante, permitindo que em velocidade acima da nominal, ocorra turbulência na região atrás das pás, aumentando a força de arrasto e o ângulo de ataque  $\alpha$ , o que provocará diminuição na força de sustentação (JERVELL, 2008). Método simples e o primeiro utilizado em sistemas de conversão eólica (ACKERMANN, 2012), porém apresenta instabilidade da potência elétrica gerada para velocidades superiores à nominal, observada pelas vibrações das pás (SOHN, 2014).

ii) Controle de passo (*pitch*): é um método de controle ativo em que as pás são rotacionadas alterando o ângulo  $\beta$  de passagem, limitando assim a energia extraída do vento (SHON, 2014). Para Burton *et al.* (2011), o que o sistema faz é aumentar o ângulo de passo conforme aumenta a velocidade do vento, diminuindo-se o ângulo de ataque, através da rotação da turbina em torno do eixo longitudinal. As vantagens desse tipo de controle estão no fácil controle da potência, maximização da energia capturada, bem como a não exigência de pás robustas, com redução de custos relacionados à estrutura mecânica. Porém, apresenta menor confiabilidade, associados ao sistema de controle e possíveis variações bruscas da velocidade do vento.

iii) Controle estol (*stall*) ativo: esse método de controle atua de forma contrária ao controle de *pitch*, pois conforme aumenta-se o vento, diminui-se o ângulo  $\beta$  e como consequência ocorre aumento do ângulo de ataque, o que provoca turbulência na região atrás das pás, reduzindo a eficiência aerodinâmica da turbina (SOHN, 2014).

## 2.5 Componentes de um sistema eólico

Os sistemas eólicos são divididos em dois grandes grupos, o sistema de grande potência e o segundo de baixa potência. Além da capacidade de geração, a diferença entre os sistemas são os componentes (**Figura 3**). Os aerogeradores (*WTG – Wind Turbine Generator*) são máquinas que convertem a energia cinética dos ventos em energia mecânica rotacional nas pás da turbina, para realizar trabalho mecânico ou conversão em energia elétrica (TIBOLA, 2009).



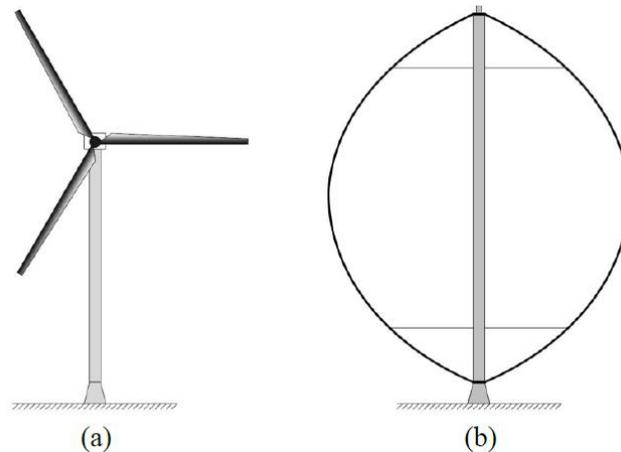
1 Rotor	3 Nacele	5 Cubo	7 Gerador
2 Caixa de engrenagens	4 Eixo do rotor	6 Torre	

**Figura 3** Principais tipos de sistemas eólicos

**Fonte:** TIBOLA (2009)

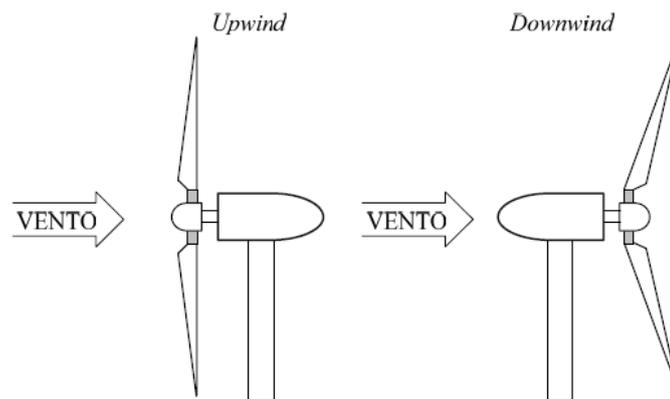
Pode-se observar na **Figura 1** que, basicamente, o sistema de conversão de energia eólica se divide em:

1 - Rotor: os rotores eólicos são responsáveis por capturar a energia cinética e transmiti-la ao gerador elétrico. Quanto à posição do eixo de rotação (**Figura 4**) as turbinas eólicas podem ser classificadas como: turbinas de eixo horizontal (*horizontal axis wind turbine – HAWT*) e as de eixo vertical (*vertical axis wind turbine – VAWT*) (PINTO, 2013). Atualmente as turbinas eólicas conectadas à rede elétrica são turbinas de eixo horizontal (MARQUES, 2004).



**Figura 4** Turbina de eixo horizontal (a) e turbina de eixo vertical (b)  
**Fonte:** BONELLI (2010).

As turbinas de eixo horizontal, baseadas na posição do rotor, em relação à torre, são classificadas em *upwind* e *downwind* (MARQUES, 2004), ou seja, em relação à superfície de ataque do vento incidente nas pás (**Figura 5**). Em posição *downwind*, o vento incide na área de varredura do rotor por trás da turbina eólica, permite o auto alinhamento do rotor na direção do vento. Está em desuso, pois o escoamento é perturbado pela torre antes de incidir no rotor. Em posição *upwind*, o vento ataca as pás pelo lado da frente. A principal vantagem deste tipo de turbina é que elas evitam o distúrbio causado pela torre no vento, isso explica o porque da maior parte das turbinas eólicas utilizadas atualmente serem do tipo *upwind*. A desvantagem desse tipo de turbina é a passagem periódica das pás pela torre, o que pode provocar pulsações de torque na turbina, e necessidade de orientação direcional, provocando maior carga na torre.



**Figura 5** Direção do vento para turbinas em *upwind* e *downwind*  
**Fonte:** MARQUES (2004)

2 - Caixa de engrenagens: localizada dentro da nacela, faz a sintonia entre a baixa velocidade da turbina e a alta velocidade do gerador. Existem geradores sem esse dispositivo multiplicador, nesse caso, o eixo do rotor é acoplado diretamente à carga (PINTO, 2013). Este elemento multiplica a velocidade de rotação do rotor, quando baixa para altas rotações por minuto (GUERREIRO, 2014).

3 - Nacela: é o envoltório montado sobre a torre onde estão contidos o gerador e a caixa de acoplamento. O uso ou não de caixas de engrenagens e a disposição dos componentes na nacela são fatores para determinar seu tamanho (PINTO, 2013). Dentro da nacela há um sistema de direção que, através de um motor, é responsável por colocar a turbina na direção do vento (PINTO, 2013). Sob a nacela estão os medidores da velocidade do vento (anemômetro) e da sua direção (biruta – *windvane*), que transmitem os dados para o sistema de controle montado sobre a base da torre. Leituras essas que servem também para monitorar o desempenho do gerador (PINTO, 2013).

4 – Eixo do rotor: é o responsável pelo acoplamento das pás ao gerador, pois são as pás que interagem com o vento, transformando energia cinética em mecânica (PINTO, 2013).

5 – Cubo: é estrutura na qual são fixadas as pás, contruída em aço ou liga metálica de alta resistência, transmitem a energia captada pelas pás para o eixo (PINTO, 2013).

6 – Torre: é a estrutura de sustentação, suportando a nacela e elevando o rotor até uma altura em que a velocidade do vento é maior e menos perturbada do que junto ao solo (PINTO, 2013).

Conforme o mesmo autor, há dois tipos de torres: i) as tubulares cônicas (construídas de aço ou concreto) e ii) treliçadas (construídas em aço).

i) Torres tubulares cônicas: frequentemente são pré-fabricadas, podendo ser construídas torres altas, sem problemas de transporte e geralmente utilizada em usinas de pequeno e médio portes, principalmente as torres de concreto armado centrifugado.

ii) Torres treliçadas: oferecem a vantagem e a facilidade de transporte em relação às torres tubulares de aço, porém com o aumento do tamanho das turbinas, as torres de aço estão substituindo as torres treliçadas. Mesmo assim ainda oferecem rapidez no transporte, quando comparadas às tubulares, já que estas são muito grandes e enfrentam problemas de logística.

7 – Gerador e pás: Pás são aerofólios sintéticos que capturam a energia do vento e a convertem em energia rotacional no eixo. São fabricadas, normalmente de compostos sintéticos, como fibras de vidro ou de carbono, estas últimas apresentam melhores características mecânicas (ABAD et al.,2011).

Gerador é a máquina responsável pela produção de energia elétrica. São dispositivos capazes de manter uma diferença de potencial elétrico entre dois pontos – pólos terminais – transformando energia mecânica em elétrica (GUERRERO, 2014). A transformação de energia mecânica de rotação em energia elétrica, através de equipamentos de conversão eletromecânica, apresentavam problemas que envolviam: variações na velocidade do vento – extensa faixa de rotação por minuto para a geração – variações do torque de entrada, exigência de frequência e tensão constante de energia final produzida e facilidade de instalação, operação e manutenção. Diante o exposto criaram-se alternativas de máquinas elétricas (LIMA, 2009).

Os geradores, mecanicamente estão compostos principalmente pelo estator e o rotor, com configurações diferentes que irão operar baseados nas mesmas leis eletromagnéticas, mas com características mecânicas e elétricas diferentes em relação ao rotor (WILDI, 2013).

Chapman (2013), apontou que geradores são dispositivos capazes de manter uma diferença de potencial elétrico entre dois pontos – pólos ou terminais – transformando energia mecânica do rotor em energia elétrica. Para Wildi (2013), a rotação do rotor sob os condutores elétricos no estator induzem uma tensão nos

terminais, que é proporcional à velocidade do campo magnético, para assim se conseguir a transformação pela ação do campo magnético em função do tempo, obedecendo ao lei de Faraday.

A energia entregue a rede deve estar em frequência específica (no Brasil 60 Hz), porém esta frequência varia com a rotação do gerador, que pode ser de dois tipos: síncronos e assíncronos, os quais ligados de diferentes formas com outros elementos mecânicos ou eletrônicos melhoram sua eficiência (GUERRERO, 2014)

- a) Síncronos: em geradores síncronos se aplica corrente contínua (CC) nos enrolamentos do rotor para se produzir campo magnético, pois quando iniciar a rotação, por meio da força da turbina do aerogerador, este produza campo magnético rotacional dentro da máquina, que induzirá uma força eletromotriz nos enrolamentos do estator do gerador (CHAPMAN, 2013).

O campo magnético no gerador síncrono pode ser criado um imã permanente ou com enrolamento convencional (PINTO, 2013). A vantagem desse tipo de gerador é que não necessita de corrente reativa para magnetização, com possibilidade de operar sem caixa de engrenagens nos aerogeradores, usando geradores multipólos que girarão à mesma velocidade (ACKERMANN, 2012).

Para calcular a velocidade de rotação deste tipo de gerador, fixa-se a frequência da rede e o número de pólos da máquina:

$$\omega_m = \frac{120 * f_s}{P} \dots\dots\dots (11)$$

Em que:

$\omega_m$ = velocidade do rotor (rpm);

P=número de pólos;

f= frequência da rede (Hz).

A equação permite que o aerogerador trabalhe com velocidade de rotação constante, de maneira que se observe o sincronismo entre frequência gerada pela rotação do gerador e a frequência da rede elétrica (WILDI, 2013).

Segundo Ackermann (2012) para o gerador funcionar à velocidade variável deve-se conectar conversores AC-DC-AC entre o estator e a rede elétrica para ajustes de frequência do rotor.

- b) Assíncronos: os geradores assíncronos são constituídos por um estator e um rotor, e este pode ser rotor de gaiola de esquilo ou rotor boninado.

O rotor de bobina possui grupos de bobinas iguais ao estator, trifásicas ligadas em uma das extremidades, na outra extremidade são ligados anéis sobre o eixo do rotor, permitindo adaptações de dispositivos – resistências variáveis ou fontes AC – para fazer controle direto das correntes do rotor (CHAPMAN, 2013). O rotor de gaiola de esquilo consiste de uma série de barras condutoras em curto-circuito por meio de anel em cada extremidade. No estator estão as bobinas indutoras que geram campo rotacional quando conectadas a um sistema trifásico em equilíbrio de tensões senoidais (CHAPMAN, 2005), que dependendo da magnitude da corrente em cada enrolamento, tem-se a força e direção do campo magnético gerado pela bobina. Este campo magnético rotacional passa sobre as barras ou bobinas do rotor e induzem uma tensão neles, é essa tensão induzida que faz o fluxo de corrente percorrer os condutores do rotor, gerando campo magnético, por efeito da indutância, daí a denominação de máquina de indutância (PINTO, 2013).

Ainda para Chapman (2013), a tensão e corrente estão em defasagem em relação ao estator, isso faz com que os campos magnéticos estejam defasados, produzindo com isso torque eletromecânico no rotor, fazendo-o girar. O campo do estator gira constantemente e o campo do rotor não consegue alinhar-se com ele, o eixo do rotor é movimentado para que os pólos do estator e rotor se alinhem, por isso são consideradas máquinas assíncronas (WILDI, 2013).

Para Ackerman (2012) são ditas assíncronas porque o rotor não irá girar na velocidade correspondente à frequência síncrona do estator, e esta diferença de velocidade pode-se ser calculada pela velocidade de escorregamento:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} * 100 \quad (12)$$

$$\omega_m = (1-s)\omega_s \quad (13)$$

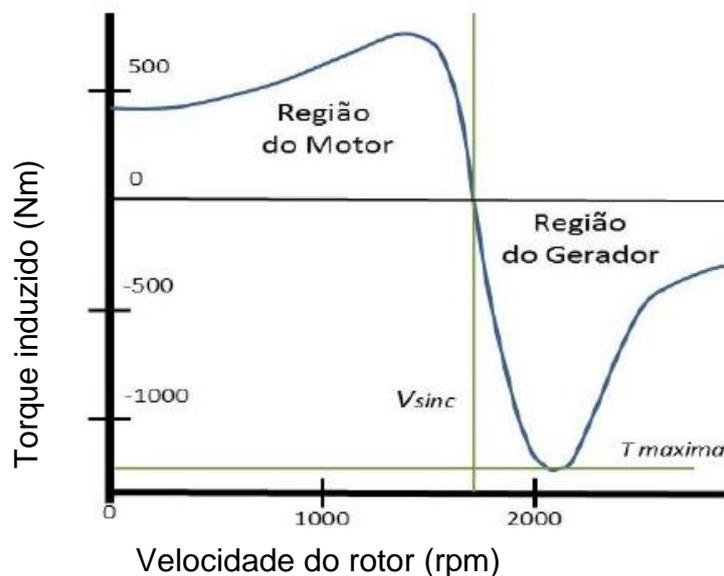
Em que:

$\omega_s$ = velocidade de sincronismo (rpm);

s=escorregamento (%);

Wildi (2013) ressaltou que se o motor está em estado estacionário, “s” terá valor 1 (um), porém ao iniciar a indução de tensão no rotor, este acelera e a medida que a velocidade aumenta, os condutores do rotor não são atravessados pelo campo magnético com a mesma velocidade, isso faz com que a tensão e a frequência induzida diminuam, o que resultará na perda de torque da máquina.

Para Chapman (2013), no funcionamento de uma máquina assíncrona (**FIGURA 6**), observa-se que, quando a velocidade do rotor se aproxima da velocidade de sincronismo, este perde torque, porém quando consegue superar a velocidade de sincronismo, impulsionando o rotor por outra máquina, a máquina assíncrona começa a trabalhar como gerador.



**Figura 6** Características da máquina assíncrona

Fonte: GUERRERO (2014), adaptado.

Quando a velocidade do rotor é maior que a velocidade de sincronismo, os pólos do rotor descam-se para frente, em relação ao estator, tornando o

escorregamento negativo, mudando a direção do fluxo de potência e a máquina começa a fornecer energia ativa à rede (CHAPMAN, 2013).

Geradores assíncronos são incapazes de fornecer potência reativa, fazendo com que se tenha que ligar fontes externas de potência, para manter o campo magnético, como capacitores. Os geradores de indução com rotor de gaiola de esquilo, são os mais utilizados em aerogeradores, pois possuem simplicidade mecânica, alta eficiência e baixo custo de manutenção. O rotor rebobinado é usado para melhorar a eficiência do gerador, pois oferece possibilidade de controle da corrente e escolha de escorregamento ideal, resultando em flutuações menores no torque de transmissão e na produção de energia, porém aumenta a complexidade e o custo do sistema (ACKERMANN, 2012).

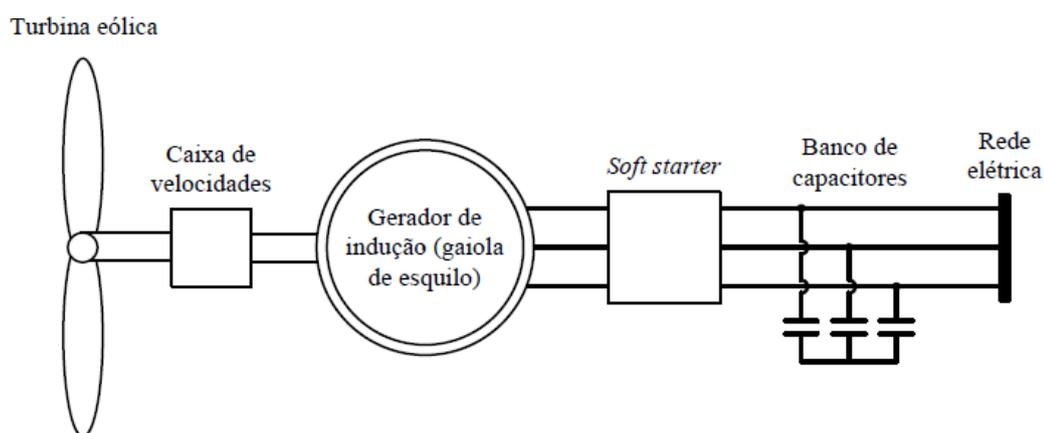
## **2.6 Classificação dos geradores eólicos**

Conforme Pinto (2013), os geradores de turbinas eólicas são classificados de acordo com a velocidade de operação e o tamanho associado aos seus conversores em: i) gerador eólico de velocidade fixa; ii) gerador eólico de velocidade variável.

- i) Gerador eólico de velocidade fixa: dotados de geradores de indução (assíncronos) e são caracterizadas por terem gerador de indução gaiola de esquilo diretamente conectado à rede através do enrolamento de um transformador, funcionando sempre à velocidade constante, independente da velocidade do vento. As turbinas de velocidade fixa estão projetadas para que as mudanças na velocidade do vento, não alterem a velocidade do gerador, sendo determinada pela frequência da rede elétrica e pelo número de par de polos do gerador (ACKERMANN, 2012; PINTO, 2013). Alterações na velocidade do vento, não afetam de modo geral a velocidade do rotor da turbina, mas afeta o torque eletromagnético e a energia elétrica gerada. Diante ao exposto faz-se necessário utilizar um sistema de controle de passo ou estol para regular a dinâmica das pás e otimizar o desempenho do sistema (PINTO, 2013). Esse tipo de aerogerador é constituído por uma turbina eólica, caixa de transmissão de velocidade e um gerador de indução (gaiola de esquilo acoplado à rede

elétrica, banco de capacitores e em alguns um *soft starter* (Figura 7). (BONELLI, 2010).

As principais características do modelo de gerador de velocidade fixa são: controle de velocidade decidido pela frequência da rede, excitação do gerador através da rede, controle de potência por estol, passo ou estol ativo, necessidade de capacitores para compensação de energia reativa, uso de *soft-starter* para limitar a conexão com a rede e rígido acompanhamento com rede – baixa elasticidade (ACKERMANN, 2012; PINTO, 2013).



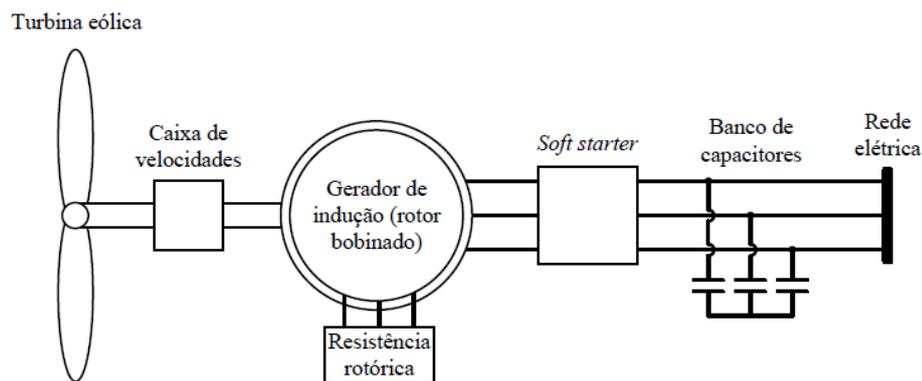
**Figura 7** Diagrama de um aerogerador à velocidade constante  
**Fonte:** BONELLI (2010).

