

GILMAR ALVES COUTINHO

**Análise do dimensionamento e viabilidade econômica de um sistema
misto de energia solar fotovoltaica, solar térmico e eólico para uma habitação
rural**

São Paulo

2015

GILMAR ALVES COUTINHO

**Análise de viabilidade econômica e dimensionamento de um sistema
misto de energia solar fotovoltaica, solar térmico e eólico para uma habitação
rural**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao PECE - USP, para
obtenção do título de Especialista em
Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Setrak Sowmy

São Paulo

2015

Catalogação-na-publicação

COUTINHO, GILMAR

Análise de viabilidade econômica e dimensionamento de um sistema misto de energia solar fotovoltaica, solar térmico e eólico para uma habitação rural / G. COUTINHO -- São Paulo, 2015.
109 p.

Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1.Energia solar fotovoltaica 2.Energia eólica 3.Energia solar térmica
4.análise de viabilidade econômica I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia II.t.

RESUMO

Neste trabalho foi elaborada uma análise de rentabilidade econômica para os microgeradores de energia elétrica por meio do uso de um sistema híbrido contemplando, geração fotovoltaica, aquecimento solar térmico e geração eólica. Procurou-se determinar o comportamento energético de uma edificação rural residida por uma família de três pessoas localizada na cidade de Bueno Brandão, MG, Brasil. O trabalho resumiu procedimentos práticos no dimensionamento fotovoltaico conectado à rede elétrica. Procurou avaliar a distribuição de energia solar térmica para o uso misto em banho e cozinha e a sua contribuição a redução carga elétrica da residência em estudo. Também comparou o uso de geração eólica por meio de um gerador de pequeno porte a ser conectado à rede elétrica de modo a utilizá-la como fonte de energia. A metodologia tomou como base o uso de dados solares e eólicos da localidade escolhida. O trabalho procurou qualificar o dimensionamento por meio do uso de três fontes de energia e analisar economicamente sua viabilidade. Os resultados alcançados mostraram que a planta proposta de forma híbrida é factível de implementação em termos energéticos e financeiros dentro do tempo proposto de 25 anos. As simulações mostraram que a planta híbrida de pequeno porte pode atender consumidores de 125 a 200 kWh. A análise financeira ainda demonstrou que apesar dos avanços na legislação da microgeração ainda há a necessidade de maiores incentivos ao microgerador quanto à melhores benefícios para aqueles que injetam o excedente da energia à rede, reduzindo assim o tempo de retorno no investimento à planta de microgeração.

Palavras-chave: Microgeração, sistemas fotovoltaicos, sistemas eólicos, aquecimento solar, conexão à rede.

ABSTRACT

In this paper was prepared an economic cost-benefit analysis for the electricity microgenerators, through the use of a hybrid system contemplating, photovoltaic generation, end solar heating and wind power. We sought to determine the energy performance of a building rural resided for a family of three people in the city of Bueno Brandão, MG, Brazil. The work summarized practical procedures in the PV scaling connected to mains. We tried to evaluate the thermal solar energy distribution for mixed use in bath and kitchen and its contribution to reduce electric charge of the residence under consideration. Also compared the use of wind energy through a small generator to be connected to the grid in order to use it as a source of energy. The methodology was based on the use of solar and wind data of the chosen location. The study sought to qualify the design through the use of three sources of energy and economically analyze its viability. The results obtained showed that the hybrid form proposed plant is feasible to implement energy and financial terms in the suggested period of 25 years. The simulations showed that the small hybrid plant can meet consumers 125-200 kWh. The financial analysis has also shown that despite advances in legislation microgeneration there is still a need for greater incentives to microgenerator on the best benefits for those who inject the excess power to the grid, thus reducing the turnaround time on investment in microgenerator.

Keywords: Microgeneration, photovoltaic systems, wind power, solar heating, grid tie.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Fonte: Caderno Temático Microgeração ANEEL 2014.	29
Figura 2 - Esquema de Circuito para termossifão. Fonte: (10) ABNT-15569	33
Figura 3 - Sistema Fotovoltaico conectado à rede. Fonte: (15).....	39
Figura 4 - Velocidade média anual do vento no território brasileiro. Fonte: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. Fonte: (12).....	45
Figura 5 - Rotores de eixo horizontal de pequeno porte. Fonte: Hummer	47
Figura 6 - Torres treliçadas. Fonte: Hummer	48
Figura 7 - Inversor Grid-Tie. Fonte: Hummer.....	49
Figura 8 - Sistema híbrido eólico-fotovoltaico	55
Figura 9 - Localização escolhida para o estudo de caso. Fonte: Google Maps Maio/2015.....	59
Figura 10 - Foto aérea da localidade. Fonte: Google Maps Maio/2015.....	60
Figura 11 - Posição de instalação dos coletores. Fonte: Polaris. Medição na localidade. Maio/2015.	61
Figura 12 - Vista geral da localidade rural escolhida. Fonte: Foto do autor Maio/2015	61
Figura 13 - Em primeiro plano, vista da face norte para instalação do coletor solar térmico. Fonte: Foto do autor Maio/2015	62

Figura 14 - Face norte para instalação dos painéis fotovoltaicos. Fonte: Foto do autor Maio/2015	63
Figura 15 - Local escolhido para instalação do aerogerador. Fonte: Foto do autor Maio/2015	64
Figura 16 - Direção predominante do vento. Fonte. Polaris. Medição na localidade - Maio/2015.....	64
Figura 17 - Arquitetura de instalação da planta hibrida: Fonte: Autor - Maio/2015	65
Figura 18 - Perfil de consumo da residencial rural em estudo. Fonte: Fatura Fev/2015 Energisa SA.	66
Figura 19 - Temperatura e pluviosidade média anual para Bueno Brandão - MG. Fonte: Climate Data Org – Março/2015.....	68
Figura 20 - Dimensões e formato do reservatório	71
Figura 21 - Irradiação média mensal. Fonte: CRESEB – 2015 – Abril/2015	77
Figura 22 - Inversor SMA sunny Boy SB 1200. Fonte: SMA – Abril/2015 .	79
Figura 23 - Característica sazonais do vento em Bueno Brandão - MG. Fonte: CRESESB. Abril/2015	83
Figura 24 - Conexão do conjunto aerogerador / inversor à rede local. Fonte: Hummer.....	84
Figura 25 - Aerogerador Hummer. Fonte: Hummer – Abril/2015	85

Figura 26 - Gráfico de potência do aerogerador Hummer. Fonte: Hummer – Abril/2015.....	86
Figura 27 - Histograma da Velocidade do Vento em Bueno Brandão – MG.	89
Figura 28 - Comparativo energético entre as fontes e sua contribuição	95
Figura 29 - Comparativo de investimento entre as fontes	96
Figura 30 - Relação Custo versus energia gerada	97
Figura 31 - Comparativo de energia gerada pela planta híbrida versus o convencional.....	98
Figura 32 - Relação da economia gerada pela planta híbrida versus o convencional	99
Figura 33 - Fluxo de caixa do empreendimento	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Componentes do SAS. Fonte: (10) - ABNT-15569.....	32
Tabela 2 - Valores de Zo e alpha de acordo com o tipo de terreno. Fonte: (14)	53
Tabela 3 - Dados Bueno Brandão. Fonte: Climate Data Org – Março/2015	67
Tabela 4 - Cálculo do volume de água quente no chuveiro.....	69
Tabela 5 - Cálculo do volume de água quente na pia do banheiro.....	69
Tabela 6 - Cálculo do volume de água quente no pia da cozinha.....	69
Tabela 7 - Cálculo do volume de armazenamento.....	70
Tabela 8 - Tipo do Reservatório.....	70
Tabela 9 - Tabela do Fabricante. Dimensões do Reservatório. Fonte: Ouro Fino - Março/2015	71
Tabela 10 - Cálculo da energia útil do sistema térmico.....	71
Tabela 11 - Produção média diária de energia específica.....	72
Tabela 12 - Cálculo do fator de correção da inclinação e orientação	72
Tabela 13 - Dimensionamento da área coletora necessária	73
Tabela 14 - Características do coletor solar. Fonte: Ouro Fino - Março/2015.....	73
Tabela 15 – Dimensões do coletor solar. Fonte Ouro Fino - Março/2015 ..	73

Tabela 16 - Consumo de Energia Elétrica do Chuveiro a ser substituído ...	74
Tabela 17 - Custo dos Materiais da planta de aquecimento solar. Fonte: Orçamento: HIDRO SYSTEM H. E HIDRAULICA LTDA - ME. Abril/2015	75
Tabela 18 - Custo dos Serviços de Instalação. Fonte: Orçamento HIDRO SYSTEM H. HIDRAULICA LTDA - ME. Abril/2015	75
Tabela 19 - Dados da localidade para o cálculo da energia elétrica produzida. Fonte Climate Data Org – Abril/2015	76
Tabela 20 - Dimensionamento do quantitativo de painéis	77
Tabela 21 - Painel fotovoltaico 140W Kyocera. Fonte: Kyocera – Abril/2015	78
Tabela 22 - Número de Painéis em série e cálculo da tensão e corrente máxima nos terminais do inversor.....	79
Tabela 23 - Características do inversor selecionado. Fonte: Fabricante SMA	80
Tabela 24 - Orçamento dos Materiais para a planta fotovoltaica. Fonte: Consulta: Eudora Solar. Abril/2015.	81
Tabela 25 - Serviços envolvidos para implantação da planta fotovoltaica. Fonte: Consulta: Eudora Energia Solar. Abril/2015. www.eudoraenergia.com.br	81
Tabela 26 - Característica do vento em Bueno Brandão - MG. Fonte: CRESESB. Abril/2015	83
Tabela 27 - Características do aerogerador eólico. Fonte: Hummer – Abril/2015	84

Tabela 28 - Características do inversor. Fonte: Breeze – Abril/2015	85
Tabela 29 - Cálculo da velocidade do vento à 15 metros.	86
Tabela 30 - Distribuição de potência do aerogerador Hummer instalado em Bueno Brandão - MG.....	88
Tabela 31 - Cálculo da energia produzida anualmente.....	89
Tabela 32 - Orçamento dos Materiais para a geração eólica. Fonte: Consulta: Energia Pura. Abril/2015.	91
Tabela 33 - Serviços envolvidos para implantação do aerogerador. Fonte: Consulta: Energia Pura. Abril/2015.	91
Tabela 34 - Tarifa de energia Grupo B Rural Monofásico. Fonte: Concessionária Energisa SA.	92
Tabela 35 - Balanço de Energia Planta Solar Térmica.....	92
Tabela 36 - Balanço de energia fotovoltaica	93
Tabela 37 - Balanço de energia eólica.....	93
Tabela 38 - Balanço energético comparativo	93
Tabela 39 - Comparativo do custo e retorno anual de ambos os modelos, o convencional e o híbrido.	94
Tabela 40 - Valor total do investimento de tempo de retorno (payback simples)	95
Tabela 41 - Dados para análise financeira do projeto.....	99
Tabela 42 - Payback descontado, VPL e TIR do empreendimento.....	100

Tabela 43 - Parcelas anuais de abatimento do investimento inicial101

LISTA DE ABREVIASÕES E SIGLAS

ANEEL	Agência nacional de energia elétrica
ABNT	Associação brasileira de normas técnicas
CERPCH	Centro de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas
CRESESB	Centro de Referência em Energia Solar e Eólica –, o Centro de Referência em Biomassa
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
MCT	Ministério da Ciência e Tecnologia
MME	Ministérios das Minas e Energia
MPPT	<i>Máximum Power Point Tracking</i>
NDU	Norma de Distribuição Unificada
PCH	Pequenas Centrais Hidrelétricas
PRODEEM	Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios
PROINFA	Programa de incentivos as fontes alternativas
SAS	Sistema de aquecimento solar
SEB	Sistema elétrico brasileiro
SFVCR	Sistema solar fotovoltaico conectado à rede elétrica
TIR	Taxa interna de retorno

VPL

Valor presente líquido

SUMÁRIO

1	Introdução	17
1.1	Objetivos.....	20
1.1.1	Gerais	20
1.1.2	Específicos	21
2	Justificativa e relevância do trabalho	21
3	Revisão bibliográfica.....	21
3.1	O Panorama do setor elétrico brasileiro	21
3.2	Os desafios para aumento dos investimentos.....	23
3.3	A evolução da matriz elétrica	24
3.4	Tendências tecnológicas	24
3.5	A legislação da geração distribuída no Brasil	25
3.5.1	Crédito de energia	26
3.5.2	Condições para adesão	27
3.6	Energia solar térmica	30
3.6.1	Características	31
3.6.2	Materiais e componentes.....	31
3.6.3	Dimensionamento	34
3.7	Energia solar fotovoltaica	37
3.7.1	Características	38

3.7.2	Sistemas conectados à rede	38
3.7.3	Dimensionamento	39
3.8	Energia Eólica	43
3.8.1	Potencial Eólico.....	44
3.8.2	Componentes.....	46
3.8.3	Instalação	51
3.8.4	Dimensionamento	51
3.9	Sistemas híbridos.....	55
4	Metodologia	57
4.1	Análise dos dados e da localidade	59
4.2	Estratégia e arquitetura do projeto	61
5	Resultados	67
5.1	Planta solar térmica.....	67
5.1.1	Dimensionamento	67
5.1.2	Custo da instalação	74
5.2	Planta solar fotovoltaica	75
5.2.1	Dimensionamento	76
5.2.2	Custo da instalação	81
5.3	Planta eólica.....	82
5.3.1	Dimensionamento	82

5.3.2	Custo da instalação	90
6	Análise dos dados	91
7	Conclusão	102
8	Referências.....	105
9	Apêndices	107
9.1	Apêndice A – Mapa da Média Anual de Temperatura.....	107
9.2	Apêndice B – Mapa da irradiação solar global.	108
9.3	Apêndice C – Mapa da velocidade medial anual na Região Sudeste.	
	108	

1 INTRODUÇÃO

A energia sendo um bem indispensável a qualquer ser vivo, pela análise do autor em (2), dentre as suas formas finais, a energia elétrica é uma das mais utilizadas, e embora presente na vida de muitos, não está na de todas as pessoas. A busca pela universalização do atendimento elétrico (1) constitui um constante desafio vivido por cidadãos comuns, autoridades, governos e demais segmentos da sociedade. Um dos principais motivos da ausência de energia elétrica na vida de milhares de pessoas no mundo é talvez a condição de pobreza aliada à situação de isolamento geográfico em que elas se encontram.

Apesar de ainda crítico, esse panorama vem sendo alterado com o passar do tempo. O avanço na pesquisa e desenvolvimento de alternativas energéticas baseadas em fontes renováveis, junto com programas governamentais e sociais, preocupados principalmente com a exclusão proporcionada pela ausência de energia elétrica e com os crescentes problemas ambientais, têm sido responsáveis por profundas e importantes mudanças. Países como a Alemanha, Espanha e Estados Unidos já contam com grande penetração de energias renováveis em suas matrizes energéticas. Em âmbito nacional, programas governamentais como o PROINFA e o Luz Para Todos (3) constituem grandes incentivos ao desenvolvimento de estudos que visam tornar as fontes renováveis ainda mais competitivas.

A expansão do atendimento elétrico no Brasil (5), assim como em muitos outros países do mundo, dá-se basicamente por meio da extensão de linhas de transmissão pertencentes ao sistema interligado, ou através da geração térmica de pequeno, médio e mesmo grande porte, usualmente com a utilização de grupos geradores com combustível de origem fóssil, principalmente o óleo diesel.

A primeira é uma solução viável quando o sistema de transmissão/distribuição não se encontra muito distante do centro de consumo a ser atendido, ou quando este tem porte suficiente para representar atratividade econômica para a concessionária. O segundo tem seus maiores atrativos na relativa facilidade de

aquisição, instalação e uso, além do reduzido custo inicial. Tais soluções, entretanto, não constituem opção única. Ao contrário, o acelerado crescimento técnico das fontes renováveis vem tornando-as competitivas, e por muitas vezes mais viáveis do que as fontes ditas convencionais.

Sistemas renováveis, cujas fontes primárias são dos tipos solar fotovoltaica e eólica, estão entre as opções mais consideradas atualmente, embora haja também a possibilidade de utilização de sistemas a biomassa e pequenas centrais hidrelétricas. Porém, para que se possa analisar de forma criteriosa em que situação e com que tipo de configuração o sistema é o mais viável para determinada aplicação, diversos fatores devem ser considerados. Dentre eles, os principais são os aspectos técnicos e econômicos de cada alternativa.

Análises de viabilidade técnico-econômica de sistemas de geração de energia elétrica, principalmente aqueles que visam ao atendimento de locais remotos, são associadas a aspectos como a logística de instalação, custos de capital, facilidades e custos de manutenção e operação, disponibilidade de combustível, seja ele renovável ou não, modularidade, confiabilidade, dentre outros.

No Brasil, a possibilidade de aplicação das tecnologias de geração renovável de energia representa um importante vetor de desenvolvimento social (3) e econômico para comunidades, isoladas ou não, de diversas regiões do país. Este tipo de iniciativa é fundamental para as estratégias que buscam a sustentabilidade do desenvolvimento e a democratização do acesso à energia em suas formas mais adequadas, favorecendo a geração de empregos, a melhoria da qualidade de vida, o uso ótimo das dimensões continentais e da diversidade de fatores sociais, econômicos e ambientais do País segundo a Empresa de Pesquisa Energética – EPE, vinculada ao Ministério das Minas e Energia do governo brasileiro (3).

No Brasil, a utilização de novas fontes de energia renovável tomou ímpeto após a realização da Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, conhecida como Rio 92 (no Brasil) e ECO 92 (no exterior) (2). Em abril de 1994, os Ministérios das Minas e Energia (MME) e da Ciência e

Tecnologia (MCT) convocaram um encontro para Definição de Diretrizes para o Desenvolvimento das Energias Solar e Eólica no Brasil, onde foram levantadas ações que visaram identificar mecanismos e propor mudanças de políticas governamentais para permitir a disseminação do uso dessas formas de energia.

Foi recomendado, segundo (2) o estabelecimento de um Foro Permanente (instalado em outubro de 1993) para assegurar a implementação das diretrizes e a criação de Centros de Referência para as diversas tecnologias que vieram a se materializar, como o Centro de Referência em Energia Solar e Eólica – CRESESB, o Centro de Referência em Biomassa – CENBIO e o Centro de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas – CERPCH, estabelecidos em 1994, 1996 e 1997, respectivamente.

O setor privado também se organizou e criou, em novembro de 1994, a Associação Brasileira de Empresas de Energia Renovável e Eficiência Energética – ABEER, formada por representantes de empresas que atuam nestes segmentos no país. Em dezembro de 1994, por meio de Decreto Presidencial, foi criado o Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios (PRODEEM), com o objetivo de prover energia básica a comunidades remotas, não assistidas pela rede elétrica, e instalar, sobretudo, sistemas fotovoltaicos para eletrificação de serviços comunitários (poços, centros de saúde, escolas, creches etc.).

Em 2002, foi aprovada a Lei 10.438, que cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) e a Conta de Desenvolvimento Energético (CDE). Essa Lei, segundo (3) determina que as concessionárias, permissionárias de distribuição e agentes comercializadores deverão contratar, por um prazo de no mínimo 10 anos e por valor equivalente a 80% da tarifa média regional de fornecimento ao consumidor, à aquisição de toda a energia a ser produzida por empreendimentos a partir de fontes eólica, solar e biomassa. Com os incentivos às energias renováveis, prevê-se que, em 20 anos, essas fontes, de forma isolada ou conjugada, atendam 10% do consumo anual de energia de todo o País (4). Segundo a consulta em (1), o fornecimento de energia para uma variedade

de cargas, a partir da utilização de duas ou mais fontes de energias renováveis, pode ser realizada, basicamente, por dois procedimentos:

- a) Converter todas as fontes energéticas em uma única forma de energia (tipicamente elétrica, por ser bastante versátil). O termo “híbrido” é frequentemente utilizado neste contexto;
- b) Conciliar os recursos energéticos, necessidades e tecnologias para maximizar a eficiência final do sistema e minimizar o custo. Neste caso, a integração dos benefícios para o usuário final é o objetivo maior.

O primeiro procedimento é bastante conveniente do ponto de vista da uniformização na utilização e armazenamento energético, porém nem sempre é a opção mais econômica, e normalmente não resulta na utilização mais eficiente das fontes energéticas. O segundo procedimento, quando bem dimensionado, apresenta-se como uma opção possivelmente mais econômica.

Sistemas utilizando duas ou mais fontes de energias renováveis e duas ou mais tecnologias de conversão energética, para suprir uma variedade de diferentes cargas, são normalmente chamados de “sistemas integrados de energias renováveis”, ou, do inglês, *integrate renewable energy systems* (IRES). Tipicamente, esses sistemas funcionam isoladamente, com diferentes formas de armazenamento energético, mas também podem ser utilizados conjuntamente com fontes convencionais de energia e/ou geração a diesel, quando for o caso.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Gerais

O presente trabalho tem como objetivo analisar e discutir a viabilidade econômico-financeira da instalação híbrida, de fontes fotovoltaica, térmica solar e eólica, entendendo quais são as principais variáveis que influenciam na sua rentabilidade final. Além disso, pretende-se apresentar uma descrição atual dos principais aspectos da instalação híbrida e suas vantagens frente ao investimento proposto.

Para a realização das análises desejadas, utilizou-se de ferramentas de análise de projetos, especialmente a TIR (Taxa Interna de Retorno), bem como realizar uma análise do empreendimento que permitam um entendimento da possibilidade sua implantação frente à energia disponível na localidade, seja ela eólica, solar térmica ou fotovoltaica e quais são as principais variáveis que determinam a viabilidade econômico-financeira para microgeração em uma residência rural no Brasil.

1.1.2 Específicos

Este trabalho teve como objetivo específico o dimensionamento de um sistema integrado de energia conectado à rede (rural), utilizando fontes renováveis locais (solar e eólica), visando minimizar o custo e manter um determinado nível de confiabilidade do sistema. Para a execução do modelo, serão utilizados dados de radiação solar, velocidade do vento, curva de carga e os custos associados à implantação do sistema.

2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TRABALHO

A justificativa deste trabalho é oferecer uma contribuição para o dimensionamento de sistemas integrados de energia, contemplando os aspectos da localidade escolhida, de modo a buscar a melhor solução, técnica e econômica, para o suprimento de energia.

