



Maiana Brito de Matos

**Análise Energética de um Sistema Híbrido  
Eólico-Fotovoltaico com Armazenamento de  
Energia Elétrica através do Hidrogênio e Banco  
de Baterias**

70/2013

Campinas, 2013



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Maiana Brito de Matos

# **Análise Energética de um Sistema Híbrido Eólico-Fotovoltaico com Armazenamento de Energia Elétrica através do Hidrogênio e Banco de Baterias**

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Doutora em Planejamento de Sistemas Energéticos.

Orientador: Prof. Dr. Ennio Peres da Silva

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO  
FINAL DA TESE DEFENDIDA PELA ALUNA  
MAIANA BRITO DE MATOS  
E ORIENTADA PELO PROF. DR.  
ENNIO PERES DA SILVA



ASSINATURA DO ORIENTADOR

Campinas, 2013

FICHA CATALOGRÁFICA  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

M428a Matos, Maiana Brito de, 1983-  
Análise energética de um sistema híbrido eólico-fotovoltaico com armazenamento de energia elétrica através do hidrogênio e banco de baterias / Maiana Brito de Matos. – Campinas, SP : [s.n.], 2013.

Orientador: Ennio Peres da Silva.  
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Sistemas híbridos. 2. Hidrogênio. 3. Energia eólica. 4. Sistema de energia fotovoltaica. 5. Energia - Armazenamento. I. Silva, Ennio Peres da, 1956-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Energy analysis of a wind-photovoltaic hybrid system with electric energy storage by hydrogen and battery bank

**Palavras-chave em inglês:**

Hybrid systems

Hydrogen

Wind energy

Photovoltaic power system

Energy - Storage

**Área de concentração:** Planejamento de Sistemas Energéticos

**Titulação:** Doutora em Planejamento de Sistemas Energéticos

**Banca examinadora:**

Ennio Peres da Silva [Orientador]

Carla Kazue Nakao Cavaliero

Ernesto Ruppert Filho

Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella

Daniel Gabriel Lopes

**Data de defesa:** 26-07-2013

**Programa de Pós-Graduação:** Planejamento de Sistemas Energéticos

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS**


**TESE DE DOUTORADO**


**Análise Energética de um Sistema Híbrido  
Eólico-Fotovoltaico com Armazenamento de  
Energia Elétrica através do Hidrogênio e Banco  
de Baterias**

Autora: Maiana Brito de Matos

Orientador: Prof. Dr. Ennio Peres da Silva


A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Tese:

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Ennio Peres da Silva, Presidente**  
**Instituto de Física “Gleb Wataghin” -UNICAMP**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dra. Carla Kazue Nakao Cavaliero**  
**Faculdade de Engenharia Mecânica- UNICAMP**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Ernesto Ruppert Filho**  
**Faculdade de Engenharia Elétrica- UNICAMP**

  
\_\_\_\_\_  
**Profa. Dra. Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella**  
**Faculdade de Engenharia de Energia- UFERSA**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Daniel Gabriel Lopes**  
**Hytron- Campinas**

Campinas, 26 de julho de 2013

## **Dedicatória**

Dedico este trabalho aos meus pais, Sandra e Eduardo, a minha querida irmã Amana, ao meu marido Fernando e ao meu filho Bernardo.

## Agradecimentos

Não poderia deixar de agradecer o apoio fundamental de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

Aos meus pais, Sandra e Eduardo, e à minha irmã, Amana, pelo amor e por me incentivarem a lutar pelos meus sonhos.

Ao meu marido Fernando e ao meu filho Bernardo pelo amor e companheirismo.

Aos meus queridos amigos pelos momentos de descontração.

À minha avó, Dora, às minhas tias, aos meus primos e à minha sogra por torcerem pelo meu êxito.

Ao meu orientador, Ennio, que sempre me auxiliou nos caminhos a serem seguidos.

Ao pessoal do Laboratório de Hidrogênio.

A todos os professores e colegas da FEM, por que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho.

A CAPES pelo apoio financeiro.

Ao *Erasmus Mundus* pelo apoio financeiro do meu Doutorado Sanduíche na *Universidad Politecnica de Valencia*

Ao professor Salvador Segui Chilet da *Universidad Politecnica de Valencia* e ao escritório de Ação Internacional da *Universidad Politecnica de Valencia* pelo apoio durante meu doutorado sanduíche.

Ao professor Paulo Bastos da UFBA por ter me incentivado ainda na graduação a seguir carreira acadêmica.

Aos colegas da Faculdade SENAI CIMATEC pelo apoio na conclusão deste trabalho.

Ao GEDAE e ao Prof. Dr. João Tavares Pinho da UFPA, por propagar a experiência adquirida nos sistemas híbridos implantados pelo grupo.

Aos professores da UFCE que fizeram parte do projeto desta tese.

*“A educação é a mais poderosa  
arma que você pode usar para  
mudar o mundo”.*  
**Nelson Mandela**

## Resumo

Tradicionalmente, a geração de energia elétrica em pequenas comunidades isoladas no Brasil é feita a partir da utilização de conjuntos motores geradores, que exigem uma rotineira manutenção especializada, quase nunca existente nas comunidades; necessitam do suprimento constante de óleo Diesel, que é encarecido pelas longas distâncias que é transportado; além de emitirem gases poluentes e de efeito estufa. Em algumas localidades brasileiras e em diversas partes do mundo, já existem comunidades isoladas das redes de distribuição de eletricidade que são assistidas pela energia solar fotovoltaica e/ou eólica, fontes intermitentes de energia, com armazenamento de energia feito através de baterias. Atualmente, com o desenvolvimento da tecnologia da célula combustível, existe a possibilidade de utilizar o hidrogênio como vetor energético, em substituição às baterias. A originalidade desta tese é a análise conceitual (teórica) da geração de energia através de um sistema híbrido eólico-fotovoltaico com armazenamento por banco de baterias ou hidrogênio na cidade de Fortaleza- CE. A partir das características do sistema proposto no projeto, foi realizado um estudo de caso para um sistema de potência fotovoltaica instalada de  $5\text{kW}_P$ , potência instalada eólica de  $6\text{ kW}$  e célula a combustível de  $5\text{ kW}$ , tendo-se estimada a energia elétrica média diária disponibilizada com armazenamento por banco de baterias de  $36,4\text{ kWh}$  ( $131,0\text{ MJ}$ ) e para o sistema de hidrogênio de  $22,7\text{ kWh}$  ( $81,7\text{ MJ}$ ). Deste modo, pôde-se estimar que aproximadamente 17 famílias poderiam ser atendidas pelo sistema com armazenamento por banco de baterias e 11 famílias com armazenamento pelo sistema de hidrogênio. Por fim, também foi possível calcular que emissões de até 19 toneladas anuais de  $\text{CO}_2$  poderiam ser evitadas pela substituição dos bancos geradores pelo sistema híbrido eólico-fotovoltaico com armazenamento por banco de baterias e 12 toneladas no caso da produção de hidrogênio e sua reconversão em energia elétrica.

Palavras Chave: Sistemas Híbridos, Armazenamento de Hidrogênio, Emissões de Gás Carbônico.



## **Abstract**

Traditionally, electricity generation in small isolated communities in Brazil is made from the use of generator engine sets, which require a specialized routine maintenance, almost inexistent in communities; need constant supply of diesel which becomes more expensive by the long distances it is transported; and emit greenhouse gases. In some places in Brazil and in several parts of the world, there are communities isolated from electricity distribution networks that are assisted by solar photovoltaic and / or wind power. However, these are intermittent sources of energy which demand power storage through batteries. Nowadays, with the development of fuel cell technology, there is the possibility of using hydrogen as an energy vector, replacing the batteries. The originality of this thesis is the conceptual analysis (theoretical) of power generation through a wind-solar hybrid system with storage by battery bank or hydrogen in the city of Fortaleza. From the characteristics of the system proposed in the project, we conducted a case study for a power system composed of 5kWp of PV, 6 kW of wind power and a 5 kW fuel cell. It was estimated that the average daily electricity supplied with a storage battery bank is 36.4 kWh (131,0 MJ) and for the hydrogen system 22.7 kWh (81,7 MJ). Thus, it could be estimated that approximately 17 families could be supplied by the system for storage battery bank and 11 families with storage system for hydrogen. Finally, it was also possible to calculate emissions of up to 19 tons of CO<sub>2</sub> could be avoided by replacing the generators sets with wind-solar hybrid system and storage battery bank and by 12 tons in the case of hydrogen production and its conversion into electricity.

**Keywords:** Hybrid System, Hydrogen Storage, Carbon Dioxide Emissions.

## Lista de Ilustrações

Figura 2.1: a) Turbina de eixo horizontal b) Turbina de eixo vertical .....	9
Figura 2.2: Velocidade média trimestral do vento (m/s) a 50m de altura na cidade de Fortaleza	10
Figura 2.3: a) silício monocristalino b) silício policristalino c) silício amorfo .....	18
Figura 2.4: Os quinze maiores fabricantes de painéis fotovoltaicos .....	18
Figura 2.5: Sistema híbrido eólico- fotovoltaico na região de San Juan na Espanha.....	20
Figura 2.6: Sistema eólico-Diesel simplificado.....	23
Figura 2.7: Sistema eólico-diesel na Ilha de Tac no Chile .....	24
Figura 2.8: Sistema Eólico-Diesel para Eletrificação da Comunidade de Mota (Município de Maracanã-PA).....	24
Figura 2.9: Sistema fotovoltaico-Diesel simplificado .....	25
Figura 2.10: Sistema solar-Diesel na província chinesa de Yunnan .....	26
Figura 2.11: Sistema fotovoltaico-diesel na praia de Castelejo em Portugal .....	26
Figura 2.12: Sistema fotovoltaico-Diesel em Araras- RO.....	27
Figura 2.13: Sistema fotovoltaico-eólico-Diesel simplificado .....	27
Figura 2.14: Sistema fotovoltaico-eólico-Diesel na China.....	28
Figura 2.15: Sistema fotovoltaico-eólico-Diesel em Tamaruteau- Pará.....	28
Figura 2.16: Sistema fotovoltaico-eólico simplificado.....	29
Figura 2.17: Sistema eólico-híbrido em Castellón na Espanha .....	30
Figura 2.18: Sistema híbrido eólico-fotovoltaico na CT-GÁS ER.....	30
Figura 2.19: Sistema proposto simplificado .....	31
Figura 2.20:Informações por região geográfica referentes a 2010.....	35
Figura 2.21: Famílias atendidas pelo LPT de 2004 a 2012 por região do Estado do Ceará.....	37
Figura 3.1: Fluxograma da metodologia da tese.....	40
Figura 3.2: Velocidade média trimestral do vento (m/s) a 30m de altura na cidade de Fortaleza	44
Figura 3.3: Energia elétrica gerada pela parte fotovoltaica e eólica de um dia típico do mês de Janeiro.....	50
Figura 3.4: Energia elétrica excedente ( $E_k$ ) e a faltando no sistema ( $Fl$ ) .....	51
Figura 4.1: Energia elétrica total gerada pelo sistema híbrido .....	60
Figura 4.2: Diagrama esquemático da eficiência do sistema com armazenamento por banco de baterias.....	61
Figura 4.3: Diagrama esquemático da eficiência do sistema híbrido com armazenamento pelo sistema de hidrogênio .....	62
Figura 4.4: Comportamento do sistema híbrido com armazenamento por banco de baterias no mês de Abril .....	64
Figura 4.5: Comportamento do sistema com produção de hidrogênio eletrolítico e sua reconversão em eletricidade no mês de Abril.....	64
Figura 4.6: Comportamento do sistema híbrido com armazenamento por banco de baterias no mês de Outubro.....	65
Figura 4.7:Comportamento do sistema híbrido com produção de hidrogênio eletrolítico e sua reconversão em eletricidade no mês de Outubro.....	65

## Lista de Tabelas

Tabela 1.1: Número de pessoas sem acesso à energia elétrica por região (em milhões) .....	1
Tabela 2.1: Velocidade média mensal do vento (m/s) a 50m de altura.....	11
Tabela 2.2: Velocidades médias do vento em m/s sensor 15 da FUNCEME a 10m.....	12
Tabela 2.3: Velocidade médias do vento (m/s) da cidade de Fortaleza para 10 m .....	13
Tabela 2.4: Comprimento de rugosidade do terreno .....	14
Tabela 2.5: Irradiação diária média mensal para cidade de Fortaleza/ CE.....	16
Tabela 2.6: Médias mensais de irradiação solar para a cidade de Fortaleza .....	16
Tabela 2.7: Principais fabricantes e seus representantes de painéis fotovoltaicos no Brasil.....	19
Tabela 2.8: Alguns Sistemas Híbridos instalados pelo grupo GEDAE.....	21
Tabela 2.9: Principais fabricantes mundiais de eletrolisadores .....	32
Tabela 2.10: Principais Fabricantes de Célula a Combustível .....	33
Tabela 2.11: Disponibilidade mensal garantida nas unidades consumidores atendidas por meio MIGDI ou SIGFI .....	36
Tabela 2.12: Fatores de emissão de dióxido de carbono por combustível .....	39
Tabela 3.1: Velocidade Média Mensal do vento (m/s) a 30m de altura para cidade de Fortaleza	45
Tabela 3.2: Variação da eficiência com a voltagem de operação e consumo de energia.....	46
Tabela 3.3: Irradiação e velocidade do vento de um dia típico do mês de Janeiro na cidade de Fortaleza .....	49
Tabela 4.1: Energia elétrica média mensal produzida pelo aerogerador da Enersud na cidade de Fortaleza .....	57
Tabela 4.2: Energia elétrica média mensal gerada pelo arranjo de 20 painéis na cidade de Fortaleza .....	59
Tabela 4.3: Energia elétrica média mensal gerada pelo aerogerador e pelos painéis fotovoltaicos	60
Tabela 4.4: Energia elétrica média disponibilizada pelo sistema.....	63
Tabela 4.5: Saldo entre a energia armazenada e energia fornecida pelo banco de baterias por dia típico de cada mês na cidade de Fortaleza.....	66
Tabela 4.6: Saldo entre a energia armazenada e da energia fornecida pelo Sistema de Armazenamento de hidrogênio por dia típico de cada mês na cidade de Fortaleza.....	67
Tabela 4.7: Energia disponibilizada, excedente, armazenada, complementada, fornecida pelo sistema de armazenamento e o saldo de energia no armazenamento com banco de baterias na cidade de Fortaleza. ....	68
Tabela 4.8: Energia disponibilizada, excedente, armazenada, complementada, fornecida pelo sistema de armazenamento e o saldo de energia no armazenamento através do hidrogênio na cidade de Fortaleza. ....	69
Tabela 4.9: Hidrogênio em gramas produzido e utilizado pelo sistema mensalmente .....	70
Tabela 4.10: Emissões anuais evitadas em tCO <sub>2</sub> pela substituição do banco gerador pelo sistema com os dois tipos de armazenamento .....	71

## Lista de Abreviaturas e Siglas

### *Letras Latinas*

- $\eta_T$  – eficiência do sistema de armazenamento  
 $\eta_g$  – eficiência para armazenar energia  
 $\eta_C$  – eficiência no processo de utilização da energia armazenada

### *Abreviações*

<b>ABEEólica</b>	Associação Brasileira de Energia Eólica
<b>CA</b>	Corrente Alternada
<b>CaC</b>	Célula a Combustível
<b>CC</b>	Corrente Contínua
<b>CIGS</b>	cobre-índio-gálio-selênio
<b>EB</b>	<i>Executive Board</i>
<b>EMMG</b>	Energia Elétrica Média Mensal
<b>LER</b>	Leilão de Energia de Reserva
<b>LPT</b>	Luz para Todos
<b>UC</b>	Unidade Consumidora
<b>PCS</b>	Poder Calorífico Superior
<b>P&amp;D</b>	Pesquisa e Desenvolvimento
<b>PMDD</b>	Potência média diária disponibilizada para uso

### *Siglas*

<b>AFC</b>	<i>Alkaline Fuel Cell</i>
<b>ANEEL</b>	Agência Nacional de Energia Elétrica
<b>ARE</b>	<i>Alliance for Rural Electrification</i>
<b>AVEN</b>	<i>Agencia Valenciana de la Energia</i>
<b>AWEA</b>	<i>American Wind Energy Association</i>
<b>CBEE</b>	Centro Brasileiro de Energia Eólica
<b>CCC</b>	Conta de Consumo de Combustíveis

<b>CDE</b>	Conta de Desenvolvimento Energético
<b>CDM</b>	<i>Clean Development Mechanism</i>
<b>CdTe</b>	Telureto de cádmio
<b>CEMIG</b>	Companhia Energética de Minas Gerais
<b>CEPEL</b>	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
<b>CHESF</b>	Companhia Hidro Elétrica do São Francisco
<b>CNE</b>	<i>Comisión Nacional de Energía</i>
<b>COELBA</b>	Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia
<b>COELCE</b>	Concessionária de Energia do Estado do Ceará
<b>CRESESB</b>	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
<b>DMFC</b>	<i>Direct Metanol Fuel Cell</i>
<b>DOE</b>	<i>U.S Department of Energy</i>
<b>EMBRAPA</b>	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
<b>EPE</b>	Empresa de Pesquisa Energética
<b>FUNCEME</b>	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
<b>GEDAE</b>	Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas
<b>GEE</b>	Gases de Efeito Estufa
<b>IBGE</b>	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
<b>IDH</b>	Índice de Desenvolvimento Humano
<b>IEA</b>	<i>International Energy Agency</i>
<b>IEC</b>	<i>International Electrotechnical Commission</i>
<b>LABSOLAR</b>	Laboratório de Energia Solar
<b>LH2</b>	Laboratório de Hidrogênio
<b>MCFC</b>	<i>Molten Carbonate Fuel Cell</i>
<b>MDL</b>	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
<b>MIGDI</b>	Microssistema Isolado de Geração e Distribuição de Energia Elétrica
<b>MME</b>	Ministério de Minas e Energia
<b>NASA</b>	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
<b>NREL</b>	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
<b>OECD</b>	<i>Organisation for Economic Co-Operation and Development</i>
<b>PAFC</b>	<i>Phosphoric Acid Fuel Cell</i>
<b>PCD</b>	Plataforma de Coleta de Dados
<b>PEMFC</b>	<i>Proton Exchange Membrane Fuel Cell</i>
<b>PNER</b>	Programa Nacional de Eletrificação Rural

<b>PRODEEM</b>	Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios
<b>PROINFA</b>	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
<b>REF</b>	<i>Rural Energy Foundation</i>
<b>RGR</b>	Reserva Global de Reversão
<b>SEINFRA</b>	Secretária de Infraestrutura do Estado do Ceará
<b>SENAI</b>	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
<b>SIGFI</b>	Sistema Individual de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes
<b>SOFC</b>	<i>Solid Oxid Fuel Cell</i>
<b>SWERA</b>	<i>Solar and Wind Energy Resource Assessment</i>
<b>UFC</b>	Universidade Federal do Ceará
<b>UFPA</b>	Universidade Federal do Pará
<b>UFPE</b>	Universidade Federal de Pernambuco
<b>UFSC</b>	Universidade Federal de Santa Catarina
<b>UNEP</b>	<i>United Nations Environment Programme</i>
<b>UNFCCC</b>	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>
<b>UNICAMP</b>	Universidade Estadual de Campinas
<b>USF</b>	Usina Solar Fotovoltaica
<b>WWEA</b>	<i>World Wind Energy Association</i>

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1	Justificativa .....	1
1.2	Objetivos .....	4
1.3	Estrutura da Tese .....	4
<b>2</b>	<b>Revisão da Literatura</b> .....	<b>6</b>
2.1	Energia Eólica.....	7
2.2	Energia Solar.....	14
2.3	Sistemas Híbridos no Mundo e no Brasil .....	20
2.4	Principais Tipos de Sistemas Híbridos .....	22
2.4.1	Sistema eólico-Diesel .....	22
2.4.2	Sistema solar fotovoltaico-Diesel.....	25
2.4.3	Sistema solar fotovoltaico-eólico-Diesel.....	27
2.4.4	Sistema solar fotovoltaico-eólico .....	29
2.4.5	Sistema Alternativo .....	31
2.5	Perfil de carga do consumo.....	34
2.6	Emissões de sistema de banco de geradores .....	38
<b>3</b>	<b>Materiais e Métodos</b> .....	<b>40</b>
3.1	Dados da literatura .....	41
3.2	Análise do potencial eólico.....	43
3.3	Seleção dos equipamentos .....	45
3.4	Energia elétrica produzida pelo sistema híbrido eólico-fotovoltaico .....	47
3.5	Energia elétrica média disponibilizada pelo sistema híbrido eólico-fotovoltaico com dois tipos de armazenamento .....	49
3.6	Hidrogênio produzido e consumido pelo sistema.....	53
3.7	Quantidade de famílias atendidas e emissões de CO <sub>2</sub> evitadas pelo sistema nos dois tipos de armazenamento .....	54
<b>4</b>	<b>Resultados e Discussão</b> .....	<b>57</b>
4.1	Energia elétrica gerada pelo aerogerador por meses do ano.....	57
4.2	Energia elétrica gerada pelos painéis fotovoltaicos .....	58
4.3	Energia elétrica produzida pelo arranjo híbrido .....	59
4.4	Eficiência dos sistemas de armazenamento .....	61
4.5	Energia elétrica média disponibilizada pelo sistema híbrido eólico-fotovoltaico com dois tipos de armazenamento .....	63
4.6	Hidrogênio produzido e consumido pelo sistema.....	69
4.7	Quantidade de famílias atendidas e emissões de CO <sub>2</sub> evitadas pelo sistema nos dois tipos de armazenamento .....	71
<b>5</b>	<b>Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros</b> .....	<b>73</b>
5.1	Conclusões .....	73
5.2	Sugestões para próximos trabalhos .....	75
	<b>Referências</b> .....	<b>76</b>
	<b>Anexo A- Dados Técnicos do Aerogerador ENERSUD</b> .....	<b>87</b>
	<b>Anexo B- Dados Técnicos Paineis Fotovoltaicos Yingli</b> .....	<b>89</b>
	<b>Anexo C- Dados Técnicos Sunny Boy</b> .....	<b>91</b>

<b>Anexo D– Dados Técnicos <i>Sunny Island</i>.....</b>	<b>92</b>
<b>Anexo E– Dados Técnicos Inversor .....</b>	<b>94</b>
<b>Anexo F– Dados Técnicos Eletrolisador <i>Nitidor</i> .....</b>	<b>95</b>
<b>Anexo G- Dados de Energia Solar utilizados no <i>Homer</i> .....</b>	<b>96</b>
<b>Anexo H– Dados de Energia Eólica utilizados no <i>Homer</i> .....</b>	<b>97</b>
<b>Anexo I– Dados de Irradiação solar por dia típico de todos os meses do ano obtidos através do <i>Homer</i> .....</b>	<b>98</b>
<b>Anexo J– Dados de velocidades média do vento a 30 m de altura por dia típico de todos os meses do ano obtidos através do <i>Homer</i> .....</b>	<b>99</b>
<b>Apêndice A- Comportamento do sistema com produção de hidrogênio eletrolítico e sua reconversão em eletricidade em todos os meses do ano .....</b>	<b>100</b>
<b>Apêndice B- Comportamento do sistema com armazenamento por banco de baterias em todos os meses do ano .....</b>	<b>106</b>



# 1 Introdução

## 1.1 Justificativa

O número de pessoas sem acesso a energia elétrica no mundo ainda é significativo. De acordo com a *International Energy Agency* (IEA) em 2010 mais de 1,3 bilhões de pessoas, que correspondia a aproximadamente 20% da população mundial, ainda não tinha acesso à eletricidade. Deste número, a maior parte vivia em países em desenvolvimento conforme a Tabela 1.1 (IEA, 2012).

Tabela 1.1: Número de pessoas sem acesso à energia elétrica por região (em milhões)

	2010			2030		
	Rural	Urbana	Total	Rural	Urbana	Total
<b>Países em desenvolvimento</b>	<b>1081</b>	<b>184</b>	<b>1265</b>	<b>877</b>	<b>112</b>	<b>989</b>
África	476	114	590	572	83	655
Ásia	566	62	628	305	29	334
América Latina	23	6	29	0	0	0
Oriente Médio	16	2	18	0	0	0
<b>Países desenvolvidos</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>Mundo**</b>	<b>1083</b>	<b>184</b>	<b>1267</b>	<b>877</b>	<b>112</b>	<b>989</b>

\*\*Incluindo Países da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD) e do Leste Europeu /Euroasia

Fonte: IEA, 2012

Ainda de acordo com a Tabela 1.1 pode-se observar que a IEA (2012) estima que aproximadamente cerca de 1 bilhão de pessoas ainda estarão sem acesso à eletricidade em 2030. Na Ásia o número de pessoas sem acesso em 2030 será quase metade do valor de 2010, enquanto que a América Latina pela projeção já terá acesso universal. Entretanto, na África em 2030 a tendência é aumentar o número de pessoas sem acesso.

No Brasil, o acesso ao serviço de eletricidade também não contempla toda a população, devido principalmente a sua extensão territorial de 851 milhões de hectares, de acordo com Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), e a própria forma de ocupação do território ao longo do tempo (IBGE, 2010).

Em 1994, foi criado o Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios (PRODEEM) que tinha como finalidade permitir acesso à eletricidade pelas comunidades isoladas contemplando bombeamento de água e iluminação pública. A maioria dos sistemas do PRODEEM foi instalada em escolas rurais (ANEEL, 2012a). De acordo com Francellino (2005) a quase totalidade dos sistemas instalados no PRODEEM foi fotovoltaico, apesar de estar previsto na sua concepção original a utilização de diferentes tipos de fontes renováveis.

Em 1999, durante o mandato do presidente Fernando Henrique Cardoso, foi criado o Programa Nacional de Eletrificação Rural (PNER), também conhecido como Luz no Campo, com finalidade similar ao PRODEEM (POLITO, 2009a).

Em novembro de 2003, o Governo Federal lançou o programa Luz para Todos (LPT), ao qual foi incorporado o Luz no Campo, com o objetivo de fornecer acesso à energia elétrica a mais de 10 milhões de pessoas no meio rural até 2008. O programa foi estendido até 2014, através do Decreto nº 7.520, uma vez que se percebeu que o universo de pessoas excluídas do acesso à energia era maior do que se pensava (BRASIL, 2013). O LPT já atendeu cerca de 3,3 milhões de famílias que corresponde aproximadamente 15 milhões de pessoas. De 2011 a 2014 o LPT pretende atender a mais de 715 mil 939 famílias (MME apud PAC, 2013).

Em 2004, foi publicada pela ANEEL a Resolução Normativa nº 83/2004 que regulamenta os procedimentos e as condições de fornecimento através dos Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes (SIGFI's). Estes sistemas podem ser utilizados como alternativa para universalização dos serviços de eletricidade (ANEEL, 2004).

Em 15 de maio de 2012 foi lançada pela ANEEL a Resolução Normativa nº 488/2012 que “estabelece as condições para revisão dos planos de universalização dos serviços de distribuição de energia elétrica na área rural, considerando a instituição do Programa Luz para Todos para o período 2011 a 2014” (ANEEL, 2012b).

Em 05 de junho de 2012 foi publicada a Resolução Normativa nº 493/2012 que “estabelece os procedimentos e as condições de fornecimento por meio de Microsistema Isolado de Geração e Distribuição de Energia Elétrica (MIGDI) ou SIGFI” (ANEEL, 2012c).

As famílias excluídas encontram-se, majoritariamente, nas localidades de menor Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) e nas famílias de baixa renda. Destas, cerca de 90% possuem renda inferior a três salários-mínimos e 80% estão no meio rural (LUZ PARA TODOS, 2010).

Além disso, normalmente as residências do LPT estão em lugares de difícil acesso o que impacta no valor da tarifa de energia elétrica. Sendo assim, para minimizar estes custos, o LPT é financiado pela Conta de Desenvolvimento Energético (CDE), a Reserva Global de Reversão (RGR) e Conta de Consumo de Combustíveis (CCC), esta última com o objetivo ressarcir parte do custo total de geração de energia elétrica em Sistemas Isolados. A CCC é proveniente de cotas arrecadadas por empresas distribuidoras, permissionárias e transmissoras a partir de valores pré-determinados pela ANEEL (ELETROBRÁS, 2013).

Normalmente, a geração de energia elétrica em pequenas comunidades isoladas no país é feita a partir da utilização de óleo Diesel em motores de combustão interna, apesar de existirem algumas comunidades isoladas que são assistidas pela energia solar fotovoltaica e/ou eólica.

O aproveitamento de forma isolada em pequena escala da energia elétrica produzida por geradores eólicos e fotovoltaicos, que operam a partir de fontes intermitentes de energia, implica no uso de bancos de baterias para o armazenamento de eletricidade, de forma a se ajustar a demanda e a geração de eletricidade. Hoje em dia, com o desenvolvimento da tecnologia das células a combustível (CaC), existe a possibilidade de utilizar o hidrogênio como vetor energético. O hidrogênio é gerado através da eletrólise da água, ou seja, através da quebra das moléculas da água, nos períodos em que há disponibilidade excedente de energia elétrica (demanda menor que a produção), e reconvertido em eletricidade, utilizando CaC, nos períodos em que a demanda ultrapassa a produção, constituindo um sistema autônomo completo.

Nesse contexto, a originalidade desta tese está na análise teórica do balanço de energia do sistema híbrido com o uso do hidrogênio e sua comparação com o uso tradicional de baterias, bem como das emissões de gases de efeito estufa (GEE) evitadas pela utilização do sistema proposto na cidade de Fortaleza-CE.

Este trabalho teve origem a partir de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da ANEEL, elaborado pelo Laboratório de Hidrogênio (LH2) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) em parceria com a Universidade Federal do Ceará (UFC), aprovado pela Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF) e pela ANEEL, cuja execução está

suspensa devido aos entraves burocráticos que tem caracterizado a interação universidade/empresa no Brasil.

O projeto prevê a instalação de um sistema híbrido eólico-fotovoltaico isolado, ou seja, não conectado à rede na cidade de Fortaleza no Estado do Ceará. Além disso, no projeto está previsto a potência instalada com painéis fotovoltaicos de 5kWp, com aerogerador de 5 kW e com a célula a combustível (CaC) de 5 kW. Entretanto, nesta tese foi utilizado um aerogerador com potência nominal de 6 kW, pois não foi encontrado um equipamento nacional com a potência prevista no projeto.

## 1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é determinar a energia elétrica gerada por um sistema híbrido eólico-fotovoltaico de pequeno porte na cidade de Fortaleza-CE e comparar dois tipos de armazenamento da energia elétrica gerada pelo sistema, por meio de baterias e hidrogênio.

Os itens seguintes constituem objetivos específicos deste trabalho:

1. Analisar os dados do potencial eólico e solar da cidade de Fortaleza;
2. Determinar a eficiência<sup>1</sup> do sistema de produção do hidrogênio;
3. Estimar a quantidade mássica de hidrogênio produzido e utilizado para disponibilizar a mesma energia elétrica média diária;
4. Estimar a quantidade de famílias que o sistema com os dois tipos de armazenamento poderá atender;
5. Estimar as emissões de gás carbônico evitadas com a utilização do sistema em comparação a um conjunto motor gerador equivalente.

## 1.3 Estrutura da Tese

---

<sup>1</sup> Eficiência é a razão entre a potência de saída e a potência de entrada em percentual (IEEE, 2012). As eficiências mencionadas neste trabalho são teóricas, pois foram fornecidas pelos fabricantes.

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos, sendo que o Capítulo 1 constitui a Introdução. No Capítulo 2 é feita uma breve descrição de alguns sistemas híbridos, da irradiação solar e da velocidade do vento da cidade de Fortaleza-CE, dos principais fabricantes de painéis fotovoltaicos, aerogeradores, eletrolisadores e CaC, da eficiência de banco de baterias, do perfil de carga de consumo de famílias atendidas pelo LPT e das emissões de sistema de banco de geradores à Diesel.

No Capítulo 3 são descritos os materiais e métodos utilizados para o cálculo da energia elétrica gerada pelo sistema híbrido eólico-fotovoltaico com armazenamento a partir de banco de baterias e CaC. Além disso, descreve-se o cálculo da energia elétrica utilizada para produção de hidrogênio e aquela gerada utilizando este hidrogênio e, por fim, o cálculo da quantidade de famílias que o sistema proposto irá atender e as emissões de GEE evitadas ao se substituir um conjunto gerador tipo Diesel que produziria a mesma quantidade de eletricidade.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados da energia elétrica produzida pelo sistema híbrido eólico-fotovoltaico com os dois tipos de armazenamento, a quantidade de hidrogênio mássica produzido e utilizado para disponibilizar a média diária de energia elétrica, a quantidade de famílias atendidas e as emissões evitadas.

Finalmente, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões, considerações finais e recomendações para trabalhos futuros.

## 2 Revisão da Literatura

O presente capítulo descreve as principais características de sistemas eólico-fotovoltaico já implementados para o suprimento de energia elétrica em comunidades isoladas e que utilizam banco de baterias para armazenamento de eletricidade. Também apresenta dados solarimétricos e eólicos da cidade de Fortaleza-CE, fabricantes de aerogeradores, de painéis fotovoltaicos, de eletrolisadores e de CaC.

Vale salientar que outros trabalhos já abordaram o tema de sistemas híbridos, por exemplo, o próprio livro do Ministério de Minas e Energia (MME): “Sistemas Híbridos- Soluções Energéticas para Amazônia” (PINHO, 2008) e algumas dissertações e teses da Unicamp, como por exemplo: “Determinação dos Parâmetros de Funcionamento de um Sistema Híbrido Solar-Eólico para Geração de Hidrogênio Eletrolítico”, de Fernando Apolinário, tese que foi defendida e aguarda homologação e “Análise Comparativa de Sistemas de Armazenamento de Energia Elétrica Fotovoltaica por Meio de Baterias e Hidrogênio em Localidades Isoladas da Região da Amazônica”, dissertação de André Luís Furlan (FURLAN, 2008). No primeiro é comentada a possibilidade do uso de CaC, mas esta alternativa não é analisada em detalhe; no segundo foi realizada a análise técnica e econômica do hidrogênio produzido através das duas fontes para utilização no setor de transporte; e no terceiro foi avaliado apenas o uso da energia solar fotovoltaica.

Os sistemas denominados híbridos são aqueles formados pela combinação de mais de um tipo de fonte de energia. De acordo com Reis (2003), estes sistemas podem ser constituídos apenas por fontes renováveis ou pela combinação de fontes não-renováveis com renováveis, a depender da disponibilidade dos recursos, bem como da estrutura local.

Em muitos casos são constituídos de pelo menos uma fonte renovável de energia e por sistema Diesel-elétrico de caráter não renovável, que pode ser o componente principal, quando a fonte renovável é utilizada para economizar combustível; ou operar como *backup*, de modo a garantir a continuidade e maior confiabilidade dos sistemas híbridos (BARBOSA et al, 2004). O *backup* é muitas vezes necessário devido ao caráter intermitente das fontes alternativas, ou seja,

sua disponibilidade varia de forma significativa durante o dia, como a solar e a eólica, ou ainda sazonalmente, como ocorre no cultivo de espécies vegetais (safras e entressafras).