- ii) Gerador eólico de velocidade variável: utilizam tanto geradores assíncronos quanto geradores síncronos e são caracterizados pela velocidade variável do rotor da turbina, sendo permitido alterar a velocidade do rotor da turbina para diferentes velocidades do vento, mantendo a relação de velocidade constante com relação ao coeficiente de potência, mantendo constante o torque do gerador, em que as variações do vento são absorvidas por variações de velocidade do rotor do gerador (LI;CHEN, 2008). Para operação em velocidade variável deve-se empregar conversores eletrônicos de potência, que convertem a tensão e frequência gerada para a frequência da rede elétrica, e podem ser inseridos do lado do rotor e a rede – estreita faixa de operação de velocidade de 0 a 10% (gerador de indução com rotor bobinado) - limitada faixa de operação - -40 a 30%(gerador de indução síncrono de rotor bobinado e gerador síncrono a imã permanente), ou do lado do estator e

a rede – ampla faixa de operação de velocidade, 2,5 vezes a velocidade nominal (PINTO, 2013; KADAM;KUSHARE, 2012).

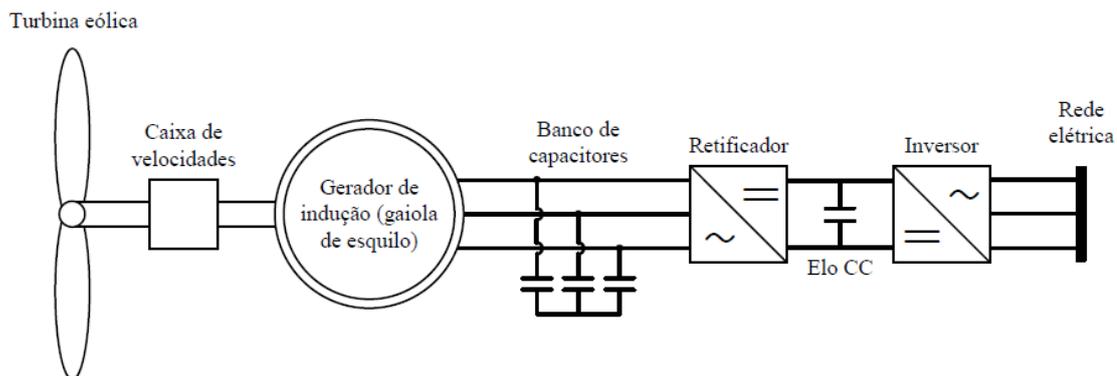
Dentre as características para o emprego de tais geradores destacam-se: máxima extração de potência do vento – rendimento aerodinâmico da turbina depende da velocidade do vento; controle da potência injetada na rede elétrica – uso de inversores de frequência; ausência de caixa de transmissão de velocidade; redução de ruídos emitidos da operação em baixa velocidades (BONELLI, 2010).

Para o sistema de velocidade variável existem três tipos de geradores: **a)** Gerador de indução com escorregamento variável: utiliza um gerador de indução com rotor bobinado, e os terminais do rotor são conectados a uma resistência através de chaves tiristorizadas, possibilitando variação da velocidade do gerador através da variação do escorregamento, e gira em torno de 10% (**Figura 8**), (PERDANA, 2007).



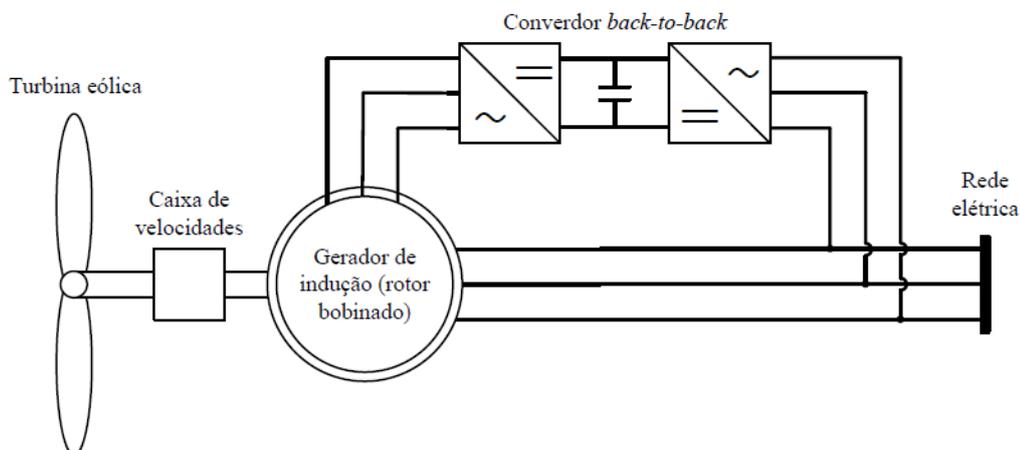
**Figura 8** Diagrama de um aerogerador de indução com escorregamento variável  
**Fonte:** BONELLI (2010).

**b)** Gerador de indução com conversor de frequência: contém um gerador de indução acoplado à rede elétrica através de um conversor de frequência, necessitando de excitação reativa, feita por capacitores (**Figura 9**), (SOHN, 2014).



**Figura 9** Diagrama de um aerogerador de indução com conversor de frequência  
**Fonte:** BONELLI (2010).

c) Gerador de indução de dupla alimentação: geralmente conhecido por *DFIG – Doubly-fed induction generator* e é constituído por um gerador de indução com rotor bobinado, estator ligado diretamente à rede elétrica e o rotor interligado via conversor de potência back-to-back (**Figura 10**) (SOHN, 2014).



**Figura 10** Diagrama básico de um aerogerador de indução de dupla alimentação (DFIG)  
**Fonte:** BONELLI (2010).

As tabelas 2 e 3 apresentam seis tipos de geradores e cinco critérios de análise. Conforme Pinto (2013) o rendimento de energia do gerador síncrono a ímã permanente apresenta a taxa mais alta, em torno de 10 a 15% maior que os geradores de indução gaiola de esquilo, os quais apresentaram a menor taxa de rendimento.

**Tabela 02** Vantagens e desvantagens dos modelos dos geradores de turbinas eólicas.

Fonte: PINTO (2013)

Tipo de Gerador	Vantagens	Desvantagens
De indução gaiola de esquilo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fácil de operar</li> <li>• Operação robusta</li> <li>• Baixo custo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixo rendimento de energia</li> <li>• Sem controle de potência ativa/reactiva</li> <li>• Alto estresse mecânico</li> </ul>
Síncrono a ímã permanente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O mais alto rendimento de energia</li> <li>• Maior controle de potência ativa/reactiva</li> <li>• Ausência de escovas/enrolamento</li> <li>• Baixo estresse mecânico</li> <li>• Sem perdas de cobre no rotor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elevado custo do material magnético</li> <li>• Desmagnetização do ímã permanente</li> <li>• Complexo processo de construção</li> <li>• Maior custo e perdas dos conversores de potência</li> <li>• Tamanho grande</li> </ul>
Síncrono com rotor bobinado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto rendimento de energia</li> <li>• Maior controle de potência ativa/reactiva</li> <li>• Ausência de escovas/rolamento</li> <li>• Baixo estresse mecânico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maior custo do enrolamento do cobre</li> <li>• Maior custo e perdas dos conversores de potência</li> <li>• Tamanho grande</li> </ul>
De indução duplamente alimentado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto rendimento de energia</li> <li>• Alto controle de potência ativa/reactiva</li> <li>• Baixo custo e perdas dos conversores de potência</li> <li>• Menos estresse mecânico</li> <li>• Tamanho compacto</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Existência de rolamentos</li> <li>• Altas perdas das engrenagens</li> </ul>
De indução duplamente alimentado sem escovas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maior rendimento de energia</li> <li>• Alto controle de potência ativa/reactiva</li> <li>• Menor custo e perdas dos conversores de potência</li> <li>• Ausência de escovas/enrolamentos</li> <li>• Menos estresse mecânico</li> <li>• Tamanho compacto</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Complexidade na montagem, controle e projeto</li> <li>• Altas perdas das engrenagens</li> </ul>
De relutância duplamente alimentado sem escovas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maior rendimento de energia</li> <li>• Alto controle de potência ativa/reactiva</li> <li>• Menor custo e perdas dos conversores de potência</li> <li>• Ausência de escovas/enrolamentos</li> <li>• Sem perdas de cobre no rotor</li> <li>• Menos estresse mecânico</li> <li>• Construção mais fácil</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Complexidade na montagem, projeto e controle</li> <li>• Altas perdas das engrenagens</li> <li>• Maior tamanho que o DFIG</li> </ul>

Também o mesmo autor observou que o gerador de indução gaiola de esquilo tem o mais baixo custo e o gerador indução duplamente alimentado sem escovas é o que mais se aproxima do custo do primeiro; devido à grande dimensão

de seu rotor o gerador síncrono com rotor bobinado é o que apresentou o maior custo.

**Tabela 03** Comparação entre os seis diferentes conceitos de geradores eólicos

**Fonte:** PINTO (2013)

<b>Tipo de Gerador</b>	<b>Rendimento Energético</b>	<b>Custo</b>	<b>Confiabilidade</b>	<b>Suporte da rede</b>	<b>Maturidade Técnica</b>
De indução gaiola de esquilo	Baixo	Baixo	Alta	Baixo	Alta
Síncrono a ímã permanente	Alto	Médio-alto	Alta	Alto	Médio-alta
Síncrono com rotor bobinado	Médio-alto	Alto	Alta	Alto	Alta
De indução duplamente alimentado	Médio-alto	Médio	Alta	Médio	Alta
De indução duplamente alimentado sem escovas	Médio-alto	Médio	Médio-alta	Médio-alta	Baixa
De relutância duplamente alimentado sem escovas	Médio-alto	Baixo-médio	Alta	Médio-alta	Baixa

## 2.7 Aplicações do sistema eólico

Um sistema eólico pode ser utilizado em três aplicações distintas – sistemas isolados, híbridos e sistemas interligados à rede - e devem ser dimensionados e instalados conforme as condições climáticas, geográficas e demandas existentes, pois necessitam de uma unidade de controle de potência, e se for o caso, unidade de armazenamento (LIMA, 2009).

Os sistemas isolados devem apresentar alguma forma de armazenamento de energia (baterias, energia potencial gravitacional), e necessitam de um dispositivo para controlar a carga e a descarga da bateria, cujo objetivo é impedir danos ao sistema de bateria por sobrecarga ou descarga. Esses sistemas tornam-se dispendiosos, devido ao sistema de armazenamento para fornecimento regular de eletricidade e apresentam aplicação limitada a pequenos sistemas de recarga de baterias, como por exemplo, eletrodomésticos e equipamentos de comunicação (SANTOS et al., 2006).

Segundo o mesmo autor, os sistemas híbridos apresentam mais de uma fonte de geração de energia, quando desconectados da rede convencional, como turbinas eólicas, geradores a diesel, módulos fotovoltaicos.

Faz-se necessário o controle de todas as fontes para que haja máxima eficiência e otimização dos fluxos energéticos (LIMA, 2009).

Geralmente são empregados em sistemas de médio porte, pois se destina a atender o maior número de usuários. Esse sistema também necessita de um inversor, pois trabalha com corrente alternada (SANTOS et al., 2006).

Os sistemas integrados à rede, não necessitam de sistemas de armazenamento, pois apresentam aerogeradores com grande potência individual e toda a geração é entregue diretamente à rede elétrica. As vantagens desse sistema são, redução de perdas, menor custo de expansão de rede e a geração de energia se dá quando o regime dos ventos coincide com o pico da curva de carga (SANTOS et al., 2006; LIMA, 2009).

## **2.8 Aspectos econômicos de projetos eólicos**

Segundo Dutra; Tolmasquim (2002), o detalhamento dos aspectos econômicos de um projeto é tão importante quando a análise da viabilidade técnica. Os mesmos autores afirmam ainda que, sobre os aspectos econômicos, pode-se dividi-los em duas etapas: custos iniciais do projeto e os custos anuais com operação e manutenção.

Os custos iniciais de um projeto eólico englobam encargos como: estudo da viabilidade técnica, negociações e desenvolvimento, projetos de engenharia, custos dos equipamentos, infraestrutura e despesas diversas. Para os custos anuais de operação e manutenção, têm-se custos com equipamentos (reposição e prevenção), arrendamento e uso do terreno, seguro entre outras (DUTRA; TOLMASQUIM, 2002).

Conforme Luzio (2014), para avaliação econômica deve montar-se um fluxo de caixa, custos e receitas, e determinar quais indicadores econômicos, bem como, verificar se o projeto tem possibilidade de sucesso econômico financeiro, para isso, faz-se necessário o uso de algumas ferramentas como: fluxo de caixa, valor presente do dinheiro, indicadores econômicos e análise de sensibilidade.

- a) Fluxo de caixa (FC): indica a origem do dinheiro que entrou no caixa, e a aplicação do dinheiro que saiu do caixa em determinado período, bem como o resultado do fluxo financeiro. O fluxo de caixa é um resumo financeiro de entradas e saídas efetivas do dinheiro por um determinado período, permitindo conhecer sua rentabilidade e viabilidade econômica, representando a renda econômica gerada pelo projeto ao longo de sua vida útil (BLASQUES, 2005; MELEK, 2013).
- b) Valor presente do dinheiro (VPD): determinação do valor presente de pagamentos futuros descontados as taxas de juros, menos o custo do investimento inicial. Sempre é usado em projeto de investimentos em potencial (BLASQUES, 2005; MELEK, 2013) e é calculado conforme:

$$VP = VF \left( \frac{1}{(1+i)^n} \right) \quad (14)$$

Em que:

VP= valor presente;

VF= valor futuro;

i=taxa de juros, ou taxa de desconto;

n= intervalo de tempo.

- c) Indicadores econômicos (IC): dentre eles destaca-se, o valor presente líquido, a taxa interna de retorno, e payback, e servem para fundamentar o comparativo da análise econômica em projetos de geração de energia elétrica.

c.1) Valor presente líquido (VPL) consiste em determinar o valor no instante inicial, descontando o fluxo de caixa líquido de cada período futuro gerado durante a vida útil do investimento, conforme a taxa de juros, ou seja, é um indicador que valora o dinheiro no tempo e os investimentos realizados (HOJI, 2014).

Para Blasques (2005), o valor presente líquido possui as possibilidades: maior que zero – investimento economicamente atrativo; igual a zero –

investimento indiferente; e menor que zero – não é economicamente atrativo.

$$VPL = \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1+i)^j} - FC_0 \quad (15)$$

Em que:

VPL= valor presente líquido;

FC<sub>j</sub>= valores dos fluxos de caixa da ordem j=1,2,3,.....n

FC<sub>0</sub>= fluxo inicial;

c.2) Taxa interna de retorno (TIR): é a taxa de desconto que faz seu valor presente líquido ser igual a zero, e significa a taxa de retorno esperada pelo investidor (REBELLATO, 2004). O mesmo autor completa que a taxa interna deve ser comparada com a taxa mínima de atratividade (TMA), para aceitação ou não do projeto.

Se a taxa interna de retorno (TIR) for maior que taxa mínima de atratividade (TMA) – aceito; Se TIR = TMA – caráter nulo; TIR for menor TMA – rejeitado (MELEK, 2013).

$$I_0 - \sum_{i=1}^n \frac{FC_i}{(1+TIR)^i} = 0 \quad (16)$$

Em que:

TIR=taxa interna de retorno (decimal);

I<sub>0</sub>= investimento inicial (R\$);

n= tempo de desconto do último fluxo de caixa (anos);

FC<sub>i</sub>= fluxo de caixa por período.

c.3) *Payback*: é o tempo necessário para que os benefícios resultantes do negócio retornem o investimento realizado. É considerado bom indicador de risco de um investimento (BLASQUES, 2005).

Há duas formas de calcular, o *payback* simples e o *payback* descontado. O primeiro desconsidera o valor temporal do dinheiro, e segundo considera a variação de seus cálculos do valor financeiro com o tempo. Para ser alternativa viável o *payback* descontado deve ser menor que a vida útil do empreendimento (NEWNAN; ESCHENBACH; LAVELLE, 2013).

$$PAYBACK_{simples} = \frac{Investimento}{FC} \quad (17)$$

Em que:

Investimento – valor aplicado;

FC= fluxo de caixa.

$$PAYBACK_{descontado} = \frac{\ln\left(\frac{U}{U - P * TMA}\right)}{\ln(1 + TMA)} \quad (18)$$

Em que:

U= retorno líquido anual do investimento (R\$);

P=valor presente (R\$).

## 2.9 Redes neurais estruturas e aplicações

Redes neurais artificiais (RNAs) são usadas em áreas diversas, como na análise de séries temporais, processamento de sinais e reconhecimento de padrões, devido à sua capacidade de aprender a partir de um conjunto de dados de entrada com ou sem supervisão (BRAGA, 2011). De acordo com Heaton (2008), a capacidade de funcionarem como aproximadores universais de funções é que tornam as redes neurais artificiais uma técnica interessante para a classe de problemas de aproximação de funções. De modo análogo às sinapses humanas, as RNAs são sistemas paralelos compostos por diversas unidades de processamento ou neurônios artificiais que realizam algum cálculo, sendo dispostas em camadas e

interligadas por conexões, porém, geralmente direcionais e com pesos numéricos associados.

Conforme Palma Neto (2005), podem-se definir três componentes básicos de uma rede neural artificial: i) Neurônios: nodos ou elementos de processamento da rede, usualmente organizados em camadas, contendo uma função de ativação, que representa o estado ou ativação do neurônio; ii) Arquitetura: um conjunto de sinapses ou canais de conexão entre os neurônios, com pesos associados; iii) Algoritmo de aprendizagem: algoritmo utilizado para efetuar o treinamento e ajuste dos pesos sinápticos.

A utilização de redes neurais é interessante na resolução de problemas que não são expressos numa sequência de passos, como por exemplo, no reconhecimento de padrões, *data mining* e previsão de séries temporais, na qual envolve os seguintes pontos: i) Classificação: condiz com a identificação de um padrão e a associação deste padrão a uma classe; ii) Categorização: que abrange a descoberta de categorias implícitas num conjunto de dados; iii) Aproximação: envolvendo o aprendizado supervisionado, na qual os padrões de entrada apresentados são mapeados para padrões de saída, através do ajuste dos pesos sinápticos; iv) Previsão: envolve a questão da estimação de valores futuros, com base nos estados atuais e anteriores do sistema e; v) Otimização: caracterizado pela minimização ou maximização de uma função custo, conhecida de antemão (BRAGA, 2011).

## 2.10 Arquitetura de uma RNA

A arquitetura de uma RNA compreende no modo como os neurônios e as sinapses estão organizados e distribuídos em camadas, e se estão completamente interconectados, parcialmente ou mesmo se não estão conectados. Também, compreende os padrões de conexão entre as camadas e dentro das mesmas.

Haykin (2000) apresenta três classes fundamentais de arquiteturas de redes neurais: i) *Single-Layer Feed-forward Networks* ou *Perceptron*: rede na qual os neurônios são organizados em uma única camada, sendo a forma mais simples de redes em camadas, na qual os padrões de entrada conectam-se diretamente a uma camada de saída de neurônios, sem camadas intermediárias ou camadas ocultas;

*Multilayer Feed-forward Networks*: esta segunda classe de RNAs diferenciam-se pela presença de uma ou mais camadas ocultas, cujos nodos computacionais são denominados neurônios ocultos. Em geral, as entradas dos neurônios de uma camada são provenientes do sinal de saída dos neurônios da camada precedente, sem apresentar realimentação na camada de saída; iii) *Recurrent Networks*: esta arquitetura difere das anteriores pelo fato de que os neurônios da camada de saída alimentam com seu sinal de saída a entrada dos neurônios da camada de entrada, ou seja, a saída produzida pela rede é usada para alimentar a entrada da própria rede, formando um fluxo de realimentação contínua.

Outro ponto importante é em relação à aprendizagem, que é a etapa na qual a rede ajusta os pesos sinápticos de modo a encontrar uma relação entre cada um dos pares entrada-saída do conjunto analisado. Essa etapa é realizada após a definição da arquitetura da RNA e ocorre de forma metódica, onde os parâmetros livres da rede serão ajustados progressivamente cada iteração, o que permite uma melhor adaptação, por parte da RNA, ampliando sua capacidade de aprendizagem (BRAGA, 2011). Uma memória associativa é o princípio que rege o processo de aprendizagem de uma rede (HEATON, 2008).