A importância deste trabalho encontra-se vinculada aos benefícios econômicos e sociais que o processo de geração distribuída poderá desencadear no país.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 O PANORAMA DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO

A matriz elétrica Brasileira, composta basicamente por fontes de energia consideradas limpas ou renováveis segundo o Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT (2). A principal fonte de energia segundo o MCT é a hidrelétrica, a qual

representou 74% da energia gerada nos últimos doze meses (novembro de 2013 a novembro de 2014). O Ministério, sobre a energia hidráulica, caracteriza o Brasil como um dos países com matriz energética mais limpa do mundo. Por outro lado, a predominância da energia hidrelétrica torna o país dependente e vulnerável ao regime hidrológico das principais bacias hidrográficas.

Desde 2012, o Brasil tem presenciado uma redução gradativa no nível dos reservatórios das usinas hidrelétricas, decorrente da incidência de chuvas abaixo da média do histórico e do aumento do consumo de energia. Na atual conjuntura os reservatórios do Sudeste somam 16,9% de sua capacidade – menor patamar desde janeiro de 2000 – contra 40,3% em janeiro de 2014 segundo a consulta realizada (5). Ou seja, hoje o acumulado de água nos reservatórios do Sudeste é inferior ao período em que a população enfrentou um forte racionamento de energia, fato esse que ainda não se repetiu devido à entrada em operação de termoelétricas nesse intervalo.

O cenário atual impactou o preço da energia no mercado de curto prazo (Preço de Liquidação das Diferenças PLD), que permaneceu próximo ao seu valor máximo (R\$ 822,23/KW) praticamente durante todo o ano de 2014 segundo a EPE (6).

Nesse sentido, para a estimativa dos investimentos a serem executados entre os anos de 2015 e 2018, foram levados em consideração investimentos cuja maturação ocorrerá até o ano de 2022. O destaque é a geração de energia elétrica, cujos investimentos foram estimados em R\$ 118,8 bilhões, entre os quais R\$ 56,3 bilhões referentes a empreendimentos hidrelétricos, sendo mais da metade já contratada por leilões públicos. Além dos investimentos em hidrelétricas, a segunda fonte mais importante é a energia eólica, com R\$ 35,5 bilhões de investimentos. Outro fato relevante é a introdução da energia solar nessa perspectiva de investimentos em R\$ 6,6 bilhões, devido à decisão de se executar um leilão de energia de reserva para energia fotovoltaica e de se inserir a fonte no Plano Decenal de Expansão (PDE) elaborado pela EPE.

3.2 OS DESAFIOS PARA AUMENTO DOS INVESTIMENTOS

Os investimentos do SEB podem contar com prazos de maturação longos e, em geral, pouco sensíveis a mudanças macroeconômicas de curto prazo. No segmento de geração de energia elétrica, sua determinação se dá prioritariamente a partir do processo de contratação de energia de longo prazo, que é executado e planejado pela EPE. Segundo esta, nesse processo de contratação para o mercado cativo, as distribuidoras de energia desempenham o relevante papel de prever a demanda para os próximos anos (cinco anos ou três anos à frente).

Contudo, existem alguns desafios na atual conjuntura que precisam ser monitorados e/ou solucionados, pois têm o potencial de prejudicar a execução dos investimentos em perspectiva ou de reduzir a atratividade para novos investimentos segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica – Aneel (7):

- A escassez de recursos hídricos provocou elevação dos preços no mercado de curto prazo e acionamento expressivo e continuado das termelétricas. Os grupos econômicos estão consumindo parcela expressiva de seus recursos internos e de sua capacidade de endividamento para custear e financiar as despesas correntes de curto prazo.
- A principal estatal do setor, a Eletrobrás, que tem sido uma parceira relevante do setor privado na implementação de novos empreendimentos passa, segundo a ANEEL, por processo de recuperação de margens e de rentabilidade e, consequentemente de sua capacidade de investimento e endividamento afetada pela renovação de concessões de geração e transmissão de energia.
- O segmento de transmissão de energia elétrica, segundo (7), tem sofrido atraso na implantação dos empreendimentos associados, sobretudo porque os projetos mais recentes são, em sua maior parte, de maior extensão e situados em regiões pouco antropizadas que demandam pré-requisitos mais complexos de licenciamento ambiental

e de construção. Para o segmento de distribuição de energia, os investimentos são periódicos e condicionados às necessidades de manutenção e reforço de rede, fundamentais à prestação do serviço.

3.3 A EVOLUÇÃO DA MATRIZ ELÉTRICA

As recentes pesquisas da EPE, da pesquisa em (5) menciona que o SEB tende a preservar seu patamar de investimentos, sendo o principal destaque a mudança do perfil da matriz elétrica brasileira. A hidroeletricidade ainda é a principal fonte na expansão, com 23,3 GW em projetos em execução. Porém, começa a dar lugar às demais fontes renováveis e à energia termelétrica. Em segundo lugar, cabe destacar a energia eólica, que se tornou competitiva. Atualmente, existem 4,1 GW em operação comercial e mais de 10 GW em construção. Consequentemente, em cinco anos a energia eólica terá cerca de 10% de participação na matriz elétrica. Outro destaque recente é a introdução da energia solar, que, segundo (15), deve contar com 3,5 GW de capacidade instalada até o fim do horizonte decenal. A tendência do setor é a diversificação da matriz elétrica, com um perfil de fontes renováveis mais heterogêneas e menos dependente da complementaridade das fontes fósseis. A consequência disso é a tendência à elevação do preço final da energia elétrica.

3.4 TENDÊNCIAS TECNOLÓGICAS

Tradicionalmente, o SEB conta com uma indústria local de bens de capital que provê máquinas e equipamentos para seus três principais segmentos (geração, transmissão e distribuição). Contudo, nos últimos anos o SEB observou a elevação da participação das importações na composição dos bens de capital adquiridos. Esse fato ocorre tanto em tecnologias maduras, como é o caso da hidroeletricidade, como em tecnologias novas, como são os casos da energia eólica e da energia solar. Para as tecnologias tradicionais, uma das explicações pode ser o preço das máquinas e equipamentos importados, que se tornaram internamente competitivos após cerca de 10 anos de taxa de câmbio apreciada. Para as novas tecnologias, o

desafio é implantá-las no país, com adensamento da cadeia de fornecedores locais, ao mesmo tempo em que:

- A taxa de câmbio encontra-se favorável às importações; e
- Há no mundo uma relativa oferta de máquinas e equipamentos destinados ao setor elétrico, notadamente para as fontes de energia eólica e solar.

Para tanto, a política de credenciamento de máquinas e equipamentos do BNDES, segundo (6), ao lado das desonerações fiscais para bens de capital, tem surtido efeito para a criação de uma cadeia produtiva voltada à energia eólica. Atualmente, existem sete empresas de grande porte fabricantes de aero geradores credenciadas no BNDES. Adicionalmente, destaca-se que, há pouco tempo, o BNDES divulgou uma política específica de credenciamento para painéis fotovoltaicos, o que deve permitir que a energia solar percorresse caminho semelhante ao da energia eólica e também estruture um conjunto de fornecedores locais.

3.5 A LEGISLAÇÃO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO BRASIL

A geração de energia elétrica em determinada região, ou geração distribuída (GD), é um tipo de geração que se faz diferente da realizada pela geração centralizada, por ocorrer em locais em que não seria instalada uma usina geradora convencional, contribuindo, desse modo, para aumentar a distribuição geográfica da geração.

Desde 17 de abril de 2012, quando entrou em vigor a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, conforme (8), o consumidor brasileiro pode gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis e inclusive fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade. Os estímulos à geração distribuída são justificados pelos potenciais benefícios que tal modalidade pode proporcionar ao sistema elétrico. Entre eles, está o adiamento de investimentos em expansão dos sistemas de transmissão e distribuição, o baixo impacto ambiental, a redução no

carregamento das redes, a minimização das perdas e a diversificação da matriz energética.

De acordo com a Resolução Normativa nº 482/2012, os microgeradores são aqueles com potência instalada menor ou igual a 100 quilowatts (kW), e os minigeradores, aqueles cujas centrais geradoras possuem de 101 kW a 1 megawatt (MW). As fontes de geração precisam ser renováveis ou com elevada eficiência energética, isto é, com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada.

3.5.1 Crédito de energia

A novidade da norma é simplificar a conexão das pequenas centrais à rede das distribuidoras de energia elétrica e permitir que a energia excedente produzida possa ser repassada para a rede, gerando um “crédito de energia” que será posteriormente utilizado para abater seu consumo. Um exemplo é o da microgeração por fonte solar fotovoltaica: de dia, a “sobra” da energia gerada pela central é passada para a rede; à noite, a rede devolve a energia para a unidade consumidora e supre necessidades adicionais. Portanto, a rede funciona como uma bateria, armazenando o excedente até o momento em que a unidade consumidora necessite de energia proveniente da distribuidora.

O saldo positivo desse crédito de energia não pode ser revertido em dinheiro, mas pode ser utilizado para abater o consumo em outro posto tarifário (ponta/fora ponta), quando aplicável, em outra unidade consumidora (desde que as duas unidades estejam na mesma área de concessão e sejam do mesmo titular) ou na fatura do mês subsequente. Os créditos de energia gerados continuam válidos por 36 meses.

Na prática, se em um determinado ciclo de faturamento a energia injetada na rede pelo micro ou minigerador for maior que a consumida, o consumidor receberá um crédito em energia (kWh) na próxima fatura. Caso contrário, o consumidor pagará apenas a diferença entre a energia consumida e a gerada. Cabe ressaltar

que, dependendo da forma de incidência dos impostos em cada Estado, o consumidor terá ainda que pagar os impostos (ICMS e PIS/COFINS) incidentes sobre o total da energia absorvida da rede, conforme descrito no item 3.6. Importante ressaltar que, para unidades consumidoras conectadas em baixa tensão (grupo B), ainda que a energia injetada na rede seja superior ao consumo, será devido o pagamento referente ao custo de disponibilidade – valor em reais equivalente a 30 kWh (monofásico), 50 kWh (bifásico) ou 100 kWh (trifásico). De forma análoga, para os consumidores conectados em alta tensão (grupo A) será devida apenas a parcela da fatura correspondente à demanda contratada.

3.5.2 Condições para adesão

Compete ao consumidor a iniciativa de instalação de micro ou minigeração distribuída – a ANEEL, conforme resolução em (8), não estabelece o custo dos geradores e tampouco eventuais condições de financiamento. Portanto, o consumidor deve analisar a relação custo/benefício para instalação dos geradores, com base em diversas variáveis: tipo da fonte de energia (painéis solares, turbinas eólicas, geradores a biomassa, etc), tecnologia dos equipamentos, porte da unidade consumidora e da central geradora, localização (rural ou urbana), valor da tarifa à qual a unidade consumidora está submetida, condições de pagamento e financiamento do projeto e existência de outras unidades consumidoras que possam usufruir dos créditos do sistema de compensação de energia elétrica.

Por fim, é importante ressaltar que para unidades consumidoras conectadas em baixa tensão (grupo B), ainda que a energia injetada na rede seja superior ao consumo, será devido o pagamento referente ao custo de disponibilidade – valor em reais equivalente a 30 kWh (monofásico), 50 kWh (bifásico) ou 100 kWh (trifásico). Em situação análoga, para os consumidores conectados em alta tensão (grupo A), a parcela de energia da fatura será zerada, sendo que a parcela da fatura correspondente à demanda contratada será faturada normalmente (9).

O consumidor que desejar se tornar um microgerador ou minigerador de eletricidade deve solicitar à concessionária a instalação de um medidor de quatro quadrantes.

Para conectar o sistema fotovoltaico à rede elétrica o consumidor, segundo o autor em (22) deve atender as exigências da concessionária, adequando a instalação elétrica da residência em questão com as normas e acrescentando o sistema de proteção que forem exigidos, além de observar se os equipamentos utilizados atendem as certificações nacionais e internacionais.

O consumidor que possuir um sistema de geração fotovoltaica registrado na concessionária de energia recebe todo mês uma conta de eletricidade em que constarão duas medidas: a energia consumida e a energia gerada.

A definição sobre a cobrança de impostos e tributos federais e estaduais foge das competências desta Agência, cabendo à Receita Federal do Brasil e às Secretarias de Fazenda Estaduais tratar da questão relativos aos impostos como ICMS e PIS/COFINS:

As alíquotas estabelecidas são:

PIS = 1,65%

COFINS = 7,60%

PIS + COFINS = 9,25%

A figura 1 abaixo exemplifica o modo de conexão bidirecional de mediação do consumo e geração de energia elétrica.

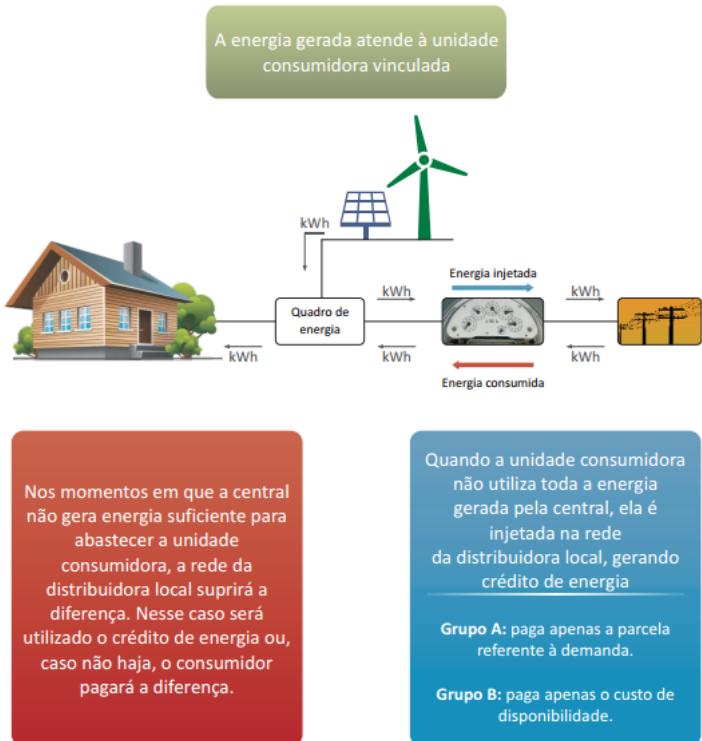


Figura 1 - Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Fonte: Caderno Temático Microgeração ANEEL 2014.

Referente ao sistema de tarifação, um dos autores consultados (22) descreve a existência de três métodos de tarifação sendo eles:

- Venda livre de energia, que prevê a venda de energia no mercado de comercialização e as regras são iguais para todo tipo de usina geradora.
- Tarifação *net metering*, que utiliza a energia líquida mensal do sistema de mediação, ou seja, a energia consumida pela residência é subtraída à energia gerada no mesmo período de tempo sendo que o resultado do consumo será debitado, pagamento da diferença, ou creditado ao consumidor microgerador o valor exportado à rede, conforme apresentado no detalhamento da legislação ANEEL nº 482/2012.
- Tarifação *feed in* que é semelhante à *net metering*, contudo o consumidor é premiado com o pagamento de uma quantia maior que o

preço da energia consumida, incentivando assim a microgeração. Este sistema segundo a literatura consultada (22) só é previsto na Europa.

Para o trabalho em questão foi consultado o NDU-13 (Norma de Distribuição Unificada) da concessionária local, conforme referência (25), que detalha os critérios técnicos e comerciais para a solicitação de conexão de cessantes microgeradores ao sistema de baixa tensão. É possível observar que além de uma solicitação formal é necessário anexar ao formulário principal os demais dados do projeto técnico como especificações dos transformadores de corrente de medição, cópias dos manuais dos inversores, painéis fotovoltaicos e inversores bem como do projeto detalhado do unifilar de conexão à rede além dos certificados do INMETRO que atestam de que o inversor cumpre os requisitos estabelecidos pela norma.

Assim, tais exigências devem ser levadas em conta no orçamento do projeto da planta de modo que este passo da homologação do microgerador não seja uma formalidade impeditiva à conclusão do projeto.

No decorrer do capítulo 4 apresentar-se-á a metodologia que visa o dimensionamento de fontes energéticas hibridas. Por fim, será exposto o modelo desenvolvido neste trabalho que permite um dimensionamento otimizado do sistema energético híbrido.

3.6 ENERGIA SOLAR TÉRMICA

O uso da energia solar como sistema de aquecimento tem como principal finalidade reduzir os custos referentes à utilização de sistemas convencionais como o elétrico e o gás. No Brasil cujo clima predominante é o tropical, a incidência solar anual gira em torno de 2.000 a 2.500 horas (aproximadamente. 6 a 7 horas diárias de insolação) variável de acordo com a região. O aproveitamento desta energia é extremamente viável, mesmo com a necessidade de utilização de um sistema auxiliar elétrico para suprir as necessidades provocadas pelo excesso de nebulosidade em algumas épocas do ano.

Com base nos dados de incidência de insolação da região escolhida é que se pretender obter com o uso do Sistema de Aquecimento Solar uma redução na quantidade de energia a ser gerada pelos painéis fotovoltaicos e do aerogerador e consequente redução dos custos do empreendimento híbrido, visto que tais células fotovoltaicas e geradores eólicos representam custos expressivos.

3.6.1 Características

O Sistema de Aquecimento Solar (SAS) é constituído basicamente por três elementos principais:

- a) Coletores solares;
- b) Reservatório térmico;
- c) Sistema de aquecimento auxiliar;

O projeto do SAS deve considerar e especificar a vida útil projetada para cada um dos principais elementos. A transferência de energia entre cada um destes elementos é assegurada pelos circuitos:

- a) Primário: Transferência de energia captada nos coletores para seu armazenamento;
- b) Secundário: Abastecimento e distribuição da água na rede;

3.6.2 Materiais e componentes

Os materiais e componentes do SAS e suas interligações devem estar projetados de maneira que contemplem a dilatação térmica característica de cada material em função da variação de temperatura do SAS. Os componentes que contenham partes móveis, com manutenção adequada devem ser capazes de cumprir função com a qual tenham sido projetados, sem desgaste ou deterioração excessiva. Os coletores solares, reservatórios térmicos, moto bombas, válvulas, tubulações e outros componentes devem poder operar corretamente dentro dos intervalos de pressão e temperatura de projeto e suportar as condições ambientais previstas para o funcionamento real, sem reduzir a vida útil projetada para o sistema.

A tabela 1 abaixo exemplifica os componentes do SAS em questão.

Tabela 1 - Componentes do SAS. Fonte: (10) - ABNT-15569

Item	Componente	Função
1.	Coletor solar	Converter energia radiante em energia térmica
2.	Reservatório térmico	Acumular energia térmica na forma de água aquecida
3.	Controlador diferencial de temperatura	Controlar o funcionamento da motobomba hidráulica do sistema de aquecimento solar e eventualmente possui funções de segurança
4.	Sensor de temperatura	Medir a temperatura da água em pontos específicos do SAS
5.	Reservatório de expansão	Proteger o sistema contra variações de pressão e expansão volumétrica durante o funcionamento do SAS
6.	Válvula de alívio de pressão	Aliviar automaticamente a pressão do SAS caso a pressão máxima seja atingida
7.	Válvula de retenção	Não permitir o movimento reverso da água
8.	Válvula eliminadora de ar	Permitir a saída de ar do SAS
9.	Válvula quebra-vácuo	Aliviar pressões negativas formadas durante o funcionamento do SAS, permitindo a entrada de ar
10.	Dreno	Possibilitar o escoamento ou drenagem da água do SAS
11.	Motobomba	Promover a circulação forçada da água pelo SAS
12.	Tubos e conexões	Interconectar os componentes e transportar água aquecida
13.	Isolamento térmico	Minimizar perdas térmicas dos componentes e acessórios do SAS
14.	Equipamento auxiliar de aquecimento	Suprir a demanda térmica complementar do SAS
15.	Respiro	Equalizar pressões positivas e negativas do SAS e permitir a saída de ar e vapor

O arranjo a ser elaborado, segundo (10), prevê a instalação de aquecimento auxiliar no reservatório térmico. A circulação da água quente será de forma natural ou termossifão, ou seja, o sistema utiliza a mudança de densidade do fluido de trabalho para obter a circulação entre o coletor e o tanque de armazenamento. Já a estrutura de armazenamento será a convencional, portanto terá um sistema em que o tanque de armazenamento está separado do coletor e está localizado a certa distância deste em que haverá um sistema de alimentação de agua fria abastecerá somente o SAS.

Os coletores solares podem ser montados sobre o solo ou sobre cobertura específica. Na montagem sobre cobertura podem ser usados: estruturas de apoio independente da estrutura da cobertura, suportes de apoio fixados à cobertura, apoio direto à cobertura ou integrados à cobertura.

A montagem sobre a cobertura deverá observar as seguintes operações:

- i. Localização dos pontos de específicos de apoio;
- ii. Fixação dos suportes dos pontos de apoio;

A circulação da água pelos coletores, segundo o autor em (19), dar-se-á pela variação de densidade entre água fria contida no reservatório e na tubulação que alimenta os coletores e a quente produzida por estes, fazendo com que a água fria mais pesada e a quente mais leve circule naturalmente. Este processo chama-se convecção.

A figura 2 abaixo exemplifica o modo de conexão dos componentes do SAS a serem utilizados neste trabalho.

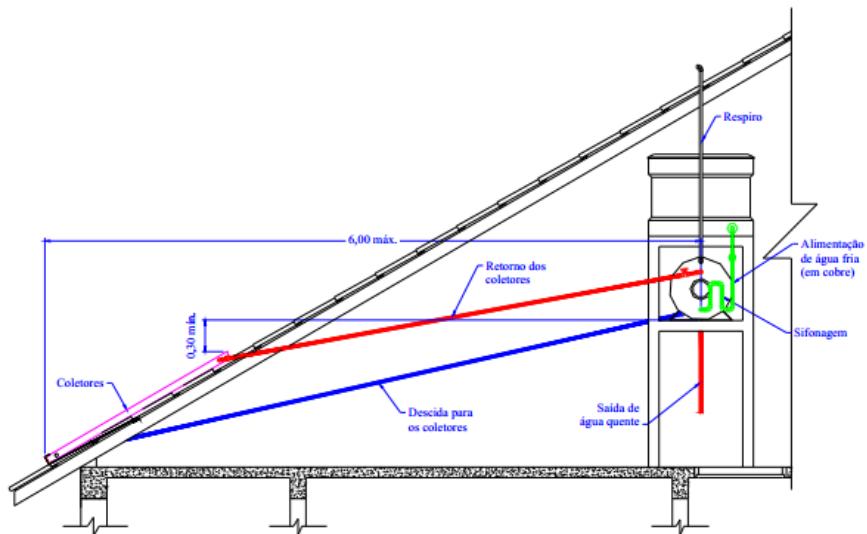


Figura 2 - Esquema de Circuito para termossifão. Fonte: (10) ABNT-15569

Os coletores solares devem ser instalados conforme especificações do manual do produto. Estes deverão ser instalados voltados para o norte geográfico com desvio máximo de até 30° desta direção.

