

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

REBECA CATUNDA PEREIRA MACHADO

**FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA A PARTIR
DE SISTEMAS HÍBRIDOS RENOVÁVEIS**

FORTALEZA

2013

REBECA CATUNDA PEREIRA MACHADO

FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA A PARTIR DE
SISTEMAS HÍBRIDOS RENOVÁVEIS

Dissertação de Mestrado apresentada à
Coordenação do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica do Centro de
Tecnologia, da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial para obtenção do grau
de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Eletrônica de Potência
e Acionamentos Elétricos.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de
Carvalho

FORTALEZA

2013

REBECA CATUNDA PEREIRA MACHADO

FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA A PARTIR DE
SISTEMAS HÍBRIDOS RENOVÁVEIS

Dissertação de Mestrado apresentada à
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia, da
Universidade Federal do Ceará, como requisito
parcial para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Elétrica. Área de concentração:
Eletrônica de Potência e Acionamentos
Elétricos.

Aprovada em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr.-Ing. Sérgio Daher
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Kleber Araújo Lima
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Douglas Bressan Riffel
Universidade Federal de Sergipe (UFS)

A Deus,
Aos meus pais Pereira e Liduina,
A meu esposo Carlos Renato,
Aos meus familiares e amigos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo que tem feito na minha vida.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho, pelo seu incentivo, apoio e dedicação no desenvolvimento desta dissertação, com valiosas indicações, sugestões e críticas.

Ao Professor Manuel Rangel Borges Neto, pelo acompanhamento e colaboração na realização desse trabalho.

Aos professores do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, que muito contribuíram com seus ensinamentos para o meu crescimento acadêmico e profissional.

Aos meus pais, Pereira e Liduina, pelo exemplo, suporte e dedicação em todos os momentos da minha vida e sem os quais não alcançaria essa conquista.

Ao meu esposo, Renato, pelo carinho, compreensão e apoio durante os períodos de dedicação aos meus estudos.

À minha família, amigos e a todos que direta ou indiretamente ajudaram na colaboração deste trabalho.

“As pessoas mais felizes não têm as melhores coisas. Elas sabem fazer o melhor das oportunidades que aparecem em seus caminhos.”

(Clarice Lispector)

RESUMO

A presente dissertação apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta computacional de auxílio ao planejamento energético, chamada de GDHER (Geração Distribuída de Sistemas Híbridos de Energias Renováveis). A ferramenta pode ser utilizada sem custo, uma vez que foi desenvolvido através do Calc, um programa de planilha eletrônica semelhante ao Excel, que faz parte de um pacote de vários aplicativos livres da Broffice. Após identificar algumas limitações dos principais *softwares* disponíveis no mercado, foi desenvolvida uma nova ferramenta adaptada à realidade brasileira, principalmente voltada às áreas rurais e isoladas, que utiliza o português como idioma e possui uma interface bastante amigável, facilitando sua compreensão e operação pelo usuário. A ferramenta permite o usuário fazer dimensionamento de algumas modalidades de geração de energia elétrica a partir de tecnologias limpas como a solar fotovoltaica, aerogeradores e biodigestores, e através de uma análise financeira, esses sistemas são comparados com a extensão da rede de energia elétrica, permitindo que o usuário obtenha um prognóstico de viabilidade. A ferramenta também permite fazer o dimensionamento e a análise financeira de configurações de sistemas híbridos como fotovoltaico-eólico, fotovoltaico-biodigestor e biodigestor-eólico, a fim de encontrar a configuração ótima para o projeto. Para validação da ferramenta, foi feito um estudo de caso, e a partir da análise financeira e análise de sensibilidade, a modalidade de fornecimento de energia elétrica mais viável para os sistemas individualizados são os biodigestores, em seguida são os módulos fotovoltaicos e a rede elétrica, e por último são os aerogeradores. De acordo com a análise financeira dos sistemas híbridos, a configuração mais lucrativo é 75% da demanda sendo atendida por biodigestores e 25% por módulos fotovoltaicos. Os resultados são apresentados através de tabelas e gráficos para melhor compreensão do usuário. Com todas essas características a ferramenta proposta permite dimensionar sistemas com máxima eficiência e menor custo, obtendo assim, sistemas mais adequados e confiáveis tanto do ponto de vista técnico como financeiro.

Palavras-chave: Geração Distribuída. Sistemas híbridos. Energias renováveis.

ABSTRACT

This work presents the development of a computational tool to aid in energy planning, called GDHER (Distributed Generation of Hybrid Systems for Renewable Energy). The program can be used without cost, since it was developed through the Calc, a program of electronic spreadsheet similar to Excel, which is part of a package of several free applications of Broffice. After identifying some limitations of the main software available on the market, we obtained a new tool adapted to the Brazilian reality, especially to rural and isolated areas, which uses the portuguese as language and has an interface very user friendly, facilitating the understanding and operation of the program by the user. The program allows the user to do the scaling of some methods of electricity generation from clean technologies such as solar photovoltaics, wind turbines and biodigesters and through a financial analysis, these systems are compared with the extension of the network of electric energy, allowing the user get a prognosis of viability. The tool also allows the user to do the scaling and the financial analysis of some configurations of hybrid systems like photovoltaic-wind, photovoltaic-digester and wind-digester, in order to find the optimal configuration for the project. For validation of the program, it was done a case study, and from the financial analysis and sensitivity analysis, the modality of electric energy supply more viable for individualized systems are the digesters, then are the photovoltaic modules and the electrical network, and finally are the wind turbines. According to the financial analysis of hybrid systems, the configuration more profitable is 75% of demand being served by biodigesters and 25% by photovoltaic modules. The results are presented using tables and graphs for better understanding of the user. With all these features the tool allows to scale systems with maximum efficiency and lower costs, thereby obtaining, more appropriate and reliable systems both from the technical point of view as financial.

Keywords: Distributed generation. Hybrid systems. Renewables energies.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Painéis fotovoltaicos.....	21
Figura 2.2 – Componentes de um sistema fotovoltaico.....	22
Figura 2.3 – Aerogerador.....	24
Figura 2.4 – Componentes de um sistema eólico de baixa potência.....	26
Figura 2.5 – Componentes de um biodigestor.....	28
Figura 2.6 – Gráfico da capacidade mundial instalada de energia eólica de 1996 a 2011....	31
Figura 2.7 – Oferta interna por fonte em 2011.....	34
Figura 2.8 – Mapa da radiação solar global do Brasil.....	35
Figura 2.9 – Gráfico da evolução da geração eólica no Brasil.....	37
Figura 2.10 – Mapa do potencial eólico no Brasil.....	38
Figura 3.1 – Modelagem do sistema no software HOMER.....	45
Figura 3.2 – Resultados das simulações no HOMER.....	45
Figura 3.3 – Gráfico dos resultados das simulações no HOMER.....	46
Figura 3.4 – Custos do sistema no HOMER.....	46
Figura 3.5 – Modelagem do sistema no HOGA.....	48
Figura 3.6 – Simulação, otimização e estratégias de controle no HOGA.....	49
Figura 3.7 – Tela inicial do RETScreen.....	49
Figura 3.8 – Tela de análise de emissões de gases.....	50
Figura 3.9 – Tela de análise financeira do RETScreen.....	50
Figura 4.1 – Diagrama da estrutura operacional do GDHER.....	56
Figura 4.2 – Legenda da codificação das células.....	57
Figura 4.3 – Página inicial do GDHER	58
Figura 4.4 – Tela da demanda elétrica da instalação.....	58
Figura 4.5.– Planilha dos valores atualizados.....	61
Figura 4.6 – Dados de entrada do sistema FV.....	62
Figura 4.7 – Dados de saída do sistema FV.....	66
Figura 4.8 – Dados de entrada do sistema eólico.....	67
Figura 4.9 – Tela inicial do programa ventos.....	67
Figura 4.10 – Dados de entrada do programa ventos.....	68
Figura 4.11 – Dados de saída do sistema eólico.	69
Figura 4.12 – Dados de entrada do sistema.....	70

Figura 4.13 – Dados de saída do gerador a biogás.....	71
Figura 4.14 – Caixa d'água de fibra de vidro utilizada como gasômetro.....	71
Figura 4.15 – Biodigestor modelo indiano.....	73
Figura 4.16 – Dados de saída do biodigestor.....	76
Figura 4.17 – Análise da biomassa.....	77
Figura 4.18 – Opções de acréscimo de animais.....	78
Figura 5.1 – Análise financeira para cada um dos sistemas.....	83
Figura 5.2 – Gráficos da análise financeira.....	84
Figura 5.3 – Dimensionamento do sistema híbrido 25% FV e 75% BI.....	92
Figura 5.4 – Gráficos da análise financeira dos sistemas híbridos.....	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Capacidade instalada mundial de energia FV até 2011.....	29
Tabela 2.2 – Capacidade instalada mundial de energia eólica até 2011.....	31
Tabela 2.3 – Capacidade acumulada de geração elétrica no Brasil por tipo de usina.....	33
Tabela 2.4 – Capacidade instalada no Brasil em 2011 por tipo de usina.....	34
Tabela 2.5 – Evolução da geração eólica no Brasil.....	37
Tabela 3.1 – Principais características do HOMER, Hybrid 2, HOGA e RETScreen.....	53
Tabela 4.1 – Fator de diversidade.....	59
Tabela 4.2 – Fator de demanda para residências.....	59
Tabela 4.3 – Fator de correção para os módulos fotovoltaicos.....	63
Tabela 4.4 – Especificações das caixas d’água de fibra de vidro.....	72
Tabela 4.5 – Produção de biogás a partir de dejetos de animais.....	77
Tabela 5.1 – Parâmetros de entrada dos sistemas.....	82
Tabela 5.2 – Análise financeira para extensão da rede elétrica igual a 1 km.....	85
Tabela 5.3 – Análise financeira para extensão da rede elétrica igual a 2 km.....	85
Tabela 5.4 – Análise financeira para extensão da rede elétrica igual a 3 km.....	85
Tabela 5.5 – Análise financeira para extensão da rede elétrica igual a 4 km.....	85
Tabela 5.6 – Análise financeira para extensão da rede elétrica igual a 5 km.....	86
Tabela 5.7 – Análise financeira para extensão da rede elétrica igual a 6 km.....	86
Tabela 5.8 – Análise financeira para extensão da rede elétrica igual a 7 km.....	86
Tabela 5.9 – Análise financeira para extensão da rede elétrica igual a 14 km.....	86
Tabela 5.10 – Análise financeira para extensão da rede elétrica igual a 15 km.....	86
Tabela 5.11 – Análise financeira para 1 hora de sol pleno.....	87
Tabela 5.12 – Análise financeira para 2 horas de sol pleno.....	87
Tabela 5.13 – Análise financeira para 3 horas de sol pleno.....	87
Tabela 5.14 – Análise financeira para 4 horas de sol pleno.....	88
Tabela 5.15 – Análise financeira para 5 horas de sol pleno.....	88
Tabela 5.16 – Análise financeira para velocidade do vento igual a 3 m/s.....	88
Tabela 5.17 – Análise financeira para velocidade do vento igual a 7 m/s.....	88
Tabela 5.18 – Análise financeira para velocidade do vento igual a 10 m/s.....	88
Tabela 5.19 – Análise financeira para profundidade do solo igual a 2 m.....	89
Tabela 5.20 – Análise financeira para profundidade do solo igual a 2,5 m.....	89

Tabela 5.21 – Análise financeira para profundidade do solo igual a 3 m.....	89
Tabela 5.22 – Análise financeira para profundidade do solo igual a 3,5 m.....	89
Tabela 5.23 – Análise financeira para profundidade do solo igual a 4 m.....	90
Tabela 5.24 – Análise financeira para profundidade do solo igual a 4,5 m.....	90
Tabela 5.25 – Análise financeira para quantidade de animais igual a 8.....	90
Tabela 5.26 – Análise financeira para quantidade de animais igual a 10.....	90
Tabela 5.27 – Análise financeira para quantidade de animais igual a 40.....	90
Tabela 5.28 – Análise financeira dos sistemas híbridos.....	91

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	Objetivos.....	18
1.2	Distribuição dos capítulos.....	18
2	SISTEMAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA A PARTIR DE ENERGIAS RENOVÁVEIS.....	20
2.1	Principais tecnologias de uso de energias renováveis.....	21
2.1.1	<i>Solar fotovoltaica.....</i>	<i>21</i>
2.1.2	<i>Aerogerador.....</i>	<i>23</i>
2.1.3	<i>Biodigestor.....</i>	<i>27</i>
2.2	Mercado mundial de energias renováveis	28
2.2.1	<i>Mercado mundial de energia solar fotovoltaica.....</i>	<i>28</i>
2.2.2	<i>Mercado mundial de energia eólica.....</i>	<i>31</i>
2.3	Mercado brasileiro de energias renováveis.....	33
2.3.1	<i>Energia solar no Brasil.....</i>	<i>35</i>
2.3.2	<i>Energia eólica no Brasil.....</i>	<i>36</i>
2.3.3	<i>Microgeração.....</i>	<i>39</i>
2.3.4	<i>Considerações finais.....</i>	<i>39</i>
3	PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO PARA SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	41
3.1	Introdução.....	41
3.2	Tipos de ferramentas computacionais.....	42
3.3	Programas de simulação.....	44
3.4	Considerações finais.....	54
4	DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA COMPUTACIONAL GDHER.....	55
4.1	Descrição da ferramenta computacional.....	55
4.2	Estrutura operacional da ferramenta.....	56
4.3	Tela inicial.....	58
4.4	Demanda elétrica.....	58
4.5	Valores atualizados.....	60
4.6	Energia solar fotovoltaica.....	62

4.6.1	<i>Dados de entrada.....</i>	62
4.6.1.1	<i>Dados de entrada do sistema.....</i>	62
4.6.1.2	<i>Dados de entrada do módulo fotovoltaico.....</i>	63
4.6.1.3	<i>Dados de entrada das baterias.....</i>	64
4.6.2	<i>Dados de saída.....</i>	64
4.6.2.1	<i>Dimensionamento dos módulos fotovoltaicos.....</i>	64
4.6.2.2	<i>Dimensionamento do banco de baterias.....</i>	65
4.6.2.3	<i>Dimensionamento do controlador de carga.....</i>	65
4.6.2.4	<i>Dimensionamento do inversor.....</i>	65
4.7	<i>Energia eólica.....</i>	66
4.7.1	<i>Dados de entrada.....</i>	66
4.7.2	<i>Dados de saída.....</i>	68
4.7.2.1	<i>Dimensionamento dos aerogeradores.....</i>	68
4.7.2.2	<i>Dimensionamento do banco de baterias, controladores de carga e inversores.....</i>	68
4.8	<i>Biodigestores.....</i>	69
4.8.1	<i>Dados de entrada.....</i>	69
4.8.2	<i>Dados de saída.....</i>	70
4.8.2.1	<i>Dimensionamento do gerador a biogás.....</i>	70
4.8.2.2	<i>Dimensionamento do biodigestor.....</i>	71
4.8.2.3	<i>Dimensionamento do gasômetro.....</i>	74
4.8.2.4	<i>Dimensionamento da caixa de carga e descarga.....</i>	75
4.8.2.5	<i>Análise dos custos do biodigestor.....</i>	75
4.8.2.6	<i>Análise da biomassa.....</i>	77
4.9	<i>Análise financeira.....</i>	78
4.9.1	<i>Dados de Entrada.....</i>	78
4.9.1.1	<i>Rede Elétrica.....</i>	79
4.9.1.2	<i>Solar Fotovoltaica.....</i>	79
4.9.1.3	<i>Eólica.....</i>	79
4.9.1.4	<i>Biogás.....</i>	79
4.9.2	<i>Dados de Saída.....</i>	80
4.10	<i>Análise financeira dos sistemas híbridos.....</i>	81
5	<i>ESTUDO DE CASO.....</i>	82
5.1	<i>Resultados e gráficos dos sistemas individualizados.....</i>	82

5.2	Análise de sensibilidade dos sistemas individualizados a partir da variação de alguns parâmetros de entrada.....	84
5.3	Resultados e gráficos dos sistemas híbridos.....	91
5.4	Considerações finais.....	93
6	CONCLUSÃO.....	96
6.1	Desenvolvimentos futuros.....	98
	REFERÊNCIAS.....	99

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, questões como igualdade social, eficiência econômica e preservação ambiental vêm assumindo um papel importante no processo de desenvolvimento, que começa a ser compreendido não apenas pela quantidade, mas pela qualidade, onde a principal meta é a qualidade de vida.

A energia elétrica foi o ponto de partida para o desenvolvimento econômico e social, mas que, entretanto resultou na excessiva utilização dos recursos naturais e a sua degradação. Existe um elo entre energia, desenvolvimento econômico e emissões de CO₂, no qual alguns países pretendem quebrar fazendo o uso de fontes de energias limpas e renováveis.

O Brasil é um país com grandes extensões territoriais e com grande diversidade de clima e relevo. Apesar disso, o sistema energético brasileiro é considerado homogêneo, pois mais de 74% da eletricidade do país é gerada a partir de usinas hidrelétricas.

Esse sistema convencional não consegue atender todo o país, pois é organizado para o atendimento de grandes conglomerados urbanos com mercados fortemente concentrados, deixando as regiões de difícil acesso e baixa renda, carentes de eletricidade. Portanto, é necessário buscar novas tecnologias de geração elétrica para suprir essas regiões desfavorecidas e ainda, garantir o abastecimento da demanda futura, diminuindo assim, a dependência em relação a um único recurso energético.

Um levantamento feito pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) junto às distribuidoras de energia aponta que o Brasil ainda possui um milhão de residências sem luz. Essa população está localizada principalmente nas Regiões Norte e Nordeste, as quais possuem os mais baixos níveis de desenvolvimento. [1]

Alguns fatores contribuem para a inviabilidade técnico-econômica da extensão da rede convencional para áreas rurais e isoladas como, por exemplo, existe uma dificuldade de acesso a algumas propriedades, devido ao alto nível de dispersão dessas áreas e ao seu tamanho, além disso, a baixa renda familiar e a pouca demanda por energia fazem com que os sistemas energéticos convencionais, caracterizados pela centralização da produção e distribuição, nem sempre se apresentam como a melhor opção para atender esse mercado. [2]

Desta forma, os habitantes destas localidades não fazem parte das prioridades das concessionárias de energia, ficando sem eletricidade e, conseqüentemente, apresentando sérios problemas com relação ao seu modo de produção, à qualidade de vida e à degradação intensiva de seus recursos naturais, fazendo com que não haja desenvolvimento nestas

comunidades. Por outro lado, a energia não é fornecida por falta de desenvolvimento, gerando um círculo vicioso.

Portanto, uma saída para esse problema é a geração distribuída. Existem vários fatores que induzem o interesse em geração distribuída no país, como, por exemplo: atendimento a comunidades rurais e isoladas, diversificação da matriz energética, redução no pico de demanda, permitindo-se postergar ou até mesmo evitar investimentos em transmissão e distribuição; redução das perdas; aumento na confiabilidade do sistema, melhorando a qualidade da energia e assegurando fornecimento sem interrupções e o uso de tecnologias limpas ou fontes de energias renováveis. [3]

A geração distribuída a partir de energias renováveis, tanto trazem benefícios para o meio ambiente, diminuindo a necessidade de utilização de recursos fósseis e reduzindo a emissão de gás carbônico, como também, proporcionam um desenvolvimento sustentável com a utilização de matéria prima e mão de obra local, compatível com as condições socioeconômicas da população.

Uma promissora aplicação no mundo das tecnologias de conversão de energia que utiliza os recursos renováveis, como o solar, o eólico e a biomassa, é a instalação de sistemas híbridos de energia, que apesar de, eventualmente, possuírem custos iniciais de investimentos maiores, demonstram maior confiabilidade do que sistemas que dependem apenas de uma única fonte de energia.

Entretanto, sistemas híbridos de energias renováveis são caracterizados por um alto grau de complexidade na fase de dimensionamento e de análise financeira, pois a quantidade de parâmetros a serem avaliados torna o processo de planejamento energético consideravelmente mais trabalhoso. Por esta razão, o uso de ferramentas computacionais é de grande importância na construção e na avaliação do desempenho de sistemas de geração de energia elétrica, a fim de encontrar a configuração ótima para o projeto. [4]

No mercado, há uma diversidade de programas que auxiliam no planejamento energético, como por exemplo: Homer, Hybrid2, Hoga, Retscreen, Insel e Trnsys. Essas ferramentas possuem diferentes linguagens de programação, precisões e metodologias de cálculo. A maioria foi desenvolvida em países industrializados e considera valores de produtos e serviços do próprio país, dificultando que as análises financeiras sejam feitas também em países em desenvolvimento. A principal língua utilizada é o inglês; portanto, para uma aplicação no Brasil, principalmente em zonas rurais ou em áreas isoladas, a compreensão da ferramenta se torna bem mais difícil. Além disso, os principais programas comerciais possuem interfaces bastante amigáveis para o usuário, mas não apresentam os modelos

matemáticos utilizados, somando ao fato que grande parte dessas ferramentas computacionais não é livre e a compra da licença para seu uso possui custo elevado. [5]

Portanto, surge a necessidade de desenvolver uma ferramenta computacional para auxílio na decisão do melhor sistema híbrido sob critérios financeiros utilizando como referencial a realidade brasileira.

1.1 Objetivos

Desta forma, esta dissertação de mestrado tem como objetivos:

- Apresentar uma ferramenta computacional de auxílio ao planejamento energético, chamada de Geração Distribuída de Sistemas Híbridos de Energias Renováveis (GDHER), que possua um ambiente agradável e de fácil compreensão, utilize como idioma o português, seja desenvolvida em uma plataforma livre e que possa ser utilizada sem custos;
- Fazer análise de sistemas de energia com tecnologias renováveis, como solar fotovoltaica, aerogeradores e biodigestores para atender comunidades rurais ou isoladas não eletrificadas;
- Dimensionar e fazer análise financeira de sistemas autônomos e híbridos com máxima eficiência e menor custo, utilizando como referencial a realidade brasileira e, obtendo assim, sistemas com configurações mais adequadas e confiáveis do ponto de vista técnico e financeiro.

1.2 Distribuição dos capítulos

Na presente dissertação, o capítulo 1 apresenta a introdução do trabalho, onde são descritas as justificativas e os objetivos.

O capítulo 2 relata uma fundamentação teórica sobre os sistemas de geração distribuída e algumas tecnologias de uso de energias renováveis como a solar fotovoltaica, os aerogeradores e os biodigestores. E apresenta o panorama das energias renováveis no mundo e no Brasil.

O capítulo 3 descreve o estado da arte dos programas de simulação e dimensionamento mais usados no mundo para sistemas de energia elétrica, mostrando suas principais características e aplicações.

No capítulo 4 é apresentada a ferramenta computacional adaptada à realidade brasileira, desenvolvida a partir de um programa livre de planilha eletrônica chamado CALC. São descritos os modelos matemáticos utilizados para dimensionar as diferentes modalidades de geração distribuída como a energia solar fotovoltaica, energia eólica e gerador a biogás. E a partir dos dados de entrada inseridos pelo usuário, são apresentados resultados e gráficos da análise financeira dos sistemas híbridos.

Finalmente, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 SISTEMAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA A PARTIR DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

A Geração distribuída caracteriza-se como um sistema autônomo de produção de eletricidade que tem como finalidade assegurar por meios próprios o fornecimento da energia necessária, sem recorrer à rede elétrica nacional. A necessidade de energia pode ser pontual e esporádica, apenas durante um determinado período, ou pode ser prolongada no tempo e ter um caráter regular. Um sistema autônomo de produção de energia elétrica pode basear-se em módulos fotovoltaicos, aerogeradores, hidroelétricas, geradores a gasolina ou a diesel, entre outros.

Os sistemas distribuídos que se têm revelado mais eficientes e equilibrados são os híbridos, porque utilizam mais do que uma fonte de energia. Como exemplo, os módulos fotovoltaicos e os aerogeradores nem sempre estão a produzir, os módulos não produzem de noite e os aerogeradores só produzem se houver vento. Se o sistema incluir módulos fotovoltaicos e um aerogerador, tem possibilidade de garantir uma produção de energia mais regular.

Essa geração elétrica em pequena escala para consumidores integrados ou isolados, localizados perto do ponto de consumo final é a modalidade de geração que mais cresce no mundo. No Brasil, onde cerca de 81% da oferta total de energia elétrica é proveniente de usinas hidrelétricas, existem vários fatores que induzem o interesse em geração distribuída, como, por exemplo:

- Redução no pico de demanda, permitindo-se postergar ou até mesmo evitar investimentos em transmissão e distribuição;
- Redução das perdas;
- Aumento na confiabilidade do sistema, contribuindo para a melhoria na qualidade da energia em áreas congestionadas e em locais onde uma alta qualidade de energia é exigida;
- Atendimento a comunidades isoladas ou remotas.

Além disso, um sistema complementar ao convencional a partir de fontes renováveis de energia, pode também trazer benefícios sociais, econômicos e ambientais, com impactos locais e regionais. [3]

Nesse contexto, o presente capítulo pretende descrever e comparar, levando em consideração aspectos técnicos e econômicos, algumas tecnologias para sistemas de geração distribuída de eletricidade a partir de fontes renováveis, como fotovoltaica, eólica e biomassa.

2.1 Principais tecnologias de uso de energias renováveis

2.1.1 Solar fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica (FV) é obtida através da conversão de energia da luz em eletricidade. A operação básica de transformar radiação solar em eletricidade é feita pelo conjunto de células solares conectadas entre si em painéis FV. A figura 2.1 apresenta uma ilustração de painéis FV.

O princípio físico de funcionamento dos módulos fotovoltaicos é denominado efeito fotovoltaico (foto = luz; volt = unidade de tensão elétrica), que é o aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da luz. O material mais comum utilizado na fabricação dessas células é o silício (Si) mono ou multicristalino. [7]

Figura 2.1 – Painéis fotovoltaicos.