Geralmente, os sistemas híbridos são isolados (não conectados às redes de transmissão de energia elétrica), sendo as tecnologias de conversão de fontes renováveis de energia mais utilizadas os painéis fotovoltaicos, os geradores eólicos ou aerogeradores e as turbinas hidráulicas, enquanto as tecnologias de conversão de fontes não renováveis usuais são os conjuntos geradores a Diesel, gasolina ou a gás natural (REIS, 2003).

A escolha do melhor sistema a ser utilizado deve ser feita de forma criteriosa, de acordo com a aplicação e com aspectos como a logística de instalação; disponibilidade do combustível ou energético no local, seja ele renovável ou não; do seu armazenamento e manuseio; custos de capital, de operação e manutenção, dentre outros (BARBOSA, 2008).

A utilização de diversas fontes de geração de eletricidade amplifica a complexidade do sistema e requer a otimização do uso de cada uma das fontes e de todo o conjunto. Deste modo é necessário realizar um controle de todas as fontes para que haja máxima eficiência na entrega da energia para o usuário (FERNANDES, 2005).

Os sistemas híbridos aqui estudados são compostos por aerogerador e/ou painéis fotovoltaicos, sendo assim é importante se conhecer os dados eólicos e solarimétricos do local que o sistema será instalado, bem como os principais fabricantes de aerogeradores, painéis fotovoltaicos, eletrolisadores e CaC.

## **2.1 Energia Eólica**

Na década de 1970, a denominada Crise do Petróleo motivou muitos países, como por exemplo, Estados Unidos, Alemanha, Dinamarca e Holanda, a investirem em pesquisas na área de fontes renováveis de energia.

Em 1976, foi instalada na Dinamarca a primeira turbina eólica comercial e ligada à rede elétrica (PROINFA, 2012). De acordo com a ANEEL (2002), a primeira turbina instalada no Brasil foi em 1992 no arquipélago de Fernando de Noronha, o que proporcionou na época uma economia de aproximadamente 70.000 litros de óleo Diesel por ano.

Segundo a *American Wind Energy Association* (AWEA), em 2010 a capacidade instalada mundial de produção de energia elétrica a partir da eólica era de 196,63 GW, sendo a China responsável por cerca de 22% deste total (AWEA, 2010).

De acordo com a *World Wind Energy Association* (WWEA) em 2012, a capacidade eólica instalada em todo mundo passou a ser aproximadamente a 282 GW, sendo que 45 GW foram adicionados em 2012. A China continua a ser o maior mercado da Ásia e os Estados Unidos passou a ser o maior mercado do mundo em novas turbinas (WWEA, 2012).

Ainda em 2012, a Ásia apresentou a maior parcela de novas instalações de Parques Eólicos com 36,3%, seguida da América do Norte com cerca de 31,3%, a Europa com 27,5%, a América Latina com 3,9%, a Austrália/Oceania 0,8% e a África com 0,2% que possui um mercado bem pequeno. A América Latina e Europa Oriental continuam a ser as regiões do mundo mais dinâmicas, enquanto a África apresentou estagnação, exceto a Tunísia e Etiópia que estão instalando novos parques eólicos (WWEA, 2012).

A WWEA (2012) espera que capacidade instalada de energia eólica seja em torno de 500GW até o ano de 2016 e acredita que seja de 1.000 TW até o ano de 2020.

O crescimento da capacidade instalada no Brasil é principalmente devido ao Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), que foi criado em 2002 com o objetivo de contratar 3.300 MW divididos de modo igualitário entre as fontes de pequenas centrais hidroelétricas, biomassa e eólica; e aos leilões de energia (PROINFA, 2012).

De acordo com Elbia Melo, presidente executiva da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica) “de 2009 a 2011, nos seis leilões onde a fonte eólica participou, foram contratados 6,8 GW em novos projetos. Tais projetos elevarão o volume de instalações de energia eólica no País para mais de 8,2 GW até 2016, ou seja, 5,5 vezes maior do que a capacidade atual”(MELO, 2013).

O Leilão de Energia de Reserva (LER) de 2009, que foi específico de energia eólica, contratou 1.805 MW divididos entre os Estados da Bahia, Ceará, Rio do Grande do Norte, Rio Grande do Sul e Sergipe, a um preço médio de venda de R\$148,39/MWh (EPE, 2009). Já no LER-2011 o preço médio da energia eólica foi de R\$99,54/MWh (MEDEIROS, 2011)

De acordo com a ANEEL (2013), em junho/2013 no Brasil a capacidade instalada de energia eólica era de 2.093 MW, distribuída em 95 empreendimentos em operação. Mais 84 parques estão em construção e irão contribuir com 2.083 MW. Foram outorgados 207



empreendimentos entre 1998 e 2013 que ainda não iniciaram sua construção e que irão adicionar 5.499 MW.

No Brasil, devido principalmente aos LERs e aos leilões de fontes renováveis de energia, o mercado de aerogeradores de grande porte vem se tornando significativo. Em 2012, já existiam no país quatro fábricas de aerogeradores de grande porte: IMPSA, Wobben, Alston e Gamesa. A IMPSA está situada no Estado de Pernambuco, a Wobben em São Paulo e Alston e Gamesa na Bahia. Entretanto, o mercado de aerogeradores de pequeno porte, potência nominal de até 100 kW, no país é praticamente inexistente, uma vez que a geração de energia elétrica no Brasil é predominantemente centralizada (FADIGAS, 2011).

Atualmente, existem apenas dois fabricantes de aerogerador de pequeno porte, a Enersud (2012) situada na cidade de Maricá no Rio de Janeiro; e Satrix (2012), situada no Ceará, ao contrário de países como Estados Unidos, Inglaterra e China que possuem vários fabricantes.

De acordo com WWEA (2013) até o final de 2011 já havia 730 mil turbinas de pequeno porte instaladas no mundo. A China continua a ser o maior mercado superando inclusive os Estados Unidos e Reino Unido com mais de 500 mil turbinas instaladas. Ainda no final de 2011 a capacidade instalada de pequenas turbinas eólicas foi superior a 576 MW sendo 40% da China e 35% dos Estados Unidos.

Até o final de 2011 foram contabilizados mais de 330 fabricantes de pequenos aerogeradores no mundo, sendo o Canadá, a China, a Alemanha, Reino Unido e Estados Unidos juntos responsáveis por 50% dos fabricantes. A partir de um estudo feito com os fabricantes, conclui-se que 74% fabricam turbinas com eixo horizontal, 18% produzem do eixo vertical e 6% fabricam os dois tipos (WWEA, 2013). A Figura 2.1 apresenta dois tipos de turbinas.

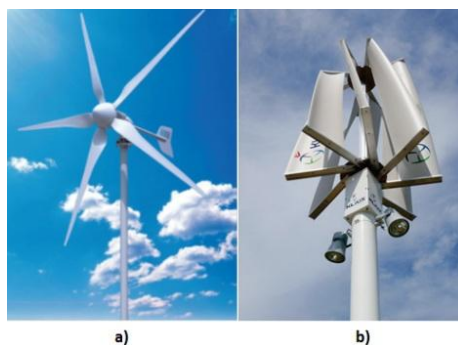


Figura 2.1: a) Turbina de eixo horizontal b) Turbina de eixo vertical

Fonte: WWEA, 2013

Na página da internet *All Small Wind Turbines* ou Todos os Pequenos Aerogeradores estão cadastradas cerca de 670 turbinas de mais de 230 fabricantes. Nesta página foram identificados cerca de 50 fabricantes de aerogeradores de 5kW, sendo que destes não havia nenhum fabricante nacional (ALL SMALL TURBINES, 2012).

A *International Electrotechnical Commission* (IEC) prepara e publica normas internacionais para padronização de procedimentos relacionados à área de elétrica e eletrônica. A norma IEC 61400-12-1 trata da geração de energia elétrica a partir de aerogeradores como também de ensaio de aerogeradores de todos os tipos e tamanhos ligados à rede. A norma IEC 61400-12-2 refere-se a aerogeradores de pequeno porte (IEC, 2012).

No Brasil, a norma IEC 61400-12-1 foi traduzida e denominada de NBR IEC 61400-12-1, intitulada de Medições do Desempenho de Potência de Aerogeradores.

De acordo com o Atlas do Potencial Eólico do Ceará, disponível no endereço eletrônico da Secretária de Infraestrutura (SEINFRA) do Estado do Ceará, a cidade de Fortaleza possui velocidades médias anuais do vento entre 5 e 5,5 m/s para uma altura de 50 metros (m) (SEINFRA, 2011). Já o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, disponível a partir da página da internet do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB, 2012a), indica uma faixa de variação de velocidade média entre 3,5 e 6,7 m/s para Fortaleza a 50 m de altura, conforme a Figura 2.2.

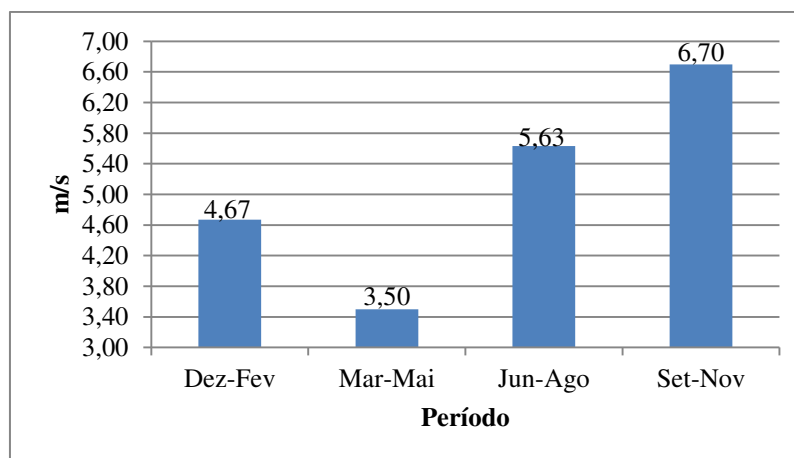


Figura 2.2: Velocidade média trimestral do vento (m/s) a 50m de altura na cidade de Fortaleza<sup>2</sup>

Fonte: Adaptada de CRESESB, 2012a

<sup>2</sup>A Figura 2.2 foi adaptada do site do CRESESB, pois no site a última coluna do gráfico estava de setembro a outubro e não de setembro a novembro.

A partir dos dados da Figura 2.2 pode-se obter a velocidade média anual a 50 m de 5,1 m/s que está dentro da faixa de velocidade média anual do vento apresentado no Atlas do Potencial Eólico do Ceará.

O banco de dados da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) também foi consultado a partir da página da internet do projeto *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (SWERA). Na Tabela 2.1 podem-se observar os valores de velocidade média mensais a 50 m de altura para Fortaleza/CE, cujo valor médio para o ano é 5,9 m/s.

Tabela 2.1: Velocidade média mensal do vento (m/s) a 50m de altura

Mês	m/s
Janeiro	4,62
Fevereiro	3,96
Março	3,25
Abril	3,64
Maió	4,66
Junho	6,48
Julho	7,13
Agosto	8,03
Setembro	8,42
Outubro	7,92
Novembro	7,36
Dezembro	5,85

Fonte: SWERA, 2012

No Atlas do Potencial Eólico Brasileiro e no banco de dados da NASA os valores médios foram obtidos a partir da localização no mapa da cidade Fortaleza.

É importante salientar que os dados obtidos nos Atlas e o banco de dados da NASA foram medidos para uma altura de 50 m, onde há menor interferência de obstáculos, enquanto que as alturas de interesse para este trabalho são de até 30m, pois trata apenas de aerogerador de pequeno porte. Na maior parte dos projetos de sistemas híbridos do grupo de pesquisa Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (GEDAE) que está situado na Universidade Federal do Pará (UFPA) as torres dos aerogeradores foram colocadas entre 24 e 30m (PINHO, 2008).

Segundo o estudo realizado por WOOD (2010) que considera fatores como os custos da torre, o tempo de retorno do investimento e o lucro efetivamente gerado, a altura ótima para torre de aerogeradores de pequeno porte é de 21 m. Entretanto, áreas com mais obstáculos, como por exemplo, zonas urbanas podem ter a altura ótima da torre maior.

A fim de fazer uma investigação mais detalhada sobre esses valores, também foram consultados os dados disponíveis na Plataforma de Coleta de Dados (PCD) da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) a uma altura de 10 m, num intervalo de 3 em 3 horas, para ano de 2006 de janeiro a maio e para o ano de 2009 de junho a setembro, para o mesmo intervalo de horas conforme apresenta a Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Velocidades médias do vento em m/s sensor 15 da FUNCEME a 10m

Mês	2006	2009
Janeiro	4,35	*nd
Fevereiro	3,26	*nd
Março	2,52	*nd
Abril	1,90	*nd
Maio	2,30	*nd
Junho	*nd	4,35
Julho	*nd	3,26
Agosto	*nd	2,52
Setembro	*nd	1,90
Outubro	*nd	2,30
Novembro	*nd	*nd
Dezembro	*nd	*nd

\*nd= não disponível

Fonte: adaptado de PCD da FUNCEME<sup>3</sup>, 2012

A partir da Tabela 2.2 podem-se observar as velocidades médias do vento em m/s da cidade de Fortaleza de acordo com o sensor 15 da PCD, que por não apresentarem uma série anual completa, não permitem o cálculo de uma média anual de velocidades. Entretanto, pode-se perceber que nenhum valor atinge as médias anteriores para 50 m, o que era de se esperar para uma altura de 10 m.

<sup>3</sup> Os dados da FUNCEME não estavam disponíveis para download da PCD da FUNCEME em 2012, de modo que os dados primários apresentados nesta tese foram disponibilizados por Francisco Daniel, doutorando da UFC, que havia obtidos estes dados anteriormente na PCD.

Em seguida foram consultados os dados de velocidade média mensal do vento em m/s da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) para o ano de 2003, numa altura de 10 m, mostrados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Velocidade médias do vento (m/s) da cidade de Fortaleza para 10 m

<b>Mês</b>	<b>Média histórica (1966-2003)</b>	<b>2003</b>
Janeiro	3,5	3,5
Fevereiro	3,4	3,7
Março	2,6	3,0
Abril	2,5	2,4
Maiο	3,1	3,1
Junho	3,3	3,4
Julho	3,7	3,4
Agosto	4,4	4,3
Setembro	4,7	4,2
Outubro	4,6	4,3
Novembro	4,5	3,7
Dezembro	4,1	3,6

Fonte: EMBRAPA, 2004

Na Tabela 2.3 pode-se observar que a média anual histórica é em torno de 3,7 m/s e que no ano de 2003 foi de 3,5 m/s, ou seja, estão abaixo das médias anuais a 50 m, como esperado.

Os dados consultados no Atlas do Potencial Eólico do Estado do Ceará, no Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, no banco de dados da NASA, na PCD da FUNCEME e na EMBRAPA, estão em alturas diferentes. Deste modo, torna-se necessário a estimativa das médias mensais para a altura adotada nesta tese, a saber, 30 m conforme item 3.2 do Capítulo 3 desta tese.

De acordo com Custódio (2009), a rugosidade do terreno é a influência da superfície e dos obstáculos de um terreno que ocasionam um retardo do vento junto ao solo. Normalmente, a rugosidade é definida de acordo com a altura e distribuição dos elementos de rugosidade, como por exemplo, vegetação e construções de um terreno. A rugosidade é comumente parametrizada em uma escala de comprimento denominada comprimento de rugosidade. A Tabela 2.4 apresenta o valor do comprimento de rugosidade para diferentes tipos de terreno.

Tabela 2.4: Comprimento de rugosidade do terreno

<b>Descrição do terreno</b>	<b>Zo (m)</b>
Terreno muito liso, gelo ou lama	0,00001
Mar aberto em condições de calmaria	0,0002
Mar agitado	0,0005
Neve	0,003
Gramado	0,008
Pasto rugoso	0,01
Campo de pouso	0,03
Plantações	0,05
Poucas árvores	0,1
Muitas árvores, poucas construções	0,25
Florestas	0,5
Subúrbios	1,5
Centro de cidade com construções altas	3,0

Fonte: MANWELL et al, 2002

## 2.2 Energia Solar

De modo indireto quase todas as fontes de energia, como por exemplo, hidráulica, biomassa, fósseis, etc, são provenientes da energia do Sol. A radiação solar pode ser aproveitada para aquecer fluídos, na arquitetura bioclimática ou para gerar energia elétrica (ANEEL, 2005).

Neste trabalho é abordada apenas a energia solar fotovoltaica, que consiste em converter diretamente a energia do Sol em energia elétrica (ANEEL, 2005).

Em 2012, a capacidade instalada no mundo de painéis fotovoltaicos atingiu o valor aproximado de 102 GW. Estas instalações poupam a cada ano cerca de 53 milhões de toneladas de gás carbônico (tCO<sub>2</sub>). A energia fotovoltaica é a terceira fonte renovável de energia mais importante no mundo em termos de capacidade instalada, ficando atrás apenas da energia hidráulica e da eólica (EPIA, 2013a).

Em 2012, a Alemanha foi o país que teve o maior aumento da capacidade instalada de energia fotovoltaica com aproximadamente 7,6 GW de sistemas recém-conectados, seguido pela

China com cerca de 5 GW, Itália com 3,4 GW, EUA com 3,3 GW e Japão, com 2 GW (EPIA, 2013a).

No Brasil, em julho de 2011 entrou em operação a primeira usina solar do Brasil e da América Latina com capacidade inicial de 1 MW chamada MPX Tauá, pois é localizada no município de Tauá no Estado do Ceará (MPX, 2013).

Em abril de 2012 foi inaugurado em Salvador o primeiro estádio solar da América Latina conhecido como Pituauçu Solar. A energia é usada nas instalações do estádio, compensando com a energia fornecida pela Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia (COELBA). Estima-se que o estádio vai gerar 630 MWh/ano e proporcionará uma economia de cerca de 120 mil reais por ano. O estádio Macaranã situado na cidade do Rio de Janeiro também deverá gerar 529 MWh por ano através de painéis fotovoltaicos (AMERICA DO SOL, 2013).

Em 17 de maio de 2013 a Usina Solar Fotovoltaica (USF) do estádio do Mineirão, situado na cidade de Belo Horizonte, entrou em operação com uma potência instalada de 1,42 MWp. Toda a energia elétrica produzida será injetada na rede de distribuição da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) (CEMIG, 2013).

No Brasil, a energia solar fotovoltaica é mais comumente utilizada nas regiões Norte e Nordeste, em comunidades isoladas da rede de energia elétrica (ANEEL, 2005). Acredita-se que futuros incentivos do governo; a chamada de número de 13/2011 da ANEEL (2011) e a Resolução Normativa nº 482/2012 da ANEEL (2012d) que “estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída através do sistema de compensação de energia elétrica”, aumentem a quantidade de sistemas fotovoltaicos no Brasil interligados à rede elétrica, entretanto, neste trabalho o sistema considerado é isolado e localizado no Estado do Ceará.

Esse Estado do país possui elevados índices de radiação solar devido, principalmente, à posição geográfica, que é próxima à Linha do Equador. Para o caso específico da cidade de Fortaleza, situada na latitude 3,717222°Sul e longitude 38,543055°Oeste segundo o Atlas Solarimétrico do Brasil (TIBA et al, 2000), os valores de irradiação solar para Fortaleza/CE estão entre 16 e 20 MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>. Já o Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA et al, 2006) apresenta o valor da irradiação média no plano inclinado para o Nordeste de 5,8 kWh.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup> ou 20,88 MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>.

A Tabela 2.5 apresenta os valores médios mensais de irradiação<sup>4</sup>, obtidos a partir da página da internet do CRESESB (2012b).

Tabela 2.5: Irradiação diária média mensal para cidade de Fortaleza/ CE

Ângulo	Inclinação	Radiação diária média mensal [kwh/m <sup>2</sup> .dia]												Média	Delta
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
Plano Horizontal	0° N	5,33	5,14	4,67	4,53	5,03	5,00	5,69	6,19	6,25	6,47	6,36	6,06	5,56	1,94
Ângulo igual a latitude	4° N	5,20	5,07	4,66	4,58	5,16	5,17	5,88	6,32	6,28	6,39	6,20	5,88	5,57	1,81
Maior média anual	3° N	5,23	5,09	4,67	4,57	5,13	5,13	5,83	6,29	6,27	6,42	6,24	5,92	5,57	1,84
Maior mínimo mensal	9° N	5,01	4,95	4,63	4,63	5,30	5,36	6,08	6,45	6,28	6,27	5,98	5,62	5,55	1,82

Fonte: CRESESB, 2012b

Também foi consultado o Atlas Solarimétrico do Ceará, documento lançado durante o evento *All About Energy* que ocorreu em julho de 2011 na cidade de Fortaleza. Os dados deste Atlas foram extraídos dos mapas mensais em W/m<sup>2</sup> e adaptados na Tabela 2.6.

Tabela 2.6: Médias mensais de irradiação solar para a cidade de Fortaleza

Mês	MJ.m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup> (faixa)		kWh.m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup> (faixa)	
Janeiro	15,56	15,99	4,32	4,44
Fevereiro	17,71	18,19	4,92	5,05
Março	16,43	16,86	4,56	4,68
Abril	17,87	18,31	4,96	5,09
Maio	18,15	18,59	5,04	5,16
Junho	17,87	18,31	4,96	5,09
Julho	18,59	19,02	5,16	5,28
Agosto	20,32	20,75	5,64	5,76
Setembro	21,44	21,89	5,96	6,08
Outubro	21,18	21,61	5,88	6,00
Novembro	20,55	20,99	5,71	5,83
Dezembro	17,29	17,72	4,80	4,92

Fonte: adaptado do Atlas Solarimétrico do Ceará (SEINFRA, 2010)

De acordo com os dados da Tabela 2.6, pode-se observar que a irradiação solar média do ano varia entre 15,56 e 21,89 MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup> ou 4,32 e 6,08 kWh.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>, dados estes que estão um pouco abaixo daqueles obtidos junto ao CRESESB.

<sup>4</sup>Irradiação é uma grandeza empregada para quantificar a radiação solar normalmente em W/m<sup>2</sup> e radiação é a transmissão de energia do sol através do espaço (VILLALVA, 2012).



O Atlas de Energia Elétrica do Brasil também foi analisado. Este apresenta o mapa da variação da radiação solar no Brasil referenciado pela EPE (*apud* ANEEL, 2008). A partir deste mapa foi observada a posição geográfica da cidade de Fortaleza e então se chegou a uma variação da irradiação solar de 18 a 20 MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup> ou 5,00 e 5,55 kWh.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>

Os dados da PCD da FUNCEME também foram consultados, mas os mesmos estavam incompletos. Os valores obtidos foram apenas para alguns meses de 2006 e outros meses para o ano de 2009 de 3 em 3 horas. Entretanto, em vários momentos do dia a irradiação incidente apresentada foi zero. Deste modo, por acreditar que o sensor 9 estava com problema, estes dados foram descartados deste estudo.

Também foram consultados alguns professores da UFC para obtenção de dados na Universidade, mas os mesmos disseram não possuir os dados de irradiação e de velocidade para cidade de Fortaleza.

Para realizar a análise da produção de energia pela parte fotovoltaica também foi necessário conhecer os tipos de células fotovoltaicas que são comumente encontradas no mercado como silício monocristalino, silício policristalino e de filme fino de silício (EPIA, 2013b).

Normalmente, as células monocristalinas possuem uma estrutura cristalina única e uma organização molecular homogênea, o que ocasiona um aspecto brilhante e uniforme as células deste tipo. Estas células são as mais eficientes com eficiência até 18%, entretanto, possuem custo de produção mais elevado do que outros tipos de células (CRESESB, 2013).

As células policristalinas são compostas por vários cristais e possui eficiência menor do que as monocristalinas entre 13% e 15% (VILLALVA, 2012). Estas também possuem um menor custo de produção, pois necessitam de menos materiais e energia, isto fez com que a tecnologia tivesse a maior parte do mercado durante um longo período (AMERICA DO SOL, 2013).

Os filmes finos podem ser de silício amorfo com eficiência entre 5% e 8%, silício microcristalino com eficiência de 8,5%, da tecnologia de telureto de cádmio (CdTe) com eficiência entre 9% e 10% e da tecnologia CIGS (cobre-índio-gálio-selênio) com eficiência entre 10% a 14%. Os dois últimos são os mais eficientes do grupo de filmes finos (VILLALVA, 2012).

A Figura 2.3 apresenta os três principais tipos de células fotovoltaicas.

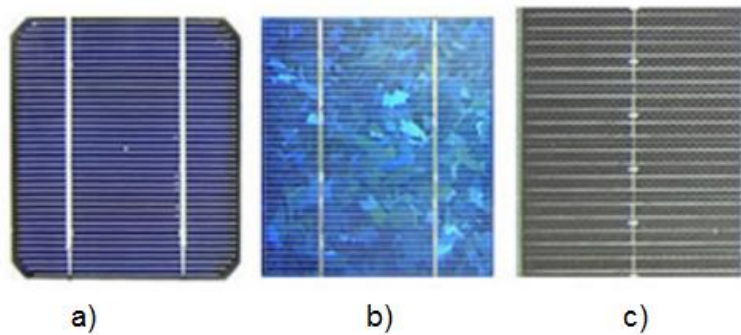


Figura 2.3: a) silício monocristalino b) silício policristalino c) silício amorfo

Fonte: CRESESB, 2013

O continente asiático possui 11 dos 15 maiores fabricantes de painéis fotovoltaicos. A China sozinha possui aproximadamente 650 fabricantes de painéis. A Figura 2.4 apresenta os quinze maiores fabricantes de painéis fotovoltaicos do Mundo em 2012 (REN21, 2013).

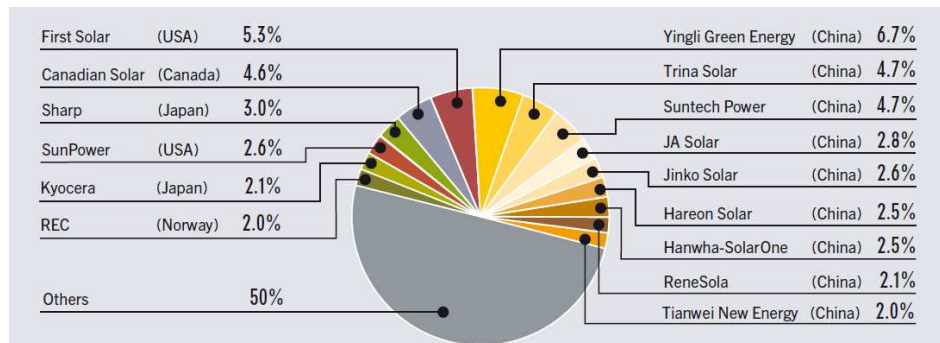


Figura 2.4: Os quinze maiores fabricantes de painéis fotovoltaicos

Fonte: REN21, 2013

A partir da Figura 2.4 pode-se observar que o fabricante *Yingli Green Energy* da China ficou em primeiro lugar, superando *First Solar* dos Estados Unidos, *Suntech* e *Trina Solar* ambos da China. *Hanwha Group* da Coreia do Sul comprou o fabricante falido *Q-Cells* da Alemanha que era um dos maiores fabricante em 2008. *First Solar* dos Estados Unidos e o fabricante japonês *Panasonic* fecharam linhas de produção e suspenderam planos para novas fábricas; *GE* dos Estados Unidos suspendeu a construção da fábrica de filme fino no Colorado e anunciou planos para retornar à P &D; *Bosch Solar* da Alemanha anunciou que iria parar de produzir células e

painéis em 2014; e *Siemens* também da Alemanha anunciou sua saída do mercado de energia solar (REN21, 2013).

Nem todos os 15 maiores fabricantes comercializam seus painéis no Brasil, como por exemplo, *REC*, *Trina Solar*, *Tianwei New Energy*, *Hanwha- SolarOne*, *Hareon Solar*, *JA Solar* e *Jinko Solar*. Strangueto (2012) realizou uma pesquisa para identificar os representantes e revendedores de painéis fotovoltaicos no país, utilizando o trabalho de Varella (2009) como ponto de partida e através de pesquisas na internet para complementação das informações. As empresas encontradas nesta pesquisa estão apresentadas na Tabela 2.7.

Tabela 2.7: Principais fabricantes e seus representantes de painéis fotovoltaicos no Brasil

Empresa	Representante/ Revendedor/ Distribuidor
Atersa	Neosolar energia
AVProject	Aerbrax Power
Canadian Solar	Gehrlicher Solar
Conergy	Bahia Solar
ENN Solar	Gehrlicher Solar
Exxa Solar	Exxa Global
First Solar	Gehrlicher Solar
Kyocera	Blue Sol, BR Eletron, Brasil Hobby, Comercial elétrica Redimax, FC Solar, Kyocera Solar do Brasil Ltda, Minha Casa Solar, Neosolar energia, R F Com, Solar Brasil Tecnologia & Energia Fotovoltaica Ltda, Solenerg
LG	Blue Sol
Mitsubishi	Energia Pura Empreendimentos Ltda, Solarterra Energias Alternativas Ltda
Sanyo	Apolo Energia
Sharp	Apolo Energia, GehrlicherSolar
Siemens Solar	Planeta Solar
SolarWord	Apolo Energia, Blue Sol, Minha Casa Solar, SS Solar
Solarfabrik	Gehrlicher Solar
Solaria	Solaria
Solaris	Neosolar energia
Sunpower	Gehrlicher Solar
Suntech Power	Blue Sol, BR Solar, Guascor
Tecnometal	Apolo Energia, Blue Sol, Tecnometal
Yingli	Apolo Energia, Blue Sol, Gehrlicher Solar, YingliSolar

Fonte: STRANGUETO, 2012

### 2.3 Sistemas Híbridos no Mundo e no Brasil

Em muitos países do mundo diversos sistemas híbridos têm sido instalados, principalmente com o objetivo de fornecer energia elétrica para comunidades isoladas, para pequenos sistemas de bombeamento e dessalinização de água, refrigeração, etc (PINHO, 2008).

De acordo com Barbosa (2006), não existe na literatura uma base de dados que registre o número de sistemas no mundo nem um consenso de quando o primeiro sistema híbrido foi instalado. Entretanto, sabe-se que os primeiros sistemas foram implementados no início da década de 1970, provavelmente em virtude da primeira Crise do Petróleo em 1973. No início da década de 1990, as questões ambientais passaram a motivar a instalação destes sistemas, além da redução de custos operacionais.

Nos Estados Unidos, o *U.S Department of Energy* (DOE), por meio do *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), é um dos principais promotores de estudos em relação a estes sistemas.

De acordo com Guerra (2000), na Espanha a maior parte dos sistemas híbridos encontra-se em áreas montanhosas com difícil acesso devido, principalmente, ao Estado de conservação das estradas ou sua ausência.

Estas comunidades ou *pueblos* normalmente não possuem baixos índices de IDH como no Brasil e outros países como, por exemplo, os da África Subsaariana. A Figura 2.5 mostra o sistema híbrido na Região de *San Juan* na Espanha.



Figura 2.5: Sistema híbrido eólico- fotovoltaico na região de San Juan na Espanha

Fonte: AVEN, 2010.

Na Europa há a *Alliance for Rural Electrification* (ARE), uma organização não governamental formada por empresas e organizações que tem como principal objetivo promover a eletrificação rural em países em desenvolvimento a partir de fontes renováveis de energia (ARE, 2011).

Além da ARE, existe também a *Rural Energy Foundation* (REF), que tem como objetivo principal promover o acesso à energia elétrica para comunidades rurais da África Subsaariana a partir da utilização de fontes renováveis de energia (REF, 2011).

De acordo com Pinho (2008), no Brasil algumas instituições têm promovido a instalação e o monitoramento de sistemas deste tipo, como o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL); o GEDAE/UFPA; o Centro Brasileiro de Energia Eólica (CBEE), situado na Universidade Federal do Pernambuco (UFPE); o Laboratório de Energia Solar (LABSOLAR) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC); a Petróleo Brasileiro S.A (PETROBRÁS), entre outros. A Tabela 2.8 mostra os principais sistemas híbridos instalados pelo GEDAE.

Tabela 2.8: Alguns Sistemas Híbridos instalados pelo grupo GEDAE

Local	Configuração/ Capacidade
Sucuriju- Amapá	Fotovoltaico (10 kWp)-Eólico (50kW)-Diesel (60 kVA)
Praia Grande- Pará	Eólico (25 kW)-Diesel (7,5 kVA)
Joanes- Pará	Fotovoltaico (10,2 kWp)- Eólico (40 kW)
Tamaruteua- Pará	Fotovoltaico (2 kW)– Eólico (20 kW)- Diesel (30 kVA)
São Tomé- Pará	Fotovoltaico (3,2 kWp)- Eólico (10 kW)- Diesel (20 kVA)
Campinas- Amazonas	Fotovoltaico (51,2 kWp)- Diesel (120 kVA)
Araras- Rondônia	Fotovoltaico (20,48 kWp)- Diesel (180 kVA)

Fonte: PINHO, 2011

Na Tabela 2.8 pode-se observar que nos sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos instalados pelo grupo GEDAE a potência instalada do aerogerador é de 4 a 10 vezes maior do que a potência instalada dos painéis fotovoltaicos.

De acordo com Pinho (2011) a sustentabilidade dos sistemas de eletrificação de áreas isoladas é “um dos maiores problemas que têm sido encontrados no Brasil e em outros países em desenvolvimento devido a fatores como a pobreza, a falta de instrução, a falta de políticas públicas ou a má utilização, etc”.

A empresa Solarterra, localizada em São Paulo, também atua na área de sistemas híbridos e instala conjuntos em diversas regiões do país como, por exemplo, o sistema híbrido do CT-GÁS ER, empresa formada a partir da parceria do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) e da empresa Petrobrás, na cidade de Natal no Estado do Rio Grande do Norte.

Além dos órgãos, instituições e empresas citados nos parágrafos anteriores, o LH2 da UNICAMP também estuda, instala e monitora sistemas híbridos de pequeno porte que utilizam o hidrogênio como vetor energético.

## **2.4 Principais Tipos de Sistemas Híbridos**

Os sistemas híbridos de pequeno porte (potências inferiores a 500 kW) abordados neste trabalho são compostos por um ou mais aerogeradores, conjuntos de painéis fotovoltaicos, um controlador de carga, banco de baterias e um inversor de tensão contínua para tensão alternada.

O controlador ou regulador de carga tem como funções principais: evitar que a bateria seja sobrecarregada; proteger a bateria contra descarga excessiva e gerenciar o carregamento da bateria de acordo com o perfil natural de carga (VILLALVA, 2012).

Nos sistemas híbridos eólico-Diesel, solar-Diesel, eólico-fotovoltaico e eólico-fotovoltaico-Diesel, em geral utilizam-se baterias eletroquímicas no armazenamento/conversão de energia elétrica, mesmo assim de forma limitada (mínima necessária), pois são sistemas caros, pesados e volumosos.

As baterias normalmente estabilizam as flutuações de corrente oriundas dos arranjos fotovoltaicos e/ou eólicos, assegurando assim uma faixa de corrente mais adequada para a operação dos componentes do sistema a serem alimentados. Além disso, o armazenamento por bateria apresenta uma eficiência de aproximadamente 85% (CEPEL-CRESESB, 2004).

### **2.4.1 Sistema eólico-Diesel**

O sistema eólico- Diesel é aquele que gera energia elétrica a partir do aproveitamento eólico e Diesel operando de modo combinado, mas não necessariamente em paralelo (simultaneamente), com o objetivo de atender a determinadas cargas.