Os coletores solares devem ser instalados com ângulo de inclinação igual à latitude local acrescido de 10°, nunca inferior a 15°.

O posicionamento correto dos coletores visa obter um maior período diário de insolação sobre o conjunto de coletores e a maior captação da radiação solar em determinadas épocas do ano ou em médias anuais.

3.6.3 Dimensionamento

Para dimensionar um sistema de aquecimento solar além do consumo diário, deve-se levar em consideração o local da instalação e a região onde ser instalado. O mau posicionamento dos coletores e um dimensionamento abaixo das necessidades diárias podem reduzir a eficiência do sistema aumentando a frequência de acionamento do auxílio elétrico, como consequência eleva-se o custo de operação.

O dimensionamento da instalação solar térmica depende principalmente:

- Das condições climáticas locais;
- Da demanda de calor;
- Da fração solar desejada;
- Do rendimento da instalação e sua configuração.

O objetivo do dimensionamento é determinar qual área coletora e o volume do sistema de armazenamento necessário a atender a demanda de energia útil de um determinado perfil de consumo.

A metodologia prevê basicamente prevê dois métodos principais. Um a “Carta F” segundo Solar Heating Design by the F-chart method (11) e a outra prevista na norma ABNT-15569 aqui a ser utilizada, pois é a recomendada para residências unifamiliares. Este método considera uma fração solar de 70% e que não existirá sombreamento sobre os coletores solares.

Os passos a serem seguidos é inicialmente apurar o volume de consumo para atendimento dos pontos de utilização, levando em consideração a vazão das peças de utilização e o tempo de utilização considerando a frequência de uso:

$$V_{consumo} = \sum(Q_{pu} \times T_u \times freqüência\ de\ uso) \quad (1)$$

onde:

$V_{consumo}$ é o volume total de água quente consumindo diariamente em m³.

Q_{pu} é a vazão de utilização de cada ponto em m³/s.

T_u é o tempo médio de uso diário da peça do ponto de utilização de água quente em s.

Freqüência é o número total de utilizações do ponto de água quente.

Em seguida é necessário calcular o volume do sistema de armazenamento:

$$V_{armaz.} = \frac{V_{consumo} \times (T_{consumo} - T_{ambiente})}{(T_{armaz} - T_{ambiente})} \quad (2)$$

V_{armaz} é o volume do sistema de armazenamento em m³. A norma sugere que $V_{armaz} \geq 75\% V_{consumo}$.

$T_{consumo}$ é a temperatura de consumo de utilização expressa em ° (graus celsius). A norma sugere que 40°C.

T_{armaz} é a temperatura de armazenamento de agua em ° (graus celsius). A norma sugere que seja utilizado $T_{armaz} \geq T_{consumo}$.

$T_{ambiente}$ é a temperatura do ambiente media anual do local de instalação (ver apêndice A).

A demanda de energia útil é prevista pela equação abaixo:

$$E_{util} = \frac{V_{armaz} \times \rho \times Cp \times (T_{armaz} - T_{ambiente})}{3600} \quad (3)$$

$E_{útil}$ é a energia útil, expressa em kWh/dia.

ρ é a massa específica da água igual à 1000 Kg/cm³.

C_p é o calor específico da água igual à 4,18 Kj/Kg.

Após o cálculo da energia útil é necessário efetuar o dimensionamento da área coletora de modo a viabilizar a especificação de quantos painéis coletores solares serão necessários no empreendimento.

$$A_{coletora} = \frac{(E_{útil} + E_{perdas}) \times FC_{instal} \times 4,901}{PMDEE \times I_G} \quad (4)$$

onde:

$A_{coletora}$ é a área coletora em m².

I_G é o valor da irradiação global média anual para a localidade em questão em kWh/m².dia. Ver apêndice B.

E_{perdas} é o somatório das perdas técnicas dos circuitos primário e secundário, expresso em kWh/m².dia.

$$E_{perdas} = 0,15 \times E_{útil}$$

O dimensionamento também leva em conta as características técnicas do coletor solar elegido para o empreendimento.

Assim, $PMDEE$ é a produção média diária de energia específica do coletor solar em kWh/m².

$$PMDEE = 4,901 \times (Fr\tau\alpha - 0,0249 \times Fr_{UL}) \quad (5)$$

os quais:

Fr_{ta} é o coeficiente de ganho do coletor solar e é adimensional.

Fr_{UL} é o coeficiente de perdas do coletor solar (adimensional).

$FC_{install}$ é o fator de correção para inclinação e orientação do coletor solar dado pela equação abaixo:

$$FC_{Instal} = \frac{1}{1 - [1,2 \times 10^{-4} \times (\beta - \beta_{\text{óptimo}})^2 + 3,5 \times 10^{-5} \times \gamma^2]} \quad (6)$$

para $15^\circ < \beta < 90^\circ$ onde:

β é a inclinação do coletor solar em relação ao plano horizontal em graus ($^\circ$)

$\beta_{\text{recomendado}}$ é a inclinação ótima do coletor para o local da instalação conforme já descrito neste capítulo acima.

γ é o ângulo de orientação dos coletores solares em relação ao norte geográfico em graus ($^\circ$).

3.7 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Em uma básica definição, sistema fotovoltaico é um conjunto integrado de painéis fotovoltaicos e outros componentes, projetado para converter a energia solar em eletricidade (20). O princípio físico de funcionamento dos painéis fotovoltaicos é denominado efeito fotovoltaico (foto= luz; volt= eletricidade), que é o fenômeno apresentado por determinados materiais que, expostos à luz, produzem eletricidade. Os painéis são compostos por células fotovoltaicas e a conversão da radiação solar em energia elétrica é obtida utilizando-se material semicondutor como elemento transformador, conhecido como célula solar ou célula fotovoltaica.

As células fotovoltaicas disponibilizadas comercialmente são elaboradas à base de silício monocristalino, policristalino e amorfo, mas também há células

fabricadas com outros materiais, como o disseleneto de cobre-índio (CIS) e telureto de cádmio (CdTe).

A célula de silício monocristalino é historicamente a mais utilizada e comercializada, segundo (20). Também chamado de silício policristalino, tais células fotovoltaicas são produzidas a partir de blocos de silício, obtidos por fusão de porções de silício puro em moldes especiais. Uma vez nos moldes, o silício resfria lentamente e solidifica-se. Neste processo, os átomos não se organizam em um único cristal, formando-se uma estrutura policristalina com superfícies de separação entre os cristais. A presença de interfaces entre os vários cristais reduz um pouco a eficiência destas células. A eficiência deste tipo de célula, na conversão de luz em eletricidade, é menor do que as de silício monocristalino, variando de 14% a 20,3% (21).

O termo irradiação se refere à radiação captada em uma determinada área na superfície terrestre durante um determinado tempo.

3.7.1 Características

Sistemas Fotovoltaicos (SF) podem ser classificados em três categorias principais: isolados, híbridos ou conectados à rede, este último aqui a ser utilizado. A utilização de cada uma dessas opções dependerá da aplicação e/ou da disponibilidade de recursos energéticos. Cada um deles poderá ser de complexidade variável dependendo da aplicação em questão e das restrições específicas de cada projeto. Isto pode ser facilmente visualizado, por exemplo, quando se considera a utilização de um sistema híbrido Diesel-fotovoltaico. O presente trabalho deu foco ao estudo do sistema conectado à rede;

3.7.2 Sistemas conectados à rede

Estes sistemas, apresentados na figura 3 são basicamente de um único tipo e são aqueles em que o arranjo fotovoltaico representa uma fonte complementar ao sistema elétrico de grande porte ao qual está conectado. São sistemas que

normalmente não utilizam armazenamento de energia, pois toda a potência gerada é entregue à rede instantaneamente. Instalações deste tipo vêm se tornando cada dia mais populares em diversos países europeus, no Japão, Estados Unidos e mais recentemente no Brasil. As potências instaladas vão desde poucos kWp em instalações residenciais, até alguns MWp em grandes sistemas operados por empresas.

Os sistemas fotovoltaicos são compostos basicamente de painéis fotovoltaicos, inversores CC-CA com MPPT, explicados mais adiante neste capítulo e as caixas de *string* que nada mais são que caixas de conexão que permitem que o conjunto de painéis fotovoltaicos possam ser ligados entre si, como visto na figura 3 abaixo.

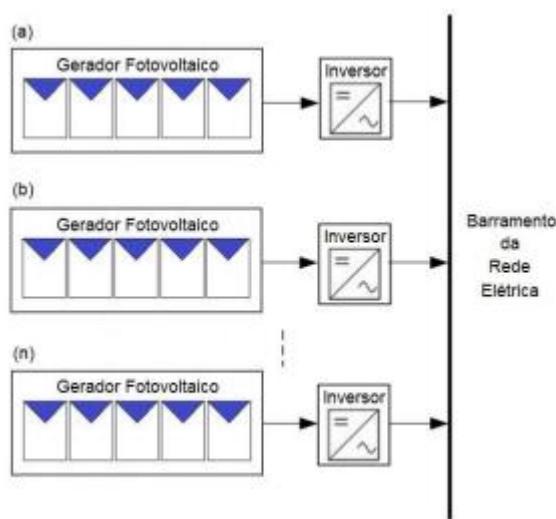


Figura 3 - Sistema Fotovoltaico conectado à rede. Fonte: (15)

3.7.3 Dimensionamento

O projeto e dimensionamento de sistemas fotovoltaicos ligados à rede dependem essencialmente das condições apresentadas a seguir:

- Do espaço disponível nos telhados, sua orientação e ângulo de inclinação;
- Das especificações técnicas dos painéis e inversores;

- Localização geográfica, longitude e latitude;
- Temperatura do local;
- Requisitos estéticos do edifício;
- Disponibilidade financeira.

As principais condições que limitam a potência instalada são a área disponível e o valor monetário que se pretende investir.

O projeto de sistemas fotovoltaicos pode ser dividido nas seguintes tarefas:

- Estimativa inicial da potência instalada baseada na área disponível e no financiamento;
- Seleção do módulo fotovoltaico;
- Seleção do inversor compatível ou de uma configuração de inversores compatível com o módulo fotovoltaico;
- Estabelecer a configuração ótima módulo-inversor;
- Efetuar a listagem dos componentes;
- Estimativa da energia produzida baseada nos dados da radiação solar do local;
- Considerar aspectos adicionais tais como proteções contra sobrecarga.

Após a definição do valor do investimento e da área disponível para implementação dos painéis fotovoltaicos pode proceder-se a seleção dos componentes do sistema.

3.7.3.1 Seleção e número de painéis fotovoltaicos e inversores

Para satisfazer as necessidades de produção os painéis têm que ser ligados em série (para aumentar o valor de tensão) ou em paralelo (para aumentar o valor de corrente).

Como os sistemas conectados à rede sempre dispõem de um sistema MPTT segundo (22), o método adequado é aquele baseado na insolação diária, ou seja, no

valor do quilowatt-hora por metro quadrado diário [kWh/m²/dia] disponível em uma determinada localidade. Com base na área no módulo e sua eficiência, calcula-se a energia elétrica por ele produzida. Para saber a produção mensal basta multiplicar por 30 o valor diário obtido.

Uma vez calculada a energia produzida por um módulo e conhecendo-se o valor da energia que se deseja produzir diariamente ou mensalmente, determina-se a quantidade de painéis necessários no sistema fotovoltaico:

$$N_p = E_{\text{Sistema}} / E_{\text{painel}} \quad (7)$$

Sendo:

N_p = Número de painéis fotovoltaicos da Instalação

E_{Sistema} = Energia produzida pelo sistema no intervalo de tempo considerado

E_{painel} = Energia produzida por um painel no mesmo intervalo de tempo considerado.

Uma vez determinado o número de painéis torna-se necessário verificar se é possível colocá-los no espaço disponível para o efeito. Muitas vezes as restrições em termos de espaço disponível podem condicionar o número de painéis que constituem o módulo e o modo como estes vão serem ligados.

O painel fotovoltaico deve ser colocado suficientemente distante de objetos que possam encobrir a luz do sol, para que nenhuma sombra ocorra especialmente nas horas de irradiação, usualmente entre 9 e 15 horas.

A tensão dos terminais das fileiras deve tomar valores compreendidos entre o limite mínimo e o limite máximo da tensão correspondente ao ponto de potência máxima do inversor (dados fornecidos pelos fabricantes), isto é, dentro da gama de variação da tensão para a qual o inversor se adapta ao ponto correspondente à máxima extração de potência da fileira. O valor da tensão em circuito aberto da

fileira (*string*) deve também ser verificado de modo a assegurar que é inferior ao valor máximo da tensão de entrada do inversor. O inversor deve ser especificado para uma potência igual ou superior à potência de pico do conjunto de módulo. Tendo em conta estas considerações é necessário determinar o número de painéis a ligar em série e/ou em paralelo.

Segundo a literatura consultada em (22), é comum sobredimensionar levemente o conjunto fotovoltaico, pois a potência de pico do conjunto somente é atingida em condições padronizadas de testes (STC). Ainda, como regra prática segundo o autor, é comum considerar um fator de segurança de 10%, mesmo considerando que o sistema possuirá o MPPT em seus inversores.

O MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) ou rastreamento do ponto de máxima potência segundo (22) é um recurso presente em todos os inversores para a conexão de sistemas fotovoltaicos à rede elétrica.

O sistema MPPT tem o objetivo de garantir que instantaneamente os painéis operem em seu ponto de máxima potência, qualquer que seja ele, independente das condições de operação. Devido ao fato das condições de operação dos painéis fotovoltaicos (temperatura e radiação solar) mudarem aleatoriamente durante o funcionamento do inversor, a estratégia do MPPT é necessária nos sistemas fotovoltaicos conectados à rede para maximizar constantemente a produção de energia, proporcionando o maior rendimento possível do sistema.

Como boa prática o autor também recomenda ter como boa prática as etapas abaixo no dimensionamento de um SFV:

- Planejamento da interconexão dos diversos componentes do sistema de forma eficiente;
- Adequação do projeto aos requisitos de segurança, visando torná-lo seguro sob o ponto de vista elétrica, contemplando a segurança do próprio sistema e do usuário, bem como da rede elétrica;

- Verificação da obediência às normas e aos regulamentos técnicos aplicáveis para instalações elétricas (ABNT, Aneel, distribuidoras local, NBR5410);

3.7.3.2 Orientação

Em geral, para uma operação adequada e eficiente, os painéis devem estar orientados em direção à linha do equador, segundo o autor em (22). Nas instalações localizadas no hemisfério sul, a face dos painéis fotovoltaicos deve estar orientada em direção ao Norte verdadeiro (18). Porém esta regra pode não ser válida caso o cliente local varie muito durante um dia típico, por exemplo, caso ocorra neblina durante a manhã e a maioria da incidência de radiação solar ocorra à tarde.

Para geração máxima de energia ao longo do ano, o ângulo de inclinação do gerador fotovoltaico deve ser igual à latitude do local onde o sistema será instalado. No entanto pequenas variações na inclinação não resultam em grandes mudanças na energia gerada anualmente e a inclinação do gerador fotovoltaico pode estar dentro de 10° em torno da latitude do local.

O inversor conectado à rede elétrica de baixa tensão realiza apenas o controle da corrente fornecida, não devendo exercer nenhum controle sobre a tensão da rede, segundo a literatura em (22).

3.8 ENERGIA EÓLICA

Uma das maiores preocupações do século XXI é com a escassez das reservas naturais de combustíveis fósseis chamadas de fontes de energia não renováveis, conforme o autor em (23). Em contrapartida, desenvolvimento científico e tecnológico proporciona um grande aumento da utilização de fontes de energia renováveis: Energia eólica, solar, das marés, geotérmica, biomassa, entre outras. É com base de observação dos fatos atuais da situação energética mundial, que este trabalho tem como objetivo a construção de uma pequena turbina eólica para instalações residenciais ou comerciais de pequeno porte, demonstrando que de

forma racional é possível aproveitar uma fonte de energia limpa, renovável e abundante em grande parte do Brasil e do Mundo.

3.8.1 Potencial Eólico

Como o próprio nome revela, a geração eólica é a geração de eletricidade a partir dos ventos, ou seja, é a conversão da energia cinética dos deslocamentos de ar em energia elétrica (15). Essa conversão é feita através dos chamados aerogeradores (também conhecidos como turbinas eólicas), que conseguem captar parte da energia cinética do vento que atravessa o espaço varrido pelo rotor das turbinas. Conforme pode ser verificado na equação abaixo, a potência elétrica gerada pela turbina depende cubicamente dessa variável.

$$P=1/2(pAV^3C_p\eta) \quad (8)$$

p = densidade do ar em kg/m³;

$A=\pi.D^2/4$, em que D é o diâmetro do rotor em m²;

C_p = coeficiente aerodinâmico de potência do rotor;

η =eficiência do conjunto gerador transmissão.

V =velocidade do vento em m/s;

Ao absorver a energia do vento, o aerogerador provoca sua desaceleração à jusante do rotor, de modo que ele recupera sua velocidade anterior gradualmente, conforme se mistura com as demais massas de ar predominantes na atmosfera. Essa é a razão pela qual, nos parques eólicos, observa-se certa distância (da ordem de 10 vezes o diâmetro do rotor da turbina) entre uma turbina eólica e outra instalada a jusante, conforme cita o autor em (14).

Dada a relação cúbica entre a velocidade do escoamento e a potência da turbina eólica, a instalação de aerogeradores muito próximos uns dos outros comprometeria sensivelmente sua potência.

Conforme apresentado no documento “Atlas do Potencial Eólico Brasileiro”, elaborado pela ANEEL em 2003 (12), o Brasil possui um potencial eólico estimado em 143,5 GW.

Abaixo na figura 4, há um mapa extraído do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro que mostra a velocidade média anual do vento no território brasileiro e, portanto, permite identificar as localidades com maior potencial para o aproveitamento de energia eólica.

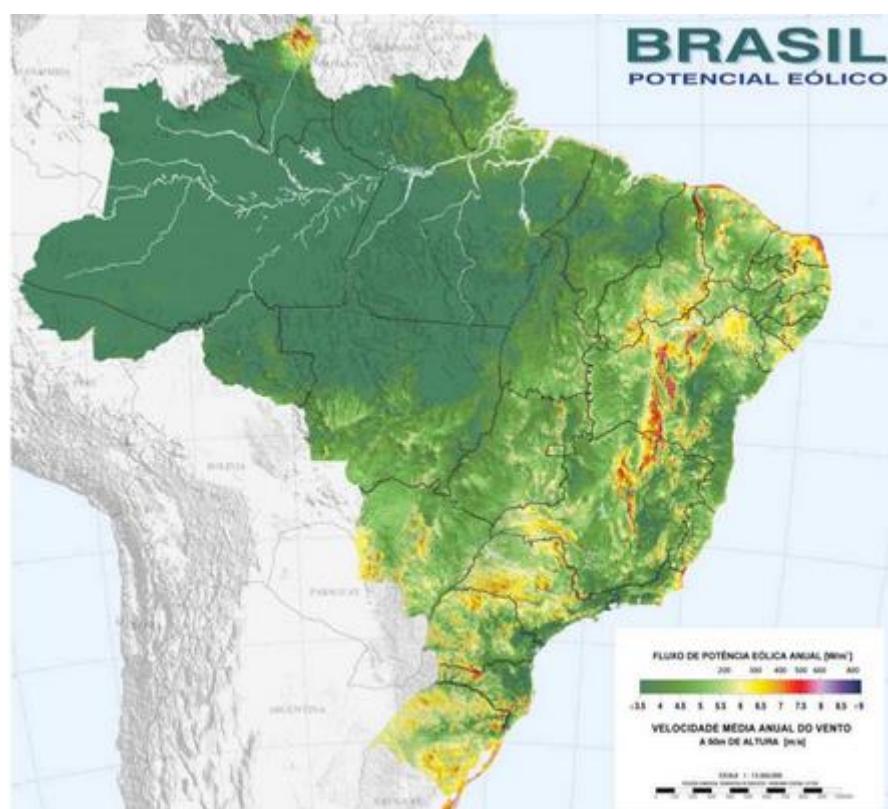


Figura 4 - Velocidade média anual do vento no território brasileiro.

Fonte: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. **Fonte:** (12)

Nele, é possível notar como, principalmente, as regiões nordeste e sudeste do Brasil possuem condições de vento mais favoráveis, por apresentarem localidades com as mais altas velocidades médias do vento para o território nacional. O Apêndice desse trabalho apresenta o mapa com a velocidade média do vento para a região aplicada neste trabalho. Ver apêndice C.

Um dos aspectos mais interessantes e positivos no aproveitamento da energia eólica para o caso brasileiro especificamente é a complementaridade que ela possui com o regime de chuvas no país (13). Segundo o autor, quando há chuva não há vento e quando há vento não há chuva. Como o sistema de geração brasileiro atual é predominantemente hidrelétrico (aproximadamente 75% de toda a capacidade instalada), ele possui grande dependência dos regimes de chuva e das condições hidrológicas do país, de modo que condições hidrológicas muito desfavoráveis e não previstas pelos órgãos reguladores e operadores do sistema elétrico nacional podem acarretar em problemas sérios de abastecimento. É por essa razão, inclusive, que o país possui também usinas termelétricas, que conferem maior confiabilidade e segurança ao sistema elétrico nacional já que sua capacidade de geração independe da aleatoriedade da natureza. Nesse sentido, também a energia eólica pode ser utilizada para aumentar a confiabilidade do sistema, dada a complementaridade sazonal mencionada anteriormente.

3.8.2 Componentes do gerador eólico

É a máquina que converte a energia cinética do vento em energia elétrica, sendo composta por vários elementos que podem ser divididos conforme descrição nos próximos itens.

3.8.2.1 Rotor elétrico

É parte responsável por captar a energia do vento e transformar em energia mecânica de rotação. São divididos em rotores de eixo horizontal ou de eixo vertical. Os de eixo horizontal são os frequentemente utilizados e devem ter mecanismos de controle para que o rotor fique em posição perpendicular ao vento. Na figura 5 temos a exemplificação de um rotor de eixo horizontal de pequeno porte utilizado neste trabalho.



Figura 5 - Rotores de eixo horizontal de pequeno porte. Fonte: Hummer

3.8.2.2 Transmissão e caixa multiplicadora

Transmite a energia mecânica do rotor até o gerador. É utilizada para adaptar a baixa velocidade do rotor à velocidade mais elevada dos geradores convencionais.

3.8.2.3 Mecanismos de controle

Utilizados para orientar o rotor na direção do vento, controlar a velocidade e carga, podendo ser mecânico, aerodinâmico ou eletrônico.

3.8.2.4 Controle de potência

Evita o sobrecarregamento elétrico e do sistema de transmissão, devido ao aumento do fluxo de ar.