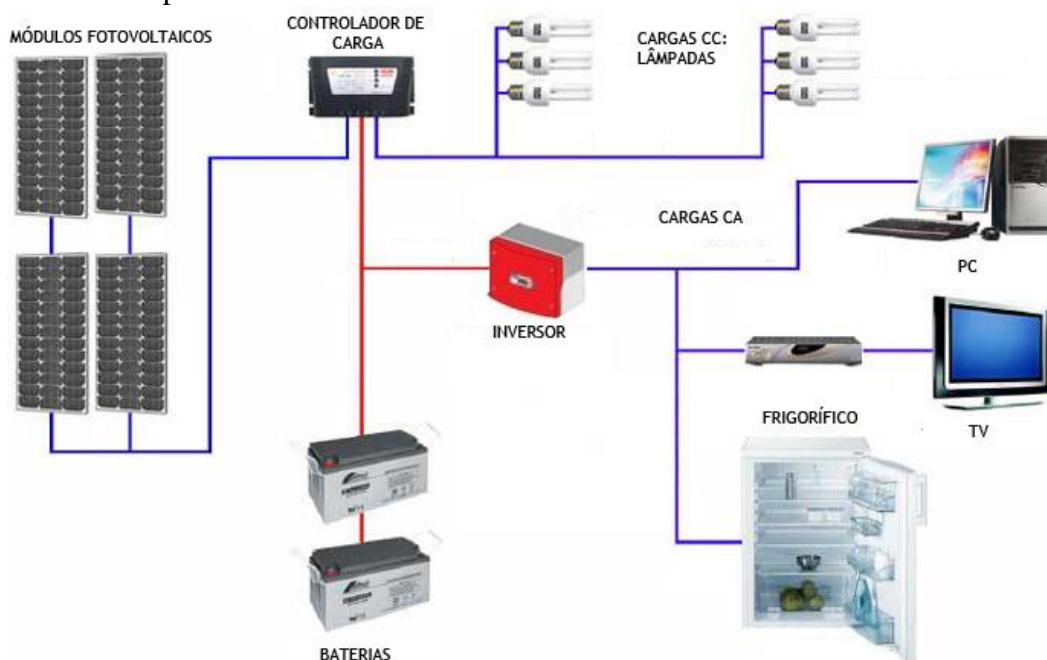
Os sistemas FV podem fornecer energia tanto para cargas em corrente contínua como para cargas em corrente alternada. A alimentação de cargas em corrente contínua pode ser realizada de forma direta; entretanto, para a alimentação de cargas em corrente alternada, é necessária à utilização de inversores.

Sistemas com tecnologia FV podem atender tanto aos sistemas isolados, ou seja, sistemas que não estão conectados à rede de distribuição, como também aos sistemas conectados à rede. Os módulos FV, quando utilizados em sistemas autônomos, requerem a utilização de baterias, que armazenam energia e garantem a continuidade do serviço em períodos de baixa irradiação solar e à noite.

Os sistemas fotovoltaicos isolados tanto podem abastecer às residências, fornecendo eletricidade para iluminação, refrigeração e outras cargas baixas de energia, como também para uma ampla escala de aplicações, tais como em telecomunicação, refrigeração de medicamentos e vacinas em postos de saúde, bombeamento de água e outros. [8]

Já nos sistemas FV conectados à rede elétrica, os consumidores podem usar a energia da rede elétrica convencional para complementar a quantidade de energia gerada pelos painéis FV, caso haja algum aumento do consumo de energia em sua residência ou estabelecimento comercial, como podem também vender a energia gerada pelo sistema para a distribuidora, caso use menos energia do que a gerada pelo sistema FV. [9]

Figura 2.2 – Componentes de um sistema fotovoltaico.



Fonte: Eng2Solutions (2013).

Conforme a figura 2.2, o sistema FV geralmente é composto por três partes básicas: o gerador fotovoltaico, que é composto pelas células FVs projetadas para converter energia solar em eletricidade; os elementos de condicionamento de potência e proteção, que é formado pelo controlador de carga, inversor e seguidor do ponto de máxima potência (MPPT); e por fim, as baterias, que armazenam a energia gerada.

As principais vantagens da tecnologia FV são: a energia solar é uma fonte renovável, limpa e sustentável; não há emissão de resíduos ou ruídos; os painéis FV praticamente não precisam de manutenção, apenas uma limpeza temporária; a vida útil do sistema dura em média vinte e cinco anos; e para locais remotos e de difícil acesso, a utilização de sistemas FV reduziria os investimentos com linhas de transmissão. [10]

Contudo a energia FV possui algumas desvantagens como: baixo rendimento no processo de conversão solar-elétrico, alto custo na compra e instalação dos equipamentos; além disso, em períodos de baixa irradiação e à noite, a produção de energia diminui bastante, o que obriga a existência de meios de armazenamento da energia, como por exemplo, as baterias que possuem uma reduzida vida útil e eficiência. [10]

Apesar desses pontos negativos, a geração solar FV é uma das tecnologias de geração de eletricidade que mais cresce no mundo. Os motivos são o crescente interesse dos investidores, as políticas de incentivos, a redução dos custos de equipamentos e as novas tecnologias.

2.1.2 Aerogerador

O princípio de funcionamento de uma turbina eólica baseia-se na conversão da energia cinética, que é resultante do movimento de rotação causado pela incidência do vento nas pás do rotor da turbina, em energia elétrica.

A turbina eólica é uma máquina que absorve parte da potência cinética do vento através de um rotor aerodinâmico, convertendo em potência mecânica, a qual é convertida em potência elétrica através de um gerador elétrico.

Um aerogerador é ilustrado na figura 2.3 e é formado essencialmente por um conjunto de três pás, com perfis aerodinâmicos eficientes, impulsionadas por forças predominantemente de sustentação, acionando geradores que operam a velocidade variável, para garantir uma alta eficiência de conversão. A instalação de turbinas eólicas tem interesse em locais em que a velocidade média anual dos ventos seja superior a 3,6 m/s. [11]

Figura 2.3 – Aerogerador



Os principais componentes de uma instalação eólica são: [11]

- **Pás do rotor** – um conjunto normalmente de três pás deve ser leve, forte e possuir um bom rendimento aerodinâmico para captar melhor o vento.
- **Torre** - é o elemento que sustenta o rotor e a nacelle na altura adequada ao funcionamento da turbina eólica.
- **Rotor** – é o componente onde são fixadas as pás da turbina e que transforma energia cinética dos ventos em energia mecânica de rotação. Todo o conjunto é conectado a um eixo que transmite a rotação das pás para o gerador, muitas vezes, através de uma caixa de engrenagens.
- **Nacelle** - é o compartimento instalado no alto da torre que abriga todo o mecanismo do gerador, caixa multiplicadora, freios, embreagem, mancais, controle eletrônico e sistema hidráulico.
- **Caixa de engrenagens** – geralmente presente em aerogerador baseados em máquinas de indução, presente na maioria das instalações ligadas à rede elétrica, funciona como elemento de ligação entre a baixa rotação das pás e a elevada rotação do gerador.
- **Gerador** – elemento responsável pela geração de eletricidade. É o componente que tem função de converter a energia mecânica do eixo em energia elétrica.

- **Mecanismos de controle** – responsáveis por diferentes tarefas, como o acionamento do deslocamento angular das pás em torno do eixo e do acompanhamento da direção do vento pela nacele.
- **Anemômetro** - Mede a intensidade e a velocidade dos ventos, normalmente, de 10 em 10 minutos.
- **Biruta** – Captam a direção do vento, visando posicionamento ótimo da nacele.

Um sistema eólico pode ser utilizado em duas aplicações: sistemas autônomos e sistemas interligados à rede.

Os sistemas autônomos são caracterizados por operarem isoladamente do sistema elétrico e geralmente utilizam sistemas de armazenamento de energia. Quando este armazenamento é feito através de baterias, é necessário o uso de dispositivos de controle para evitar danos nas mesmas, causados por sobrecargas e descargas profundas. Outra forma de armazenar energia é na forma de energia potencial gravitacional com a finalidade de armazenar a água bombeada em reservatórios elevados para posterior utilização. Alguns sistemas isolados não necessitam de armazenamento, como no caso dos sistemas para irrigação onde toda a água bombeada é diretamente consumida.

Os sistemas conectados à rede representam uma fonte complementar ao sistema elétrico, pois toda energia gerada é lançada diretamente à rede elétrica, não necessitando de sistemas de armazenamento. [12]

Existem também sistemas que apresentam mais de uma fonte de energia como, por exemplo, turbinas eólicas, geradores diesel, módulos FV, entre outras, esses sistemas são chamados de sistemas híbridos de energia. Nestes sistemas, os geradores eólicos podem representar um fator de economia de combustível, com custos atraentes para locais onde não se dispõe de interligação com a rede de distribuição e dependam de geradores a diesel para fornecimento de energia elétrica. Apesar do gerador a diesel garantir regularidade e estabilidade no fornecimento de energia, dispensando sistemas de armazenamento, o transporte deste combustível apresenta um custo adicional, tornando a implementação de aerogeradores muito atraente. [12]

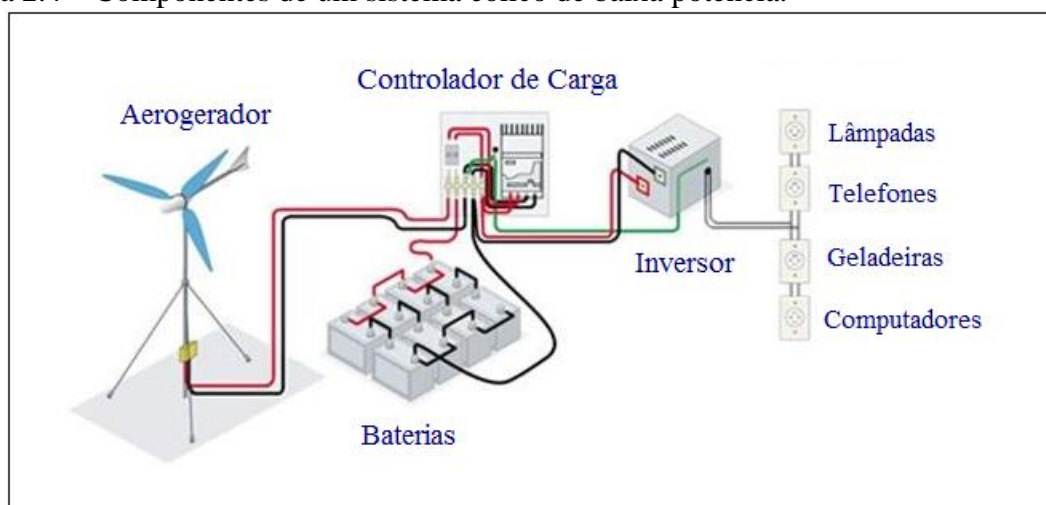
A utilização de várias formas de geração de energia elétrica aumenta a complexidade do sistema e exige a otimização do uso de cada uma das fontes. Nesses casos, é necessário realizar um controle de todas as fontes para que haja máxima eficiência e otimização dos fluxos energéticos na entrega da energia para o usuário.

Em geral, os sistemas híbridos são empregados em sistemas de médio porte destinados a atender um número maior de usuários. Devido à grande complexidade de

arranjos e multiplicidade de opções, a forma de otimização do sistema torna-se um estudo particular a cada caso.

A figura 2.4 apresenta os componentes de um sistema eólico, que geralmente é composto por três partes básicas: aerogerador; unidade de controle de potência; que são constituídos por controladores de carga e, se necessários, conforme a aplicação, inversores e unidades de armazenamento.

Figura 2.4 – Componentes de um sistema eólico de baixa potência.



Fonte: Portal-Energia (2012).

A produção de energia elétrica através de aerogeradores apresenta várias vantagens como: é uma fonte de energia inesgotável, segura e renovável; não emite gases de efeito estufa, gases poluentes e nem gera resíduos; os parques eólicos são de rápida construção (inferior a 6 meses) e compatíveis com outros usos e utilizações do terreno como a agricultura e a criação de gado; aumentam o número de empregos; toda a eletricidade produzida pela energia eólica evita a poluição resultante do funcionamento de uma central elétrica a carvão ou a gás e possui uma excelente rentabilidade de investimento. [13]

Apesar de todos os pontos positivos, é preciso, antes de apostar na energia eólica, fazer estudos de mapeamento, medição e previsão dos ventos, por causa da intermitência das condições climáticas. Além disso, pode-se citar como desvantagens: os impactos sonoros causados pelos ruídos das turbinas; impactos visuais, pois algumas pessoas acreditam que os parques eólicos apresentam efeito paisagístico negativo; o movimento das hélices pode provocar a morte de aves; possíveis perturbações na fauna do local; e o custo elevado das turbinas eólicas. [13]

2.1.3 Biodigestor

O biogás, uma das formas de aproveitamento da biomassa, é uma mistura produzida naturalmente pela digestão anaeróbia das bactérias em material orgânico encontrado em resíduos de animais e vegetais, decomposição do lixo urbano, lodo de esgoto e tratamento de efluentes domésticos.

O biogás é uma mistura gasosa composta em média por: 55 - 66 % de metano, 35 - 45 % de dióxido de carbono, 0 - 3 % nitrogênio, 0 - 3 % de sulfeto de hidrogênio, 0 - 1 % de hidrogênio e 0 - 1 % de oxigênio. Essa porcentagem varia de acordo com as características do substrato e as condições de funcionamento do processo de fermentação como: carga orgânica, pressão e temperatura. [14]

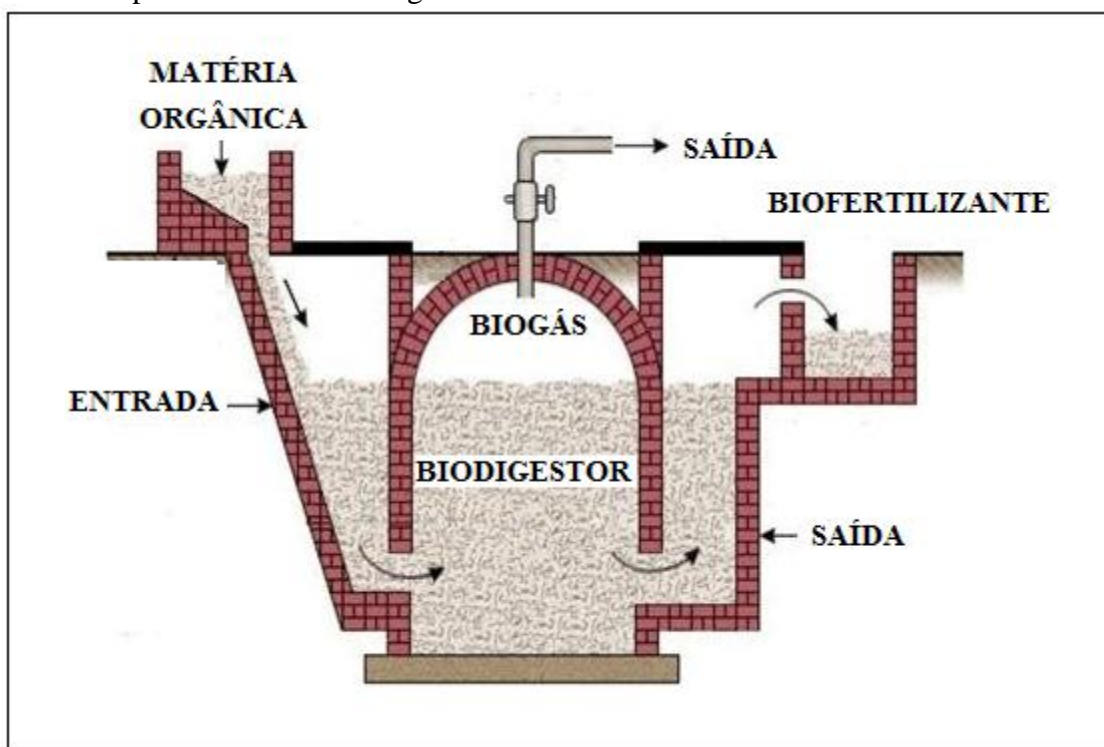
O biogás pode ser produzido artificialmente com o uso de um biodigestor, que é um local onde ocorre a fermentação da biomassa, podendo ser um tanque, uma caixa, ou uma vala revestida e coberta por um material impermeável. O importante é que, com exceção dos tubos de entrada e saída, o biodigestor seja totalmente vedado e dentro de determinados limites de temperatura, pressão, teor de umidade e acidez. Estabelecendo assim, um ambiente anaeróbio onde os microorganismos degradam o material orgânico, transformando-o em biogás e biofertilizante.

O biofertilizante é um poderoso adubo orgânico que pode ser usado na própria fazenda ou ainda vendido como uma mercadoria, a fim de receber renda adicional para a comunidade rural. Enquanto o biogás pode ser usado como energia para cozinhar ou até mesmo como um combustível utilizado para geração de energia elétrica, térmica ou mecânica, alimentando motores de combustão capazes de conduzir as bombas de água e geradores elétricos em uma propriedade rural, contribuindo para a redução dos custos de produção.

Como mostra a figura 2.5, em geral, o biodigestor é formado pelos seguintes componentes básicos: tanque de processamento da biomassa, gasômetro, caixa de carga da matéria orgânica, caixa de descarga do biofertilizante, saída de biogás e cano guia. [14]

Existem diferentes modelos de biodigestores, sendo os principais o indiano, o chinês e o batelada. Nessa dissertação foi adotado o modelo indiano e suas principais características são: há um carregamento diário de matéria-prima, produção constante de biogás e biofertilizante, facilidade no controle da pressão de saída do gás produzido e esse modelo é bastante difundido no Brasil. [15]

Figura 2.5 – Componentes de um biodigestor.



Fonte: Deganutti, R.; Palhaci, M. C. J. P.; Rossi, M.; Tavares, R.; Santos, C. (2002) [15]

As principais vantagens da tecnologia dos biodigestores são: o biogás é uma fonte de energia renovável e um combustível de alta qualidade, podendo substituir a gasolina e o diesel, além disso, é uma alternativa ao uso do GLP (gás de cozinha). Através do seu processo evita-se a liberação de metano para a atmosfera que provoca um aumento do efeito estufa, não há geração de resíduos, pois há um reaproveitamento da matéria orgânica e pode produzir biofertilizante.

Porém, os biodigestores também apresentam algumas desvantagens como: o valor do custo inicial e custo de manutenção, na sua produção há emissão de dióxido de carbono, os gases presentes possuem cheiro desagradável e, caso a biodigestão não funcione corretamente, há formação de gases tóxicos.

2.2 Mercado mundial de energias renováveis

2.2.1 Mercado Mundial de Energia Solar Fotovoltaica

Até o final de 2011, a capacidade instalada total de sistemas FV em todo o mundo era superior a 67 GW. Em um ano, toda essa potência pôde gerar 80 bilhões de kWh, energia suficiente para atender as necessidades anuais de fornecimento de eletricidade para mais de 20

milhões de famílias em todo o mundo. A energia solar FV é a terceira energia renovável mais importante a nível mundial em termos de capacidade instalada, só perde para energia hidráulica e eólica.

Aproximadamente 27,7 GW de capacidade de painéis FV foram instalados no mundo durante 2011, quase o dobro da quantidade do ano anterior, que foi de 16,6 GW. Os dois maiores mercados, Alemanha e Itália, são responsáveis por quase 60% do crescimento do mercado mundial no ano passado. Se a China, os EUA, a França e Japão forem incluídos, a proporção aumenta para 86% do total das instalações de PV em 2011. A taxa anual de crescimento de capacidade instalada acumulada em 2011 foi de 82%, acima da taxa de crescimento em 2010 que foi de 68%. [16]

A tabela 2.1 mostra os sete principais mercados mundiais em termos de nova capacidade instalada durante 2011 e capacidade instalada acumulada até esse período.

Tabela 2.1 – Capacidade instalada mundial de energia solar FV até 2011

Países	Nova capacidade instalada em 2011(MW)	Capacidade instalada até 2011 (MW)
1. Alemanha	7.500	24.700
2. Itália	9.000	12.500
3. Japão	1.100	4.700
4. Estados Unidos	1.600	4.200
5. Espanha	400	4.200
6. China	2.000	2.900
7. França	1.500	2.500
Resto do Mundo	4.550	11.650
Total	27.650	67.350

Fonte: European Photovoltaic Industry Association –EPIA (2012).

A maioria dos países que se destacam por possuírem as maiores gerações de energia a partir de sistemas FV como: Alemanha, Itália, Japão, Estados Unidos, Espanha, China e França, possuem programas governamentais de incentivos, através do fornecimento de subsídios pelo governo. Alguns fatores motivaram à elaboração de tais programas, por

exemplo: a preocupação com o meio ambiente; a adoção de uma matriz energética sustentável; o incentivo a indústria de componentes fotovoltaicos; a redução de gases que provocam o efeito estufa; a diversificação das fontes de energia e o barateamento da tecnologia. O incentivo varia de um país para o outro devido ao seu perfil e todos eles alcançaram resultados positivos para o desenvolvimento dessa tecnologia. [17]

A Alemanha é o país líder no setor fotovoltaico com 24,82 GW de capacidade instalada. Medidas de apoio ao mercado continuam a incentivar novas instalações de sistemas FV, resultando em 7,5 GW de capacidade instalada em 2011, quase a mesma quantidade do ano de 2010.

Na Itália, a potência instalada de FV atingiu 9,3 GW durante 2011, mais de 60% de toda sua capacidade acumulada, que é de 12,8 GW. Os painéis FV fornecem 10 TWh de eletricidade, ou seja, cerca de 3% do consumo nacional de energia.

No Japão, um total de 1.100 MW de painéis FV foi instalado durante 2011, um aumento de 30% com relação ao ano anterior. A capacidade instalada acumulada de sistemas FV no Japão em 2011 chegou a 4,7 GW ou 2,1% da geração total de eletricidade nacional. [18]

Nos Estados Unidos, a capacidade instalada de painéis FV aumentou para 1.600 MW em 2011, quase o dobro de crescimento com relação ao ano anterior. Mais de 60.000 sistemas FV foram conectados a rede durante esse período, somando uma capacidade instalada acumulada de 4.200 MW. Atingindo cerca de 0,4% da capacidade total de geração de energia do país, sendo que 9,4% das novas capacidade instaladas de geração de eletricidade são de painéis FV.

Nos últimos anos, a Espanha vinha registrando as maiores taxas de expansão de geração solar, contudo devido à crise econômica no qual atravessa, esse cenário se alterou. Em 2011, a potência instalada foi de 400 MW, acumulando uma capacidade instalada de 4.200 MW. Atualmente, 99% das instalações FVs são sistemas conectados à rede, com o número total de painéis FV superior a 57.600. [18]

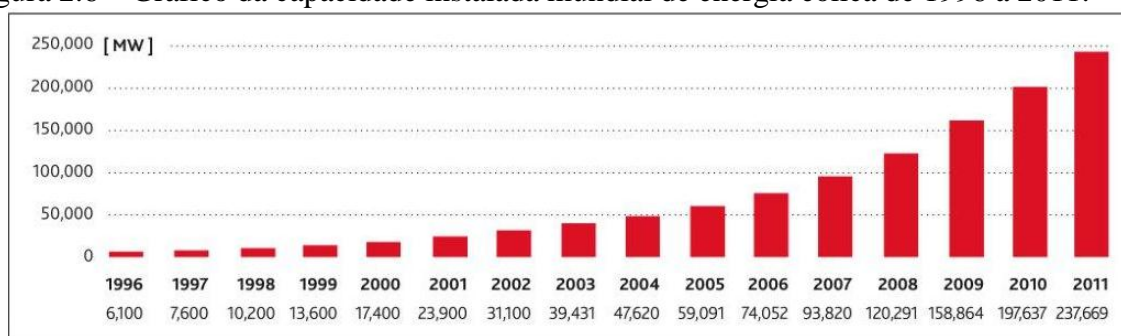
Na China, cerca de 2 GW de FV foram instalados em 2011, um aumento de quatro vezes com relação a 2010. A capacidade total instalada chegou a 2.900 GW, enquanto que, há quatro anos, era de apenas 160 MW.

A França representa o sétimo lugar nos países com maior capacidade instalada somando 2.500 MW. Apenas no ano de 2011, foram conectados à rede 1.500 MW de energia FV, 780 MW a mais que em 2010, representando um aumento de mais de 50%. [18]

2.2.2 Mercado mundial de energia eólica

Até 2011, a potência mundial instalada de energia eólica era de aproximadamente 238 GW como mostra a figura 2.6. Apenas em 2011, o mercado mundial de energia eólica cresceu cerca de 6% em relação a 2010, e os 40,5 GW de novas instalações eólicas foram frutos de grandes investimentos que somam cerca de 68.000 milhões de dólares. [19]

Figura 2.6 – Gráfico da capacidade instalada mundial de energia eólica de 1996 a 2011.



Fonte: Global Wind Report - GWEC (2012).

A tabela 2.2 apresenta os principais países responsáveis pelo crescimento da energia eólica no mercado global.

Tabela 2.2 – Capacidade instalada mundial de energia eólica até 2011

Países	Capacidade (MW)	Participação Global (%)
China	62.364	26,2
Estados Unidos	46.919	19,7
Alemanha	29.060	12,2
Espanha	21.674	9,1
Índia	16.084	6,8
França	6.800	2,9
Itália	6.737	2,8
Reino Unido	6.540	2,7
Canadá	5.265	2,2
Portugal	4.083	1,7
Resto do Mundo	32.143	13,5
Total	237.669	100

Fonte: Global Wind Report - GWEC (2012).

Em 2011, a China tomou a frente do processo de expansão do setor eólico, instalando mais 17.631 MW de nova capacidade eólica, quase 50% do total mundial. O país é líder do mercado global com 62.364 MW instalados e sua capacidade eólica representa 26,3% da participação global, mais de 1/4 da capacidade eólica mundial. [19]

Os Estados Unidos aparecem em segundo lugar no ranking, com uma capacidade eólica acumulada de 46.919 MW, o que corresponde a 19,7% do total mundial. Em 2011, o país foi responsável pelo segundo maior investimento no setor, instalando 6.810 MW em 31 estados, o que representa um aumento de 30% em relação aos 5.216 MW instalados em 2010. Isso mostra um crescimento de 17% de energia eólica mundial registrada no período.