Estes sistemas são constituídos por um ou mais aerogeradores, associados a um ou mais geradores a Diesel, em geral apresentando também um sistema de controle que gerencia o uso dos subsistemas de geração e o suprimento de cargas, além de dispositivos de potência (retificadores e inversores) que são essenciais para adequar os sinais de acordo com o uso final da energia, sendo comum ter-se também um banco de baterias (PINHO, 2008).

A Figura 2.6 mostra o arranjo de um sistema eólico-Diesel simplificado, sendo que, dependendo das potências envolvidas, o retificador e o inversor podem estar agrupados em um único controlador de carga.

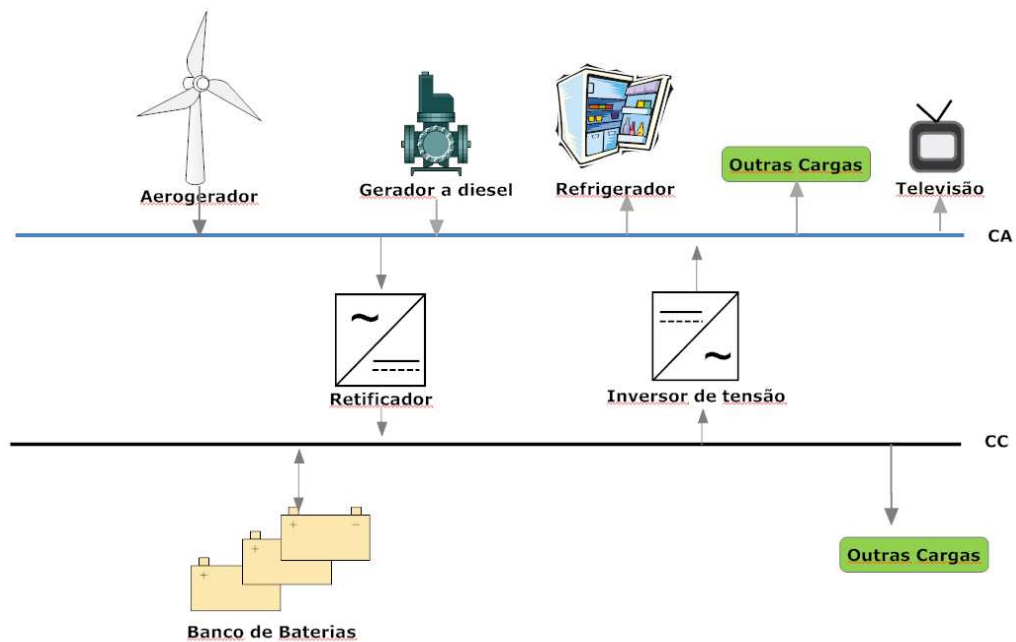


Figura 2.6: Sistema eólico-Diesel simplificado

Fonte: Desenvolvimento próprio

A Figura 2.7 mostra o sistema eólico-Diesel instalado na ilha de Tac no Chile, a partir do projeto de eletrificação rural da *Comisión Nacional de Energía* (CNE), que tinha como meta promover acesso à energia elétrica a 90% dos chilenos até 2006 (PNUD, 2005). O sistema da ilha de Tac beneficiou 79 famílias e 3 estabelecimentos comerciais.



Figura 2.7: Sistema eólico-diesel na Ilha de Tac no Chile

Fonte: PNUD, 2005

A Figura 2.8 mostra o sistema eólico-Diesel da Comunidade de Mota, que está localizada a 240 km da cidade de Belém no Estado do Pará. Este sistema é formado por um aerogerador de 10 kW, por um banco de baterias de 150 Ah cada e fornece energia elétrica a 434 pessoas (GEDAE, 2011).



Figura 2.8: Sistema Eólico-Diesel para Eletrificação da Comunidade de Mota (Município de Maracanã-PA)

Fonte: GEDAE, 2011



## 2.4.2 Sistema solar fotovoltaico-Diesel

Estes sistemas geram eletricidade a partir de um arranjo de painéis fotovoltaicos em conjunto com um ou mais conjuntos de geradores a Diesel. Geralmente, são mais econômicos que os sistemas puramente fotovoltaicos no fornecimento de energia elétrica em projetos isolados de maior escala, pois necessitam de uma menor potência instalada de painéis fotovoltaicos e baterias, reduzindo deste modo os custos totais do sistema (TEOFILO et al, 2004).

A Figura 2.9 mostra o arranjo de um sistema fotovoltaico-Diesel simplificado. Também neste caso o retificador e o inversor podem ser substituídos por um único controlador de carga.

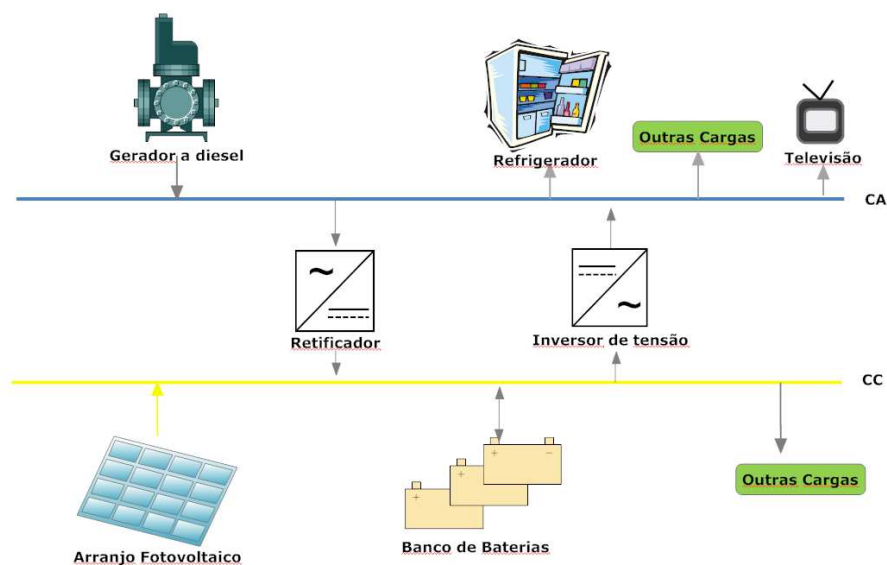


Figura 2.9: Sistema fotovoltaico-Diesel simplificado

Fonte: Desenvolvimento próprio

A partir da Figura 2.9 nota-se que o sistema fotovoltaico-Diesel se assemelha ao sistema eólico-Diesel, sendo a principal diferença a geração de energia elétrica em corrente contínua (CC) nos painéis fotovoltaicos e em corrente alternada (CA) nos aerogeradores.

Na Figura 2.10 pode-se observar um sistema deste tipo na província chinesa de *Yunnan*. Este sistema foi financiado pelo Ministério Chinês de Finanças e pelo Banco Alemão de Reconstrução e montado pela empresa *Solarworld*. Assim como *Yunnan*, muitas das províncias no oeste e no sul da China não são conectadas à rede devido, principalmente, às longas distâncias e a dificuldade ao acesso a estas regiões (ARE, 2010a).



Figura 2.10: Sistema solar-Diesel na província chinesa de Yunnan

Fonte: ARE, 2010a

Pode-se observar na Figura 2.11 um restaurante na Praia de Castelejo, em Portugal, que é alimentado por 24 m<sup>2</sup> de painéis monocristalinos posicionados em 45 graus para melhor aproveitar o sol durante todo o ano. A potência total instalada dos painéis é de 3 kW. O sistema foi implementado em 1993 e custou cerca de 30 mil euros, sendo que 40% deste valor foi financiado pela União Europeia (WILLE, 2008).



Figura 2.11: Sistema fotovoltaico-diesel na praia de Castelejo em Portugal

Fonte: WILLE, 2008-08

A Figura 2.12 mostra o sistema fotovoltaico-Diesel de Araras no Estado de Rondônia.



Figura 2.12: Sistema fotovoltaico-Diesel em Araras- RO

Fonte: RUTHER, 2011

### 2.4.3 Sistema solar fotovoltaico-eólico-Diesel

Este tipo de instalação, formada pela combinação entre energia solar, eólica e o conjunto gerador a Diesel, torna o sistema mais confiável no suprimento de energia em áreas isoladas e mais atrativo economicamente, uma vez que um maior aproveitamento dos recursos locais pode ocasionar uma economia significativa de consumo de óleo Diesel (REIS, 2003).

A Figura 2.13 mostra o arranjo de um sistema fotovoltaico-eólico-diesel simplificado.

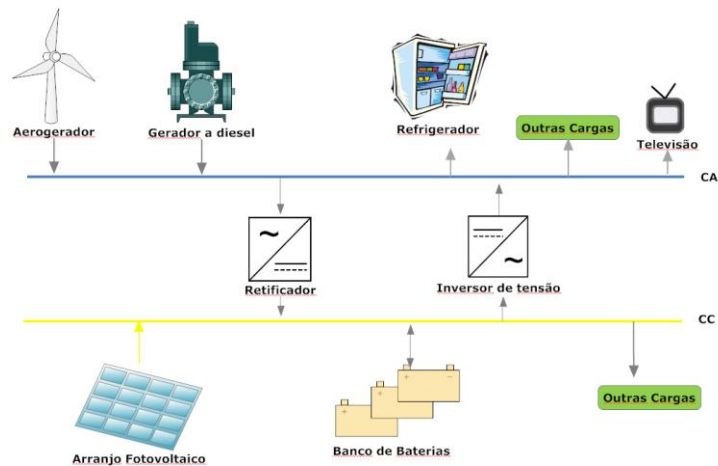


Figura 2.13: Sistema fotovoltaico-eólico-Diesel simplificado

Fonte: Desenvolvimento próprio

A Figura 2.14 apresenta um sistema híbrido fotovoltaico-eólico-Diesel na China, que foi instalado em 2002 para fornecer energia elétrica a três comunidades compostas por um total de 500 casas.



Figura 2.14: Sistema fotovoltaico-eólico-Diesel na China

Fonte: ARE, 2010b

A Figura 2.15 mostra um sistema fotovoltaico-eólico-Diesel em Tamaruteau instalado pelo grupo GEDAE no Estado do Pará.



Figura 2.15: Sistema fotovoltaico-eólico-Diesel em Tamaruteau- Pará

#### 2.4.4 Sistema solar fotovoltaico-eólico

A energia solar e a eólica geralmente se comportam conjuntamente de modo anticíclico, o que leva a um nivelamento da oferta de energia durante o dia. De acordo com a latitude, em geral as menores intensidades de vento ocorrem no verão, que é quando as condições de radiação solar são as melhores (REIS, 2003).

Uma das principais vantagens deste sistema é que não utiliza combustíveis fósseis, como por exemplo, o Diesel; contudo, devido ao caráter intermitente das fontes, torna-se necessário o uso de um sistema de armazenamento de energia maior do que nas configurações com geradores Diesel-elétricos (PINHO, 2008).

A Figura 2.16 apresenta o arranjo de um sistema fotovoltaico-eólico simplificado, onde equipamentos específicos existentes no mercado foram utilizados, como retificadores e inversores.

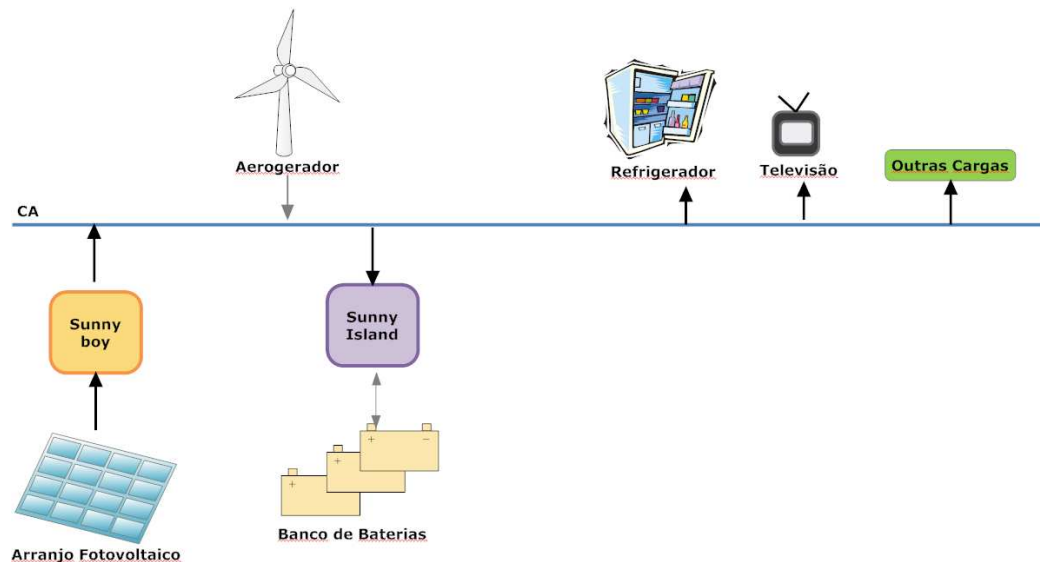


Figura 2.16: Sistema fotovoltaico-eólico simplificado

Fonte: Desenvolvimento próprio

A Figura 2.17 mostra o sistema híbrido eólico-fotovoltaico da Masías de Raco, localizada na Região de Castellón na Espanha. Este sistema possui uma aerogerador de 1,5 kW.



Figura 2.17: Sistema eólico-híbrido em Castellón na Espanha

Fonte: AVEN, 2010

A sede do CT-GÁS ER, localizada em Natal no Estado do Rio Grande do Norte, possui dois sistemas híbridos fotovoltaico-eólico. A Figura 2.18 apresenta um destes sistemas.



Figura 2.18: Sistema híbrido eólico-fotovoltaico na CT-GÁS ER

O sistema da Figura 2.18 possui um sistema de rastreamento solar da marca Lorentz, que posiciona os painéis de acordo com a radiação solar, de modo a permitir um maior aproveitamento da radiação.

## 2.4.5 Sistema Alternativo

Como visto anteriormente, o aproveitamento em pequena escala de energia elétrica produzida por geradores eólicos e fotovoltaicos é tradicionalmente feito através de bancos de baterias. O sistema alternativo proposto neste trabalho difere dos citados nos itens anteriores por utilizar o hidrogênio como meio armazenador da energia elétrica, ao invés dos bancos de baterias.

A comparação desses sistemas deve ser realizada levando-se em consideração dois aspectos fundamentais: a análise técnica, envolvendo a eficiência e as perdas em cada caso, e a análise econômica, que não é objeto deste estudo.

O sistema proposto é semelhante ao descrito na Figura 2.16, composto por um aerogerador e um arranjo fotovoltaico, responsáveis pelo fornecimento de energia elétrica às cargas e também a um subsistema de eletrólise, que fornece hidrogênio a um reservatório acoplado a uma CaC, que irá reconverter o hidrogênio armazenado em eletricidade. Como se pode ver, esse subsistema substitui o banco de baterias. A operação integrada das fontes é feita por um sistema eletrônico de controle. A Figura 2.19 mostra o arranjo do sistema proposto, de modo simplificado.

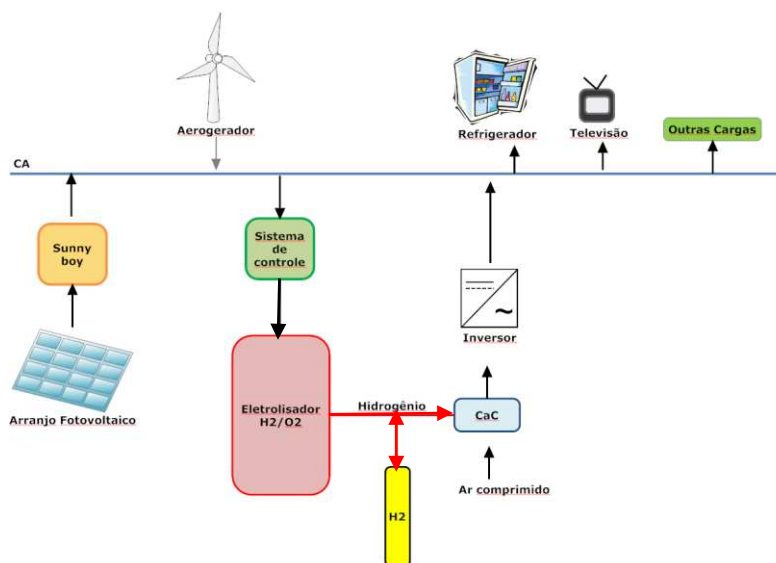


Figura 2.19: Sistema proposto simplificado

Fonte: Desenvolvimento próprio



No sistema proposto, os principais componentes tecnológicos são a CaC e o eletrolisador. Este último é um equipamento utilizado para produzir hidrogênio e oxigênio através da eletrólise da água. Este é um processo eletroquímico de dissociação da água onde a passagem de corrente entre os eletrodos, provoca “reações eletrolíticas para evolução de hidrogênio no catodo (redução) e oxigênio no anodo (oxidação)” (FURLAN, 2008).

Os principais fabricantes de eletrolisadores no mundo estão descritos na Tabela 2.9.

Tabela 2.9: Principais fabricantes mundiais de eletrolisadores

Fabricante	País	Características do Equipamento				
		Tipo	Capacidade de produção		Energia Consumida (kWh/m <sup>3</sup> )	Pureza do H <sub>2</sub> Produzido (%)
			m <sup>3</sup> /h	kg/h		
Avalence (2013)	EUA	nd*	0,34 a 150	0,03 a 13,5	5 a 5,9	nd
Proton Energy (2013)	EUA	PEM	0,27 a 30	0,03 a 2,64	6,2 a 5,8	99,9998
NEL (2013)	Noruega	Alcalino bipolar	10 a 500	0,90 a 44,90	4,1 a 4,35	99,9
Teledyne (2013)	EUA	PEM	2,8 a 56,0	0,25 a 5,03	nd	99,9998
Hydrogenics (2013)	Canadá	Alcalino bipolar e PEM	1 a 60	0,09 a 5,4	4,9 a 6,7	99,999
H2Nitidor (2013)	Itália	Alcalino bipolar	0,25 a 200	0,02 a 18,0	5,3 a 4,7	99,99
Ener Blue AS**(2013)	Suíça	Alcalino bipolar	60 a 150	5,39 a 13,47	5,0	99,999%
McPhy (2013)/ Piel (2013)	Itália / França	Alcalino bipolar	1 a 16	0,09 a 1,44	0,47 a 5	99,999
IHT (2013)	Suíça	Alcalino bipolar	1 a 760	0,09 a 68	4,3 a 4,6	99,9
ITM Power (2013)	Inglaterra	PEM	0,60 a 2,32	0,05 a 0,21	4,8 a 5,0	99,99%

\* nd= não disponível; 1 kWh= 3,6 MJ \*\* Ener Blue AS comprou a Accagen. As informações da Ener Blue AS foram obtidas através do site da Accagen

Fonte: Desenvolvimento próprio e Pinto (2013)

Em relação às CaC, as mesmas ainda estão em fase de desenvolvimento, enquanto que o eletrolisador e os demais componentes já se encontram disponíveis no mercado há bastante tempo. As principais CaC em desenvolvimento ou em utilização são: *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC), *Solid Oxid Fuel Cell* (SOFC), *Alkaline Fuel Cell* (AFC), *Molten Carbonate Fuel Cell* (MCFC), *Phosphoric Acid Fuel Cell* (PAFC), e *Direct Metanol Fuel Cell*



(DMFC). Estas CaC são classificadas pelo tipo de eletrólito e temperatura de operação (SANTOS, 2007).

Os principais fabricantes de CaC estão descritos na Tabela 2.10.

Tabela 2.10: Principais Fabricantes de Célula a Combustível

<b>Empresa</b>	<b>Localização</b>	<b>Empresa</b>	<b>Localização</b>
Versa Power Systems	Littleton, Colorado, USA	Intelligent Energy	Loughborough, Leicestershire, UK
UTC Power	South Windsor, Connecticut, USA	Infinity Fuel Cell and Hydrogen, Inc.	Windsor, Connecticut, USA
Tropical S.A.	Athens, Greece	IdaTech	Bend, Oregon, USA
Topsoe Fuel Cell A/S	Lyngby, Denmark	Horizon Fuel Cell Technologies	Singapore
SOFCpower Spa	Mezzolombardo - Trento, Italy	FutureE Fuel Cell Solutions GmbH	Nuertingen, Baden-Wuerttemberg, Germany
SFC Energy AG	Brunnthal-Nord, Germany	FuelCell Energy	Danbury, Connecticut, USA
SerEnergy A/S	Hobro, Denmark	EnerFuel	West Palm Beach, Florida, USA
ReliOn	Spokane, Washington, USA	Elcogen AS	Tallinn, Estonia
PowerCell Sweden AB	Göteborg, Sweden	Delphi Automotive Systems, LLC	Troy, Michigan, USA
Plug Power Inc.	Latham, New York, USA	DDI Energy Inc.	Airdrie, Canada
Palcan Energy Corp.	Vancouver, BC, Canada	ClearEdge Power	Hillsboro, Oregon, USA
Oorja Protonics Inc.	Fremont, California, USA	Ceramic Fuel Cells Ltd.	Noble Park, Australia
Nuvera Fuel Cells	Billerica, Massachusetts, USA	Cellkraft AB	Stockholm, Sweden
Nedstack PEM Fuel Cells	6802 ED Arnhem, Netherlands	Bloom Energy	Sunnyvale, California, United States
Microcell Corporation	Raleigh, North Carolina, USA	BIC Consumer Products	Shelton, Connecticut, USA
MES sa	Stabio, Switzerland	Ballard Power Systems	Burnaby, Canada
M-FIELD Energy LTD.	Taipei, Taiwan, Province of China	Automotive Fuel Cell Cooperation Corp.	Burnaby, BC, Canada

Fonte: FUEL CELLS 2000, 2012

De acordo com Matos (2009) as células PEMFC e SOFC respectivamente são as mais utilizadas no Brasil. A do tipo PEMFC opera com temperatura abaixo de 100°C; é formada por uma membrana sólida entre dois eletrodos de carbono e o catalisador é a platina, possui rápido tempo de partida e já é vendida comercialmente em países do primeiro mundo. Por outro lado, a SOFC opera com altas temperaturas de 800°C a 1000°C e possui alto tempo de partida (SANTOS, 2007).

No Brasil, existem dois fabricantes nacionais de CaC: a Electrocell e a Novocell, ambas localizadas no Estado de São Paulo. Entretanto, estas empresas não possuem uma linha de produção e seus equipamentos estão num estágio pré-comercial e só podem ser adquiridas por encomenda.

De acordo com os testes realizados no LH2 da Unicamp, a CaC de 5kW da *Plug Power* possui uma eficiência de 48% e necessita de 0,80 m<sup>3</sup> de hidrogênio para produzir 1 kWh de energia elétrica.

Além dessa aplicação, acredita-se que o vetor energético hidrogênio possa ser o combustível de uma nova geração de veículos, em associação com o uso das CaC, substituindo a utilização da maioria dos combustíveis de origem fóssil (gasolina, Diesel e gás natural), por ser um combustível isento de carbono e, portanto, um emissor zero de GEE, desde que ele seja obtido a partir de fontes renováveis de energia. No Brasil, seu uso deverá ser prioritariamente estacionário, como está preconizado no Roteiro para Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil, já que os veículos podem ser abastecidos com biocombustíveis, que também emitem menos GEE (MATOS, 2009).

## **2.5 Perfil de carga do consumo**

De acordo com dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), em 2010 o consumo residencial médio no Brasil foi de 154 kWh por mês. A Figura 2.20 mostra informações sobre o consumo de energia para o ano de 2010, dividido por região do país.

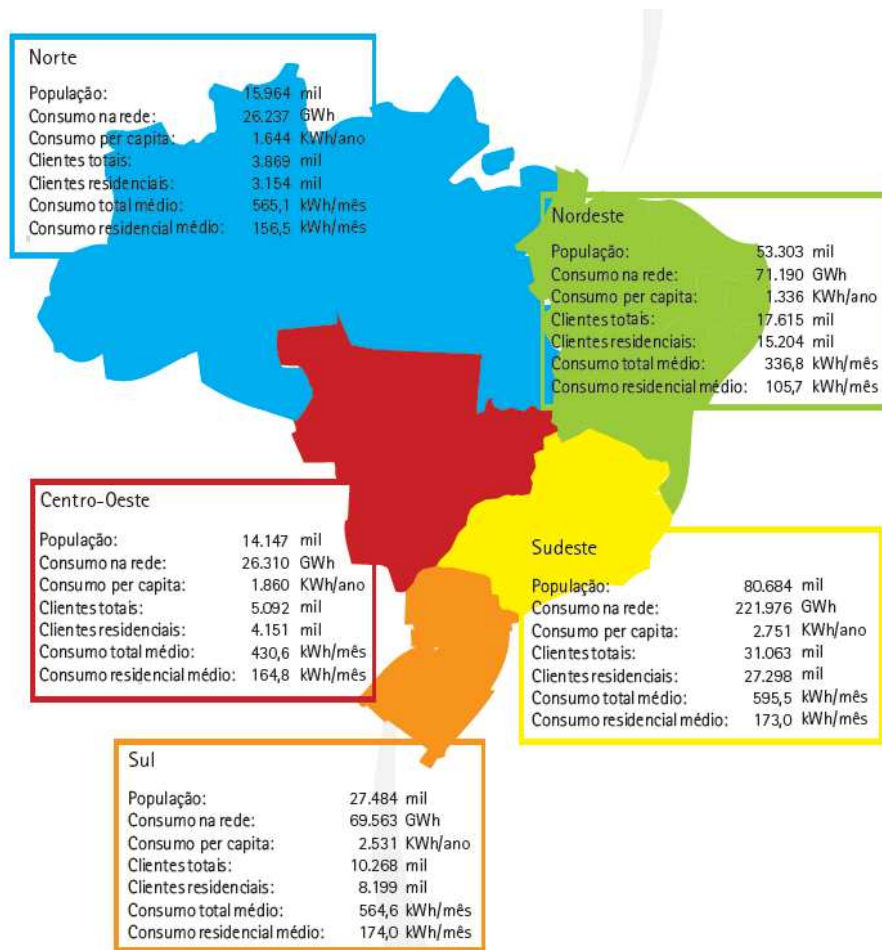


Figura 2.20: Informações por região geográfica referentes a 2010

Fonte: EPE, 2011

Conforme a Figura 2.20, pode-se observar que o consumo residencial médio do Nordeste é de 105,7 kWh por mês, o menor entre todas as regiões do país. Os valores da figura correspondem às médias nacionais e, deste modo, não representam o consumo dos beneficiados com o programa LPT, adotados neste trabalho como sendo o perfil de consumo a ser atendido pelo projeto.

De acordo com Resolução 493/2012 da ANEEL as unidades consumidoras (UC) atendidas por meio de MIGDI ou SIGFI devem ter uma disponibilidade de energia elétrica mensal garantida de 13 kWh, 20 kWh, 30 kWh, 45 kWh, 60 kWh ou 80 kWh conforme Tabela 2.11 (ANEEL, 2012c).

Tabela 2.11: Disponibilidade mensal garantida nas unidades consumidores atendidas por meio MIGDI ou SIGFI

<b>Disponibilidade mensal garantida (kWh/mês/UC)</b>	<b>Consumo de referência (Wh/dia/UC)</b>	<b>Autonomia mínima (horas)</b>	<b>Potência mínima (W/UC)</b>
13	435	48	250
20	670	48	250
30	1000	48	500
45	1500	48	700
60	2000	48	1000
80	2650	48	1250

Fonte: ANEEL, 2012c

O MME encomendou ao Zaytecbrasil Serviços de Pesquisa um estudo com os beneficiados pelo programa LPT dos 26 Estados, exceto do Distrito Federal, que apresentou os seguintes resultados: 21,2% das casas consomem até 30 kWh por mês; 33,9%, que corresponde à maioria, consomem entre 31 kWh e 80 kWh mensais; 27,5% ficam na faixa entre 81 kWh a 180 kWh mensais; 5% consomem entre 181 kWh a 220 kWh por mês; 6,2% consome acima de 220 kWh e, por fim, 6,2% dos entrevistados não responderam à pesquisa (POLITO, 2009b).

Segundo a Concessionária de Energia do Estado do Ceará (COELCE), no Ceará até 2011 foram feitas 165 mil novas ligações no programa LPT e beneficiou aproximadamente 760 mil pessoas, que equivale a 8,5% da população do Estado, sendo que a maior parte dos novos clientes do programa se enquadram na classe de baixa renda e possuem um consumo médio mensal de 60 kWh (COELCE, 2011).

De acordo com coordenador do LPT na COELCE Luis Jara, no Estado Ceará o programa atendeu de 2004 a 2012 cerca de 862,6 mil pessoas, sendo que 353 novas UC foram instaladas em 2011 e 4.256 consumidores foram atendidos em 2012. A previsão é que 2013 sejam ligados mais 6.373 clientes (JARA, 2013).

A partir da Figura 2.21 pode-se observar que 8% das famílias atendidas estavam na Região Metropolitana e que a maior parte das famílias, que corresponde a 19%, está na região Centro Sul.

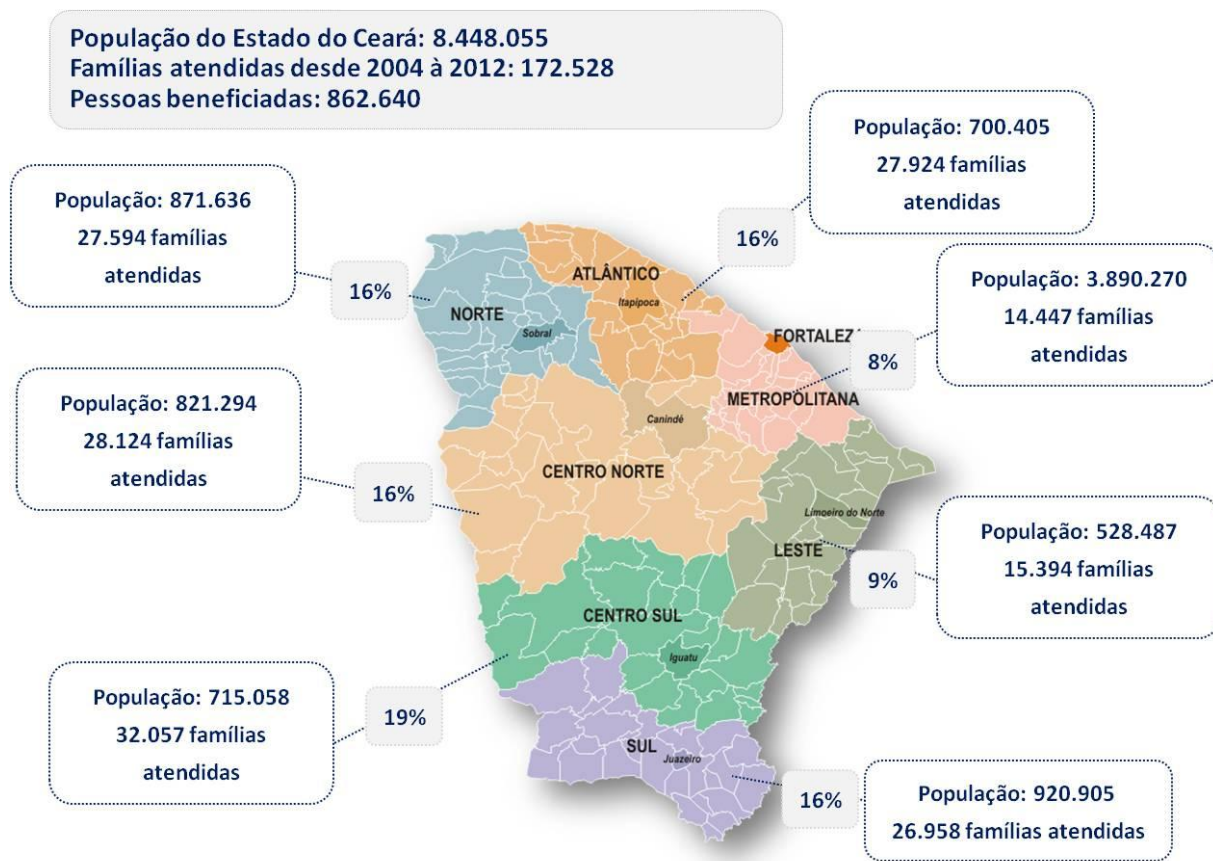


Figura 2.21: Famílias atendidas pelo LPT de 2004 a 2012 por região do Estado do Ceará

Fonte: JARA, 2013

Segundo Jara (2013) todas UC atendidas no LPT pela COELCE são interligadas à rede elétrica. Ainda não estão sendo trabalhadas pela concessionária outras formas de atendimento, como por exemplo, sistemas isolados. No entanto, a Concessionária já estrutura documentações específicas e definição dos padrões de trabalhos para atendimento com base na Resolução da ANEEL nº 488/2012 procurando novas fontes de energia, como por exemplo, energia solar.

Entre as obras já feitas no LPT da COELCE, destaca-se a comunidade da Serra do Cafundó localizada no município de Choró, a 165 km de Fortaleza, onde 34 famílias até 2011 não possuíam acesso a energia elétrica. O atendimento desta comunidade foi um desafio devido às dificuldades de acesso, já que era possível chegar a comunidade apenas por uma trilha bastante íngreme após uma caminhada de aproximadamente uma hora. Para interligar a comunidade a

rede, a COELCE dispôs de uma equipe de profissionais e a utilização de um helicóptero para transportar postes, transformadores, cruzetas e condutores (JARA, 2013).

A implementação de sistemas híbridos isolados no Ceará pode também ser viável devido à dificuldade de acesso a determinadas comunidades, como por exemplo, a comunidade da Serra do Cafundó e a aplicação da Resolução da ANEEL de nº488/ 2012.

## **2.6 Emissões de sistema de banco de geradores**

O Protocolo de Quioto tem como principal objetivo a limitação ou a redução das emissões de GEE. Este propõe três mecanismos baseados no mercado para ajudar aos países a atingirem suas metas de emissão e incentivar o setor privado e os países em desenvolvimento para contribuir para os esforços de redução de emissões que são: *Emissions Trading* (Comércio de Emissões), *Clean Development Mechanism* (CDM) ou Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e *Joint Implementation* ou Implementação Conjunta (UNFCCC, 2013).

Neste trabalho, é abordado apenas o MDL, pois é o único mecanismo que pode ser viabilizado em países em desenvolvimento. O MDL permite que projetos de redução de emissões de GEE sejam implementados em países em desenvolvimento para que os créditos de carbono sejam negociados, vendidos e utilizados pelos países industrializados para atender a uma parte de suas metas de redução de emissões no âmbito do Protocolo de Quioto (CDM, 2013).

Uma das modalidades do MDL é o programático que foi criado com a finalidade de:

Reduzir os custos de transação dos projetos, ao permitir a execução de vários projetos integrados metodologicamente num mesmo programa (que, pelas suas características, não seriam individualmente viáveis pelos custos de transação). Com as novas regras, ao agregar várias atividades de projeto (CPA's) de pequena escala, facilita a abrangência das atividades de forma que o programa apresente características de larga escala. Isso implica em redução de custos para os participantes, tornado mais atrativo economicamente (ROMEIRO, 2010, p.47).