3.8.2.5 Torre

Parte estrutural que suporta todo peso e carga da turbina e posiciona o rotor a uma altura necessária para o seu funcionamento. Neste trabalho é prevista o uso de uma torre em suporte sob treliça, por ser um aerogerador de pequeno porte, conforme apresenta-se da figura 6.



Figura 6 - Torres treliçadas. Fonte: Hummer

3.8.2.6 Gerador Elétrico

O gerador é a parte da máquina eólica responsável pela transformação da energia mecânica em energia elétrica. Nesse trabalho será utilizado um gerador elétrico de corrente contínua devido às características do rotor eólico que opera com velocidade variável.

A principal vantagem de geradores síncronos, conforme cita o autor em (15) é que seu fluxo de potência reativa pode ser controlado. Com o aumento da corrente de campo, a potência reativa pode ser entregue à rede; de forma inversa, com a diminuição da corrente o gerador pode solicitar potência reativa da rede.

3.8.2.7 Inversor *Grid-Tie*

Inversor *grid-tie* é um dispositivo elétrico que permite os usuários de energia solar ou eólica interligar seus sistemas com a rede da concessionária, apesar do inversor para sistemas fotovoltaicos possuírem particularidades de controle MPPT conforme item 4.7.3.1. A principal diferença entre um inversor padrão e um inversor *grid-tie* é que este último é capaz de se interligar com a rede da concessionária,

devido a sua capacidade de sincronizar sua frequência (60 Hz, no Brasil) e a sua tensão de saída com a rede que se deseja conectar. Os inversores *grid-tie* também são capazes de se desconectar da rede da concessionária que esta última não está fornecendo energia (por exemplo, um blecaute ou apagão).

Este inversor capta a tensão fornecida do aerogeradores em forma de corrente contínua e converte para a forma de corrente alternada, podendo assim ser alimentada diretamente na rede. O inversor deve estar também em sincronia com a frequência da rede (60 Hz, no Brasil), usando um oscilador local e limitar a tensão para que a mesma não seja superior à tensão da rede. Os modernos inversores têm a unidade de fator de potência fixa, isso significa que a tensão de saída e a corrente estão perfeitamente alinhadas, e seu ângulo de fase é de 1º (um grau) em relação ao da rede de energia. Tal inversor, apresentado na figura 7 possui a capacidade de analisar a frequência da onda da rede e "corrigir" tensão e frequência provindas do gerador.



Figura 7 - Inversor Grid-Tie. Fonte: Hummer

Dentre os sistemas eólicos existentes como isolados, híbrido e conectados à rede, este último é o aplicado neste trabalho e será analisado isoladamente apesar de estar inserido em um sistema proposto como híbrido.

Sistemas eólicos de pequeno porte, foco aqui em trabalho, são mais próximos do solo do que grandes aerogeradores. Por isso, o terreno e o entorno da edificação devem ser analisados (15) antes de definir-se o local exato da instalação. Desse modo, será possível identificar obstáculos que possam influenciar o comportamento dos ventos.

De modo geral, a velocidade do vento aumenta com a altura e depende do que está construído nos arredores (15). Nas alturas mais baixas, ela é afetada pela fricção do vento com a superfície terrestre. Bosques ou áreas urbanas densas, por exemplo, podem abrandar muito o vento, enquanto áreas abertas, como lagoas, têm influência quase nula. Por isso aerogeradores são normalmente instalados em torres elevadas ou no topo de edificações, mantendo-se distantes de outros edifícios, árvores e eventuais obstáculos.

A escolha do aerogerador é influenciada, segundo o autor em (15), tomando os seguintes pontos:

- Velocidade mínima de vento para funcionamento do microgerador eólico;
- Velocidade de vento em que o microgerador eólico alcança a potência nominal;
- Velocidade (máxima) de vento em que o microgerador eólico desliga.

Para que a instalação aqui em questão possa participar do Sistema de Compensação de Energia deve ser escolhido um microgerador eólico que atenda à necessidade energética da edificação, gerando no máximo a energia que você consome ao longo de um ano ou considerando o uso de créditos para compensação em outras unidades consumidoras que estão em seu nome.

Primeiramente, verificar-se-á o quanto de eletricidade da casa consome em determinado período, para calcular qual deve ser a capacidade de seu sistema eólico.

Deve-se conhecer o local onde será instalado o gerador, para avaliar as condições físicas e definir como será a microgeração. O desempenho de um gerador eólico de pequeno porte deve levar em conta tanto a intensidade e a regularidade dos ventos quanto à continuidade da direção (15).

3.8.3 Instalação

Para garantir um bom aproveitamento do vento, é importante manter distâncias mínimas entre o gerador eólico e eventuais obstáculos no entorno conforme pesquisa em (24). Uma regra geral, segundo o autor, é que o microgerador seja instalado a uma altura de pelo menos 10 metros a mais que o obstáculo mais alto dentro de um raio de 150 metros. Obstáculos de mesma altura ou mais altos que o microgerador localizados a partir de um raio de 150 metros terão pouca influência na geração de energia.

Deverá ser verificado se existe uma corrente de ar livre – pelo menos na direção principal do vento – e uma saída de ar atrás do aerogerador. Caso não haja, terá de ser analisado se é possível aumentar a torre, para que o obstáculo não atrapalhe, ou, ainda, afastá-la do local.

3.8.4 Dimensionamento

Como visto na equação 8 deste mesmo capítulo, a potência da massa de ar em movimento é proporcional ao cubo de sua velocidade, segundo o autor (15), é essencial ter conhecimento detalhado do vento e suas características, para que o rendimento dos aerogeradores seja estimado com precisão. Vários parâmetros necessitam serem conhecidos a respeito do vento, incluindo a sua velocidade média, direção, variações em torno da média em curtos intervalos de tempo, variações diárias, variações sazonais, variações anuais e variações com a altura.

Para uma primeira análise do potencial eólico disponível, costumam ser apresentadas médias mensais de velocidade de vento, obtidas a partir de períodos de integração mais curtos, como horários ou de 10 minutos. Outras ferramentas são normalmente usadas em estudos de potencialidade eólica para a estimativa da energia produzida, como histogramas da velocidade do vento e/ou a distribuição de probabilidade da velocidade do vento, como por exemplo a função de Distribuição de Weibull, que fornece informações importantes para serem utilizadas na etapa de projeto. A distribuição de Weibull, segundo o autor (15), exemplificada na equação 9, fornece duas importantes conclusões: o fator de escala qualifica a velocidade de vento, ou seja, quanto maior for o valor de c , maior será a velocidade de vento no local; já o fator de forma indica o nível de variação da velocidade de vento no local. Altos valores de k , que resultam em curvas com picos mais acentuados, indicam menores variações na velocidade de vento.

Por meio da equação da função de distribuição de Weibull é possível obter o histograma de distribuição da probabilidade de ocorrência do vento à certa velocidade.

$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c} \right)^{k-1} \exp \left[-\left(\frac{V}{c} \right)^k \right] \quad \begin{cases} k > 0 \\ c > 1 \end{cases} \quad (9)$$

A velocidade do vento é nula na superfície do solo, devido ao atrito existente entre ele e o ar. Próximo ao solo, a velocidade aumenta mais rapidamente, sendo este aumento mais lento à medida que a altura também aumenta. A variação torna-se pouco significativa a uma altura aproximada de 150 m, e nula a aproximadamente 2 km sobre o solo, segundo o autor em (15). O fenômeno de variação da velocidade do vento com a altura é denominado de perfil vertical do vento.

Dois modelos são bastante utilizados para expressar a variação da velocidade do vento com a altura, sendo conhecidos como perfil exponencial e perfil logarítmico do vento, dados respectivamente pelas equações 10 e 11.

$$V(z) = V_r \left(\frac{Z}{Z_r} \right)^\alpha, \quad (10)$$

$$V(z) = V_r \left[\frac{I_n \left(\frac{Z}{Z_0} \right)}{I_n \left(\frac{Z_r}{Z_0} \right)} \right], \quad (11)$$

Sendo $v(z)$ a velocidade na altura z desejada, V_r a velocidade na altura de referência Z_r , α o coeficiente de Hellmann, parâmetro dependente da rugosidade do terreno, e z_0 comprimento da rugosidade. Valores típicos de α e z_0 são apresentados na tabela 2.

Tipo de Terreno	z_0 (m)	α
Muito liso: gelo ou lama	10^{-5}	
Mar aberto calmo	2×10^{-4}	
Mar agitado	5×10^{-4}	
Neve	3×10^{-3}	0,10
Gramado	8×10^{-3}	
Pastagem	10^{-2}	
Descampado	3×10^{-2}	0,13
Plantações	5×10^{-2}	0,19
Árvores esparsas	10^{-1}	
Árvores compactas, sebes, prédios esparsos	$2,5 \times 10^{-1}$	
Florestas e bosques	5×10^{-1}	
Subúrbios	1,5	0,32
Centros de cidades com prédios altos	3	

Tabela 2 - Valores de Zo e alpha de acordo com o tipo de terreno. Fonte: (14)

A energia utilizada pela turbina eólica é a energia cinética da massa de ar em movimento, é calculada considerando um volume de ar à frente do rotor, que se movimenta a velocidade constante, como visto na equação 10 acima.

A potência produzida por um aerogerador depende tanto das suas características de projeto, quanto das características do vento no local de sua instalação. Esses parâmetros determinam o fator de capacidade do aerogerador (FC) exemplificada na equação 12. Esse fator é definido como a razão entre a energia efetivamente gerada em um período de tempo e a que seria produzida caso o aerogerador operasse com sua potência nominal durante todo esse período.

$$FC = \frac{\text{Energia efetivamente gerada}}{P_n \cdot \Delta t} \cdot 100 (\%) \quad (12)$$

onde,

P_n é a potência nominal do aerogerador (kW), e

Δt é o período considerado (h).

A curva de potência de um aerogerador indica a saída de potência elétrica do mesmo para uma carga, um sistema de armazenamento, ou uma rede elétrica, em função da velocidade do vento na altura do rotor. O resultado da aplicação da distribuição de frequência à curva de potência do aerogerador fornece a quantidade de energia produzida no período considerado como apresentado na equação abaixo:

$$EP(\text{ano}) = \sum f_{ri} \times P_i \times \Delta t \quad (13)$$

onde,

f_{ri} é a frequência de ocorrência de uma determinada velocidade de vento [%];

P_i é a potencia do aerogerador para uma determinada velocidade (Gráfico de Potencia do Aerogerador) [W].

Δt período de tempo considerado, geralmente um ano, 8760 horas.

O cálculo da energia gerada em um ano EG é a soma da EP no mesmo período de tempo, contudo, subtraindo as perdas elétricas e indisponibilidade (manutenção) conforme a equação 14.

$$EG(\text{ano})_{\text{central}} = \sum_1^{nT} EG(\text{ano})_n \times (1 - \text{perdas}) \quad (14)$$

A escolha de aerogeradores com velocidade de partida menor, segundo o autor em (15) favorecem o aproveitamento da energia em baixas velocidades de vento (característica de vários locais da região amazônica). Há casos estudados em que aerogeradores com potência nominal 25% menor que as de outros fabricantes produzem mais energia anualmente, pois têm melhor rendimento para o perfil de vento do local.

Nos próximos tópicos serão tratados o dimensionamento do sistema híbrido aqui proposto, sendo este conectado à rede da distribuidora da localidade escolhida.

3.9 SISTEMAS HÍBRIDOS

Um sistema híbrido de geração do tipo fotovoltaico-eólico é baseado nos aproveitamentos solar fotovoltaico, térmico e eólico (14). A combinação dessas fontes procura explorar satisfatoriamente a complementaridade entre ambas no tempo.

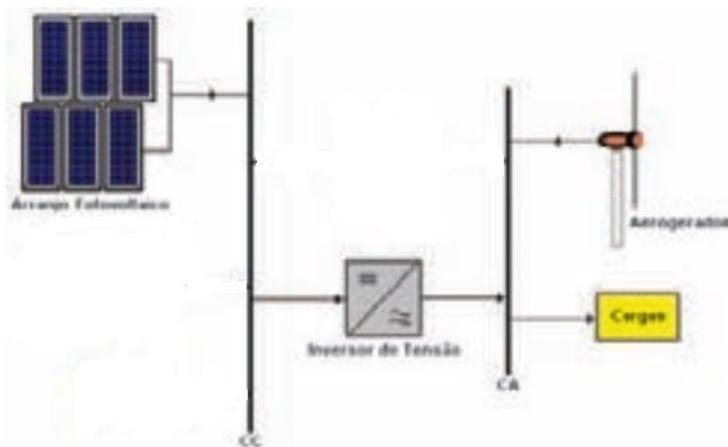


Figura 8 - Sistema híbrido eólico-fotovoltaico

Uma importante vantagem do sistema híbrido fotovoltaico-eólico é não empregar recursos não renováveis, como por exemplo, o óleo diesel. Entretanto, devido à característica intermitente e aleatória das fontes este trabalho dedica o estudo à um sistema híbrido conectado à rede, e para isso utilizou-se os inversores conectados à rede elétrica da concessionária.

A complementaridade entre as fontes, muitas vezes verificada em alguns locais durante diferentes períodos de tempo, pode garantir segundo a referência consultada (3), uma maior confiabilidade ao sistema, além de reduzir consideravelmente a participação do banco de baterias e/ou do grupo gerador a diesel.

O comportamento da radiação solar ao longo do dia segue um padrão razoavelmente previsível, iniciando no início da manhã com valores discretos, atingindo um máximo próximo ao meio-dia, e decrescendo até o pôr-do-sol. Em contrapartida, o comportamento do recurso eólico é menos previsível, e a possibilidade de serem obtidas velocidades mais elevadas em períodos onde o nível de radiação solar é baixo ou inexistente confere ao sistema maior continuidade no que se refere à geração de energia elétrica.

Os sistemas híbridos podem ser classificados de várias formas. As mais usuais são as classificações quanto à:

- Interligação com a rede elétrica convencional;
- Prioridade de uso das fontes de energia;
- Configuração.

Na sequência do trabalho serão desenvolvidas as considerações sobre o tipo do sistema híbrido utilizado.

4 METODOLOGIA

Para realizar o dimensionamento de sistemas integrados de energia, utilizando os preceitos apresentados, a metodologia proposta determina que o cálculo seja feito para o período de 1 (um) ano de tal modo que as fontes energéticas e as cargas apresentem variações razoavelmente similares durante o período considerado. Os procedimentos para o projeto são aplicados para o período considerado, de modo a se determinar a quantidade de recursos energéticos e dimensionar os dispositivos de conversão, considerando os níveis de confiabilidade, as disponibilidades dos recursos naturais e o custo mínimo do capital a ser investido.

Dentre as fontes renováveis de energia utilizadas, destaca-se a solar térmica, que será utilizada para reduzir a necessidade de energia para o aquecimento de água da localidade com o uso do chuveiro elétrico e, embora apresentando custos mais elevados serão utilizadas turbinas eólicas e painéis fotovoltaicos para se produzir eletricidade.

Como já apresentado no capítulo anterior, o dimensionamento dos sistemas solar-eólico leva em consideração o nível de confiabilidade no fornecimento de energia, as cargas e o custo mínimo do sistema. Baseado nessa breve discussão, a lógica do dimensionamento é ordenar as fontes energéticas de acordo com os custos e disponibilidade, partindo das fontes de menor custo, procurando utilizá-las ao máximo, até chegar às fontes de maior custo, conforme as necessidades de atendimento às cargas.

Dados médios de radiação solar e velocidade do vento serão utilizados no dimensionamento. Parâmetros referentes às diversas fontes ou dispositivos de conversão energética – como painel fotovoltaico, gerador eólico, coletor solar, assim como parâmetros econômicos - como custo inicial dos equipamentos, custo de manutenção, custo dos insumos energéticos taxa de desconto, deverão ser considerados. As necessidades energéticas a serem supridas foram agrupadas em três itens: cozimento, energia elétrica (para iluminação, eletrodomésticos, bombeamento de água, etc) e água quente. O primeiro item apresenta uma

disponibilidade de dados diários e os demais itens apresentam uma disponibilidade de dados horários.

O processo interativo utilizado para o dimensionamento ótimo do sistema energético apresenta as seguintes etapas:

- 1) Leitura dos dados iniciais (necessidades energéticas e disponibilidade dos recursos energéticos naturais), parâmetros referentes aos equipamentos de conversão energética e parâmetros econômicos a serem utilizados no dimensionamento.
- 2) Obtenção, para a média anual, das energias solar e eólica geradas pelos dispositivos de conversão energética. Cálculo de geração individualizado para cada fonte energética. Cálculo dos custos dos equipamentos convertidos a valor presente, a partir dos parâmetros econômicos estabelecidos.
- 3) Resultados do dimensionamento otimizado dos componentes de conversão energética das fontes renováveis locais.

Neste contexto, objetivando complementar os modelos de dimensionamento apresentados na literatura, desenvolveu-se o modelo para atender às seguintes proposições:

- Contemplar a totalidade dos custos associados aos processos de conversão energética, como custos de materiais, instalação e manutenção;
- Utilizar valores médios de radiação solar e velocidade do vento;
- Verificar a viabilidade técnica da instalação do sistema híbrido;
- Realizar uma análise econômica comparativa entre os sistemas energéticos;

A especificação de equipamentos terá como premissa a utilização do equipamento existente no mercado nacionalizado e deverá contar com robustez e praticidade na instalação visto obter e corroborar com uma instalação que de fato possa ser aplicada.

4.1 ANÁLISE DOS DADOS E DA LOCALIDADE

Os métodos de dimensionamento discutidos no capítulo anterior foram simulados com base nos dados indicados na tabela 3 deste capítulo, e os resultados obtidos foram comparados e discutidos, salientando as diferenças existentes entre eles. Utilizou-se, como referência para a realização do estudo, uma típica propriedade rural situada em uma área atendida pela eletrificação convencional.

A localidade rural escolhida fica na cidade de Bueno Brandão – MG à 170 km da cidade de São Paulo – SP como é possível observar na figura 9.

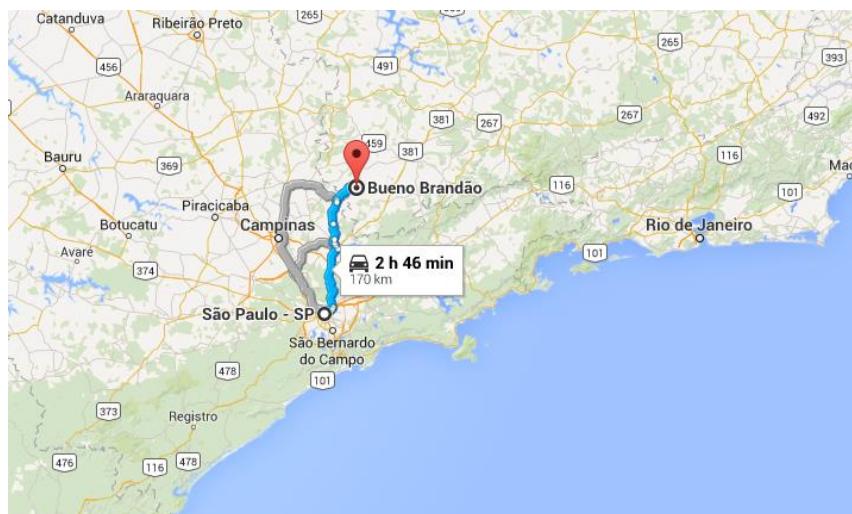


Figura 9 - Localização escolhida para o estudo de caso. Fonte: Google Maps Maio/2015

A zona rural em questão se situa à Latitude de 22,43º Sul e a 46,38º Oeste estando à uma altitude de 1175 m de altitude e com médias de temperatura de 17ºC ao longo do ano conforme fonte indicada na figura 19.

A proposta de instalação das plantas solares, fotovoltaica e térmica, é que ambos os painéis coletores sejam instalados no telhado de ambas as construções exemplificadas pela foto na figura 10 onde:

1. Instalação do coletor solar térmico por ser a residência principal. Face 1 voltada à 20º norte;

2. Instalação do painel fotovoltaico por existir espaço disponível para instalação do inversor, face 2 voltada à 20º norte;



Figura 10 - Foto aérea da localidade. Fonte: Google Maps Maio/2015

Vê-se que ambas as posições possuem boa orientação ao norte, ou seja, em torno de 20º conforme aferição local, vista na figura 11, a qual indica que os painéis serão instalados à 20º em relação ao norte geográfico.



Figura 11 - Posição de instalação dos coletores. Fonte: Polaris. Medição na localidade. Maio/2015.

Na figura 12 abaixo é possível ter uma visão panorâmica da localidade em questão.



Figura 12 - Vista geral da localidade rural escolhida. Fonte: Foto do autor Maio/2015

4.2 ESTRATÉGIA E ARQUITETURA DO PROJETO

A presente estrutura prevê a instalação do coletor solar no telhado da residência principal devido à facilidade da instalação hidráulica deste ao seu

principal ponto de consumo, ou seja, o banheiro e cozinha da instalação. A face 1 do telhado demonstrada na figura 10 é melhor detalhada abaixo na figura 13.



Figura 13 - Em primeiro plano, vista da face norte para instalação do coletor solar térmico. Fonte: Foto do autor Maio/2015

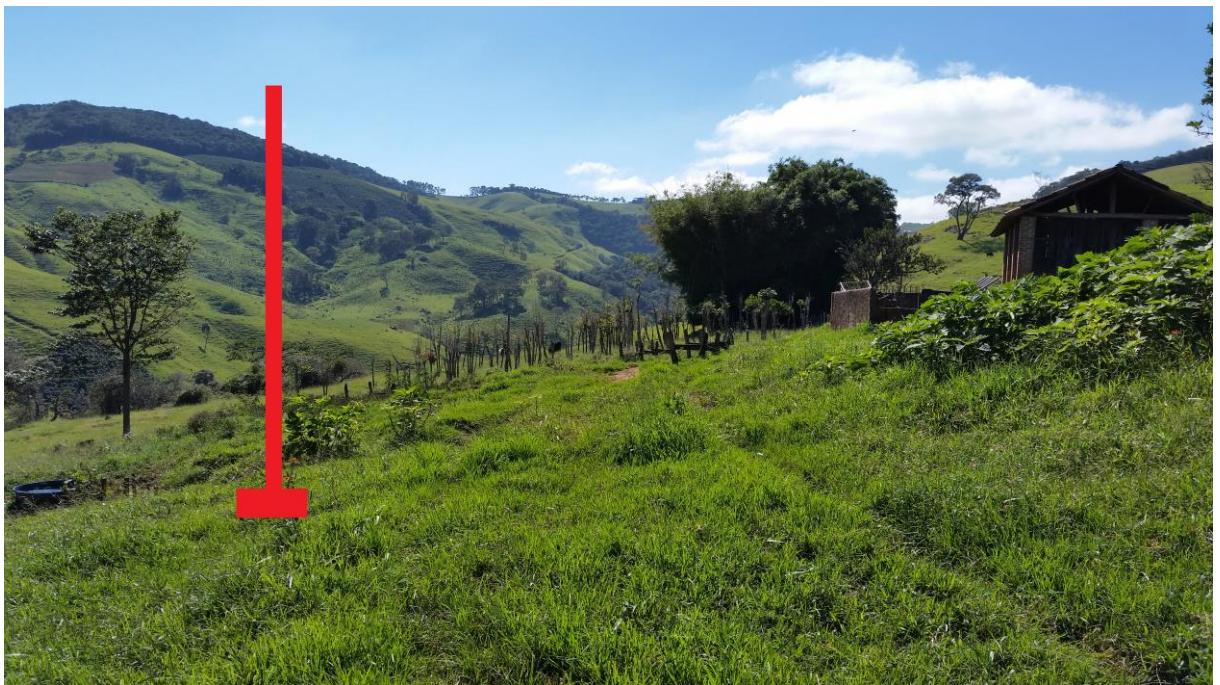
Para além da face 1, para a instalação dos coletores solares térmicos, sendo que a face 2, apresentada na figura 10, é melhor detalhada na figura 14 abaixo.