Em 2011, o mercado eólico alemão recuperou-se da crise financeira e económica de 2010. Em terceiro lugar do ranking, a Alemanha manteve a sua posição como líder europeu em energia eólica com 29.060 MW de capacidade instalada, com 22.297 turbinas e respondendo por 12,2% do acumulado mundial. O país também ficou na quarta colocação daqueles que mais contribuíram para o crescimento do setor no ano de 2011, foram adicionados 2.086 MW, representando 5% da participação global. Em relação a 2010, o mercado eólico cresceu 30%. [19]

Na Alemanha, a energia eólica gerou 48 TWh de eletricidade em 2011, que representam 7,8% do consumo de eletricidade do país. No total, 20% da eletricidade foram geradas a partir de fontes renováveis de energia em 2011, sendo o vento o maior contribuinte.

O mercado eólico espanhol alcançou o sétimo maior crescimento do setor, registrando um aumento de 1.050 MW de nova capacidade e uma participação global de 2,5%. Em quinze anos, a capacidade total instalada de energia eólica espanhola atingiu 21.674 MW, o que representa 9,1% do potencial dos projetos eólicos mundiais. Depois da Alemanha, a Espanha permanece na segunda posição na Europa em termos de total de capacidade eólica instalada.

O ano de 2011 foi o ano em que a velocidade do vento alcançou a maior média na Espanha. Os parques eólicos do país geraram 42 TWh de eletricidade, respondendo por 15,7% do consumo nacional de energia. Todas as fontes renováveis de energia produziram juntas cerca de 33% da demanda de eletricidade na Espanha e a energia eólica foi a maior contribuinte. Em novembro de 2011, um novo recorde foi alcançado, quando 59,6% da demanda de energia da Espanha, foi fornecido pela energia eólica. [19]

Nesse mesmo ano, o país também teve recorde de novas instalações de energia eólica, acrescentando 3.019 MW de nova capacidade, cerca de 7% do total investido no mundo, ficando com o terceiro melhor desempenho. Com relação à capacidade total

acumulada, o país soma 16.084 MW em projetos eólicos, o quinto maior desempenho mundial, com participação de 6,7%.

A política econômica da Índia é baseada em planos quinquenais. Durante o plano de 2007 a 2012, foi definida uma meta de 9.000 MW até 2012. No começo de 2011, já tinham sido instalados 7.063 MW de energia eólica e até março de 2012, o total instalações eólicas eram cerca de 10.000 MW, superando a meta do plano quinquenal.

Em 2011, a Índia viu 10,3 bilhões dólares investidos em tecnologia limpa, dos quais \$ 4,6 bilhões foram investidos em energia eólica. Esse dinheiro é responsável por 4% de todos os investimentos em energia limpa do mundo em 2011. [19]

A sexta colocação no ranking foi para França que, entre 1996 e 2011, acumulou uma capacidade eólica total de 6.800 MW, com 4.000 turbinas eólicas no país, o que representa 2,9% da participação mundial. Em 2011, o país teve um bom desempenho, novos 830 MW de energia eólica foram conectados à rede de eletricidade francesa, respondendo por 2% do crescimento mundial do setor no período. A energia eólica já produz 2,5% da demanda de eletricidade da França e no mês de dezembro de 2011, esta participação atingiu 7%, ou seja, 5.350 MW. A França tem o segundo maior potencial eólico na Europa e esse recurso é bem distribuído em todo o país. [19]

2.3 Mercado brasileiro de energias renováveis

Tabela 2.3 – Capacidade acumulada de geração elétrica no Brasil por tipo de usina (MW)

	2007	2008	2009	2010	2011	$\Delta\%$ 2011/10	Part.% 2011
Usinas Hidrelétricas	74.937	74.901	75.484	77.090	78.371	1,7	66,9
Usinas Termelétricas	21.229	22.999	25.350	29.689	31.244	5,2	26,7
PCH	1820	2490	2953	3428	3870	12,9	3,3
CGH	112	154	173	185	216	17,0	0,2
Usinas Nucleares	2007	2007	2007	2007	2007	0,0	1,7
Usinas Eólicas	247	398	602	927	1425	53,7	1,2
Solar	-	-	-	1	1	8,7	0,0
Total	100.352	102.949	106.569	113.327	117.135	3,4	100,0

Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (2012).

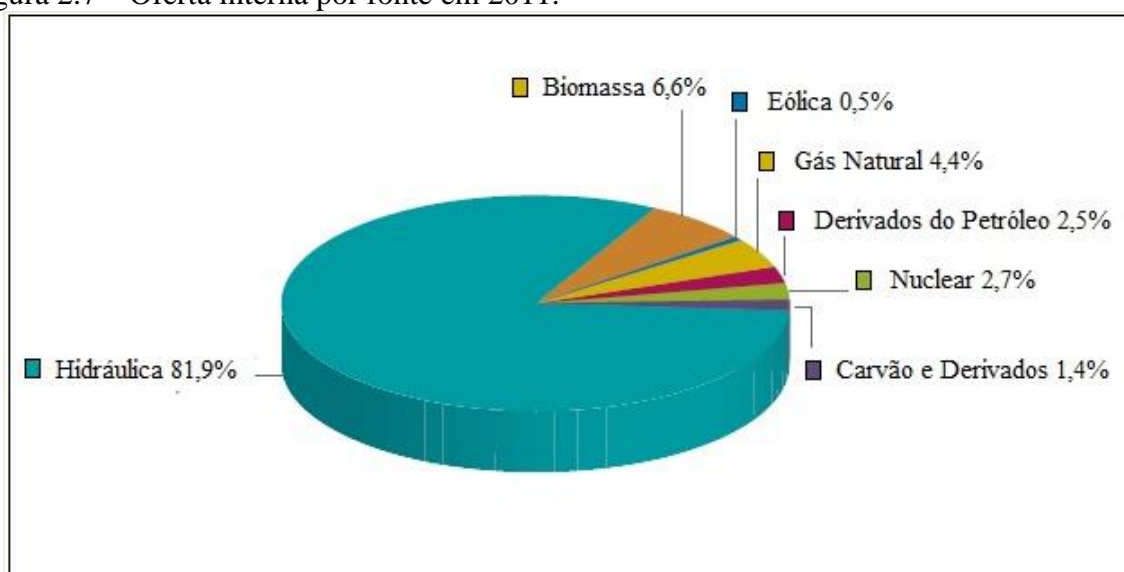
Em 2011, a capacidade instalada no Brasil chegou a 117.135 MW, provenientes de usinas hidrelétricas, usinas termelétricas, pequenas centrais hidrelétricas, centrais

geradoras hidrelétricas, usinas nucleares, usinas eólicas e solares, como é apresentado na tabela 2.3.

A energia das hidrelétricas predomina e responde por 66,91% da capacidade instalada do país, seguida das termelétricas, com 26,67%, e das pequenas centrais hidrelétricas, com 3,3%. Compõem ainda a matriz 1,71% de potência de usinas nucleares, 1,22% de eólicas e 0,18% das centrais geradoras.

A figura 2.7 apresenta a estrutura da oferta interna de eletricidade por fonte no Brasil em 2011.

Figura 2.7 – Oferta interna por fonte em 2011.



Fonte: Balanço Energético Nacional - BEN (2012)

Tabela 2.4 – Capacidade instalada no Brasil em 2011 por tipo de usina.

USINAS	NOVA CAPACIDADE (MW)
Hidrelétricas	1281
Termelétricas	1555
PCH	442
CGH	31
Nucleares	0
Eólicas	498
Solares	0
TOTAL	3807

Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (2012).

A tabela 2.4 apresenta a capacidade instalada no Brasil em 2011 por tipo de usina. A geração de energia elétrica no Brasil atingiu 531,8 TWh, 3,1% a mais que em 2010. A

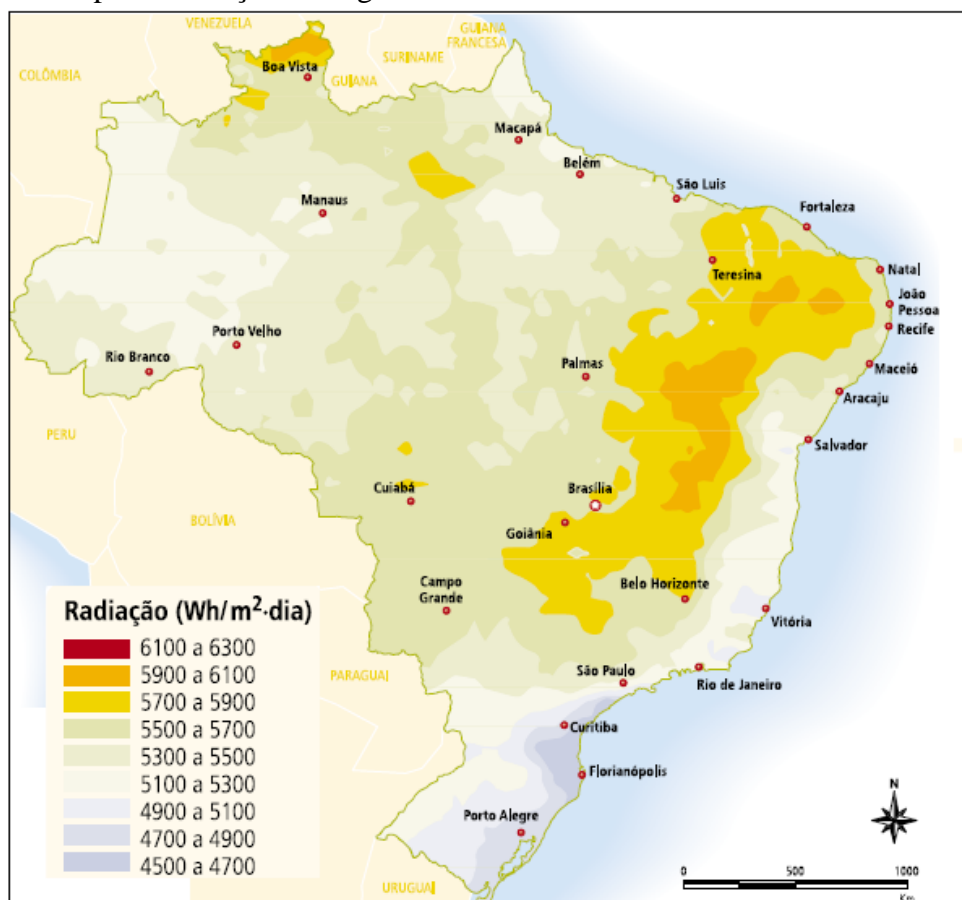
matriz de geração elétrica é de origem predominantemente renovável, sendo que a geração interna hidráulica responde por 74% da oferta. Somando as importações, que essencialmente também são de origem renovável, pode-se afirmar que 89% da eletricidade no Brasil são originadas de fontes renováveis. [20]

2.3.1 Energia solar no Brasil

O Brasil apresenta em toda sua extensão um grande potencial para aproveitamento da energia solar, devido suas condições geográficas e climatológicas. A figura 2.8 apresenta o mapa da radiação solar global do Brasil.

Observa-se uma concentração de irradiação média diária entre 4,5 e 6,3 kWh/m²/dia, enquanto que na Alemanha o valor máximo é 3,4 kWh/m². Ou seja, o local com menor insolação no Brasil é melhor que o de maior insolação na Alemanha, sendo este o país com maior capacidade instalada em energia fotovoltaica. [21]

Figura 2.8 – Mapa da radiação solar global do Brasil.



Fonte: Atlas de Irradiação Solar no Brasil (2013).

No Brasil ainda não existem muitos incentivos inseridos em políticas públicas. Atualmente, os sistemas FV são poucos e empregados em caráter experimental, em concessionárias de energia, pesquisa e instituições de ensino e a maior aplicação desses sistemas são em sistemas autônomos para fins de iluminação residencial, bombeamento de água, telecomunicação, eletrificação rural e serviços públicos em comunidades isoladas. [17]

Com o intuito de amenizar o problema da falta de acesso à energia elétrica, mais de 40 mil sistemas FV autônomos foram instalados, sendo que, a maior parte dos sistemas FV estão localizados nas Regiões Norte e Nordeste.

Apesar de ficar evidente que a energia solar FV ainda não está sendo considerada adequadamente no nosso planejamento energético, algumas iniciativas envolvendo esses sistemas foram viabilizadas através de governos estaduais e municipais, instituições de ensino, centros de pesquisa e concessionárias de energia. Como por exemplo: o Programa Luz no Campo, a nível nacional, o Programa Luz do Sol, na Região Nordeste e o Programa Luz Solar, desenvolvido em Minas Gerais. [8]

O Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios (PRODEEM) tinha como objetivos atender comunidades isoladas, não supridas por energia elétrica pela rede convencional, utilizando fontes renováveis de energia, e promover o desenvolvimento social e econômico dessas localidades. Esse programa foi responsável por ¼ da capacidade instalada de sistemas FV autônomos no país, cerca de 20 MW. [8]

Os sistemas FV no Brasil, dependendo do local a ser atendido, representam soluções adequadas e podem ser economicamente viáveis em função dos elevados custos de expansão da rede elétrica.

2.3.2 Energia eólica no Brasil

Em 2012, o Brasil conseguiu atingir a décima sexta posição entre os países do mundo com maior capacidade instalada de energia eólica, acumulando 2,4 GW. Uma participação de 2% na demanda de energia, o que representa o fornecimento de energia elétrica a quatro milhões de residências.

Em 2011, a produção de eletricidade a partir da energia eólica alcançou 2.705 GWh, conforme mostra a tabela 2.5. Um aumento de 24,3% em relação ao ano anterior, quando se alcançou 2.177 GWh. A potência instalada para geração eólica no país aumentou 53,7%. O parque eólico nacional cresceu 498 MW, alcançando 1.426 MW até o final desse período. [20]

Tabela 2.5 – Evolução da geração eólica no Brasil.

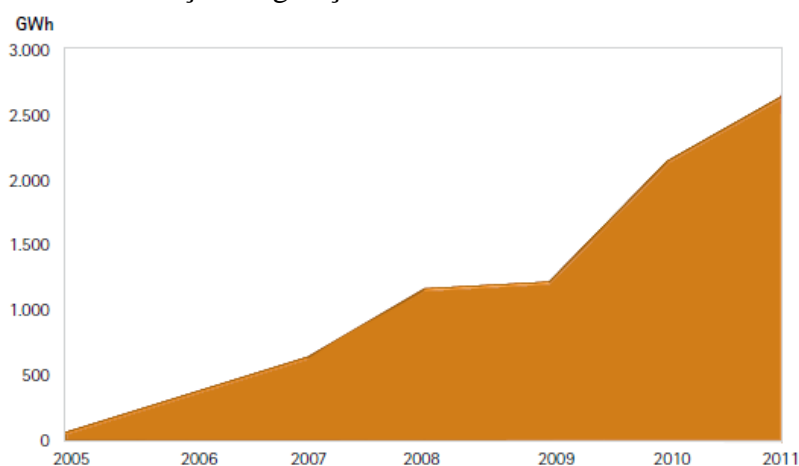
Ano	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Geração Eólica-elétrica(GWh)	63	74	74	342	668	1183	1238	2177	2705

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2012).

Apenas no ano de 2012, quase essa mesma potência foi injetada, foram instalados 38 novos parques, alcançando 1 GW de potência instalada e totalizando no sistema 106 empreendimentos.

O Brasil deseja atingir uma meta de instalar 2 GW por ano, e em 2013, o país deve somar 4 GW de capacidade instalada, passando a se posicionar entre os 10 países com maior capacidade eólica instalada no mundo. Na figura 2.9 se verifica o gráfico da evolução da geração eólica no Brasil. [22]

Figura 2.9 – Gráfico da evolução da geração eólica no Brasil.



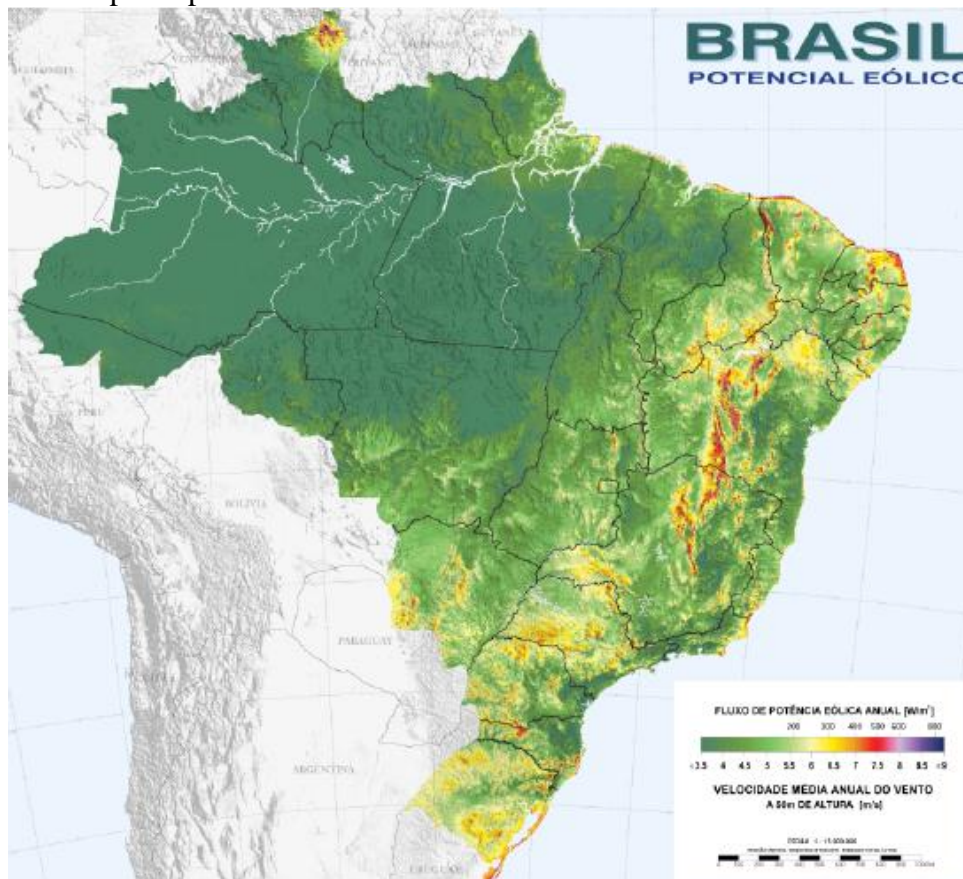
Fonte: Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2012).

Apesar das iniciativas de aproveitamento da energia eólica no país ao longo dos últimos anos, a capacidade instalada ainda é muito baixa em relação ao grande potencial eólico que possui capacidade para gerar até 140 gigawatts. Contudo a maior fonte de eletricidade do Brasil são as usinas hidrelétricas. A figura 2.10 mostra o mapa do potencial eólico brasileiro.

Um estudo indica que o país poderia substituir a energia térmica pela energia eólica. Isso porque as usinas térmicas só são acionadas durante os períodos de seca, quando os rios ficam mais baixos e as hidrelétricas são insuficientes para produzir toda a energia

consumida. Porém, é justamente nesse período que o regime de ventos no Nordeste é mais intenso.

Figura 2.10 – Mapa do potencial eólico no Brasil.



Fonte: [Atlas do Potencial Eólico Brasileiro](#) (2013).

A alavancagem dos patamares de capacidade instalada no Brasil se deu principalmente por iniciativa do governo que criou o Programa de Incentivo às Energias Alternativas (PROINFA), coordenado pelo Ministério de Minas e Energia (MME) e gerenciado pela ELETROBRÁS. O programa tinha como objetivo ampliar o aproveitamento e a participação das fontes alternativas de energia na matriz energética brasileira, visando adotar soluções regionais para o uso da energia eólica.

O PROINFA apresentou características de incentivos do sistema *Feed-in*, pois o programa determinou uma tarifa de compra de energia para projetos com contratos para 20 anos. Outra política de incentivo foi o mecanismo de subsídios para investimentos do BNDES que disponibilizava linhas especiais para alguns projetos selecionados pelo programa.

Além disso, o governo vem realizando leilões para a contratação de energia proveniente de empreendimentos de fonte eólica. [22]

2.3.3 Microgeração

Em abril de 2012, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) apresentou uma resolução para regulamentar a minigeração e microgeração de energia a partir de fontes renováveis conectadas à rede. A regulamentação oferece benefícios aos consumidores que utilizarem pequenos geradores de energia a partir de fontes renováveis, como painéis FV e mini turbinas eólicas.

Pela resolução da ANEEL, os usuários com geração distribuída, além de consumir sua própria energia, poderão, por meio de um Sistema de Compensação de Energia, trocar a energia excedente com a distribuidora. Ou seja, caso um microgerador produza mais do que consumiu em um determinado mês, o saldo positivo será utilizado para abater o consumo na fatura dos meses seguintes. Contudo esse crédito teria validade de trinta e seis meses.

O órgão regulador também busca alavancar as usinas solares no país, alterando a Resolução Normativa nº 77/2004 e elevando o desconto nas tarifas de transmissão e distribuição (TUSD e TUST) de 50 para 80%, nos primeiros 10 anos de operação de plantas fotovoltaicas e termossolares com até 30 MW. [9]

É considerado microgeração as centrais com até 100 kW conectadas à rede e minigeração são aquelas com potência entre 100 kW e 1 MW, em qualquer tensão, também conectadas à rede. A partir da data da resolução, as distribuidoras tiveram 240 dias para elaborar ou revisar normas técnicas para tratar do acesso a minigeração e microgeração distribuída. Deverão ser utilizadas como referências, o Prodist, as normas técnicas brasileiras e, de forma complementar, as normas internacionais.

Essa medida é uma ação de eficiência energética, pois irá reduzir as perdas com transmissão de energia, o consumo e o carregamento dos alimentadores em regiões com alta densidade de carga. Além disso, essa proposta é um passo importante para a instalação da rede inteligente (*smart grid*) de geração distribuída no país. [9]

2.3.4 Considerações finais

Neste capítulo foram abordadas algumas definições de geração distribuída e várias oportunidades para sua implantação no Brasil. Também foram apresentadas, a partir da disponibilidade de recursos renováveis no país, algumas tecnologias de energias renováveis como solar FV, aerogeradores e biodigestores para geração de energia elétrica e seu panorama no mundo e no Brasil.

Como foi visto nesse capítulo, a grande extensão territorial do Brasil, seu relevo e seu clima são bastante favoráveis para o uso de geração distribuída a partir de tecnologias renováveis. Na região Nordeste do país, a grande concentração de irradiação solar favorece o uso da geração fotovoltaica. E o uso de biodigestores produzindo biogás para geração de energia elétrica tem grande potencial para desenvolvimento, contudo necessita de maior difusão no meio rural. Em todo o país, há um grande potencial eólico e os ventos atingem velocidades bastante altas, com maior aplicação de geração eólica no litoral.

Contudo, o cenário nacional de energias renováveis não possui muitos incentivos políticos e governamentais e não dispõe de tecnologia própria para a maioria dos equipamentos utilizados. Uma resolução da ANEEL foi aprovada para regular a minigeração e microgeração com o objetivo de incentivar a geração distribuída a partir de energias renováveis conectadas à rede.

Juntamente com as possibilidades de expansão e diversificação do setor, fazem-se necessários investimentos maciços em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias próprias, e assim, reduzir os custos de produção e logística das mesmas. Tais investimentos em GD utilizando tecnologias energias renováveis favorecem toda uma cadeia produtiva, sobretudo para a localidade em que for utilizada.

Para o Brasil, marcado por profundas desigualdades sociais, a geração distribuída utilizando tecnologias renováveis é uma importante ferramenta em que se distribui não só a geração de energia, mas a geração de emprego, renda e desenvolvimento para o meio rural e localidades isoladas. Agregando aos benefícios técnicos, econômicos e ambientais um importante valor social.

3 PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO PARA SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

3.1 Introdução

Para a implantação de sistemas de geração de energia elétrica é necessário considerar fatores como: tecnologia de geração (painéis FV, turbinas eólicas, motores de combustão), a potência do gerador, a vida útil dos equipamentos, o capital inicial e o combustível (biogás, biomassa, gás natural, diesel e hidrogênio).

Para que a simulação desses sistemas seja feita de forma eficiente, é necessário fazer uma análise de diversos fatores tais como: informação precisa sobre o sistema projetado, a curva de carga que deve ser atendida e as condições climáticas e meteorológicas do local. Portanto, para se obter resultados precisos e seguros, é necessário a escolha de uma ferramenta eficiente e adequada. [5]

Os programas de simulação são ferramentas de grande utilidade na construção e na avaliação do desempenho de sistemas de geração de energia elétrica. Esses programas são desenvolvidos como instrumentos de apoio à decisão e através de simulações no computador são feitas várias análises, como por exemplo: o desempenho do sistema, o custo de produção de energia, riscos financeiros e impactos ambientais de diversas configurações de sistemas, com a finalidade de encontrar uma configuração ótima do projeto.

No mercado, podem-se encontrar programas para sistemas isolados, sistemas híbridos, sistemas autônomos e sistemas conectados à rede. Estas ferramentas computacionais são de grande importância para os sistemas híbridos, principalmente na fase de dimensionamento, onde as fontes de energia e os sistemas de armazenamento de energia devem ser dimensionados de forma a corresponder às necessidades de energia estimada para certa localidade. [5]

Quando se deseja desenvolver programas computacionais de auxílio ao planejamento energético, é necessário que estes programas possuam um ambiente agradável e de fácil compreensão. Além disso, para esses programas serem desenvolvidos, é necessária a disponibilidade de informações meteorológicas, demanda de carga e principalmente o conhecimento dos modelos matemáticos dos componentes do sistema. A cada dia, o número de usuários de programas de simulação vem aumentando, devido a essa facilidade na aplicação. Mesmo pessoas sem conhecimentos na tecnologia do sistema ou em programação conseguem utilizá-los. [7]

Muitos desses programas foram criados com o objetivo de simular e fazer uma análise financeira de projetos de grandes instalações, realizando cálculos de produção e consumo de energia em base horária, tempo suficiente pequeno para obter valores adequados na simulação. Alguns programas já possuem base de dados como de irradiância e de clima. Outros possuem uma interface que permite importar conjunto de dados meteorológicos e de carga.