O Anexo 53 do *Executive Board (EB) Meeting 66* trata sobre *Methodological standards for small-scale CDM project activities* ou as normas metodológicas para projetos de MDL de pequena escala (CDM, 2012a).

De acordo com Freitas *et al*, *apud* Cavaliero (2003), a cada 1 kWh gerado por um grupo gerador com rendimento de 28% é consumido aproximadamente 0,33 litros (l) de óleo Diesel. Além disso, esta quantidade de óleo ocasiona a liberação de cerca de 0,297 kg C-CO<sub>2</sub> (carbono na forma de CO<sub>2</sub>).

A Tabela 2.12 apresenta os fatores de emissão de tCO<sub>2</sub> por combustível, de acordo com dados da *United Nations Environment Programme* (UNEP) que para o óleo Diesel é 0,0002667 tCO<sub>2</sub>/kWh ou 0,2667 tCO<sub>2</sub>/MWh (UNEP, 2000).

Tabela 2.12:Fatores de emissão de dióxido de carbono por combustível

Derivados do petróleo	tCO <sub>2</sub> /litro	tCO <sub>2</sub> /kWh	tCO <sub>2</sub> /tonelada
Carvão		0,0003413	1,84
Gasolina	0,00222	0,0002496	3,07
Gás Natural		0,0002020	2,93
Óleo Diesel	0,00268	0,0002667	3,19
Óleo combustível residual	0,00300	0,0002786	3,08
GLP	0,00165	0,0002271	2,95
Querosene	0,00258	0,0002575	3,17
Xisto		0,0002218	2,61
Etano		0,0002641	2,90
Nafta	0,00224	0,0002905	3,27
Betume		0,0002641	3,21
Lubrificantes	0,00263	0,0003631	2,92
Coque de Petróleo		0,0002641	3,09
Matéria-prima de refinaria		0,0002641	3,25
Gás de refinaria		0,0002403	2,92
Outros produtos petrolíferos	0,00254	0,0002641	2,92

Fonte: UNEP, 2000

### 3 Materiais e Métodos

Neste capítulo é descrita a metodologia utilizada para a seleção de equipamentos, cálculos e análises deste trabalho. A Figura 3.1 ilustra a sequência das etapas da metodologia deste trabalho.

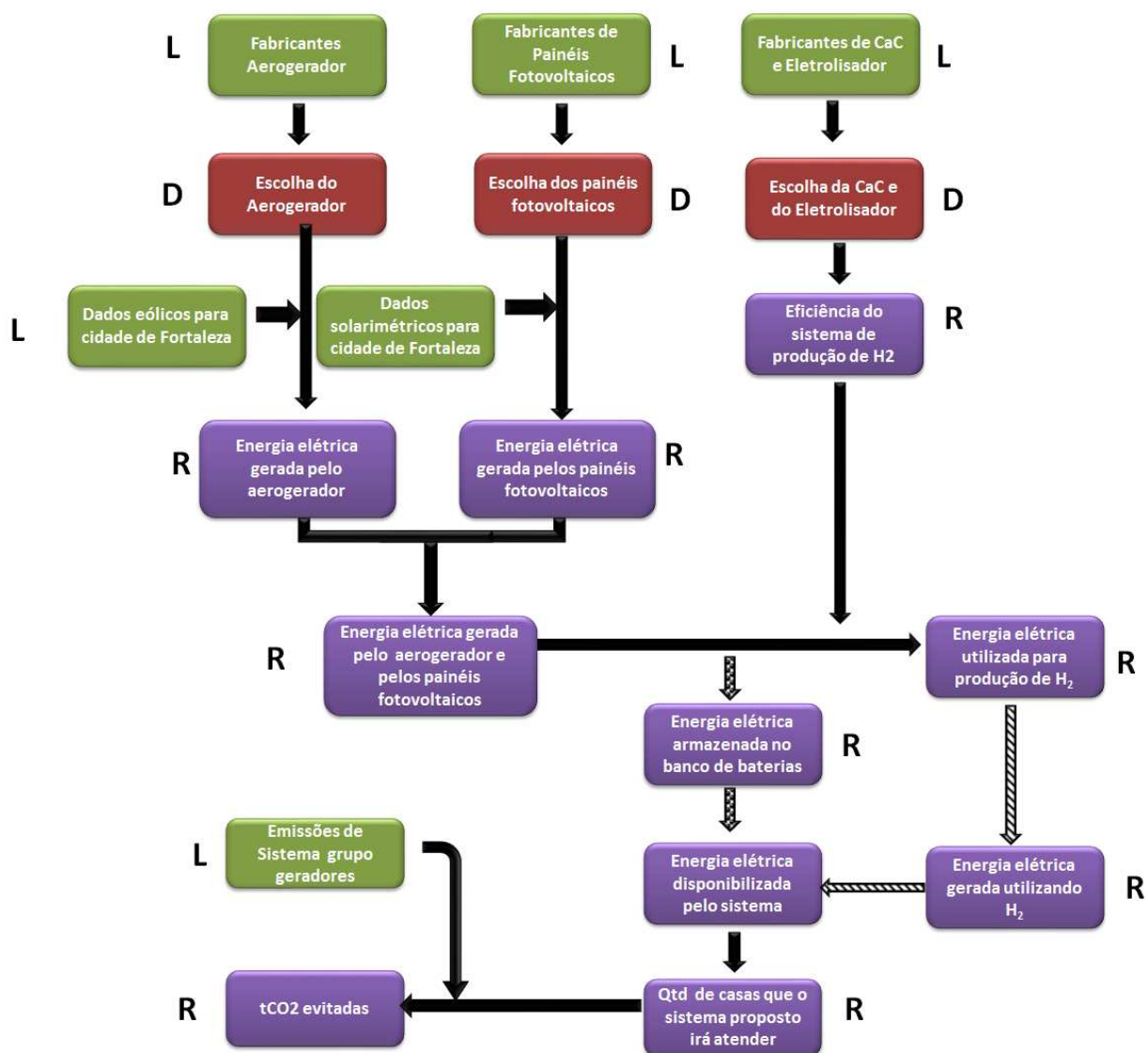


Figura 3.1: Fluxograma da metodologia da tese

L- Dados obtidos a partir de pesquisa bibliográfica, D- Escolhas realizadas e R- Resultados



Na Figura 3.1 as informações contidas nos quadrados em verde e legenda com a letra L correspondem às informações que foram obtidas a partir de pesquisas bibliográficas, ou seja, foram retiradas de uma base de dados. Estes dados possibilitaram realizar escolhas, além de serem utilizados como base para os cálculos e análises realizados neste trabalho.

As informações contidas nos quadrados em vermelho e com a letra D como legenda correspondem às escolhas realizadas ou às decisões tomadas que buscavam formular as melhores hipóteses para o projeto P&D ANEEL. Vale ressaltar que a potência instalada dos painéis fotovoltaicos e aerogerador, bem como a da CaC, já estavam predefinidas no projeto em 5kW cada. Estas escolhas, juntamente com os dados obtidos na literatura, serviram de base para os cálculos de energia elétrica disponibilizada pelos dois tipos de armazenamento, quantidade de famílias atendidas pelo sistema e emissões de CO<sub>2</sub> evitadas.

Por fim, as informações presentes nos quadrados em roxo e legenda com a letra R, se referem à sequência lógica utilizada para realizar a análise da energia elétrica gerada pelo sistema híbrido eólico-fotovoltaico com os dois tipos de armazenamento considerados.

Apresenta também como foi estimada a quantidade de famílias que este sistema pode atender e quais foram as emissões de gás carbônico evitadas ao utilizar este sistema ao invés de um grupo gerador com igual capacidade de fornecimento de eletricidade.

### **3.1 Dados da literatura**

Para obtenção dos dados de fabricantes de aerogeradores, painéis fotovoltaicos, CaC e eletrolisadores, foi realizada uma pesquisa para determinar quais eram as principais empresas que comercializam estas tecnologias no Mundo e no Brasil. A partir desta pesquisa foi possível obter os dados técnicos dos equipamentos de diferentes fabricantes.

No caso dos fabricantes de aerogeradores de pequeno porte, foi realizada uma pesquisa na WWEA e no endereço eletrônico *All Small Wind Turbines*. Por fim, também foram solicitadas informações aos fabricantes nacionais Enersud e Satrix.

Em relação aos fabricantes de painéis fotovoltaicos, foram utilizadas como fonte a tese de doutorado de Varela (2009) e a dissertação de mestrado de Strangueto (2012). A partir destes

documentos foi possível identificar os principais fabricantes de painéis do mundo e quais destes equipamentos estavam disponíveis no Brasil através de seus representantes.

Para se obter os fabricantes de CaC e eletrolisadores foram consultados os projetos desenvolvidos pelo LH2 e a dissertação de mestrado de Gambetta (2010).

Em relação aos dados relativos à energia solar, primeiro foi consultado o programa *Sundata*, através da inserção da latitude e longitude da cidade de Fortaleza na página do CRESESB (CRESESB, 2012b). Em seguida, foram consultados os Atlas Solarimétricos do Ceará (SEINFRA, 2010), Atlas Solarimétricos do Brasil (TIBA et al, 2000), Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA et al, 2006) e Atlas de Energia Elétrica do Brasil (ANEEL, 2008). Além destas fontes, também foi consultado a PCD da FUNCEME, mas estes dados não foram utilizados por apresentar radiação diária igual a zero em vários momentos próximo ao meio-dia.

A partir dos valores obtidos foi possível decidir qual ou quais fontes de dados seriam utilizadas neste estudo. Os dados solarimétricos apresentados pelos Atlas, por serem gerais e imprecisos quanto à localização exata da cidade de Fortaleza, não foram utilizados nos cálculos deste trabalho, mas foram importantes para avaliar a compatibilidade com os dados de outras fontes. Sendo assim, fez-se a opção de utilizar os dados solarimétricos do CRESESB para realizar os cálculos, pois os mesmos estavam mais detalhados que os das demais fontes consultadas e foram obtidos a partir da latitude e longitude da cidade de Fortaleza no site do CRESESB. Além disso, a fim de maximizar os resultados, foram considerados os valores de irradiação para uma inclinação igual à latitude.

Para este trabalho resolveu-se adotar o consumo residencial médio mensal de 60 kWh do Estado do Ceará, uma vez que, conforme previsto no projeto de P&D ANEEL, o sistema deverá ser instalado neste Estado (COELCE, 2011).

O fator de emissão de CO<sub>2</sub> por kWh gerado por um grupo gerador também foi obtido da literatura (UNEP, 2000) e pela metodologia do CDM para projetos de pequena escala (CDM, 2012a).

Em seguida, foram obtidos dados necessários à estimativa da geração de eletricidade a partir da energia eólica da cidade de Fortaleza. Primeiramente foram consultadas as velocidades médias do vento a 50 m de altura apresentadas no Atlas do Potencial Eólico do Ceará, disponível a partir da página da internet da SEINFRA (SEINFRA, 2011), no Atlas Eólico Brasileiro disponibilizado pelo CRESESB (CRESESB, 2012a) e no banco de dados da NASA (SWERA,

2012). Os dados de velocidade média do vento na altura de 10 m foram obtidos através da EMBRAPA (EMBRAPA, 2004) e da PCD da FUNCEME, através do aluno de doutorado da Universidade Federal do Ceará (UFC), Francisco Daniel, pois os dados não estavam mais disponíveis a partir de *download* na página da FUNCEME (FUNCEME, 2012).

Além disso, foram consultados professores e pesquisadores da UFC para obtenção de dados coletados pela Universidade, entretanto os professores que foram contatados disseram não possuir esta informação. A FUNCEME também foi contatada, mas a instituição não enviou resposta.

Por fim, para decidir quais dados seriam utilizados nesta tese foi necessário colocar as velocidades médias numa mesma base, ou seja, numa mesma altura.

Conforme já mencionado no Capítulo 2, de acordo com Pinho (2008) as torres dos aerogeradores de grande parte dos sistemas híbridos instalados pelo grupo de pesquisa GEDAE/UFPA foram colocadas entre 24 e 30m de altura. Por outro lado, segundo Wood (2010) a altura ótima é de 21 metros. Neste trabalho, com objetivo de maximizar os resultados da energia elétrica produzida pelo aerogerador resolveu-se adotar a torre do aerogerador com 30 m de altura.

### 3.2 Análise do potencial eólico

Para melhor analisar os dados primários apresentados no Capítulo 2, todas as velocidades médias das diferentes bases de dados foram extrapoladas para a altura de 30 m, através da Equação 3.1.

$$V_2 = \frac{V_1 \ln\left(\frac{h_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_1}{z_0}\right)} \quad (3.1)$$

onde  $V_1$  [m/s] é a velocidade do vento no ponto 1,  $h_2$  [m] é altura em relação ao solo do ponto 2,  $z_0$  é o comprimento da rugosidade e  $h_1$  [m] é altura em relação ao solo do ponto 1 (CUSTÓDIO, 2009).

Para este trabalho foi considerado o comprimento de rugosidade  $z_o$  de 0,1 (valor retirado da Tabela 2.4) que caracteriza terrenos com quebra-ventos afastados a mais de 1.000 metros entre si e alguns obstáculos espalhados (poucas árvores), pois ao que tudo indica o sistema será efetivamente instalado próximo ao litoral e num terreno com estas características (MANWELL et al, 2002).

Assim, as velocidades médias anuais do vento a 30m para Fortaleza do Atlas Eólico do Ceará estão entre 4,6 e 5,0 m/s, enquanto a Figura 3.2 apresenta as velocidades médias do vento a 30 m por período do ano do Atlas Eólico Brasileiro, para a mesma localidade.

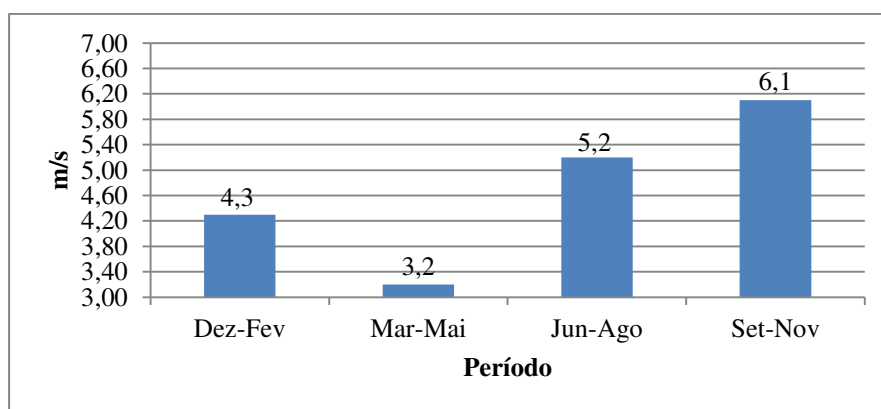


Figura 3.2: Velocidade média trimestral do vento (m/s) a 30m de altura na cidade de Fortaleza

A partir dos dados apresentados na Figura 3.2 pode-se calcular a velocidade média anual a 30 m de acordo com os valores do Atlas Eólico Brasileiro, que é de 4,7 m/s. Este valor está dentro da faixa de velocidade média anual do Atlas Eólico do Ceará para cidade Fortaleza.

A Tabela 3.1 apresenta as velocidades médias mensais do vento a 30 m de altura para cidade de Fortaleza de acordo com dados da NASA, FUNCEME e EMBRAPA.

Conforme análise dos valores apresentados na Tabela 3.1, os dados da FUNCEME foram descartados deste trabalho por estarem incompletos para diversos meses do ano e por possuir valores bem diferentes das demais fontes, principalmente para o ano de 2009.

Ainda de acordo com Tabela 3.1 os dados de velocidade média mensal do vento da NASA e EMBRAPA diferem, principalmente, de Agosto a Novembro. Analisando-se as médias anuais optou-se pela escolha dos dados da EMBRAPA para dar continuidade aos cálculos deste trabalho, pois apresentam um valor da velocidade média anual de 4,6 m/s, que está de acordo com a faixa de velocidade obtida a partir do Atlas de Eólico do Ceará, enquanto o valor médio

anual da NASA está fora desta faixa. Os dados do Atlas, por não serem tão precisos, foram utilizados com a finalidade de averiguar a coerência dos valores das demais fontes.

Tabela 3.1: Velocidade Média Mensal do vento (m/s) a 30m de altura para cidade de Fortaleza

	NASA	FUNCEME		EMBRAPA Média Histórica
		2006	2009	
Janeiro	4,2	5,4	nd	4,3
Fevereiro	3,6	4,0	nd	4,2
Março	3,0	3,1	nd	3,2
Abril	3,3	2,4	nd	3,1
Maiio	4,3	2,8	nd	3,8
Junho	5,9	*nd	0,1	4,1
Julho	6,5	nd	0,4	4,6
Agosto	7,4	nd	3,2	5,4
Setembro	7,7	nd	3,3	5,8
Outubro	7,3	nd	nd	5,7
Novembro	6,8	nd	nd	5,6
Dezembro	5,4	nd	nd	5,1
Média anual	5,5			4,6

\*nd não disponível

### 3.3 Seleção dos equipamentos

Nesta tese foi adotado o aerogerador da empresa Enersud (GRW555, Anexo A) para realizar os cálculos da energia elétrica gerada pelo vento. Esta escolha deveu-se ao fato de estar indicado no projeto da P&D ANEEL preferencialmente um equipamento nacional. Apesar de nacional, o aerogerador da empresa Satrix não foi utilizado neste trabalho, pois o fabricante informou que seu equipamento estava em fase de testes e, por este motivo, não havia como informar as especificações técnicas nem orçamento da sua turbina de 6 kW.

Para os cálculos da energia gerada pelos painéis fotovoltaicos do sistema híbrido proposto nesta tese foi adotado o painel fotovoltaico *Yingli* de 260Wp (Anexo B) de eficiência de 15,9%, o mesmo do trabalho de Strangueto (2012), pelo fato de possuir maior eficiência do que os outros

modelos, como por exemplo, da *Suntech* de 245Wp (eficiência de 14,8%) e *SolarWorld* de 85 Wp (eficiência de 12,5%), que também são comercializados no Brasil.

Ainda de acordo com os critérios de Strangueto (2012), o painel de 230 Wp da Tecnometal, atualmente única empresa nacional fabricante de painéis, não foi escolhido para realização dos cálculos, pois, além de uma potência nominal inferior ao da Yingli, é encontrado a preços superiores.

Já o eletrolisador, foi utilizado da *Nitidor* (Anexo F) por ser o único que possui representação no Brasil. Segundo a Nitidor (2012), o eletrolisador escolhido necessita de 5,3 kW para produzir 1 Nm<sup>3</sup> de hidrogênio.

A Tabela 3.2 apresenta os valores de eficiência do processo de eletrólise, de acordo com a tensão de operação e o consumo de energia.

Tabela 3.2: Variação da eficiência com a voltagem de operação e consumo de energia

<b>Eficiência (%)</b>	<b>Voltagem de Operação (V)</b>	<b>Consumo de energia (kWh/Nm<sup>3</sup>)</b>	<b>Consumo de energia* (kWh/m<sup>3</sup>)</b>
100	1,481	3,544	3,247
90	1,646	3,938	3,608
88	1,683	4,027	3,690
84	1,763	4,219	3,866
80	1,839	4,400	4,031
78	1,899	4,544	4,163
76	1,949	4,663	4,272
74	2,001	4,789	4,388
72	2,057	4,922	4,510
70	2,116	5,063	4,639
68	2,178	5,211	4,775
67	2,210	5,289	4,846
66	2,244	5,369	4,919
64	2,314	5,537	5,073
62	2,389	5,716	5,237
60	2,468	5,905	5,410
59	2,509	6,003	5,500
58	2,553	6,109	5,597

Fonte: Adaptada de SOUZA(1998)

\*1 atm e 25°C

A partir da Tabela 3.2 e do consumo de energia do eletrolisador da Nitidor, foi possível estimar a eficiência deste equipamento, que é de 67%.

Para este trabalho foi escolhida a célula de 5 kW da marca *PlugPower*, pois a mesma já é comercializada no país e não necessita de importação. Além disto, o LH2 da Unicamp já utilizou esta célula em vários dos seus projetos e obteve resultados satisfatórios.

### 3.4 Energia elétrica produzida pelo sistema híbrido eólico-fotovoltaico

Neste item é explicado como foi cálculo a energia elétrica produzida pelo sistema híbrido eólico-fotovoltaico.

A partir da velocidade média mensal do vento a 30 m de altura e da curva de potência do aerogerador (disponível no Anexo A), que foi fornecida pelo fabricante, utilizando-se a Equação 3.2 foi possível determinar a energia elétrica média mensal gerada pelo aerogerador.

$$EMMG = P(v_m). h \quad (3.2)$$

Onde  $v_m$  [m/s] é a velocidade média mensal do vento,  $P(v_m)$  é a potência [kW] produzida pelo aerogerador na velocidade média mensal do vento  $v$  e  $h$  são as horas do mês.

A energia elétrica gerada pelos painéis fotovoltaicos foi determinada pelos dados do painel fotovoltaico *Yingli* e dos valores da irradiação solar diária média mensal do CRESESB.

A partir da incidência da radiação total no local de instalação do sistema, das características técnicas do painel, como eficiência e área, pode-se determinar a potência elétrica obtida por um painel fotovoltaico pela Equação 3.3.

$$P_{\text{fot}} = \eta . A . I_t \quad (3.3)$$

onde  $\eta$  é a eficiência de conversão do painel fotovoltaico,  $A$  [m<sup>2</sup>] é a área realmente ocupada pelo material semicondutor e  $I_t$  [W.m<sup>-2</sup>] é a incidência da radiação total na região analisada (STRANGUETO, 2012).

Normalmente, não são encontrados nos manuais os valores da área realmente ocupada pelo material semiconductor ( $A$ ) e da eficiência ( $\eta$ ) dos painéis fotovoltaicos. Entretanto, o valor da área é constante para cada modelo de painel e a eficiência é determinada a partir dos valores padrão de teste. A eficiência é própria de cada modelo de painel. Para determinar o valor da multiplicação entre  $A$  e  $\eta$  foi desconsiderada a perda de eficiência que ocorre ao longo da utilização do painel. Dessa forma, a partir da Equação 3.3 e dos valores padrões de teste do painel informados no manual foi possível calcular o valor da constante  $A \cdot \eta$  através da Equação 3.4.

$$A \cdot \eta = \frac{P_{\text{fot}}}{I_T} \quad (3.4)$$

Em seguida, utilizando a Equação 3.5, pode-se obter a energia elétrica média diária fornecida por um painel. Deste modo, o valor da energia elétrica média mensal produzida pelo conjunto fotovoltaico resultou da multiplicação do resultado da Equação 3.5 pela quantidade de painéis e pelo número de dias do mês em análise.

$$E_{\text{fot}} = \eta \cdot A \cdot H_T \quad (3.5)$$

onde  $H_t$  [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ] é a quantidade de irradiação incidente na superfície de um painel fotovoltaico (STRANGUETO, 2012)

Assim, a energia elétrica produzida mensalmente pelo conjunto eólico-fotovoltaico foi obtida pela soma da energia elétrica gerada pela parte eólica mais a energia elétrica gerada pela parte solar em cada mês do ano. Evidentemente que os valores obtidos variam ao longo do tempo, sendo necessário se estabelecer qual a carga que efetivamente pode ser atendida continuamente. O valor mínimo obtido (mês de menor produção) seria uma solução, mas uma grande quantidade de energia seria desperdiçada. O uso de um sistema de armazenamento da eletricidade permite o atendimento de uma carga maior



### 3.5 Energia elétrica média disponibilizada pelo sistema híbrido eólico-fotovoltaico com dois tipos de armazenamento

Para o cálculo da energia elétrica disponibilizada para uso pelo sistema híbrido eólico-fotovoltaico com armazenamento de energia, foi necessário analisar o comportamento diário do sistema. A Tabela 3.3 mostra os valores de irradiação e velocidade do vento de um dia típico no mês de Janeiro.

Tabela 3.3: Irradiação e velocidade do vento de um dia típico do mês de Janeiro na cidade de Fortaleza

<b>Hora do dia</b>	<b>Irradiação (kW/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Velocidade (m/s)</b>
1	0,0000	3,28
2	0,0000	3,16
3	0,0000	3,11
4	0,0000	3,07
5	0,0126	3,05
6	0,1384	3,15
7	0,2514	3,49
8	0,4063	3,59
9	0,5474	4,08
10	0,6612	4,49
11	0,7200	4,56
12	0,6814	5,11
13	0,6460	5,57
14	0,5176	6,02
15	0,3691	6,02
16	0,1998	5,73
17	0,0490	5,31
18	0,0000	5,40
19	0,0000	5,26
20	0,0000	4,73
21	0,0000	4,33
22	0,0000	3,74
23	0,0000	3,55
24	0,0000	3,48

Os valores por hora da Tabela 3.3 foram obtidos a partir do programa computacional *Hybrid Optimization Model for Electric Renewables (Homer)*<sup>5</sup> do NREL.

Conforme já mencionado para analisar o sistema adotou-se um dia típico (médio) para cada mês do ano, ou seja, como se todos os dias de cada mês fossem iguais ao respectivo dia típico. Para obtenção do dia típico de cada mês do ano (Anexo I e J) utilizou-se o *Homer*. Este calcula a irradiação solar por hora de um dia médio de cada mês a partir de parâmetros como latitude, longitude, dados de irradiação média diária mensal e a taxa de não nebulosidade ou *clearness* (Anexo G). Em relação ao cálculo da velocidade do vento por hora num dia médio, são considerados parâmetros como velocidade média mensal do vento a 30 metros, altitude, altura do anemômetro, fator weikbull<sup>6</sup> e hora de pico da velocidade do vento (Anexo H).

A partir dos dados por hora, com auxílio de planilhas eletrônicas do Microsoft Excel, foi possível calcular a energia elétrica gerada pelo aerogerador e pelos painéis fotovoltaicos num dia típico de cada mês.

Em seguida, ainda com auxílio do Excel para análise do sistema com armazenamento, foram construídos os gráficos de Potência x Tempo de cada dia típico de cada mês do ano. A Figura 3.3 mostra um dia típico de mês Janeiro.

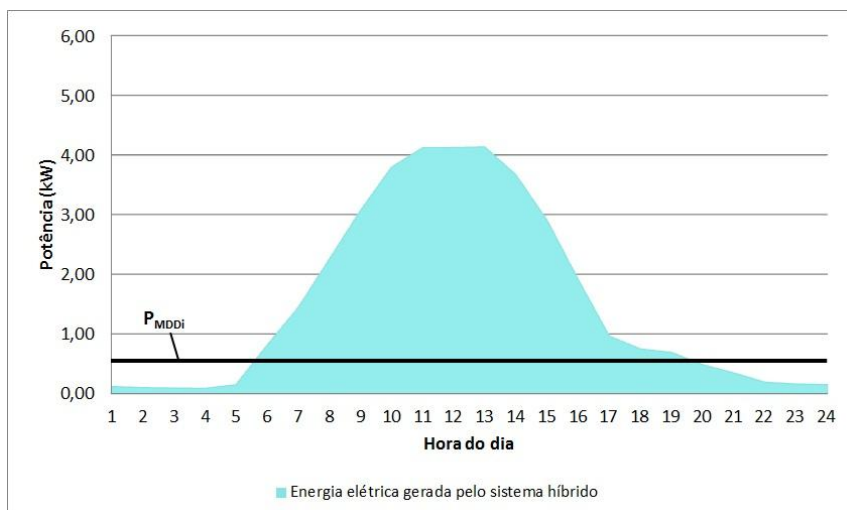


Figura 3.3: Energia elétrica gerada pela parte fotovoltaica e eólica de um dia típico do mês de Janeiro

<sup>5</sup> Homer é uma ferramenta de modelagem computacional utilizada para projetar e analisar diferentes tipos de sistemas híbridos desenvolvida pelo NREL (HOMER, 2013).

<sup>6</sup> Método probabilístico que retrata um grande número de padrões de comportamento dos ventos (FADIGAS, 2011).

Ainda de acordo com a Figura 3.3 a área abaixo da reta  $P_{MDD}$  (potência média diária disponibilizada para uso) que está em branco corresponde à energia elétrica média que deverá ser complementada pelo sistema de armazenamento, pois no período aproximado das 18 horas às 06 horas da manhã do dia seguinte os painéis fotovoltaicos e o aerogerador não geram o suficiente para atender as cargas. A área acima da reta  $P_{MDD}$  corresponde à energia elétrica gerada pelo painel fotovoltaico e pelo aerogerador que não está sendo utilizada logo esta é uma energia excedente que será armazenada.

A partir da Figura 3.4 pode-se observar que os valores das potências (eixo das ordenadas) são em valores absolutos iguais às energias produzidas no mesmo intervalo de tempo, neste caso de 1 hora, expressas em unidades de kWh.

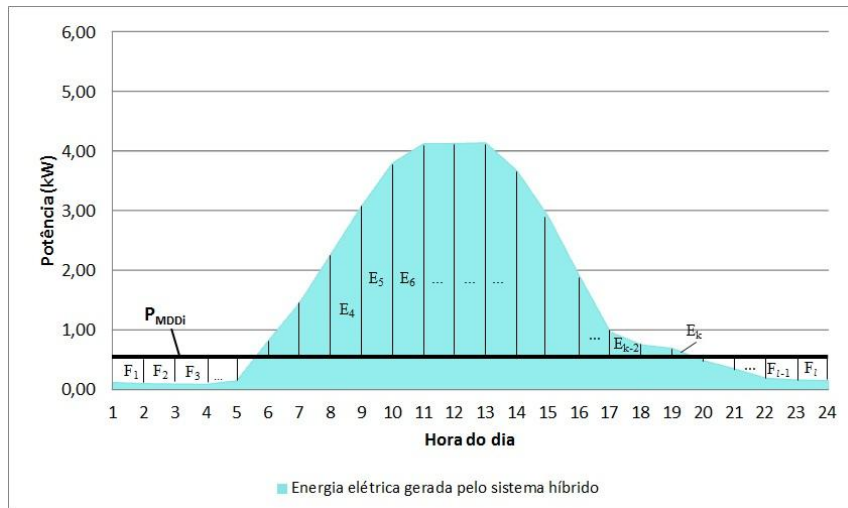


Figura 3.4: Energia elétrica excedente ( $E_k$ ) e a faltando no sistema ( $F_l$ )

O procedimento descrito a seguir é válido tanto para o sistema com armazenamento por banco de baterias quanto para o hidrogênio. Entretanto, vale ressaltar que os cálculos foram feitos em separado para cada tipo de armazenamento, pois os mesmos possuem eficiências diferentes consequentemente as potências médias diárias disponibilizadas para uso também são diferentes.

Primeiro, foi calculado um valor da  $P_{MDDi}$  para cada mês do ano de modo que a energia elétrica excedente seria armazenada num dia e seria toda utilizada neste mesmo dia, ou seja, o balanço energético diário seria igual à zero. A Equação 3.6 apresenta o cálculo da  $P_{MDDi}$ .

$$P_{MDDi} = \frac{\eta_T \cdot [E_1 + E_2 + \dots + E_k] + [F_1 + F_2 + \dots + F_l]}{(\eta_T \cdot k + l)} \quad (3.6)$$

Onde  $i$  varia de 1 a 12 e corresponde aos meses do ano,  $\eta_T$  é a eficiência global do sistema de armazenamento,  $E$  valor da energia excedente nas horas acima da reta  $P_{MDD}$ ,  $F$  valor da energia que está faltando e será complementada pelo sistema de armazenamento nas horas abaixo da reta  $P_{MDD}$ ,  $k$  é quantidade de horas do dia que o sistema está com energia excedente,  $l$  é quantidade de horas do dia que o sistema necessita utilizar a energia armazenada, sendo a soma destes dois últimos iguais a 24.

Ainda considerando que toda a energia armazenada num dia típico seria utilizada no mesmo dia que foi armazenada, foi calculada energia elétrica média anual ( $E_{MA}$ ) disponibilizada para uso pelo sistema híbrido através da Equação 3.7.

$$E_{MA} = \sum_{i=1}^{12} (P_{MDDi} \cdot 24 \cdot Di) \quad (3.7)$$

Onde  $i=1$  a 12, 24 horas do dia,  $D$  é quantidade de dias do mês

Em seguida, através da Equação 3.8 foi estabelecida a potência média diária disponibilizada para uso que deve ser igual para todos os dias do ano para que deste modo o balanço de energia elétrica não zere mais diariamente e sim anualmente.

$$P_{MDD} = \frac{E_{MA}}{(365 \cdot 24)} \quad (3.8)$$

A etapa seguinte foi refazer todos os cálculos diários para cada dia típico, agora com a  $P_{MDD}$  fixa para todos os dias do ano, para verificar se o balanço entre a energia excedente armazenada diariamente e a energia fornecida pelo sistema de armazenamento diariamente zerava anualmente.

Entretanto, notou-se que devido às aproximações nos cálculos, ao final de um ano faltava uma pequena quantidade de energia elétrica. Sendo assim, o valor de  $P_{MDD}$  foi manualmente ajustado até que fosse zerado o balanço anual entre a energia armazenada e a fornecida pelo sistema de armazenamento para uso.

Neste trabalho para realizar os cálculos não foi considerado o número de dias de autonomia, ou seja, que o sistema de armazenamento pode alimentar as cargas sem receber energia do sistema híbrido tanto por falta de luz solar como por falta de vento. Entretanto, estudos futuros poderão tratar do dimensionamento de banco de baterias e do tanque de hidrogênio.

Sendo a energia elétrica média diária disponibilizada para uso ( $E_{MDD}$ ) com o sistema de armazenamento igual a  $P_{MDD}$  multiplicada por 24 que são as horas do dia. Obteve-se um valor de  $P_{MDD}$  para armazenamento por banco de baterias e outro para o sistema de hidrogênio.

Para calcular a energia elétrica armazenada  $E_{ADi}$  num dia típico foi utilizada a Equação 3.9

$$E_{ADi} = \eta_g \cdot [(E_1 - P_{MDD}) + (E_2 - P_{MDD}) + \dots + (E_k - P_{MDD})] \quad (3.9)$$

Onde  $i$  varia de 1 a 12 (corresponde aos meses do ano) e  $\eta_g$  é a eficiência para armazenar energia.

Em seguida, para calcular a energia elétrica fornecida pelo sistema de armazenamento  $E_{FSAi}$  num dia típico foi utilizada a Equação 3.10.

$$E_{FSAi} = \frac{[(F_1 - P_{MDD}) + (F_2 - P_{MDD}) + \dots + (F_l - P_{MDD})]}{\eta_c} \quad (3.10)$$

Onde  $i$  varia de 1 a 12 (corresponde aos meses do ano) e  $\eta_c$  é a eficiência na utilização da energia armazenada.