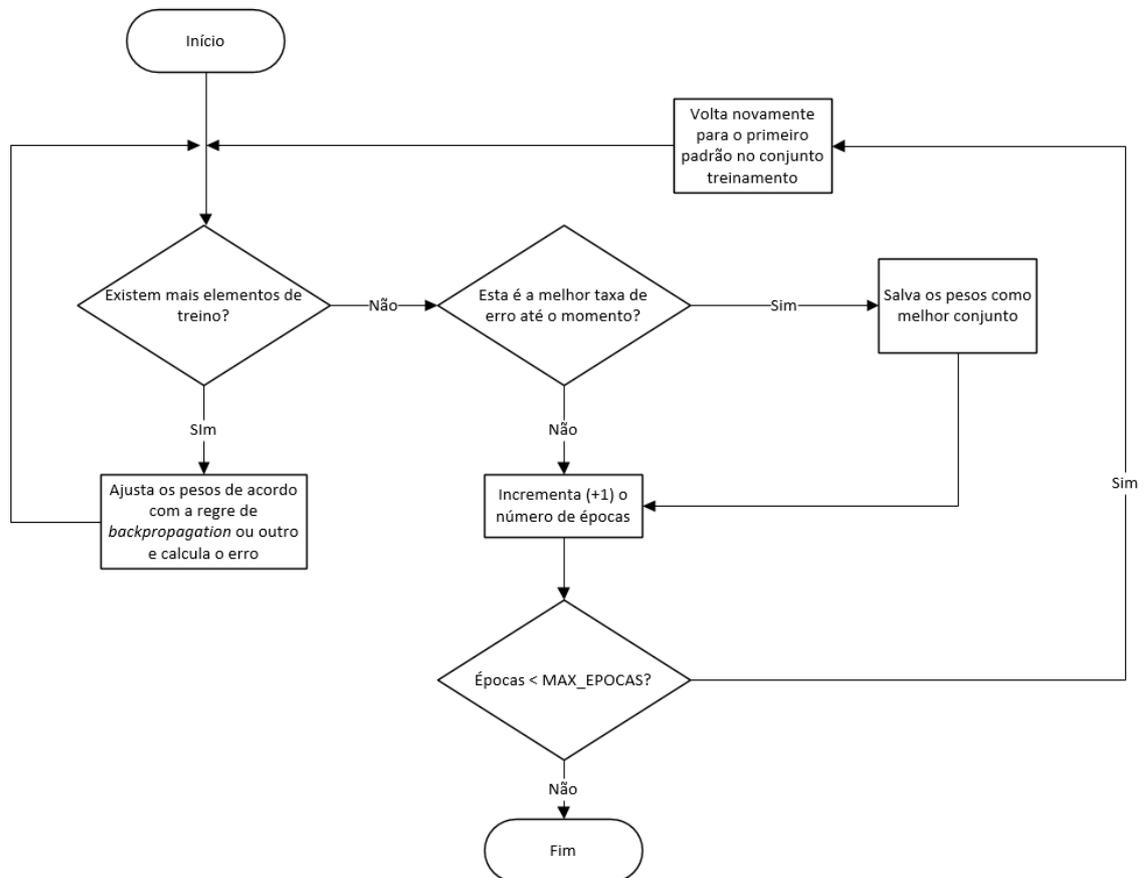
Para Haykin (2000) há basicamente duas categorias de classificação para a aprendizagem de uma RNA: i) Supervisionado: que consiste na ação de indicar a saída desejada para um padrão de entrada, efetuando, para isso, ajustes nos parâmetros da rede para que a mesma encontre uma relação entre os pares de entrada-saída e; ii) Não supervisionado: onde há inexistência de uma influência externa que indique qual a resposta desejada para um conjunto de entradas. Em geral este último modelo é utilizado para agrupar os dados de entrada em categorias através de neurônios classificadores, consistindo dessa maneira de um processo de descoberta dos grupos de classificação na qual as entradas serão associadas.

### **2.10.1 Aprendizagem**

Durante a execução de um ciclo de aprendizagem na RNA tem-se a seguinte sequência de ocorrências: Inicialmente, padrões originários de um ambiente são submetidos como entrada na rede com o intuito de estimulá-la. Em seguida, essa estimulação gera eventos internos na RNA, que iniciam mudanças

internas em seus parâmetros livres. Em consequência dessas mudanças, tornam a rede melhor adaptada para o ambiente, permitindo que esta responda de um modo novo aos estímulos externos (BRAGA, 2011).

A aprendizagem de uma rede *multi-layer perception* é supervisionada, utilizando em geral, a técnica da minimização de uma função erro, aplicando as modificações nos pesos sinápticos de acordo com o cálculo dessa função. Inicia-se com a criação de uma matriz de pesos com valores aleatórios para que posteriormente, a cada elemento do conjunto exemplo, o algoritmo de aprendizagem efetua os ajustes na matriz de pesos a fim de atualizar essa matriz com a contribuição de cada elemento do conjunto exemplo, conforme apresentado em **Figura 11**. O erro de saída indica o quão distante ou diferente as saídas da rede neural estão da saída desejada ou ideal. Outro critério também utilizado é o número de iterações realizadas sobre o conjunto exemplo. Em alguns casos, a convergência não ocorre, e, portanto, a minimização do erro não é possível de ser realizada. Nesse caso, o número de épocas funciona como critério alternativo de parada.



**Figura 11** Aprendizagem supervisionada  
**Fonte:** Heaton (2008)

A aprendizagem em uma RNA envolve duas fases importantes, a primeira, denominada Fase de Treinamento ou Calibração, que tem por objetivo alcançar a melhor solução, com base em medidas de desempenho. Esta etapa exige em geral um acompanhamento, ou aprendizagem supervisionada, para verificar se a RNA está generalizando ou simplesmente memorizando os dados. A segunda denominada Fase de teste consiste em usar um conjunto diferente daquele que foi usado para o treinamento, mas ainda com valores de saída conhecidos e analisar a taxa de acerto deste conjunto (RIAD, 2004).

Um dos objetivos durante a etapa de aprendizagem é efetuar a calibração dos pesos de modo que a RNA consiga desenvolver a capacidade de generalização, que se refere à capacidade da RNA produzir dados de saída razoáveis para entrada de dados não especificadas durante a fase de treinamento/aprendizagem, onde a rede deve ser capaz de gerar respostas adequadas para entradas que não estiveram presentes durante a fase de treinamento (HAYKIN, 2000).

À medida que ocorre o treinamento/aprendizagem, a rede vai aprendendo o modelo ou a função subjacente, que melhor representa o domínio dos dados de treinamento. A etapa final é a validação de uma RNA, sendo crucial para verificar se a rede conseguiu atingir um grau aceitável de generalização e se precisa de mais treinamento. Outro objetivo da validação é a busca de possíveis problemas, já que ela também pode demonstrar problemas estruturais na rede, tais como o número inadequado de neurônios; taxa de aprendizagem inadequada, conjunto treinamento insuficiente, problema de memorização dos padrões, número de camadas inapropriadas ou mesmo erros na estimação do peso dos conjuntos iniciais (BRAGA, 2011).

## **2.11 Algoritmos genéticos**

Este modelo é baseado na teoria evolucionista de Darwin, onde a seleção natural é o elemento chave na qual os indivíduos melhores adaptados ao ambiente sobrevivem. Estes sobreviventes geram proles que possuem em seus materiais genéticos as características que auxiliaram seus antecedentes a sobreviverem. Como resultado os descendentes tendem a adaptarem-se melhor ao ambiente,

possuindo melhores chances de sobrevivência e geração de descendentes. (DARWIN, 2014).

Para a computação, o algoritmo genético é uma interessante ferramenta de busca e otimização para diversas classes de problemas (REZENDE, 2002). Em um cenário há um grande número de soluções possíveis para um determinado problema, torna-se complexo e infactível encontrar a solução melhor através de algoritmos iterativos, sendo que os algoritmos genéticos torna-se uma alternativa para buscas amplas nesse espaço de estados (HEATON, 2008).

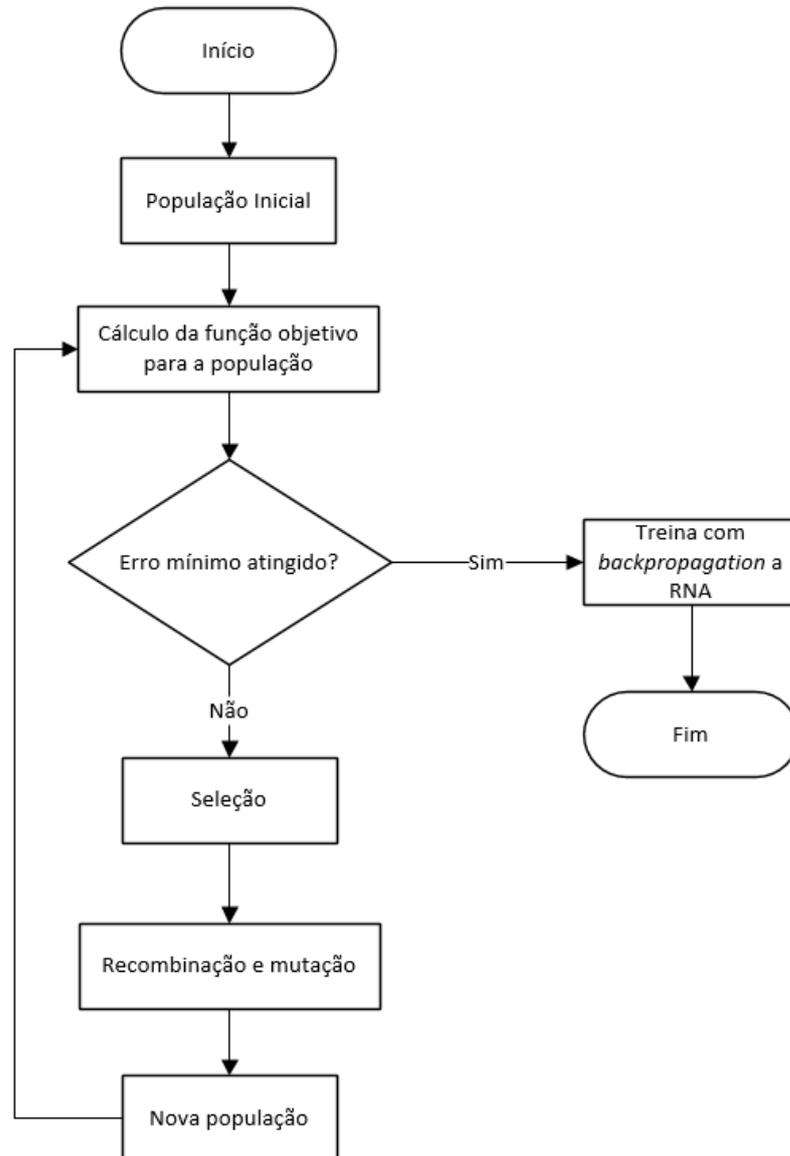
Os algoritmos genéticos operam sobre uma população de indivíduos, onde cada um destes representa uma possível solução no espaço de busca.

Para Braga (2011), os algoritmos genéticos diferem dos métodos tradicionais de busca e otimização, em quatro pontos: i) Utilizam uma codificação do conjunto de parâmetros; ii) Utilizam uma população de elementos ao invés de um único elemento; iii) Utilizam informações de custo para delimitar o quão boa é uma solução e; iv) Não são determinísticos já que utilizam regras com base em probabilidades.

O funcionamento de um algoritmo genético inicia-se com a criação de uma população de indivíduos aleatoriamente criados, quais representam possíveis soluções do problema em questão. Essa população é avaliada por uma função custo, onde cada indivíduo recebe uma nota ou índice que reflete a sua habilidade de adaptação ao ambiente. Em sequência, uma quantidade de indivíduos considerados mais aptos é mantida, enquanto os outros, considerados menos aptos são descartados. Aqueles que são mantidos pela seleção, podem passar por modificações através de mutação e cruzamento gerando descendentes para a próxima geração, que será a nova população de indivíduos avaliados pelo algoritmo genético.

Os cromossomos gerados por reprodução são adicionados à antiga população, substituindo aqueles com pior função de ajuste. Neste ponto tem-se uma nova população (BRAGA, 2011).

A integração de RNAs com algoritmos genéticos, conforme apresentado na **Figura 12**, é benéfica já que adiciona a capacidade de busca global dos algoritmos genéticos juntamente com o algoritmo de treinamento/aprendizagem.



**Figura 12** Rede neural acoplada a um algoritmo genético  
**Fonte:** Xin (1999)

## 3 MATERIAL E MÉTODOS

### 3.1 Desenvolvimento do *software*

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizadas as linguagens de programação *Java*, *C*, *C++* e o banco de dados *MySQL*, combinação esta que permitiu uma independência de plataforma para execução do aplicativo, consentindo que este seja executado em qualquer sistema operacional.

Para manipular estas linguagens em conjunto, utilizou-se o ambiente de desenvolvimento integrado *Microsoft® Visual Studio 2015 Enterprise*, que fornece uma gama de *plugins* e recursos aprimorados que simplificam todo o processo de desenvolvimento para várias linguagens de programação resultando no ambiente apropriado para esta aplicação, da qual não se aterá apenas a uma única linguagem de programação.

Para a análise de requisitos e o desenvolvimento deste sistema, utilizou-se uma metodologia orientada a objetos com a modelagem através da *UML* – Linguagem de Modelagem Unificada.

O processo de desenvolvimento orientado a objetos consiste em uma estratégia interativa em que os objetos são identificados e definidos, conjuntamente com seus relacionamentos e comunicações. No avanço do processo de desenvolvimento, podem ser encontradas novas classes ou serem redefinidas algumas das existentes, resultando na definição de novos relacionamentos, comportamentos e comunicações. Isto implica numa grande sobreposição e iteração entre as fases do desenvolvimento, onde a análise e o projeto não são uma exceção (SOMMERVILLE, 2016).

O ciclo de vida foi do tipo chafariz, que pode ser encarado como um ciclo de vida em espiral, só que a ênfase maior se dá nas fases de análise, gerando uma especificação de requisitos, na forma de um modelo lógico do funcionamento do sistema real e projeto, gerando um modelo físico, baseado em objetos, ficando as fases de implementação em diante com uma parcela menor do tempo total gasto (PRESSMAN, 2014).

Neste modelo de ciclo de vida, as fases do processo de desenvolvimento de software se sobrepõem, e cada fase pode levar a revisão de uma fase anterior. Este modelo é apenas uma nova visão da estrutura do ciclo de vida, que se aplica à metodologia orientada a objetos (SOMMERVILLE, 2016).

Devido à possibilidade de reutilização de especificações de requisitos e de código inerente as técnicas orientadas a objetos, tem-se uma visão diferenciada do desenvolvimento de um projeto de sistemas, já que continuamente consultamos bibliotecas buscando soluções já desenvolvidas para aplicar na solução atual, e, caso não existam, podem ser criados ou derivados de objetos e especificações já existentes, aumentando o volume das bibliotecas disponíveis e diminuindo sensivelmente o tempo necessário para desenvolvimento do projeto (PRESSMAN, 2014).

Em relação às redes neurais artificiais e algoritmos genéticos, estes foram desenvolvidos utilizando o *Encog* (HEATON, 2008), que é uma biblioteca *Java* de programação voltada para o desenvolvimento de redes neurais.

Toda a parte relacionada aos modelos *Autorregressive and moving average*, foram implementados com a utilização do *software Matlab®*, utilizando como biblioteca o *Toolbox System Identification* (LJUNG, 2016).

Para integrar as plataformas de desenvolvimento *Java* e *Matlab®*, a fim de organizar o carregamento de arquivos e análise dos resultados, foi utilizada a biblioteca *Matlabcontrol*<sup>3</sup>, que é uma interface de programação para controle e interação com sessões do *software Matlab®*, a partir de uma aplicação *Java*. A visão geral da arquitetura do sistema proposto pode ser visualizada na **Figura 13**.

Para facilitar a avaliação dos modelos implementados de redes neurais artificiais e algoritmos genéticos, foram construídas diversas classes nas linguagens *C* e *Java*, para as funções de custos e dimensionamento, com o intuito de apresentar o melhor cenário para esta.

---

<sup>3</sup> Disponível em: <http://code.google.com/p/matlabcontrol/>



com 3 camadas, sendo 1 camada de entrada, 1 camada oculta e 1 camada de saída.

Gallant(1995), Thierens e Goldberg (1994), Sedki *et al* (2009), Anders *et al* (1999), Minns e Hall (1996) e Wang *et al* (2009) demonstraram que mais de uma camada oculta não exerce fator decisivo no impacto de generalização da rede, podendo inclusive aumentar substancialmente o consumo de processamento.

### **3.3 Método de dimensionamento dos sistemas de geração eólica**

O intuito deste trabalho foi desenvolver uma aplicação que facilite o dimensionamento de sistemas eólicos *On-grid* e *Off-grid*. Para isso torna-se necessário a implantação de métodos criteriosos, a fim de não sub ou super-dimensionar o projeto. Outro objetivo é tornar esse processo simples ao usuário.

Dentre esses critérios, de acordo com Pinto (2013), destacam-se: obtenção de dados de vento, demanda de energia a ser atendida (para posterior delimitação da quantidade de aerogeradores e corrente máxima gerada destes), quantidade de controladores de carga e inversores, quando necessário e quantificação do sistema de armazenamento para os sistemas *Off-grid*, com o número de baterias necessárias para suprir a demanda diária e autonomia para o período no qual não haverá geração de energia.

Também foram considerados fatores importantes para a implantação de sistemas eólicos o detalhamento dos aspectos econômicos como custos iniciais do projeto e custos com operação e manutenção.

O ponto que delimita o início do dimensionamento é a escolha do tipo de sistema eólico, *On-grid* ou *Off-grid*, o que influenciará na complexidade do projeto e no custo final. O próximo passo foi a obtenção dos dados de vento.

Para isso foi criado uma meio de acesso entre a aplicação e o banco de informações do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro<sup>4</sup> do CRESESB, que é uma plataforma *web* que objetiva fornecer informações tais como: velocidade média sazonal do vento, direções predominantes e parâmetros estatísticos de *Weibull*, mapas temáticos e fluxos de potência eólica para todo o país. Esta consulta foi realizada através da inserção das coordenadas geográficas do ponto de interesse

---

<sup>4</sup> [http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=atlas\\_eolico](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=atlas_eolico)

(CRESESB, 2016). Caso seja de preferência do utilizador, este poderá inserir manualmente os dados de velocidade de vento coletados para gerar o valor da velocidade média de vento e posteriores cálculos.

Em seguida, para a verificação da demanda de energia, o utilizador teve duas condições para definição dos valores de referência e realização dos cálculos: i) Inserção de um valor referente ao consumo médio diário, em kWh ou; ii) Saída do simulador de consumo médio diário, que possibilita a simulação do consumo baseado nos equipamentos elétricos a serem utilizados, retornando o consumo médio diário aproximado, em kWh/mês.

Com a definição do tipo de sistema eólico e de posse dos valores da demanda de energia e velocidade média de vento, iniciou-se o dimensionamento eólico. É extremamente importante a realização de simulações com vários aerogeradores de diferentes potências e fabricantes, assim como com os demais equipamentos, a fim de verificar os mais adequados às características da região a qual se deseja implantar o sistema de geração de energia, garantindo a minimização nos custos oriundos desse método de geração. A partir desse ponto iniciou-se a utilização dos algoritmos genéticos, que tem o objetivo de verificar qual configuração proporcionará o melhor cenário para a implantação, realizando uma comparação entre todos os equipamentos, analisando todas as configurações possíveis com os equipamentos previamente cadastrados no banco de dados da plataforma, tendo como parâmetros de escolha inicial o menor custo juntamente com a menor quantidade de equipamentos. Outro propósito da utilização deste algoritmo é que, no momento da inicialização da simulação ele busque em seu histórico se houve ou não simulação similar, minimizando assim o processamento e otimizando a *performance* do *software*.

Os cálculos utilizados para o dimensionamento foram conforme Pinho *et al.* (2008), CRESESB (2014) e em Albano (2009).

### **3.3.1 Capacidade de carga diária total**

De acordo com Pinho *et al.* (2008) o cálculo da energia produzida por um aerogerador permite a avaliação de qualquer projeto que vise o aproveitamento da energia eólica para a geração de eletricidade. Uma forma de estimar a energia

elétrica produzida por meio da série de dados de vento medida, utilizando, a distribuição de frequência da velocidade do vento ao longo de um período e aplicando-se essa distribuição à curva da potência de saída do aerogerador. A curva de potência do aerogerador indica a saída de potência elétrica do mesmo para uma carga, um sistema de armazenamento, ou uma rede elétrica, em função da velocidade do vento na altura do rotor. O resultado da aplicação da distribuição de frequência à curva de potência do aerogerador fornece a quantidade de energia produzida no período considerado.

A Equação 19 relaciona a capacidade de carga diária total com as especificações do aerogerador, para posteriormente delimitar o número de aerogeradores necessários ao projeto.

$$CCDT = \left( \frac{\left( \frac{CI \times DDCA}{RI} \right)}{TNA} \right) \quad (19)$$

Em que:

CCDT = capacidade de carga diária total (Ah/dia)

CI= coeficiente de segurança (adimensional)

DDAC = demanda diária de energia em corrente alternada (Wh/dia)

TNA = Tensão nominal do aerogerador (V)

RI = Rendimento do inversor (%)

### 3.3.2 Número de aerogeradores

A Equação 20 calcula o número de aerogeradores que serão necessários para suprir a demanda diária do projeto.

$$NA = \frac{CCDT}{CDAVM} \quad (20)$$

Em que:

NA = número de aerogeradores (un.)