Apesar das ferramentas ajudarem na simplificação do projeto de sistemas de energia, estas possuem muitas limitações. A maioria dos programas de simulação foi desenvolvida em países industrializados, dificultando a aplicação em países em desenvolvimento, pois consideram valores de produtos e serviços adotados em países desenvolvidos. Além disso, utilizam como principal idioma o inglês, tornando o entendimento do programa mais complexo. [23]

Em algumas ferramentas como o Homer, o Hybrid2 e o Hoga podem ser feitas análises bem detalhadas de sistemas híbridos. Já outras ferramentas como *Retscreen* limitam as opções disponíveis para arquiteturas do sistema, estratégia de controle e fontes de energia. Neste programa, o usuário só pode escolher uma fonte de energia por vez, com o objetivo de diminuir a complexidade e facilitar o uso da ferramenta. O Trnsys e o Insel permitem mais flexibilidade na escolha das fontes de energia, arquiteturas de sistema e estratégias de controle, mas para isso, é necessário entender melhor o programa e desenvolver modelos matemáticos.

Alguns programas como Hybrid2 e Retscreen oferecem várias informações a respeito dos modelos matemáticos e das rotinas utilizadas. Contudo, a maioria dos programas não oferecem essas informações, não existe material bibliográfico sobre os dados utilizados nos programas. [24]

Uma das principais decisões a serem tomadas pelo usuário é selecionar qual o melhor programa a ser utilizado. Para isso é necessário conhecer as principais características de cada programa e saber qual o foco desejado para os cálculos.

3.2 Tipos de ferramentas computacionais

Para auxiliar na avaliação de uma grande variedade de ferramentas computacionais, estas são classificadas em quatro categorias: dimensionamento, simulação, ferramentas de pesquisa e de projeto de mini rede. [24]

➤ Ferramentas de Dimensionamento

Calcula o dimensionamento do sistema com base nos dados de entrada: demanda de carga e dados de clima, determinando a potência ideal para cada um dos componentes do sistema.

Esses programas fazem o dimensionamento com o objetivo de encontrar a configuração ótima do projeto, minimizando o custo do ciclo de vida do sistema. A maioria das ferramentas de dimensionamento fornece informações detalhadas sobre indicações de períodos críticos durante o ano e fluxos de energia entre os componentes. São pacotes compilados e geralmente possuem uma interface rápida e fácil de usar. Esses tipos são os mais utilizados pelos instaladores de sistemas.

➤ Ferramentas de Simulação

Utiliza os dados de entrada: carga, dados de clima, componentes e configuração do projeto, para simular o comportamento do sistema durante um determinado período de tempo.

O usuário deve especificar a natureza e o tamanho de cada componente. Em seguida, a ferramenta fornece uma análise detalhada do comportamento do sistema. Cada programa tem um tempo diferente para simulação, que depende do nível de detalhe requerido e da disponibilidade de dados de entrada, mas as simulações mais comuns são feitas a cada hora e tem vários objetivos como: verificar o dimensionamento do sistema, investigar o impacto de futuras mudanças na carga, avaliar o desempenho em condições atípicas, investigar a sensibilidade do projeto e analisar o impacto de falhas ou defeitos nos componentes.

As simulações podem também fornecer informações sobre as características ambientais e financeiras do sistema, tais como o custo do ciclo de vida e emissões de CO₂.

➤ Ferramentas de Pesquisa

Permite uma simulação complexa de diferentes sistemas para fins de pesquisa, pois possuem um elevado grau de flexibilidade e a configuração pode ser alterada.

Enquanto as ferramentas de simulações tradicionais executam análises de sensibilidade que geralmente não permitem ao usuário modificar os algoritmos, com as ferramentas de pesquisa, o usuário tem a liberdade de modificar as rotinas ou adicionar rotinas inteiramente novas, determinando o comportamento e as interações dos componentes individualmente. Tais ferramentas de pesquisa podem ser implementadas dentro de um ambiente de simulação ou programado e compilado em uma linguagem como Fortran, C ou Pascal.

➤ Ferramentas de Projeto de Mini Rede

Ajudam no projeto de rede de distribuição de mini rede elétrica, permitindo que o usuário determine se um sistema autônomo consegue suprir a demanda de uma área remota. Além disso, permite também minimizar as perdas de potência na rede de distribuição com uma seleção apropriada de nível de tensão e secção transversal dos cabos de distribuição. [24]

3.3 Programas de simulação

No mercado existem vários tipos de programas para simulação de sistemas de energia com diferentes linguagens de programação, precisões e metodologias de cálculo. Entre as ferramentas que auxiliam no planejamento energético, pode-se destacar: Homer, Hybrid2, Hoga, Retscreen, Insel e Trnsys.

➤ HOMER

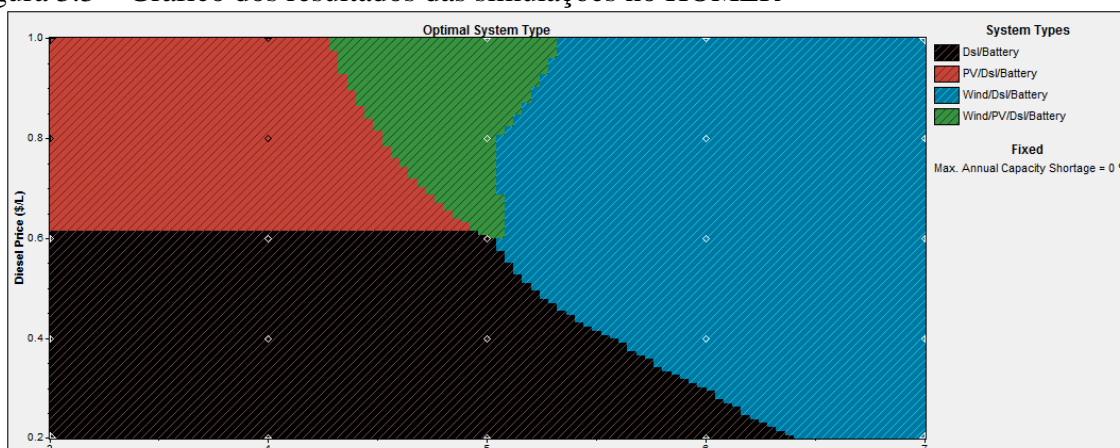
O programa *Hybrid Optimization Model for Electric Renewables* (HOMER) é um modelo de otimização de sistemas híbridos de geração de energia que foi desenvolvido nos Estados Unidos pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL).

Esse programa é indicado quando se deseja projetar e analisar sistemas híbridos. Tem como objetivo auxiliar na otimização desses sistemas, avaliando um grande número de alternativas e identificando o sistema de menor custo capaz de suprir a demanda de energia elétrica de uma determinada localidade.

Outra característica desse programa é a capacidade de fazer uma análise com mais de cem parâmetros de entrada, podendo otimizar sistemas constituídos por turbinas eólicas, turbinas hidráulicas, painéis FV, geradores AC, baterias, células a combustível, eletrolisadores, tanques de hidrogênio, conversores, caldeiras, biomassa e biogás. As cargas podem ser cargas térmicas, AC, DC, e / ou cargas de hidrogênio. A figura 3.1 mostra a modelagem do sistema com alguns equipamentos que foram adicionados. [5]

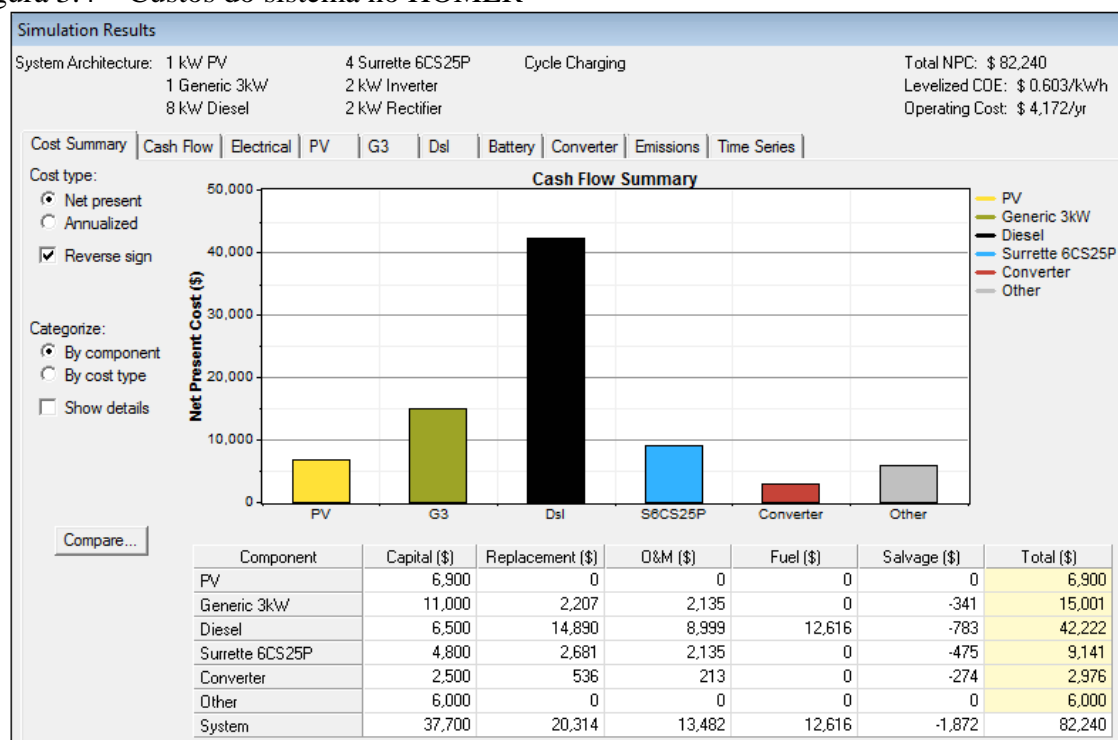
Em função da curva de demanda horária do local definida pelo usuário, o HOMER simula diferentes combinações de componentes e apresenta gráficos com os resultados dessas simulações como é mostrado na figura 3.2 e 3.3, gerando resultados que são ordenados de acordo com o *Net Present Cost* (NPC), ou seja, custo total em valor presente, e o *Cost of Energy* (COE), que é o custo de geração de energia, obtendo uma projeção realista do capital e das despesas operacionais. [25]

Figura 3.3 – Gráfico dos resultados das simulações no HOMER



Fonte: Homer Energy (2013).

Figura 3.4 – Custos do sistema no HOMER



Fonte: Homer Energy (2013).

O HOMER é capaz de simular tanto sistemas conectados à rede, como também, sistemas isolados ou híbridos. E tendo como base o custo da tarifa elétrica comprada pela concessionária, o programa consegue determinar a viabilidade técnica de um projeto, comparando as diversas alternativas de geração distribuída, com a capacidade do sistema de suprir a demanda isoladamente ou conectados com a rede. Além disso, o programa também permite fazer uma análise econômica, fornecendo o fluxo de caixa, ou seja, o total de energia gerada pelo sistema e a energia comprada da rede, o volume de combustível utilizado e a

emissões geradas anualmente, permitindo que os usuários realmente entendam como funcionam os sistemas híbridos de energias renováveis. [25]

Adicionalmente, o programa possibilita análises de sensibilidade que avaliam o impacto da variação de parâmetros de carga, da disponibilidade de recursos e do custo dos equipamentos e dos combustíveis. O programa pode ser baixado no seguinte site: http://homerenergy.com/user_interface.html e usado gratuitamente.

➤ **Hybrid2**

O Hybrid2 é um programa de simulação de sistemas híbridos que foi desenvolvido nos Estados Unidos pelo *Renewable Energy Research Laboratory* (RERL) da Universidade de Massachusetts Amherst com o apoio da NREL.

O Hybrid2 é um modelo computacional probabilístico e de séries temporais fácil de usar. Tem como objetivos prever o desempenho do sistema, utilizando série de dados de cargas, temperatura, velocidade de ventos, irradiação solar e do sistema elétrico, e fazer uma análise técnica de sistemas híbridos. A simulação é muito precisa, pois pode ser realizada nos intervalos de tempo de 10 minutos à 1 hora.

Os sistemas híbridos podem ser constituídos por turbinas eólicas, painéis FV, geradores a diesel, armazenamento em bateria, três tipos de cargas elétricas e quatro tipos de conversores de energia, tanto para sistemas conectados à rede, como também sistemas isolados. Outros componentes como células a combustível ou eletrolisadores podem ser modelados. Os sistemas podem ser conectados nos barramentos AC, DC ou em ambos. Além disso, uma variedade de estratégias de controle podem ser implementadas. [5]

NREL recomenda primeiramente otimizar o sistema com HOMER e só depois que o sistema estiver otimizado, deve-se melhorar o projeto usando Hybrid2. O programa pode ser baixado no seguinte site: <http://www.ceere.org/rerl/projects/software/hybrid2/> e usado gratuitamente.

➤ **HOGA**

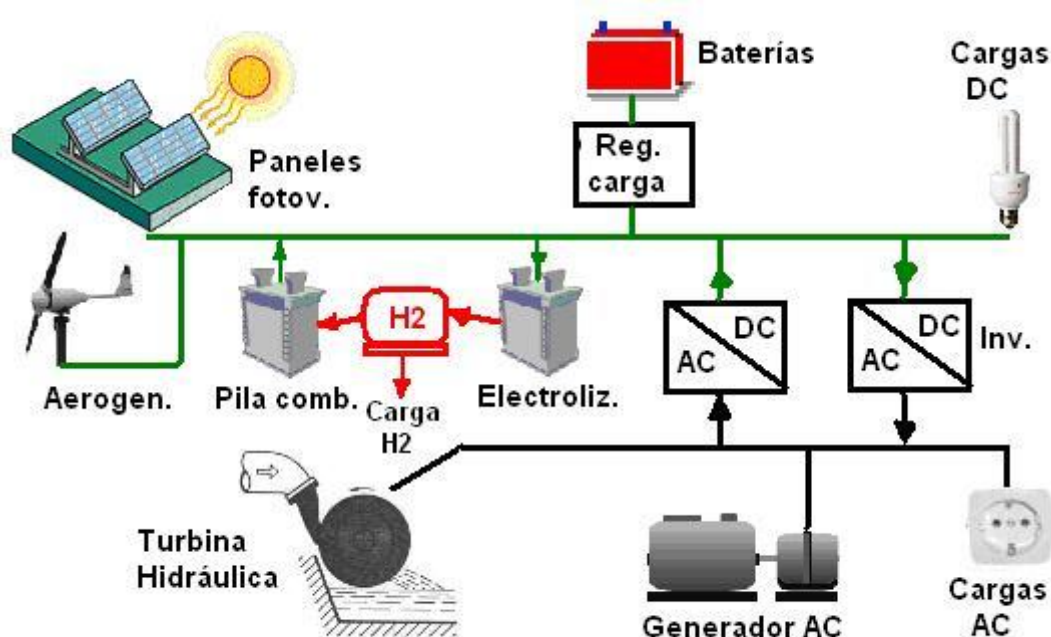
O *Hybrid Optimization by Genetic Algorithms* (HOGA) é um programa de simulação e otimização de sistemas híbridos para geração de energia desenvolvido na Espanha pelo Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Zaragoza.

HOGA foi desenvolvido por Rodolfo Dufo e L. José Bernal na linguagem de programação C++. Inicialmente, o programa foi projetado apenas para sistemas que não estavam conectados à rede elétrica, mas atualmente, o programa permite a compra de energia elétrica da rede ou a venda de energia elétrica para a rede, quando possui energia excedente.

Além da energia elétrica, o hidrogénio excedente produzido pelos eletrolizadores e armazenado no tanque, pode ser também comercializado. [5]

O programa permite a otimização de sistemas híbridos constituídos por painéis FV, baterias, turbinas eólicas, turbinas hidráulicas, geradores CA, células a combustível, eletrolisadores, tanques de hidrogênio, retificadores e inversores. O programa também permite conectar cargas elétricas AC, DC e de bombeamento de água. A modelagem do sistema pode ser visto na figura 3.5.

Figura 3.5 – Modelagem do sistema no HOGA

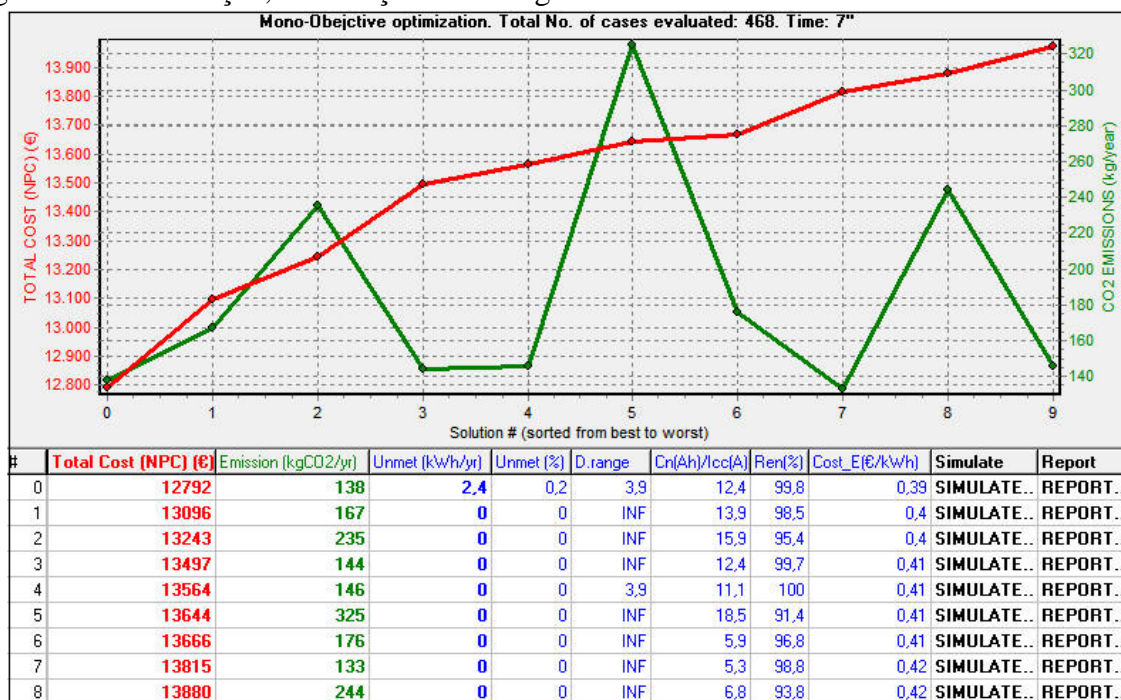


Fonte: Hoga Renewable (2013).

A figura 3.6 mostra gráficos e resultados das simulações, otimizações e estratégias de controle feitas pelo programa. A simulação é realizada em intervalos de 1 hora, durante o qual todos os parâmetros permaneceram constantes. São feitas várias combinações de componentes e estratégias de controle utilizando algoritmos genéticos, com o objetivo de encontrar a combinação ideal.

A otimização pode ser mono ou multi-objetiva e é obtida através da minimização dos custos totais do sistema ao longo de toda a vida útil. A otimização mono-objetiva avalia o NPC e a otimização multi-objetiva pode minimizar alguns variáveis adicionais como as emissões de CO₂ ou a carga não atendida.

Figura 3.6 – Simulação, otimização e estratégias de controle no HOGA



Fonte: Hoga Renewable (2013).

O programa pode ser baixado no seguinte site: <http://www.unizar.es/rdufo/hoga-eng.htm> e usado gratuitamente.

➤ RETSCREEN

RETScreen é uma ferramenta de análise financeira de projetos de energias renováveis desenvolvido no Canadá pela *Natural Resources Canada* (NRCan). É um aplicativo de dimensionamento de sistemas baseado em modelos de planilhas de dados do programa Excel da Microsoft. A página inicial do programa é mostrado na figura 3.7.

Figura 3.7 – Tela inicial do RETScreen

Informação sobre o projeto

Nome do Projeto: Fotovoltaica - 10.8 kW

Localização do Projeto: Estados Unidos da América

Preparado para: Preparado para

Preparado por: Preparado por

Descrição: Descrição

Ver parâmetros ▼

Idioma: Portuguese - Português

Manual do usuário: English - Anglais

Conexão com a Internet: Ativar

Condições de Referência do site

Selecionar local de dados climáticos

Localização dos dados climáticos: Boston

Mostrar dado ▶

Fonte: RETScreen (2013).

O programa tem como objetivo avaliar a produção e economia de energia, os custos durante o tempo de vida do projeto e a redução das emissões de gases. A figura 3.8 apresenta a tela de análise de emissões de gases.

Figura 3.8 – Tela de análise de emissões de gases

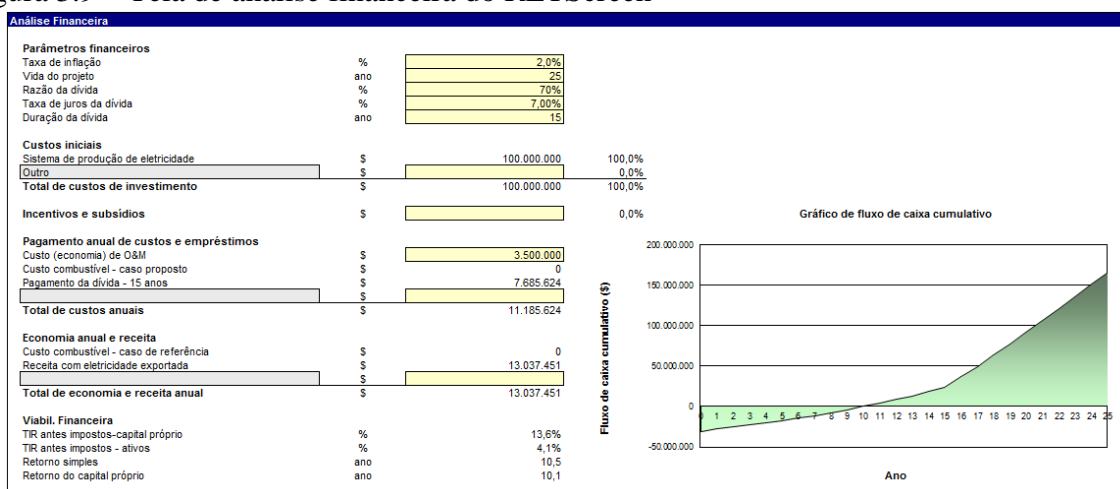
Análise de Emissões				
Sistema elétrico de referência (Baseline)		Fator de Emissão de GEE (excl. T&D)	Perdas T&D	Fator de emissão de GEE
Pais - região	Tipo de	tCO ₂ /MWh	%	tCO ₂ /MWh
Canadá	Todos os tipos	0,196	5,0%	0,207
Eletricidade exportada p/ rede	MWh	130.375	Perdas T&D	2,0%
Emissão de GEE				
Caso de referência	tCO ₂	26.939,5		
Caso proposto	tCO ₂	538,8		
Redução anual bruta de emissões de GEE	tCO ₂	26.400,7		
Custo de transação dos créditos de GEE	%			
Redução anual líquida de emissões de GEE	tCO ₂	26.400,7	é equivalente a	4.835 Carros e camionetes não utilizados
Receita pela redução de GEE				
Crédito para redução de GEE	\$/tCO ₂			

Fonte: RETScreen (2013).

Os sistemas podem ser constituídos por painéis FV, turbinas eólicas, geradores a gás ou a diesel, células a combustível, turbinas a gás, pequenas hidroelétricas e bombas geotérmicas. Como combustível podem ser usados a biomassa, fósseis, resíduos e hidrogênio. E ainda como opção de armazenamento de energia podem ser usadas as baterias. Contudo o programa só analisa sistemas com uma única fonte de energia e apenas faz simulação de sistemas autônomos.

O Retscreen também realiza viabilidade financeira de um projeto, como mostra a tela da figura 3.9, auxiliando na tomada de decisão e permitindo que o usuário avalie projetos de energia renovável e não renovável, de eficiência energética e de cogeração. [7]

Figura 3.9 – Tela de análise financeira do RETScreen



Fonte: RETScreen (2013).

O programa possui banco de dados de irradiação para mais de 6000 localidades no mundo e através de um link para o site da NASA, podem ser obtidos dados climáticos para qualquer ponto na Terra. Também possui banco de dados de produtos e custos.

O programa pode ser baixado no seguinte site: <http://www.retscreen.net/pt/home.php> e usado gratuitamente.

➤ INSEL

O *Integrated Simulation Environment Language* (INSEL) é um programa de simulação de sistemas de energias renováveis que foi desenvolvido na Alemanha pela Universidade de Oldenburg.

O usuário seleciona os componentes do sistema, constrói um diagrama de blocos e os conecta definindo a estrutura do projeto. No programa, modelos de simulação podem ser criados com a ajuda de editores gráficos e de textos.

Em geral, o programa Insel é usado em projetos de sistemas de energia renovável. Os engenheiros usam esse programa para serviços como visualização e monitoramento pela Internet, já os operadores usam INSEL para monitoramento e detecção rápida de falha de sistemas, por fim, os investidores usam esse programa com o objetivo de avaliar a viabilidade econômica e prognósticos de rendimento precisos de sistemas FV e eólicos.

Nesse programa, o usuário pode especificar o intervalo de tempo onde a análise da operação será realizada. A análise econômica inclui os custos de instalação do sistema, os custos de operação e manutenção, custo presente líquido, custos de eletricidade e tarifas. [7]

O usuário tem acesso a um grupo de bibliotecas disponíveis: cálculo da radiação, módulos FV, inversores, baterias, geradores eólicos e sistemas de bombeamento. A flexibilidade para criar os modelos e configurações do sistema é uma característica muito interessante nesse programa. Além disso, o programa possui uma base de dados com valores de irradiação de mais de 2000 lugares.

INSEL é um programa apenas de simulação e não realiza otimização de sistemas. Ele pode ser conectado a outros programas e pode ser personalizado por um usuário.

O programa completo na versão Insel 8 custa 1700 Euros. Universidades, Institutos de Pesquisa e outros Órgãos Públicos podem obtê-lo com 50 por cento de desconto. Os estudantes podem comprar o software completo por 85 euros.

O programa pode ser baixado em: <http://www.insel.eu/index.php?id=79&L=1>.

➤ TRNSYS

O *Transient Energy System Simulation Program* (TRNSYS) é um programa de simulação de sistemas de energia que foi desenvolvido nos Estados Unidos pela Universidade de Wisconsin e Universidade de Colorado.