Em seguida, para calcular o saldo mensal de energia ( $S_{MEi}$ ) foi utilizada a Equação 3.11

$$S_{MEi} = (E_{ADi} - E_{FSAi}) \cdot Di \quad (3.11)$$

Por fim o balanço energético anual foi igual à Equação 3.12.

$$\sum_{i=1}^{12} S_{MEi} = 0 \quad (3.12)$$

### 3.6 Hidrogênio produzido e consumido pelo sistema

Para obtenção dos valores em mássicos do hidrogênio produzido e consumido foi realizada a transformação da  $E_{ADi}$  e da  $E_{FSAi}$  de kWh para Joule através da relação  $1\text{kWh}=3,6\text{ MJ}$  (ANEEL, 2008). Em seguida, foi utilizado o poder calorífico superior (PCS) do hidrogênio que é  $141,88\text{ MJ/kg}$  de acordo com U.S DOE (2013). Deste modo, é possível calcular o hidrogênio produzido num dia típico em gramas através da Equação 3.13.

$$H_2 \text{ produzido } i = \frac{(E_{ADi} \cdot 3,6 \cdot 1000)}{141,88} \quad (3.13)$$

Para o cálculo da quantidade mássica do hidrogênio diário utilizada para alimentar a CaC e produzir energia utilizou-se a Equação 3.14

$$H_2 \text{ utilizado } i = \frac{(E_{FSAi} \cdot 3,6 \cdot 1000)}{141,88} \quad (3.14)$$

Em seguida, para calcular o saldo mensal de hidrogênio ( $S_{MHi}$ ) foi utilizada a Equação 3.15

$$S_{MHi} = (H_2 \text{ produzido } i - H_2 \text{ utilizado } i) \cdot Di \quad (3.15)$$

Já o balanço anual de hidrogênio foi calculado pela equação 3.16.

$$\sum_{i=1}^{12} S_{MHi} \quad (3.16)$$

### **3.7 Quantidade de famílias atendidas e emissões de CO<sub>2</sub> evitadas pelo sistema nos dois tipos de armazenamento**

Também foi realizado o cálculo da quantidade de famílias a ser atendida pelo sistema, com os dois tipos de armazenamento, dividindo-se a energia elétrica média disponibilizada no mês de menor número de dias (fevereiro com 28 dias) pelo consumo médio mensal de famílias atendidas pelo programa LPT no Estado do Ceará, conforme a Equação 3.17.

$$Qtd\ famílias = \frac{Energia\ elétrica\ média\ disponibilizada\ em\ fevereiro}{Consumo\ médio\ mensal} \quad (3.17)$$

Por fim, as emissões evitadas pelo uso do sistema híbrido foram calculadas a partir da consideração de um sistema equivalente (mesma quantidade diária de energia) operando com óleo Diesel, cujo fator de emissão é 0,0002667 tCO<sub>2</sub> por kWh produzido, segundo dados fornecidos pela UNEP (UNEP,2000).

Além disso, as emissões evitadas também foram calculadas através da metodologia AMS-I.L versão 01: *Electrification of rural communities using renewable energy* ou Eletrificação de comunidades rurais usando fontes renováveis de energia descrita no Anexo 53 do EB da *Meeting 66* (CDM, 2012a).

Ainda de acordo com a metodologia CDM (2012a) para os primeiros 55 kWh de energia elétrica proveniente de fonte renovável consumidos por unidade consumidora o fator de emissão é 6.8 tCO<sub>2</sub>/ MWh, para consumo maior que 55 kWh e menor que 250 kWh o fator de emissão é 1.3 tCO<sub>2</sub>/ MWh e para consumo maior que 250 kWh o fator de emissão é 1.0 tCO<sub>2</sub>/ MWh.

Para o cálculo da *baseline emissions* ou emissão de base de todo o projeto de MDL é utilizado a Equação 3.18 (CDM, 2012a).

$$BE_a = BE_{55,a} + BE_{250,a} + BE_{maior\ 250,a} \quad (3.18)$$

Onde  $BE_a$  são as emissões de base num ano  $a$  em tCO<sub>2</sub>,  $BE_{55,a}$  emissões de base das unidades consumidoras com consumo igual ou inferior a 55 kWh do projeto de MDL no ano  $a$ ,  $BE_{250,a}$  são as emissões de base das unidades consumidoras com consumo maior 55 kWh e menor do que 250 kWh do projeto de MDL no ano  $a$ ,  $BE_{maior\ 250,a}$  são as emissões de base das unidades consumidoras com consumo maior do que 250 kWh do projeto de MDL no ano  $a$ .

No caso deste trabalho, como todas as unidades consumidoras possuem o consumo médio mensal igual a 60 kWh, ou seja, 720 kWh anual. Sendo assim,  $BE_{55,a} = 0$  e  $BE_{250,a} = 0$ .

Para instalações com consumo anual maior do que 250 kWh a *baseline emissions* ou emissão de base é calculada pela Equação 3.19 (CDM, 2012a).

$$BE_{maior\ 250,a} = \sum_w^p ((EG_{w,a} - 0.250) \cdot EF_{CO2,maior\ 250} + C) \quad (3.19)$$

Onde  $EG_{w,a}$  (MWh) é a eletricidade entregue pelo projeto de energia renovável por unidade de consumidora  $w$  em um ano  $a$  na qual a eletricidade entregue é maior do que 250 kWh no ano,  $EF_{CO2,maior\ 250}$  é o fator de emissão de 1.0 tCO<sub>2</sub>/ MWh,  $w$  é a unidade consumidora com consumo maior que 250 kWh por ano,  $C$  é 0.6275 que a constante calculada por (0.055 MWh x 6.8 tCO<sub>2</sub>/MWh + 0.195 MWh x 1.3 tCO<sub>2</sub>/MWh) e  $p$  é o número de unidades consumidoras.

Como todas as unidades consumidoras possuem o mesmo consumo médio anual igual a 0.720 MWh a equação 3.19 poderá ser escrita conforme a Equação 3.20.

$$BE_{maior\ 250,a} = Qtd\ famílias \cdot ((EG_{w,a} - 0.250) \cdot EF_{CO2,maior\ 250} + C) \quad (3.20)$$

As emissões reduzidas na base anual podem ser calculadas através da Equação de 3.21

$$ER_a = BE_a - PE_a - LE_a \quad (3.21)$$

Onde  $PE_a$  são as emissões do projeto num ano em tCO<sub>2</sub>/a e  $LE_a$  é são as emissões fugitivas em tCO<sub>2</sub>/a.

$PE_a$  são consideradas iguais a zero exceto quando envolvem plantas geotermiais e reservatório de água de micro, mini ou pequenas centrais hidrelétricas (CDM, 2012a).

Além disso, como a energia gerada pelo projeto de energia renováveis não é transferida para outra atividade que tenha fuga do carbono, o valor de  $LE_a$  também foi considerada igual a zero. Deste modo, a emissões reduzidas são iguais às emissões de base (CDM, 2012a).

O projeto de MDL Programático denominado *Sustainable Development Programme of Rural Electrification by Husk Power Systems* também utilizou a metodologia AMS-I.L versão 01 e estima-se que o mesmo irá evitar 215 tCO<sub>2</sub> por ano sendo 10 anos o período de obtenção de créditos. Este projeto é composto por 500 unidades com consumo entre 55 e 250 kWh por ano (CDM, 2012b).



## 4 Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através da metodologia proposta no Capítulo 3, bem como uma discussão dos resultados, na sequência indicada na Figura 3.1.

### 4.1 Energia elétrica gerada pelo aerogerador por meses do ano

A partir das velocidades médias mensais do vento a 30m na cidade de Fortaleza e das potências correspondentes fornecidas pelo aerogerador da Enersud de 6kW (GRW555, Anexo A), foi possível estimar a energia elétrica média mensal gerada pela parte eólica do sistema, conforme apresentado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Energia elétrica média mensal produzida pelo aerogerador da Enersud na cidade de Fortaleza

Mês	Velocidade do vento (m/s)	Energia (MJ)	Energia (kWh)
Janeiro	4,3	1.094,1	303,9
Fevereiro	4,2	843,7	234,3
Março	3,2	309,9	86,1
Abril	3,1	283,4	78,7
Mai	3,8	675,3	187,6
Junho	4,1	852,1	236,7
Julho	4,6	1.275,3	354,3
Agosto	5,4	2.054,6	570,7
Setembro	5,8	2.513,1	698,1
Outubro	5,7	2.404,3	667,9
Novembro	5,6	2.318,1	643,9
Dezembro	5,1	1.738,2	482,8
Média mensal	4,6	1.363,5	378,8

Pode-se observar na Tabela 4.1 que no mês de maior produção de energia (Setembro), a quantidade gerada é 8,9 vezes maior que no mês de menor produção (Abril), o que indica uma significativa sazonalidade da geração eólica na região de Fortaleza.

## 4.2 Energia elétrica gerada pelos painéis fotovoltaicos

Para estimar a energia elétrica gerada pelos painéis fotovoltaicos do sistema híbrido proposto nesta tese foram considerados os dados solarimétricos do CRESESB e o painel fotovoltaico da marca *Yingli* (Anexo B) de potência nominal de 260 Wp, conforme justificado no Capítulo 3. Após a escolha do modelo do painel, foi possível determinar o número de painéis da parte fotovoltaica do sistema.

No projeto de P&D ANEEL considerado nesta tese, inicialmente foi definido que a parte fotovoltaica deveria ter uma potência instalada de 5 kWp. Assim sendo, o número de painéis foi determinado pela divisão desta potência total fotovoltaica pela potência nominal de cada painel (260 Wp), obtendo-se o resultado de 19,23, ou seja, são necessários pelo menos 20 painéis da *Yingli*.

Para o cálculo da energia elétrica mensal produzida pelo conjunto de painéis, consideraram-se os dados da irradiação diária apresentados na Tabela 2.5, com a inclinação igual à latitude, adotando-se para os painéis o fator  $A \cdot \eta = 0,26$ , o total de 20 painéis e o número de dias de cada mês. A Tabela 4.2 apresenta os resultados obtidos para a parte fotovoltaica do sistema híbrido. Conforme se pode observar na Tabela 4.2, Abril também é o mês que menos se gera energia a partir do arranjo de painéis, sendo Outubro o mês de maior produção, havendo um fator 1,4 entre ambos, o que significa uma sazonalidade muito inferior àquela verificada na energia eólica (8,9 vezes). Percebe-se ainda que no caso de Fortaleza não há a complementariedade entre as fontes, ambas produzindo menos energia no mês de Abril e em maior quantidade entre Setembro e Outubro.

Tabela 4.2: Energia elétrica média mensal gerada pelo arranjo de 20 painéis na cidade de Fortaleza

Mês	Irradiação diária média mensal (kWh.m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup> )	Energia (MJ)	Energia (kWh)
Janeiro	5,20	2.978,0	838,2
Fevereiro	5,07	2.622,6	738,2
Março	4,66	2.668,8	751,2
Abril	4,58	2.538,3	714,5
Mai	5,16	2.955,1	831,8
Junho	5,17	2.865,3	806,5
Julho	5,88	3.367,5	947,9
Agosto	6,32	3.619,5	1.018,8
Setembro	6,28	3.480,5	979,7
Outubro	6,39	3.659,5	1.030,1
Novembro	6,20	3.436,2	967,2
Dezembro	5,88	3.367,5	947,9
Média mensal	5,57	3.129,9	881,0

### 4.3 Energia elétrica produzida pelo arranjo híbrido

A energia elétrica gerada pelo aerogerador e pelos painéis fotovoltaicos foi obtida pela soma da energia elétrica produzida por cada parte individualmente mês a mês, conforme ilustra a Figura 4.1 e a Tabela 4.3.

A partir da Tabela 4.3 pode-se observar que os painéis fotovoltaicos geram mais energia que o aerogerador (2,3 vezes mais na média mensal), além de que Abril é o mês no qual o sistema gera menos energia elétrica e Outubro é o mês de maior produção, com 793,2 kWh e 1.698,0 kWh respectivamente.

Não é adequado considerar que o sistema híbrido aqui estudado pode operar sem um sistema de armazenamento de energia fornecendo a mínima energia disponível, a saber, aquela referente ao mês de Abril (793,2 kWh). Sem o armazenamento, a energia mensal firme seria a mínima do sistema eólico, ou seja, 78,7 kWh (média diária de 2,6 kWh e anual de 1 MWh), uma vez que os painéis fotovoltaicos não estariam fornecendo energia à noite. Mesmo assim, noites sem vento

acarretariam a interrupção do suprimento de eletricidade. Portanto, a presença do sistema de armazenamento é essencial ao funcionamento adequado do sistema.

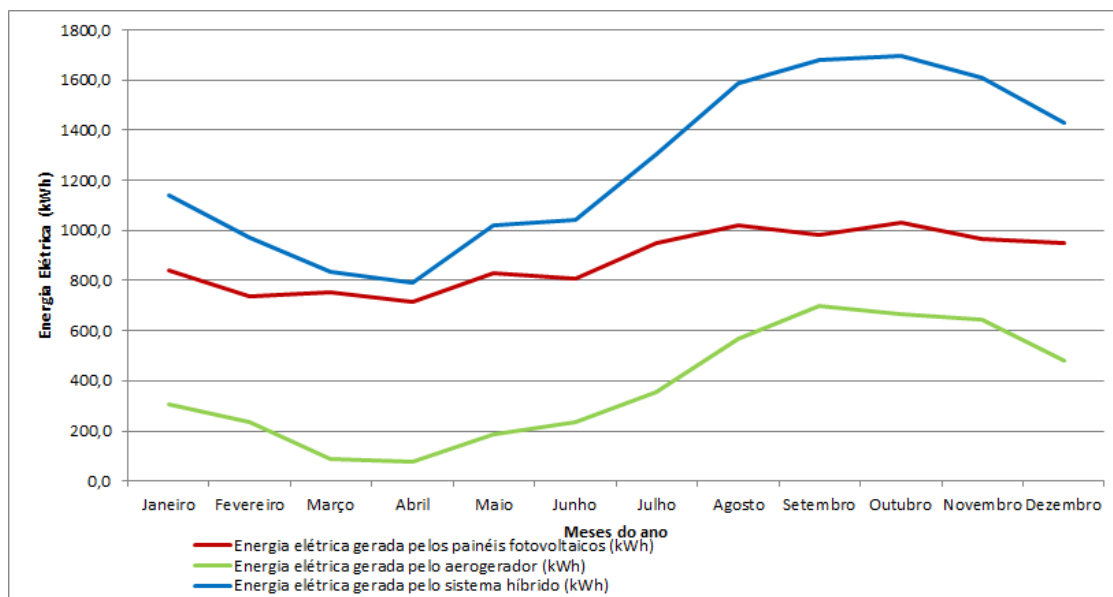


Figura 4.1: Energia elétrica total gerada pelo sistema híbrido

Tabela 4.3: Energia elétrica média mensal gerada pelo aerogerador e pelos painéis fotovoltaicos

Mês	Energia Eólica (kWh)	Energia Solar (kWh)	Energia Eólica + Energia Solar (kWh)
Janeiro	303,9	838,2	1142,1
Fevereiro	234,3	738,2	972,5
Março	86,1	751,2	837,3
Abril	78,7	714,5	793,2
Mai	187,6	831,8	1019,4
Junho	236,7	806,5	1043,2
Julho	354,3	947,9	1302,2
Agosto	570,7	1.018,8	1589,5
Setembro	698,1	979,7	1677,8
Outubro	667,9	1.030,1	1698,0
Novembro	643,9	967,2	1611,1
Dezembro	482,8	947,9	1430,7
Média mensal	378,8	881	1259,8

#### 4.4 Eficiência dos sistemas de armazenamento

Na análise técnica, deve ser considerada a eficiência de cada um dos componentes que constituem os dois subsistemas solar e eólico. De acordo com a Figura 4.2, a eficiência apenas para armazenar energia ( $\eta_g$ ) é de 78%, pois considera as eficiências do *Sunny Boy* de 97% (Anexo C), *Sunny Island* de 95% (Anexo D) (SMA, 2012) e do banco de baterias de 85%. Para a eficiência no processo de utilização da energia armazenada ( $\eta_c$ ) é considerada apenas a eficiência de 95% do *Sunny Island* (SMA, 2012). Deste modo, a eficiência total do sistema armazenamento ( $\eta_T$ ) e sua posterior utilização é igual a multiplicação de  $\eta_g$  por  $\eta_c$  que corresponde aproximadamente 74%.

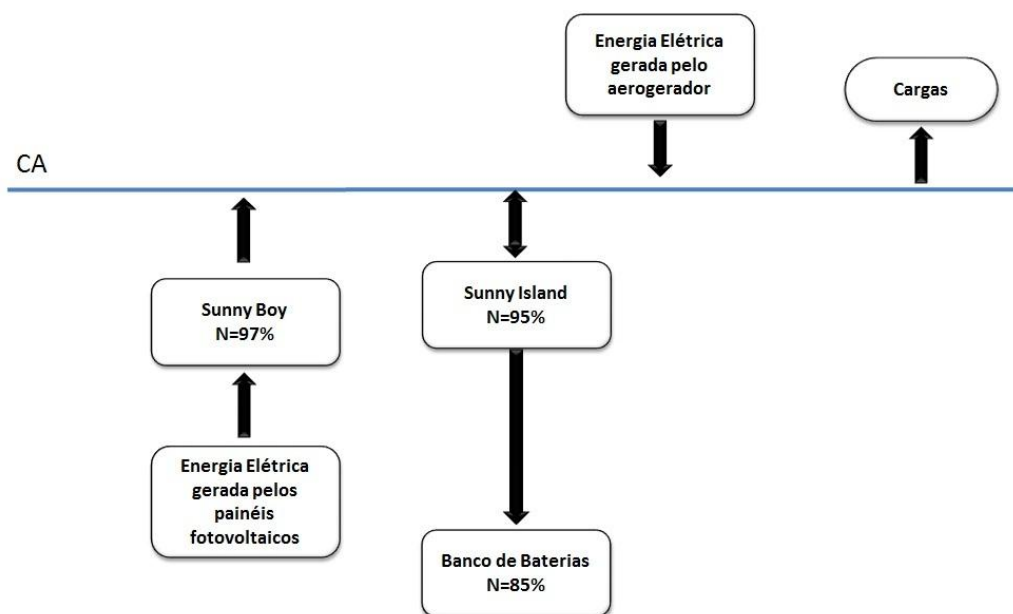


Figura 4.2: Diagrama esquemático da eficiência do sistema com armazenamento por banco de baterias

Para o caso do armazenamento com a produção, armazenamento de hidrogênio e sua reconversão em eletricidade, foi considerado o arranjo da Figura 4.3, que apresenta as eficiências específicas de cada componente.

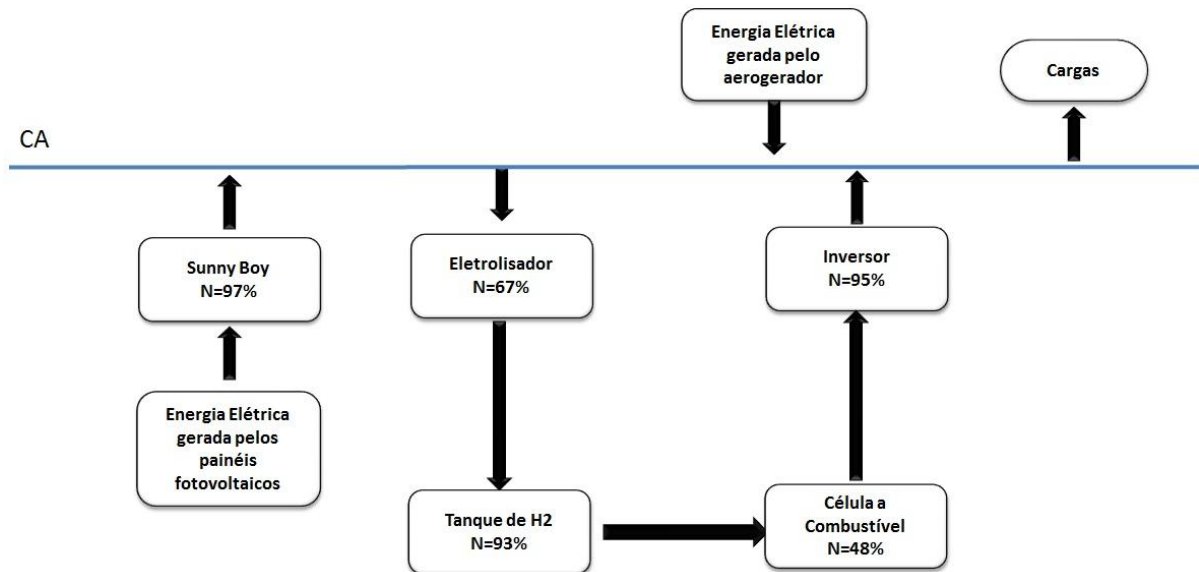


Figura 4.3: Diagrama esquemático da eficiência do sistema híbrido com armazenamento pelo sistema de hidrogênio

A partir da Figura 4.3 pode-se observar que a eficiência apenas para produzir e armazenar o hidrogênio ( $\eta_g$ ) é de aproximadamente 60%, já que considera a eficiência de 97% do *Sunny Boy* (Anexo C) também da SMA (2012), a eficiência de 67% do eletrolisador (Anexo F) e a perda de armazenamento no tanque de 7% (SOUZA, 1998). Para a eficiência no processo de utilização da energia armazenada na forma de hidrogênio ( $\eta_c$ ) é cerca de 46%, uma vez que considerada a eficiência da CaC de 48% e do inversor (Anexo E) de 95% (SCHNEIDER, 2012).

Por fim, a eficiência total do sistema de produção e armazenamento do hidrogênio ( $\eta_T$ ) e sua reconversão em eletricidade através de CaC está por volta de 27% da energia disponível no barramento CA, pois corresponde  $\eta_g$  multiplicado por  $\eta_c$ .

Deve-se observar também que a energia elétrica disponível no barramento CA é a totalidade da energia produzida pelo aerogerador, que já está em corrente alternada, mais 97% da energia total produzida pelos painéis, uma vez que é necessária sua conversão de corrente contínua em alternada.

#### 4.5 Energia elétrica média disponibilizada pelo sistema híbrido eólico-fotovoltaico com dois tipos de armazenamento

Foi realizada a análise do comportamento de um dia típico de todos os meses do ano para mensurar quanto de energia elétrica média diária foi disponibilizada para uso com sistema de armazenamento. Para o armazenamento com banco de baterias a  $P_{MDD}$  encontrada foi de 1,517 kW e para o sistema de hidrogênio foi de 0,9462 kW.

Deste modo, a Tabela 4.4 mostra a energia elétrica média diária e anual disponibilizada para uso com armazenamento por banco de baterias e pelo sistema de hidrogênio.

Tabela 4.4: Energia elétrica média disponibilizada pelo sistema

	Energia média diária disponibilizada (kWh)	Energia média anual disponibilizada (kWh)
Armazenamento banco de baterias	36,41	13.289
Sistema de Hidrogênio	22,71	8.289

A partir da Tabela 4.4 pode-se observar o sistema com armazenamento por banco de baterias disponibiliza mais energia do que o sistema de hidrogênio (1,7 vezes maior nas médias diária e anual).

A Figura 4.4 apresenta o comportamento de um dia típico do sistema para armazenamento a partir do banco de baterias no mês de Abril. Já a Figura 4.5 mostra o comportamento do sistema num dia típico do mês de Abril com armazenamento pelo sistema de hidrogênio.

Abril é o mês no qual os painéis fotovoltaicos e o aerogerador produzem a menor quantidade de energia elétrica, necessitando utilizar mais a energia armazenada. Também se pode observar na Figura 4.4 e na Figura 4.5 que mesmo em Abril ocorre armazenamento da energia excedente durante o dia e que durante a noite a geração híbrida não é suficiente de modo que necessita ser complementada pelo sistema de armazenamento.

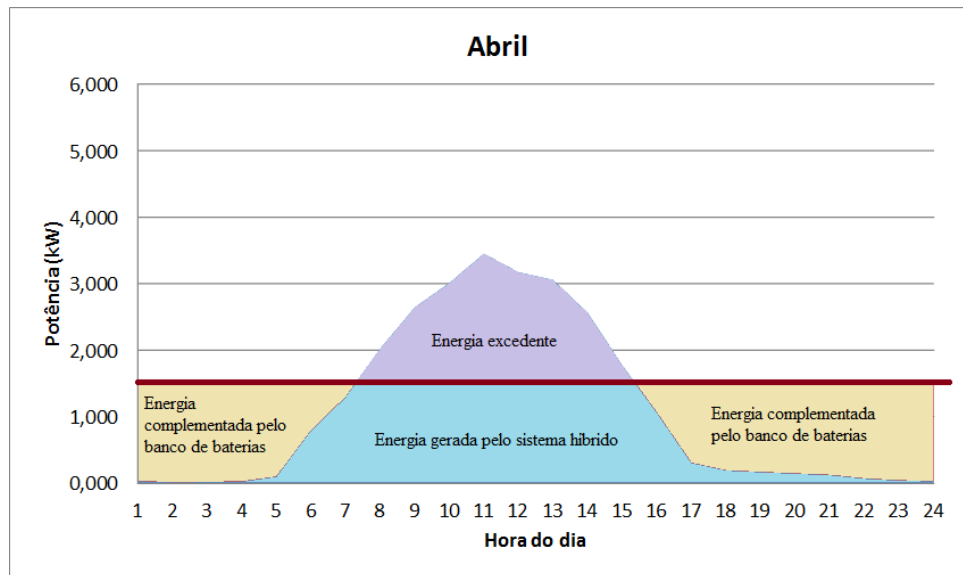


Figura 4.4: Comportamento do sistema híbrido com armazenamento por banco de baterias no mês de Abril

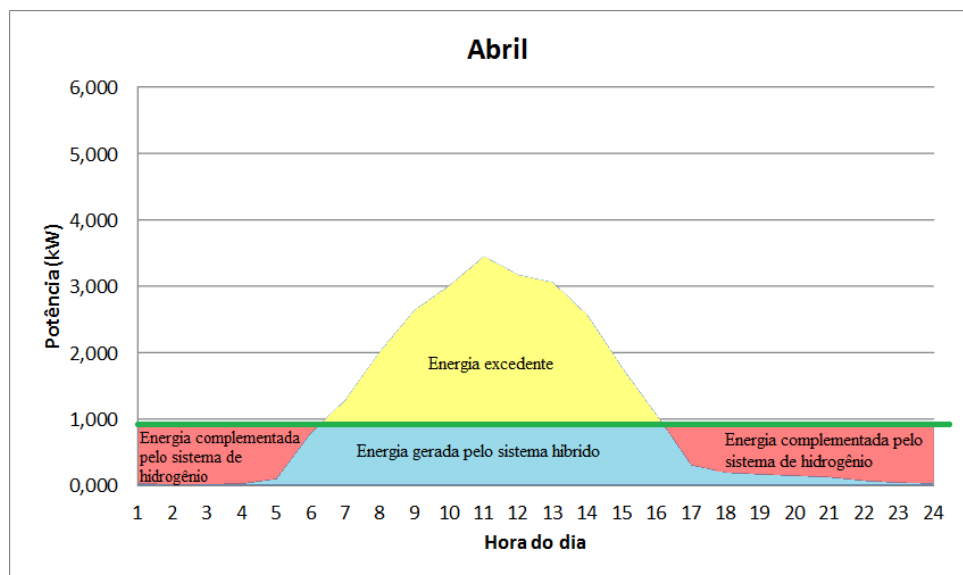


Figura 4.5: Comportamento do sistema com produção de hidrogênio eletrolítico e sua reconversão em eletricidade no mês de Abril

A Figura 4.6 igualmente apresenta o comportamento do sistema para armazenamento de eletricidade por banco de baterias para o mês de Outubro.



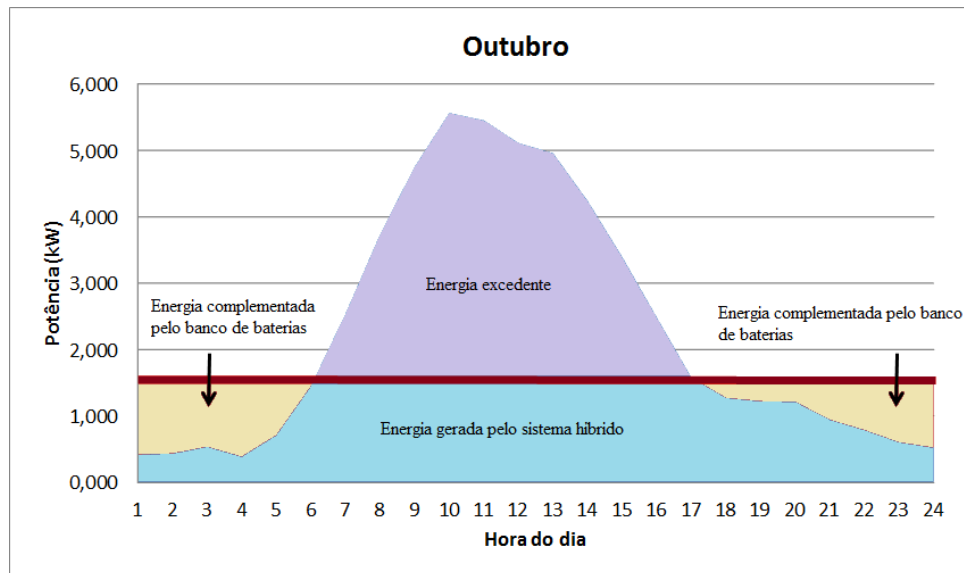


Figura 4.6: Comportamento do sistema híbrido com armazenamento por banco de baterias no mês de Outubro

A Figura 4.7 apresenta o comportamento do sistema para armazenamento de eletricidade pelo vetor energético hidrogênio para o mês de Outubro.

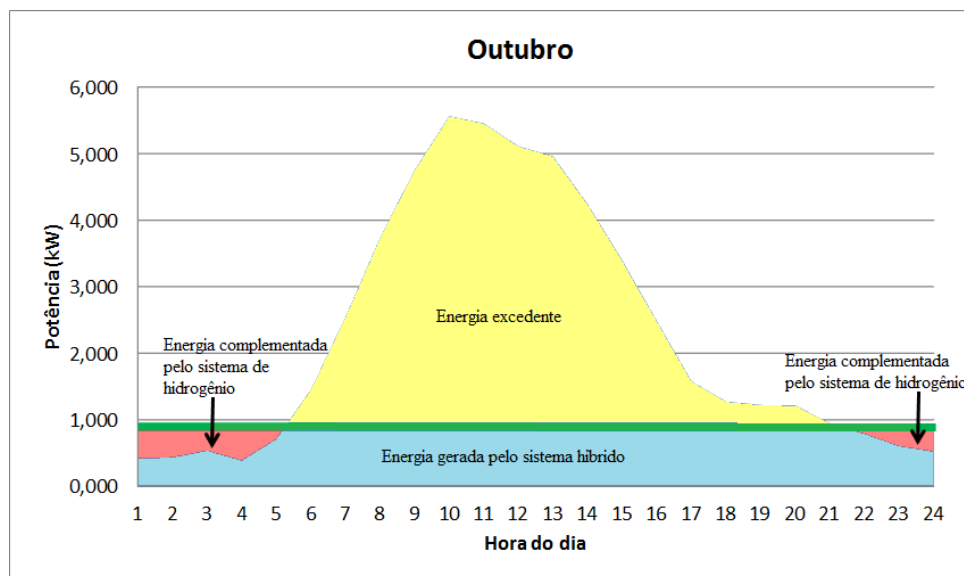


Figura 4.7: Comportamento do sistema híbrido com produção de hidrogênio eletrolítico e sua reconversão em eletricidade no mês de Outubro

De acordo com a Figura 4.6 e Figura 4.7 pode-se observar que de fato outubro é o melhor mês de geração de energia elétrica pela parte solar e eólica do sistema e que, sendo assim, possui a maior quantidade de energia excedente. Por consequência, neste mês se armazena a maior quantidade de energia. Entretanto, mesmo neste mês pode-se observar que de 22h a 06h é necessário recorrer à energia armazenada.

Conforme Figura 4.6 e Figura 4.7 pode-se notar que a produção de hidrogênio ou o armazenamento de energia no banco de baterias ocorre todos os dias e não apenas em alguns meses do ano. Nos meses de maior geração de energia elétrica pela parte solar e eólica haverá um maior excedente de energia e, conseqüentemente, uma maior produção de hidrogênio ou armazenamento de eletricidade no banco de baterias. Sendo assim, nestes meses também irá utilizar menos energia armazenada.

O comportamento dos sistemas de armazenamento para os demais meses do ano pode ser observado no Apêndice A e Apêndice B.

A Tabela 4.5 apresenta o saldo diário, mensal e anual de energia elétrica do sistema de armazenamento por banco de baterias.

Tabela 4.5: Saldo entre a energia armazenada e energia fornecida pelo banco de baterias por dia típico de cada mês na cidade de Fortaleza.

Energia (kWh)- Banco de Baterias					
Mês	$E_{ADi}^*$	$E_{FSAi}^{**}$	$E_{ADi} - E_{FSAi}$	Dias do mês	Saldo
Jan	13,0	17,1	-4,0	31	-124,7
Fev	11,7	17,5	-5,8	28	-162,4
Mar	8,0	20,7	-12,7	31	-392,5
Abril	7,7	20,8	-13,1	30	-394,2
Mai	11,1	18,6	-7,5	31	-233,4
Jun	12,1	18,0	-5,9	30	-176,4
Jul	16,7	16,6	0,1	31	4,5
Ago	20,9	12,5	8,5	31	262,0
Set	22,0	9,1	13,0	30	389,0
Out	21,6	9,7	11,9	31	369,1
Nov	21,0	10,0	11,0	30	330,0
Dez	17,7	13,5	4,2	31	129,1
				365	0,0

\* $E_{ADi}$  é energia elétrica armazenada num dia típico \*\* $E_{FSAi}$  é energia elétrica fornecida pelo sistema de armazenamento num dia típico

Pode-se observar na Tabela 4.5, que de julho a dezembro o saldo diário de energia é positivo, consequentemente o mensal também. Ao final de um ano, o balanço entre a energia elétrica armazenada e fornecida pelo banco de baterias é igual à zero.

Já na Tabela 4.6, nota-se que de agosto a dezembro o saldo diário de energia é positivo. O balanço anual entre a energia elétrica armazenada na forma de hidrogênio e a energia elétrica gerada pelo hidrogênio é igual à zero.

Tabela 4.6: Saldo entre a energia armazenada e da energia fornecida pelo Sistema de Armazenamento de hidrogênio por dia típico de cada mês na cidade de Fortaleza

Energia (kWh)- H <sub>2</sub>					
Mês	E <sub>ADi</sub> *	E <sub>FSAi</sub> **	E <sub>ADi</sub> - E <sub>FSAi</sub>	Dias do mês	Saldo
Jan	13,4	17,9	-4,5	31	-140,4
Fev	12,3	18,6	-6,3	28	-175,4
Mar	9,2	24,0	-14,9	31	-461,0
Abril	8,9	24,5	-15,5	30	-465,8
Mai	11,9	21,0	-9,2	31	-284,2
Jun	12,7	19,9	-7,2	30	-216,7
Jul	16,2	17,0	-0,7	31	-22,9
Ago	19,8	9,8	10,1	31	312,2
Set	21,6	6,0	15,6	30	466,8
Out	21,1	6,9	14,2	31	440,9
Nov	21,0	8,6	12,4	30	371,0
Dez	17,2	11,6	5,7	31	175,7
				365	0,0

\*E<sub>ADi</sub> é energia elétrica armazenada num dia típico \*\*E<sub>FSAi</sub> é energia elétrica fornecida pelo sistema de armazenamento num dia típico

Novamente, pode-se notar na Tabela 4.5 e Tabela 4.6 que o armazenamento de energia e a utilização da energia armazenada ocorrem todos os dias do ano. Entretanto, de janeiro a junho utiliza-se mais a energia fornecida pelo sistema de armazenamento do que se armazena energia no banco de baterias. No armazenamento por hidrogênio, o sistema possui comportamento semelhante de janeiro a julho.