Figura 14 - Face norte para instalação dos painéis fotovoltaicos. Fonte: Foto do autor Maio/2015.

No sistema híbrido proposto, será analisado a implantação de um aerogerador de forma a complementar a planta solar em questão e aproveitar a força do vento local, o qual será detalhado nos próximos capítulos.

A fim de aproveitar as correntes locais do vento, o local de instalação da torre do aerogerador foi propositalmente escolhida para ser o mais próximo da residência, reduzindo assim o uso de cabos para a transmissão de energia ao ponto de conexão e consumo, bem como aproveitar o corredor de vento impostos pelo relevo e vegetação local, conforme visto na sessão 4.9.3 na tabela 02.



**Figura 15 - Local escolhido para instalação do aerogerador. Fonte: Foto do autor
Maio/2015**

A posição escolhida para prevê que o aerogerador tenha o melhor aproveitamento do vento que possui predominância nordeste conforme mediação local, exemplificada pelas figuras 15 e 16, de direção do vento.



**Figura 16 - Direção predominante do vento. Fonte. Polaris. Medição na localidade -
Maio/2015.**

A arquitetura proposta, conforme figura 17, prevê a conexão do conjunto de painéis fotovoltaicos, o aerogerador e seus respectivos inversores à rede elétrica, seja realizada em paralelo à carga de modo que toda a geração possa suprir o consumo da residência bem como exporta à rede elétrica, ou quando a geração for insuficiente à demanda de consumo a carga total possa ser suprida pela energia da concessionária local, a Energisa, que recentemente adquiriu a Empresa Elétrica Bragantina.

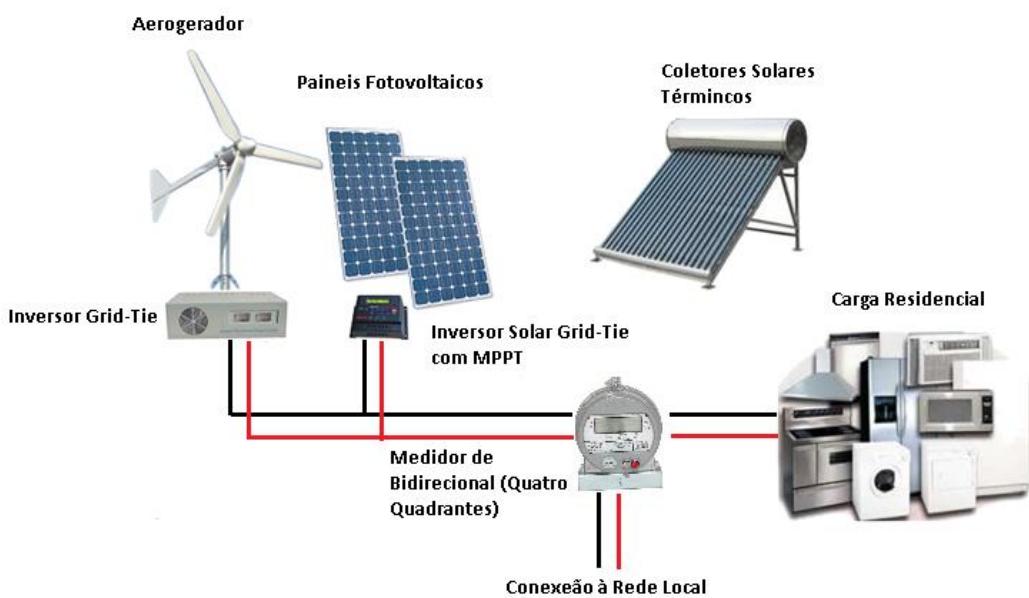


Figura 17 - Arquitetura de instalação da planta híbrida: Fonte: Autor - Maio/2015

O coletor solar térmico previsto neste projeto tem como o objetivo principal reduzir o consumo de energia elétrica no aquecimento de água, objetivando assim reduzir o número de painéis fotovoltaicos e de um menor aerogerador para suprir a carga da residencial rural em estudo.

Para além de todos os materiais de instalação como, cabos de corrente alternada, cabos solares, tubulações hidráulicas, sensores de segurança e proteção e suporte para fixação dos componentes citados acima é importante citar o medidor bidirecional a ser instalado no ponto de conexão da planta e carga à rede elétrica. Este medidor mede a energia consumida pela residência e, por ser do tipo quatro

quadrantes, também registra a energia injetada na rede. Este recurso permite calcular a energia líquida consumida.

Como base em uma pesquisa na conta de energia elétrica da residência em questão por um período de um ano (ano referência 2014) foi possível obter o perfil de consumo apresentado na figura 18 abaixo.

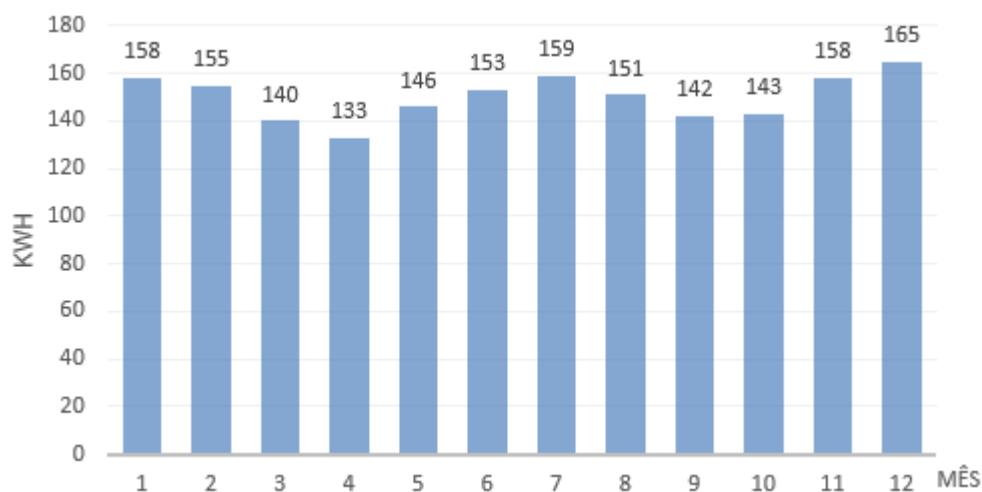


Figura 18 - Perfil de consumo da residencial rural em estudo. Fonte: Fatura Fev/2015 Energisa SA.

A residência em estudo possui três residentes e possui como carga residencial duas televisões, uma geladeira, uma máquina de lavar roupas, um chuveiro elétrico, uma bomba d'água de 0,5 HP, 8 lâmpadas fluorescentes, utensílios domésticos como liquidificador, batedeira, aparelho de som e demais itens, como conversor de antena parabólica, carregador de telefone celular e aparelho de barbear.

Este perfil de consumo prevê uma média de 155 kWh de energia mensal, pelos quais definimos aqui que o consumo anual é o produto de 155 kWh pelos 12 meses no ano, obtendo assim o valor de 1860 kWh ano.

É com essa definição que o dimensionamento passo a passo foi efetuado sendo que primeiro foi definido qual a potência consumida pelo uso do chuveiro

elétrico, atendido pelo sistema solar térmico. Depois com subtração do valor total anual consumido pela residência pelo consumo anual médio do chuveiro, obteve-se assim, um valor de energia a ser suprida pelo conjunto fotovoltaico e eólico.

A planta fotovoltaica foi dimensionada para suprir 50% da demanda de energia da residência, ou seja, 930kWh.

Para o estudo da eficiência da planta, as próximas sessões dedicaram-se a dimensionar o conjunto híbrido aqui proposto.

5 RESULTADOS

Por meio da sequência de trabalho descrita no capítulo anterior detalha-se abaixo os dados obtidos.

5.1 PLANTA SOLAR TÉRMICA

Para o dimensionamento do coletor solar térmico inicialmente é necessário conhecer as temperaturas médias, frias e quentes para assim delinearmos os próximos passos.

5.1.1 Dimensionamento

Com base nos dados da posição geográfica da residência apresentado na tabela 3 percebemos que as médias das temperaturas são relevantes também para a escolha do reservatório de água quente, visto a necessidade deste em manter a temperatura da água à temperatura ideal para o uso de 40°C, conforme Norma-ABNT-NBR-15569.

Tabela 3 - Dados Bueno Brandão. Fonte: Climate Data Org – Março/2015

Latitude	22,4377 °
Longitude	46,3861 °
Altitude	1175 m
*Temperatura Média	17,3 °

A figura 19, obtida pela consulta da organização Climate Data releva também os níveis de precipitação para a região em questão.

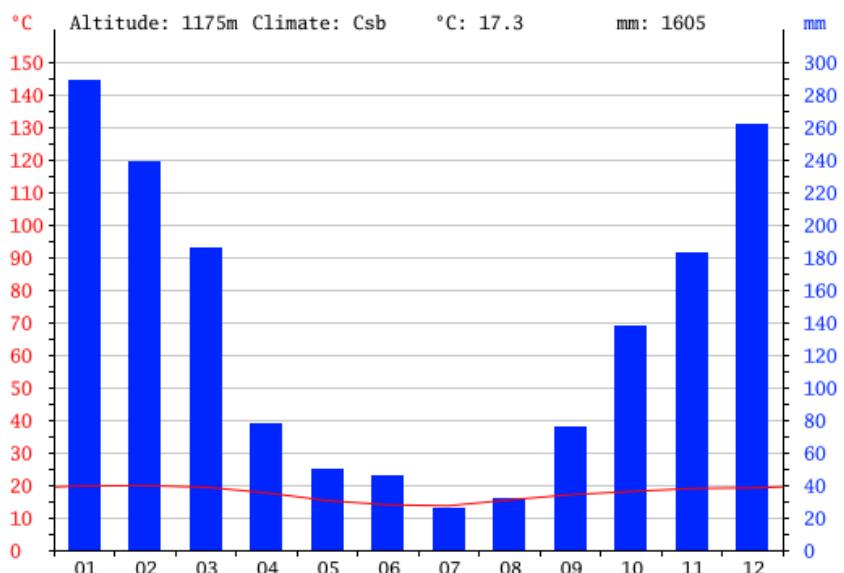


Figura 19 - Temperatura e pluviosidade média anual para Bueno Brandão - MG. Fonte:
Climate Data Org – Março/2015

Com base dos dados locais faz-se necessário dimensionar o consumo de água quente para a residência em questão que possui neste estudo 3 pessoas.

Sendo assim, com base na ABNT NBR 15569:2008, o cálculo do volume de água quente necessário para suprir o chuveiro, a pia da cozinha e a pia do banheiro é apresentado nas tabelas 4, 5 e 6 respectivamente segundo a equação (1).

O Tu (tempo de utilização) é o produto do número de pessoas que utilizam o chuveiro, neste trabalho quantificado em três pessoas, e o tempo estimado de uso deste, estabelecido com 10 minutos. Para o cálculo foi utilizado uma ducha de vazão de 15,60 l/min e por fim obtém-se o volume de consumo, apresentado na tabela, 4 pelo produto da vazão (Qpu) pelo tempo de utilização total (Tu) e a frequência diária que este é utilizado.

Tabela 4 - Cálculo do volume de água quente no chuveiro.

V consumo	0,468 m ³
Qpu	0,0002600 m ³ /s
Tu	1.800 s
F	1
Pessoas	3
Tempo Ducha	10,0 min/dia
Vazão da ducha	15,60 l/min

Sob o mesmo raciocínio é possível obter o volume de água quente a ser utilizado na pia do banheiro. A tabela 5 abaixo, estabeleceu uma vazão média de 3,5 L/min, bem como o tempo de utilização (Tu) de 2 minutos bem e por fim a frequência de uso de 12 vezes, ou seja, 4 vezes por residente, obtendo um total de 12.

Tabela 5 - Cálculo do volume de água quente na pia do banheiro

V consumo	0,084 m ³
Qpu	0,0000583 m ³ /s
Tu	120 s
F	12
Vazão da Torneira	3,5 l/min

Também é possível obter o volume de agua quente a ser utilizado na pia da cozinha. A tabela 6 abaixo, estabeleceu uma vazão média de 3,5 L/min, bem como o tempo de utilização (Tu) de 2 minutos bem e ao final a frequência de uso de 9 vezes, ou seja, 3 vezes por residente, obtendo um total de 9.

Tabela 6 - Cálculo do volume de água quente no pia da cozinha

V consumo	0,063 m ³
Qpu	0,0000583 m ³ /s
Tu	120 s
F	9
Vazão da Torneira	3,5 l/min

Obtemos um total de volumo de consumo de 0,615 m³, como apresentado na tabela 7 abaixo por meio da equação 2.

Tabela 7 - Cálculo do volume de armazenamento

Varmaz.	0,455 m ³
Vconsumo	0,615 m ³
Tconsumo	40 °C
Tarmaz.	48 °C
Tambiente	17 °C

A norma sugere que o Volume de Armazenamento, Varmaz, seja maior ou igual à 75% do Volume de Consumo, Vconsumo, vemos que não é necessário fazer a correção, como sugere a norma, mantendo assim Varmaz de 0,455 m³.

Com base da definição do volume a ser armazenado escolheu-se o tipo de reservatório mais próximo do volume ajustado, apresentado na tabela 8.

Tabela 8 - Tipo do Reservatório

Fabricante	Ouro Fino
Tipo do Reservatório	Inox 304 - 300 L

Na tabela 9 é apresentado o reservatório que mais próximo acondicionaria o volume de armazenamento de 0,455m³ (455 L), sendo este o que possui 670 cm de diâmetro, 1985 de comprimento e 722 cm entre os pontos de suporte.

Tabela 9 - Tabela do Fabricante. Dimensões do Reservatório. Fonte: Ouro Fino - Março/2015

VOLUME (l)	DIMENSÕES (cm)			QUANT. DE SUPORTES	MÁXIMA PRESSÃO		POTÊNCIA DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA (Kw)	PESO(Kg)		TUBULAÇÃO	
	A	B	C		BAIXA PRESSÃO	ALTA PRESSÃO		BAIXA PRESSÃO	ALTA PRESSÃO	SAÍDA CONSUMO/ ENTRADA ÁGUA FRIA	SAÍDA E RETORNO COLETORES
100	538	925	385	2	10	40	2	18	23	1"	1"
200	538	1480	800	2	10	40	2	27	34	1"	1"
300	538	2010	700	2	10	40	2	33	43	1"	1"
400	670	1610	542	3	10	40	3	32	46	1"	1"
500	670	1985	722	3	10	40	3	40	52	1"	1"
600	670	2300	766	3	10	40	3	47	61	1"	1"
800	830	2105	705	3	10	40	3	56	73	1"	1"
1000	1070	1625	510	3	10	40	5	89	112	1 1/2"	1"
1500	1070	2200	753	3	10	40	5	110	140	1 1/2"	1"
2000	1070	2800	702	4	10	40	9	136	174	1 1/2"	1"
2500	1070	3390	700	5	10	40	9	156	202	1 1/2"	1"
3000	1585	2075	702	3	10	40	12	184	232	2"	1 1/2"
3500	1585	2300	570	4	10	40	12	197	249	2"	1 1/2"
4000	1585	2620	676	4	10	40	17	213	271	2"	1 1/2"
5000	1585	3110	630	5	10	40	21	238	305	2"	1 1/2"

Na figura 20 é possível observar a dimensão do reservatório estipulado para a sua correta fixação e alocação no telhado da residência.

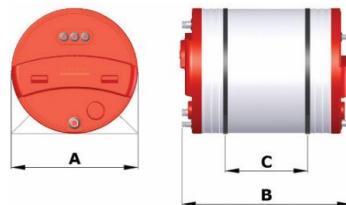


Figura 20 - Dimensões e formato do reservatório

Definido as características do reservatório é necessário, conforme equação 3, definir a energia útil do sistema assim temos a definição na tabela 10 abaixo.

Tabela 10 - Cálculo da energia útil do sistema térmico

Eútil	15,14 kWh/dia
Varmaz.	0,455 m³
Y	1000kg/m³
Cp	0,001kWh/Kg°C
Tarmaz.	48 °C
Tambiente	17 °C

A energia útil, $E_{útil}$, foi obtida pelo produto do peso específico da água de γ em kg/m^3 , o calor específico da água em $\text{kWh/Kg.}^{\circ}\text{C}$, o volume de armazenamento V_{armaz} e pela diferença entre temperatura de armazenamento, T_{armaZ} , utilizada como 48°C e a temperatura ambiente $T_{ambiente}$ de 17°C

Uma vez que há perdas no sistema empregado e, segundo a norma, tais perdas representam 15% da energia útil temos que a energia perdida diariamente é de aproximadamente 2,27 KWh.

O dimensionamento leva em conta também o fator de ganho, F_{rta} adimensional, e do fator de perdas F_{rUL} , também adimensional conforme equação 5 apresentada pelos quais é possível obter o PMDDE apresentada na tabela 11 abaixo.

Tabela 11 - Produção média diária de energia específica

PMDDE	2,801 kWh/m ²
F_{rta}	0,6997
F_{rUL}	5,1508

Quanto ao quesito instalação é previsto também, por meio da equação 6, estabelecer um fator de correção da inclinação e orientação do coletor solar, $F_{Cinstall}$, conforme apresentado tabela 12 abaixo.

Tabela 12 - Cálculo do fator de correção da inclinação e orientação

$F_{Cinstall}$	1,0
β	$30,00^{\circ}$
$\beta_{ótimo}$	$32,44^{\circ}$
α	$20,00^{\circ}$
Latitude Local	$22,4377^{\circ}$

Após o cálculo da energia útil, o PMDDE e o $F_{Cinstall}$, o dimensionamento da área coletora solar é efetuado através da equação 4 e, apresentada na tabela 13 com o valor de $A_{coletora}$ de 6,126 m².

Tabela 13 - Dimensionamento da área coletora necessária

Acoletores	6,126 m ²
E útil	15,14 kWh/dia
E perdidas	2,27 kWh/dia
$F_{Cinstall}$	1,0
PMDDE	2,801
IG	4,90kWh/m ² .dia

Sabendo qual a área necessária de coletores solares pode-se especificar o equipamento conforme a necessidade seguindo a tabela 15 e a 16 do fabricante consultado, Ouro Fino.

Tabela 14 - Características do coletor solar. Fonte: Ouro Fino - Março/2015

Fabricante	Ouro Fino
Tipo do Coletor	Vertical - Ouro 20V
F_{rra}	0,6997
F_{rl}	5,1508

Tabela 15 – Dimensões do coletor solar. Fonte Ouro Fino - Março/2015

MODELO	ÁREA (m ²)	TIPO	MATERIAL DE ALETAS	DIMENSÕES (cm)			PESO(Kg)		Nº DE TUBOS	BITOLA ENTRADA/SAÍDA
				A	B	C	Drenado	Escovado		
Ouro 10	1	Quadrado	Alumínio	100	100	6	14	15	9	22 mm
Ouro 14 V	1,4	Vertical	Alumínio	140	100	6	24	27	9	22 mm
Ouro 17 V	1,7	Vertical	Alumínio	170	100	6	30	33	9	22 mm
Ouro 20 V	2	Vertical	Alumínio	200	100	6	36	40	9	22 mm
Ouro 14 H	1,4	Horizontal	Alumínio	100	140	6	27	30	12	22 mm
Ouro 17 H	1,7	Horizontal	Alumínio	100	170	6	30	33	15	22 mm
Ouro 20 H	2	Horizontal	Alumínio	100	200	6	39	43	18	22 mm

Com base na área de coletores encontrada de 6,126 m² na tabela 13, pode-se eleger o número de três coletores de 2 m² cada um, modelo Ouro 20V garantindo

assim a quantidade de área de coleta para manter o volume de agua quente calculado.

É importante ressaltar que com o uso dos coletores solares de aquecimento de agua pretende-se obter uma economia do consumo de energia elétrica em torno de 492,75 kWh/ano, conforme a tabela 16.

Tabela 16 - Consumo de Energia Elétrica do Chuveiro a ser substituído

Potência Chuveiro	5.400 W
Tu	1.800 s
F	1
Pessoas	3
Tempo de Ducha	10,0 min/dia
Cosumo Diário	2,7 Kwh
Cosumo Anual	985,50 Kwh

O cálculo acima tomou como base a frequência de um banho por pessoa, na residência de 3 pessoas e com um banho de 10 minutos cada. A potência do chuveiro em questão de 5,4 kW.

Com a redução da carga da planta é que se pode efetuar um dimensionamento mais otimizado, ou seja, de menor custo.

5.1.2 Custo da instalação

Por meio do cálculo da área de coletores e da escolha de três coletores solares de 2 m² cada, obteve-se por meio de consulta de mercado o custo total dos materiais para a instalação, tais como estruturas, tubulações de cobre e demais itens de controle de fluxo, conforme apresentado abaixo na tabela 17.

**Tabela 17 - Custo dos Materiais da planta de aquecimento solar. Fonte: Orçamento:
HIDRO SYSTEM H. E HIDRAULICA LTDA - ME. Abril/2015**

	Qtd	Preço Unt*	Preço Total
Tubulações de Cobre	48 m	R\$ 49	R\$ 2.352
Vávulas e Registros	6	R\$ 37	R\$ 222
Estruturas e Suporte	8	R\$ 192	R\$ 1.536
Resitênciia e Sistema Elétrico	1	R\$ 112	R\$ 112
Coletores	3	R\$ 527	R\$ 1.581
Reservatório	1	R\$ 1.735	R\$ 114
Total			R\$ 5.917

Segundo o estudo de dimensionamento do sistema de aquecimento e a consulta de empresas de mercado foi possível calcular os valores de serviço para a instalação, comissionamento, documentação (projeto detalhado) como mostrado na tabela 18.