O programa está disponível comercialmente desde 1975 e foi desenvolvido inicialmente com o objetivo de simular sistemas térmicos, contudo, com o passar do tempo, tornou-se também um simulador de sistemas híbridos que podem ser constituídos de sistemas FV, solares térmicos, turbinas eólicas, geradores a diesel, controladores de carga e de armazenamento da bateria. [24]

É um programa de simulação baseado na linguagem de programação Fortran. A simulação é realizada com uma grande precisão, permitindo a visualização de gráficos com muitos detalhes e precisão. No entanto, o programa não permite a realização de otimizações e não é gratuito. Para informações sobre lista de preços e como baixá-lo entre no seguinte site: <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/default.htm>

A tabela 3.1 apresenta as principais características de modelagem dos programas Homer, Hybrid 2, Hoga e Retscreen. Como foi visto acima, existem várias ferramentas computacionais para o planejamento de sistemas de energia, contudo, nesta seção, serão revisados apenas os quatro principais programas que são: Homer, Hybrid2, Hoga e RETScreen. Os motivos porque esses programas foram selecionados são: foram desenvolvidos por organizações que são bastante experientes em programas de sistemas de energia, os pacotes têm muitos usuários em todo o mundo e principalmente porque eles podem ser baixados gratuitamente da internet. [24]

A revisão dos quatro programas leva às seguintes conclusões:

- Os quatros programas citados acima fazem simulação de sistemas de energias renováveis e podem ser baixados e usados gratuitamente.
- Homer e RETScreen são provavelmente as ferramentas mais populares de planejamento energético e análise de viabilidade econômica de sistemas de energias renováveis. HOMER pode analisar sistemas híbridos com mais de uma fonte de geração e simular tanto sistemas conectados à rede quanto sistemas isolados, enquanto Retscreen só analisa sistemas com uma única tecnologia e apenas faz simulação de sistemas autônomos, com exceção apenas para aplicações de energia FV. Ambas as ferramentas podem realizar a análise financeira, com um diferente grau de sofisticação.

Tabela 3.1 – Principais características do HOMER, Hybrid 2, HOGA e RETScreen

Características	Homer	Hybrid 2	Hoga	Retscreen
Sistemas Híbridos	X	X	X	
Simulação	X	X	X	X
Estratégias de Controle	X	X	X	
Otimização	X		X	
Otimização Multi-Objetiva			X	
Análise de Sensibilidade	X			
Energia Fotovoltaica	X	X	X	X
Energia Eólica	X	X	X	X
Biomassa	X		X	X
Biogás	X			
Geotérmica				
Hidroelétrica	X	X	X	X
Diesel	X	X	X	
Baterias	X	X	X	X
Células a Combustível	X	X	X	
Eletrolizadores	X	X	X	
Cargas de Hidrogênio	X	X	X	
Cargas Térmicas	X			
Software Livre	X	X	X	X

- Os programas Homer e RETScreen fazem principalmente análise econômica, dedicado à escolha do melhor sistema de energia renovável, enquanto Hybrid2 faz principalmente análise técnica, dedicando-se ao projeto do sistema. Então primeiramente se escolhe o sistema, ou com o Homer ou com Retscreen, só depois se faz a análise técnica do sistema com o Hybrid2.

- Homer, Hoga e Hybrid2 são usados para sistemas híbridos, enquanto RETScreen não avalia sistemas com mais de uma tecnologia renovável.
- O Homer e o Hoga inclui otimização de sistemas de energia. Além disso, o Homer tem a capacidade de fazer análise de sensibilidade e o Hoga pode fazer otimização multi-objetiva que é feita através de algoritmos genéticos.

3.4 Considerações finais

Cada um dos programas tem seus prós e contras. Uma das principais decisões a ser tomada pelo usuário é selecionar qual o melhor programa a ser utilizado e quais recursos são mais importantes para suas necessidades específicas. Para isso é necessário conhecer as principais características de cada programa e saber qual o foco desejado para os cálculos. Como por exemplo: quando se deseja fazer uma análise econômica, o melhor programa a ser utilizado é o Homer, quando se quer fazer um estudo de viabilidade e dimensionamento usa-se o RETScreen, já o programa Hybrid2 ajuda na análise de sistemas e por fim, para uma pesquisa mais detalhada, o programa Trnsys é bem interessante. [24]

Por fim, deve salientar-se que os resultados da modelagem e simulação de um sistema não dependem apenas dos modelos matemáticos ou dos algoritmos dos programas, mas também da qualidade dos dados de entrada e do conhecimento técnico e experiência do usuário. Estas ferramentas são de grande ajuda durante o processo de concepção e análise de projetos e os usuários devem sempre fazer uma avaliação crítica dos resultados de saída.

4 DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA COMPUTACIONAL GDHER

O homem moderno é cada vez mais dependente da energia elétrica em suas atividades diárias e para a sua sobrevivência. Por esse motivo, é importante que o acesso a esse recurso seja facilitado cada vez mais, principalmente às populações carentes.

O grande consumo de combustíveis fósseis pela sociedade moderna tem levado o planeta a uma degradação ambiental sem precedentes, aumentando assim o efeito estufa.

Portanto, é necessário buscar novas tecnologias de geração elétrica que consigam suprir regiões desfavorecidas, como zonas rurais e áreas isoladas do país e garantir o abastecimento da demanda futura.

Neste contexto, a geração distribuída a partir de sistemas híbridos de energias renováveis representa uma solução para o suprimento de eletricidade para a população excluída e até mesmo população futura, proporcionando um desenvolvimento sustentável com a utilização de matéria prima e mão de obra local, respeitando o meio ambiente e demonstrando maior confiabilidade do que sistemas que dependem apenas de uma única fonte de energia.

Assim, o planejamento energético de sistemas híbridos de energias renováveis deve ser bem detalhado, garantindo energia de qualidade, produzindo o menor impacto sócio-ambiental e com o menor custo.

Contudo, a quantidade de parâmetros a serem avaliados deixa esse planejamento energético um processo bastante complexo. Desta forma, o uso de ferramentas computacionais torna-se indispensável.

4.1 Descrição da ferramenta computacional

A ferramenta pode ser utilizado sem custo, pois foi desenvolvido através do Calc, um programa de planilha eletrônica semelhante ao Excel, contudo o Calc faz parte de um pacote de vários aplicativos livres da Broffice.

A nova ferramenta computacional foi adaptada à realidade brasileira, principalmente às áreas rurais e isoladas, utiliza como idioma o português e permite que o usuário, com o mínimo de informações, obtenha um prognóstico de viabilidade.

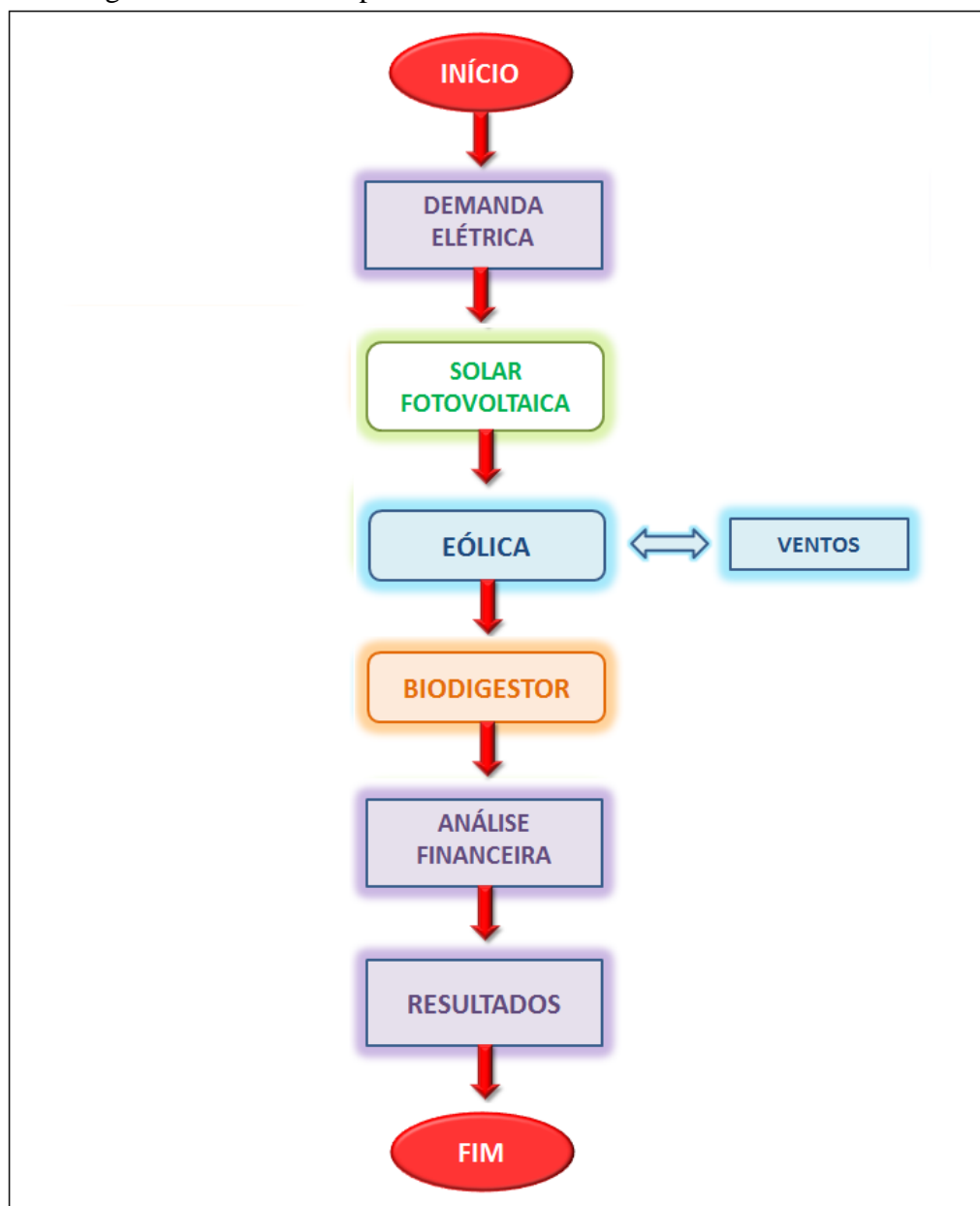
Através de uma análise financeira, a ferramenta compara a extensão da rede convencional com algumas tecnologias de geração distribuída como a solar fotovoltaica, aerogeradores e biodigestores. A análise financeira de configurações de sistemas híbridos

como fotovoltaico-eólico, fotovoltaico-biodigestor e biodigestor-eólico também é avaliada. Os resultados podem ser vistos através de gráficos apresentados pela ferramenta.

4.2 Estrutura operacional da ferramenta

Na figura 4.1 é apresentado o diagrama da estrutura operacional da ferramenta GDHER.

Figura 4.1– Diagrama da estrutura operacional do GDHER



Primeiramente, é mostrada a tela inicial com a apresentação da ferramenta. Na planilha seguinte, o usuário deverá inserir alguns dados de entrada como potência e as horas de funcionamento da carga, a partir desses valores, a ferramenta calcula a demanda elétrica da instalação.

Após, é mostrado uma tela para atualização dos valores, onde o usuário irá atualizar todos os parâmetros necessários para um bom funcionamento da ferramenta.

Nas planilhas seguintes são dimensionados o sistema solar fotovoltaico e o sistema eólico, respectivamente. A partir de alguns dados de entrada como, por exemplo: tensão nominal do sistema, horas de sol pleno, potência nominal do módulo fotovoltaico, velocidade média do vento e rugosidade, a ferramenta calcula a quantidade de painéis FV, aerogeradores, baterias, controladores de carga e inversores necessários para atender determinada demanda de uma localidade. A planilha do sistema eólico interage com um programa de dimensionamento chamado Ventos.

Depois disso, a ferramenta dimensiona os biodigestores e o gerador a biogás a partir dos dados de entrada inseridos pelo usuário como a quantidade da biomassa produzida pelos animais da localidade.

Após o dimensionamento dos sistemas, são feitas análises financeiras para cada uma das possibilidades de geração distribuída citadas acima e os resultados são comparados com a extensão da rede convencional de distribuição de energia elétrica. São apresentados gráficos da relação benefício/custo, do custo da energia, do investimento inicial e da recuperação do capital de cada um dos sistemas de geração de energia.

Por fim, é feito também uma análise financeira de configurações de sistemas híbridos como fotovoltaico-eólico, fotovoltaico-biodigestor e biodigestor-eólico e os resultados podem ser avaliados através de gráficos.

Nas planilhas da ferramenta, as células de entrada e saída de dados são codificadas com cores azuis e amarelas como mostra a figura 4.2.

Figura 4.2 – Legenda da codificação das células

	DADOS DE ENTRADA
	DADOS DE SAÍDA

As células azuis devem ser preenchidas pelo usuário com os dados de entrada que são necessários para a operação do modelo. Já as células amarelas são preenchidas com os

dados de saída que são calculados pela própria ferramenta. Os procedimentos para utilização da ferramenta e modelos matemáticos são descritos a seguir.

4.3 Tela inicial

A tela inicial do GDHER é apresentada na figura 4.3. Clicando no botão “INICIAR O PROGRAMA”, o programa abre a planilha de demanda elétrica da instalação.

Figura 4.3 – Página inicial do GDHER



4.4 Demanda elétrica

A figura 4.4 apresenta a tela de demanda elétrica da instalação. Os dados de entrada e saída e os modelos matemáticos são descritos a seguir.

Figura 4.4 – Tela da demanda elétrica da instalação

DEMANDA ELÉTRICA	
Dados de Entrada	
<div> <div>Dados Gerais</div> <div> <div>Potência Instalada por Consumidor (W)</div> <div>Quantidade de Consumidores (und)</div> <div>Taxa de Crescimento (%)</div> <div>Fator de Diversidade</div> <div>Tempo de Funcionamento da Carga (h)</div> <div>Vida Útil da Instalação (anos)</div> </div> <div> <div>800</div> <div>10</div> <div>1</div> <div>0,7</div> <div>5</div> <div>20</div> </div> </div>	
<div> <div>Dados de Saída</div> <div> <div>Fator de Demanda</div> <div>Demanda Elétrica Individual (W)</div> <div>Demanda Elétrica Total (W)</div> </div> <div> <div>0,86</div> <div>688</div> <div>5876</div> </div> </div>	

- **Potência instalada por unidade (P):** É a soma das potências nominais dos equipamentos elétricos instalados na unidade consumidora em Watts (W).
- **Quantidade de consumidores (Q_c):** Número de unidades consumidoras.
- **Tempo de funcionamento (T_f):** Quantidade de horas por dia de funcionamento da carga.
- **Vida útil da instalação (n):** Duração estimada de tempo que os equipamentos possam cumprir seu trabalho com rentabilidade.
- **Fator de diversidade (F_d):** Razão da soma das demandas máximas individuais de um conjunto de equipamentos elétricos ou instalações elétricas pela demanda máxima simultânea ocorrida no mesmo intervalo de tempo específico. A tabela 4.1 indica três valores diferentes de fator de diversidade que variam de acordo com a quantidade de consumidores rurais e as cargas. [26]

Tabela 4.1 – Fator de diversidade

Consumidores	Fator de Diversidade (%)
Um consumidor e uma única carga	100%
Um consumidor e várias cargas	85%
Vários consumidores e várias cargas	70%

Fonte: Companhia Energética do Ceará – Critério de Projeto CP 01 (2012).

Tabela 4.2 – Fator de demanda para residências

Potência Instalada (W)	Fator de Demanda (%)
Até 1000	86
1000 – 2000	75
2000 – 3000	66
3000 – 4000	59
4000 – 5000	52
5000 – 6000	45
6000 – 7000	40
7000 – 8000	35
8000 – 9000	31
9000 – 10000	27
Maior que 10000	24

Fonte: Companhia Energética do Ceará – Critério de Projeto CP 01 (2012).

- **Fator de demanda (FD):** É a razão da demanda máxima num intervalo de tempo especificado pela carga total instalada. O valor do fator de demanda para residências está relacionado à potência instalada como se verifica na tabela 4.2.
- **Demanda individual da carga (D_i):** É o somatório da potência instalada da carga multiplicada pelo seu respectivo fator de demanda.
- **Taxa de crescimento (t_c):** É o fator de multiplicação para determinação da demanda total. Deve ser estabelecido em função da perspectiva do crescimento da carga na área ou ainda com base na variação percentual do consumo médio característico da região.
- **Demanda estimada (DE):** É o valor máximo da demanda da instalação expresso em Watts (W). Para o cálculo da demanda total foi levando em consideração o fator diversidade, a taxa de crescimento anual para a carga, a demanda individual de cada consumidor e a vida útil das instalações. [26]

$$DE = D_i \cdot Q_c \cdot F_d \cdot \left(1 + \frac{t_c}{100}\right)^n \quad (4.1)$$

4.5 Valores atualizados

Como foi visto na planilha de demanda elétrica, ao inserir alguns parâmetros de entrada como potência instalada, quantidade de consumidores e tempo de funcionamento da carga, o programa calcula a demanda elétrica total do sistema. Esse dado de saída será necessário para o dimensionamento do sistema fotovoltaico, sistema eólico, gerador a gás e os biodigestores. Contudo, antes de começar o dimensionamento desses sistemas, é necessário abrir e atualizar a planilha chamada de Valores Atualizados como mostra a figura 4.5, onde são mostrados alguns valores de parâmetros importantes e suas respectivas especificações para painéis FV, aerogeradores, biodigestores e gerador a gás. Essa planilha pode ser aberta através do link “Atualizar Valores” que está localizado no canto direito das telas de Demanda, Solar Fotovoltaica, Eólica e Biodigestores.

Figura 4.5 – Planilha dos valores atualizados

VALORES ATUALIZADOS			
Tabelas para Atualização de Valores			
Módulos Fotovoltaicos			
Material	Preço (R\$/und)	Preço (R\$/und)	
Módulo FV 50 Wp	R\$ 500	R\$ 500	
Bateria 105 Ah	R\$ 439	R\$ 439	
Controlador de carga 10 A	R\$ 200	R\$ 200	
Controlador de carga 20 A	R\$ 409	R\$ 409	
Controlador de carga 30 A	R\$ 700	R\$ 700	
Inversor 300 W	R\$ 200	R\$ 200	
Inversor 600 W	R\$ 300	R\$ 300	
Inversor 1000 W	R\$ 540	R\$ 540	
Inversor 1800 W	R\$ 2.200	R\$ 2.200	
Inversor 3000 W	R\$ 3.200	R\$ 3.200	
Aerogeradores			
Potência (W)	Preço (R\$/und)	Preço (R\$/und)	
Enersud/Notus-112/250 W	R\$ 2.990	R\$ 2.990	
Enersud/Notus-138/350 W	R\$ 2.990	R\$ 2.990	
Enersud/Notus-208/700 W	R\$ 4.200	R\$ 4.200	
Enersud/Notus-246/1000 W	R\$ 5.990	R\$ 5.990	
Fortis/Espada 800 W	R\$ 4.850	R\$ 4.850	
Fortis/Passaat 1400 W	R\$ 6.460	R\$ 6.460	
Fortis/Montana 5000 W	R\$ 16.590	R\$ 16.590	
Fortis/Alize 10000 W	R\$ 74.330	R\$ 74.330	
Fortis/Boreas 30000 W	R\$ 181.170	R\$ 181.170	
Biodigestores			
Material	Preço (R\$/und)	Preço (R\$/und)	
Escavação 2 a 5m (R\$/m3)	R\$ 36,66	R\$ 36,66	
Alvenaria 0,1 (R\$/m2)	R\$ 35,62	R\$ 35,62	
Alvenaria 0,2 (R\$/m2)	R\$ 76,77	R\$ 76,77	
chapisco (R\$/m2)	R\$ 3,11	R\$ 3,11	
reboco (R\$/m2)	R\$ 17,15	R\$ 17,15	
concreto magro (R\$/m3)	R\$ 300,00	R\$ 300,00	
caixa de 5000 L (R\$/und)	R\$ 1.900,00	R\$ 1.900,00	
caixa de 10000 L (R\$/und)	R\$ 2.500,00	R\$ 2.500,00	
caixa de 15000 L (R\$/und)	R\$ 4.400,00	R\$ 4.400,00	
vara pvc (R\$/und)	R\$ 85,00	R\$ 85,00	
Gerador a Biogás			
Potência (kVA)	Consumo (m3/h)	Preço (R\$/und)	Preço (R\$/und)
2,5	1,2	R\$ 2.200	R\$ 2.200
4	2	R\$ 4.720	R\$ 4.720
9,5	4	R\$ 12.330	R\$ 12.330
18	4,81	R\$ 25.200	R\$ 25.200
37	10,33	R\$ 32.275	R\$ 32.275
75	19,33	R\$ 50.695	R\$ 50.695
100	23,58	R\$ 65.586	R\$ 65.586
198	41,11	R\$ 138.810	R\$ 138.810

Na planilha Valores Atualizados, a primeira coluna possui uma lista de equipamentos e materiais que serão utilizados pelo programa, a segunda coluna é uma lista de preços que foram coletados no ano de 2013 e a terceira coluna é onde o usuário poderá atualizar os valores dos preços dos equipamentos.

4.6 Energia solar fotovoltaica

Nessa planilha é dimensionado o sistema FV. A partir de alguns dados de entrada e modelos matemáticos que serão descritos a seguir, o programa calcula a quantidade de painéis FV, baterias, controladores de carga, inversores, assim como o custo do investimento inicial do sistema. [23]

4.6.1 Dados de entrada

Os dados de entrada a serem preenchidos pelo usuário são apresentados na figura 4.6 e descritos a seguir.

Figura 4.6 – Dados de entrada do sistema FV.

ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	
Dados de Entrada	
Dados Gerais	Atualizar Valores
Tempo de Armazenamento (d)	2
Eficiência de Conversão CC-CA	0,95
Tensão nominal (V)	12
Horas de Sol Pleno (h/dia)	5
Latitude do local (graus)	10
Módulos Fotovoltaicos	
Potência Nominal (Wp)	50
Fator de correção	0,9
Corrente nominal (A)	3,7
Tensão Temperatura Mais Alta (V)	15
Baterias	
Eficiência	0,95
Profundidade de Descarga Máxima	0,2
Capacidade nominal (Ah)	105
Tensão nominal (V)	12

4.6.1.1 Dados de entrada do sistema

- **Tempo de armazenamento (T_a):** Representa uma estimativa para um período sem insolação em que a carga pode ser atendida, também chamado de autonomia do sistema.
- **Eficiência de conversão CC/CA do inversor ($\eta_{cc/ca}$):** É uma função do carregamento do inversor e a tensão nominal do sistema e está relacionado com a

perda de energia que ocorre durante a conversão da energia contínua em alternada. O valor da eficiência de conversão pode ser encontrado através da folha de dados do dispositivo.

- **Tensão nominal do sistema (V_{ns}):** É a tensão em que a parte contínua do sistema vai operar. Este valor deve coincidir com a tensão de entrada do inversor, os padrões mais comuns são 12, 24 e 48 V.
- **Horas de sol pleno (h_{sp}):** Corresponde ao número equivalente de horas com radiação solar constante e igual a 1 kW/m², de forma que a energia total diária acumulada é mantida.
- **Latitude do local:** É dada em graus, permite a sugestão do melhor ângulo de inclinação para o sistema.

4.6.1.2 Dados de entrada do módulo fotovoltaico

- **Potência nominal (P_{nm}):** É o valor da potência nominal em Watt-pico (Wp) e pode ser encontrado na folha de dados do módulo fotovoltaico.
- **Corrente nominal (I_{nm}):** É o valor da corrente nominal em ampère (A) e pode ser encontrado na folha de dados do módulo fotovoltaico.
- **Fator de correção (STC):** É o fator de ajuste da corrente do módulo nas Condições Padrão de Teste (STC) para as condições de campo, devido ao acúmulo de poeira, perdas entre os módulos mal conectados, degradação ao longo do tempo, etc. A tabela 4.3 mostra o fator de correção para módulos cristalinos e amorfos.

Tabela 4.3 – Fator de correção para os módulos fotovoltaicos

Tipo de Módulo Fotovoltaico	Fator de Correção
Cristalino	0,9
Amorfo	0,7

Fonte: Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito - CRESESB. “Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos”. Rio de Janeiro. (2004).

- **Tensão para máxima temperatura (V_{mt}):** É o valor mais alto esperado para a temperatura de operação. Utiliza-se o valor fornecido nas especificações do fabricante para a tensão do módulo.

4.6.1.3 Dados de entrada das baterias

- **Eficiência (η_{bat}):** É igual ao número de ampères-hora de saída dividido pelo número de ampères-horas de entrada e depende da temperatura de operação das baterias.
- **Profundidade de descarga máxima (Pd_{bat}):** É o ciclo de descarga diário da bateria. Quanto mais profundo o ciclo, mais curta a vida da bateria. Alguns valores típicos utilizados são 0,2 para baterias estacionárias e 0,15 para automotivas.
- **Capacidade nominal (C_{nbat}):** É a capacidade definida em condições estabelecidas de temperatura ambiente, duração de descarga e tensão final. O valor de capacidade é indicado em ampère-hora (Ah) e indica o valor total da corrente que a bateria irá fornecer em um determinado tempo.
- **Tensão nominal (V_{nbat}):** O valor da tensão geralmente vem impresso na bateria.

4.6.2 Dados de saída

4.6.2.1 Dimensionamento dos módulos fotovoltaicos

A potência do módulo fotovoltaico disponível no programa é de 50 Wp e o valor do ângulo de inclinação do painel fotovoltaico é o mesmo valor da latitude do lugar desde que seja igual ou maior do que 15 graus. Caso contrário, o programa apresenta um ângulo de 15 graus.