A Tabela 4.7 apresenta os valores da energia elétrica em kWh disponibilizada, excedente, armazenada, faltando e a fornecida pelo sistema de armazenamento para complementar e disponibilizar a energia média diária de 36,41kWh com armazenamento pelo banco de baterias.

Tabela 4.7: Energia disponibilizada, excedente, armazenada, complementada, fornecida pelo sistema de armazenamento e o saldo de energia no armazenamento com banco de baterias na cidade de Fortaleza.

Banco de Baterias							
Mês	D*	Disponibilizada	Excedente	A**	Complementada	F <sub>SA</sub> ***	A-F <sub>SA</sub>
Jan	31	1128,7	515,8	404,0	502,3	528,7	-124,7
Fev	28	1019,5	419,8	328,8	466,7	491,3	-162,4
Mar	31	1128,7	318,5	249,5	609,9	642,0	-392,5
Abril	30	1092,3	294,9	231,0	594,0	625,2	-394,2
Mai	31	1128,7	439,4	344,2	548,7	577,6	-233,4
Jun	30	1092,3	463,2	362,8	512,3	539,2	-176,4
Jul	31	1128,7	661,1	517,8	487,6	513,3	4,5
Ago	31	1128,7	828,4	648,9	367,6	386,9	262,0
Set	30	1092,3	844,1	661,2	258,6	272,2	389,0
Out	31	1128,7	854,3	669,1	285,0	300,0	369,1
Nov	30	1092,3	802,6	628,7	283,7	298,7	330,0
Dez	31	1128,7	700,9	549,0	398,8	419,8	129,2
							0,0

\*D é o número de dias do mês \*\*A é energia armazenada \*\*\*F<sub>SA</sub> é energia fornecida pelo sistema de armazenamento

A partir da Tabela 4.7 pode-se observar que ao final de um ano o saldo entre a energia elétrica armazenada e fornecida pelo banco de baterias é igual a zero.

A energia excedente é destinada ao armazenamento. Entretanto, devido à eficiência do processo de armazenamento, a energia efetivamente armazenada é menor. Já a energia fornecida pelo sistema de armazenamento (F<sub>SA</sub>) é o maior do que a energia complementada também devido a eficiência dos equipamentos envolvidos na utilização da energia armazenada.

De acordo com a Tabela 4.8, pode-se observar que a energia excedente para produção de hidrogênio é maior do que a energia armazenada no banco de baterias todos os meses. Isto se deve à menor eficiência global de conversão ( $\eta_T$ ) pela alternativa do uso do hidrogênio, que exige um maior gasto de energia elétrica.

Tabela 4.8: Energia disponibilizada, excedente, armazenada, complementada, fornecida pelo sistema de armazenamento e o saldo de energia no armazenamento através do hidrogênio na cidade de Fortaleza.

H <sub>2</sub>							
Mês	D*	Disponibilizada	Excedente	A**	Complementada	F <sub>SA</sub> ***	A-F <sub>SA</sub>
Jan	31	704,0	691,6	415,3	253,4	555,7	-140,4
Fev	28	635,9	573,8	344,5	237,1	520,0	-175,4
Mar	31	704,0	473,0	284,0	339,7	745,0	-461,0
Abril	30	681,3	446,6	268,2	334,7	734,0	-465,8
Maio	31	704,0	612,8	367,9	297,4	652,2	-284,2
Jun	30	681,3	634,4	380,9	272,5	597,7	-216,7
Jul	31	704,0	838,0	503,2	239,9	526,1	-23,0
Ago	31	704,0	1023,4	614,5	137,8	302,3	312,2
Set	30	681,3	1079,1	647,9	82,6	181,1	466,8
Out	31	704,0	1091,9	655,6	97,9	214,7	440,9
Nov	30	681,3	1047,4	628,9	117,6	257,9	371,0
Dez	31	704,0	890,4	534,6	163,7	358,9	175,7
							0,0

\*D é o números de dia do mês \*\*A é energia armazenada \*\*\*F<sub>SA</sub> é energia fornecida pelo sistema de armazenamento

Ainda de acordo com a Tabela 4.7 e a Tabela 4.8, também fica notório que outubro é o mês no qual mais se poupa energia, seja na forma de energia propriamente dita ou pelo vetor energético hidrogênio, e que menos se utiliza esta energia para complementar a energia média disponibilizada pelo sistema. E Abril e Março são os meses nos quais menos se armazena energia e mais se utiliza a energia armazenada para disponibilizar a energia média ao sistema.

Por fim, a energia elétrica média anual disponibilizada pelo sistema com armazenamento por banco de baterias é de aproximadamente 13,3 MWh e armazenamento de hidrogênio é de 8,3 MWh, valores inferiores aos 15,1 MWh que corresponde à energia total gerada por ano pelo aerogerador e pelos painéis fotovoltaicos, porém muito superiores 1 MWh que seria possível disponibilizar sem o sistema de armazenamento.

#### 4.6 Hidrogênio produzido e consumido pelo sistema

A Tabela 4.9 apresenta o saldo entre os valores mensais em gramas do hidrogênio produzido com a energia elétrica excedente e o utilizado para alimentar a CaC que permitirá disponibilizar todos os dias do ano a mesma quantidade de energia elétrica as famílias.

Tabela 4.9: Hidrogênio em gramas produzido e utilizado pelo sistema mensalmente

Mês	H <sub>2</sub> por dia médio (g)			H <sub>2</sub> por mês (g)
	Produzido	Utilizado	Saldo	Saldo
Jan	339,9	-454,8	-114,9	-3563,3
Fev	312,2	-471,2	-159,0	-4451,6
Mar	232,5	-609,8	-377,3	-11696,9
Abril	226,8	-620,8	-394,0	-11820,1
Mai	301,2	-533,8	-232,6	-7211,4
Jun	322,2	-505,5	-183,3	-5499,0
Julho	411,8	-430,6	-18,8	-582,3
Ago	503,0	-247,4	255,5	7921,8
Set	548,0	-153,2	394,8	11844,6
Out	536,6	-175,8	360,8	11186,2
Nov	531,9	-218,1	313,8	9414,3
Dez	437,6	-293,8	143,8	4457,7
Total				0,0

A partir da Tabela 4.9 pode-se observar que de Janeiro a Julho o saldo de hidrogênio é negativo, significando que durante os dias destes meses se utiliza mais do que se produz hidrogênio. Por outro lado, de Agosto a Dezembro o saldo de hidrogênio é positivo, ou seja, em média se produz mais do que se consome deste gás. Além disso, ao final de um ano a soma dos saldos resultou em 0,0 g excedente de hidrogênio.

Com essas quantidades mensais de hidrogênio produzido é possível dimensionar o reservatório deste gás, o que não faz parte dos objetivos deste trabalho, pois envolve uma série de hipóteses como a pressão do gás, o uso ou não de compressores, etc., que não influem na análise técnica aqui realizada, apesar de impactar de forma importante a análise dos custos do sistema que, como já mencionado, também não faz parte do escopo desta tese.

#### 4.7 Quantidade de famílias atendidas e emissões de CO<sub>2</sub> evitadas pelo sistema nos dois tipos de armazenamento

Para a realização do cálculo das quantidades de famílias atendidas nos dois tipos de armazenamento foram considerados os seguintes parâmetros: a energia média diária disponibilizada em cada tipo de armazenamento, o número de dias do menor mês do ano que é fevereiro, com 28 dias e consumo médio mensal de 60 kWh, que de acordo com a COELCE (2013) corresponde ao consumo médio das novas ligações feitas pela concessionária no Programa LPT no Estado do Ceará.

Deste modo, estima-se que o sistema com armazenamento de eletricidade a partir do banco de baterias pode atender cerca de 17 famílias que vivem em comunidade isoladas e o sistema com produção de hidrogênio e posterior reconversão em energia elétrica pode atender aproximadamente 11 famílias, uma vez que a energia disponibilizada em cada caso foram respectivamente 1.019,5 kWh e 635,9 kWh para o mês de Fevereiro.

Para estimar as emissões evitadas anualmente em tCO<sub>2</sub> foram utilizados o fator de conversão da UNEP de 0,2667 tCO<sub>2</sub> por MWh e a metodologia de MDL para Eletrificação de comunidades rurais usando fontes renováveis de energia (CDM, 2012a). A Tabela 4.10 mostra os valores de emissões em tCO<sub>2</sub> evitadas ao substituir gerador a diesel (que disponibilizaria a mesma quantidade de energia) pelo sistema com um dos tipos de armazenamento

Tabela 4.10: Emissões anuais evitadas em tCO<sub>2</sub> pela substituição do banco gerador pelo sistema com os dois tipos de armazenamento

Forma de armazenamento	Emissões evitadas no ano (tCO <sub>2</sub> ) UNEP	Emissões evitadas no ano (tCO <sub>2</sub> ) MDL
Sistema de hidrogênio	2,2	12,1
Banco de baterias	3,5	18,7

De acordo com a Tabela 4.10, pode-se observar que independentemente da metodologia utilizada o sistema com armazenamento por banco de baterias evita mais emissões do que aquele que utiliza o hidrogênio, e isto se deve ao fato do banco de baterias disponibilizar uma maior energia média diária.

Ainda segundo a Tabela 4.10 é notório que os valores encontrados pela metodologia de projetos de MDL de pequena escala são aproximadamente cinco vezes maior do que os obtidos com o fator da UNEP.

A diferença entre os valores apresentados na Tabela 4.10 se deve, principalmente, a cinco pontos. Primeiro, a diferença entre os fatores de conversão já que o da UNEP é 0,2667 tCO<sub>2</sub>/MWh enquanto que o menor fator da metodologia do MDL é 1 tCO<sub>2</sub>/MWh. Segundo, a provável diferença entre a eficiência dos geradores a Diesel considerada em cada caso. Terceiro ao fator da UNEP não necessariamente considera projetos de pequena escala e de fontes renováveis de energia. Quarto, a metodologia do MDL considera diferentes fatores de emissão para cada faixa de consumo de uma mesma unidade consumidora, como 6,8 tCO<sub>2</sub>/MWh para os primeiros 55 kWh, 1,3 tCO<sub>2</sub>/MWh para consumo entre 55 e 250 kWh e 1 tCO<sub>2</sub>/MWh para consumo superior a 250 kWh. Quinto, o fator da UNEP é um dado do ano de 2000 enquanto a metodologia do MDL é de 2012.

Por fim, as emissões tCO<sub>2</sub> evitadas por ano pelo sistema são baixas quando comparadas a outros projetos de redução de emissões, tanto com o fator da UNEP quanto na metodologia do MDL para projetos de pequena escala, devido ao pequeno porte do sistema em questão. Entretanto, pode-se associá-lo a outros sistemas semelhantes igualmente de pequeno porte, de forma a se propor projetos do tipo MDL Programáticos (ARAÚJO, 2008). Neste caso, a utilização da metodologia do MDL é a mais adequada, pois além de fornecer valores mais favoráveis foi fornecida pelo *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC).



## 5 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

Nesta tese, as potências instaladas dos painéis fotovoltaicos, aerogerador e da CaC já estavam previamente dimensionadas no projeto de P&D ANEEL. Sendo assim, o objetivo principal desta tese foi estimar a energia elétrica produzida pelo sistema na cidade de Fortaleza com armazenamento por banco de baterias e pelo sistema de produção e reconversão do vetor energético hidrogênio em eletricidade.

### 5.1 Conclusões

A análise de várias fontes de dados solarimétricos mostrou que os fornecidos pelo CRESESB de radiação solar apresentaram-se mais consistentes que os dos Atlas, pois foram obtidos pela inserção da latitude e longitude exatas da cidade de Fortaleza. A radiação diária solar média mensal na cidade de Fortaleza está na faixa de 4,58 a 6,39 kWh.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>.

Da mesma forma, a análise de dados da velocidade do vento para a cidade de Fortaleza indicou que aqueles disponibilizados pela EMBRAPA apresentaram maior consistência e estavam dentro das faixas de valores apresentadas nos Atlas Eólicos e por isso foram utilizados nesta tese. A velocidade média mensal do vento na cidade de Fortaleza a 30m de altura encontra-se na faixa de 3,1 a 5,8 m/s.

Pôde-se concluir também que a geração de energia elétrica pelos painéis fotovoltaicos e aerogerador do sistema proposto no projeto de P&D ANEEL e analisado nesta tese não funcionaram de modo complementar, pois se verificou que a energia elétrica mensal gerada pelos painéis fotovoltaicos foi de 1,4 a 9,1 vezes superior à energia produzida pelo aerogerador, apesar dos valores nominais dos equipamentos escolhidos terem sido similares (respectivamente 5 kWp e 6 kW).

A partir das análises feitas pode-se também concluir que o sistema sem armazenamento seria praticamente inviável, pois só teria como disponibilizar energia elétrica às famílias quando houvesse luz solar, já que a energia elétrica gerada pelo aerogerador é mínima.

O sistema proposto com armazenamento por banco de baterias consegue atender a 17 famílias enquanto o sistema com armazenamento de hidrogênio 11 famílias, pois a energia diária disponibilizada pelo banco de baterias é de 36,4 kWh e pelo sistema de hidrogênio é 22,7 kWh.

Em todos os dias do ano ocorrem o armazenamento de energia excedente e a utilização da energia armazenada, mesmo em Outubro, que é o melhor mês de geração de energia elétrica pela parte solar e eólica. Portanto, neste mês armazena-se mais energia do que se utiliza da energia armazenada. No mês de Abril, que é o pior mês de geração dos painéis fotovoltaicos e do aerogerador, recorre-se mais à energia armazenada do que se armazena.

No sistema de produção e reconversão de hidrogênio em eletricidade nos meses de Janeiro a Julho, o saldo mensal de hidrogênio é negativo, ou seja, durante os dias destes meses utiliza-se mais do que se produz hidrogênio. Entretanto, de Agosto a Dezembro o saldo de hidrogênio é positivo e deste modo em média produz-se mais do que se utiliza hidrogênio.

Sendo assim, ao final de um ano a soma dos saldos de hidrogênio eletrolítico resultou em 0,0 gramas excedentes.

Como era de se esperar, o uso do hidrogênio como meio de armazenamento de energia elétrica é, do ponto de vista da análise de eficiência, menos vantajoso, possuindo um desempenho de aproximadamente três vezes menor daquele obtido com bancos de baterias eletroquímicas. Por outro lado, sabe-se que esses bancos possuem uma vida útil muito menor do que os sistemas baseados no hidrogênio e que, pelo custo das baterias, podem não representar a melhor opção do ponto de vista econômico conforme analisado por Furlan (2008). Entretanto, a análise econômica não foi objetivo deste trabalho.

Por fim, as emissões tCO<sub>2</sub> evitadas por ano pela substituição de gerador a diesel para o sistema com armazenamento de energia elétrica pelo vetor energético hidrogênio foi de 12 tCO<sub>2</sub> e de 19 tCO<sub>2</sub> para armazenamento de eletricidade pelo banco de baterias. Em ambos os tipos de armazenamento as emissões evitadas estão compatíveis com aquelas evitadas com o projeto *Sustainable Development Programme of Rural Electrification by Husk Power System*, que utilizou a mesma metodologia AMS– I.L versão 01 e que deverá evitar 215 tCO<sub>2</sub> por ano através de 500 unidades consumidoras que estão distribuídas em diferentes comunidades (CDM, 2012b),

e isto se deve, principalmente, ao porte do sistema em questão, o que indica como melhor estratégia para este tipo de sistema o uso de projetos de MDL Programático, considerando-se então a substituição de bancos geradores em várias comunidades.

## **5.2 Sugestões para próximos trabalhos**

A análise da viabilidade econômica deste sistema não era objetivo desta tese. Sendo assim, esta opção é deixada como um possível trabalho futuro.

Outra sugestão para trabalho futuro seria analisar a viabilidade de utilizar o sistema em diversas comunidades como projeto de MDL Programático para, assim, aumentar o número de tCO<sub>2</sub> evitadas.

Além disso, o sistema também poderia ser redimensionado de modo que a energia elétrica produzida pelo aerogerador e pelos painéis fotovoltaicos do sistema funcione de modo complementar, ou seja, mais próximo de um valor médio.

O dimensionamento do banco de baterias e do tanque de hidrogênio não foi contemplado neste trabalho. Sendo assim, esses dimensionamentos podem ser realizados em trabalhos futuros.

## Referências

ALL SMALL TURBINES. Disponível em: <<http://www.allsmallwindturbines.com/>> Acesso em: Janeiro 2012.

AMERICA DO SOL. Disponível em: < <http://www.americadosol.org/silicio-cristalino/>>. Acesso em: Maio 2013.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Banco de Informações de Geração. 2013. Disponível em: <<http://www.ANEEL.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>> Acesso em: Junho 2013.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Portaria 7 de 5 de abril de 2012**. Disponível em: <<http://www.ANEEL.gov.br/cedoc/prt2012007see.pdf>>. Acesso: Maio 2012a

ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa No 488**, de 15 de maio de 2012. Estabelece as condições para revisão dos planos de universalização dos serviços de distribuição de energia elétrica na área rural. 2012b.

ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa No 493** de 05 de junho de 2012. Estabelece os procedimentos e as condições de fornecimento por meio de Microsistema Isolado de Geração e Distribuição de Energia Elétrica – MIGDI ou Sistema Individual de Geração de Energia Elétrica com Fonte Intermitente – SIGFI. 2012c.

ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa No 482** de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. 2012d.

ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica. **Chamada** de nº13. Projeto Estratégico: “Arranjos Técnicos e Comerciais para Inserção da Geração Solar Fotovoltaica na Matriz Energética”. 2011. Disponível em: <[http://www.ANEEL.gov.br/arquivos/PDF/PeD\\_2011-ChamadaPE13-2011.pdf](http://www.ANEEL.gov.br/arquivos/PDF/PeD_2011-ChamadaPE13-2011.pdf)>

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil 3 edição**. Brasília. 236p. 2008.

ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa No 83**, de 20 de setembro de 2004. Estabelece os procedimentos e as condições de fornecimento por intermédio de Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes – SIGFI. 2004.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica. 2 edição**. Brasília. 243p. 2005. Disponível em: <<http://www.ANEEL.gov.br/aplicacoes/atlas/download.htm>> Acesso: Abril 2012.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil 1 edição**. Brasília.153p. 2002.

ARAÚJO, P. D. **O uso Energético do Hidrogênio produzido por Fontes Renováveis para Aplicação Veicular no Contexto do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo: Estudo de Caso na Cidade de São Paulo**. Tese de Doutorado. Planejamento de Sistemas de Energéticos. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas. 2008.

ARE. *The Alliance for Rural Electrification*. Disponível em <<http://www.ruralelec.org/>>. Acesso em: Outubro 2011.

ARE. *The Alliance for Rural Electrification. Shining Light for Progress. Best Practices of the Alliance for Rural Electrification what Renewable Energy can achieve in Developing Countries*.18p, 2010a.

ARE. *The Alliance for Rural Electrification. Hybrid Power Systems based on Renewable Energies: a Suitable and Cost-Competitive Solution for Rural Electrification*.2010b.

AVALENCE. *Hydrogen Energy Systems. Hydrofiller Product Line*. Disponível em: <<http://www.avalence.com/products/default.htm>>. Acesso em: Agosto 2013.

AVEN. *Agencia Valenciana de la Energia*.

Disponível em: <<http://www.aven.es/ayudas/electrificacion.html>>. Acesso em: Agosto 2010

AWEA. *American Wind Energy Association. Small Wind Turbine Global Market Study 2010*. Disponível em: <http://www.awea.org/smallwind/>. Acesso: Janeiro 2012

BARBOSA, C. F. O. **Avaliação Tecnológica, Operacional e de Gestão de Sistemas Híbridos para Geração de Eletricidade na Região Amazônica**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Pará. 2006.

BARBOSA, C.F.; PINHO, J. T. **Avaliação Econômica de Sistemas Híbridos Fotovoltaico-Eólico- Diesel para Geração de Eletricidade na Amazônia**. In: Anais do II Congresso Brasileiro de Energia Solar. Florianópolis, SC. 2008.

BARBOSA, C. F.; PINHO, J. T.; PEREIRA, E. J. S.; **Situação da Geração Elétrica através de Sistemas Híbridos no Estado do Pará e Perspectivas frente à Universalização da Energia Elétrica**. In *Proceedings of the 5th Encontro de Energia no Meio Rural*, 2004, Campinas, SP. Disponível em: <[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022004000200052&script=sci\\_arttext](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022004000200052&script=sci_arttext)>. Acesso em: Junho 2010

BRASIL. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/sobre/economia/energia/programa-luz-para-todos>>. Acesso em: Maio 2013

CAVALIERO, C. K. N.; SILVA, E.P. **Estudo de Viabilidade da Introdução de Uso de Óleos Vegetais na Geração de Energia Elétrica nos Sistemas Isolados**. In: Anais do 3. Encontro de Energia Meio Rural. 2003. Disponível em: <[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=msc0000000022000000200044&script=sci\\_arttext](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=msc0000000022000000200044&script=sci_arttext)>. Acesso: Fevereiro 2012.

CDM. *Clean Development Mechanism*. Disponível em: <http://cdm.unfccc.int/about/index.html>. Acesso em: Maio 2013.

CDM. *Clean Development Mechanism. EB Meeting 66 Annex 53. Electrification of rural communities using renewable energy. 27 February - 2 March 2012a*. Disponível em <<http://cdm.unfccc.int/EB/index.html>>. Acesso em: Maio 2013.

CDM. *Clean Development Mechanism. Sustainable Development Programme of Rural Electrification by Husk Power Systems. 2012b*. Disponível em <<http://cdm.unfccc.int/EB/index.html>>. Acesso em: Maio 2013.

CUSTÓDIO, R. S. **Energia Eólica para Produção de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro, RJ. Eletrobrás. 280p. 2009.

CEMIG. Companhia Energética de Minas Gerais S.A. **Usina Solar do Mineirão**. Disponível em: <<http://www.cemig.com.br/sites/Imprensa/pt-br/Paginas/Usina-Solar-do-Mineirao.aspx>> Acesso em: Junho 2013.

COELCE. Companhia Energética do Ceará. Universalização Luz para Todos. Julho 2011. Disponível em: <<https://www.coelce.com.br/sobrecoelce/noticias/luz-para-todos-2011.aspx>>. Acesso em: Maio 2013.

CEPEL-CRESESB. Grupo de Trabalho de Energia Solar. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro. 2004

CRESESB – Centro de Referencia para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **Sistema de Geração Fotovoltaica**. Disponível em: <<http://cresesb.cepel.br/content.php?cid=381>>. Acesso em: Junho 2013.

CRESESB. Centro de Referencia para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **Potência Eólico**. Disponível em: <[http://cresesb.cepel.br/atlas\\_eolico/index.php](http://cresesb.cepel.br/atlas_eolico/index.php)>. Acesso em: Fevereiro 2012a.

CRESESB – Centro de Referencia para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **Potencial Energético Solar – SunData**. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/sundata/index.php#sundata>>. Acesso em: Fevereiro 2012b.

ELETRORBRÁS. Disponível em: <<http://www.eletroras.com/elb/data/Pages/LUMISBDD9AB86PTBRIE.htm>>. Acesso em: Junho 2013.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Dados Climatológicos: Estação Fortaleza, 2003**. Ceará. 2004. Disponível em: <[http://www.cnpat.embrapa.br/publica/pub/SerDoc/doc\\_86.pdf](http://www.cnpat.embrapa.br/publica/pub/SerDoc/doc_86.pdf)>. Acesso em: Julho 2011.

ENER BLUE SA. Disponível em: <<http://www.accagen.com/products-and-services/products/electrolysers>>. Acesso em: Setembro 2013

ENERSUD. Empresa de Energia Limpa. Disponível em <<http://enersud.com.br/>>. Acesso em: Agosto 2011.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Informe à Imprensa Leilão de Energia de Reserva-Eólica do 14.12.2009.**

Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/imprensa/PressReleases/20091214\\_1.pdf](http://www.epe.gov.br/imprensa/PressReleases/20091214_1.pdf)> Acesso em: Fevereiro 2012.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica.** Rio de Janeiro 2011. Disponível em:

<[http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/20111213\\_1.pdf](http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/20111213_1.pdf)>. Acesso em: Abril 2012.

EPIA. European Photovoltaic Industry Association. **Global Market Outlook for Photovoltaics.** Disponível em: <<http://www.epia.org/about-us/about-photovoltaics/solar-photovoltaic-technology/>>. Acesso em: Maio 2013a.

EPIA. *European Photovoltaic Industry Association.* Disponível em: <<http://www.epia.org/about-us/about-photovoltaics/solar-photovoltaic-technology/>>. Acesso em: Maio 2013b.

FADIGAS, E. A. **Energia Eólica.** Baueri. São Paulo. Editora: Manole, 2011.

FERNANDES, R. T. **Supervisão de um Sistema Híbrido Eólico/Diesel Usando Lógica Fuzzy.** Dissertação de Mestrado. Energia. Faculdade de Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Mato Grosso do Sul. 6p. 2005.

FRANCELLINO, R. C. **PRODEEM no Luz Para Todos.** Revista Energia Hoje. Editora Brasil Energia. Fevereiro 2005. Disponível em: <<http://www.energiahoje.com/brasilenergia/noticiario/2005/02/01/268063/prodeem-no-luz-para-todos.html?>>. Acesso: Junho 2011.

FUEL CELLS 2000. **The Leading Independent Fuel Cell Resource.** Disponível em: <<http://www.fuelcells.org/top-200/?country=&state=&ctypedd=1&q=&x=13&y=13>>. Acesso em: Outubro 2012.

FUNCEME. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. Plataforma de Coleta de Dados. Disponível em: <<http://www.funceme.br/index.php/areas/rede-de-monitoramento/plataforma-de-coleta-de-dados>>. Acesso em: Fevereiro 2012.



FURLAN, A. L. **Análise Comparativa de Sistemas de Armazenamento de Energia Elétrica Fotovoltaica por meio de Baterias e Hidrogênio em Localidades Isoladas da Região Amazônica.** Dissertação de Mestrado. Planejamento de Sistemas de Energéticos. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas. 52p. 2008.

GAMBETTA, F. **Análise Técnica e Econômica de Retificadores de Corrente para Produção de Hidrogênio Eletrolítico: Estudo de Caso Aproveitando a EVT da UHE de Itaipu.** Dissertação de Mestrado. Planejamento de Sistemas de Energéticos. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas. 163p. 2010.

GEDAE. **Grupos de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas.** Disponível em <<http://www.ufpa.br/gedae/>>. Acesso em: Agosto 2011.

GUERRA, J. A. *Análisis de los Parámetros Técnicos en la Aplicación de los Sistemas de Información Geográfica a la Integración Regional de las Energías Renovables en la Producción Descentralizada de Electricidad.* Tese de Doutorado. Universidad Politécnica de Madrid. 2000.

H2NITIDOR. *Controlli Intelligent per Ambiente Energia e Sicurezza.* Disponível em: <<http://www.h2nitidor.it/h2n/category/products/electrolysers>> Acesso em: Junho 2012.

HYDROGENICS. Disponível em: <http://www.hydrogenics.com/technology-resources/hydrogen-technology/electrolysis>. Acesso em: Setembro 2013.

HOMER. *Energy Modeling Software for Hybrid Renewable Energy Systems.* Disponível em: <http://homerenergy.com/>. Acesso em: Agosto 2013.

U.S. DOE Department of Energy. *Hydrogen Analysis Resource Center.* Disponível em: <[http://hydrogen.pnl.gov/cocoon/morf/hydrogen/site\\_specific/fuel\\_heating\\_calculator](http://hydrogen.pnl.gov/cocoon/morf/hydrogen/site_specific/fuel_heating_calculator)>. Acesso em: Junho 2013.

IEA. International Energy Agency. **World Energy Outlook.** 2012. Disponível em: <<http://www.worldenergyoutlook.org/resources/energydevelopment/energyaccessprojectionsto2030/>> Acesso em: Maio 2013.

IEC. *International Electrotechnical Commission.* Disponível em: < <http://www.iec.ch/> > Acesso em: Setembro 2012.

IEEE. IEEE Standards Power & Energy Dictionary iPhone application. 2012.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <[www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br)>. Acesso em: Maio 2010.

IHT. Industrie Haute Technologie. Disponível em: <<http://www.iht.ch/technologie/electrolysis/industry/high-pressure-electrolysers.html>>

ITM. Disponível em: <http://www.itm-power.com/product/hpac-10/>. Acesso em: Setembro 2013.

JARA, L. Comunicação via email. Coordenador do Programa Luz para Todos da COELCE. Maio 2013.

LUZ PARA TODOS. Disponível em: <<http://luzparatodos.mme.gov.br/>>. Acesso em: Maio 2010.

MATOS, M. B. **Investimentos Financeiros em Células a Combustível e Hidrogênio no Brasil**. Dissertação de Mestrado. Planejamento de Sistemas de Energéticos. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas. 114p. 2009

MANWELL, J. F.; McGowan J. G. and Rogers, A. L. **Wind energy explained**, John Willey & Sons, West Sussex, England, 590 pp., 2002.

MCPHY. Disponível em: <<http://www.mcphy.com/en/markets/on-site-hydrogen/>> Acesso em: Setembro 2013.

MEDEIROS, C. **LER 2011: eólicas surpreendem novamente com preço médio abaixo dos R\$ 100/MWh**. CANAL ENERGIA. 2011. Disponível em : <<http://www.canalenergia.com.br/zpublisher/materias/Retrospectiva.asp?id=84779&a=2011>> Acesso em: Abril 2013.

MELO, E. **A Perspectiva de Futuro da Energia Eólica**. Associação Brasileira de Energia Eólica. Disponível em: <<http://www.abeeolica.org.br/index.php/artigos/118-a-perspectiva-de-futuro-da-energia-eolica.html>>. Acesso: Junho 2013.

MPX. Grupo EBX. **Solar Tauá**. Disponível em: <<http://www.mpx.com.br/pt/nossos-negocios/geracao-de-energia/usinas-em-operacao/Paginas/solar-taua.aspx>>. Acesso em: Maio 2013.

NEL. Hydrogen. Disponível em: <<http://www.nel-hydrogen.com/home/?pid=75>>. Acesso em: Setembro 2013.

PAC. Programa Ação Crescimento. Luz para Todos: 14,7 milhões de Brasileiros Atendidos. Disponível em: <<http://www.pac.gov.br/noticia/b5076107>>. Acesso: Abril 2013

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; RÜTHER, R.. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2006. 60p. São José dos Campos: INPE.

PIEL. Disponível em: <<http://www.piel.it/>>. Acesso em: Setembro 2013.

PINHO, J. T. **Sistemas Híbridos Soluções Energéticas para a Amazônia**. Barreto, E. J. F. 1ª Edição. Brasília. Ministério de Minas e Energia. 21p. 2008. Disponível em: <[http://luzparatodos.mme.gov.br/luzparatodos/downloads/Solucoes\\_Energeticas\\_para\\_a\\_Amazonia\\_Sintese.pdf](http://luzparatodos.mme.gov.br/luzparatodos/downloads/Solucoes_Energeticas_para_a_Amazonia_Sintese.pdf)>. Acesso em: Maio 2010.

PINHO, J. T. **A experiência do GEDAE com sistemas de pré-pagamento em sistemas híbridos com minirredes**. Minirredes e Sistemas Híbridos com Energias Renováveis na Eletrificação Rural – São Paulo – 25 - 26/05/2011.

PINTO, S. C. Comunicação via e-mail. Pesquisador do Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio. Agosto 2013.

POLITO, R. **De Luz no Campo a Luz para Todos**. Revista Energia Hoje. Editora Brasil Energia. 2009a. Disponível em: <<http://www.energiahoje.com/brasilenergia/noticiario/2009/12/04/399990/de-luz-no-campo-a-luz-para-todos.html?>>. Acesso em: Junho 2011.

POLITO, R. **Um Novo Consumidor**. Revista Energia Hoje. Editora Brasil Energia. 2009b. Disponível em: <<http://www.energiahoje.com/brasilenergia/noticiario/2009/12/04/399989/um-novo-consumidor.html?>>. Acesso em: Junho 2011.

PROINFA. Programa de Incentivo as Fontes Alternativas de Energia Elétrica. Disponível em [http://www.mme.gov.br/programas/proinfa/menu/programa/tecnologias\\_contempladas.html](http://www.mme.gov.br/programas/proinfa/menu/programa/tecnologias_contempladas.html). Acesso em Maio 2012.

PROTON ENERGY. Disponível: <<http://www.protononsite.com/products/products.html>>. Acesso em: Setembro 2013

PNUD. **Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento**. Disponível em: <<http://www.pnud.cl/boletin/noviembre2005/cont06.htm>>. Acesso em: Junho 2011.

REIS, L. B., **Geração de Energia Elétrica: tecnologia, inserção ambiental, planejamento, operação e análise de viabilidade**. Barueri, SP: Editora Manole, 183p. 2003.

REF. **Rural Energy Foundation**. Disponível em: <<http://www.ruralenergy.nl/>>. Acesso em: Setembro 2011.

REN21. *Renewable Energy Policy Network for 21 st Century. Renewables 2013 Global Status Report*. 2013. Disponível em: [http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2013/GSR2013\\_highres.pdf](http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2013/GSR2013_highres.pdf). Acesso em: Junho 2013.

ROMEIRO, V. R. S. **Evolução do Marco Regulatório do Clima: Perspectivas em Eficiência Energética nos países em desenvolvimento**. Dissertação de Mestrado. Planejamento de Sistemas Energéticos. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas/SP. 2010.

RUTHER, R. Sistema Fotovoltaico-Diesel de Araras-RO. Seminários de difusão e capacitação sobre Minirredes e sistemas híbridos com energias RENOVÁVEIS na eletrificação RURAL. 25/05/2011.  
Disponível em: [http://lsf.iee.usp.br/lsf/pdf/seminario\\_25/Apresentacao\\_Ricardo\\_Ruther.pdf](http://lsf.iee.usp.br/lsf/pdf/seminario_25/Apresentacao_Ricardo_Ruther.pdf). Acesso em: Agosto 2013.

SANTOS, A. M. R., **Tendências Tecnológicas das Células a Combustível para o Uso do Hidrogênio Derivado do Petróleo e do Gás Natural**. Tese de doutorado submetida a defesa. Planejamento de Sistemas Energéticos. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas/SP. 2007.

SATRIX. Energias Renováveis. Disponível em: <<http://www.satrix.com.br/produtos.htm>>. Acesso em: Fevereiro 2012.

SCHNEIDER. *Product Data Sheet Inverter/Charger 865-1000-01*. Disponível em <[http://www2.schneider-electric.com/sites/corporate/en/products-services/renewable-energies/products-offer/range-presentation.page?c\\_filepath=/templatedata/Offer\\_Presentation/3\\_Range](http://www2.schneider-electric.com/sites/corporate/en/products-services/renewable-energies/products-offer/range-presentation.page?c_filepath=/templatedata/Offer_Presentation/3_Range)>. Acesso em: Maio 2012.