CCDT = capacidade diária de carga total (Ah/dia)

CDAVM = carga diária do aerogerador, calculada em função da distribuição de velocidade do vento e da curva de potência do equipamento (Ah/dia)

### 3.3.3 Corrente máxima dos aerogeradores

A Equação 21 calcula a corrente máxima produzida pelos aerogeradores que serão necessários ao projeto.

$$MCA = CAPN \times NA \quad (21)$$

Em que:

MCA = máxima corrente fornecida pelo aerogerador (A)

CAPN = corrente do aerogerador na potência nominal (A)

NA = número de aerogeradores (un.)

### 3.3.4 Número de controladores de carga

Controladores de carga têm como função o controle do fluxo de energia entre o gerador e as baterias, protegendo-as para que estas não sejam sobrecarregadas ou descarregadas profundamente, o que influenciará no aumento da vida útil dos bancos de baterias. Os controladores de carga devem ser selecionados com base nas características de tensão e corrente envolvidos no sistema eólico (ACKERMANN, 2012).

De posse dos dados de corrente do equipamento e do controlador de cargas foi possível determinar o número de controladores, de acordo com a Equação 22.

$$NCC = \frac{MCA}{CCC} \quad (22)$$

Em que:

NCC = número de controladores de carga (un.)

MCA = máxima corrente fornecida pelo aerogerador (A)

CCC = corrente do controlador de carga (A)

### 3.3.5 Capacidade do banco de baterias

Após obter os dados de corrente máxima e a capacidade de carga foi possível dimensionar a capacidade do sistema de armazenamento de energia. O objetivo é assegurar que, em dias de escassez de vento, a demanda de energia seja atendida, e não se exceda o nível máximo de descarga permitido para a(s) bateria(s).

Inicialmente definiu-se o tipo de bateria que será utilizado, levando em consideração as especificações de cada fabricante. Após escolha, definiu-se a profundidade de descarga a trabalhar. Quanto mais profundo os ciclos de carga e descarga, menor é a vida útil da bateria. Para essa definição, serão utilizadas as curvas de vida útil em função da profundidade da descarga, fornecida pelos fabricantes.

Com os dados dos dias sem vento, bem como outros parâmetros da bateria, do aerogerador e da demanda, foi possível calcular a capacidade do banco de baterias, utilizando para isso a Equação 23:

$$CBB = \frac{CCDT \times DSV}{PDFA} \quad (23)$$

Em que:

CBB= capacidade de armazenamento do banco de baterias, em Ah

CCDT = capacidade de carga diária total, em Ah/dia

PDFA = profundidade da descarga no final da autonomia, decimal

DSV= autonomia - dias sem vento no mês crítico, em dias

### 3.3.6 Número de baterias

Com a Equação 24, foi possível calcular o número de baterias necessárias para compor o sistema de armazenamento a fim de suportar a demanda energética do projeto.

$$NB = \frac{CBB}{CB} \quad (24)$$

Em que:

NB = número de baterias (un.)

CBB = capacidade de armazenamento do banco de baterias (Ah)

CB = capacidade de armazenamento de uma bateria (Ah)

### 3.3.7 Número de inversores

Inversores têm por principal função, converter corrente contínua e gerada pelo aerogerador em corrente alternada disponibilizada à rede, ajustando a frequência e o nível de tensão da rede que ficará ligado. Em sistemas *On-grid* eles também possuem a função de emitir informações sobre a produção de energia e a interação com a rede elétrica (ACKERMANN, 2012).

Os parâmetros necessários para o dimensionamento do inversor de tensão são: i) tensões de entrada e saída e; ii) potência nominal de uso contínuo e de curta duração. Ainda, é necessário verificar a potência total das cargas de corrente alternada e selecionar um inversor com capacidade mínima de segurança acima da necessidade (valor que será delimitado). A tensão de entrada deve ser igual à tensão das baterias e a de saída igual à tensão das cargas de corrente alternada. Se o levantamento de cargas resultou na soma das cargas instaladas em corrente alternada for de 100 W, o inversor deve ter uma capacidade mínima para operação contínua de mesma proporção mais o valor de segurança.

A Equação 25 calcula a quantidade de Inversores que serão necessárias para atender o sistema:

$$NI = \left( \frac{DMP}{PI} \right) \quad (25)$$

Em que:

NI = número de inversores

DMP = demanda máxima de potência (W)

PI = potência do inversor (W)

### 3.3.8 Observações gerais

A princípio os cálculos para o dimensionamento de sistemas eólicos *On-grid* e *Off-grid*, através de geradores de corrente contínua ou corrente alternada foram os mesmos, o que mudou efetivamente foi a utilização de equipamentos para conversão de corrente e quando identificado essa necessidade, a aplicação retornará a quantidade necessária destes.

Para os sistemas *On-grid* e *Off-grid*, os cálculos iniciais referentes à demanda de energia a ser fornecida para o consumidor foram semelhantes. No entanto, no sistema *On-grid*, as quantidades e especificações técnicas dos aerogeradores e inversores, são estabelecidas conforme as resoluções da ANEEL 482/2012 e 687/2015. Estas resoluções, entre outros aspectos, delimitam o método de conexão com a rede de distribuição. Já para os sistemas *Off-grid*, além dos equipamentos citados, serão dimensionados também os controladores de carga e as baterias, com suas respectivas especificações técnicas.

Caberá ao sistema à verificação de todos os equipamentos necessários ao projeto, seja ele isolado ou conectado a rede, além da comparação entre esses, apresentando a melhor situação de implantação ao utilizador.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Sistema DIMEE

O DIMEE (Sistema Computacional para Dimensionamento Eólico) foi desenvolvido para auxiliar no dimensionamento e posterior verificação da viabilidade de um projeto de geração de energia através do uso de aerogeradores, de forma fácil e com o mínimo de interações possíveis entre o sistema computacional e o seu utilizador. Com esta ferramenta tem-se uma perspectiva dos equipamentos necessários para a implantação de um sistema eólico e a viabilidade deste. Para tal, bastará a inserção dos dados solicitados na tela de simulação.

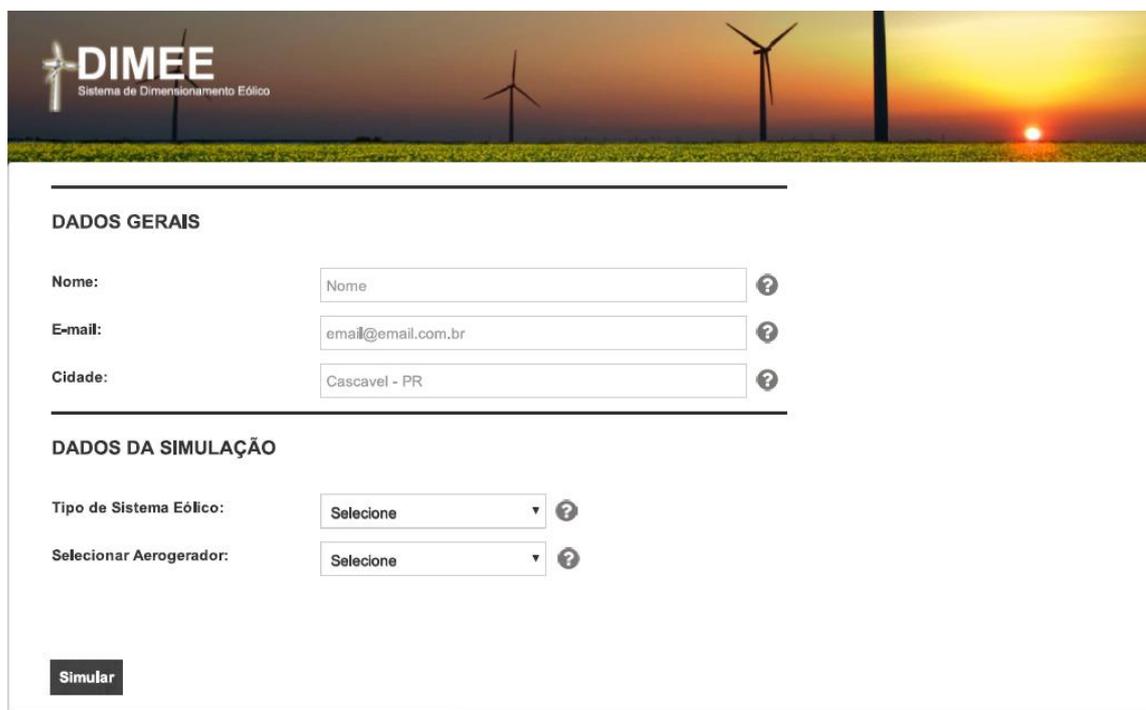
O DIMEE foi dividido em duas partes principais, a primeira delas consiste no ambiente de simulação, qual o utilizador informa os dados necessários para a realização desta, e a segunda consiste na área de administração, onde o utilizador realiza o cadastro e edição dos equipamentos necessários para a implantação de um sistema eólico. A disponibilização desse ambiente de escolha pode ser visualizada na **Figura 14**.



**Figura 14** Tela principal sistema DIMEE

## 4.2. Simulação

Após selecionar a opção Simulador Eólico surgirá a tela para iniciar a simulação, conforme apresentado na **Figura 15**.



The screenshot displays the DIMEE (Sistema de Dimensionamento Eólico) simulation interface. At the top, there is a header with the DIMEE logo and a background image of wind turbines at sunset. Below the header, the interface is divided into two main sections: "DADOS GERAIS" and "DADOS DA SIMULAÇÃO".

**DADOS GERAIS**

- Nome:** Input field containing "Nome" with a help icon.
- E-mail:** Input field containing "email@email.com.br" with a help icon.
- Cidade:** Input field containing "Cascavel - PR" with a help icon.

**DADOS DA SIMULAÇÃO**

- Tipo de Sistema Eólico:** Dropdown menu with "Selecione" and a help icon.
- Selecionar Aerogerador:** Dropdown menu with "Selecione" and a help icon.

At the bottom left, there is a "Simular" button.

**Figura 15** Tela início da simulação sistema DIMEE

Nesta tela o utilizador inserirá as informações iniciais conforme apresentadas nos campos delimitados em Dados Gerais (Nome, E-mail, Cidade), e na sequência ele informará qual o tipo de sistema eólico será utilizado na simulação, havendo como opções *On-Grid* e *Off-Grid*. O utilizador também informará se deseja ou não fixar um modelo de aerogerador previamente cadastrado para seguir a simulação (**Figura 16** e **Figura 17**). Caso ele opte por não selecionar um aerogerador, o sistema apresentará, ao final da simulação, qual é o mais viável, tanto em custo quanto em desempenho, para implantação.

**DIMEE**  
Sistema de Dimensionamento Eólico

---

**DADOS GERAIS**

Nome:  ?

E-mail:  ?

Cidade:  ?

---

**DADOS DA SIMULAÇÃO**

Tipo de Sistema Eólico:  ?

Selecionar Aerogerador:  ?

- Selecione
- Sim
- Não

Figura 16 Tela seleção aerogerador - Opções

**DIMEE**  
Sistema de Dimensionamento Eólico

---

**DADOS GERAIS**

Nome:  ?

E-mail:  ?

Cidade:  ?

---

**DADOS DA SIMULAÇÃO**

Tipo de Sistema Eólico:  ?

Selecionar Aerogerador:  ?

- Selecione
- H3.8 - 2000 W
- H3.1 - 1000 W
- H4.6 - 3000 W
- H6.4 - 5000 W
- Skystream 3.7 - 2400 W
- WES 50 - 50.000 W

Figura 17 Tela seleção aerogerador - Modelos

Ao selecionar a primeira opção (*On-Grid*) são exibidas em tela as outras informações necessárias para seguir a simulação (Dados Elétricos, Dados de Vento e Dados Financeiros), conforme apresentados na **Figura 18**.

**DIMEE**  
Sistema de Dimensionamento Eólico

---

**DADOS GERAIS**

Nome:  ?

E-mail:  ?

Cidade:  ?

---

**DADOS DA SIMULAÇÃO**

Tipo de Sistema Eólico:  ?

Selecionar Aerogerador:  ?

---

**DADOS ELÉTRICOS**

Valor Tarifa de Energia R\$/kWh:  ?

Tipo de Conexão a Rede Elétrica:  ?

Consumo de Energia (kWh):  ?

---

**DADOS DE VENTO**

Velocidade do Vento:  ?

Fator C:  ?

Fator K:  ?

Descrição do Terreno:  ?

Observações:  
Para obter os valores da velocidade do vento e dos fatores C e K acesse [Atlas do Potencial Eólico Brasileiro](#)

---

**DADOS FINANCEIROS**

Custo de Instalação:  ?

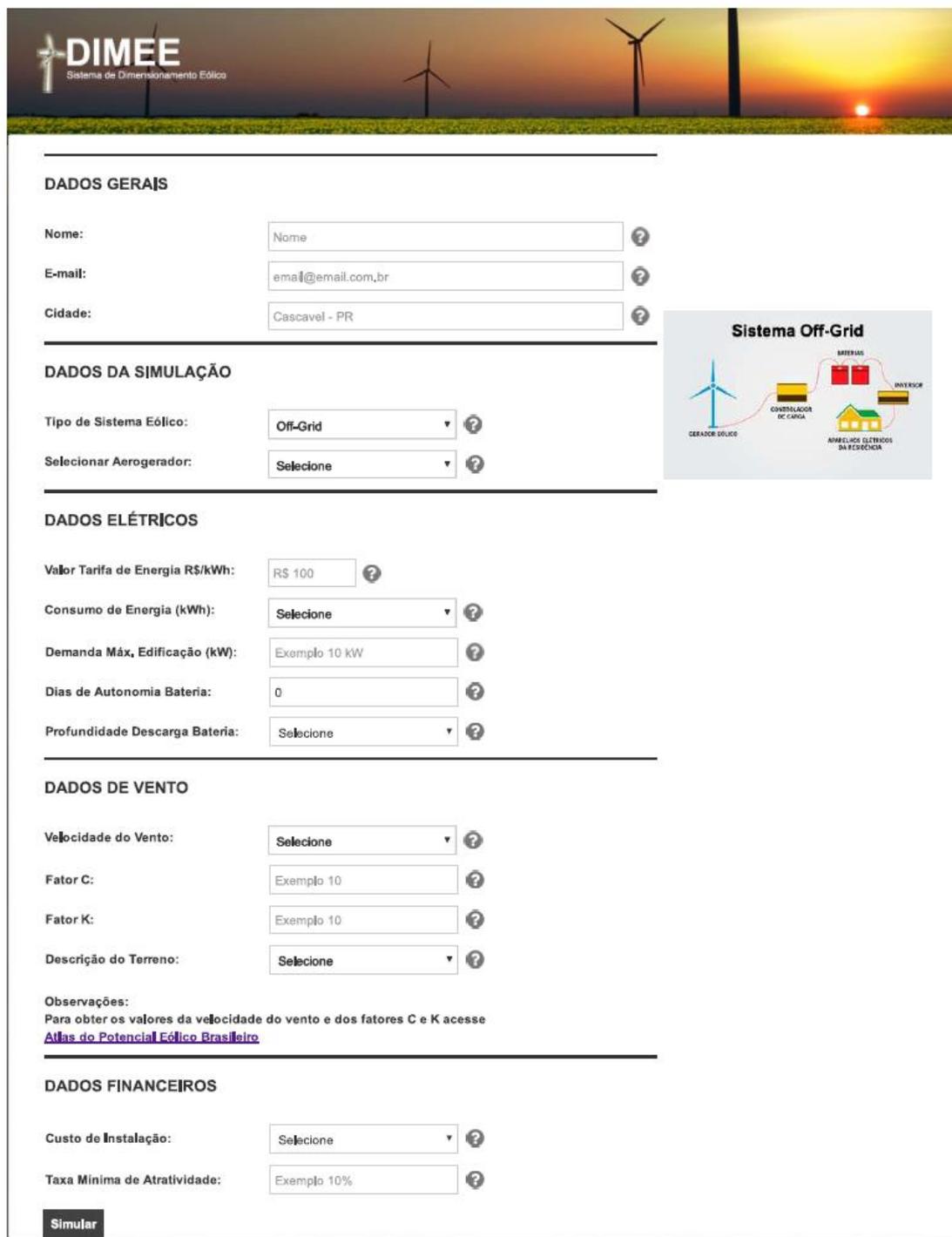
Taxa Mínima de Atratividade:  ?

**Simular**

**Sistema On-Grid**

**Figura 18** Tela simulação sistema *On-Grid*

Ao selecionar a segunda opção (*Off-Grid*), são apresentadas, além dos campos de entrada presentes na primeira opção, a solicitação da entrada das seguintes informações: Demanda Máxima da Edificação em kWh, Dias de Autonomia e Profundidade de Descarga de Bateria. A disponibilização destas solicitações é visualizada na **Figura 19**.



**DIMEE**  
Sistema de Dimensionamento Eólico

**DADOS GERAIS**

Nome:  ?

E-mail:  ?

Cidade:  ?

**DADOS DA SIMULAÇÃO**

Tipo de Sistema Eólico:  ?

Selecionar Aerogerador:  ?

**DADOS ELÉTRICOS**

Valor Tarifa de Energia R\$/kWh:  ?

Consumo de Energia (kWh):  ?

Demanda Máx, Edificação (kW):  ?

Dias de Autonomia Bateria:  ?

Profundidade Descarga Bateria:  ?

**DADOS DE VENTO**

Velocidade do Vento:  ?

Fator C:  ?

Fator K:  ?

Descrição do Terreno:  ?

Observações:  
Para obter os valores da velocidade do vento e dos fatores C e K acesse [Atlas do Potencial Eólico Brasileiro](#)

**DADOS FINANCEIROS**

Custo de Instalação:  ?

Taxa Mínima de Atratividade:  ?

**Simular**

**Sistema Off-Grid**



**Figura 19** Tela simulação sistema *Off-Grid*

Conforme apresentado na **Figura 18**, após a seleção do Tipo de Sistema Eólico que será simulado, ao selecionar a primeira opção, é apresentada, na sequência, um campo para inserção do valor de tarifa cobrado pela concessionária e o campo de seleção do Tipo de Conexão à Rede Elétrica, quais constam as opções de sistemas monofásicos, bifásicos e trifásicos. Este esquema de inserção e opções são visualizadas na **Figura 20**.

---

**DADOS ELÉTRICOS**

Valor Tarifa de Energia R\$/kWh:  ?

Tipo de Conexão a Rede Elétrica:  ?

Consumo de Energia (kWh):  ?

- 127 V ( Monofásico )
- 220 V ( Monofásico )
- 127 V - 220 V ( Bifásico )
- 220 V - 380 V ( Bifásico )
- 127 V - 220 V Trifásico
- 127 V - 380 V Trifásico

---

**Figura 20** Tela dados elétricos – Tipos de conexão a rede elétrica

Em sequência, o utilizador entrará com as informações sobre seu consumo elétrico. Há duas opções para entrada das informações sobre consumo elétrico, uma delimitada Manual, no qual são inseridas as informações do histórico de consumo de energia elétrica em kWh/mês, e a outra, denominada Simulador Elétrico, conforme apresentado na **Figura 21**.

---

**DADOS ELÉTRICOS**

Valor Tarifa de Energia R\$/kWh:  ?

Tipo de Conexão a Rede Elétrica:  ?

Consumo de Energia (kWh):  ?

- Selecione
- Manual
- Simulador Elétrico

---

**Figura 21** Tela dados elétricos – Consumo de energia

Ao selecionar a opção Manual, é aberta uma nova tela na qual o utilizador inserirá as informações, mês a mês, do histórico do seu consumo elétrico. Esta tela é visualizada na **Figura 22**.



The image shows a web form titled "Série de Consumo de Energia Elétrica" with a red close button in the top right corner. Below the title is the label "Consumo kWh:". The form contains twelve rows, each representing a month from January to December. Each row has a text label for the month and a corresponding input field containing the text "EX: 1". At the bottom left of the form is a black button with the white text "Finalizar".

Mês	Consumo kWh
Janeiro:	EX: 1
Fevereiro:	EX: 1
Março:	EX: 1
Abril:	EX: 1
Maio:	EX: 1
Junho:	EX: 1
Julho:	EX: 1
Agosto:	EX: 1
Setembro:	EX: 1
Outubro:	EX: 1
Novembro:	EX: 1
Dezembro:	EX: 1

Finalizar

**Figura 22** Tela série de histórico de consumo elétrico

Ao selecionar a opção Simulador Elétrico, é aberta uma nova tela (**Figura 23**) qual o utilizador selecionará os equipamentos (**Figura 24**), informará a quantidade, a potência em *Watts* e o tempo de uso em horas por dia, semana ou mês (**Figura 25**) de cada um dos equipamentos inseridos no quadro. Estes equipamentos estão previamente cadastrados e assim como todos os outros equipamentos utilizados na simulação são passíveis de inserção e edição.