**Tabela 18 - Custo dos Serviços de Instalação. Fonte: Orçamento HIDRO SYSTEM H.
HIDRAULICA LTDA - ME. Abril/2015**

Serviço	Preço
Instalação	R\$ 390
Start-up	R\$ 185
Documentação	R\$ 90
Garantia	R\$ 120
Total	R\$ 785

Assim, ao custo total de R\$6.702,00 (serviços e materiais) obtém se uma economia anual de 727,8 kWh. Ressalta-se que a análise financeira será realizada comparativamente no tópico 6 – Análise dos Dados.

5.2 PLANTA SOLAR FOTOVOLTAICA

A planta solar fotovoltaica, neste contexto, foi escolhida para ser a principal geradora do sistema, devendo esta atender 75% da demanda residencial.

5.2.1 Dimensionamento

Para o dimensionamento da planta fotovoltaica solar inicialmente é necessário conhecer a irradiação solar média anual à latitude e longitude do local, conforme detalhado na tabela 19, obtido por meio da consulta ao Climate Data Org e o CRESEB.

Tabela 19 - Dados da localidade para o cálculo da energia elétrica produzida. Fonte Climate Data Org – Abril/2015

Latitude	22,4377 °
Longitude	46,3861 °
Altitude	1175 m
*Temperatura Média	17,3 °
Media Temperatura Fria	19,8 °
Inclinação do Painel Solar	23 °
Irradiação Solar Diária Média dia	4,91 kWh/m ² dia
Área Disponível para os Painéis	10 x 4 (40m ²)
Tipo de Instalação	Telhado
Horas de Sol Diária	5,54 h
Horas de Sol ao Mês	168,62 h
Horas de Sol ao Ano	2.023,43 h

Ainda é possível obter a irradiação solar no plano horizontal para a latitude e longitude, apresentada na figura 21.

Latitude: 22,4377° S
Longitude: 46,3861° O

UF	País	Irradição solar diária média [kWh/m ² .dia]																
		Latitude [°]	Longitude [°]	Distância [km]	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta
MG	BRA	22,2° S	46,368888° O	26,5	5,31	5,03	5,14	4,84	4,33	3,78	4,19	4,61	4,78	5,39	5,61	6,08	4,91	2,30

Irradiação Solar no Plano Horizontal para Localidade

22,4377° S; 46,3861° O



Figura 21 - Irradiação média mensal. Fonte: CRESEB – 2015 – Abril/2015

Com base no consumo anual de energia elétrica da residência em questão de 1860 kWp ano, estimou-se que a geração fotovoltaica deveria atender 50% de tal demanda de energia elétrica, já que o uso de 985kWh referente ao uso do chuveiro elétrico seria substituído pela energia térmica dos coletores solares. Assim a planta solar foi projetada para atender 656 KWh ano, ou seja 1,9kWp/dia. A uma taxa de irradiação média anual de 4,91 kWh/m²/dia podemos calcular por meio da equação 7 o número de painéis fotovoltaicos para o atendimento de 75% da necessidade da carga conforme apresentado na tabela 20 abaixo.

Tabela 20 - Dimensionamento do quantitativo de painéis

Necessidade fotovoltaica Ano	656 kWh
Necessidade fotovoltaica / Dia	1,9 kWp
Energia fotovoltaica a ser gerada / Dia (cada Painel)	0,64 kWp
Irradiação solar diária média	4,910 kWh/m ² dia
Rendimento do módulo	13%
Área de cada módulo fotovoltaico	1,002 m ²
Quantidade de Painéis necessários	2,93

A necessidade de energia diária é o quociente da demanda de energia estipulada, 656kWh ano, pela quantidade de dias no ano, portanto 365, obtendo

deste modo, pelo método da insolação, o número de 1,9 kWp dia. Pela multiplicação da irradiação solar média de 4,91 kWh/m² dia pelo rendimento em % e a área de cada painel tem se geração média diária de cada painel, ou seja 0,64 kWp.

Conforme apresentado na tabela 21, o quociente da necessidade diária de energia pela geração diária, obtém-se a quantidade de painéis para a planta de 2,93 assumindo assim 3 três fotovoltaicos. Também é informado a seguir as demais características do painel fotovoltaico selecionado.

Tabela 21 - Painel fotovoltaico 140W Kyocera. Fonte: Kyocera – Abril/2015

140W Kyocera Solar – KD140SX-UFBS	
Especificação	
Pmax	140,0 Wp
Tolerância	5%
Voc	22 V
Vmpp	17,7 V
Ics	8,68 A
Impp	22 A
Voltagem Máxima do Sistema	
Tipo de Célula	Policristalina
Dimensões do Painel	1500 x 668 x 46 (mm)
Moldura Aluminio	Aluminio
Peso	12,9 Kg
Preço (média mercado)	R\$ 790,00
Fonte	Kyocera

O método da insolação considera o uso do MPPT no inversor de forma a obter o máximo rendimento na geração de energia elétrica no conjunto de painéis fotovoltaico, conforme visto na sessão 4.7.3.1.

Após o detalhamento do número de painéis fotovoltaicos e, considerando que a escolha do inversor deverá atender os requisitos mínimos e máximos de tensão de entrada CC em seus terminais, o conjunto de 3 painéis dispostos de maneira seriada não deverá superar o nível de tensão máxima do inversor e tão pouco ser inferior a tensão mínima de trabalho deste. Toma-se como base a tensão a V_{oc} (tensão de circuito aberto) e a I_{sc} (corrente de curto circuito) do painel fotovoltaico. Deste modo temos a tabela 22 abaixo detalhando tais valores da planta fotovoltaica.

Tabela 22 - Número de Painéis em série e cálculo da tensão e corrente máxima nos terminais do inversor

SMA Sunny Boy SB 1200 Grid Tie	
Número de Painéis em Série	4
Tensão CCMax Entrada no Inversor	88,4 V
Corrente CCMax de Entrada Inversor	8,68 A

Assim, sabendo dos valores acima foi escolhido o inversor mais adequado à aplicação que é encontrado no mercado nacional (nacionalizado), o SMA Sunny Boy SB 1200 Grid Tie conforme ilustrado na figura 22.



Figura 22 - Inversor SMA sunny Boy SB 1200. Fonte: SMA – Abril/2015

Na tabela 23 observa-se demais características do inversor selecionado.

Tabela 23 - Características do inversor selecionado. Fonte: Fabricante SMA

SMA Sunny Boy SB 1200 Grid Tie	
Especificação	
Potencia Máxima Entrada	1.320 W
Voltagem Máxima Entrada	300 Vcc
Voltagem Mínima Entrada	80 Vcc
Corrente Máxima de Entrada	13 A
Potencia Nominal de Saída	1.200 W
Voltagem de Saída	180 Vca a 265 Vca
Frequência Saída	60 Hz
Corrente Máxima Saída	6,1 A
Eficiência Máxima	92 %
Cosumo Norturno	< 0,1 W
Temperatura de Operação	- 25°C a +60°C
Dimensões (L x A x P) mm	440 x 339 x 124
Peso (kg)	14 Kg
Preço (media mercado)	R\$ 2.400,00
Fonte	SMA

É de ressaltar que a fatura de energia nunca será igual a zero, pois consumidores residenciais e de propriedades rurais (Grupo B) devem pagar mensalmente pelo menos o custo de disponibilidade. Como a conexão é bifásica, há a necessidade de pagar pela disponibilidade de um valor em reais que equivale a 50 kWh. Mesmo que a planta forneça toda energia à residência, a concessionária cumpriu com a obrigação de oferecer a infraestrutura necessária para levá-la até o consumidor razão pela qual existe esse custo mínimo.

Outro assunto de extrema importância é que a concessionária local pode cobrar ICMS (imposto sobre mercadorias e prestação de serviços) pela energia injetada na rede, contudo não é o caso da localidade em questão, situada no estado de Minas Gerais, a qual não cobra tal tarifa para sistemas conectados à rede como microgeração, segundo CONFAZ (Conselho Nacional de Política Fazendária).

Os cálculos aqui elaborados consideram a inclinação ótima de 23º e também do não sombreamento dos painéis uma vez que a área não possui obstáculos como

árvores e edificações ao redor dos painéis fotovoltaicos que pudessem levar à uma redução na produção de energia elétrica.

5.2.2 Custo da instalação

Por meio do cálculo do número de painéis, inversor e da medida estimada de cabos, tem-se a lista de componentes abaixo para o projeto a instalação da planta fotovoltaica, apresentada na tabela 24.

Tabela 24 - Orçamento dos Materiais para a planta fotovoltaica. Fonte: Consulta: Eudora Solar. Abril/2015.

	Qtd	Preço Unt*	Preço Total
Cabo Fotovoltaicos	198 m	R\$ 9,45	R\$ 1.871,10
Conectores e Terminais	10	R\$ 22,00	R\$ 220,00
Estruturas e Suporte	12	R\$ 14,50	R\$ 174,00
Painel Fotovoltaico	3	R\$ 790,00	R\$ 2.370,00
Inversor	1	R\$ 2.400,00	R\$ 2.400,00
Medidor Bidirecional	1	R\$ 421,00	R\$ 421,00
Total			R\$ 7.035,10

Desta maneira obtém-se também, sob mesma consulta os preços médios para o serviço de implantação do sistema e à sua conexão à rede, conforme tabela 25.

Tabela 25 - Serviços envolvidos para implantação da planta fotovoltaica. Fonte: Consulta: Eudora Energia Solar. Abril/2015. www.eudoraenergia.com.br

Serviço	Preço
Projeto Detalhado	R\$ 880,00
Instalação	R\$ 910,00
Start-up	R\$ 570,00
Total	R\$ 2.360

O valor dos cabos solares, painéis fotovoltaicos e inversor correspondem à 71% de todo investimento necessário.

Assim ao custo total de R\$9.395,10 obtemos a geração média anual de 656 kWh. De posse deste dado podemos efetuar o próximo passo, ou seja, complementar à geração fotovoltaica com uso de uma microgerador eólico.

5.3 PLANTA EÓLICA

A proposta da planta eólica é que esta seja uma fonte complementar à geração fotovoltaica de forma a diversificar a fonte de energia, no caso, a força do vento.

5.3.1 Dimensionamento

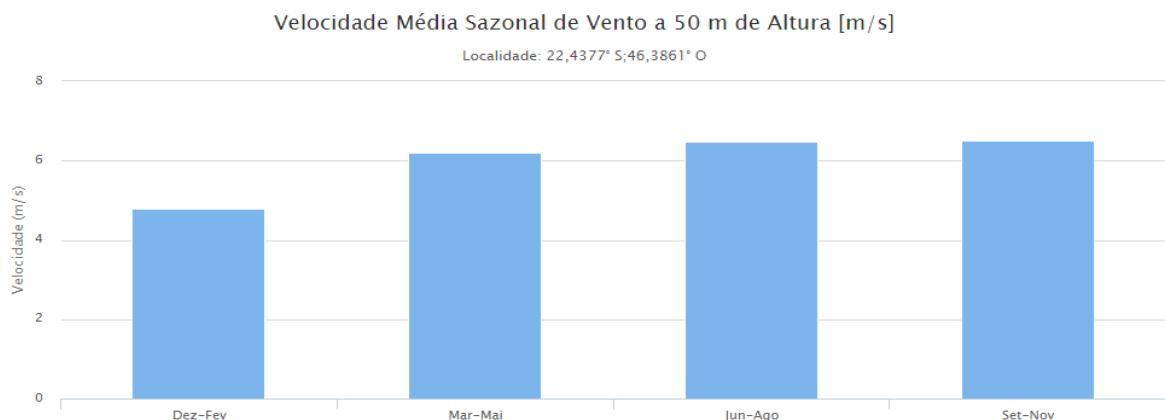
Para o dimensionamento do aerogerador inicialmente é necessário conhecer a velocidade média do vento para localidade, bem como os fatores de escala c e o fator de forma k , utilizados para descobrir o gráfico de distribuição de probabilidade da potência eólica. A tabela 26 e a figura 24 apresentam os valores médios anuais e trimestrais.

**Tabela 26 - Característica do vento em Bueno Brandão - MG. Fonte: CRESESB.
Abril/2015**

Dados de Vento

Latitude: 22,4377° S Longitude: 46,3861° O	
Atlas do Potencial Eólico Brasileiro	Dados de vento a 50 m de Altura
Grandeza	Unidade
velocidade média do vento	m/s
fator c	4,8
fator k	5,42
densidade de potência	W/m2
	6,19
	6,48
	6,51
	6,77
	7,29
	7,35
	2,48
	2,67
	2,29
	2,37
	230
	251
	285
	219

A figura 23 apresenta que a velocidade à 50 metros de altura é superior à 6 m/s nos períodos de setembro à novembro e próximo à 5 m/s de dezembro à fevereiro. Ambos períodos também correspondem aos de maior irradiação solar, conforme dados fornecidos na figura 21.



**Figura 23 - Característica sazonais do vento em Bueno Brandão - MG. Fonte: CRESESB.
Abril/2015**

Para o cálculo da energia produzida pela planta proposta na figura 24, é necessário eleger qual aerogerador a ser utilizado bem como seu inversor, compatível à conexão na rede local, que nesta residência em estudo é do tipo bifásica.

Ligaçāo do sistema ON GRID TIE:



Figura 24 - Conexāo do conjunto aerogerador / inversor à rede local. Fonte: Hummer

Por meio da análise da velocidade média anual local que é 6 m/s e que a velocidade média, segundo a fonte da figura 23, é superior à 3 m/s eleger-se o aerogerador nacional abaixo detalhado na tabela 27, de modo ter o melhor custo benefício da planta eólica.

Tabela 27 - Características do aerogerador eólico. Fonte: Hummer – Abril/2015

Turbina Eólica H2.7 500W Hummer	
Especificação	
Potência Nominal	500 W
Tensão DC	12 V
Corrente:	20,0 A
Velocidade	200 rpm
Potencia Máxima	1000 W
Numero de Lâminas	3
Velocidade de Cut-in	3,0 m/s
Velocidade de Cut-off	25,0 m/s
Velocidade do Vento (segurança)	50,0 m/s
Velocidade Nominal do Vento	7,0 m/s
Gerador	Trifásico AC Permanente
Altura Recomendada do Solo	15 m
Diâmetro do Rotor	2,5 m
Área do Rotor	4,9 m
Rendimento	88%

A figura 25 apresenta a foto do aerogerador de pequeno porte proposto na tabela 27 acima base de potencia nominal de 500 W.



Figura 25 - Aerogerador Hummer. Fonte: Hummer – Abril/2015

Uma vez que potencia nominal do aerogerador é de 500 W, especificou o inversor da Breeze, detalhado abaixo na tabela 28.

Tabela 28 - Características do inversor. Fonte: Breeze – Abril/2015

Inversor Breeze Grid Tie	
Especificação	
Potencia de Trabalho	300 à 600W
Sistema de Controle	MPPT
Tensão de Entrada	12 V
Tensão de Saída	110 ou 220V
Frequencia de Trabalho	50 ou 60Hz
Eficiêncnia	90 %
Proteção Contra sobrecarga	Sim
Proteção contra inversão de fase	Sim
Proteção contra curto circuito	Sim
Proteção de Temperatura	Sim

A tabela com a característica do inversor detalha a existência do sistema MPPT, que dará maior rendimento ao aerogerador conectado à rede de 220V da residência. Define ainda que o circuito elétrico do aerogerador até o inversor é de 12V e que possua a frequência de trabalho de 60Hz.

Com os dados da tabela 27 observa-se que a velocidade média do vento é dada para a altura de 50 metros, contudo, o aerogerador aqui proposto será

instalado em uma torre de 15 metros, na localidade da figura 15, sendo assim por meio da equação 11 é possível obter qual será a velocidade do vento ao nível do rotor, como visto na tabela 29 abaixo:

Tabela 29 - Cálculo da velocidade do vento à 15 metros.

Z	15,0 m
Zo (Arvores Esparsas)	1,00
Zr	50,0 m
Vr	6,0 m/s
V(15m)	4,2 m/s

Onde Z é a altura proposta de 15 metros, Zr é a altura de referência dos dados de rugosidade do terreno conforme tabela 2, ou seja, 50 metros, Vr a velocidade de vento de 6 m/s à altura de referencia (50 m) e por fim z_o a rugosidade do terreno de Z_o de 1 (adimensional), resultado em uma Velocidade à 15 m de altura de 4,2 m/s. Vê-se que essa velocidade obtida é superior à velocidade de Cut-in do aerogerador, ou seja, de 3 m/s (Tabela 27).

Após a escolha do aerogerador, obteve-se por meio da consulta ao fabricante em questão, o gráfico de potência em W do aerogerador versus a velocidade do vento em m/s, o qual é apresentado na figura 26.



Figura 26 - Gráfico de potência do aerogerador Hummer. Fonte: Hummer – Abril/2015

O próximo passo foi obter o gráfico da distribuição de potência do aerogerador considerando os dados do vento da localidade, fator de escala c que qualifica a velocidade do vento, ou seja, quanto maior for seu valor, maior será a velocidade do vento local e o fator de forma k que resulta em curvas com picos mais acentuados e assim obter a função de distribuição de probabilidade, F_r (%) do vento à uma faixa estudada de 0 à 25 m/s

O valor de F_r (em %) é calculado por meio da equação 9 e utilizada como entrada a velocidade em estudo, ou seja, cada uma das linhas da tabela 30, os fatores c e k. É possível observar que o maior valor de frequência do vento está à uma faixa de 4 m/s, ou seja, próximo à velocidade média encontrada pela equação 11 à altura de instalação de 15 m.

O valor da potência do aerogerador P (W) à cada velocidade é obtida da curva da figura 26, ou seja, o aerogerador atinge a potência de 1000 W à 14 m/s. De forma análoga obtém-se as demais relações potência (W) versus velocidade do vento (m/s).

Assim, a relação do produto entre a Probabilidade de Frequência do vento F_r (%) e a potência do aerogerador $P(w)$ à cada velocidade do vento é exibida na última coluna como $F(v)P(w)$.

A tabela 30 logo abaixo exemplifica o cálculo final da energia produzida pelo aerogerador no período de um dia a qual é obtida pela soma de todos os valores de $F(v)P(w)$ resultando em 144,06 W.

Tabela 30 - Distribuição de potência do aerogerador Hummer instalado em Bueno Brandão - MG.

V (m/s)	c k	Fr(%)	P(W)	F(v).P(v) (W)
1	6,77	0,0179563	0,00	0,00
2	2,37	0,0327035	0,00	0,00
3		0,0401609	50,00	2,01
4		0,0419696	125,00	5,25
5		0,0401482	250,00	10,04
6		0,0363170	375,00	13,62
7		0,0316076	500,00	15,80
8		0,0267427	600,00	16,05
9		0,0221436	700,00	15,50
10		0,0180261	750,00	13,52
11		0,0144735	800,00	11,58
12		0,0114897	825,00	9,48
13		0,0090344	900,00	8,13
14		0,0070462	1000,00	7,05
15		0,0054572	950,00	5,18
16		0,0042008	900,00	3,78
17		0,0032164	800,00	2,57
18		0,0024510	740,00	1,81
19		0,0018598	625,00	1,16
20		0,0014059	500,00	0,70
21		0,0010591	400,00	0,42
22		0,0007954	300,00	0,24
23		0,0005957	200,00	0,12
24		0,0004449	100,00	0,04
25		0,0003316	0,00	0,00
Total Diário de Energia				144,06 W

A figura 27 abaixo apresenta o gráfico do Histograma de Velocidade do Vento em m/s no eixo horizontal e a sua probabilidade em % no eixo vertical da localidade em estudo.

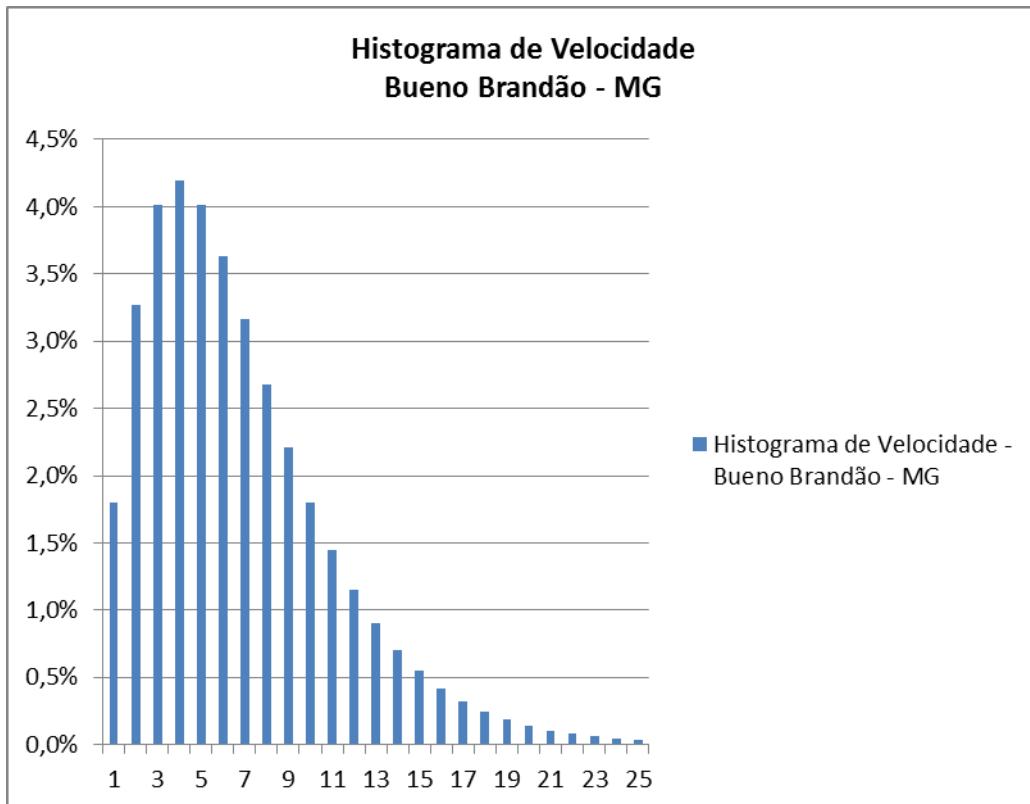


Figura 27 - Histograma da Velocidade do Vento em Bueno Brandão – MG

Com o cálculo da energia diária gerada pelo aerogerador de 144,06 W por dia é possível calcular a energia produzida anualmente como apresentado na tabela 31.