SEINFRA Secretaria da Infraestrutura. **Atlas Eólico do Potencial Eólico do Ceará**. 2011. Disponível em: <<http://www.seinfra.ce.gov.br/index.php/downloads/category/6-energia>>. Acesso em: Janeiro 2012.

SEINFRA. Secretaria da Infraestrutura. **Atlas Solarimétrico do Ceará**. 2010. 108p. Ceará.

SMA Solar Technology. Disponível em: <[http://www.sma-america.com/en\\_US/products/](http://www.sma-america.com/en_US/products/)> Acesso: Abril 2012

SOUZA, S.N. M. De. **Aproveitamento de Energia Hidroelétrica Secundária para Produção de Hidrogênio Eletrolítico**. Tese de Doutorado. Planejamento de Sistemas de Energéticos. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas. 211p. 1998.

STRANGUETO, K. M. **Usina Fotovoltaica de 1MWp para Suprimento de Veículos Elétricos: Estimativa da Frota Atendida, Logística de Abastecimento e Emissões de CO2 evitadas**. Dissertação de Mestrado. Planejamento de Sistemas de Energéticos. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas. 2012.

SWERA. **Solar and Wind Energy ResourceAssessment**. Disponível em: <[http://maps.nrel.gov/swera?visible=swera\\_wind\\_nasa\\_lo\\_res&opacity=50&extent=-74.01,-33.74,-29.84,5.27](http://maps.nrel.gov/swera?visible=swera_wind_nasa_lo_res&opacity=50&extent=-74.01,-33.74,-29.84,5.27)>. Acesso em: Fevereiro 2012.

TELEDYNE. Energy Systems. Disponível em: <<http://www.teledynees.com/titan.asp>>. Acesso em: Setembro 2013.

TEOFILO, A. F. G. **Geração de Energia Elétrica com Célula Solar Fotovoltaica para População Rural de Baixa Renda**. In *Proceedingsofthe 5th Encontro de Energia no Meio Rural*, 2004, Campinas, SP. Disponível em:

<[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022004000100064&script=sci\\_arttext](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022004000100064&script=sci_arttext)>. Acesso em: Junho 2010.

TIBA, Chigueru, et al. **Atlas Solarimétrico do Brasil: Banco de Dados Solarimétricos**. 2000. 111p. Recife.

UNEP. *United Nations Environment Programme. The GHG Indicator: UNEP Guidelines for Calculating Greenhouse Gas Emissions for Businesses and Non-Commercial Organisations 2000*. Disponível em: <[http://www.unep.fr/energy/information/tools/ghg/pdf/GHG\\_Indicator.pdf](http://www.unep.fr/energy/information/tools/ghg/pdf/GHG_Indicator.pdf)>. Acesso em: Outubro 2012.

UNFCCC. *United Nation Framework Convention on Climate Change*. Disponível: <http://unfccc.int/2860.php> Acesso em: Maio 2013.

VARELLA, F. K. O. M. **Estimativa do Índice de Nacionalização dos Sistemas Fotovoltaicos no Brasil**. Tese de Doutorado. Planejamento de Sistemas Energéticos. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas. 126p. 2009.

VILLALVA, M. G. Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações. 1.ed. São Paulo. Ed. Erica. 2012.

WILLE, H. *El Paraiso Solar se va Recuperando*. Revista WILLE. *La revista de Fotovoltaica*. Agosto. 116-117p. 2008.

WOOD, D. *Small Wind Turbines for Remote Power and Distributed Generation*. *Wind Engineering volume 34*, N<sup>o</sup>. 3, 241–254 p. 2010.

WWEA. *WORLD WIND ENERGY ASSOCIATION. 2012 Annual Report*. Disponível em: <[http://issuu.com/wwindea/docs/worldwindenergyreport2012\\_final](http://issuu.com/wwindea/docs/worldwindenergyreport2012_final)>. Acesso em: Maio 2013.

WWEA. *WORLD WIND ENERGY ASSOCIATION. 2013 Small Wind World Report*. Disponível em: <[http://issuu.com/wwindea/docs/worldwindenergyreport2012\\_final](http://issuu.com/wwindea/docs/worldwindenergyreport2012_final)>. Acesso em: Maio 2013.

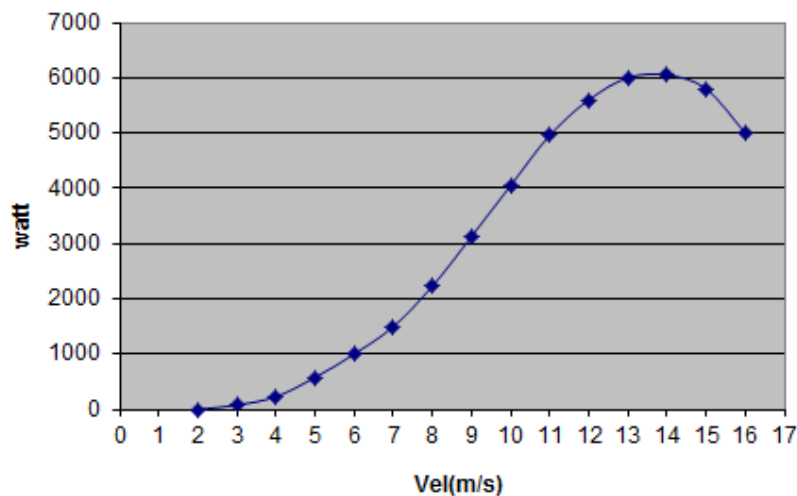
## Anexo A- Dados Técnicos do Aerogerador ENERSUD



DADOS TÉCNICOS	NOTUSII2	NOTUSI38	GERAR208	GERAR246	GRW555
Diâmetro	1,12	1,38	2,08	2,46	5,55
Potência a 12,5m/s (Watt)	250w	350w	700w	1000w	6000w
Início de Rotação	2,2 m/s				
Início de Geração	3 m/s	3 m/s	3 m/s	2,7 m/s	3 m/s
Rpm a 12,5 m/s	1100	1000	800	700	240
N° de Pás	3	3	3	3	3
Material das Pás	Fibra de Vidro				
Controle de Velocidade	Active Stall				
Proteção p/ altas Velocidade	Controle de Passo				
Sistema Magnético	Neodímio				
Sistema Elétrico	Retificação On Board		Sem Eletrônica no topo da torre		
Tensão de Saída	12 / 24 volts	12 / 24 volts	12 / 24 volts	24 / 48 volts	120 volts
Topologia	Fluxo Axial				
Peso Total	9,5 Kg	10 Kg	28 Kg	32 Kg	140 Kg
Proteção Anti-Oxidante	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Controle de Carregamento de baterias	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Proteção para excesso de carga nas baterias	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Proteção para baixa tensão das baterias	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Indicador de Carga	Amperímetro	Amperímetro	Amperímetro	Amperímetro	Amperímetro
Chave de freio magnético	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim

Enersud ind. e Soluções Energéticas Ltda  
 R. Brasilina Rosa De Jesus n 2 - sl 201 - São Gonçalo - RJ  
[www.enersud.com.br](http://www.enersud.com.br) / [enersud@enersud.com.br](mailto:enersud@enersud.com.br)  
 TEL.: 55 - 21 - 3710-0896

**Curva de Potência GRW555**



Relação velocidade do vento e potência obtida da Curva de Potência:

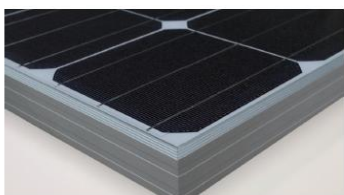
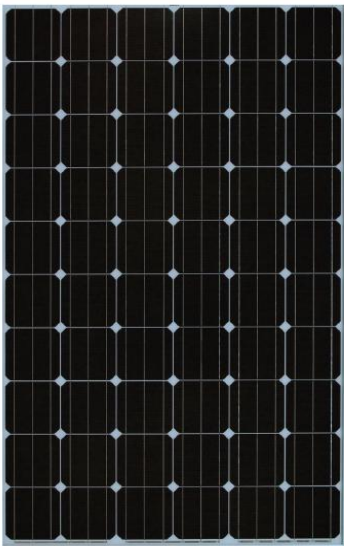
Velocidade do vento (m/s)	Potência (W)
2	0
3	75
4	230
5	580
6	1.000
7	1.500
8	2.230
9	3.130
10	4.050
11	4.960
12	5.600
13	6.000
14	6.050
15	5.800
16	5.000



## Anexo B- Dados Técnicos Painel Fotovoltaico Yingli

### Panda 265 SERIES

YL265C-30b  
YL260C-30b  
YL255C-30b  
YL250C-30b  
YL245C-30b



#### ABOUT YINGLI GREEN ENERGY

Yingli Green Energy Holding Company Limited (NYSE: YGE) is one of the world's largest fully vertically integrated PV manufacturers, which markets its products under the brand "Yingli Solar". With over 2GW of modules installed globally, we are a leading solar energy company built upon proven product reliability and sustainable performance. We are the first renewable energy company and the first Chinese company to sponsor the FIFA World Cup™.

#### PERFORMANCE

- Yingli Solar Panda is a new monocrystalline module technology with n-type solar cells that have average efficiencies higher than 18.5%. Combined with high transmission glass, module efficiencies are up to 16.2%.
- Compared to traditional modules with p-type solar cells, Panda modules have lower initial degradation and higher performance under both high temperature and low irradiation conditions.
- Power tolerance of +/-3% minimising PV system mismatch losses.

#### QUALITY & RELIABILITY

- Robust, corrosion resistant aluminum frames independently tested to withstand wind loads of up to 2.4kPa and snow loads of up to 5.4kPa ensuring a stable mechanical life for your modules.
- Module packaging optimized to protect product during transportation and minimize on-site waste.
- Modules independently tested to ensure conformance with certification and regulatory standards.
- Manufacturing facility certified by TÜV Rheinland to ISO 9001:2008, ISO 14001:2004 and BS OHSAS 18001:2007.

#### WARRANTIES

- 5-year limited product warranty<sup>1</sup>.
- Limited power warranty<sup>1</sup>: 10 years at 90% of the minimal rated power output, 25 years at 80% of the minimal rated power output.

<sup>1</sup> In compliance with our Warranty Terms and Conditions.

#### QUALIFICATIONS & CERTIFICATES

IEC 61215, IEC 61730, CE, ISO 9001:2008, ISO 14001:2004, BS OHSAS 18001:2007, SA 8000, PV Cycle



YINGLISOLAR.COM

# Panda 265 SERIES

## ELECTRICAL PERFORMANCE

### Electrical parameters at Standard Test Conditions (STC)

Module name		PANDA 265	PANDA 260	PANDA 255	PANDA 250	PANDA 245
Module type		YL265C-30b	YL260C-30b	YL255C-30b	YL250C-30b	YL245C-30b
Power output	$P_{max}$	W	265	260	255	250
Power output tolerances	$\Delta P_{max}$	%	+/- 3			
Module efficiency	$\eta_m$	%	16.2	15.9	15.6	15.3
Voltage at $P_{max}$	$V_{mp}$	V	31.0	30.8	30.6	30.5
Current at $P_{max}$	$I_{mp}$	A	8.55	8.46	8.33	8.20
Open-circuit voltage	$V_{oc}$	V	39.0	38.6	38.2	38.1
Short-circuit current	$I_{sc}$	A	8.93	8.91	8.85	8.71

STC: 1000W/m<sup>2</sup> irradiance, 25°C module temperature, AM 1.5g spectrum according to EN 60904-3.  
Ave. efficiency reduction of 5% at 200W/m<sup>2</sup> according to EN 60904-1.

### Electrical parameters at Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)

Power output	$P_{max}$	W	192.4	188.8	185.2	181.6	177.9
Voltage at $P_{max}$	$V_{mp}$	V	28.1	27.8	27.7	27.6	27.5
Current at $P_{max}$	$I_{mp}$	A	6.86	6.79	6.68	6.58	6.48
Open-circuit voltage	$V_{oc}$	V	35.9	35.5	35.2	35.1	35.1
Short-circuit current	$I_{sc}$	A	7.20	7.18	7.13	7.02	6.92

NOCT: open-circuit module operation temperature at 800W/m<sup>2</sup> irradiance, 20°C ambient temperature, 1m/s wind speed.

## THERMAL CHARACTERISTICS

Nominal operating cell temperature	NOCT	°C	46 +/- 2
Temperature coefficient of $P_{max}$	$\gamma$	%/°C	-0.45
Temperature coefficient of $V_{oc}$	$\beta_{oc}$	%/°C	-0.33
Temperature coefficient of $I_{sc}$	$\alpha_{sc}$	%/°C	0.04

## OPERATING CONDITIONS

Max. system voltage	1000Vdc
Max. series fuse rating	20A
Limiting reverse current	Do not apply external voltages larger than $V_{oc}$ of the module.
Operating temperature range	-40 to 85°C
Max. static load, front (e.g., snow and wind)	5400Pa
Max. static load, back (e.g., wind)	2400Pa
Max. hailstone impact (diameter / velocity)	25mm / 23m/s

## CONSTRUCTION MATERIALS

Front cover (material / type / thickness)	low-iron tempered glass / 3.2mm
Cell (quantity / material / type / dimensions)	60 / monocrystalline / 156mm x 156mm
Encapsulant (material)	ethylene vinyl acetate (EVA)
Frame (material / color / anodization color)	anodized aluminum alloy / silver / clear
Junction box (protection degree)	IP65
Cable (length / cross-sectional area)	1200mm / 4mm <sup>2</sup>
Plug connector (type / protection degree)	MC4 / IP67 or Amphenol H4 / IP68

- Due to continuous innovation, research and product improvement, the specifications in this product information sheet are subject to change without prior notice. The specifications may deviate slightly and are not guaranteed.
- The data do not refer to a single module and they are not part of the offer, they only serve for comparison to different module types.

Yingli Green Energy Holding Co. Ltd.  
service@yinglisolar.com  
Tel: 0086-312-8929802

YINGLISOLAR.COM

© Yingli Green Energy Holding Co. Ltd. | DS\_YL265C-30b\_EN\_201107\_v02.3

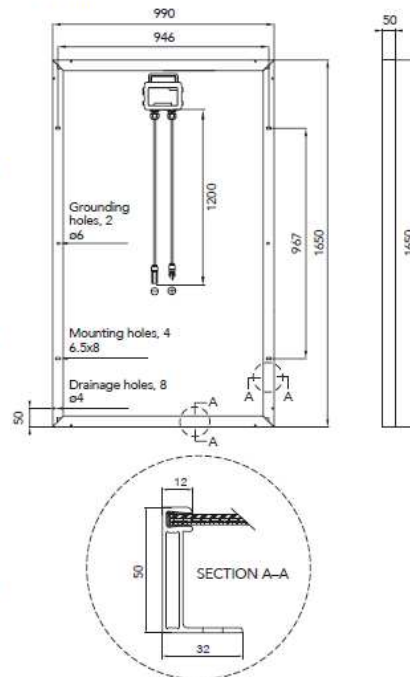
## GENERAL CHARACTERISTICS

Dimensions (L / W / H)	1650mm / 990mm / 50mm
Weight	19.5kg

## PACKAGING SPECIFICATIONS

Number of modules per pallet	20
Number of pallets per 40' container	28
Packaging box dimensions (L / W / H)	1700mm / 1150mm / 1190mm
Box weight	427kg

Unit: mm



Warning: Read the instruction manual in its entirety before handling, installing, and operating Yingli Solar modules.

Our Partners:



Fonte:

[http://www.civicsolar.com/sites/default/files/library/panels/collateral/Panda\\_265\\_Series\\_EU\\_EN\\_0.pdf](http://www.civicsolar.com/sites/default/files/library/panels/collateral/Panda_265_Series_EU_EN_0.pdf) Acesso: Jun 2011.

## Anexo C- Dados Técnicos *Sunny Boy*

### Sunny Boy

Home > Products > Grid-Tied Inverters > SUNNY BOY > SUNNY BOY 5000-US / 6000-US / 7000-US / 8000-US

### SUNNY BOY 5000-US / 6000-US / 7000-US / 8000-US

Versatile performer with UL certification

The Sunny Boy 5000-US, 6000-US, 7000-US and 8000-US inverters are UL certified and feature excellent efficiency. Graduated power classes provide flexibility in system design. Automatic grid voltage detection\* and an integrated DC disconnect switch simplify installation, ensuring safety as well as saving time. These models feature galvanic isolation and can be used with all types of modules-crystalline as well as thin-film.

\* US Patent US7352549B1

ONTARIO FIT COMPLIANT

Overview Technical data Downloads

**UL Certified**

- For countries that require UL certification (UL 1741/IEEE 1547)

**Efficient**

- 97% peak efficiency
- OptiCool™ active temperature management system

**Safe**

- Galvanic isolation

**Simple**

- Patented automatic grid voltage detection\*
- Integrated DC disconnect switch

**Assembled in the USA**

- Compliant with ARRA "Buy American" clause

\* US Patent US7352549B1

Regional Forums  
SMA DELIVERED.

NEW DATES ANNOUNCED

Register Today!

Fonte: [http://www.sma-america.com/en\\_US/products/grid-tied-inverters/sunny-boy/sunny-boy-5000-us-6000-us-7000-us-8000-us.html](http://www.sma-america.com/en_US/products/grid-tied-inverters/sunny-boy/sunny-boy-5000-us-6000-us-7000-us-8000-us.html)

## Anexo D– Datos Técnicos *Sunny Island*



### SUNNY ISLAND 4248-US



#### Simple

- For systems from 2 to 5 kW
- AC and DC coupling
- Simple installation

#### Efficient

- High efficiency
- Excellent price-performance ratio

#### Durable

- Extreme overload capability
- 5-year warranty



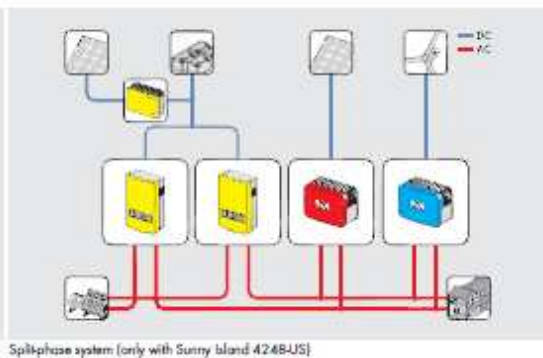
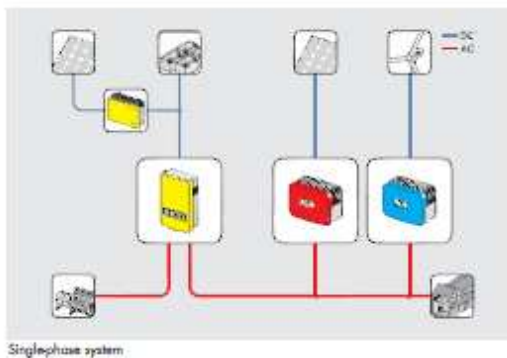
### SUNNY ISLAND 4248-US

Making stand-alone grids easier than ever

Easy installation, safe operation and an outstanding price-performance ratio make the Sunny Island 4248-US battery inverter especially suitable for small and mid-sized stand-alone grids. Designed for countries with voltage systems compatible with the U.S. standard, the Sunny Island 4248-US guarantees a reliable and high-quality power supply. Due to its outstanding overload capabilities, and that it is designed to withstand high ambient temperatures, this inverter can be used under extreme weather conditions.



Technical data	Sunny Island 4248-US
<b>AC output (loads)</b>	
Nominal AC voltage (adjustable)	120 V (105 V - 132 V)
Nominal frequency (adjustable)	60 Hz (55 Hz - 65 Hz)
Continuous AC power at 25 °C / 45 °C (77 °F / 113 °F)	4200 W / 3400 W
AC output power at 25 °C (77 °F) for 30 min / 1 min / 3 s	5400 W / 7000 W / 11900 W
Nominal AC current / max. AC current (peak)	35 A / 140 A for 5 s
THD output voltage / power factor (cos φ)	< 3% / -1 to +1
<b>AC input (generator or grid)</b>	
AC input voltage (range)	120 V (80 V - 150 V)
AC input frequency (range)	60 Hz (54 Hz - 66 Hz)
Max. input current (adjustable) / Max. input power	56 A (2 - 56 A) / 6.7 kW
<b>Battery DC input</b>	
Battery voltage (range)	48 V (41 V - 63 V)
Max. battery charging current / continuous charging current at 25 °C (77 °F)	100 A / 80 A
Battery type / battery capacity (range)	lead / 100 - 6000 Ah
Charge control	3UdU process
<b>Efficiency / operating consumption</b>	
Max. efficiency	95%
Internal consumption with no load / standby	22 W / 4 W
<b>Protection devices</b>	
DC reverse polarity protection / DC fuse	●/●
AC short-circuit / AC overload	●/●
Overtemperature / excessive battery discharge	●/●
<b>General data</b>	
Dimensions (W / H / D) in mm (in)	390 / 590 / 245 (15 / 23 / 10)
Weight	39 kg (86 lb)
Operating temperature range	-25 °C ... +50 °C (-13 °F ... +122 °F)
Protection rating (according to IEC 60529)	Indoors (NEMA 1)
<b>Features / function</b>	
Operation & display / multifunction relays	Internal / 2
3-phase systems / parallel connection	-/-
Integrated bypass / multistep operation	-/-
Charge level calculation / full / equalization charge	-/●/●
Integrated soft start / generator support	●/-
Battery temperature sensor / communication cables	●/-
Warranty: 5 / 10 / 15 / 20 / 25 years	●/○/○/○/○
Certificates and permits	www.SMA-Solar.com
<b>Accessories</b>	
Battery cables / battery fuses	○/○
Interfaces (RS485 / Multistep FS)	○/-
*GenMax* extended generator start	○
Load-shedding contactor / battery current measurement	○/-
<p>● Standard features    ○ Optional features    - Not available</p> <p>Last revision: May 2010</p> <p>Type designation: SI 4248U</p>	



Toll Free +1 888 4 SMA USA  
www.SMA-America.com

SMA America, LLC

Fonte: <http://files.sma.de/dl/7996/SUNNYIS4248US-DUS103810W.pdf>

# Anexo E- Dados Técnicos Inversor

## Product data sheet Characteristics

**865-1000-01**

Xantrex XW - hybrid inverter / charger  
XW6048-120/240-60 - input: 130A DC



### Main

Range of product	Xantrex XW
Device short name	XW6048-120/240-60
Product or component type	Hybrid inverter / charger
Network number of phases	Single phase
Type of signal	True sine wave
Continuous power	6000 W AC - 120 V) 6762 W AC - 240 V)

### Complementary

Feature available	106 A - phase to neutral (L-N) - 16 s 52.5 A - phase to phase (L-L) - 16 s
Network frequency	60 Hz +/- 0.1 Hz (output)
Cos phi	0.98
Harmonic distortion	< 5 %
Input voltage	60.4 V DC 120 V AC (L-N) - <i>bypass/charge mode</i> 240 V AC (L-L) - <i>bypass/charge mode</i>
Input voltage limits	44...64 V DC 80...160 V AC (L-N) - <i>bypass/charge mode</i> 160...270 V AC (L-L) - <i>bypass/charge mode</i> 108...130 V +/- 1.5 V AC (L-N) - <i>sell mode</i> 214...260 V +/- 3.0 V AC (L-L) - <i>sell mode</i>
Input current	130 A DC at rated power
Input frequency	69.4...60.4 Hz +/- 0.05 Hz - <i>sell mode</i> 56...66 Hz - <i>bypass/charge mode (default)</i> 44...70 Hz - <i>bypass/charge mode (allowable)</i>
Charging current	100 A
Efficiency	96 % - low load 92.5 % CEC weighted 89.4 % - maximum charge rate
Power consumption in W	< 8 W - search mode
Communication network type	Xantrex
Device mounting	Wall mounted
Provided equipment	Battery temperature sensor included for temperature compensation
Height	580 mm
Width	410 mm
Depth	230 mm
Product weight	66.2 kg

### Environment

NEMA degree of protection	NEMA Type 1
Ambient air temperature for operation	-25...70 °C
Standards	CSA 107.1 UL 1741
Product certifications	FCC Class B

The information provided in this document is for general information only. It is not intended to be used as a substitute for the manufacturer's instructions. The user must read the manufacturer's instructions and safety warnings before using the product. The user must also read the safety instructions and warnings for the product. The user must also read the safety instructions and warnings for the product. The user must also read the safety instructions and warnings for the product.

May 25, 2012



1

Fonte: [http://www2.schneider-electric.com/sites/corporate/en/products-services/renewable-energies/products-offer/range-presentation.page?c\\_filepath=/templatedata/Offer\\_Presentation/3\\_Range](http://www2.schneider-electric.com/sites/corporate/en/products-services/renewable-energies/products-offer/range-presentation.page?c_filepath=/templatedata/Offer_Presentation/3_Range) .Acesso: Abril 2012

## Anexo F– Dados Técnicos Eletrolisador *Nitidor*



*High pressure electrolyser  
& more...*

### Electrolyser 1000 NI/h


Rated stack capacity, hydrogen	[Nm <sup>3</sup> /h]	1,000
Rated stack capacity, oxygen	[Nm <sup>3</sup> /h]	0,500
Maximum operating pressure	[barg]	30
Minimum and Maximum operating temperatures	[°C]	5 - 80
Ambient temperature	[°C]	-25 / +40
Room temperature	[°C]	+2 / +40
Electrolyte (KOH solution) concentration	[% w]	25 - 30
O2 in H2 directly from stack	[vol. %]	< 0,1
H2 in O2 directly from stack	[vol. %]	< 0,2
KOH in H2	[mg/Nm <sup>3</sup> ]	< 1
Cell active area	[cm <sup>2</sup> ]	500
Cell current density	[A/m <sup>2</sup> ]	4000
Demineralized water consumption	[l/h]	0,90
Demineralized water conductivity	[µS/cm]	< 5
Nitrogen consumption (each shutdown)	[NI]	350
Stack Power consumption	[kW]	4,70
AUX Power consumption, max	[kW]	0,6
Cooling capacity	[kWth]	1,50
<b>Dimensions</b>		
Dimensions of electrolyser module (L x W x H)	[mm]	1200x1000x2050
Dimensions of power system (L x W x H)	[mm]	400x1000x1900

Fonte: <http://www.h2nitidor.it/h2n/category/products/electrolysers>

## Anexo G- Dados de Energia Solar utilizados no *Homer*

**Solar Resource Inputs**

File Edit Help

 HOMER uses the solar resource inputs to calculate the PV array power for each hour of the year. Enter the latitude, and either an average daily radiation value or an average clearness index for each month. HOMER uses the latitude value to calculate the average daily radiation from the clearness index and vice-versa.

Hold the pointer over an element or click Help for more information.

Location

Latitude  °  '  North  South Time zone

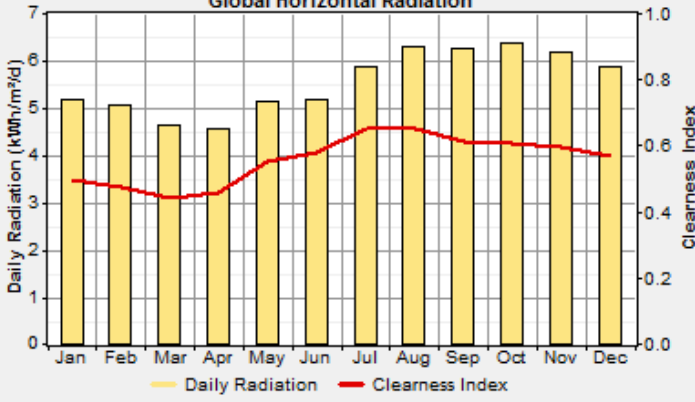
Longitude  °  '  East  West

Data source:  Enter monthly averages  Import time series data file

Baseline data

Month	Clearness Index	Daily Radiation (kWh/m <sup>2</sup> /d)
January	0.498	5.200
February	0.478	5.070
March	0.443	4.660
April	0.458	4.580
May	0.555	5.160
June	0.582	5.170
July	0.650	5.880
August	0.655	6.320
September	0.611	6.280
October	0.607	6.390
November	0.594	6.200
December	0.569	5.880
Average:	0.557	5.570

Global Horizontal Radiation



Plot... Export...  
Help Cancel OK


Scaled annual average (kWh/m<sup>2</sup>/d)



## Anexo H– Dados de Energia Eólica utilizados no *Homer*

**Wind Resource Inputs**

File Edit Help

 HOMER uses wind resource inputs to calculate the wind turbine power each hour of the year. Enter the average wind speed for each month. For calculations, HOMER uses scaled data: baseline data scaled up or down to the scaled annual average value. The advanced parameters allow you to control how HOMER generates the 8760 hourly values from the 12 monthly values in the table.

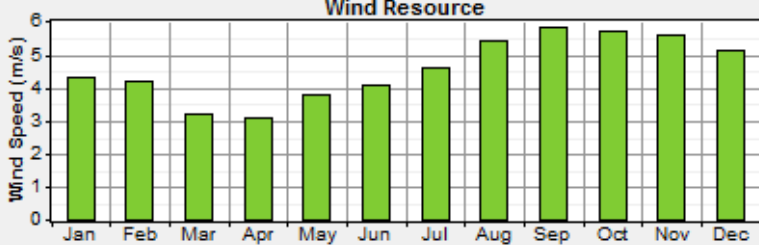
Hold the pointer over an element or click Help for more information.

Data source:  Enter monthly averages  Import time series data file

Baseline data

Month	Wind Speed (m/s)
January	4.300
February	4.200
March	3.200
April	3.100
May	3.800
June	4.100
July	4.600
August	5.400
September	5.800
October	5.700
November	5.600
December	5.100
Annual average:	4.577

**Wind Resource**

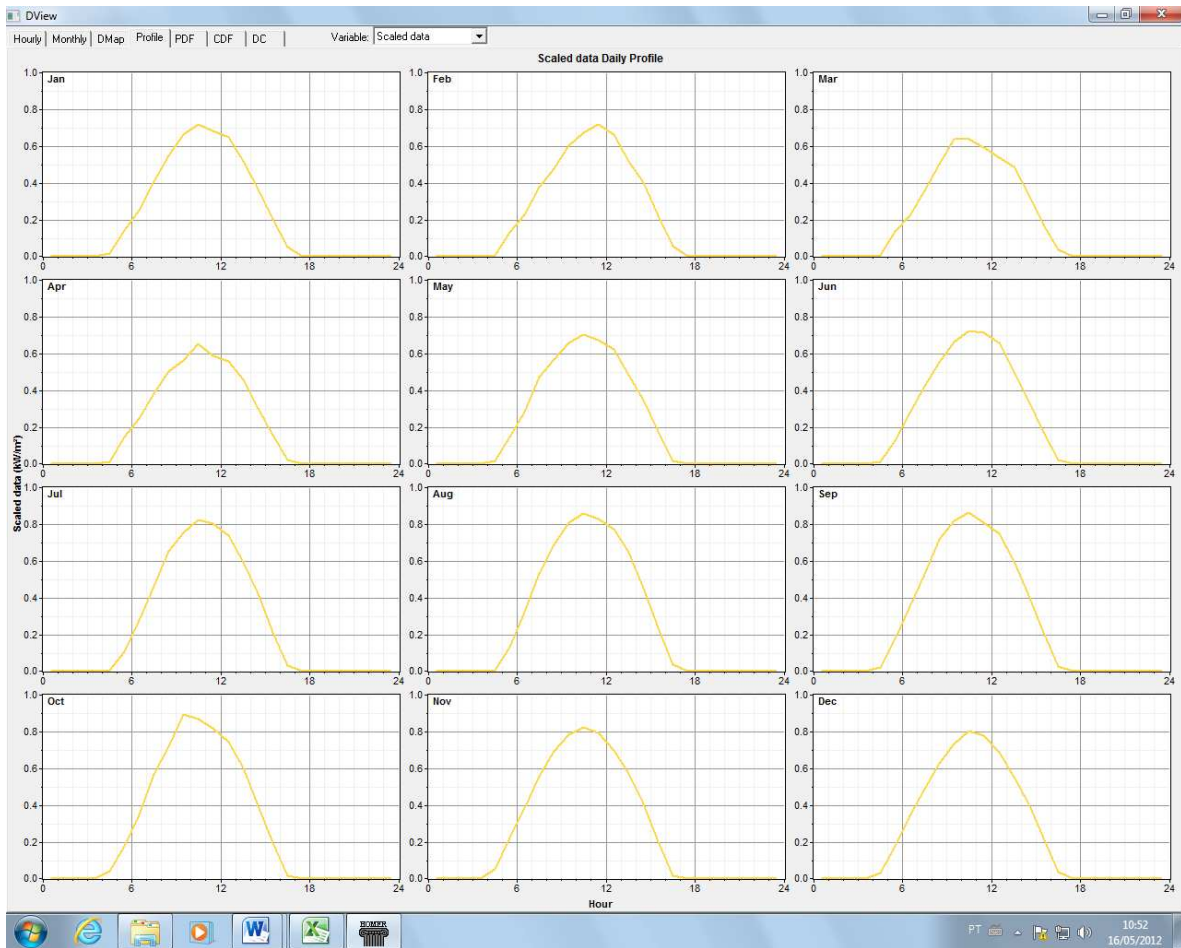


Other parameters: Altitude (m above sea level)  Anemometer height (m)

Advanced parameters: Weibull k  Autocorrelation factor  Diurnal pattern strength  Hour of peak windspeed

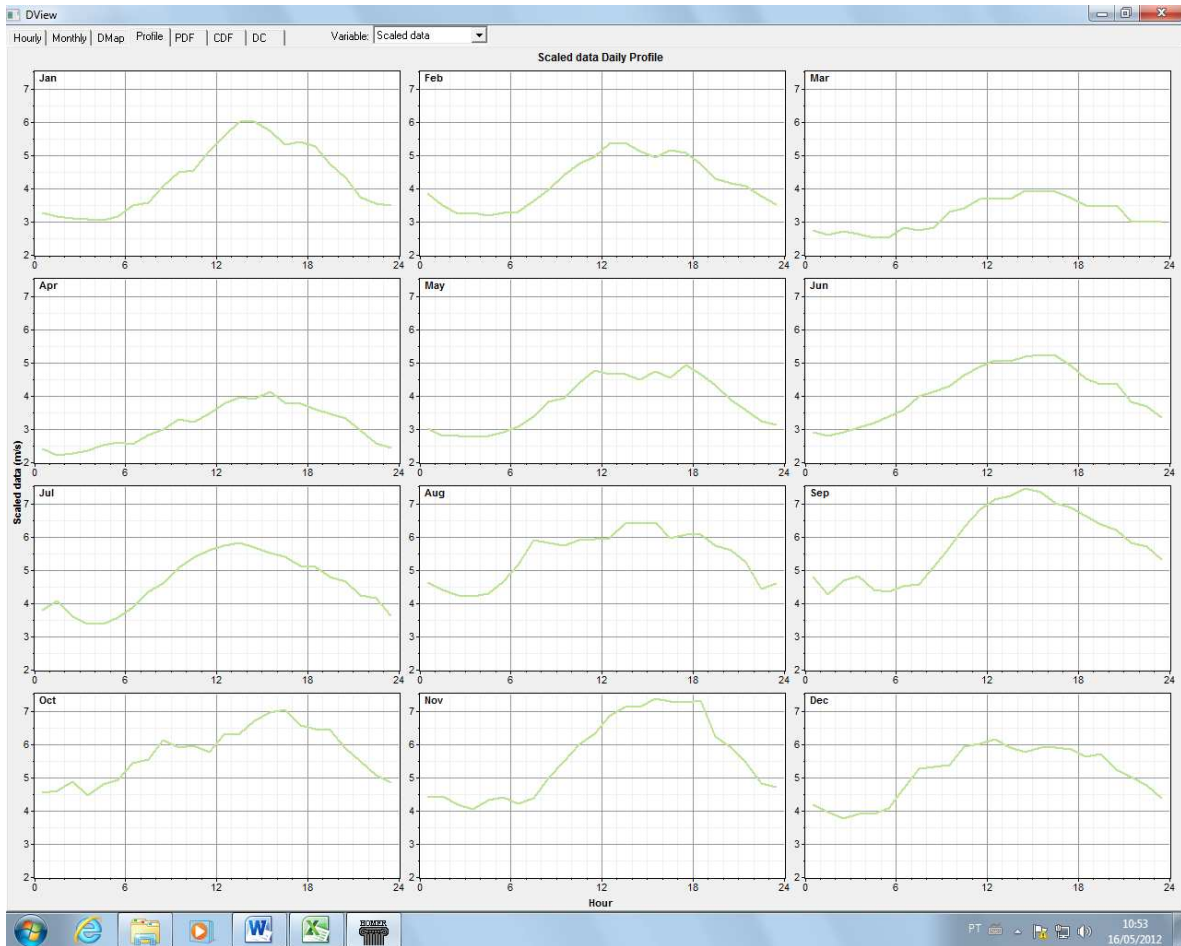
Scaled annual average (m/s)