**QUADRO DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA** ✖

Equipamentos	Quantidade	Potência (W)	Tempo de Uso (h)	Período	
Selecione ▼	EX: 1	EX: 1	EX: 1	Selecione ▼	<b>Adicionar</b>

**Figura 23** Tela Cálculo da demanda

**QUADRO DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA** ✖

Equipamentos	Quantidade	Potência (W)	Tempo de Uso (h)	Período	
Selecione ▼ Selecione Ar Condicionado Aspirador de Pó Boiler Elétrico Chuveiro Microcomputador Notebook Estufa Ferro de Passar Lavadora de Roupas Microondas Refrigerador Secadora de Roupas Freezer Fritadeira Elétrica Lâmpada Incandescente Lâmpada Fluorescente Lâmpada de Led Lavadora de Pratos Torneira Elétrica	EX: 1	EX: 1	EX: 1	Selecione ▼	<b>Adicionar</b>

**Figura 24** Tela simulador elétrico - Equipamentos

Equipamentos	Quantidade	Potência (W)	Tempo de Uso (h)	Período
Microcomputador	1	400	6	Selecione

Adicionar

**Figura 25** Tela simulador elétrico - Período

Após definir os valores de referência dos dados elétricos são solicitados os dados de vento, sendo estas: a velocidade do vento, os valores dos Fatores C e K da função densidade de probabilidade de *Weibull* e a descrição do terreno onde se pretende instalar o sistema eólico. Em relação aos dados da velocidade do vento, Fatores C e K, há uma instrução na página de como obtê-los. Para a inserção da velocidade do vento, o sistema disponibiliza duas opções denominadas de Série Temporal e Média Anual (**Figura 26**).

Ao selecionar opção de Série Temporal (**Figura 27**), uma nova tela será aberta na qual o utilizador poderá informar quantos dados de velocidade do vento quiser.

---

**DADOS DE VENTO**

Velocidade do Vento:  ?

Fator C:  ?

Fator K:  ?

Descrição do Terreno:  ?

Observações:  
Para obter os valores da velocidade do vento e dos fatores C e K acesse [Atlas do Potencial Eólico Brasileiro](#)

---

**Figura 26** Tela dados de vento – Opção velocidade do vento



The screenshot shows a window titled "Série Temporal" with a red close button in the top right corner. Below the title, the text "Velocidade do Vento (m/s):" is displayed. There is an input field containing "EX: 1" and a blue button labeled "Adicionar". Below this, there is a black button labeled "Finalizar".

**Figura 27** Tela velocidade do vento - Série temporal

Ao selecionar a opção de Média Anual (**Figura 28**), uma caixa de inserção de valor é liberada, na qual o utilizador informará a velocidade média do vento em m/s. Essa informação e a informação dos Fatores C e K, conforme informado anteriormente, são disponibilizadas através do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro do CRESESB.

---

**DADOS DE VENTO**

Velocidade do Vento:	Média Anual	?
Velocidade Média do Vento (m/s):	EX: 0	?
Fator C:	Exemplo 10	?
Fator K:	Exemplo 10	?
Descrição do Terreno:	Selecione	?

Observações:  
Para obter os valores da velocidade do vento e dos fatores C e K acesse [Atlas do Potencial Eólico Brasileiro](#)

---

**Figura 28** Tela velocidade do vento – Velocidade média do vento, fatores C e K

Posteriormente a inserção dos valores descritos anteriormente há o campo da Descrição do Terreno, onde o utilizador selecionará a opção que melhor corresponda ao local onde se pretende instalar o aerogerador. Essa opção é melhor visualizada na **Figura 29**.

---

**DADOS DE VENTO**

Velocidade do Vento: Média Anual ?

Velocidade Média do Vento (m/s): EX: 0 ?

Fator C: Exemplo 10 ?

Fator K: Exemplo 10 ?

Descrição do Terreno: Seleccione ?

Observações:  
Para obter os valores da velocidade consulte o [Atlas do Potencial Eólico Brasileiro](#)

- Seleccione
- Sem Vegetação
- Gramado
- Cultivado
- Com Poucas Árvores
- Muitas Árvores, Cerca Viva ou Pouca Edificações
- Floresta
- Zona Urbana

---

**Figura 29** Tela dados de vento – Descrição do terreno

A próxima etapa para a realização da simulação consiste na inserção de dados financeiros (**Figura 30**). Nesta parte do sistema o utilizador informará o valor referente ao custo de instalação, em valor de moeda corrente ou em percentagem do valor total do projeto (**Figura 31**), e a taxa mínima de atratividade em percentagem (**Figura 32**).

---

**DADOS FINANCEIROS**

Custo de Instalação: Seleccione ?

Taxa Mínima de Atratividade: Exemplo 10% ?

**Figura 30** Tela dados financeiros

Em relação ao custo de instalação, após a seleção da forma de entrada do valor de referência será liberado um campo para inserção desse valor que, conforme já descrito, poderá ser em porcentagem do custo total do projeto ou em um valor fixo em moeda corrente.

---

### DADOS FINANCEIROS

Custo de Instalação:	<input type="text" value="Selecione"/>	?
Taxa Mínima de Atratividade:	<input type="text" value="Selecione"/>	?
	<input type="text" value="R\$"/>	
	<input type="text" value="Percentual"/>	

**Figura 31** Tela dados financeiros – Custo de instalação

---

### DADOS FINANCEIROS

Custo de Instalação:	<input type="text" value="R\$"/>	?
Valor Estimado R\$ ou %:	<input type="text" value="R\$: 0,00"/>	?
Taxa Mínima de Atratividade:	<input type="text" value="Exemplo 10%"/>	?

**Figura 32** Tela dados financeiros - Taxa mínima de atratividade

Todo o descritivo anterior refere-se à simulação de um sistema *On-Grid*. Para a simulação de um sistema *Off-Grid* o campo Tipo de Conexão nos Dados Elétricos, conforme apresentado na **Figura 20**, não é disponibilizado e, três novos campos são disponibilizados para inserção de valores e assim possibilitar a simulação *Off-Grid*, sendo: Demanda Máxima de Edificação, Dias de Autonomia de Bateria e Profundidade de Descarga da Bateria. Esse esquema é apresentado na **Figura 33**.

---

**DADOS ELÉTRICOS**

Valor Tarifa de Energia R\$/kWh:  ?

Consumo de Energia (kWh):  ?

Demanda Máx. Edificação (kW):  ?

Dias de Autonomia Bateria:  ?

Profundidade Descarga Bateria:  ?

- Selecione
- 20%
- 30%
- 40%
- 50%
- 60%

---

**Figura 33** Tela dados elétricos – Simulação sistema *Off-Grid*

### 4.3. Administração

Conforme informado, o sistema possui duas partes principais, uma de simulação e a segunda de administração, na qual o utilizador poderá, entre outras atividades, realizar o cadastro e edição dos equipamentos necessários para a implantação de um sistema eólico. Após selecionar a opção Administração, conforme apresentado na **Figura 15**, surgirá à tela de *Login*, onde o utilizador inserirá os dados para acesso a esse ambiente. Essa tela de acesso é apresentada na **Figura 34**.

**DIMEE**  
Sistema de Dimensionamento Eólico

Email:

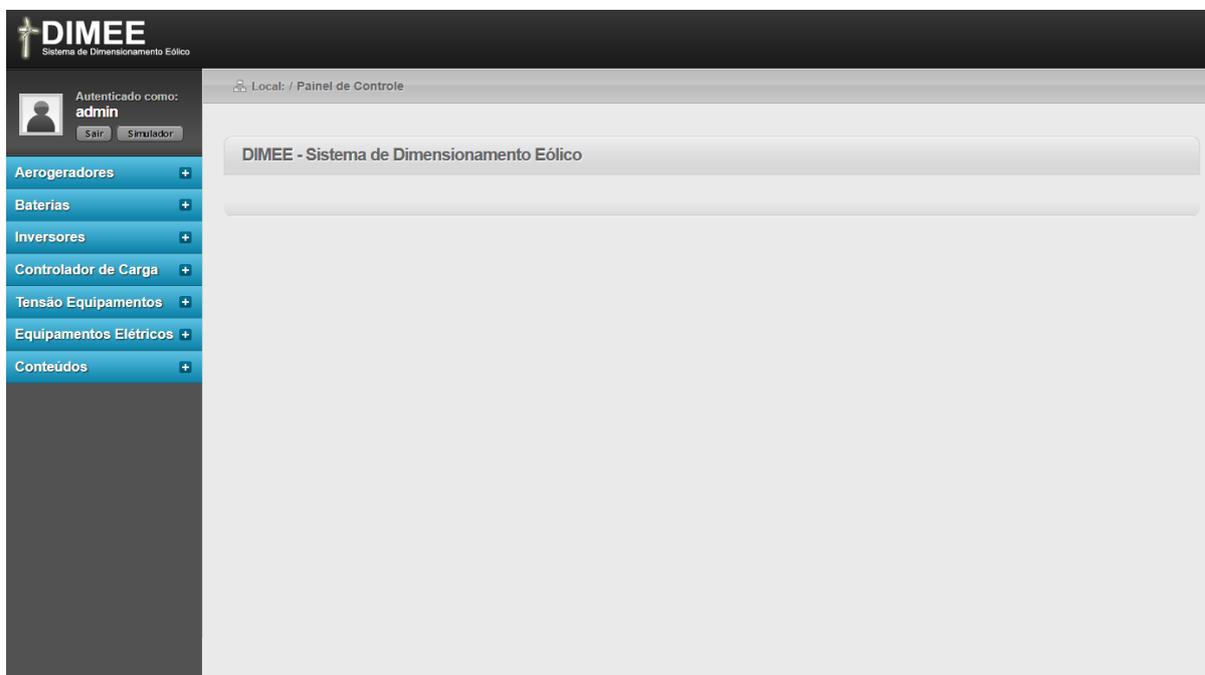
Senha:

**Acessar**

**Figura 34** Tela de *login* administração

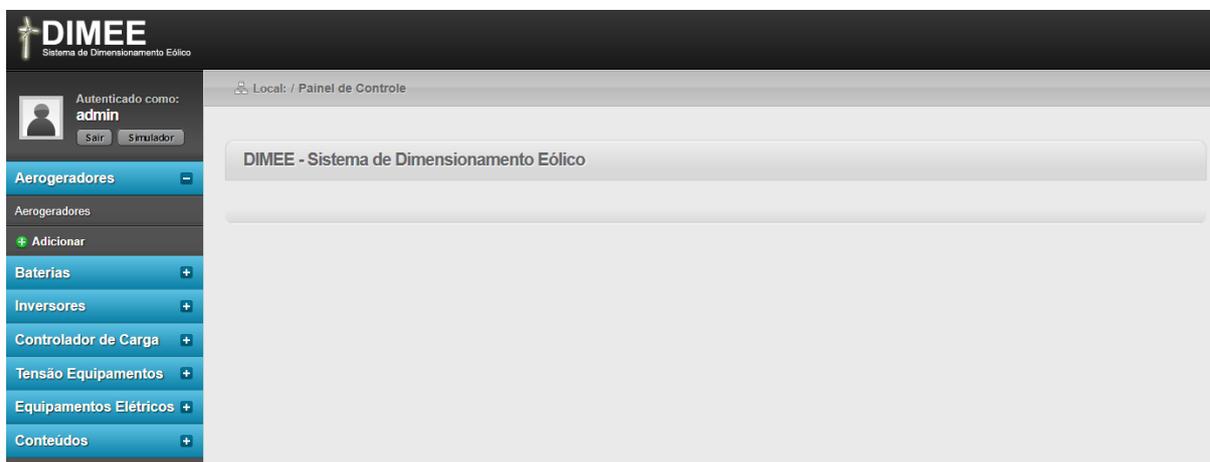
Realizado o ingresso ao ambiente de administração o utilizador terá acesso ao painel de controle e posteriormente aos cadastros de todos os equipamentos e ao gerenciador de conteúdo. Os menus exibidos nesse painel de controle são:

Aerogeradores, Baterias, Inversores, Controladores de Carga, Tensão Equipamentos, Equipamentos Elétricos e Conteúdos. Essa disponibilização é apresentada na **Figura 35**.



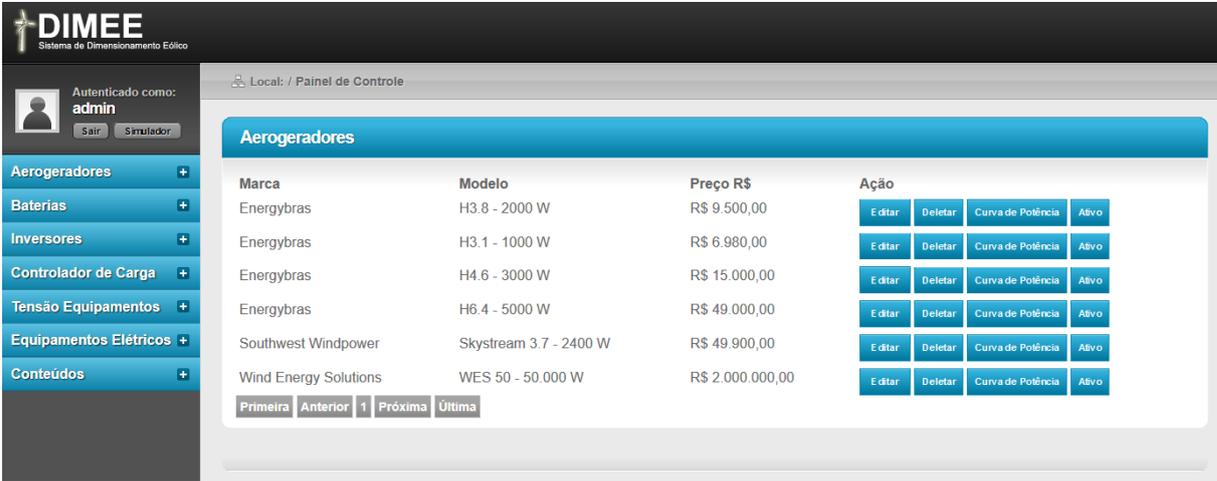
**Figura 35** Tela do painel de controle

Ao selecionar o *menu* Aerogeradores, o utilizador terá as opções de visualização dos aerogeradores cadastrados e suas respectivas informações e a opção adição de um novo aerogerador ao cadastro, conforme apresentado na **Figura 36**.



**Figura 36** Tela do painel de controle - Aerogeradores

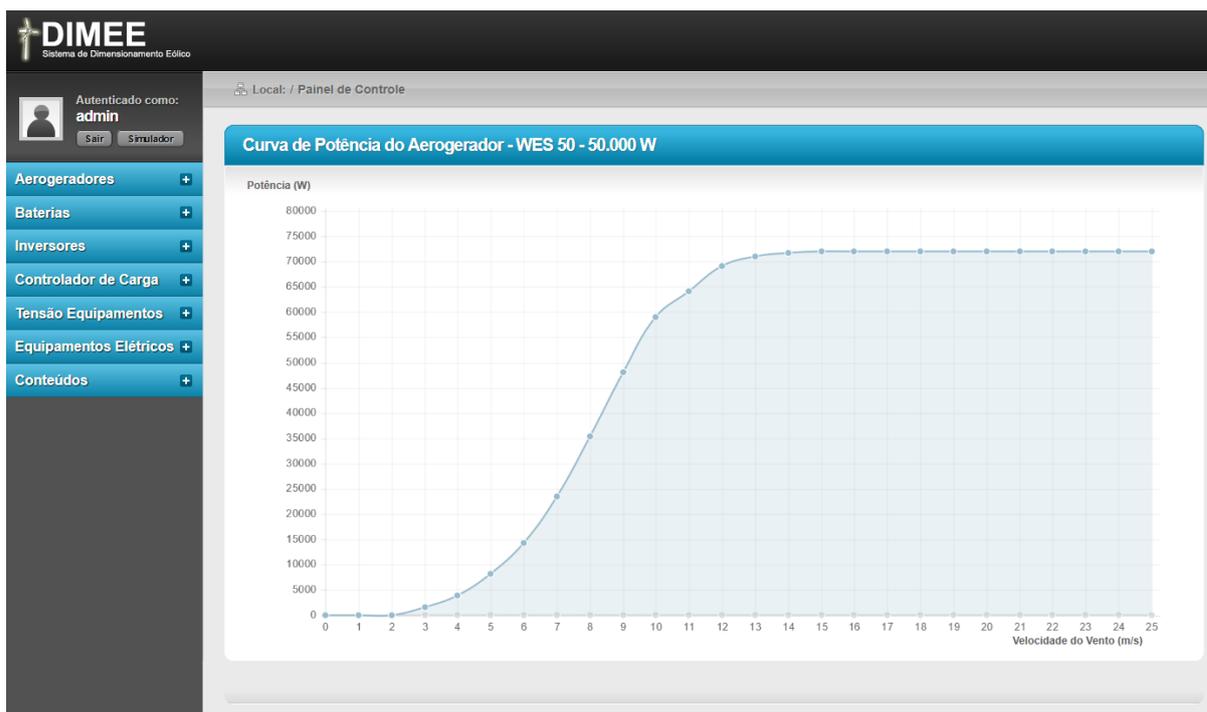
Ao selecionar o *sub-menu* Aerogeradores é apresentado em tela uma listagem contendo as informações básica dos aerogeradores cadastrados (Marca, Modelo e Preço). Na mesma tela ainda há a associação de ações a cada um dos equipamentos cadastrados sendo eles: **Editar**, no qual poderá realizar as alterações no cadastro do equipamento cadastrado; **Deletar**, no qual poderá ser feito a exclusão do cadastro; **Curva de Potência**, no qual é apresentada a curva de geração de energia e; **Ativo/Inativo**, no qual é possível deixar temporariamente desabilitado ou reabilitar para buscas na simulação o equipamento desejado. Esse esquema de opções é visto na **Figura 37**.



DIMEE Sistema de Dimensionamento Eólico				
Autenticado como: <b>admin</b>		Local: / Painel de Controle		
<b>Aerogeradores</b>				
Marca	Modelo	Preço R\$	Ação	
Energybras	H3.8 - 2000 W	R\$ 9.500,00	Editar	Deletar
Energybras	H3.1 - 1000 W	R\$ 6.980,00	Editar	Deletar
Energybras	H4.6 - 3000 W	R\$ 15.000,00	Editar	Deletar
Energybras	H6.4 - 5000 W	R\$ 49.000,00	Editar	Deletar
Southwest Windpower	Skystream 3.7 - 2400 W	R\$ 49.900,00	Editar	Deletar
Wind Energy Solutions	WES 50 - 50.000 W	R\$ 2.000.000,00	Editar	Deletar

**Figura 37** Tela aerogeradores - Listagem

Ao selecionar a opção Curva de Potência o utilizador será direcionado a uma nova tela, na qual é apresentado o gráfico da respectiva curva em função da velocidade do vento em metros por segundo, conforme demonstrado na **Figura 38**. Esses dados são obtidos através do cadastro das velocidades e potências na inserção de um novo aerogerador.



**Figura 38** Tela aerogeradores - Gráfico da curva de geração de energia

Ao selecionar a opção Adicionar no *menu* Aerogeradores o usuário é direcionado a uma nova página na qual inserirá as informações para a realização de um novo cadastro. Nesta tela ele informará a **Marca** e **Modelo** do aerogerador, informará se há um **Inversor Incluso** e também se este **Inversor é do Tipo Grietie**, Informará o tipo de **Sistema do Aerogerador**, tendo as opções de velocidade fixa e velocidade variável.

Na sequência há os campos de **Potência Nominal do Inversor** em Watts, caso haja um inversor incluso, **Velocidade do Vento de Partida** em metros por segundo, **Tempo de Vida Útil em Anos** do equipamento e **Preço** em moeda corrente.

Além das opções descritas o utilizador poderá informar se o fabricante disponibiliza para o mesmo modelo de aerogerador outras configurações de **Tensão de Saída**, tanto para corrente contínua (12V, 24V, 36V ou 48V) quanto para corrente alternada (Monofásica 127V e Monofásica 220V, Bifásica 127-22V e Bifásica 220V-380V ou Trifásica 127V-220V e Trifásica 220V-380V).

Para cada uma das opções de tensão de saída há a possibilidade da inserção do valor adicional, caso haja, para cada uma dessas configurações selecionadas.

Na sequência do cadastro o utilizador informará a **Altura da Torre em Metros** e o **Material da Torre Eólica**. Também há um campo para inserção de **Observações Gerais**, no qual é possível inserir outras informações que o utilizador julgue importante além das delimitadas no sistema.

Por último, há o campo para inserção dos valores das potências geradas pelo aerogerador em função da velocidade do vento em metros por segundo, denominado **Dados para Construção da Curva de Potência**.

Caberá ao utilizador a validação e a veracidade das informações inseridas junto ao sistema. Por se tratar de um sistema *Web* todos que utilizarem o sistema terão acesso aos mesmos dados disponibilizados. Todas essas informações são visualizadas na **Figura 39**.