Tabela 31 - Cálculo da energia produzida anualmente.

EG (ano)	848 kWh
EP (ano)	1.010 kWh
Pn (ano)	4380 kWh
FC	19%
Fator de Disponibilidade	80%
Fator de Perda da Instalação Eólica	16%

onde:

EP é a energia produzida no ano todo. Esse valor é obtido pelo produto entre $F_r(\%)P(w)$ de 144,06, o Fator de Disponibilidade da Planta, de 80% e a quantidade

de horas que há em uma ano, ou seja 8769 horas, obtendo assim o valor de 1010 kWh de energia produzida anualmente pela planta proposta conforme equação 13.

EG é a energia gerada pela planta. Esse valor é obtido pelo produto entre EP e $(1 - \text{Fator de Perda da Instalação Eólica})$, ou seja, $1 - 0,05 = 0,95$ obtendo assim o valor de 848 kWh de energia gerada anualmente pela planta proposta conforme equação 14.

P_n é a potência nominal do aerogerador em questão que é calculado multiplicando a potência, apresentado na tabela 28 de 500 W, pelo tempo total em horas do ano, ou seja, 8760 horas, portanto sem perdas e indisponibilidade do aerogerador e seu sistema.

O Fator de Disponibilidade é a porcentagem do tempo que a planta estará apta a gerar, ou seja, conforme considerado que 90% do tempo ela estará em disponibilidade para a geração, já os 10% do tempo restante, considera que estará em manutenção preventiva, conforme Tabela 31.

O Fator de Perda da instalação eólica é a porcentagem de energia perdida no transporte de conversão da energia, apresentada na tabela 31, como sendo de 5%.

A planta proposta produzirá um período de um ano 848 kWh.

5.3.2 Custo da instalação

Por meio da especificação, do aerogerador, do inversor, da medida estimada de cabos do ponto de consumo até o aerogerador, lista-se na tabela 32 o quantitativo de componentes para possibilitar a instalação do sistema eólico proposto.

A consulta sobre os valores praticados de materiais e serviços foram feitos à uma empresa especializada no sistema localizado na cidade de São Paulo/SP, a Energia Pura.

Tabela 32 - Orçamento dos Materiais para a geração eólica. Fonte: Consulta: Energia Pura. Abril/2015.

	Qtd	Preço Unt.	Preço Total
Cabos Elétricos	550 m	R\$ 3,45	R\$ 1.897,50
Conectores e Terminais	2	R\$ 45,00	R\$ 85,50
Estruturas e Suporte	2	R\$ 112,00	R\$ 212,80
Geador Eólico	1	R\$ 2.250,00	R\$ 2.250,00
Inversor	1	R\$ 490,00	R\$ 490,00
Total			R\$ 4.935,80

Apresentam-se na tabela 33 os preços médios para o serviço de implantação do sistema do porte ao aqui proposto e a conexão à rede.

Tabela 33 - Serviços envolvidos para implantação do aerogerador. Fonte: Consulta: Energia Pura. Abril/2015.

Serviço	Preço
Instalação	R\$ 880,00
Start-up	R\$ 680,00
Documentação	R\$ 205,00
Garantia	R\$ 900,00
Total	R\$ 3.655,00

Assim ao custo total de R\$8.590,00 para implantação da planta eólica obtemos complementar obtemos a geração média anual de 848 kWh.

6 ANÁLISE DOS DADOS

Após os dados acima obtidos foi feita a análise energética do conjunto híbrido proposto de forma a avaliar a viabilidade do projeto em questão, se é viável total ou parcialmente.

Primeiro foi necessário saber qual a tarifa de energia cobrada pela concessionária local. Segundo consulta da conta de energia elétrica da residência em estudo a tarifa de energia é cobrada conforme a tabela 34 apresentada abaixo.

Tabela 34 - Tarifa de energia Grupo B Rural Monofásico. Fonte: Concessionária Energisa SA.

Energisa Minas Gerais .SA. (www.energisa.com.br)
Monofásico Rural - 3 Fios
Tarifa de Energisa (Sem Impostos) (R\$/kWh)
R\$ 0,49001
PIS/COFINS
3,65%
ICMS
30,00%
Tarifa de Energisa (Com Impostos) (R\$/kWh)
R\$ 0,74

Com base na quantidade de energia gerada por cada sistema, solares e eólico, podemos avaliar o passo a passo para cada fonte de geração de modo a perceber a contribuição de cada um individualmente para a planta híbrida.

O primeiro item avaliado foi o sistema solar térmico que conforme cálculos já demonstrados gerou uma economia de 985,5 Kwh ano, ou seja, retirou a carga do chuveiro elétrico da rede de consumo.

Este valor de energia resultante de 936,2 kWh, ou seja, 50% do total de 1860 kWh gerou um plano de economia anual de R\$738,00 considerando a tarifa de energia elétrica local de R\$0,74, como apresentado na tabela 35 abaixo.

Tabela 35 - Balanço de Energia Planta Solar Térmica

Solar Térmico	Chuveiro Elétrico	Solar Térmico
Consumo de Energia Elétrica Anual	985,5 kWh	49,3 kWh
Economia de Energia Energia Elétrica Anual	-	936,2 kWh
Economia com Solar Térmico	-	R\$ 728

O passo seguinte deste plano foi equacionar a contribuição da geração fotovoltaica ao sistema.

O sistema fotovoltaico, assim como apresentado na sessão anterior, proporcionou uma geração fotovoltaica de 656 kWh/ano com o uso dos 3 painéis solares dimensionados. Este por sua vez colaborou com uma economia anual de 48% no consumo de energia e consequentemente 35% no montante gasto no

pagamento da conta de energia elétrica de R\$484,00 considerando a tarifa de R\$0,74 como apresentado na tabela 36.

Tabela 36 - Balanço de energia fotovoltaica

Geração Fotovoltaica	Convencional	Fotovoltaica
Capacidade de Geração Solar Anual	-	656 kWh
Economia com Geração Fotovoltaica		R\$ 484

Na sequência desta etapa, tratou-se do equacionamento da geração eólica, que através do aerogerador de pequeno porte dimensionado trouxe uma componente de 848 kWh ano à planta híbrida proposta e uma economia de R\$626,00.

A planta eólica, conforme tabela 37 abaixo, proporcionou uma redução de 46% no consumo de energia elétrica global da residência em comparação com o convencional.

Tabela 37 - Balanço de energia eólica

Geração Eólica	Convencional	Eólica
Capacidade de Geração Eólica Anual	-	848 kWh
Economia com Geração Eólica		R\$ 626

Em uma análise mais global da planta, uma vez que estará conectada à rede e os subsistemas acima contribuirão de forma conjunta para suprir a carga da residência é apresentado o balanço energético final através da tabela 38.

Tabela 38 - Balanço energético comparativo

Utilidades	Convencional	Híbrido
Demandá Energia Elétrica Ponta (KWh / mês)	175,0 kWh	50,0 kWh
Consumo Anual Total (ano)	1.860 kWh	-580 kWh
Custo Específico (R\$/KWh)	R\$ 0,74	R\$ 0,74
Custo anual total de energia elétrica	R\$ 1.373,64	- R\$ 428

O balanço apresentado acima exibe a demanda convencional contratada de 175 kWh (mês) e estabelece um consumo médio anual de 1860 kWh, assim o gasto anual com a energia elétrica é de R\$1.373,64.

O Sistema híbrido planejado produz um total estimado de 2.440 kWh/ano, ou seja, 580 kWh/ano médios injetados adicionalmente à rede gerando um crédito de R\$428,00 (sinal negativo: convencionado nesta base de cálculo como crédito ao microgerador).

Importante salientar que como conforme prevê a legislação vigente, deverá ser pago a concessionária o valor mensal de 50 kWh devido a disponibilidade da conexão da residência à rede. Este número não foi incluído na avaliação energética, mas será apresentado na análise do plano financeiro, uma vez que para geração líquida positiva da planta não se prevê o uso da energia da rede para consumo da carga em questão. Estes 50 kWh mensais geram um débito anual ao microgerador de R\$443,00 (R\$37,00 por mês).

A legislação atual prevê ainda que o valor em reais da energia líquida injetada na rede não pode ser revertida ao microgerador em crédito em moeda corrente, mas sim manter em crédito de energia à este durante os próximos 36 meses ou então utilizar para abater o consumo em kWh de outra entidade consumidora de mesmo registro (mesmo CPF) do microgerador.

A tabela 39 abaixo apresenta o resultado do custo anual entre o sistema convencional e a economia com a implantação do sistema híbrido.

Tabela 39 - Comparativo do custo e retorno anual de ambos os modelos, o convencional e o híbrido.

Balanço Geral	Convencional	Híbrido
Custo Anual Total	R\$ 1373,64	R\$ 443
Economia Anual Total	R\$ 0,00	R\$ 1.824

Sob outra análise é possível avaliar o custo do investimento e de maneira rápida o tempo de retorno do investimento da planta considerando os descontos anuais na conta de energia elétrica. A tabela 40 exibe a soma de um investimento total de R\$25.588,00.

Tabela 40 - Valor total do investimento de tempo de retorno (payback simples)

Investimentos	Convencional	Híbrido
Solar Término	-	R\$ 6.702
Geração Eólica	-	R\$ 8.591
Geração Fotovoltaica	-	R\$ 9.395
Custos com a Manutenção do Sistema Híbrido (Ano)	-	R\$ 900
INVESTIMENTO TOTAL	-	R\$ 25.588
PAYBACK SIMPLES (anos)	-	14,0

A tabela acima mostra um payback simples de 14 anos, isto é, o tempo decorrido entre o investimento inicial e o momento no qual o lucro líquido acumulado se iguala ao valor desse investimento. Isto mostra certo grau de liquidez do projeto e demonstra que o projeto possui um bom tempo de retorno face ao tempo de vida útil dos componentes da planta como, inversor, painel fotovoltaico e coletor solar que são de 20 a 25 anos.

Os custos anuais com a manutenção foi considerado como base a limpeza dos coletores térmicos solares, fotovoltaicos bem como a limpeza e lubrificação dos aerogerador; preço estimado para manutenção preventiva.

A análise global energética exibida em forma de cálculo nas sessões anteriores é apresentada no gráfico da figura 28 abaixo.

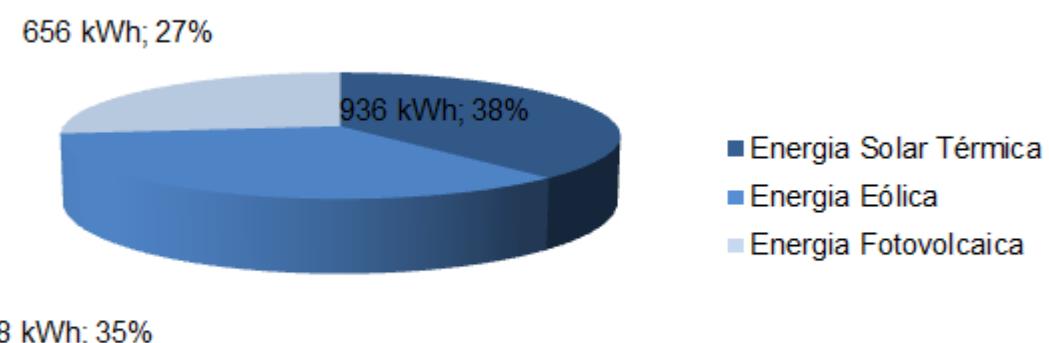


Figura 28 - Comparativo energético entre as fontes e sua contribuição

A figura acima apresenta que a média de 19% da energia da planta é utilizada pelo chuveiro elétrico convencional e pode ser substituída pelo sistema térmico solar.

Já o gráfico da figura 29 exibe um comparativo no valor investido por fonte e sua porcentagem sobre o montante do investimento.

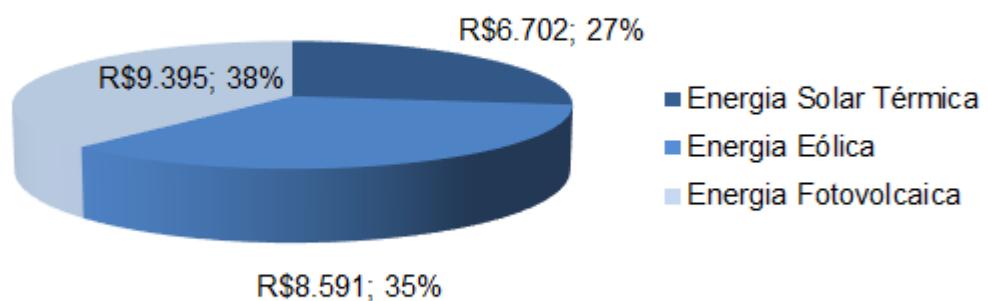


Figura 29 - Comparativo de investimento entre as fontes

Em um segundo plano é assim importante avaliar a relação custo versus energia gerada conforme apresentado no gráfico da figura 30 abaixo.

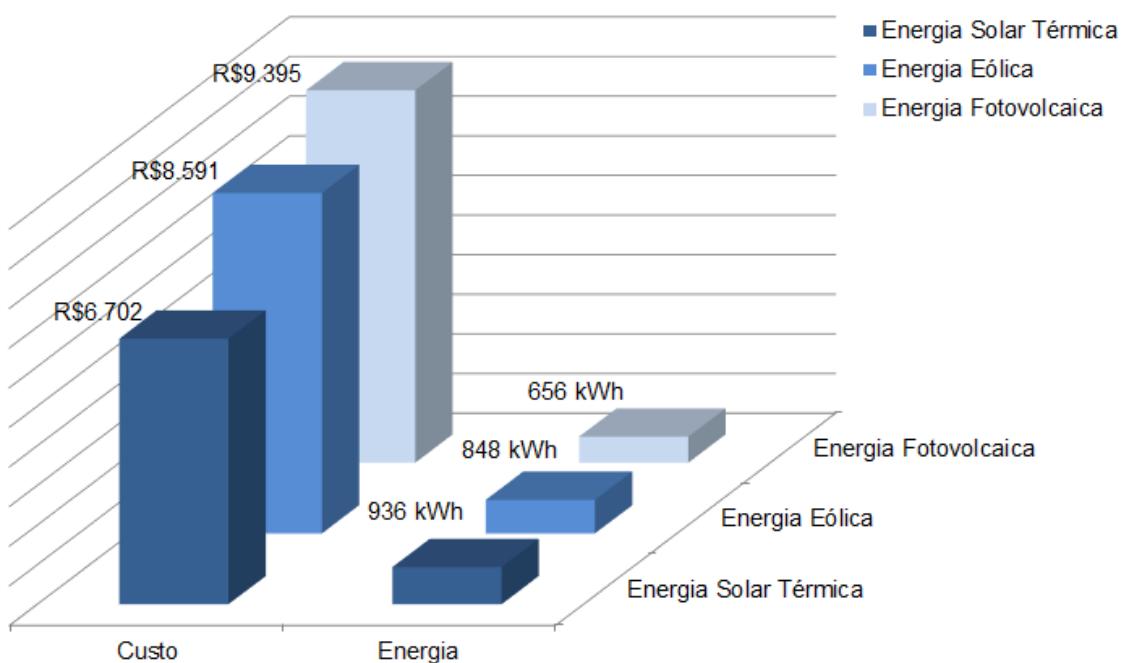


Figura 30 - Relação Custo versus energia gerada

Da relação apresentada acima é possível avaliar que a geração eólica teve importante contribuição em suprir a demanda final de energia, aquela não suprida pela geração fotovoltaica, e ainda assim um custo inferior de implantação frente a esta última.

Em comparação aos dois cenários, o convencional e ao híbrido proposto, o gráfico da Figura 31 apresenta uma economia global de energia em crédito líquido à rede de 580 KWh ano.

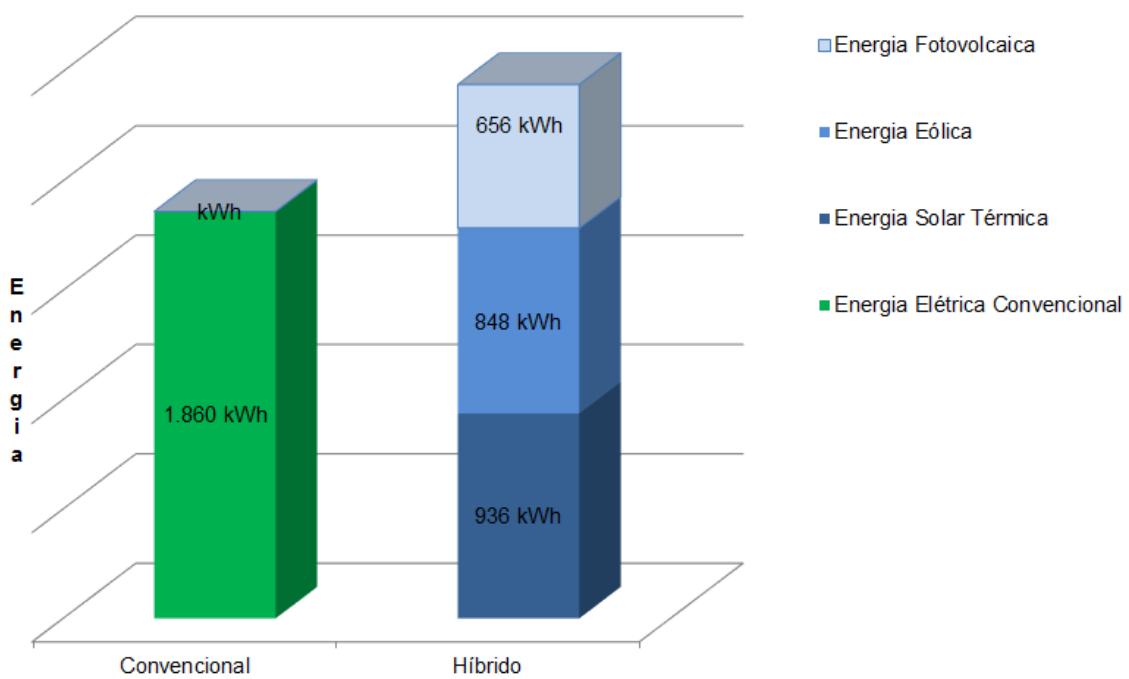


Figura 31 - Comparativo de energia gerada pela planta híbrida versus o convencional

Da mesma maneira é possível observar a representação gráfica, figura 32, do valor de R\$428,00 anuais de economia financeira da planta híbrida, ou seja, para além de suprir toda a demanda de aproximadamente R\$1.373,64 em energia anual da residência ela ainda gera um crédito de R\$428,00, conforme a legislação permite.

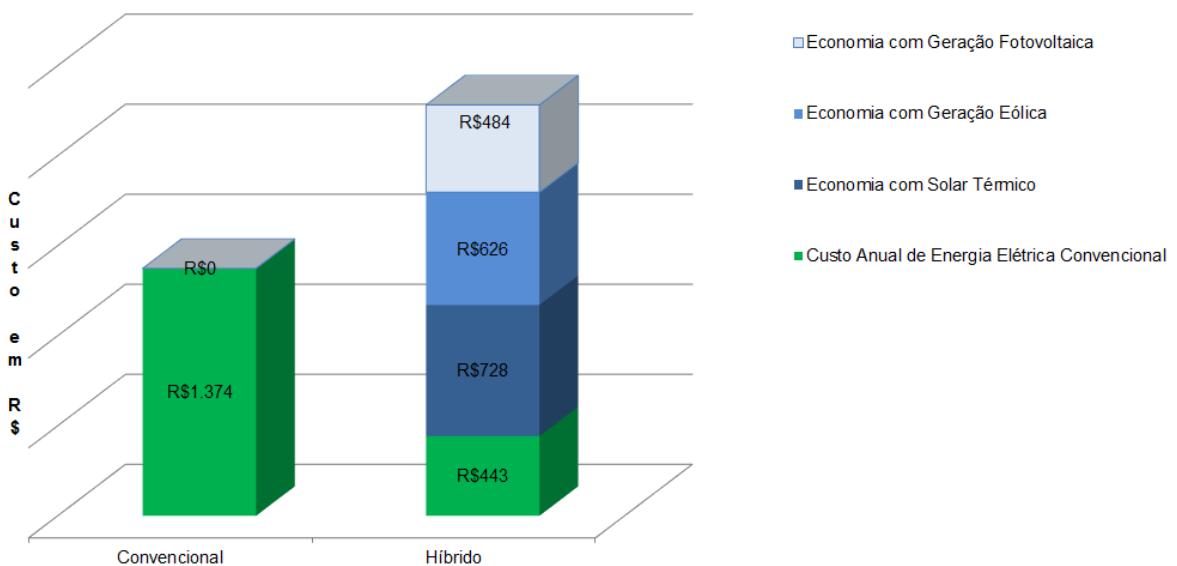


Figura 32 - Relação da economia gerada pela planta híbrida versus o convencional

Uma vez estimado o valor investimento total da planta e sua receita anual foi possível avaliar o valor presente líquido utilizando a taxa de desconto de 4%. O valor presente líquido (VPL) dos R\$25.588,00 investidos inicialmente em 25 anos de projeto, resulta em valor investido de pouco mais de R\$2904,00.

Tabela 41 - Dados para análise financeira do projeto

Investimento Inicial	-R\$ 25.588	llo
Fluxo de Caixa	R\$ 1.824	FLC
Taxa de desconto	4%	r
Período (anos)	25	n

Outro método de avaliar se o empreendimento tem possibilidade de bons retornos, baixo risco e satisfatório grau de fluidez do montante investido é calcular sua TIR (taxa interna de retorno), isto é quanto maior seu valor em % melhor sua taxa, ou seja, conforme apresentado na tabela 41 abaixo, tem-se o TIR e o VPL explicado anteriormente acima.

Tabela 42 - Payback descontado, VPL e TIR do empreendimento

Payback simples	14,03 anos
Payback Descontado	20,96 anos
VPL	R\$ 2.904
TIR	5,0%

O método do *payback simples* é dividir o valor total do investimento, R\$25.588,00 pelo valor do fluxo de caixa anual, R\$1.824,00 obtendo assim os 14 anos de retorno.

O método do *payback descontado* é obtido por meio da análise do fluxo de caixa. Neste é necessário saber qual ano o empreendimento se paga, ou seja, passa a ter fluxo de caixa positivo. A análise do fluxo de caixa acumulado apresentado no gráfico da figura 33 mostra que o projeto se paga no 21º ano após sua implantação.

