

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

NILO ALEJANDRO CARDOZO MUÑOZ

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE UM SISTEMA DE
GERAÇÃO DE ENERGIA ALTERNATIVA PARA UMA CASA DE
BOMBEAMENTO DE ESGOTO PLUVIAL**

PORTO ALEGRE

2015

NILO ALEJANDRO CARDOZO MUÑOZ

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE UM SISTEMA DE
GERAÇÃO DE ENERGIA ALTERNATIVA PARA UMA CASA DE
BOMBEAMENTO DE ESGOTO PLUVIAL**

Projeto de diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

ORIENTADOR: FAUSTO BASTOS LÍBANO

PORTO ALEGRE

2015

NILO ALEJANDRO CARDOZO MUÑOZ

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE UM SISTEMA DE
GERAÇÃO DE ENERGIA ALTERNATIVA PARA UMA CASA DE
BOMBEAMENTO DE ESGOTO PLUVIAL**

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Fausto Bastos Líbano, UFRGS

Chefe do Departamento: _____

Prof. Dr. Aly Ferreira Flores Filho, UFRGS

Aprovado em: ____/____/____

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Fausto Bastos Líbano, UFRGS
Doutor pela Universidade Politécnica de Madrid– Madrid, Espanha

Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne, UFRGS
Doutor pela Chalmers University of Technology– Göteborg, Suécia

Profa. Dra. Gladis Bordin, UFRGS
Doutora pela Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, Brasil

Porto Alegre, Dezembro de 2015.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo apoio incondicional em todos os momentos da minha jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Fausto Bastos Líbano e ao Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne pela atenção a mim dedicada neste período acadêmico.

Agradeço à minha namorada por toda a disposição que teve ao me ajudar a revisar este trabalho, e por todo o carinho que demonstra todos os dias.

Agradeço aos meus amigos, colegas de graduação e colegas de trabalho que me ajudaram durante este período.

Agradeço à Magmattec Tecnologia em Materiais Magnéticos Ltda por ter me acolhido durante o período de estágio, proporcionando totais condições para que este projeto pudesse ser realizado.

RESUMO

A expansão da matriz energética constitui uma necessidade urgente no Brasil. Neste sentido, as energias eólica e solar representam alternativas de grande potencial, devido aos bons mapas de capacidade de geração no país. Neste contexto, o presente projeto de diplomação constituiu-se em um estudo de caso específico, o qual tem como objetivo estudar a viabilidade técnica e econômica da implantação de um sistema de geração fotovoltaica para diminuir os custos com o consumo de energia em uma estação de bombeamento de esgoto pluvial. No desenvolvimento deste trabalho são estudados os temas de microgeração fotovoltaica como completo ao fornecimento de energia elétrica ao sistema conectados a rede de distribuição de energia comercial. Desta, forma, com base no histórico de consumo de energia da instalação, projetou-se um sistema que gera cerca de 25% da energia que a planta demanda. Essa limitação foi estabelecida pelo espaço físico de onde os módulos devem ser instalados. Utilizando o tempo de garantia de validade dos painéis como tempo de vida útil do investimento, foram calculados indicadores econômicos de viabilidade de investimento para dois cenários distintos: um conservador que utiliza o aumento médio da tarifa de energia elétrica e um segundo que engloba aumentos maiores que a média, como ocorreram no ano de realização deste estudo. Nas duas situações analisadas os estudos apontaram viabilidade econômica, com índices de atratividade maiores que a poupança. Porém o tempo de retorno foi relativamente alto não resultando em grande atratividade, comparável com os custos de energia atualmente ofertados pelo mercado.

Palavras chave: Engenharia Elétrica. Microgeração Fotovoltaica. Compensação Energética.

ABSTRACT

The energy matrix expansion is a urgent necessity of Brazil. In this context, the wind power and solar power represent options with big potential, due to its good potential maps. In this context, this paper is a case study, which has the objective of evaluating the technical and economical viability of the implementation of a photovoltaic generation system to decrease the energy expenses in a sewer pumping station. The subject of photovoltaic micro generation, as a way to enrich the power system connected to the commercial distribution system, was reviewed in the process of this paper. As such, based on the energy consumption history of the plant, a system that produces approximately 25 % of the energy that the plant consumes. This limitation was establish for the physical space that modules can be installed. Using the modules warranty time as a measure for the investment life extend, the project's economic viability was analyzed by economic indicators for two distinct sceneries: one for a conservative landscape that used the average energy tax raise and a a second landscape which includes bigger taxes raises then the average one. In both landscapes analyzed the results appoint to economic viability, with better incomes than a savings account. But the investment return time is fairly high, resulting in a low attractiveness, when compared with the energy cost used in energy sector.