**DIMEE**  
Sistema de Dimensionamento Ético

Local: / Painel de Controle

Autenticado como:  
**admin**

Sair Simulador

- Aerogeradores +
- Baterias +
- Inversores +
- Controlador de Carga +
- Tensão Equipamentos +
- Equipamentos Elétricos +
- Conteúdos +

### Novo Aerogerador

**Marca:**

**Modelo:**

**Inversor Incluso:**

**Inversor Grie Tie Incluso:**

**Tipo de Sistema:**

**Potência Nominal Inversor (W):**

**Velocidade do Vento de Partida (m/s):**

**Tempo de Vida Útil em Anos:**

**Preço R\$:**

---

**Configurações Possíveis de Conexão do Aerogerador:**

Tensão de Saída	Custo Adicional em R\$
<input type="checkbox"/> Corrente Contínua 12V	<input type="text" value="R\$ 100,00"/>
<input type="checkbox"/> Corrente Contínua 24V	<input type="text" value="R\$ 100,00"/>
<input type="checkbox"/> Corrente Contínua 36V	<input type="text" value="R\$ 100,00"/>
<input type="checkbox"/> Corrente Contínua 48V	<input type="text" value="R\$ 100,00"/>
<input type="checkbox"/> Corrente Alternada Monofásica 127V	<input type="text" value="R\$ 100,00"/>
<input type="checkbox"/> Corrente Alternada Monofásica 220V	<input type="text" value="R\$ 100,00"/>
<input type="checkbox"/> Corrente Alternada Bifásica 127V - 220V	<input type="text" value="R\$ 100,00"/>
<input type="checkbox"/> Corrente Alternada Bifásica 220V - 380V	<input type="text" value="R\$ 100,00"/>
<input type="checkbox"/> Corrente Alternada Trifásica 127V - 220V	<input type="text" value="R\$ 100,00"/>
<input type="checkbox"/> Corrente Alternada Trifásica 220V - 380V	<input type="text" value="R\$ 100,00"/>

---

**Altura da Torre em metros:**  **Material da Torre:**

**Observações Gerais:**

---

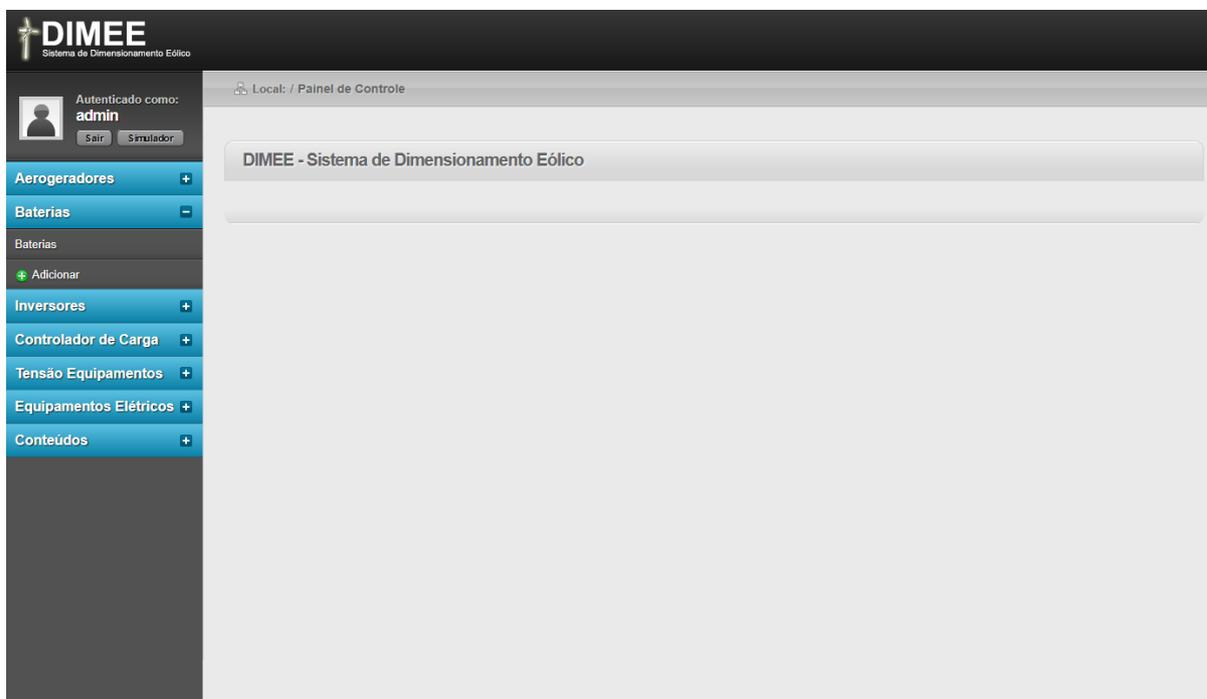
**DADOS PARA CONSTRUÇÃO DA CURVA DE POTÊNCIA:**

Velocidade do Vento (m/s):  Potência (W):  Adicionar

Adicionar Gerador

**Figura 39** Tela aerogeradores - Cadastro novo aerogerador

Ao selecionar o *menu* Baterias, o utilizador terá as opções de visualização das baterias cadastradas e suas respectivas informações e a opção adição de um novo cadastro, conforme apresentado na **Figura 40**.



**Figura 40** Tela do painel de controle - Baterias

Ao selecionar o *sub-menu* (*sub-menu*) Baterias é apresentada uma listagem contendo as informações básicas das baterias cadastradas (Marca, Modelo, Tensão e Preço). Na mesma tela ainda há a associação de ações a cada um dos equipamentos cadastrados sendo eles: **Editar**, no qual poderão ser feitas alterações no cadastro do equipamento cadastrado; **Deletar**, no qual poderá ser feita a exclusão do cadastro e; **Ativo/Inativo**, no qual é possível deixar temporariamente desabilitado ou reabilitar para buscas na simulação o equipamento desejado. Esse esquema de opções é apresentado na **Figura 41**.

Local: / Painel de Controle

Autenticado como: admin

Sair Simulador

**Baterias**

Marca	Modelo	Tensão (V)	Preço (R\$)	Ação
Moura	Clean 12MF105	12 V	R\$ 920,00	Editar Deletar Ativo
Moura	Clean 12MF63	12 V	R\$ 539,00	Editar Deletar Ativo
Moura	Clean 12MF45	12 V	R\$ 455,00	Editar Deletar Ativo
Freedom	DF4001	12 V	R\$ 1.289,00	Editar Deletar Ativo
Freedom	DF3000	12 V	R\$ 1.099,00	Editar Deletar Ativo
Freedom	DF2500	12 V	R\$ 999,00	Editar Deletar Ativo
Freedom	DF2000	12 V	R\$ 669,00	Editar Deletar Ativo
Freedom	DF1500	12 V	R\$ 569,00	Editar Deletar Ativo
Freedom	DF1000	12 V	R\$ 400,00	Editar Deletar Ativo
Freedom	DF700	12 V	R\$ 359,00	Editar Deletar Ativo
Freedom	DF500	12 V	R\$ 299,00	Editar Deletar Ativo
Freedom	DF300	12 V	R\$ 249,00	Editar Deletar Ativo

Primeira Anterior 1 2 Próxima Última

**Figura 41** Tela baterias - Listagem

Ao selecionar a opção Adicionar no *menu* Baterias o usuário é direcionado a uma nova página no qual ele inserirá as informações para a realização de um novo cadastro.

Nesta tela ele informará a **Marca** e **Modelo** da bateria, também selecionará a **Tensão Nominal em Volts**, as capacidades nominais para descargas em regimes de 10, 20 e 100 horas (**Capacidade C10**, **Capacidade C20** e **Capacidade C100**) e o número de ciclos de carga e descarga para cada uma dessas configurações.

Na sequência há os campos **Preço** e **Observações Gerais**, nos quais é possível inserir outras informações qual o utilizador julgue importante além das delimitadas no sistema. Todas essas informações são visualizadas na **Figura 42**.

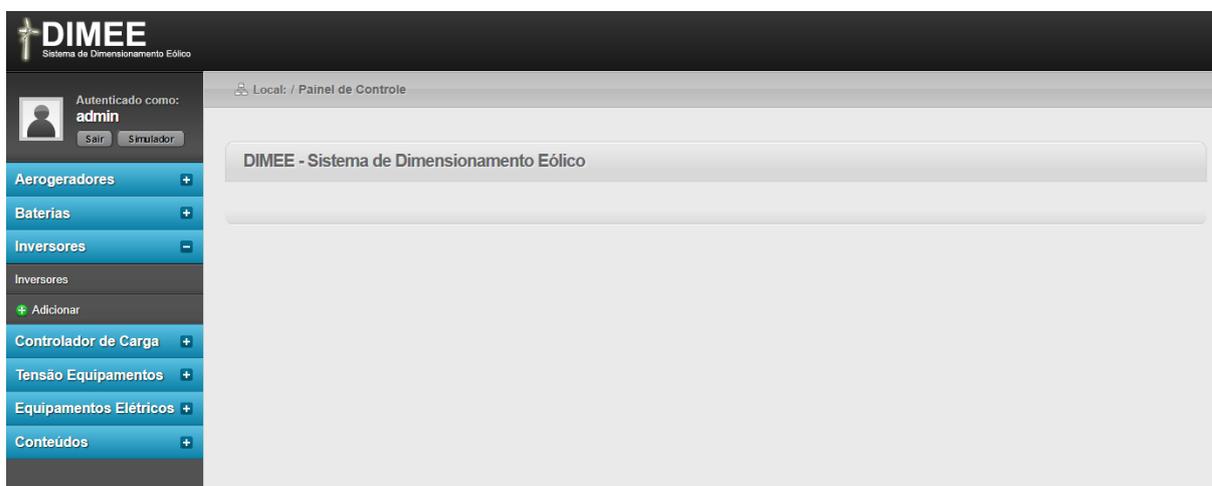
The screenshot displays the DIMEE web application interface. The top header includes the logo and the text 'DIMEE Sistema de Dimensionamento Eólico'. Below the header, the user is logged in as 'admin' with options to 'Sair' (Logout) or 'Simulador' (Simulator). The left sidebar contains a menu with items: 'Aerogeradores', 'Baterias', 'Inversores', 'Controlador de Carga', 'Tensão Equipamentos', 'Equipamentos Elétricos', and 'Conteúdos'. The main content area is titled 'Nova Bateria' and contains the following form fields:

- Marca:
- Modelo:
- Tensão Nominal (V):
- Capacidade C10 (Ah):
- Número de Ciclo C10:
- Capacidade C20 (Ah):
- Número de Ciclo C20:
- Capacidade C100 (Ah):
- Número de Ciclo C100:
- Preço R\$:
- Observações Gerais:

At the bottom of the form is a blue button labeled 'Adicionar Bateria'.

**Figura 42** Tela baterias – Cadastro nova bateria

Ao selecionar o *menu* Inversores, o utilizador terá as opções de visualização dos inversores cadastrados e suas respectivas informações e a opção adição de um novo cadastro, conforme apresentado na **Figura 43**.



**Figura 43** Tela do painel de controle - Inversores

Ao selecionar o *submenu* Inversores é apresentada uma listagem contendo as informações básicas dos equipamentos cadastrados (Marca, Modelo, Tensão de Entrada em Corrente Contínua, Tensão de Saída em Corrente Alternada, Potência Nominal em *Watts* e Preço). Na mesma tela também há a associação de ações a cada um dos equipamentos cadastrados sendo eles: **Editar**, no qual poderão ser feitas alterações no cadastro do equipamento cadastrado; **Deletar**, no qual poderá ser feita a exclusão do cadastro e; **Ativo/Inativo**, no qual é possível deixar temporariamente desabilitado ou reabilitar para buscas na simulação o equipamento desejado, conforme apresentado na **Figura 44**.

Marca	Modelo	Tensão Entrada VCC	Tensão Saída VAC	Potência Nominal (W)	Preço R\$	Ação
Unitron	iVolt - 1500W	12 V	110 V	1500 W	R\$ 1.800,00	Editar Deletar Ativo
Fronius	Galvo 1.5-1 - 1500W	120 V	180 V	1500 W	R\$ 8.190,00	Editar Deletar Ativo

**Figura 44** Tela inversores - Listagem

Ao selecionar a opção Adicionar no *menu* Inversores o usuário é encaminhado a uma nova página onde ele inserirá as informações para a realização de um novo cadastro.

Nesta tela, é solicitado a **Marca** e **Modelo** do inversor, a **Potência Nominal** em *Watts*, a **Eficiência do Inversor** em porcentagem e a **Potência de Surto** em *Watts*. Também selecionará a **Tensão de Entrada** em Volts, se este inversor é do **Tipo *Grie Tie*** e **Tipo de Onda** inversor com as opções: Senóide Pura, Senóide Modificada ou Onda Quadrada.

Na sequência é possível inserir o valor da **Tensão de Saída para Corrente Alternada**, o valor da **Corrente de Entrada** e da **Corrente de Saída** em Amperes além do campo de **Tempo de Vida Útil** em Anos. Ainda há os campos **Preço** em moeda corrente e **Observações Gerais**, no qual é possível inserir outras

informações qual o utilizador julgue necessário além das delimitadas no sistema. Todas essas informações são apresentadas na **Figura 45**.

The screenshot displays the 'Novo Inversor' form in the DIMEE system. The sidebar on the left contains a navigation menu with the following items: Aerogeradores, Baterias, Inversores, Controlador de Carga, Tensão Equipamentos, Equipamentos Elétricos, and Conteúdos. The main content area is titled 'Novo Inversor' and contains the following fields and controls:

- Marca: Text input field.
- Modelo: Text input field.
- Potencia Nominal (W): Text input field.
- Eficiência do Inversor (%): Text input field.
- Potência de Surto (W): Text input field.
- Tensão de Entrada VDC: Dropdown menu with '12' selected.
- Tipo Grid-Tie: Dropdown menu with 'Sim' selected.
- Tipo de Onda: Dropdown menu with 'Senóide Pura' selected.
- Tensão de Saída VAC: Text input field.
- Corrente de Entrada (A): Text input field.
- Corrente de Saída (A): Text input field.
- Tempo de Vida Útil em Anos: Text input field.
- Preço RS: Text input field with 'R\$ 100,00' entered.
- Observações Gerais: Text area.
- Adicionar Inversor: Button at the bottom of the form.

**Figura 45** Tela inversores – Cadastro novo inversor

Ao selecionar o *menu* Controlador de Carga, o utilizador terá as opções de visualização dos controladores de cargas cadastrados e suas respectivas

informações e a opção adição de um novo equipamento ao cadastro, conforme apresentado na **Figura 46**.



**Figura 46** Tela do painel de controle – Controlador de Carga

Ao selecionar o *sub-menu* Controlador de Carga é apresentada em tela uma listagem contendo as informações básicas dos equipamentos cadastradas (Marca, Modelo, Capacidade de Carga, Tensão e Preço). Na mesma tela ainda há a associação de ações a cada um dos equipamentos cadastrados sendo eles: **Editar**, no qual poderão ser feita alterações no cadastro do equipamento cadastrado; **Deletar**, no qual poderá ser feita a exclusão do cadastro e; **Ativo/Inativo**, no qual é possível deixar temporariamente desabilitado ou reabilitar para buscas na simulação o equipamento desejado, conforme apresentado na **Figura 47**.

Marca	Modelo	Capacidade de Carga (A)	Tensão (V)	Preço R\$	Ação
Morningstar	TriStar 60	60 A	12/24 V	R\$ 1.400,00	Editar Deletar Ativo
Beijing Epsolar	Viewstar VS1024A	10 A	12/24 V	R\$ 199,00	Editar Deletar Ativo
Beijing Epsolar	Viewstar VS3024A	30 A	12/24 V	R\$ 499,00	Editar Deletar Ativo
Beijing Epsolar	Epsolar Tracer-4210Aa	40 A	12/24 V	R\$ 989,00	Editar Deletar Ativo
Schneider Electric	Xantrex C35	35 A	12/24 V	R\$ 609,00	Editar Deletar Ativo
Schneider Electric	Xantrex C40	40 A	12/24 V	R\$ 839,00	Editar Deletar Ativo

**Figura 47** Tela controlador de carga - Listagem

Ao selecionar a opção Adicionar no *menu* Controlador de Carga o usuário é encaminhado a uma nova página na qual ele inserirá as informações para a realização de um novo cadastro.

Nesta tela é solicitado a **Marca** e **Modelo** do controlador de carga, a **Capacidade de Corrente** em Amperes. Ainda é necessário selecionar a **Tensão de Entrada** em Volts e a **Tensão de Saída** em Volts, além do campo de **Tempo de Vida Útil** em Anos, **Preço** em moeda corrente e **Observações Gerais**, onde é possível inserir outras informações qual o utilizador julgue necessário além das delimitadas no sistema. Essas informações são apresentadas na **Figura 48**.

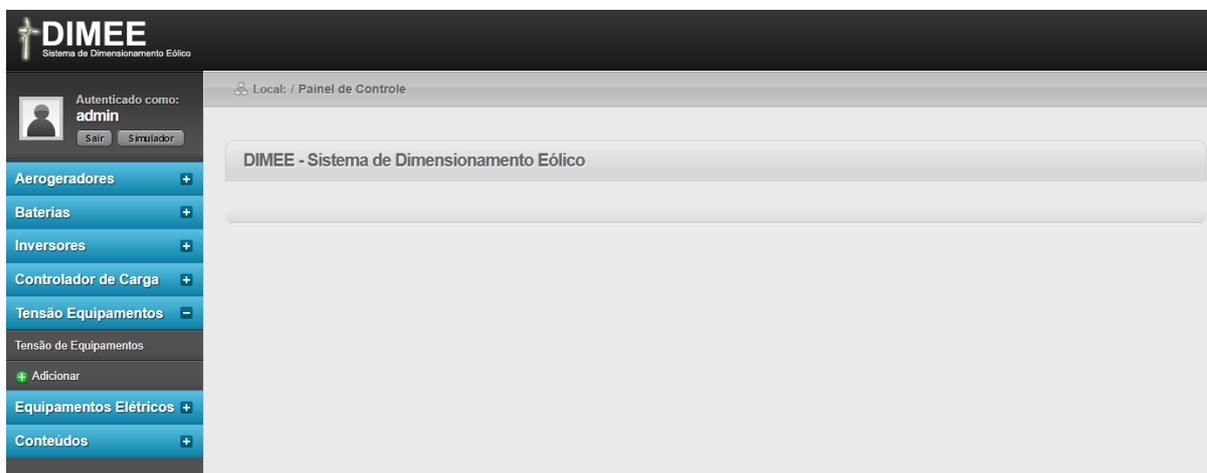
The screenshot shows the 'Novo Controlador de Carga' form in the DIMEE system. The interface includes a sidebar with navigation options and a main content area with the following fields:

- Marca:** Text input field.
- Modelo:** Text input field.
- Capacidade Corrente (A):** Text input field.
- Tensão Entrada (V):** Dropdown menu with '12' selected.
- Tensão de Saída (V):** Radio button options for 12, 24, 36, 48, 400, and 120.
- Tempo de Vida Útil em Anos:** Text input field.
- Preço RS:** Text input field with 'R\$ 100,00' entered.
- Observações Gerais:** Large text area for notes.

A blue button labeled 'Adicionar controlador' is located at the bottom of the form.

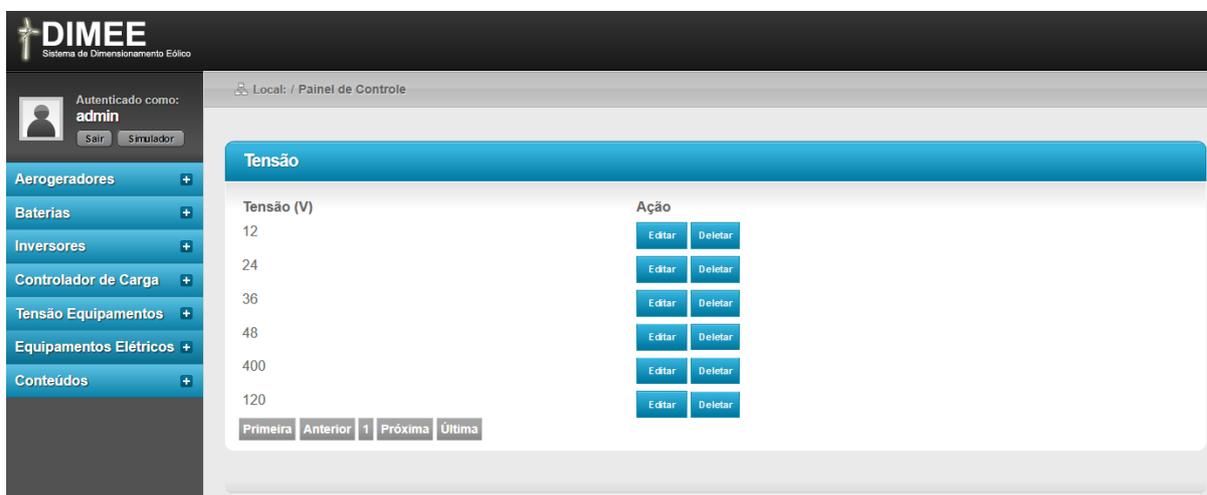
**Figura 48** Tela controlador de carga – Cadastro novo controlador

Ao selecionar o *menu* Tensão Equipamentos, o utilizador terá as opções de visualização das tensões cadastradas e suas respectivas informações e a opção adição de um novo cadastro, conforme apresentado na **Figura 49**.