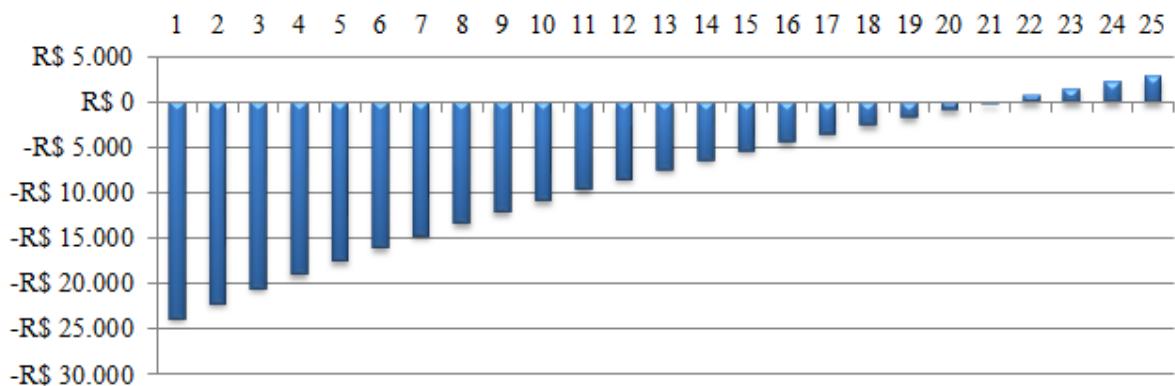


Figura 33 - Fluxo de caixa do empreendimento

O gráfico acima apresenta que no primeiro ano o microgerador faz um desembolso de aproximadamente R\$25.588,00 e conforme este economiza anualmente com a conta de energia, este montante investido vai sendo abatido ao longo dos anos até que no 21º ano a planta para a gerar caixa positivo ao microgerador.

A tabela 42 abaixo apresenta os valores anuais de cada parcela anual, considerando as taxas de desconto (coluna FCD, Fluxo de caixa descontando os juros 4% ao ano) e a parcela anual da dívida a ser abatida até o 22º em que passa a ser positiva.

Tabela 43 - Parcelas anuais de abatimento do investimento inicial

Ano	FLC	FCD	FCA
0	-R\$ 25.588	-R\$ 25.588	-R\$ 25.588
1	R\$ 1.824	R\$ 1.754	-R\$ 23.834
2	R\$ 1.824	R\$ 1.686	-R\$ 22.148
3	R\$ 1.824	R\$ 1.621	-R\$ 20.527
4	R\$ 1.824	R\$ 1.559	-R\$ 18.968
5	R\$ 1.824	R\$ 1.499	-R\$ 17.469
6	R\$ 1.824	R\$ 1.441	-R\$ 16.027
7	R\$ 1.824	R\$ 1.386	-R\$ 14.641
8	R\$ 1.824	R\$ 1.333	-R\$ 13.309
9	R\$ 1.824	R\$ 1.281	-R\$ 12.027
10	R\$ 1.824	R\$ 1.232	-R\$ 10.795
11	R\$ 1.824	R\$ 1.185	-R\$ 9.611
12	R\$ 1.824	R\$ 1.139	-R\$ 8.471
13	R\$ 1.824	R\$ 1.095	-R\$ 7.376
14	R\$ 1.824	R\$ 1.053	-R\$ 6.323
15	R\$ 1.824	R\$ 1.013	-R\$ 5.310
16	R\$ 1.824	R\$ 974	-R\$ 4.337
17	R\$ 1.824	R\$ 936	-R\$ 3.400
18	R\$ 1.824	R\$ 900	-R\$ 2.500
19	R\$ 1.824	R\$ 866	-R\$ 1.634
20	R\$ 1.824	R\$ 832	-R\$ 802
21	R\$ 1.824	R\$ 800	-R\$ 2
22	R\$ 1.824	R\$ 770	R\$ 768
23	R\$ 1.824	R\$ 740	R\$ 1.508
24	R\$ 1.824	R\$ 712	R\$ 2.219
25	R\$ 1.824	R\$ 684	R\$ 2.904

É importante considerar que o balanço energético levou em consideração a complementariedade das fontes de energia, solar e eólica para que pudesse obter rendimentos favoráveis dentro dos 25 anos esperados.

Os créditos irão aparecer somente quando o sistema gerar mais energia do que a consumida no mês, conforme previsto na resolução normativa 482/2012 da ANEEL.

De forma geral este trabalho propôs o desenvolvimento de um modelo prático para dimensionamento de sistemas híbrido em residenciais rurais conectadas à rede, a partir dos recursos naturais renováveis existentes no local, como radiação solar e velocidade do vento. Os dispositivos de conversão energética foram dimensionados considerando uma combinação entre os recursos energéticos disponíveis e as cargas a serem supridas ao longo do ano.

As necessidades energéticas consideradas para a propriedade rural típica foram a de energia para aquecimento de água e energia para produção de eletricidade. Os dispositivos de conversão energética utilizados foram os painéis fotovoltaicos, geradores eólicos e coletores solares.

Na revisão bibliográfica realizada foram encontrados diversos modelos desenvolvidos para o dimensionamento de sistemas híbridos, sejam métodos determinísticos e probabilísticos. Os métodos aqui utilizados procuraram basear-se em seus valores médios. Essas particularidades resultaram no desenvolvimento de um modelo prático que contempla as necessidades do empreendimento de forma rápida.

Todos os custos envolvidos no dimensionamento do sistema são convertidos a valor presente - custos de aquisição dos equipamentos, instalação, e manutenção - permitindo ao modelo a realização de uma análise econômica rápida comparativa com o sistema convencional.

7 CONCLUSÃO

A partir do modelo apresentado, algumas análises foram realizadas visando o uso conjunto da geração eólica e a geração fotovoltaica para suprir a carga da residência. Tais análises permitiram avaliar que melhor composição foi apresentada, ou seja, a geração fotovoltaica utilizada para suprir 75% da demanda da residência. O trabalho apresentou algumas vantagens significativas, já que incorpora e integra conceitos bastante relevantes para o dimensionamento prático do sistema híbrido e

pôde demonstrar que a planta híbrida supriu a consumo da residência e ainda gerou um crédito positivo anual à rede elétrica de 580kWh.

Pode-se considerar que incorporação prática do modelo para representar as variáveis médias das fontes energéticas (radiação solar e velocidade do vento) contribuíram para visualizar os déficits energéticos ao longo do ano, conforme sazonalidade local; flexibilidade para variação de parâmetros do projeto e assim possibilitando análise mais precisa do estudo. A incorporação de todos os possíveis parâmetros econômicos associados ao dimensionamento, inclusive dados referentes a prazos de retorno e taxas de desconto, facilitaram o entendimento do quanto importante é valorar o empreendimento bem como a taxa de retorno e em quanto tempo o sistema propõe se pagar.

Foram apresentados gráficos e tabelas referentes ao balanço energético calculado de forma a esclarecer as parcelas de contribuição de cada fonte do sistema híbrido. Estes puderam apresentar que a planta gerou uma economia anual de 68% ou seja, o microgerador desembolsará anualmente apenas R\$443,00 para pagar a disponibilidade da rede, mais o custo de manutenção preventiva da planta.

Segundo a análise dos dados apresentados as vantagens do sistema híbrido utilizado são relativas à intercambiabilidade do sistema de conexão à rede provida pelos avanços tecnológicos, facilitando o seu emprego para os que pretendem fazer uso da microgeração. Outro ponto a citar é a facilidade de encontrar fornecedores no mercado nacional que detenham a tecnologia dos produtos bem como sua engenharia e emprego para consulta técnica e orçamentária mostrando que há interesse no ramo, facilitado pelas recentes conquistas legislativas a respeito, apesar de estar ainda a quem de países da Europa os quais possuem cláusulas facilitadoras ao emprego da microgeração de baixa tensão.

O uso de dados da localidade em estudo junto com os dos equipamentos e serviços encontrados no mercado nacional mostraram que o empreendimento é factível de implementação em termos energéticos e financeiros para o intervalo de tempo proposto. O estudo mostrou que o sistema que o sistema híbrido é vantajoso

e o tempo de 21 anos para retorno do investimento é razoável face à vida útil dos componentes são similares a este período.

Assim, é importante citar que o uso da microgeração híbrida, as quais estão ligadas ao custo de implantação do projeto e ao seu tempo de amortização, necessitam de aprimoramento visto que é um mercado novo, porém com o desenvolvimento da curva de aprendizado; a tendência natural é a diminuição de custos devida melhoria da tecnologia e também a melhoria na legislação a qual possa compensar o microgerador a uma taxa de crédito à energia líquida injetada à rede.

O estudo baseou-se em um referencial teórico cujos conceitos apresentados têm origem, principalmente, na engenharia econômica e financeira. A análise do estudo de caso proposto foi possível após o desenvolvimento de um modelo financeiro representativo do projeto híbrido em questão.

Somando-se a economia anual das três fontes temos um crédito anual de R\$1838,00, subtraindo este valor pelo débito anual da concessionária pela disponibilidade da rede no valor de R\$443,00 tem-se um saldo positivo de R\$1354,00 anual. Considerando que o consumo de energia elétrica convencional é de R\$1373,64 aproximadamente, percebe-se que a planta possui um razoável grau de sustentabilidade, ou seja, 98% do dinheiro gasto com o consumo médio convencional podem ser supridos pela planta híbrida proposta.

Assim, em termos gerais a planta apesar de possuir um considerável valor de investimento inicial, mostrou ser vantajosa vista à economia anual financeira para pagar o investimento, de possibilitar a geração de crédito à rede elétrica o que possibilita o uso deste saldo em outra residência do mesmo microgerador, e por fim a possibilidade de expansão no consumo da residência visto a produção ser 580 KWh superior à demanda anual.

De forma complementar, é possível sugerir novas frentes de estudo para trabalhos futuros como, considerar, na modelagem de sistemas fotovoltaicos, a

utilização de sistemas de rastreamento do sol, que, embora mais caros, podem apresentar maior eficiência no aproveitamento da radiação solar incidente. Outro item importante é incorporar um modelo de falha dos equipamentos, tendo em vista que as análises apresentadas aqui consideraram que os equipamentos são 100% disponíveis (confiáveis).

Além disso, adotar cenários de crescimento de carga, com a possibilidade de acrescentar novos equipamentos de geração ao longo do tempo (expansão dinâmica da geração) e analisar demais itens da legislação vigente quanto à conexão e os danos à rede de energia elétrica e irregularidades no pós-conexão.

A análise do impacto ambiental positivo e do apelo positivo no marketing da localidade também pode ser um importante meio de análise para futuros projetos deste seguimento de microgeração híbrida conectada à rede.

8 REFERÊNCIAS

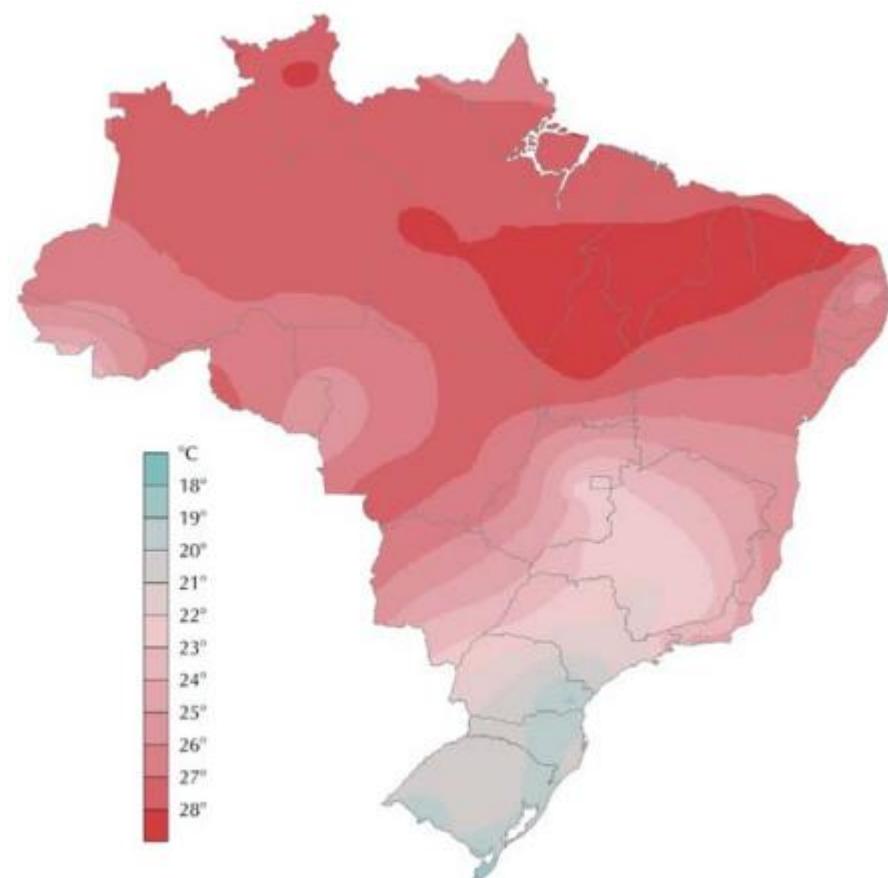
- [1] RAMAKUMAR, R. Energizing Rural Areas of Developing Countries Using IRES. Energy Conversion Engineering Conference. Proceeding of the 31 St Intersociety, v.3, p.536-1541, 1996.
- [2] MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. Situação e Perspectivas das Novas Fontes de Energia Renovável no Brasil – Histórico Recente das Renováveis. Relatório elaborado para o MCT, dentro do projeto BRA/95/G31, sob o contrato no 99/117, com o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento – PNUD, 2000.
- [3] FORO PERMANENTE DE ENERGIAS RENOVÁVEIS. Ações para o Desenvolvimento das Energias Renováveis no Brasil. In: O Estado das Energias Renováveis no Brasil. IV Encontro. Recife, 6 a 9 de outubro de 1998.
- [4] TOLMASQUIM, M.T; TIAGO FILHO, G. L. Pequenas Centrais Hidroelétricas. In: Fontes Renováveis de Energia no Brasil. Rio de Janeiro: Editora Interciênciencia: CENERGIA, 2003. p. 163-206.
- [5] EPE. Projeções de Demanda de Energia Elétrica nos próximos 10 anos – PDE 2014-2023. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>. Acesso em 04/04/2014.
- [6] EPE. Resenha Mensal do Mercado de Energia Elétrica – Fevereiro de 2015. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>. Acesso em 05/04/2015.

- [7] ANEEL. Atlas Energia Elétrica do Brasil – 3º Edição. Disponível em: <www.aneel.gov.br>. Acesso em 06/04/2015.
- [8] ANEEL. Resolução Normativa ANEEL nº482. Disponível em: <www.aneel.gov.br>. Acesso em 07/04/2015.
- [9] ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição. Disponível em: <www.aneel.gov.br>. Acesso em 07/04/2015.
- [10] NBR 15569: 2008- Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto-Projeto e Instalação.
- [11] BECKMAN, W. A., KLEIN S. A. and DUFFIE, J. A., Wiley-Interscience, New York (1997).
- [12] ANEEL. Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. Brasília, 2003. Disponível em: <www.aneel.gov.br>. Acesso em 11/04/2015.
- [13] CBEE-Centro Brasileiro de Energia Eólica.
http://www.eolica.com.br/index_por.html. Acessado em 12/04/2007.
- [14] ROHATGI, J. S. e NELSON, V. (1994). Wind Characteristics – An Analysis for the Generation of Wind Power. Alternative Energy Institute, West Texas A&M University.
- [15] MACÊDO, W. N. (2002). Estudo de Sistemas de Geração de Eletricidade Utilizando a Energias Solar Fotovoltaica e Eólica. Dissertação de Mestrado. Belém: UFPA.
- [16] IMAMURA, M. S., HELM, P., PALZ, W. “Photovoltaic System Technology - An European Handbook”, CEC, H. S. Stephens & Associates, 1992.
- [17] Florida Solar Energy Center, “Photovoltaic System Design - Course Manual”, FSEC-GP-31-86, 1991.
- [18] ROSSI, O. D. “Rastreamento e Radiação Incidente em Sistemas de Conversão da Energia Solar”, Tese de Mestrado, COPPE / UFRJ, 1985
- [19] BARZOLLA, A. C “Análise do Aquecimento Solar de Água por Sistema a Termosifão”, Tese de Mestrado, COPPE / UFRJ, 1992
- [20] MAYCOCK, P. D. Photovoltaics: Sunlight to Electricity in One Step. Andover: Brick House. 222 p. 1981.

- [21] PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS: RESEARCH AND APPLICATIONS. Short Communication: Solar Cell Efficiency Tables (Version 32). Jun, 2008.
- [22] VILLALVA M. G. & GAZOLI J. R., 2012 Energia Solar Fotovoltaica: conceitos e Aplicações, São Paulo, Érica, 2012, 224 p.
- [23] Coletânea de Artigos de Energias Solar e Eólica. Volumes 1 e 2. Hamilton Souza, Patrícia Silva e Ricardo Dutra (coordenadores). CRESESB 2003.
- [24] IVONI, C. Acunha Jr1 & ALMEIDA, Jorge A. 2 - Análise do desempenho de um aerogerador de pequeno - Porte FURG, Rio Grande, RS – 2006.
- [25] NUD. Norma de Distribuição Unificada Energisa – Maio 2015. Disponível em: <http://www.energisa.com.br/Documents/ndu/ndu013.pdf>

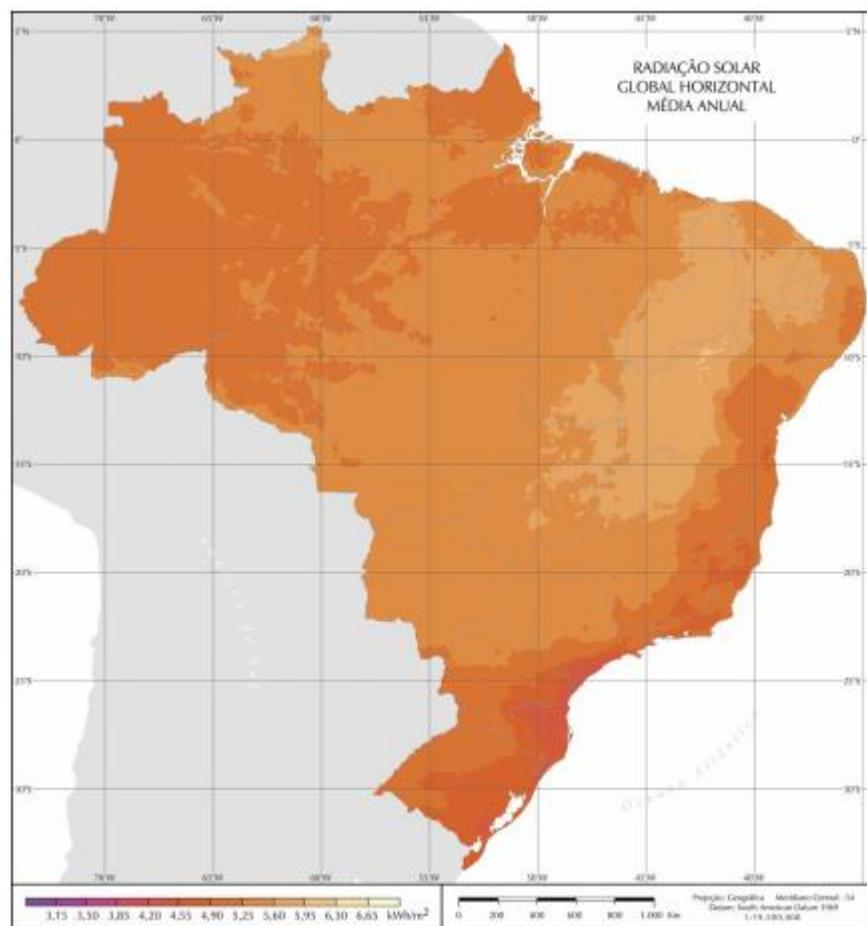
9 APÊNDICES

9.1 APÊNDICE A – MAPA DA MÉDIA ANUAL DE TEMPERATURA



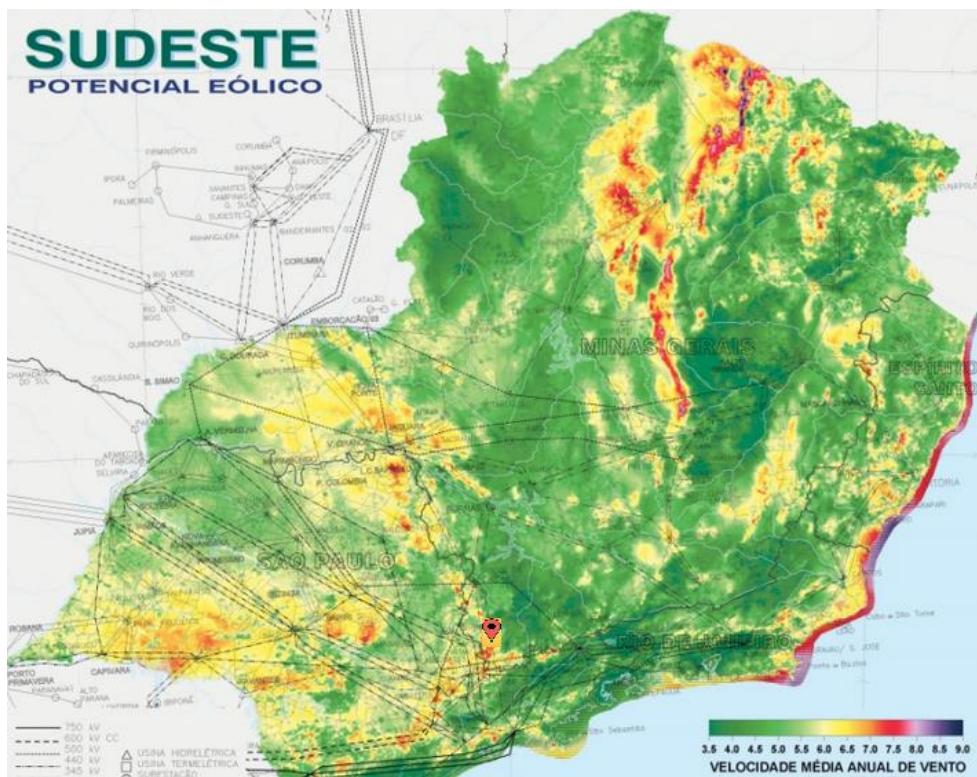
Fonte: Atlas brasileiro de energia solar, INPE: 2006.

9.2 APÊNDICE B – MAPA DA IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL.



Fonte: Atlas brasileiro de energia solar, INPE: 2006.

9.3 APÊNDICE C – MAPA DA VELOCIDADE MEDIAL ANUAL NA REGIÃO SUDESTE.



Fonte: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, CEPEL: 2001.