A quantidade de módulos FV em série (Q_{FVs}) é determinada pela equação:

$$Q_{FVs} = \frac{V_{ns}}{V_{mt}} \quad (4.2)$$

E a quantidade de módulos FV em paralelo (Q_{FVp}) é determinada pela equação:

$$Q_{FVp} = \frac{DET_f}{V_{ns} \cdot \eta_{cc/ca} \cdot \eta_{bat} \cdot h_{sp} \cdot STC \cdot I_{nm}} \quad (4.3)$$

4.6.2.2 Dimensionamento do banco de baterias

Primeiramente é calculada a corrente necessária das baterias para suprir a demanda de corrente elétrica da instalação, a fórmula é dada por:

$$I_{dbat} = \frac{DE.T_a.T_f.(1 - Pd_{bat})}{V_{ns}.\eta_{cc/ca}.\eta_{bat}} \quad (4.4)$$

A quantidade de baterias em série (Bat_s) é calculada por:

$$Q_{bats} = \frac{V_{ns}}{V_{nbat}} \quad (4.5)$$

A bateria disponível no programa possui capacidade nominal igual a 105 Ah e a quantidade de baterias em paralelo (Q_{batp}) é determinada pelo maior número inteiro positivo calculado por:

$$Q_{batp} = \frac{I_{dbat}}{C_{nbat}} \quad (4.6)$$

4.6.2.3 Dimensionamento do controlador de carga

Primeiramente é calculada a corrente mínima do controlador de carga que é dada por:

$$I_{mc} = Q_{FVP} . I_{nm} \quad (4.7)$$

A quantidade de controladores de carga é determinada pela divisão entre a corrente mínima a ser controlada e as correntes nominais disponíveis na biblioteca da planilha que são de 10, 20 e 30 A.

$$Q_{co} = \frac{I_{mc}}{I_{nco}} \quad (4.8)$$

4.6.2.4 Dimensionamento do inversor

A potência do inversor (P_{inv}) pode variar de 300 a 3000 W e é determinada de acordo com o valor da demanda estimada de acordo com a fórmula:

$$P_{inv} = \frac{DE}{0,9} \quad (4.9)$$

A partir dos dados de entrada inseridos pelo usuário e dos modelos matemáticos descritos acima, o programa calcula os dados de saída e apresenta os resultados em uma tela como mostra na figura 4.7.

Figura 4.7 – Dados de saída do sistema FV

Figura 14 - Dados de saída do sistema PV

Dados de Saída			
Módulos Fotovoltaicos			
FV em Série	1	Quantidade	163
FV em Paralelo	163	Potência Total	8150
Potência FV (Wp)	50	Ângulo de Inclinação	15
Baterias			
Baterias em Série	1	Quantidade	42
Baterias em Paralelo	42		
Controlador de Carga			
Corrente nominal (A)	10	Quantidade	61
Inversor			
Potência (W)	600	Quantidade	11
Custo Total do Sistema			R\$ 115.438

Concluída a etapa da energia solar fotovoltaica, o usuário avança para a energia eólica.

4.7 Energia eólica

Nessa planilha é dimensionado o sistema eólico. A partir de alguns dados de entrada inseridos no programa Ventos, como velocidade média e altura de medição do vento, rugosidade e fator de forma, o programa GDHER calcula a quantidade de aerogeradores, baterias, controladores de carga, inversores, assim como o custo do investimento inicial do sistema para suprir a demanda de certa localidade. A seguir, são descritos os dados de entrada e saída e os modelos matemáticos.

4.7.1 Dados de entrada

A figura 4.8 apresenta a planilha dos dados de entrada do sistema eólico. Para inserir os dados de entrada do sistema, primeiramente, é necessário abrir o programa Ventos pressionando o botão “Programa Ventos”.

Figura 4.8 – Dados de entrada do sistema eólico

ENERGIA EÓLICA			
Dados de Entrada			
Dados Gerais			Atualizar Valores
Tempo de Armazenamento (d)	2	Programa Ventos	
Eficiência de Conversão CC-CA	0,95		
Tensão nominal (V)	12		
Velocidade Média do Vento (m/s)	7		
Rugosidade	0,1		
Aerogerador			
Fabricante/Modelo	Fortis/Montana		
Altura do Cubo (m)	18		
Potência Nominal (kW)	5		
Fator de Capacidade (%)	33,23		
Energia Produzida (kWh/d)	1,66		
Baterias			
Eficiência	0,95		
Profundidade de Descarga Máxima	0,2		
Capacidade nominal (Ah)	105		
Tensão nominal (V)	12		

A tela inicial do programa Ventos é mostrado na figura 4.9, o usuário deverá acessar o link com a opção “Dados Processados”. [27]

Figura 4.9 – Tela inicial do programa Ventos



Fonte: Sabino Júnior, F. R. (2003) [27].

Como mostra a figura 4.10, o usuário deve inserir alguns dados de entrada como velocidade média do vento, a altura de medição, a rugosidade do local e o fator de forma, além de escolher um aerogerador na biblioteca do programa. Pressionando o botão “Abrir”, o

usuário terá várias opções de aerogeradores com diferentes fabricantes e modelos e suas potências variam de 250 a 30.000 W.

Figura 4.10 – Dados de entrada do programa Ventos

Dados do local		Valor
Velocidade média	m/s	7
Altura de medição do vento	m	10
Rugosidade	m	0,1
Fator de forma		4
Fator de escala	m/s	8,71
Velocidade à altura do cubo	m/s	7,89

Características do sistema		Valor
Fabricante/Modelo		Fortis/Montana
Altura do cubo	m	18
Potência	kW	5,00

Dados de máquina

Fonte: Sabino Júnior, F. R. (2003) [27].

A partir dessas informações, o programa Ventos irá calcular o fator de capacidade e a energia elétrica gerada pelo aerogerador, e enviará os dados de entrada e saída para o programa GDHER e este realiza os cálculos de dimensionamento do sistema eólico.

4.7.2 Dados de saída

4.7.2.1 Dimensionamento dos aerogeradores

A quantidade de aerogeradores Q_{Ae} necessária para suprir a demanda total do sistema é determinada pela equação:

$$Q_{Ae} = \frac{DE * T_f}{\eta_{cc/ca} * \eta_{bat} * E_{Ae}} \quad (4.10)$$

Onde E_{Ae} representa a energia elétrica total gerada pelo aerogerador.

4.7.2.2 Dimensionamento do banco de baterias, controladores de carga e inversores

Para o dimensionamento do banco de baterias, controladores de carga e inversores foram adotados os mesmos modelos matemáticos da geração fotovoltaica do ponto de vista da demanda, ou seja, foram utilizados os mesmos arranjos.

A partir dos dados de entrada inseridos pelo usuário e dos modelos matemáticos descritos acima, o programa calcula dos dados de saída e apresenta os resultados em uma tela como mostra a figura 4.11. Concluída a etapa dos aerogeradores, o usuário avança para os biodigestores.

Figura 4.11 – Dados de saída do sistema eólico

Dados de Saída			
Aerogerador			
Potência (kW)	5	Quantidade	20
Baterias			
Baterias em Série	1	Quantidade	42
Baterias em Paralelo	42		
Controlador de Carga			
Corrente nominal (A)	10	Quantidade	61
Inversor			
Potência (W)	600	Quantidade	11
Custo Total do Sistema			R\$ 365.738

4.8 Biodigestores

Nessa planilha é dimensionado o gerador a biogás e os biodigestores. O biodigestor indiano é bastante difundido no Brasil e possui uma grande facilidade de controle da pressão de saída do biogás. Por causa desses fatores, esse modelo de biodigestor foi adotado pelo programa.

Então, a partir de alguns dados de entrada inseridos pelo usuário mostrados na figura 4.12, o programa calcula a potência do gerador necessária para suprir a demanda da comunidade, utilizando como combustível o biogás produzido na própria localidade a partir de matéria-prima local através de biodigestores. A seguir, são descritos os dados de entrada e saída e os modelos matemáticos. [28]

4.8.1 Dados de entrada

- **Profundidade máxima do solo:** Como o biodigestor adotado é construído enterrado, o usuário deve informar a maior profundidade permitida pelo solo.

- **Pressão do gás:** Para geradores a gás, a pressão de saída do biogás deve ser maior ou igual a 0,15 mca.
- **Biomassa:** O usuário deve informar o tipo e a quantidade de animais existentes na localidade que fornecem matéria-prima para a produção do biogás e biofertilizantes.

Figura 4.12 – Dados de entrada do sistema

BIODIGESTOR	
Dados de Entrada	
<div>Dados Gerais Atualizar Valores</div>	
Profundidade Máxima do Solo (m)	3
Pressão do Gás (mca)	0,15
Biomassa	
Animais	Quantidade
Bubalino	
Bovino	40
Equino	
Suíno	
Caprino	
Ovino	
Aves	

4.8.2 Dados de saída

4.8.2.1 Dimensionamento do gerador a biogás

A potência nominal do gerador é determinada em função da demanda elétrica total do sistema, contudo é recomendável que o motor não trabalhe com uma carga muito baixa. Para isso, é necessário que o Índice de Carregamento (IC), calculado através da divisão entre a potência elétrica da carga e a potência nominal do gerador, seja superior a 50%.

$$0,5 < IC = \frac{DE}{P_N} \quad (4.11)$$

O programa possui uma biblioteca com vários geradores a biogás e suas especificações. A partir da potência elétrica da carga, a ferramenta escolhe o melhor gerador que atenda as recomendações com o objetivo de atingir o melhor rendimento como é apresentado na figura 4.13.

Figura 4.13 – Dados de saída do gerador a biogás

Gerador a Biogás			
Potência Nominal (kVA)	9,5		
Consumo (m³/h)	4,00		
Índice de Carregamento (%)	62	Custo do Gerador	R\$ 12.330

4.8.2.2 Dimensionamento do biodigestor

Geralmente, para o dimensionamento de um biodigestor indiano, primeiro são calculados todos os parâmetros para sua construção, como suas dimensões e a quantidade necessária de biodigestores, só depois os gasômetros são confeccionados em chapas de aço soldadas. Além do custo de material e mão-de-obra especializada para fabricação desse gasômetro, o seu peso dificulta o transporte e a montagem desta peça do biodigestor.

Sabendo disso, optou-se por utilizar como gasômetro, caixas d'água de fibra de vidro como mostra a figura 4.14. Esses reservatórios têm algumas vantagens, já são pré-fabricados, são bastante acessíveis no comércio de material de construção e de fácil transporte e montagem.

Figura 4.14 – Caixa d'água de fibra de vidro utilizada como gasômetro



Fonte: Fortlev (2013).

A partir dos parâmetros de entrada inseridos pelo usuário, o programa calcula todos os parâmetros de saída e o custo total do sistema para cada uma das caixas d'água, a de 5000, 10.000 e 15000 litros. A planilha então avalia qual, dentre os resultados, representa o

menor investimento inicial e retorna para o usuário os dados de saída do sistema. A tabela 4.4 mostra as especificações das três caixas d'água.

Tabela 4.4 – Especificações das caixas d'água de fibra de vidro

Caixa D'água (L)	D (m)	d (m)	H (m)
5000	2,21	1,86	1,64
10000	2,7	2,38	2
15000	2,95	2,5	2,59

Fonte: Fortlev (2013).

Onde: D= diâmetro maior da caixa d'água, d= diâmetro menor da caixa d'água e H= altura da caixa d'água.

Com o objetivo de atingir o rendimento máximo na produção de biogás, algumas proporcionalidades devem ser seguidas quando se deseja fazer o dimensionamento correto do biodigestor como, por exemplo:

$$0,6 \leq \frac{d_{Bd}}{h_{Bd}} \leq 1,0 \quad (4.12)$$

Onde: d_{Bd} = Diâmetro Interno do Biodigestor e h_{Bd} = altura do Biodigestor, que equivale a verdadeira profundidade do solo.

Apesar de o usuário ter informado a profundidade permitida pelo solo, nem sempre é utilizada a profundidade máxima. O programa calcula qual o diâmetro interno e a altura mais adequada para o biodigestor, respeitando as proporcionalidades e as dimensões do gasômetro. As principais medidas de um biodigestor modelo indiano são apresentadas na figura 4.15.

Um importante dado de saída é a quantidade de biodigestores que serão necessários para suprir a demanda de uma localidade e esse número vai depender tanto do volume de biogás exigido pelo gerador, quanto do volume útil do biodigestor.

Então, primeiramente, é calculado o volume de biogás demandado pelo motor-gerador através da expressão abaixo:

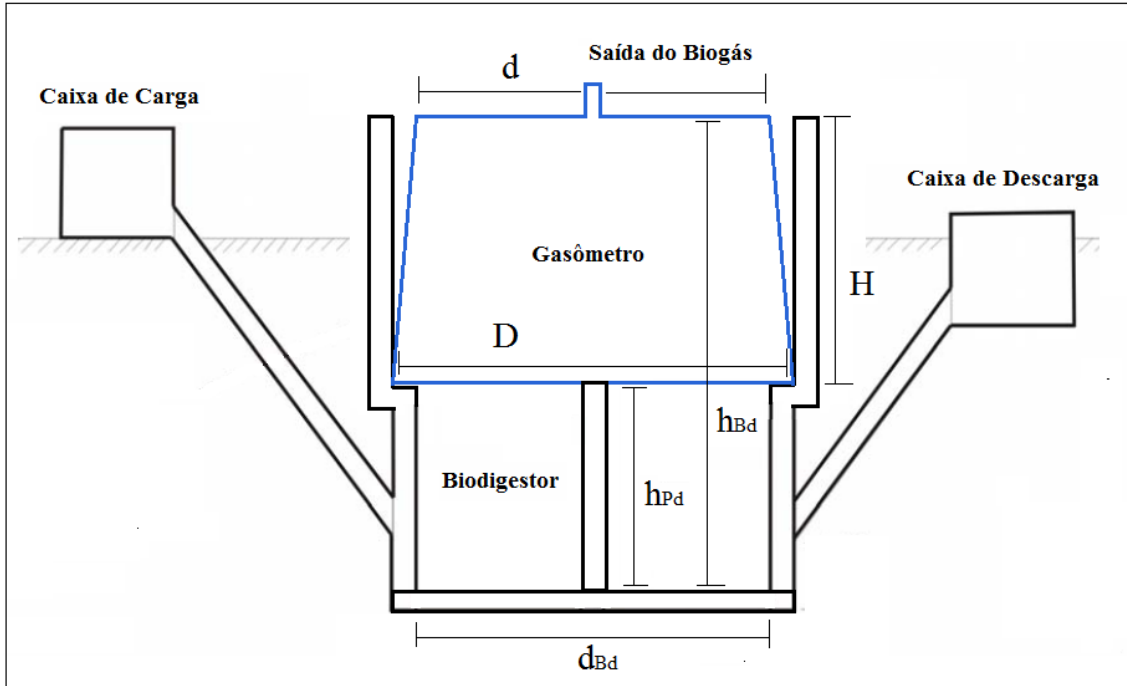
- **Volume de biogás necessário (V_{BioN}):**

É o volume de gás exigido pelo gerador para suprir a demanda da comunidade num determinado intervalo de tempo.

$$V_{Bio N} = C.T_f \quad (4.13)$$

Onde: C é igual ao consumo de biogás do gerador em m³/h e T_f é a quantidade de horas por dia de funcionamento da carga.

Figura 4.15 – Biodigestor modelo indiano



Em seguida, a partir das equações abaixo, o programa calcula o volume da parede divisória e o volume do biodigestor. Portanto, encontrando o volume útil do biodigestor.

- **Volume da parede divisória (V_{Pd}):**

A parede divisória de um biodigestor é uma parede central que divide o tanque de fermentação em duas câmaras. Sua função é fazer com que o material circule por todo o interior da câmara de fermentação. E com relação a essa parede central, outra condição de proporcionalidade deve ser respeitada:

$$h_{Pd} \geq \frac{2}{3} \cdot h_{Bd} \quad (4.14)$$

Onde: h_{Pd}= Altura da Parede Divisória do Biodigestor.

Assim o Volume da Parede divisória é obtido através da seguinte equação:

$$V_{Pd} = h_{Pd} \cdot d_{Bd} \cdot l_{Pd} \quad (4.15)$$

Onde: l_{Pd}=Largura da Parede Divisória do Biodigestor, que é de aproximadamente 0,25 m.

- **Volume do biodigestor (V_{Bd}):**

$$V_{Bd} = h_{Bd} \cdot \frac{\pi \cdot d_{Bd}^2}{4} \quad (4.16)$$

- **Volume útil do biodigestor (V_{uBd}):**

$$V_{uBd} = V_{Bd} - V_{Pd} \quad (4.17)$$

Enfim, a quantidade de biodigestores pode ser obtida de acordo com a seguinte relação:

- **Quantidade de biodigestores (Q_{Bd}):**

O volume útil de um biodigestor pode ser determinado como no mínimo, o triplo do volume do biogás demandado pela carga. Isso se deve porque, para a produção de biogás, o biodigestor será preenchido pelo substrato (água + matéria orgânica) e o biogás produzido na proporção mínima de 1:2.

$$Q_{Bd} = 3 \cdot \frac{V_{BioN}}{V_{uBd}} \quad (4.18)$$

Contudo, a quantidade de biodigestores também vai depender da quantidade de gasômetros que serão necessários para o sistema.

4.8.2.3 Dimensionamento do gasômetro

- **Volume do gasômetro**

$$V_{Ga} = \frac{\pi}{12} \cdot (H - P) \cdot (D^2 + D \cdot d + d^2) \quad (4.19)$$

- **Volume de biogás a ser armazenado**

$$V_{BioA} = V_{BioN} \cdot \left(1 - \frac{T_f}{24}\right) \quad (4.20)$$

- **Quantidade de gasômetros**

$$Q_{Ga} = \frac{V_{BioA}}{V_{Ga}} \quad (4.21)$$

Após o dimensionamento do gasômetro, a quantidade correta de biodigestores será o maior valor entre as expressões 4.18 e 4.21.

4.8.2.4 Dimensionamento da caixa de carga e descarga

- **Caixa de carga e descarga**

Para a caixa de carga e descarga, adotou-se uma caixa padrão de base quadrada com lateral de 1 m e altura de 0,8 m, resultando em um volume de 0,8 m³. A caixa de descarga deverá situar-se em desnível abaixo da caixa de carga em pelo menos 0,3 m.

- **Tubulação das caixas de carga e descarga**

$$L_{PVC} = 2 \cdot \left(\frac{h_{Bd} - 0,3}{\cos 30^\circ} \right) \quad (4.22)$$

4.8.2.5 Análise dos custos do biodigestor

- **Custo com a tubulação (C_T)**

$$Q_V = \frac{L_{PVC}}{6} \quad (4.23)$$

$$C_T = a \cdot Q_V \quad (4.24)$$

Onde: Q_V= Quantidade de tubos de 6 metros de comprimento com diâmetro mínimo de 150 mm em PVC e a= Preço unitário desse tubo.

- **Custo para escavação do solo (C_E)**

É calculado a partir do produto entre o volume do solo que foi escavado para a construção do biodigestor e a mão-de-obra necessária.

$$V_E = h_{Bd} \cdot \frac{\pi \cdot d_{Bd}^2}{4} \quad (4.25)$$

$$C_E = b \cdot V_E \quad (4.26)$$

Onde: V_E= Volume de escavação do solo e b= valor da escavação manual de valas em profundidade de 2 a 5 metros.

- **Custo com alvenaria e acabamento (C_A)**

$$A = 4,48 + h_{Bd} \cdot 2\pi \cdot d_{Bd} + \frac{h_{Bd}}{3} \cdot d_{Bd} \quad (4.27)$$

$$C_A = c \cdot A \quad (4.28)$$

Onde: A= Área de alvenaria e acabamento para parede e c= somatório dos valores dos preços da alvenaria, do chapisco e do reboco.

Para biodigestores com volume de até 10 m³, foram adotados alvenarias em tijolo maciço de 0,10 m e para biodigestores com volumes maiores, foram adotados alvenarias em tijolo maciço de 0,20 m. Para a fabricação do chapisco foi usada fração de 1:6 de cimento e areia por m² e para revestimento foi utilizada a fração de 1:5 de cimento e areia por m².

- **Custo com o piso (C_{Pi})**

$$V_{Pi} = 0,1 \cdot \frac{\pi \cdot d_{Bd}^2}{4} \quad (4.29)$$

Onde: V_{Pi}= Volume do Piso.

$$C_{Pi} = d \cdot V_{Pi} \quad (4.30)$$

- **Custo do gasômetro (C_G)**

Onde: C_G= Custo da caixa d'água.

- **Custo inicial de um biodigestor (C_{Bd})**

$$C_{Bd} = 1,2 \cdot (C_T + C_E + C_A + C_{Pi} + C_G) \quad (4.31)$$

Onde: 1,2 = Margem de segurança de 20% para variação de preços, despesas extras e acessórios;

- **Custo inicial total para todos os biodigestores (C_{tBd})**

O custo do investimento inicial total dos biodigestor é calculado multiplicando-se a quantidade de biodigestores pelo seu custo unitário.

$$C_{tBd} = Q_{Bd} \cdot C_{Bd} \quad (4.32)$$

Os resultados do dimensionamento do biodigestor são apresentados na figura 4.16.

Figura 4.16 – Dados de saída do biodigestor

Biodigestor e Gasômetro			
Biogas Necessário (m ³ /d)	20,0		
Diâmetro Interno (m)	2	Quantidade de Biodigestores	8
Altura do Biodigestor (m)	3		
Volume do Gasômetro (L)	5000	Custo dos Biodigestores	R\$ 47.781

4.8.2.6 Análise da biomassa

Como mostra a figura 4.17, o programa faz também uma análise da biomassa informada pelo usuário e informa o custo total do sistema.

Figura 4.17 – Análise da biomassa.

Análise da Biomassa			
Biogás Produzido (m ³ /d)	14,4	Tempo de Funcionamento (h)	3,6
Biogás Excedente (m ³)	0	Tempo Excedente (h/dia)	0,00
Déficit de Biogás (m ³ /d)	-5,6	Energia Excedente (kWh/d)	0,00

- **Biogás produzido:** É a quantidade de biogás que pode ser produzido a partir da quantidade de animais informada na entrada de dados. A tabela 4.5 apresenta algumas produções de biogás em função das espécies de animais.
- **Tempo de funcionamento:** É a quantidade de horas de funcionamento da carga por dia em função do biogás. É calculado a partir da divisão entre a quantidade de biogás produzido e o consumo de biogás pelo gerador.

Tabela 4.5 – Produção de biogás a partir de dejetos de animais

Espécie do Animal	Produção de Biogás (m ³ /animal.dia)
Bubalino	0,550
Bovino	0,360
Equino	0,360
Suíno	0,180
Caprino	0,075
Ovino	0,075
Aves	0,011

Fonte: Canafístula, F.J.F. (2013) [25]

- **Biogás excedente:** É a diferença entre o biogás produzido e o biogás necessário para atender ao consumo do gerador. Existe biogás excedente quando a sua produção é maior que a demanda do sistema. Para o exemplo, não existe produção de biogás excedente.

- **Tempo excedente:** É a quantidade de horas a mais de funcionamento da carga por dia em função do biogás excedente. É calculado a partir da divisão entre a quantidade de biogás excedente e o consumo de biogás pelo gerador.
- **Excedente energia estimada:** É a quantidade diária de energia que pode ser gerada a partir do biogás excedente.
- **Déficit de biogás:** Existe um déficit de biogás, quando a quantidade de biogás necessária para o funcionamento do sistema é maior que a quantidade de biogás produzida.
- **Acréscimo de animais:** É a quantidade de animais que deve ser acrescida para que a produção de biogás consiga atender plenamente ao gerador. A figura 4.18 apresenta várias opções de acréscimo de animais para atender plenamente à instalação. [28]

Figura 4.18 – Opções de acréscimo de animais

Animais	Acréscimo
Bubalino	11
Bovino	16
Equino	16
Suíno	32
Caprino	75
Ovino	75
Aves	510

4.9 Análise financeira

Após fazer o dimensionamento dos sistemas, o programa permite fazer uma análise financeira de cada modalidade de fornecimento de energia elétrica, comparando com a rede elétrica convencional.

4.9.1 Dados de Entrada

- **Taxa de mínima de atratividade:** É uma [taxa de juros](#) que representa o mínimo que um investidor se propõe a ganhar quando faz um investimento.
- **Preço do kWh:** Valor atual do kWh cobrado pela concessionária local.

4.9.1.1 Rede Elétrica

- **Custo inicial/km:** É o preço médio do km de rede convencional em média tensão. Este valor pode ser obtido diretamente na concessionária local.
- **Manutenção/km:** É a estimativa, anual percentual, do valor total da instalação relativo às despesas de inspeção, poda de árvores, manutenções corretivas e preventivas da rede convencional.
- **Distância da rede:** é a distância que a rede convencional já existente precisa ser estendida para atender à instalação ou carga a ser eletrificada.

4.9.1.2 Solar Fotovoltaica

- **Manutenção:** Estimativa percentual do valor de aquisição do arranjo solar fotovoltaico, referente às manutenções preventivas e corretivas dos mesmos.
- **Período de Manutenção:** Período, em anos, em que ocorre a manutenção dos sistemas FV.
- **Vida útil da bateria:** Estimativa, em anos, da vida útil das baterias.

4.9.1.3 Eólica

- **Manutenção:** Estimativa percentual do valor de aquisição do sistema de geração eólico, referente às manutenções preventivas e corretivas dos mesmos.
- **Período de Manutenção:** Período, em anos, em que ocorre a manutenção dos sistemas de geração eólica.
- **Vida útil da bateria:** Estimativa, em anos, da vida útil das baterias.

4.9.1.4 Biogás

- **Salário mínimo:** É o valor do salário mínimo mensal em vigor no país. A ferramenta utiliza como padrão a quantidade de um homem-hora-dia por biodigestor calculado.
- **Manutenção do gerador:** Estimativa percentual do valor do custo do gerador a biogás referente aos custos de manutenções preventivas e corretivas.

- **Período Manutenção:** Frequência em anos, em que ocorre a manutenção do gerador à biogás.
- **Manutenção do biodigestor:** Estimativa, em percentual, do valor do custo da construção do biodigestor, referente às manutenções preventivas e corretivas dos mesmos.
- **Período Manutenção:** Frequência em anos, em que ocorre a manutenção do biodigestor.

4.9.2 Dados de Saída

A partir dos dados de entrada inseridos pelo usuário, o programa calcula alguns parâmetros de saída através das relações financeiras a seguir. [29]

- **Benefício/Custo (B/C)**

$$B / C = \frac{\sum VPL(Benefícios)}{\sum VPL(Custos)} \quad (4.33)$$

Quanto maior for a relação benefício/custo, mais atraente é o investimento. Essa relação é atualizada segundo o Valor Presente Líquido (VPL).