## Anexo I– Dados de Irradiação solar por dia típico de todos os meses do ano obtidos através do *Homer*



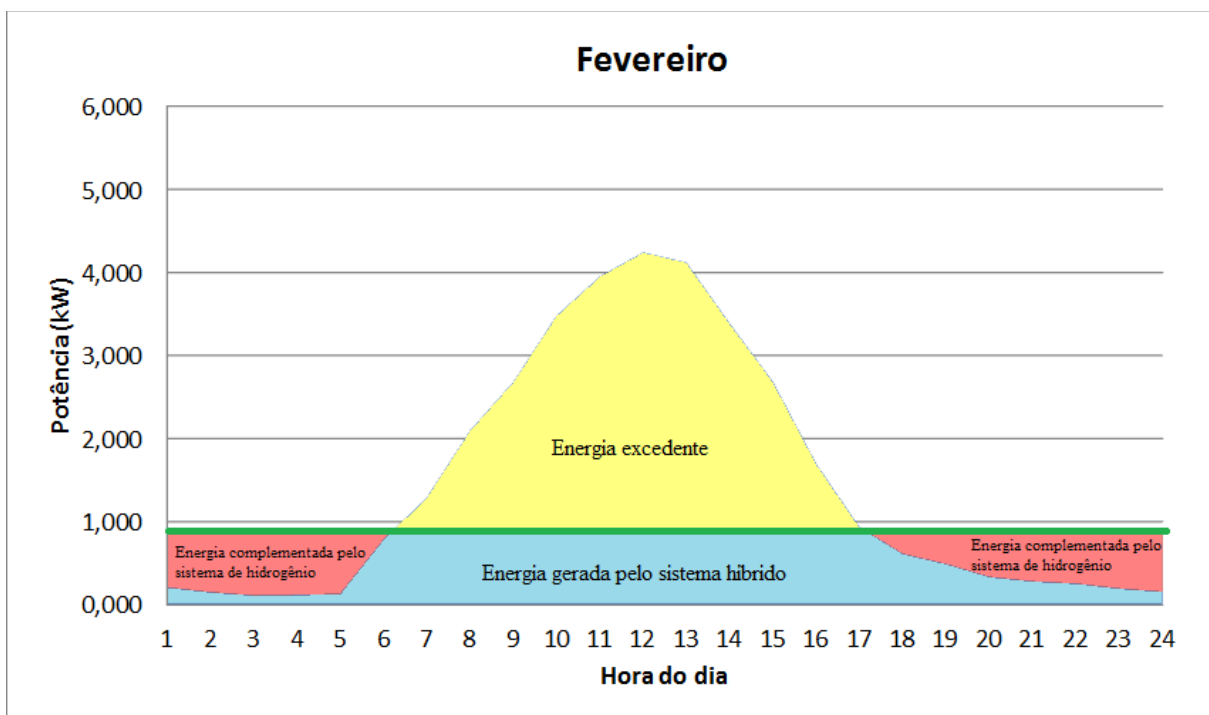
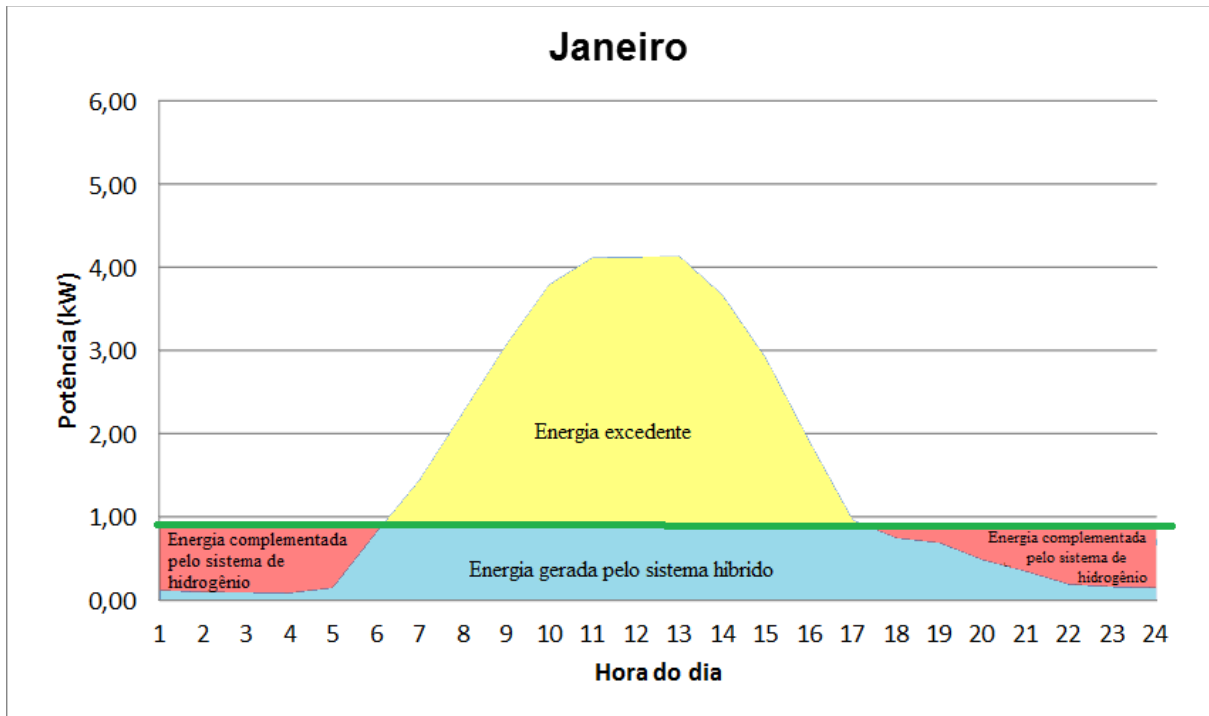
Fonte: Programa Computacional Homer

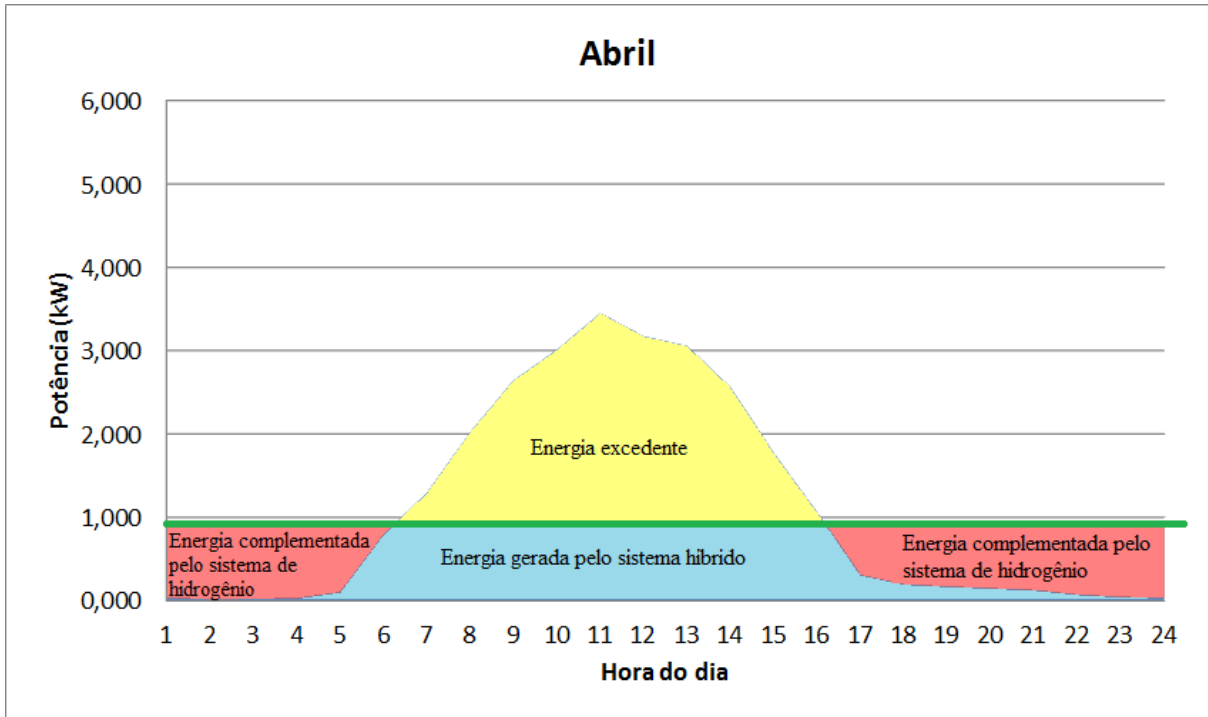
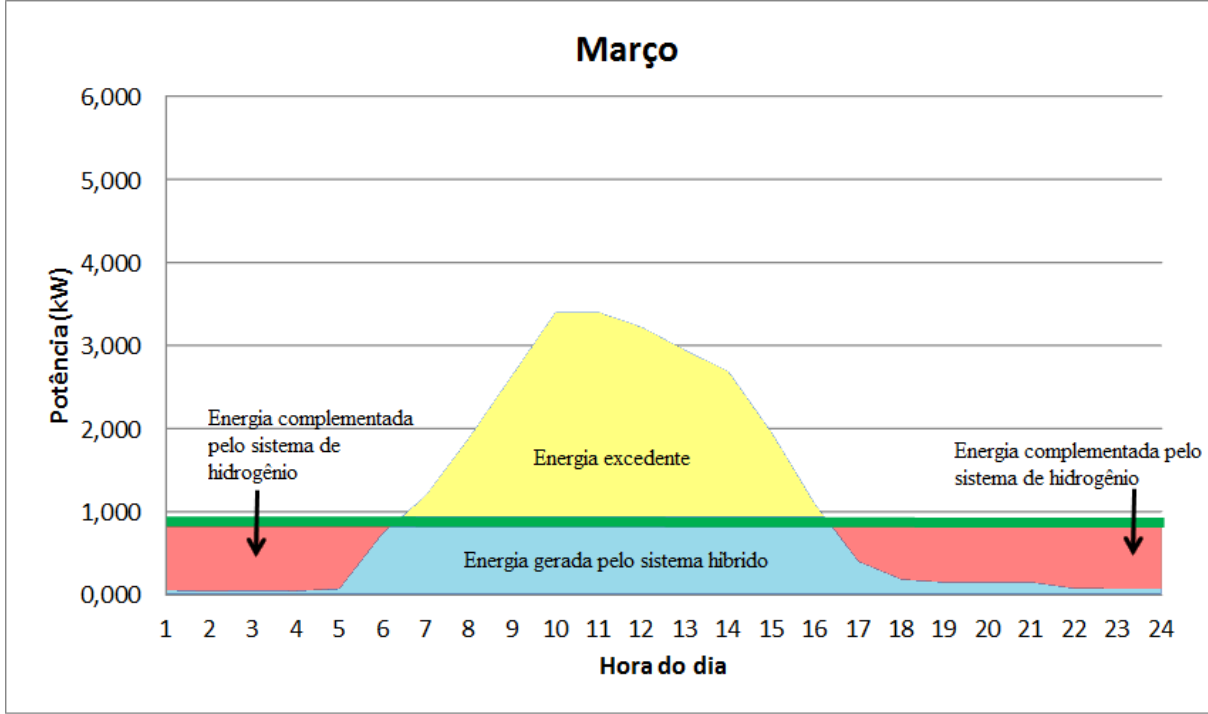
## Anexo J– Dados de velocidades média do vento a 30 m de altura por dia típico de todos os meses do ano obtidos através do *Homer*

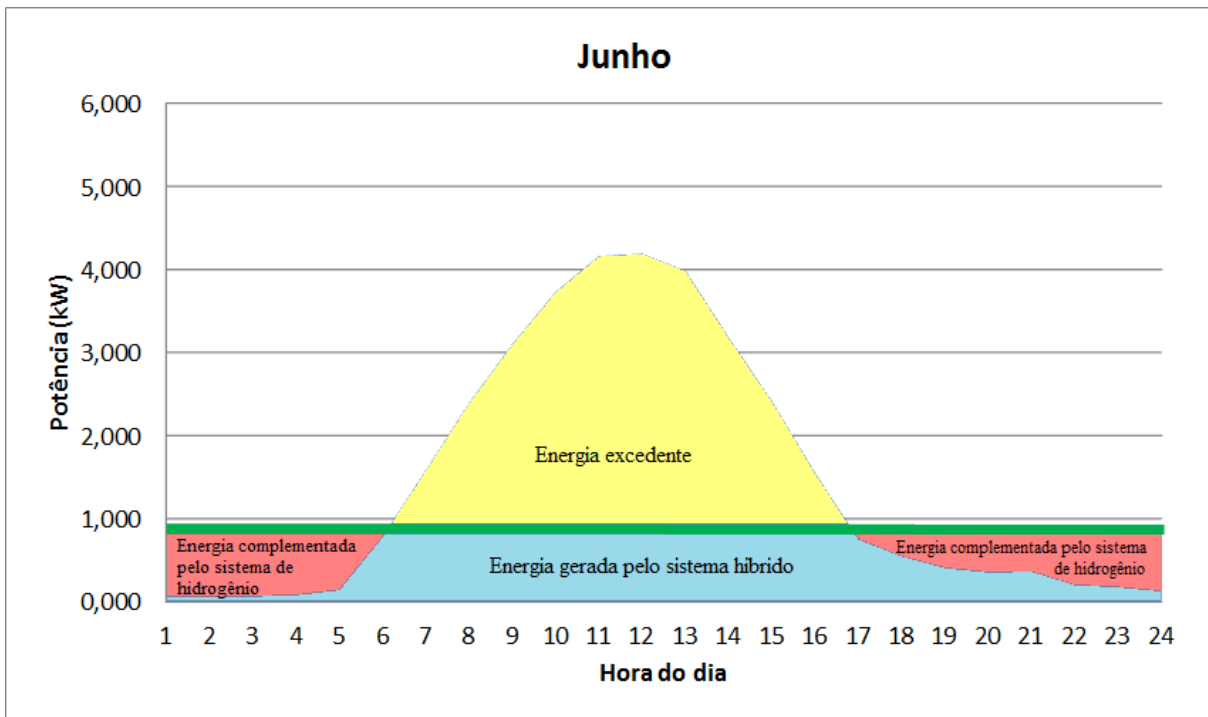
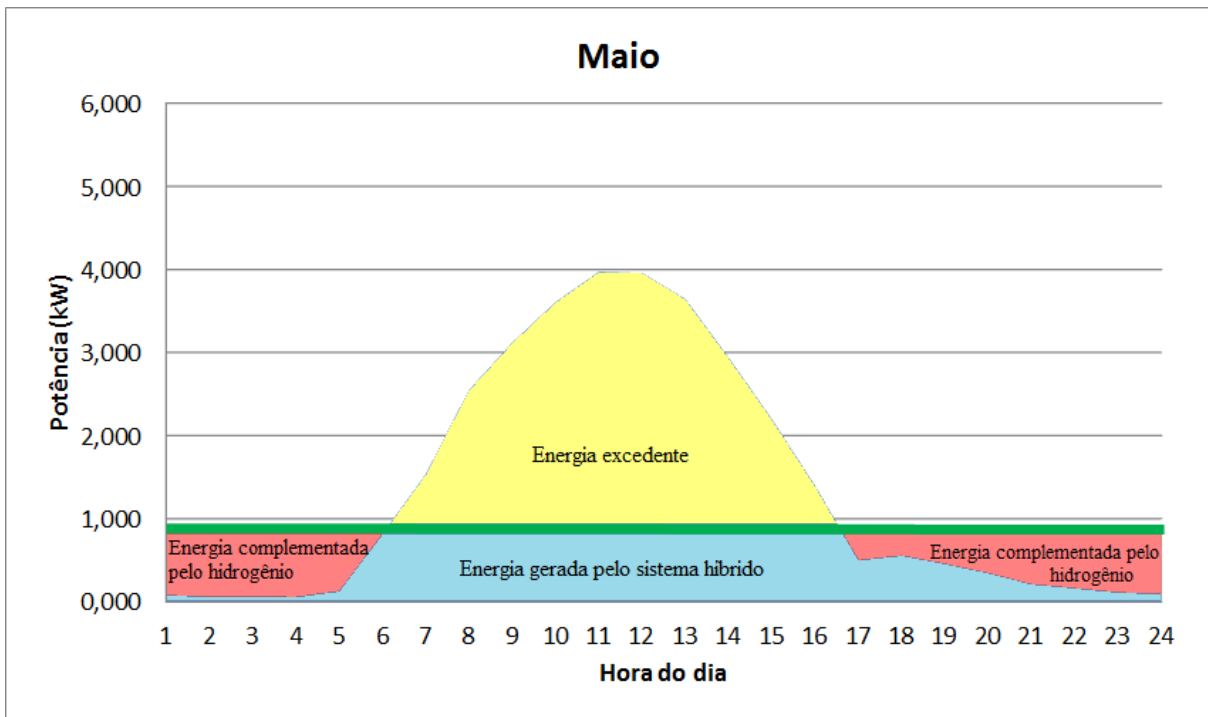


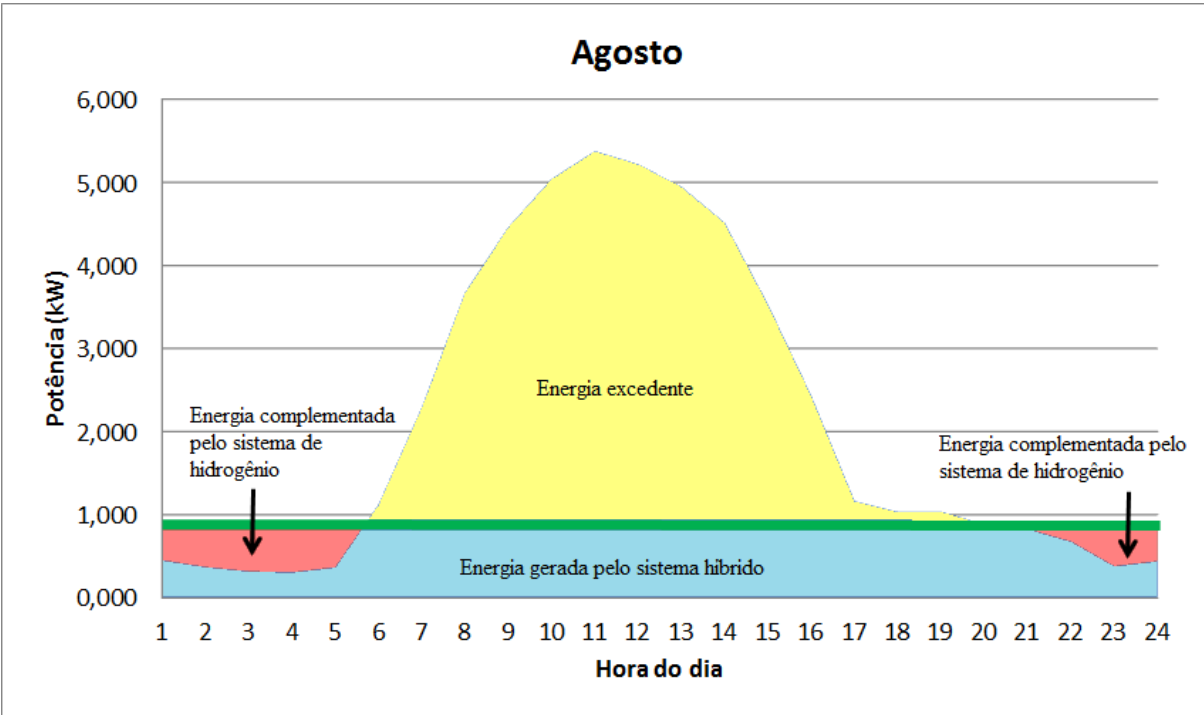
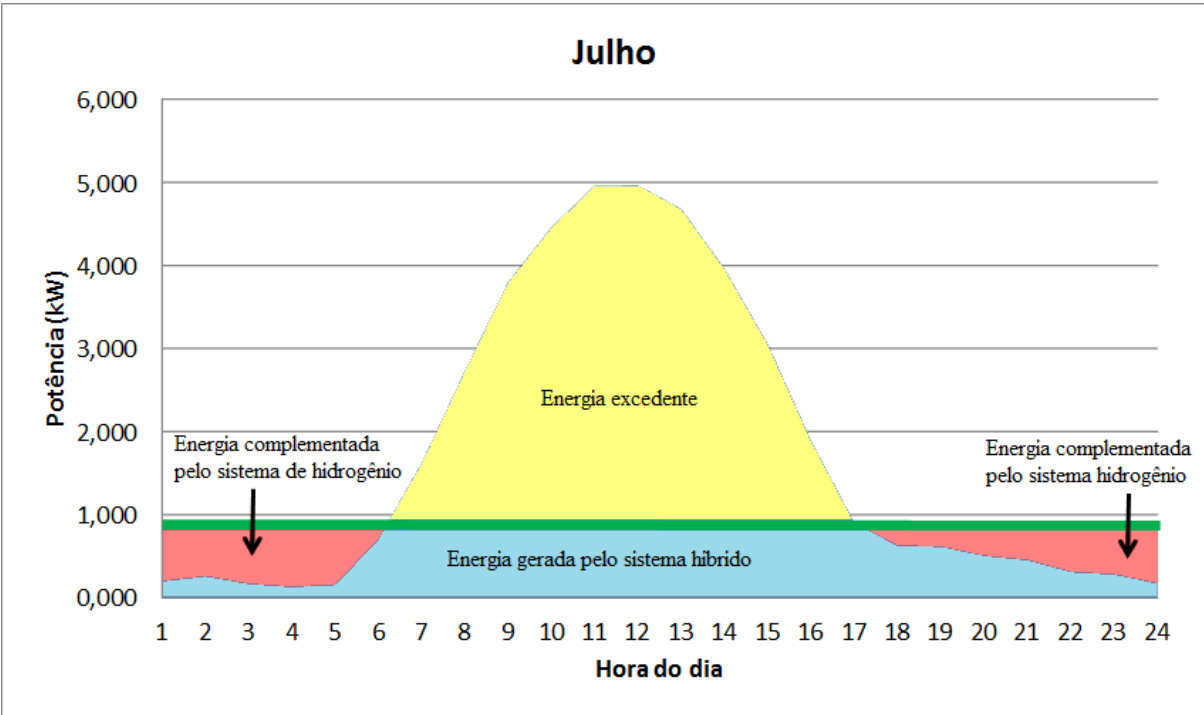
Fonte: Programa Computacional Homer

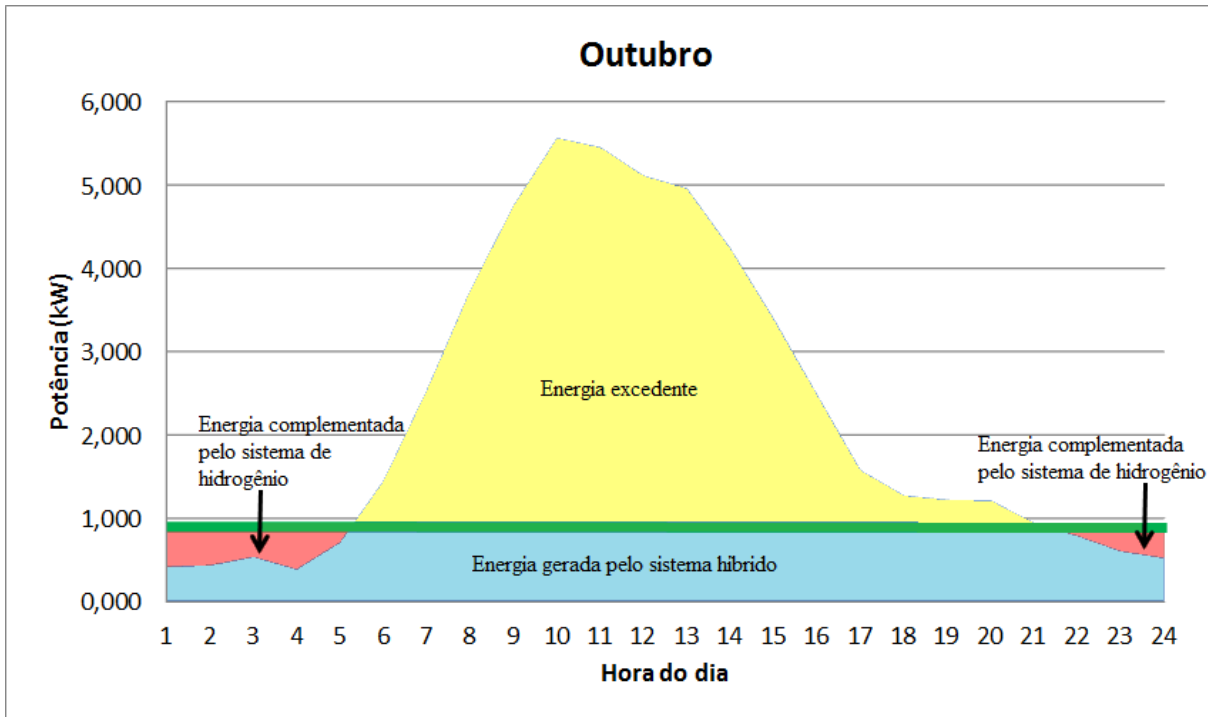
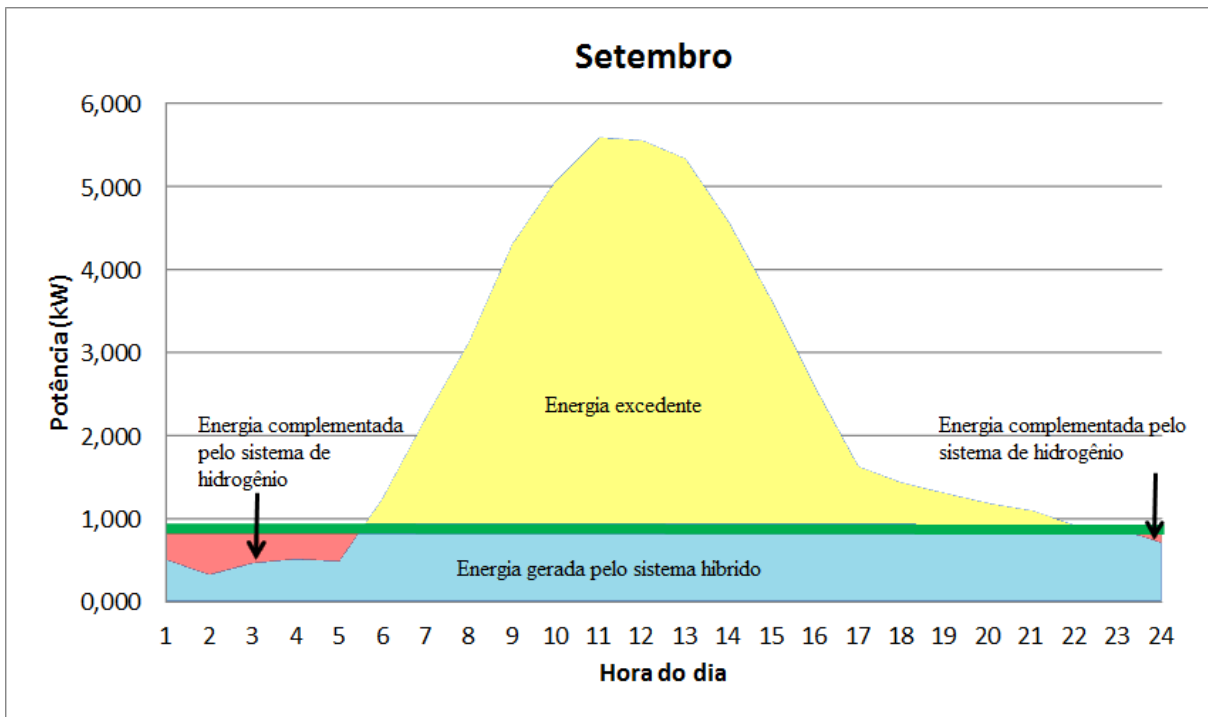
## Apêndice A- Comportamento do sistema com produção de hidrogênio eletrolítico e sua reconversão em eletricidade em todos os meses do ano



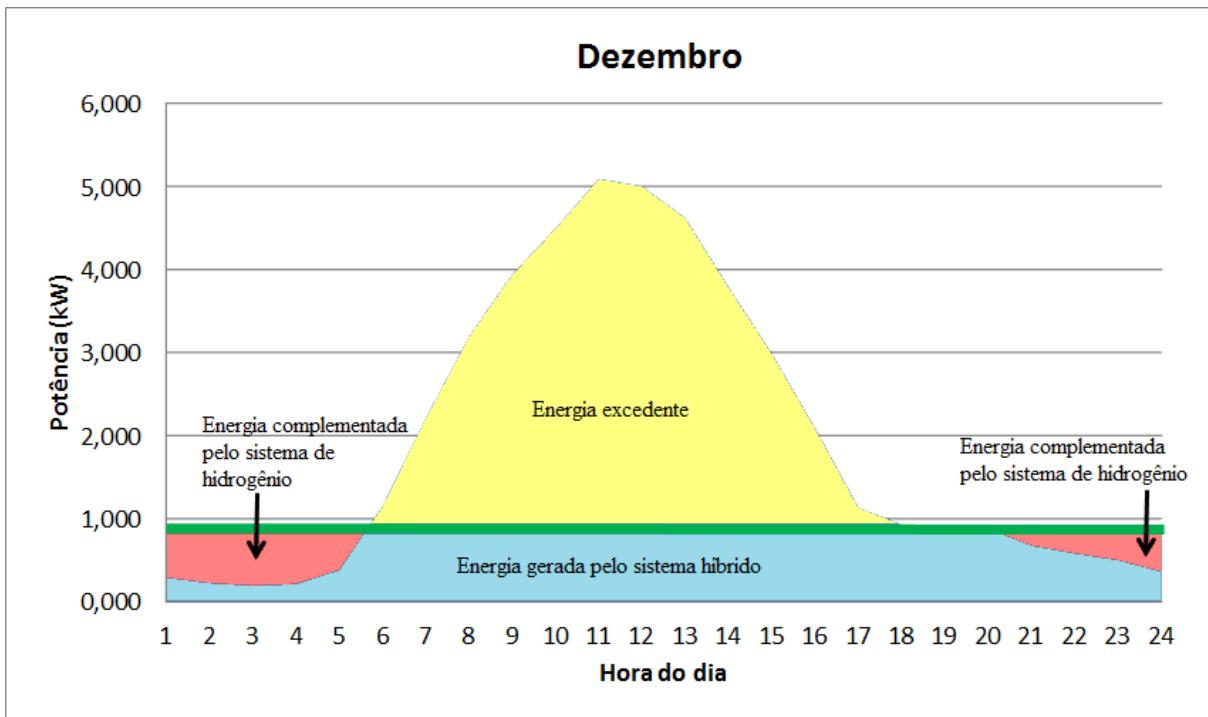
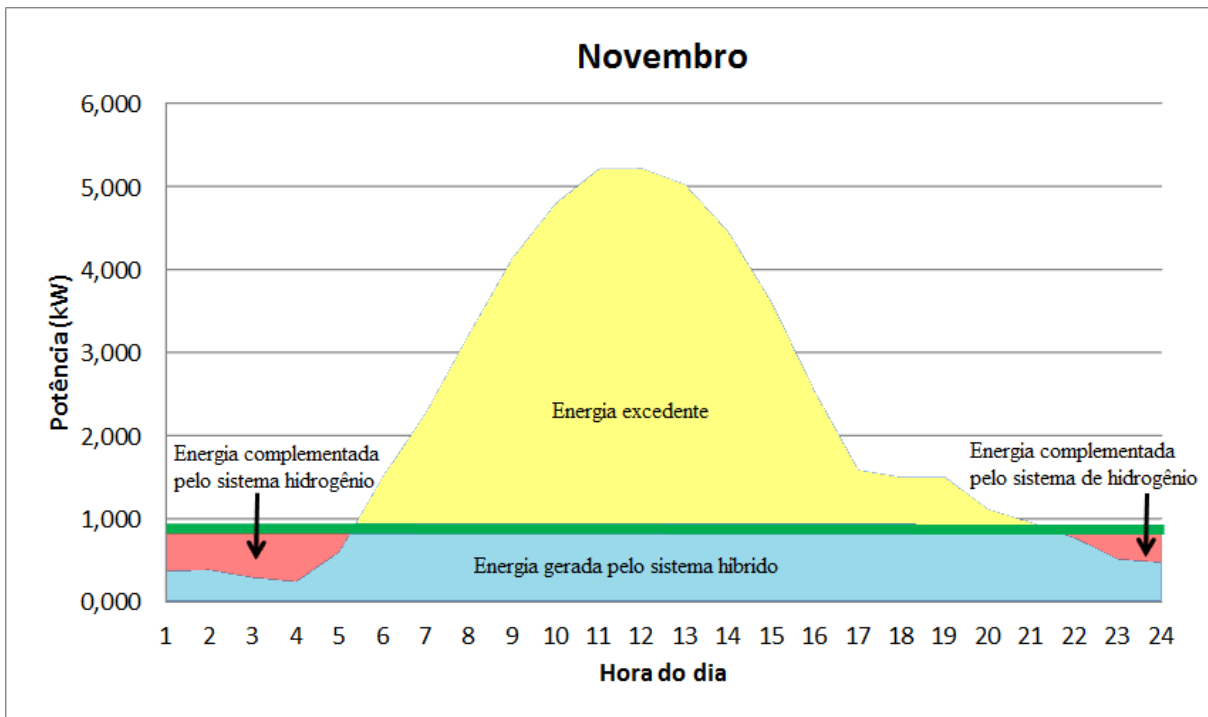












## Apêndice B- Comportamento do sistema com armazenamento por banco de baterias em todos os meses do ano