**Figura 49** Tela do painel de controle – Tensão de equipamentos

Ao selecionar o *sub-menu* Tensão de Equipamentos é apresentada em tela uma listagem contendo as tensões cadastradas. Estes valores serão utilizados em todos os cadastros apresentados anteriormente. Na mesma tela ainda há a associação de ações a cada uma das tensões cadastradas, sendo estas: **Editar**, na qual poderá realizar alterações no cadastro do equipamento cadastrado e **Deletar**, no qual poderá ser feita a exclusão do cadastro, conforme apresentado na **Figura 50**.



### Figura 50 Tela tensão - Listagem

Selecionada a opção Adicionar no *menu* Tensão Equipamentos o usuário é encaminhado a uma nova página na qual ele inserirá as informações para a realização de um novo cadastro. Nesta tela é solicitada a **Tensão** em volts, conforme apresentado na **Figura 51**.

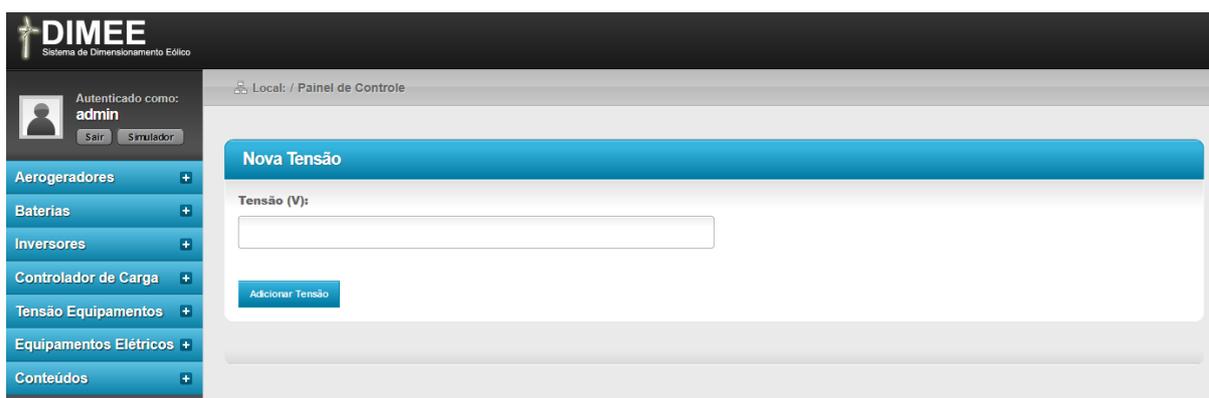


Figura 51 Tela tensão equipamentos – Cadastro nova tensão

Ao selecionar o *menu* Equipamentos Elétricos, o utilizador terá as opções de visualização dos equipamentos cadastrados e suas respectivas informações e a opção adição de um novo cadastro, conforme apresentado na **Figura 52**.

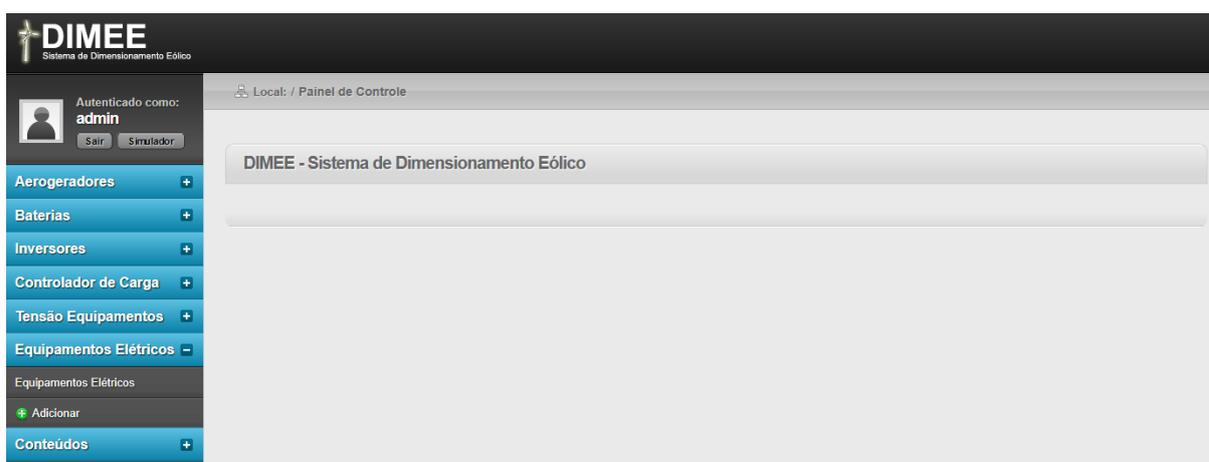


Figura 52 Tela do painel de controle – Equipamentos elétricos

Ao selecionar o *sub-menu* Equipamentos Elétricos é apresentada em tela uma listagem contendo os equipamentos cadastrados. Estes valores serão utilizados no quadro de simulação elétrica. Na mesma tela ainda há a associação de ações a cada uma das tensões cadastradas, sendo estas: **Editar**, na qual poderão ser feitas alterações no cadastro do equipamento cadastrado e **Deletar** e **Ativo/Inativo**, onde no qual é possível deixar temporariamente desabilitado ou reabilitar para utilização na simulação de consumo elétrico, no qual poderá ser feita a exclusão do cadastro, conforme apresentado na **Figura 53**.

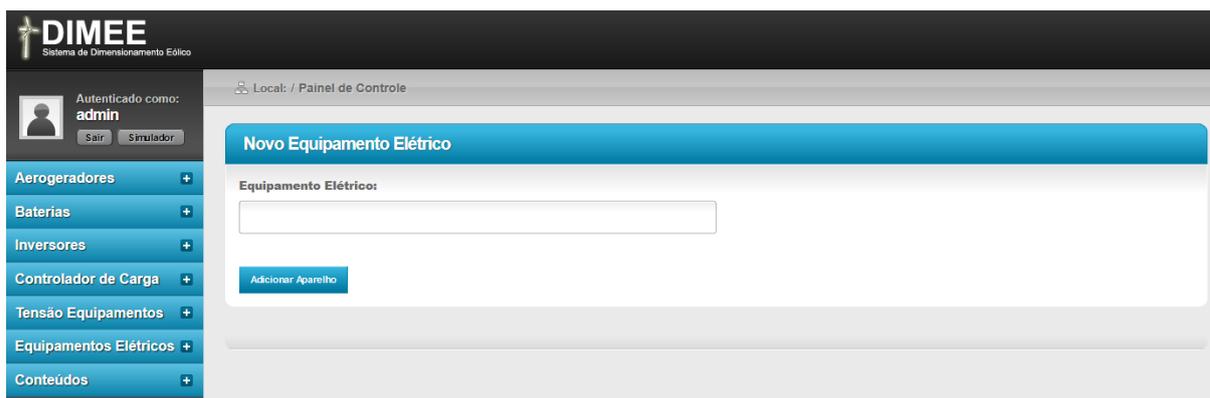
The screenshot shows the DIMEE (Sistema de Dimensionamento Elétrico) web application. The user is logged in as 'admin'. The main content area displays a list of electrical equipment with the following details:

Equipamentos Elétricos	Ação
Ar Condicionado	Editar Deletar Inativo
Aspirador de Pó	Editar Deletar Ativo
Boiler Elétrico	Editar Deletar Ativo
Chuveiro	Editar Deletar Ativo
Microcomputador	Editar Deletar Ativo
Notebook	Editar Deletar Ativo
Estufa	Editar Deletar Ativo
Ferro de Passar	Editar Deletar Ativo
Lavadora de Roupas	Editar Deletar Ativo
Microondas	Editar Deletar Ativo
Refrigerador	Editar Deletar Ativo
Secadora de Roupas	Editar Deletar Ativo

At the bottom of the list, there are navigation controls: Primeira, Anterior, 1, 2, 3, Próxima, Última.

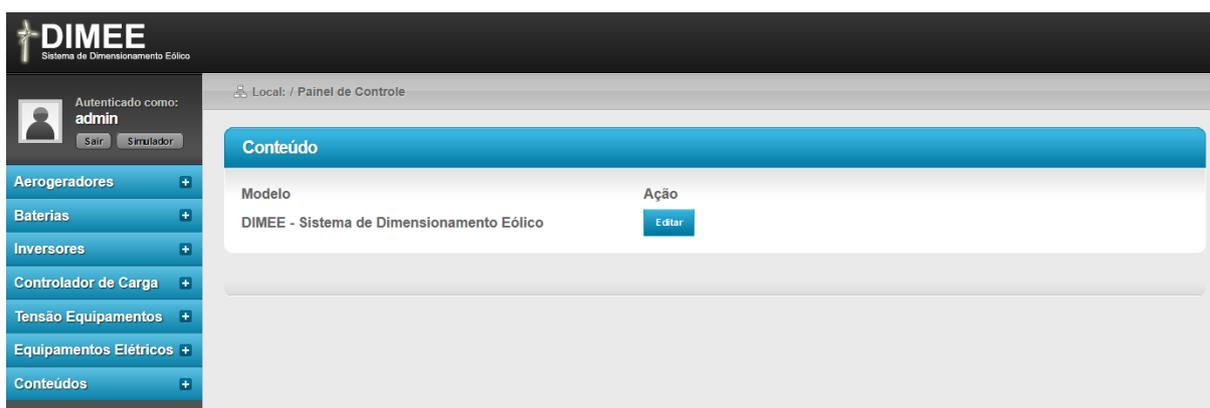
**Figura 53** Tela equipamentos elétricos - Listagem

Selecionada a opção Adicionar no *menu* Equipamentos Elétricos o usuário é encaminhado a uma nova página na qual ele inserirá as informações para a realização de um novo cadastro. Nesta tela é solicitado o nome do equipamento, conforme apresentado na **Figura 54**.



**Figura 54** Tela equipamento elétrico – Cadastro novo equipamento

Ao selecionar o *menu* Conteúdo, o utilizador terá as opções de visualização e posterior edição do conteúdo apresentado na tela inicial, conforme apresentado na **Figura 55**.



**Figura 55** Tela do painel de controle – Conteúdos

Ao solicitar a edição o utilizador é encaminhado a uma nova tela na qual terá um editor de texto e poderá realizar a inserção ou alteração das informações iniciais do sistema (**Figura 56**). Este campo é usado somente para o texto de apresentação do sistema.

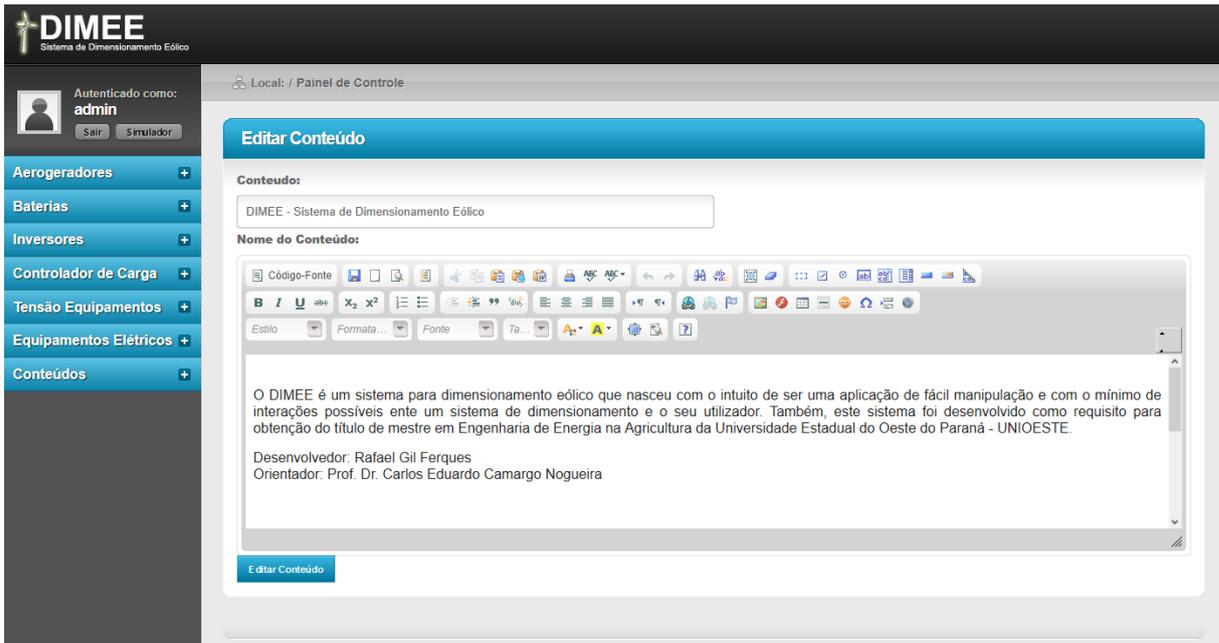


Figura 56 Tela edição conteúdo

#### 4.4. Simulação eólica *On-Grid*

Ao final da simulação é apresentado um relatório contendo as informações da simulação e os resultados desta, conforme apresentado na **Figura 57**.

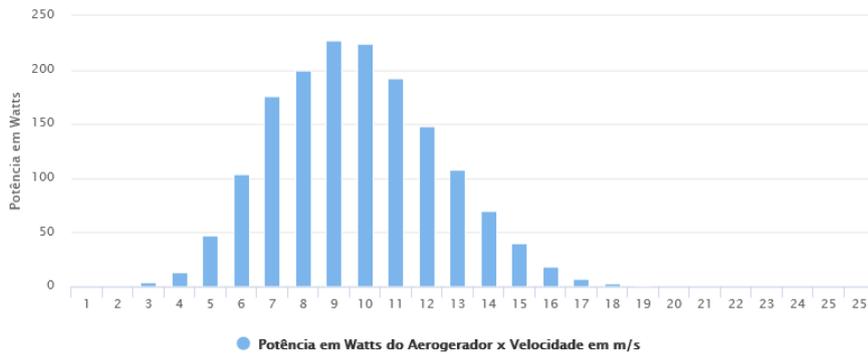
RELATÓRIO GERAL DA SIMULAÇÃO			
<b>IDENTIFICAÇÃO</b>			
Nome:	Rafael Gil Ferques		
E-mail:	rafael.ferques@ifpr.edu.br		
Cidade:	Cascavel - PR		
<b>DADOS DA SIMULAÇÃO</b>			
Consumo Elétrico Simulado:	707,71 kWh/mês		
Velocidade Média do Vento Anual:	7,01 m/s		
Velocidade Média do Vento Corrigida:	5,91 m/s		
Fator C:	7.9		
Fator K:	2.47		
<b>TABELA FINANCEIRA (FÍSICO/FINANCEIRO)</b>			
Descrição	Quantidade	Custo Unitário	Custo Total
Aerogerador Energybras - H3.8 - 2000 W	3	R\$ 9.500,00	R\$ 28.500,00
Custo da Instalação			R\$ 750,00
<b>TOTAL GERAL</b>			<b>R\$ 29.250,00</b>

**OBSERVAÇÕES GERAIS**

Altura da torre do aerogerador: 12 metros.

Para mais informações sobre o aerogerador selecionado acesse: <http://www.energybras.com.br/produtos/aerogeradores/modelo-h38-2000w>

Gráfico Potência Média do Aerogerador em Função da Curva de Potência Pela Função Densidade de Probabilidade de Weibull



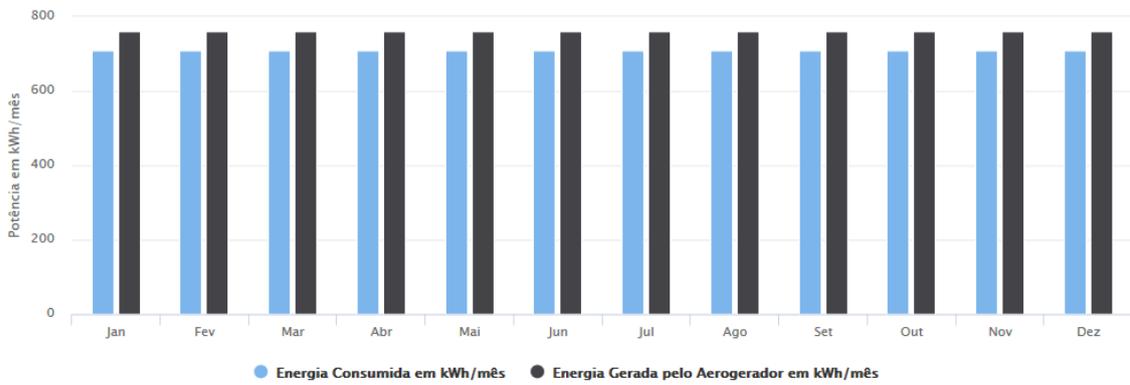
Valor Probabilidade Weibull:

0,99

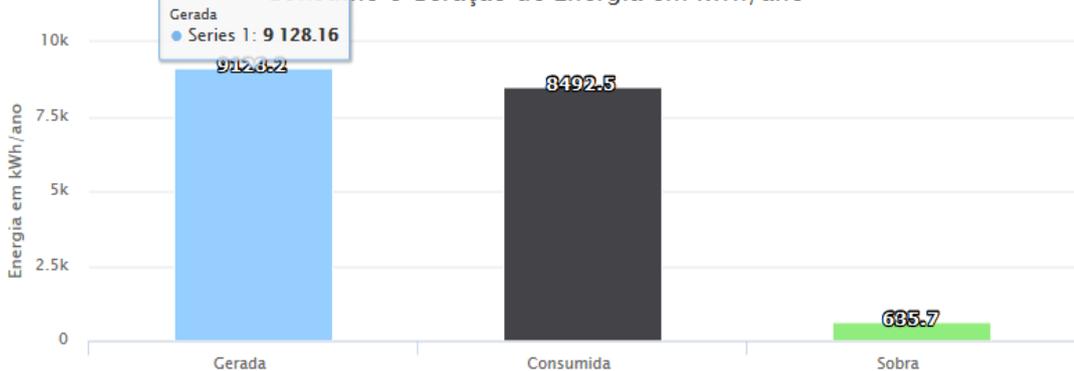
Potência Média em função da Probabilidade Weibull:

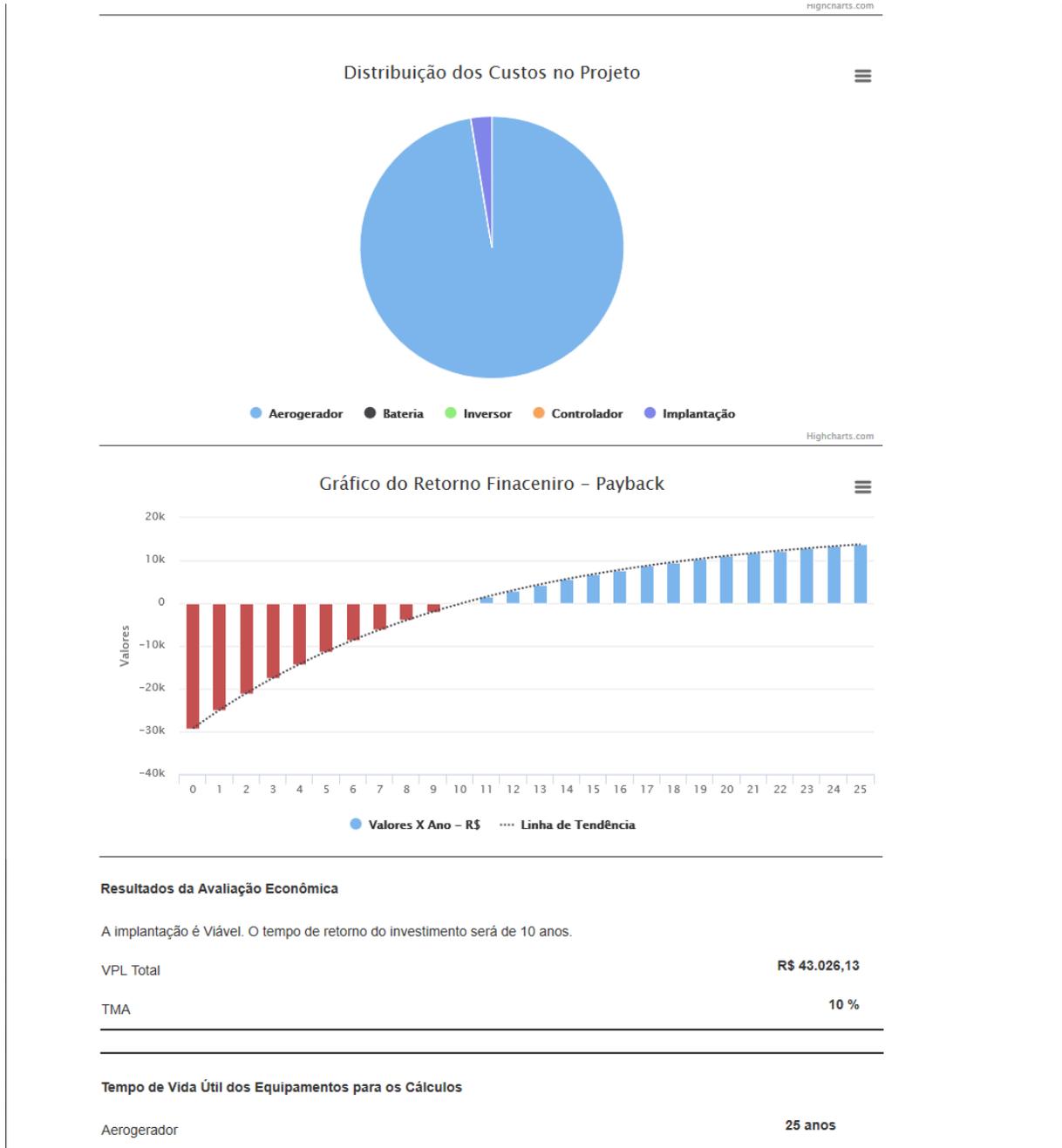
1.584,77 W

Consumo Mensal e Geração Eólica Mensal (kWh/mês) X Meses Anos



Consumo e Geração de Energia em kWh/ano





**Figura 57** Relatório simulação *On-Grid*

#### 4.5. Simulações eólica *Off-Grid*

Ao final da simulação é apresentado um relatório contendo as informações da simulação e os resultados desta, conforme apresentado na **Figura 58**.