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{valor}{(1+i)^n}$$

- **Recuperação do capital (R_{ec})**

$$R_{ec} = C_i \cdot \left[\frac{(i \cdot (1+i)^n)}{(1+i)^n - 1} \right] \quad (4.34)$$

Onde: R_{ec} = Retirada anual para que se recupere o investimento, C_i = Custo do investimento inicial, i = Taxa mínima de atratividade e n = vida útil do sistema. Quanto menor o valor de R , melhor é o investimento. [30]

Depois que o programa calcula os valores da análise financeira, uma tela chamada de Gráficos é apresentada com os gráficos dos resultados.

4.10 Análise financeira dos sistemas híbridos

Além de fazer uma análise financeira de cada modalidade de fornecimento de energia elétrica, o programa também permite fazer dimensionamento e análise financeira para três configurações de sistemas híbridos: fotovoltaico/eólico, fotovoltaico/biodigestor e eólico/biodigestor.

Na tela de análise financeira de sistemas híbridos, uma tabela é mostrada com diferentes combinações de tecnologias renováveis com variações: 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da demanda sendo atendida por sistemas FV, eólicos e geradores a biogás.

Nessa mesma tabela, para cada configuração de sistemas híbridos, são apresentados os resultados de saída da análise financeira ordenados em ordem decrescente da relação benefício/custo. Clicando em cima de cada configuração dos sistemas híbridos, uma nova tela é aberta mostrando o dimensionamento de cada combinação.

Além de calcular os valores da análise financeira e dimensionar sistemas híbridos uma tela chamada de Gráficos Híbridos é apresentada com os gráficos dos resultados das cinco melhores opções de combinações dos sistemas híbridos.

5 ESTUDO DE CASO

Para uma compreensão melhor do funcionamento da ferramenta e validação do programa foi feito um estudo de caso de eletrificação rural e para isso foram utilizados os parâmetros de entrada descritos na tabela 5.1.

Trata-se de uma comunidade com 10 unidades consumidoras e cada uma possui 4 tomadas e 4 pontos de iluminação somando uma potência instalada de 800 W. O estudo de caso se trata de uma comunidade rural de baixa renda, por isso optou-se por uma taxa de 1% ao ano e como se trata de uma instalação com vários consumidores e várias cargas, o fator de diversidade é igual a 0,7.

Os valores do preço da tarifa de energia elétrica e da extensão da rede elétrica convencional são de R\$ 0,20 e R\$ 26.000,00, respectivamente. Esses dados foram obtidos na concessionária de energia elétrica, COELCE. Adotou-se que a rede elétrica convencional mais próxima encontra-se a uma distância de 7 km da localidade.

Tabela 5.1 – Parâmetros de entrada dos sistemas.

Parâmetros de Entrada	Dados de Entrada
Potência Instalada por Consumidor (W)	800
Quantidade de Consumidores	10
Taxa de Crescimento (%)	1
Fator de Diversidade	0,7
Tempo de Funcionamento da Carga (h/d)	5
Vida Útil da Instalação (a)	20
Horas de Sol Pleno (h/d)	5
Velocidade Média do Vento (m/s)	7
Rugosidade	0,1
Profundidade do Solo (m)	3
Pressão do Gás (mca)	0,15
Quantidade de Animais	40 bovinos
Taxa Mínima de Atratividade (%)	10
Preço do kWh (R\$)	0,20
Preço de Extensão da Rede Elétrica (R\$/km)	26.000
Distância da Rede Elétrica (km)	7
Vida Útil das Baterias (a)	5
Salário Mínimo (R\$)	678

5.1 Resultados e gráficos da análise financeira dos sistemas individualizados

Os resultados da análise financeira para cada um dos sistemas são apresentados na figura 5.1.

Figura 5.1 – Análise financeira para cada um dos sistemas

ANÁLISE FINANCEIRA			
Dados Gerais			
Taxa Mínima de Atratividade (%)	0,1		
Preço do kWh (R\$)	R\$ 0,20	Energia/ano (kWh)	10724,49
Rede Elétrica			
Custo Inicial/Km (R\$/Km)	R\$ 26.000,00		
Manutenção (%)	2	Recuperação do Capital (R\$)	R\$ 21.377,65
Distância de Extensão da Rede (Km)	7	Benefício/Custo	0,09
Módulos Fotovoltaicos			
Custo Inicial (R\$)	R\$ 115.438		
Manutenção (%)	1	Recuperação do Capital (R\$)	R\$ 13.559,30
Período de Manutenção (anos)	10	Benefício/Custo	0,10
Vida Útil da Bateria (anos)	5		
Aerogeradores			
Custo Inicial (R\$)	R\$ 365.738		
Manutenção (%)	1	Recuperação do Capital (R\$)	R\$ 42.959,45
Período de Manutenção (anos)	10	Benefício/Custo	0,04
Vida Útil da Bateria (anos)	5		
Biodigestores			
Custo Inicial (R\$)	R\$ 60.111		
Salário Mínimo (R\$)	R\$ 678,00	Recuperação do Capital (R\$)	R\$ 7.060,63
Manutenção Gerador (%)	5	Benefício/Custo	0,26
Período de Manutenção (anos)	1		
Manutenção Biodigestor (%)	5		
Período de Manutenção (anos)	5		
Preço do Biofertilizante (R\$/m3)	R\$ 5,00		
RESULTADOS			
Sistemas	B/C	Investimento Inicial (R\$)	Recuperação Capital (R\$)
Rede Elétrica	0,095	R\$ 182.000	R\$ 21.378
Módulos Fotovoltaicos	0,105	R\$ 115.438	R\$ 13.559
Aerogeradores	0,045	R\$ 365.738	R\$ 42.959
Biodigestores	0,260	R\$ 60.111	R\$ 7.061

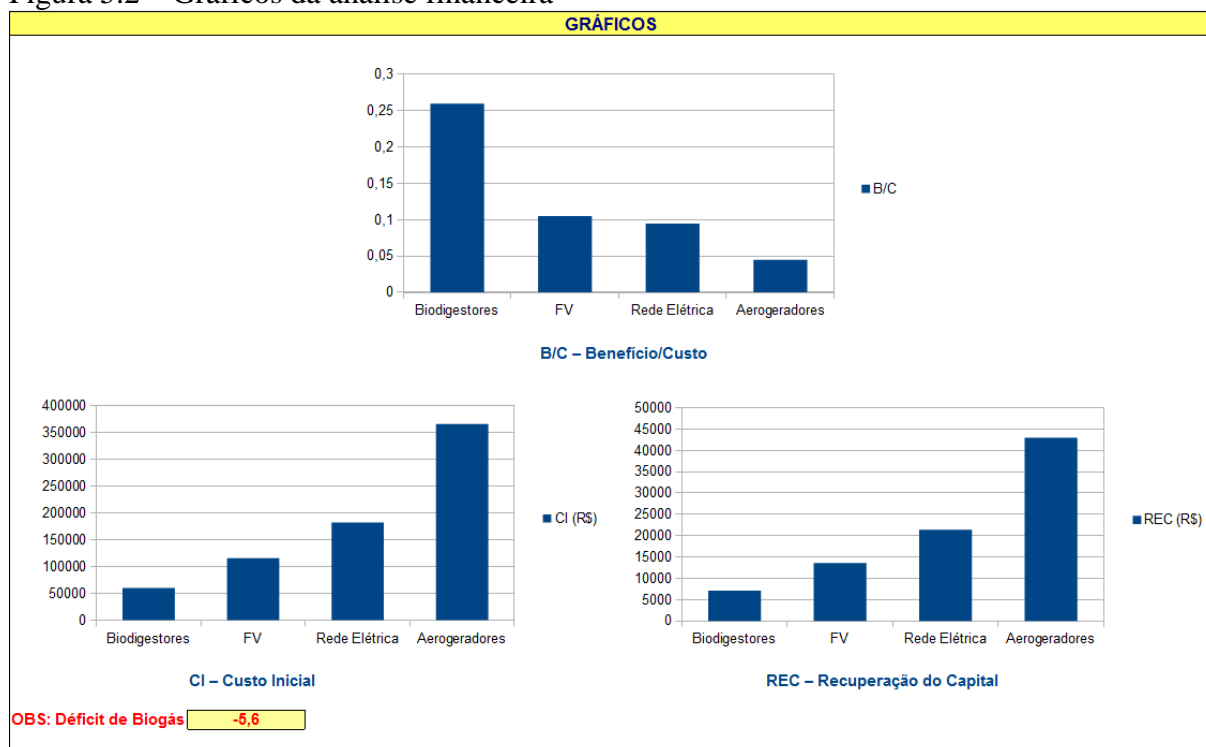
Na figura 5.2 são apresentados três gráficos: relação benefício/custo, investimento inicial e recuperação do capital. Geralmente, a primeira análise feita pelo usuário é em relação ao investimento inicial dos sistemas e o menor custo refere-se aos biodigestores com R\$ 60.111,00. Em seguida, seguem os módulos FV com R\$ 115.438,00, a extensão da rede elétrica convencional com R\$ 182.000,00 e os aerogeradores com R\$ 365.738,00.

O valor do parâmetro de recuperação do capital está ligado diretamente ao custo de investimento inicial, quanto menor o valor da retirada anual para que se recupere o investimento, melhor é o investimento. A melhor alternativa, segue a mesma ordem do investimento inicial, os biodigestores com custo anualizado de R\$ 7.061,00, na sequência vem os módulos FV com R\$ 13.559,00, a rede elétrica com R\$ 21.378,00 e os aerogeradores com R\$ 42.959,00.

Contudo, para o programa, o principal parâmetro a ser observado em uma análise financeira de um investimento é o Valor Presente Líquido (VPL) da relação benefício/custo. Quanto maior essa relação, mais atraente é o investimento. Então, de acordo com esse valor,

os biodigestores com 0,260 é o melhor investimento. Tal condição deve-se ao fato do gerador a biogás produzir seu próprio combustível através dos biodigestores e da possibilidade de comercialização do biofertilizante. Em segundo lugar, vem os módulos FV com 0,105, depois vem a rede elétrica com 0,095 e os aerogeradores com 0,045.

Figura 5.2 – Gráficos da análise financeira



5.2 Análise de sensibilidade dos sistemas individualizados a partir da variação de alguns parâmetros de entrada

A partir dos dados de entrada mostrados na tabela 5.1, é feita uma análise de sensibilidade do sistema variando alguns parâmetros de entrada como: a distância de extensão da rede elétrica, horas de sol pleno, velocidade do vento, profundidade do solo e quantidade de animais disponíveis. Enquanto apenas um parâmetro de entrada sofre variação, os outros parâmetros permanecem constantes.

➤ Variando o parâmetro de entrada: distância de extensão da rede elétrica

Quando a distância de extensão da rede elétrica é igual a 1 ou 2 km, a alternativa mais atraente é a extensão da rede elétrica convencional, pois possui a maior relação benefício/custo, menor preço da energia, menor investimento inicial e menor recuperação do

capital. Em seguida vem a tecnologia dos biodigestores, módulos FV e aerogeradores como mostram as tabelas 5.2 e 5.3.

Tabela 5.2 – Análise financeira para extensão da rede elétrica igual a 1 km.

Sistemas	B/C	Preço kWh (R\$/kW))	Investimento Inicial (R\$)	Recuperação Capital (R\$)
Rede Elétrica	0,662	R\$ 0,28	R\$ 26.000	R\$ 3.054
Módulos Fotovoltaicos	0,105	R\$ 1,26	R\$ 115.438	R\$ 13.559
Aerogeradores	0,045	R\$ 4,01	R\$ 365.738	R\$ 42.959
Biodigestores	0,260	R\$ 0,66	R\$ 60.111	R\$ 7.061

Tabela 5.3 – Análise financeira para extensão da rede elétrica igual a 2 km.

Sistemas	B/C	Preço kWh (R\$/kW))	Investimento Inicial (R\$)	Recuperação Capital (R\$)
Rede Elétrica	0,331	R\$ 0,57	R\$ 52.000	R\$ 6.108
Módulos Fotovoltaicos	0,105	R\$ 1,26	R\$ 115.438	R\$ 13.559
Aerogeradores	0,045	R\$ 4,01	R\$ 365.738	R\$ 42.959
Biodigestores	0,260	R\$ 0,66	R\$ 60.111	R\$ 7.061

Se a distância de extensão da rede elétrica for igual a 3 ou 4 km, a melhor opção em todos os parâmetros de saída da análise financeira será os biodigestores. Em segundo lugar, a extensão da rede elétrica, em terceiro, os módulos FV e, por último, os aerogeradores como mostram as tabelas 5.4 e 5.5.

Tabela 5.4 – Análise financeira para extensão da rede elétrica igual a 3 km.

Sistemas	B/C	Preço kWh (R\$/kW))	Investimento Inicial (R\$)	Recuperação Capital (R\$)
Rede Elétrica	0,221	R\$ 0,85	R\$ 78.000	R\$ 9.162
Módulos Fotovoltaicos	0,105	R\$ 1,26	R\$ 115.438	R\$ 13.559
Aerogeradores	0,045	R\$ 4,01	R\$ 365.738	R\$ 42.959
Biodigestores	0,260	R\$ 0,66	R\$ 60.111	R\$ 7.061

Tabela 5.5 – Análise financeira para extensão da rede elétrica igual a 4 km.

Sistemas	B/C	Preço kWh (R\$/kW))	Investimento Inicial (R\$)	Recuperação Capital (R\$)
Rede Elétrica	0,165	R\$ 1,14	R\$ 104.000	R\$ 12.216
Módulos Fotovoltaicos	0,105	R\$ 1,26	R\$ 115.438	R\$ 13.559
Aerogeradores	0,045	R\$ 4,01	R\$ 365.738	R\$ 42.959
Biodigestores	0,260	R\$ 0,66	R\$ 60.111	R\$ 7.061

Observando o principal parâmetro de saída da análise financeira, que é a relação benefício/custo, apresentado nas tabelas 5.6 e 5.7, quando a distância de extensão da rede elétrica for igual a 5 ou 6 km, a tecnologia mais lucrativa é os biodigestores, pois possui a maior relação benefício/custo. Logo depois vem a rede elétrica, os módulos FV e os aerogeradores. Contudo, observando os outros parâmetros de saída como preço da energia, investimento inicial e retirada anual para que se recupere o investimento, a ordem dos sistemas mais atraentes muda. Em primeiro lugar continua sendo os biodigestores que está melhor em todos os parâmetros, mas em segundo lugar, são os módulos FV, e só depois vem a rede elétrica e os aerogeradores como é apresentado nas tabelas 5.6 e 5.7.

Tabela 5.6 – Análise financeira para extensão da rede elétrica igual a 5 km.

Sistemas	B/C	Preço kWh (R\$/kW))	Investimento Inicial (R\$)	Recuperação Capital (R\$)
Rede Elétrica	0,132	R\$ 1,42	R\$ 130.000	R\$ 15.270
Módulos Fotovoltaicos	0,105	R\$ 1,26	R\$ 115.438	R\$ 13.559
Aerogeradores	0,045	R\$ 4,01	R\$ 365.738	R\$ 42.959
Biodigestores	0,260	R\$ 0,66	R\$ 60.111	R\$ 7.061

Tabela 5.7 – Análise financeira para extensão da rede elétrica igual a 6 km.

Sistemas	B/C	Preço kWh (R\$/kW))	Investimento Inicial (R\$)	Recuperação Capital (R\$)
Rede Elétrica	0,110	R\$ 1,71	R\$ 156.000	R\$ 18.324
Módulos Fotovoltaicos	0,105	R\$ 1,26	R\$ 115.438	R\$ 13.559
Aerogeradores	0,045	R\$ 4,01	R\$ 365.738	R\$ 42.959
Biodigestores	0,260	R\$ 0,66	R\$ 60.111	R\$ 7.061

Com distância de extensão da rede elétrica entre 7 e 14 km, de acordo com todos os parâmetros de saída da análise financeira, a ordem das melhores alternativas de fornecimento de energia são os biodigestores, os módulos FV, a rede elétrica e os aerogeradores respectivamente, como é apresentado nas tabelas 5.8 e 5.9.

Tabela 5.8 – Análise financeira para extensão da rede elétrica igual a 7 km.

Sistemas	B/C	Preço kWh (R\$/kW))	Investimento Inicial (R\$)	Recuperação Capital (R\$)
Rede Elétrica	0,095	R\$ 1,99	R\$ 182.000	R\$ 21.378
Módulos Fotovoltaicos	0,105	R\$ 1,26	R\$ 115.438	R\$ 13.559
Aerogeradores	0,045	R\$ 4,01	R\$ 365.738	R\$ 42.959
Biodigestores	0,260	R\$ 0,66	R\$ 60.111	R\$ 7.061

Tabela 5.9 – Análise financeira para extensão da rede elétrica igual a 14 km.

Sistemas	B/C	Preço kWh (R\$/kW))	Investimento Inicial (R\$)	Recuperação Capital (R\$)
Rede Elétrica	0,047	R\$ 3,99	R\$ 364.000	R\$ 42.755
Módulos Fotovoltaicos	0,105	R\$ 1,26	R\$ 115.438	R\$ 13.559
Aerogeradores	0,045	R\$ 4,01	R\$ 365.738	R\$ 42.959
Biodigestores	0,260	R\$ 0,66	R\$ 60.111	R\$ 7.061

De 15 km em diante, a rede elétrica se torna a opção mais inviável de fornecimento de energia elétrica, com investimento inicial muito alto e com baixa relação benefício/custo, menor até que a relação benefício/custo dos aerogeradores de acordo com a tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Análise financeira para extensão da rede elétrica igual a 15 km.

Sistemas	B/C	Preço kWh (R\$/kW))	Investimento Inicial (R\$)	Recuperação Capital (R\$)
Rede Elétrica	0,044	R\$ 4,27	R\$ 390.000	R\$ 45.809
Módulos Fotovoltaicos	0,105	R\$ 1,26	R\$ 115.438	R\$ 13.559
Aerogeradores	0,045	R\$ 4,01	R\$ 365.738	R\$ 42.959
Biodigestores	0,260	R\$ 0,66	R\$ 60.111	R\$ 7.061

➤ Variando o parâmetro de entrada: horas de sol pleno

Quando o número de horas de sol pleno é igual a 1, os módulos FV se tornam a pior alternativa de fornecimento de energia elétrica, em seguida vem os aerogeradores, rede elétrica e biodigestores de acordo com a tabela 5.11.

Tabela 5.11 – Análise financeira para 1 hora de sol pleno.

Sistemas	B/C	Preço kWh (R\$/kW))	Investimento Inicial (R\$)	Recuperação Capital (R\$)
Rede Elétrica	0,095	R\$ 1,99	R\$ 182.000	R\$ 21.378
Módulos Fotovoltaicos	0,035	R\$ 5,36	R\$ 489.638	R\$ 57.513
Aerogeradores	0,041	R\$ 4,53	R\$ 413.938	R\$ 48.621
Biodigestores	0,260	R\$ 0,66	R\$ 60.111	R\$ 7.061

Com o número de horas de sol pleno igual a 2, a tecnologia solar FV troca de posição com a eólica, saindo da última posição e indo para a terceira. Os biodigestores e rede elétrica continuam sendo as melhores opções de fornecimento, respectivamente, de acordo com a tabela 5.12.

Tabela 5.12 – Análise financeira para 2 horas de sol pleno.

Sistemas	B/C	Preço kWh (R\$/kW))	Investimento Inicial (R\$)	Recuperação Capital (R\$)
Rede Elétrica	0,095	R\$ 1,99	R\$ 182.000	R\$ 21.378
Módulos Fotovoltaicos	0,060	R\$ 2,80	R\$ 255.938	R\$ 30.062
Aerogeradores	0,043	R\$ 4,20	R\$ 383.738	R\$ 45.074
Biodigestores	0,260	R\$ 0,66	R\$ 60.111	R\$ 7.061

Se o número de horas de sol pleno for igual a 3 ou 4, com relação ao principal parâmetro de saída da análise financeira que é a relação benefício/custo, a ordem de melhores opções para o abastecimento de energia continua a mesma de quando o número de horas de sol pleno era igual a 2, ou seja, a primeira opção é os biodigestores, a segunda opção é a extensão da rede elétrica, a terceira opção é os módulos FV e a última opção é os aerogeradores. Contudo observando os outros três parâmetros de saída, apesar da opção da rede elétrica possuir maior relação benefício/custo do que os módulos FV, estes possuem menor preço da energia, menor investimento inicial e menor recuperação do capital do que a extensão da rede conforme a tabela 5.13 e 5.14.

Tabela 5.13 – Análise financeira para 3 horas de sol pleno.

Sistemas	B/C	Preço kWh (R\$/kW))	Investimento Inicial (R\$)	Recuperação Capital (R\$)
Rede Elétrica	0,095	R\$ 1,99	R\$ 182.000	R\$ 21.378
Módulos Fotovoltaicos	0,079	R\$ 1,95	R\$ 177.938	R\$ 20.901
Aerogeradores	0,044	R\$ 4,09	R\$ 373.738	R\$ 43.899
Biodigestores	0,260	R\$ 0,66	R\$ 60.111	R\$ 7.061

Tabela 5.14 – Análise financeira para 4 horas de sol pleno.

Sistemas	B/C	Preço kWh (R\$/kW))	Investimento Inicial (R\$)	Recuperação Capital (R\$)
Rede Elétrica	0,095	R\$ 1,99	R\$ 182.000	R\$ 21.378
Módulos Fotovoltaicos	0,093	R\$ 1,52	R\$ 138.938	R\$ 16.320
Aerogeradores	0,045	R\$ 4,04	R\$ 368.738	R\$ 43.312
Biodigestores	0,260	R\$ 0,66	R\$ 60.111	R\$ 7.061

De 5 horas de sol pleno em diante, os módulos FV superam a rede elétrica em todos os parâmetros e a ordem de alternativas mais viáveis são biodigestores, módulos FV, rede elétrica e aerogeradores conforme a tabela 5.15.

Tabela 5.15 – Análise financeira para 5 horas de sol pleno.

Sistemas	B/C	Preço kWh (R\$/kW))	Investimento Inicial (R\$)	Recuperação Capital (R\$)
Rede Elétrica	0,095	R\$ 1,99	R\$ 182.000	R\$ 21.378
Módulos Fotovoltaicos	0,105	R\$ 1,26	R\$ 115.438	R\$ 13.559
Aerogeradores	0,045	R\$ 4,01	R\$ 365.738	R\$ 42.959
Biodigestores	0,260	R\$ 0,66	R\$ 60.111	R\$ 7.061

➤ Variando o parâmetro de entrada: velocidade do vento

Para qualquer valor de velocidade do vento, essa modalidade será sempre a última opção para o fornecimento de energia elétrica devido ao preço dos aerogeradores e, consequentemente, alto custo com investimento inicial, conforme as tabelas 5.16, 5.17 e 5.18.

Tabela 5.16 – Análise financeira para velocidade do vento igual a 3 m/s.

Sistemas	B/C	Preço kWh (R\$/kW))	Investimento Inicial (R\$)	Recuperação Capital (R\$)
Rede Elétrica	0,095	R\$ 1,99	R\$ 182.000	R\$ 21.378
Módulos Fotovoltaicos	0,105	R\$ 1,26	R\$ 115.438	R\$ 13.559
Aerogeradores	0,007	R\$ 29,99	R\$ 2.738.108	R\$ 321.617
Biodigestores	0,260	R\$ 0,66	R\$ 60.111	R\$ 7.061

Tabela 5.17 – Análise financeira para velocidade do vento igual a 7 m/s.

Sistemas	B/C	Preço kWh (R\$/kW))	Investimento Inicial (R\$)	Recuperação Capital (R\$)
Rede Elétrica	0,095	R\$ 1,99	R\$ 182.000	R\$ 21.378
Módulos Fotovoltaicos	0,105	R\$ 1,26	R\$ 115.438	R\$ 13.559
Aerogeradores	0,045	R\$ 4,01	R\$ 365.738	R\$ 42.959
Biodigestores	0,260	R\$ 0,66	R\$ 60.111	R\$ 7.061

Tabela 5.18 – Análise financeira para velocidade do vento igual a 10 m/s.

Sistemas	B/C	Preço kWh (R\$/kW))	Investimento Inicial (R\$)	Recuperação Capital (R\$)
Rede Elétrica	0,095	R\$ 1,99	R\$ 182.000	R\$ 21.378
Módulos Fotovoltaicos	0,105	R\$ 1,26	R\$ 115.438	R\$ 13.559
Aerogeradores	0,072	R\$ 2,19	R\$ 199.838	R\$ 23.473
Biodigestores	0,260	R\$ 0,66	R\$ 60.111	R\$ 7.061

➤ Variando o parâmetro de entrada: profundidade do solo

Com o objetivo de atingir o rendimento máximo na produção de biogás e para seguir algumas proporcionalidades na hora de fazer o dimensionamento do biodigestor, a profundidade do solo permitida pelo programa deve estar entre 2 e 4,5 m.

Para qualquer profundidade do solo adotada, os biodigestores são a tecnologia de fornecimento de energia elétrica mais vantajosa, em seguida é a tecnologia FV, rede elétrica e aerogeradores. Porém, algumas observações importantes podem ser feitas fazendo variações na profundidade do solo como mostram as tabelas 5.19 a 5.24.

Uma observação é que, a medida que o usuário varia o parâmetro de entrada profundidade do solo, todos os parâmetros de saída da análise financeira como relação benefício/custo, preço da energia, investimento inicial e recuperação do capital variam também. Contudo, pode-se perceber que nem sempre a maior relação benefício/custo está ligada diretamente com a maior profundidade do solo, e que nem sempre o menor investimento inicial está ligado diretamente com a menor profundidade. Pois a maior relação benefício/custo é quando a profundidade é igual a 4 m e não a 4,5 m, que é a maior profundidade. E o menor investimento inicial é quando a profundidade é igual a 3,5 m e não a 2 m, que é a menor profundidade.

A pior hipótese para profundidade do solo é de 2 m, pois possui a menor relação benefício/custo, maior preço da energia, maior investimento inicial e maior recuperação de capital. E a melhor hipótese é de 4 m, pois possui a maior relação benefício/custo e segundo menor preço da energia, investimento inicial e recuperação do capital.

Tabela 5.19 – Análise financeira para profundidade do solo igual a 2 m.

Sistemas	B/C	Preço kWh (R\$/kW))	Investimento Inicial (R\$)	Recuperação Capital (R\$)
Rede Elétrica	0,095	R\$ 1,99	R\$ 182.000	R\$ 21.378
Módulos Fotovoltaicos	0,105	R\$ 1,26	R\$ 115.438	R\$ 13.559
Aerogeradores	0,045	R\$ 4,01	R\$ 365.738	R\$ 42.959
Biodigestores	0,208	R\$ 0,72	R\$ 65.631	R\$ 7.709

Tabela 5.20 – Análise financeira para profundidade do solo igual a 2,5 m.

Sistemas	B/C	Preço kWh (R\$/kW))	Investimento Inicial (R\$)	Recuperação Capital (R\$)
Rede Elétrica	0,095	R\$ 1,99	R\$ 182.000	R\$ 21.378
Módulos Fotovoltaicos	0,105	R\$ 1,26	R\$ 115.438	R\$ 13.559
Aerogeradores	0,045	R\$ 4,01	R\$ 365.738	R\$ 42.959
Biodigestores	0,242	R\$ 0,66	R\$ 60.553	R\$ 7.113

Tabela 5.21 – Análise financeira para profundidade do solo igual a 3 m.

Sistemas	B/C	Preço kWh (R\$/kW))	Investimento Inicial (R\$)	Recuperação Capital (R\$)
Rede Elétrica	0,095	R\$ 1,99	R\$ 182.000	R\$ 21.378
Módulos Fotovoltaicos	0,105	R\$ 1,26	R\$ 115.438	R\$ 13.559
Aerogeradores	0,045	R\$ 4,01	R\$ 365.738	R\$ 42.959
Biodigestores	0,260	R\$ 0,66	R\$ 60.111	R\$ 7.061

Tabela 5.22 – Análise financeira para profundidade do solo igual a 3,5 m.

Sistemas	B/C	Preço kWh (R\$/kW))	Investimento Inicial (R\$)	Recuperação Capital (R\$)
Rede Elétrica	0,095	R\$ 1,99	R\$ 182.000	R\$ 21.378
Módulos Fotovoltaicos	0,105	R\$ 1,26	R\$ 115.438	R\$ 13.559
Aerogeradores	0,045	R\$ 4,01	R\$ 365.738	R\$ 42.959
Biodigestores	0,367	R\$ 0,63	R\$ 57.912	R\$ 6.802

Tabela 5.23 – Análise financeira para profundidade do solo igual a 4 m.

Sistemas	B/C	Preço kWh (R\$/kW))	Investimento Inicial (R\$)	Recuperação Capital (R\$)
Rede Elétrica	0,095	R\$ 1,99	R\$ 182.000	R\$ 21.378
Módulos Fotovoltaicos	0,105	R\$ 1,26	R\$ 115.438	R\$ 13.559
Aerogeradores	0,045	R\$ 4,01	R\$ 365.738	R\$ 42.959
Biodigestores	0,402	R\$ 0,65	R\$ 58.935	R\$ 6.922

Tabela 5.24 – Análise financeira para profundidade do solo igual a 4,5 m.

Sistemas	B/C	Preço kWh (R\$/kW))	Investimento Inicial (R\$)	Recuperação Capital (R\$)
Rede Elétrica	0,095	R\$ 1,99	R\$ 182.000	R\$ 21.378
Módulos Fotovoltaicos	0,105	R\$ 1,26	R\$ 115.438	R\$ 13.559
Aerogeradores	0,045	R\$ 4,01	R\$ 365.738	R\$ 42.959
Biodigestores	0,386	R\$ 0,68	R\$ 62.431	R\$ 7.333

➤ Variando o parâmetro de entrada: quantidade de animais

Variando a quantidade de animais consegue-se perceber que o único parâmetro de saída da análise financeira que também varia é a relação benefício/custo. Quanto maior a quantidade de animais, maior a relação benefício/custo. Isso se deve porque quanto maior o número de animais, maior a quantidade de biomassa para a produção de biofertilizante que pode ser vendido como mercadoria e trazer mais um benefício além da produção de biogás.

Quando o número de animais é igual ou menor que 8, a relação benefício/custo dos módulos FV é maior que a dos biodigestores. A partir de 9, a relação benefício/custo dos biodigestores será sempre maior que as outras modalidades de energia como mostram as tabelas 5.25, 5.26 e 5.27.

Tabela 5.25 – Análise financeira para quantidade de animais igual a 8.

Sistemas	B/C	Preço kWh (R\$/kW))	Investimento Inicial (R\$)	Recuperação Capital (R\$)
Rede Elétrica	0,095	R\$ 1,99	R\$ 182.000	R\$ 21.378
Módulos Fotovoltaicos	0,105	R\$ 1,26	R\$ 115.438	R\$ 13.559
Aerogeradores	0,045	R\$ 4,01	R\$ 365.738	R\$ 42.959
Biodigestores	0,102	R\$ 0,66	R\$ 60.111	R\$ 7.061

Tabela 5.26 – Análise financeira para quantidade de animais igual a 10.

Sistemas	B/C	Preço kWh (R\$/kW))	Investimento Inicial (R\$)	Recuperação Capital (R\$)
Rede Elétrica	0,095	R\$ 1,99	R\$ 182.000	R\$ 21.378
Módulos Fotovoltaicos	0,105	R\$ 1,26	R\$ 115.438	R\$ 13.559
Aerogeradores	0,045	R\$ 4,01	R\$ 365.738	R\$ 42.959
Biodigestores	0,111	R\$ 0,66	R\$ 60.111	R\$ 7.061

Tabela 5.27 – Análise financeira para quantidade de animais igual a 40.

Sistemas	B/C	Preço kWh (R\$/kW))	Investimento Inicial (R\$)	Recuperação Capital (R\$)
Rede Elétrica	0,095	R\$ 1,99	R\$ 182.000	R\$ 21.378
Módulos Fotovoltaicos	0,105	R\$ 1,26	R\$ 115.438	R\$ 13.559
Aerogeradores	0,045	R\$ 4,01	R\$ 365.738	R\$ 42.959
Biodigestores	0,260	R\$ 0,66	R\$ 60.111	R\$ 7.061

No entanto, para suprir a demanda do gerador a biogás e atender uma localidade, o usuário deverá sempre observar se a quantidade de animais disponíveis é o bastante,

fazendo uma análise da biomassa. É necessário observar se existe déficit de biogás e, se existir, precisa-se fazer acréscimo de animais.

5.3 Resultados e gráficos dos sistemas híbridos

Além de fazer o dimensionamento, análise financeira e análise de sensibilidade dos sistemas individualizados, o programa permite também fazer o dimensionamento e análise financeira dos sistemas híbridos fotovoltaico (FV), eólico (EO) e biodigestores (BI) como mostra a tabela 5.28.

Tabela 5.28 – Análise financeira dos sistemas híbridos

Sistemas	B/C	Investimento Inicial	Recuperação Capital
100% BI	0,2599	R\$ 60.111	R\$ 7.061
25%FV+75%BI	0,1747	R\$ 58.040	R\$ 6.817
50%FV+50%BI	0,1241	R\$ 86.830	R\$ 10.199
75%BI+25%EO	0,1124	R\$ 120.490	R\$ 14.153
100%FV	0,1049	R\$ 115.438	R\$ 13.559
75%FV+25%BI	0,1048	R\$ 107.566	R\$ 12.635
75%FV+25%EO	0,0707	R\$ 179.327	R\$ 21.064
50%BI+50%EO	0,0694	R\$ 211.730	R\$ 24.870
50%FV+50%EO	0,0571	R\$ 241.338	R\$ 28.347
25%BI+75%EO	0,0525	R\$ 294.916	R\$ 34.641
25%FV+75%EO	0,0521	R\$ 304.227	R\$ 35.734
100%EO	0,0450	R\$ 365.738	R\$ 42.959

Para cada combinação de sistemas híbridos são apresentados os resultados de saída da análise financeira ordenados em ordem decrescente da relação benefício/custo. Em cada umas dessas combinações foram criados hiperlinks e clicando em cima deles, uma nova tela é aberta mostrando o dimensionamento de cada configuração. Por exemplo, clicando no hiperlink 25% FV + 75% BI, abrirá uma nova tela mostrando o dimensionamento desse sistema híbrido, com 25% da demanda sendo atendida por módulos FV e 75% da demanda sendo atendida por biodigestores como é apresentado na figura 5.3.

Os gráficos dos resultados da análise financeira dos sistemas híbridos são apresentados na figura 5.4.

O primeiro gráfico mostra as cinco melhores opções com relação ao principal parâmetro indicado no programa, a relação benefício/custo. E a opção híbrida que possui a melhor configuração é 25% da demanda sendo atendida por módulos FV e 75% por biodigestores com relação benefício/custo igual a 0,1747.

Figura 5.3 – Dimensionamento do sistema híbrido 25% FV e 75% BI.

CONFIGURAÇÃO HÍBRIDA (25%FV+75%BIO)				
Dados de Saída – 25% FV				
Módulos Fotovoltaicos				
FV em Série	1	Quantidade	41	
FV em Paralelo	41	Potência Total	2050	
Potência FV (Wp)	50	Ângulo de Inclinação	15	
Baterias				
Baterias em Série	1	Quantidade	11	
Baterias em Paralelo	11			
Controlador de Carga				
Corrente nominal (A)	10	Quantidade	16	
Inversor				
Potência (W)	600	Quantidade	3	
		Custo 25% FV	R\$ 29.429,00	
Dados de Saída – 75% BIO				
Gerador a Biogás				
Potência Nominal (kVA)	4			
Consumo (m³/h)	2	Custo do Gerador	R\$ 4.720	
Biodigestor e Gasômetro				
Biogás Necessário (m³/d)	10	Quantidade de Biodigestores	4	
Diâmetro Interno (m)	2			
Altura do Biodigestor (m)	3	Custo dos Biodigestores	R\$ 23.890,55	
Volume do Gasômetro (L)	5000			
		Custo 75% BIO	R\$ 28.611	

Observando os resultados dos gráficos apresentados na figura 5.4, é possível verificar que o sistema autônomo de biodigestores é a melhor opção, logo depois vêm os sistemas híbridos com 25% FV + 75% BI, 50% FV + 50% BI e 75% BI + 25% EO. Só depois vem o sistema autônomo de painéis FV.

Na tabela 5.28, pode-se ainda perceber que as configurações híbridas 75% FV + 25 BI e todas as outras configurações híbridas com aerogeradores, são ainda mais favoráveis que um sistema autônomo de aerogeradores.

Figura 5.4 – Gráficos da análise financeira dos sistemas híbridos



5.4 Considerações finais

Em uma análise geral de todos os parâmetros de saída da análise financeira para os sistemas individualizados em comparação com a extensão da rede elétrica convencional, observa-se no estudo de caso, que as alternativas rede elétrica e aerogeradores são as menos atraentes, pois ambas as tecnologias requerem investimento inicial elevado. A rede elétrica devido à distância significativa que a rede convencional precisa ser estendida para atender a carga a ser eletrificada e os aerogeradores em função dos equipamentos envolvidos, principalmente, o próprio preço da turbina eólica. Todo esse investimento remete a um custo anualizado igualmente alto, caracterizando, portanto, a inviabilidade dessas alternativas de fornecimento de eletricidade no presente caso.

Já o sistema fotovoltaico ficou como a segunda melhor opção para o fornecimento de energia. E apesar do investimento inicial com os painéis FV ser relativamente alto e das baterias possuir uma baixa vida útil, isso é recompensado com a baixa manutenção. Os painéis FV quase não precisam de manutenção, é necessária apenas uma limpeza temporária.

A modalidade de geração a partir de biodigestores ficou em primeiro lugar em todos os parâmetros de saída da análise financeira, ou seja, possui a maior relação benefício/custo, menor investimento inicial e menor recuperação do capital, deixando essa modalidade de fornecimento de energia bastante atraente. O investimento inicial pequeno se deve à utilização de matéria prima e mão de obra local, e a maior relação benefício/custo é devido à da possibilidade de comercialização do biofertilizante.

Além disso, o biogás produzido, a partir da matéria prima local, é uma fonte de energia renovável e um combustível de alta qualidade, podendo substituir a lenha, a gasolina, o diesel e o GLP (gás de cozinha), pois há um reaproveitamento da matéria orgânica.

No entanto, a ferramenta emitiu uma observação abaixo do gráfico, alertando que há um déficit na produção de biogás de $-5,6 \text{ m}^3/\text{dia}$. Ou seja, é necessário expandir a criação de animais, pois a localidade não dispõe de matéria-prima suficiente para atender a demanda do gerador a biogás.

Fazendo a análise de sensibilidade percebe-se que quando a rede elétrica fica próxima à carga a ser eletrificada, ou seja, quando a distância de extensão da rede elétrica é menor do que 7 km, essa modalidade de fornecimento de energia é bastante atraente, contudo, em localidades mais distantes, os biodigestores e os módulos FV são as melhores opções de fornecimento de energia. E para áreas isoladas e remotas, distantes mais de 15 km da rede elétrica convencional, até os aerogeradores são mais vantajosos do que a rede elétrica.

Outra observação a ser feita, quando há uma variação no parâmetro de entrada horas de sol pleno, é que quando o número de horas é igual ou maior que 5, a tecnologia solar FV fica bastante lucrativa em relação a rede elétrica e aerogeradores, perdendo apenas para os biodigestores. E se a quantidade de horas for menor que 5, os módulos FV se tornam inviáveis para o fornecimento de energia.

Permanecendo constante os parâmetros de entrada e variando apenas a velocidade do vento, observa-se que, independente da velocidade do vento, os aerogeradores são sempre a última opção para o fornecimento de energia para o exemplo dado. Apenas quando a extensão da rede elétrica é maior ou igual a 15 km é que a energia eólica se torna mais atraente do que a rede elétrica e também quando a quantidade de horas de sol pleno é igual a uma hora, é que os aerogeradores são mais viáveis do que os módulos FV.

Analisando a profundidade do solo dos biodigestores, percebe-se que para qualquer profundidade do solo, os biodigestores é a opção mais viável para o fornecimento de energia no estudo de caso. E para um maior rendimento do biodigestor, maior produção de

biogás e menor custo, a profundidade do solo mais adequada para a construção do biodigestor é de 4 m. Em seguida é a tecnologia FV, rede elétrica e aerogeradores.

E por fim, fazendo uma variação na quantidade de animais, observa-se que quanto maior o número de animais disponíveis na localidade, maior a relação benefício/custo. Isso se deve porque quanto mais animais, maior é a quantidade de biomassa para a produção de biogás e maior é a produção de biofertilizante que pode ser vendido como mercadoria.

Uma outra observação que pode ser feita quando se varia a quantidade de animais é que quando esse número for igual ou menor que 8, a relação benefício/custo dos módulos FV é maior que a dos biodigestores. A partir de 9, a relação benefício/custo dos biodigestores será sempre maior que as outras modalidades de energia. Contudo, para suprir toda a demanda de energia dessa localidade, sem deixar nenhum déficit de produção de biogás, seriam necessários o acréscimo de 16 bovinos, ou seja, seriam necessários um total de 56 bovinos.

6 CONCLUSÃO

Nesta dissertação foi desenvolvida uma ferramenta computacional de auxílio ao planejamento energético chamada de GDHER. Como resultados favoráveis do programa GDHER pode-se citar:

- O programa foi desenvolvido pelo CALC, um aplicativo livre, portanto pode ser utilizado sem custo;
- Além de o idioma utilizado ser o português, a ferramenta possui uma interface bastante amigável, facilitando a compreensão e operação do programa pelo usuário;
- Este trabalho estimula à adoção da geração distribuída por meio de tecnologias convencionais e de energias renováveis como solar fotovoltaica, eólica e biogás;
- O GDHER utiliza como referencial a realidade brasileira, permitindo fazer a viabilidade técnica e financeira de sistemas autônomos e híbridos.

Com todas essas características, o GDHER permite dimensionar sistemas autônomos e híbridos com máxima eficiência e menor custo, e a partir de uma análise de sensibilidade e análise financeira obter sistemas mais adequados e confiáveis tanto do ponto de vista técnico como financeiro.

Neste trabalho foi apresentado um estudo de caso de eletrificação rural a fim de validar o programa e fazer com que o usuário compreenda melhor o funcionamento da ferramenta. Foi feito o dimensionamento de sistemas autônomos fotovoltaicos, eólicos e gerador a biogás a partir de biodigestores para suprir a demanda de uma localidade. Depois, foi feita uma comparação entre a análise financeira de cada um desses sistemas e a rede elétrica convencional, onde os melhores resultados encontrados para o fornecimento de energia elétrica foram: os biodigestores e os módulos FV.

Para o exemplo dado, o biodigestor se tornou a opção de fornecimento de energia mais viável, devido aos seguintes fatores: o sistema pode gerar seu próprio combustível, utilização de mão de obra e matéria prima local, e principalmente da possibilidade de comercialização do biofertilizante. Os módulos FV também se apresentaram como uma modalidade bastante atraente, ficando em segundo lugar como melhor opção para o fornecimento de energia e, apesar do investimento inicial com o sistema fotovoltaico ser relativamente alto e das baterias possuir uma baixa vida útil, esse investimento é

recompensado com a baixa manutenção, pois os painéis FV precisam apenas de uma limpeza periódica.

Ainda no estudo de caso, observou-se a inviabilidade das alternativas: rede elétrica e aerogeradores, pois ambos necessitam de um investimento inicial bastante alto. A rede elétrica devido à distância de extensão da rede elétrica e os aerogeradores em função dos equipamentos envolvidos.

A ferramenta também permitiu fazer uma análise de sensibilidade onde foi feita a variação de alguns parâmetros de entrada e de acordo com essa análise concluiu-se que:

- Permanecendo constantes os parâmetros de entrada e variando apenas a distância de extensão da rede elétrica convencional para o fornecimento de energia em áreas isoladas ou remotas, distantes mais de 15 km da rede elétrica, o sistema convencional de energia é a opção menos atraente, ficando atrás dos biodigestores, módulos FV e até dos aerogeradores.
- Quando a distância de extensão da rede elétrica está entre 7 e 15 km, os aerogeradores se tornam a última opção e o sistema elétrico convencional vai para o terceiro lugar.
- E em localidades onde a rede elétrica fica próxima a carga a ser eletrificada, ou seja, com extensão da rede menor do que 7 km, essa modalidade de fornecimento de energia é bastante viável, ficando em segundo lugar na lista dos sistemas mais lucrativos, melhor até que os módulos FV.
- Outra observação que foi feita, é que os módulos FV se tornam menos atraentes para o fornecimento de energia, quando o número de horas de sol pleno é menor do que 5, igual ou acima desse valor a tecnologia solar fotovoltaica fica bastante rentável em relação a rede elétrica e biodigestores, perdendo apenas para estes últimos.
- Observou-se também que, os aerogeradores são sempre a última opção para o fornecimento de energia para o exemplo dado, independente da velocidade do vento, devido ao alto custo das turbinas eólicas.
- Com relação à profundidade do solo, concluiu-se que o valor mais adequado para a construção do biodigestor é de 4 m. E por fim, fazendo uma variação na quantidade de animais, percebeu-se que quanto maior o número de animais disponíveis na localidade, mais rentável é o investimento.

O programa também fez o dimensionamento e análise financeira de sistemas híbridos com as seguintes configurações: fotovoltaica-eólica, eólica-biodigestor, biodigestor-fotovoltaica. E para o estudo de caso, a configuração híbrida mais favorável é 25% da demanda sendo atendida por módulos FV e 75% por biodigestores.

Em uma análise final a partir dos resultados obtidos da análise financeira do exemplo proposto, percebe-se que, apesar do sistema elétrico brasileiro ainda ser homogêneo e a grande parte da energia elétrica ser abastecida pelas hidrelétricas, existem outras formas de geração distribuída a partir de energias renováveis que podem ser opções de fornecimento de energia bem mais vantajosas do que a rede elétrica convencional. Contudo é importante, primeiramente, fazer um estudo de viabilidade através de ferramentas computacionais de auxílio ao planejamento energético.

6.1 Desenvolvimentos Futuros

A partir das experiências acumuladas e das dificuldades ainda não solucionadas, os seguintes temas são propostos para trabalhos futuros:

- Disponibilizar a ferramenta em outros idiomas;
- Expandir as modalidades de geração distribuída;
- Fazer uma análise para emissões de gases com direito a créditos de carbono;
- Permitir a conexão dos sistemas de energias renováveis à rede elétrica convencional;
- Desenvolver uma linguagem compatível com a *web* e permitir aos usuários acesso gratuito a ferramenta através da internet.

REFERÊNCIAS

- [1] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Disponível em: <www.aneel.gov.br>. Acesso em: 31 dez 2012.
- [2] RODRIGUES, A. F. **Análise da Viabilidade de Alternativas de Suprimento Descentralizado de Energia Elétrica a Comunidades Rurais de Baixa Renda com Base no seu Perfil de Demanda**. 2006. 146 p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- [3] DIAS, M. V. X. **Geração Distribuída no Brasil: Oportunidades e Barreiras**. 2005. 143 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2005.
- [4] DA SILVA, S.B. **Dimensionamento Ótimo de Sistemas Híbridos com Geração Fotovoltaica e Célula a Combustível para Atendimento a Comunidades Isoladas na Amazônia**. 2010. 132 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade de Brasília, Brasília, 2010.
- [5] DUFO-LÓPEZ, R; BERNAL-AGUSTÍN, J.L. Simulation and Optimization of Stand-Alone Hybrid Renewable Energy Systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.13, p. 2111-2118, janeiro. 2009.
- [6] MOREIRA, J. R.; COELHO, S. T.; ALMEIDA, M. C. Externalidades Associadas à Geração Distribuída de Energia Elétrica a partir de Biomassa na Indústria Sucroalcooleira. In: AGRENER, 2004, Campinas-SP, **5º Encontro de Energia no Meio Rural**, 2004.
- [7] VERA, L. H. **Programa Computacional para Dimensionamento e Simulação de Sistemas Fotovoltaicos Autônomos**. 2004. 165 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2004.
- [8] INTERNATIONAL ENERGY INITIATIVE (IEI). Relatório Final. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica no Brasil: Panorama da Atual Legislação**. Campinas- SP, 2009.
- [9] BRASIL. **AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL): Resolução Normativa nº 482**, de 17 de abril de 2012.
- [10] BRAGA, R. P. **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos e Aplicações**. 2008. 67 p. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.
- [11] CARVALHO, P. **Geração Eólica**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2003.
- [12] CRUZ, R.; VENTURA, R. **Integração da Energia Eólica na Rede: Projecto de Produção e Planeamento de Electricidade**. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2010.

- [13] Salino, P.J. **Energia Eólica no Brasil: Uma Comparação do PROINFA e dos Novos Leilões**. 2011. 113 p. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.
- [14] BRITES, O.; GAFEIRA, T. **Biogás: Projecto de Produção e Planeamento de Electricidade**. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2007.
- [15] DEGANUTTI, R.; PALHACI, M. C. J. P.; ROSSI, M.; TAVARES, R.; SANTOS, C. Biodigestores Rurais: Modelo Indiano, Chinês e Batelada. *In: AGRENER*, 2002, Campinas-SP, **4º Encontro de Energia no Meio Rural**, 2002.
- [16] EUROPEAN PHOTOVOLTAIC INDUSTRY ASSOCIATION (EPIA). Market Report 2011. Disponível em: <<http://www.epia.org>>. Acesso em: jul 2012.
- [17] BEHENCK, I. S. **Estudo Comparativo da Viabilidade de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, Através do Software HOMER**. 2011. 106 p. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.
- [18] INTERNACIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Trends in Photovoltaic Applications: Survey Report of Selected IEA Countries Between 1992 and 2011. Disponível em: <<http://www.iea.org>>. Acesso em: abr 2012.
- [19] GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (GWEC). Annual Market Update 2011. Disponível em: <<http://www.gwec.net>>. Acesso em: jun 2012.
- [20] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Balanço Energético Nacional – BEN – 2012. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/>> Acesso em: abr 2012.
- [21] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA ELÉTRICA ELETRÔNICA (ABINEE). Disponível em: <<http://www.abinee.org.br/informac/arquivos/profotov.pdf>>
- [22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (ABEEÓLICA). Disponível em: <<http://www.abeeolica.org.br/>> Acesso em: mai 2012.
- [23] BORGES NETO, M.R. **Ferramenta Computacional Aplicada ao Planejamento de Abastecimento de Eletricidade no Meio Rural**. 2007. 113 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-Ceará, 2007.
- [24] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). World-wide overview of design and simulation tools for hybrid PV systems. Disponível em: <<http://www.iea.org>>. Acesso em: abr 2012.
- [25] ALMEIDA, S. C. A.; FREIRE, R. L. Geração de Energia Elétrica Através de Sistema Híbrido Diesel-Eólico para um Hospital. *In: AGRENER GD*, 2008, Fortaleza - CE, **7º Congresso Internacional sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural**, 2008.
- [26] COMPANHIA ENERGÉTICA DO CEARÁ (COELCE). Disponível em: <<https://www.coelce.com.br/sobrecoelce/normastecnicas/criterios-de-projetos.aspx>>. Acesso em: out 2012.

- [27] SABINO JÚNIOR, F.R. **Ferramenta Computacional para o Cálculo da Produção de Eletricidade de Geradores Eólicos de Pequeno Porte.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-Ceará, 2003.
- [28] CANAFÍSTULA, F.J.F. **Biodigestor como Opção de Fonte Energética para Comunidades Rurais do Semi-Árido.** 2009. 110 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-Ceará, 2009.
- [29] HESS, G.; MARQUES, J.L.; PAES, L.C.R.; PUCCINI, A.; **Engenharia Econômica.** 11. ed. São Paulo: DIFEL, 1980.
- [30] REIS, M.M., Oliveira Júnior, D.S.; CARVALHO, P.C.M. Estudo da Viabilidade Econômica de Geradores Eólicos de Pequeno Porte no Modo Autônomo. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**, Campina Grande, 2006.