## RELATÓRIO GERAL DA SIMULAÇÃO

### IDENTIFICAÇÃO

**Nome:** Rafael Gil Ferques  
**E-mail:** rafael.ferques@ifpr.edu.br  
**Cidade:** Cascavel - PR

### DADOS DA SIMULAÇÃO

**Consumo Elétrico Simulado:** 1.890,00 kWh/mês  
**Velocidade Média do Vento Anual:** 7,01 m/s  
**Velocidade Média do Vento Corrigida:** 5,91 m/s  
**Fator C:** 7.9  
**Fator K:** 2.47

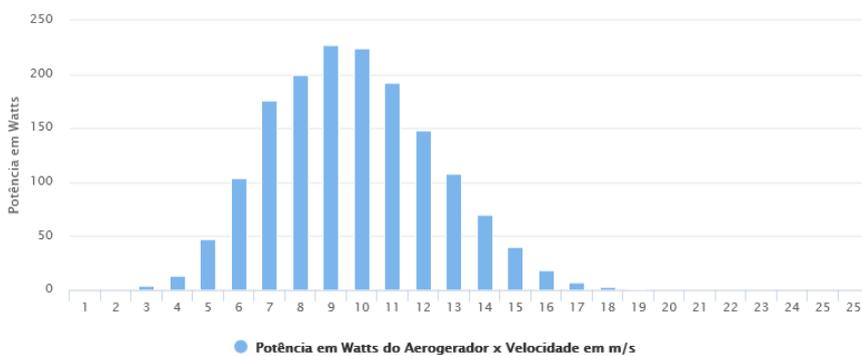
### TABELA FINANCEIRA (FÍSICO/FINANCEIRO)

Descrição	Quantidade	Custo Unitário	Custo Total
Aerogerador Energybras - H3.8 - 2000 W	7	R\$ 9.500,00	R\$ 66.500,00
Controlador de Carga Morningstar - TriStar 60	8	R\$ 1.400,00	R\$ 8.400,00
Bateria Moura - Clean 12MF220	68	R\$ 1.099,00	R\$ 71.435,00
Custo da Instalação			R\$ 750,00
<b>TOTAL GERAL</b>			<b>R\$ 147.085,00</b>

### OBSERVAÇÕES GERAIS

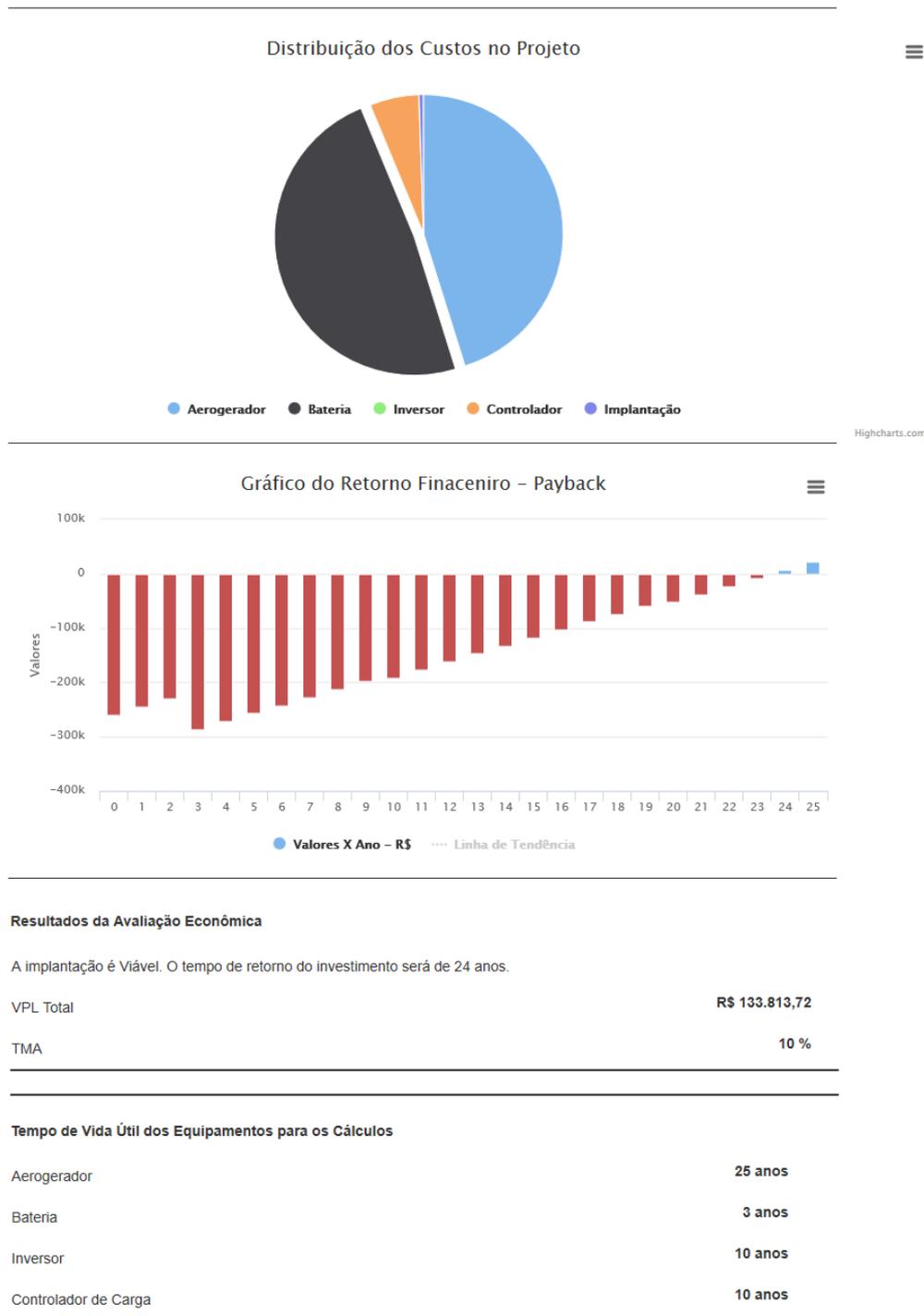
Altura da Torre: 12 metros.  
Material da Torre: Treliça.  
Controlador de Carga com corrente máxima de 60A  
Bateria estacionária de 220 Ah.  
Controladores de carga conectados em paralelo.  
Baterias conectadas em série de quatro baterias e o restante em paralelo.

Gráfico Potência Média do Aerogerador em Função da Curva de Potência Pela Função Densidade de Probabilidade de Weibull



**Valor Probabilidade Weibull:** 0,99

**Potência Média em função da Probabilidade Weibull:** 1.584,77 W



**Figura 58** Relatório simulação *Off-Grid*

## 5. CONCLUSÕES

A pesquisa realizada, verificando a pertinência dos seus objetivos, constatou a necessidade do desenvolvimento de uma aplicação computacional voltada à realização de simulações para projetos de geração de energia através de uso de aerogeradores, que não fique restrito ao âmbito acadêmico e sim, pela simplicidade, pois requer o mínimo de interações necessárias, e a facilidade de acesso, por se tratar de uma plataforma web, permitindo que qualquer pessoa realize uma simulação sem a preocupação de acesso e instalação do aplicativo. Diante disto, os objetivos desta dissertação foram alcançados.

O aplicativo mostrou-se eficaz no dimensionamento e análise econômica de sistemas eólicos de pequeno porte, permitindo de forma rápida e simples a simulação de sistemas *On-Grid* e sistemas *Off-Grid*. Além disso, este se mostrou eficaz no armazenamento e acesso das informações referentes às simulações realizadas e no comparativo entre estas, a fim de, realizar uma nova simulação. Também, foi fidedigno na realização da análise econômica, retornando de forma clara a viabilidade ou não da implantação do projeto.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, a serem realizados no contexto do melhoramento do *software*, sugere-se:

- Criar métodos para fornecer simulações com a fixação de outros equipamentos além do aerogerador, visando à customização da simulação.
- Possibilitar para uma mesma simulação fixar mais de um aerogerador e criar um comparativo entre este.
- Adaptar o software para rodar em *smartphones*.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAD, G.; JESUS, L.; RODRIGUES, M.; MARROYO, L.; IWANSKI, G. **Doubly fed induction machine: modeling and control for wind energy generation**. New Jersey: Wiley-IEEE Press, 2011, 640 p.

ALBANO, J. M. M. **Estudo comparativo entre sistema de produção clássico e sistema com energias alternativas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores), Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2009, 112 p.

ACKERMANN, T. **Wind power in power systems**. 2 ed. England: Wiley, 2012, 1120 p.

Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas da Energia Elétrica do Brasil**, 3 ed. Brasília, 2008, 236 p.

Agência Nacional de Energia Elétrica. **Folder** Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/informacoes-tecnicas>>. Acesso em: 26 jun 2016.

ANDERS, U.; KORN, O. **Model selection in neural networks**. Neural Networks Journal, V. 12, n. 2, p. 309-323, 1999.

Associação Brasileira de Energia Eólica Disponível em: <<http://www.portalabeeolica.org.br/>>. Acesso em: 26 jun 2016.

BLASQUES, L. C. M. **Estudo da viabilidade técnico-econômica de sistemas híbridos para geração de eletricidade**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2005, 215 p.

BRAGA, A. de P., CARVALHO, A. P. de L. F. de, LUDERMIR, T. B., **Redes neurais artificiais - teoria e prática**, 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011, 238 p.

BONELLI, A. F. **Modelagem e simulação de unidade eólica para estudos de indicadores de qualidade de energia elétrica**. Dissertação (Mestrado em Ciências), Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Uberlândia, 2010, 84 p.

BURTON, T.; SHARPE, D.; JENKINS, N.; BOSSANYI, E. **Wind energy handbook**. Hoboken: Wiley, 2011, 780 p.

CASAROTTO, N. F.; KOPITKE, B. H. **Análise de Investimentos: matemática financeira, engenharia econômica, tomada de decisão**, estratégia empresarial. 11 ed. São Paulo: Atlas, 2010, 432 p.

CHAPMAN, S. J. **Fundamento de máquinas elétricas**. 5 ed. Porto Alegre: AMGH, 2013, 700 p.

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. CEPEL, 2014, 529 p.

DARWIN, C. **A origem das espécies por meio da seleção natural ou a preservação das raças favorecidas na luta pela vida**. São Paulo: Martin Claret, 2014, 556 p.

DAWSON, C. W.; WILBY, R. **An artificial neural network approach to rainfall runoff modelling**. Hydrological Science Journal, v. 43, n. 1, p. 47-66, 1998.

DUTRA, R. M.; TOLMASQUIM, M. T. **Estudo da viabilidade econômica para projetos eólicos com base no novo contexto do setor elétrico**. Revista Brasileira de Energia, Itajuba, v. 9, n. 1, 2002.

GALLANT, S. L. **Neural network learning and expert systems**, 3 ed. Massachusetts: The MIT Press, 1995, 382 p.

GUERRERO, G. A. V. **Análise em regime permanente de parques eólicos com máquinas SCIG e DFIG**. Dissertação (Mestrado em Engenharia elétrica). Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 2014. , 111 p.

GWEC, **Global Wind Report 2015**. Disponível em: <[http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC-Global-Wind-2015-Report\\_April-2016\\_22\\_04.pdf](http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC-Global-Wind-2015-Report_April-2016_22_04.pdf)>. Acesso em: 26 jun 2016.

HAMZAÇEBI, C. **Improving artificial neural networks performance in seasonal time series forecasting**. Information Sciences an International Journal, v. 178, n. 23, p. 4550-4559, 2008.

HAYKIN, S. **Redes neurais princípios e prática**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2000, 900p.

HEATON, J. **Introduction to neural networks with Java**. 2. ed. St. Louis: Heaton Research Inc, 2008, 477 p.

HOJI, M. **Administração Financeira e Orçamentária**. 11. ed. São Paulo: Atlas, 2014, 608 p.

JERVELL, T. **Estudo da influência das características do vento no desempenho de aerogeradores**. Dissertação (Mestrado em Engenharia mecânica), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008, 75 p.

KADAM, D. P.; KUSHARE, B. E. **Overview of different wind generator systems and their comparisons**. IJSAT, International Journal Of Engineering Science & Advanced Techonology, Nashik, v. 2, n. 4, p. 1076-1081, 2012.

LIMA, M. R. **O uso da energia eólica como fonte alternativa para solucionar problemas de energia e bombeamento de água subterrânea em locais isolados**. Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia de Especialização). Univesidade Federal de Lavras – UFLA, 2009, 45 p.

LI, H. CHEN, Z. **Overview of different wind generator systems and their comparisons**. IET, Renewable Power Generation, v. 2, n. 2, p. 123-138, 2008.

LJUNG, L.; **System identification toolbox user's guide R2016a**; Natick: The Math Works, inc., 2016, 1086 p.

LOPES, L. F. da R. **Importância da energia renovável para o meio ambiente**. Monografia (Especialização em Gestão Ambiental) – Universidade Candido Mendes, Rio de Janeiro, 2011, 63 p.

LUZIO, E. **Finanças corporativas teoria e prática**. 2 ed. Rio de Janeiro: Senac Rio, 2014. 384 p.

MARQUES, J. **Turbinas eólicas: Modelo, análise e controle do gerador de indução com dupla alimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. Santa Maria, 2004, 158 p.

MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A.; PEREIRA, E. B. **O aproveitamento da energia eólica**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 30, n. 1, 2008.

MELEK, V. C. **Estudo comparativo da viabilidade econômica entre uma usina eólica e uma usina híbrida (eólico-fotovoltaica)**. Trabalho de conclusão de curso (Especialização em Eficiência Energética), Universidade Tecnológica Federal de Paraná – UTFPR. Curitiba, 2013, 86 p.

MELO, E.; SANTOS, R.; YAMAMOTO, S. **As políticas energéticas e a regulamentação do marco legal do mercado brasileiro de energia renovável**. Disponível em: < <http://abeeolica.org.br/pdf/Artigo-Forum-Nacional-Opcao-pela-Energia-hidroeletrica-e-outras-energias-renovaveis.pdf>>. Acesso em: 20 jun 2016.

MINNS, A. W.; HALL, M. J. **Artificial neural networks as rainfall-runoff models**. Hydrological Sciences Journal, v. 41, n. 3, p. 399-417, 1996.

MOREIRA JUNIOR, F. D. **Viabilidade técnica/econômica para produção de energia eólica em grande escala, no nordeste brasileiro**. Trabalho de conclusão de curso (Monografia de Especialização). Universidade Federal de Lavras – UFLA, Minas Gerais, 2009, 53 p.

NEWNAN, D.; ESCHENBACH, T.; LAVELLE, J. **Engineering Economics Analysis**. 12 ed. Oxford: Oxford University Press, 2013, 704 p.

NGUYEN, K. Q. **Alternatives to grid extension for rural electrification: Decentralized renewable energy technologies in Vietnam**. Energy Policy, v. 35, n. 4, p. 2579-2589, 2007.

PALMA NETO, L. G., NICOLETTI, M. do C. **Introdução às redes neurais construtivas**. São Carlos: EDUFSCAR, 2005, 192 p..

PERDANA, A. **Dynamic models of wind turbines – a contribution towards the establishment of standardized models os wind turbines for power system**

**stability studies.** Tese de Doutorado (Engenharia Elétrica). Chalmers University Of Technology, Goteborg, 2008, 211p.

PINHO, J. T.; BARBOSA, C. F. O.; PEREIRA, E. J. da S.; SOUZA, H. M. S.; BLASQUES, L. C. M; GALHARDO, M. A. B.; MACÊDO, W. N. **Sistemas híbridos – Soluções energéticas para a Amazônia.** Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008, 398 p.

PINTO, M. O. **Fundamentos de energia eólica.** Rio de Janeiro: LTC, 2013, 368 p.

PRESSMAN, R. S.; **Software engineering a practitioner's approach**, 8 ed., New York: McGraw Hill, 2014, 976 p.

REN21. Renewables 2011 Global Status Report. **Renewable Energy Policy Network for the 21st Century**, 2011. Disponível em: <<http://www.ren21.net/Portals/97/documents/>

REBELATTO, D. **Projeto de Investimento.** São Paulo: Manole, 2004, 329 p.

REZENDE, S. O. **Sistemas inteligentes fundamentos e aplicações.** 3 ed., São Paulo: Manole, 2002, 550 p.

RIAD, S.; MANIA, J., BOUCHAOU, L.; NAJJAR, Y. **Rainfall-runoff model using an artificial neural network approach.** Mathematical and Computer Modelling, v. 40, n. 7, p. 839-846, 2004.

SANTOS, A. A.; RAMOS, D. S.; SANTOS, N. T. F. dos; OLIVEIRA, P. P. de. **Projeto de geração de energia eólica.** Trabalho de conclusão de curso (Monografia). Universidade Santa Cecília, Santos, 2006, 75 p.

SEDKI, A.; OUAZAR, D.; EL MAZOUZI, E. **Evolving neural network using real coded genetic algorithm for daily rainfall runoff forecasting.** Expert Systems with Applications, v. 36, n. 1, p. 4523-4527, 2009.

SHAMSELDIN, A. Y. **Application of a neural network technique to rainfall-runoff modelling.** Journal of Hydrology, v. 199, n. 3, p. 272-294, 1997.

SOHN, A. P. **Estudos de estabilidade de sistemas elétricos de potência na presença de diferentes modelos de unidades eólicas.** Dissertação (Mestrado em Ciências), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2014, 217 p.

SOMMERVILLE, I.; **Software Engineering**, 10 ed., Boston: Pearson Prentice Hall, 2016, 816 p.

THIERENS, D.; GOLDBERG, D. E.; **Convergence models of genetic algorithm selection schemes.** In PPSN III: Proceedings of the International Conference on Evolutionary Computation. The Third Conference on Parallel Problem Solving from Nature, p. 119-129, 1994.

TIBOLA, G. **Sistema Eólico de pequeno porte para geração de energia elétrica com rastreamento de máxima potência.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis, 2009, 285 p.

TOURKOLIAS, C.; MIRASGEDIS, S. **Quantification and monetization of employment benefits associated with renewable energy technologies in Greece.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 15, n. 6, p. 2876-2886, 2011.

WANG,W; CHAU, K; CHENG, C; QIU, L;. **A comparison of performance of several artificial intelligence methods for forecasting monthly discharge time series.** Journal of Hydrology, v. 374, n. 3, p. 294-306, 2009.

WILDI, T. **Electrical machines, drives and power systems – pearson new international edition.** 6 ed., Boston: Pearson Education, 2013, 926 p.

WILLIS, H. L.; SCOTT, W. G. **Distributed Power Generation Planning and Evaluation.** New York: Marcel Dekker, Inc. , 2000, 616 p.

WOBLEN WINDPOWER – ENERCON. **Apresentação da empresa.** Disponível em:<<http://www.wobben.com.br/empresa/wobben/apresentacao-da-empresa/>>. Acesso em: 20 junho 2016.

XIN, Y. **Evolving artificial neural networks.** Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers, v. 87, n. 9, p. 1423-1447, 1999.