Keywords: Electrical Engineering. Photovoltaic Micro generation. Energy Compensation.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparação do rendimento de diferentes células.....	25
Tabela 2: Parâmetros de Tensão.....	33
Tabela 3: Limites de distorção Harmônica de Corrente.....	35
Tabela 4: Limites de operação de FP para diferentes faixas de potência instalada.....	35
Tabela 5: Histórico de Consumo.....	39
Tabela 6: Base Comparação dos dados de radiação global média diária, com painéis inclinados em 30°, para Novo Hamburgo, em kWh/(m ² .dia).....	42
Tabela 7: Base Comparação dos dados de radiação global média diária, com painéis inclinados em 30°, para Porto Alegre, em kWh/(m ² .dia).....	42
Tabela 8: Especificações de Inversores.....	46
Tabela 9: Comparação Entre Arranjo e Inversor.....	46
Tabela 10: Eficiências Utilizadas na Estimativa da Geração de Energia Elétrica.....	48
Tabela 11: Valores obtidos utilizando as eficiências do sistema.....	50
Tabela 12: Definição dos Termos.....	51
Tabela 13: Informações do Parecer de Acesso.....	53
Tabela 14: Liberação para operação em teste.....	53
Tabela 15: Liberação para operação comercial.....	54
Tabela 16: Investimento Inicial.....	59
Tabela 17: Tempo de Retorno do Primeiro e Segundo Cenário.....	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Matriz de energia elétrica brasileira.....	13
Figura 2: Fluxo da radiação solar	18
Figura 3: Mapa de irradiação solar	19
Figura 4: Radiação solar média anual do Brasil	20
Figura 5: Efeito fotovoltaico.....	22
Figura 6: Representação painel fotovoltaico	26
Figura 7: Curva I x V e curva P x V típicas de um módulo fotovoltaico.....	27
Figura 8: Curvas características de I x V em diferentes temperaturas de operação.	27
Figura 9: Associação série.....	28
Figura 10: Associação paralelo	29
Figura 11: Associação mista.....	29
Figura 12: Sistema de microgeração fotovoltaico.	31
Figura 13: Curva de operação do sistema de geração distribuída em função da frequência da rede para desconexão por sobre/subfrequência.	34
Figura 14: Casa de bombas vista de satélite	36
Figura 15: Galpão da casa de bombas	38
Figura 16: Gráfico da probabilidade normal.	40
Figura 17: Tabela comercial de módulos fotovoltaicos.....	44
Figura 18: Orçamento para os módulos fotovoltaicos.....	45
Figura 19: Rendimento do Inversor em Função da Potência de Saída pela Potência Nominal.	47
Figura 20: Geração de energia estimada.....	49
Figura 21: Fluxograma etapas do processo de liberação de conexão.....	54
Figura 22: Diagrama Unifilar.	55
Figura 23: : Instalação com proteção mínima	57
Figura 24: Tempo de Payback Cenário A	62
Figura 25: Tempo de Payback do Segundo Cenário.	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BT	Baixa Tensão
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FER	Faturamento de Energia Reativa
FP	Fator de Potência
ICMS	Imposto sobre Mercadorias e Prestação de Serviços
IPI	Imposto sobre Produtos Industrializados
LABSOL	Laboratório de Energia Solar
MT	Média Tensão
RES	Resolução
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa de Atratividade Mínima
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
VPL	Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 MOTIVAÇÃO.....	13
1.2 JUSTIFICATIVA.....	15
1.3 OBJETIVO	16
1.4 ORGANIZAÇÃO.....	16
2 ENERGIA SOLAR.....	18
2.1 FONTE ENERGÉTICA PRIMÁRIA.....	18
2.2 EFEITO FOTOVOLTAICO	20
2.3 TIPOS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS.....	22
2.3.1 Células Fotovoltaicas de Silício Poli e Monocristalino	23
2.3.2 Células Fotovoltaicas de Película Fina	23
2.3.3 Células Fotovoltaicas Híbridas.....	24
2.3.4 Comparação do Rendimento das Diferentes Células Fotovoltaicas	24
2.4 SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE ELÉTRICA.....	25
2.4.1 Painel Fotovoltaico	25
2.4.2 Inversores	30
3 METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA	36
3.1 METODOLOGIA.....	36
3.2 ESTUDO DE CASO	37
3.3 HISTÓRICO DE RADIAÇÃO SOLAR	40
3.4 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA.....	41
3.4.1 Painéis Fotovoltaicos	43
3.4.2 Inversores	43
3.4.3 Energia Gerada pelo Sistema	45
4 PROJETO ELÉTRICO	51
4.1 CONEXÃO DE MICROGERAÇÃO DISTRIBUÍDA À REDE.....	51
4.2 ENVIO DA PROPOSTA DE CONEXÃO.....	52
4.3 DIAGRAMA UNIFILAR	55
4.4 REQUISITOS DE MEDIÇÃO.....	56
4.5 REQUISITOS DE PROTEÇÃO	56
4.6. ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA.....	58

4.6.1 VPL	59
4.6.2 TIR	61
4.6.3 Payback	61
4.6.4 Comparação dos Cenários	63
5 CONCLUSÃO.....	65
5.1 DISCUSSÃO	65
5.2 TRABALHOS FUTUROS	66
REFERÊNCIAS	67

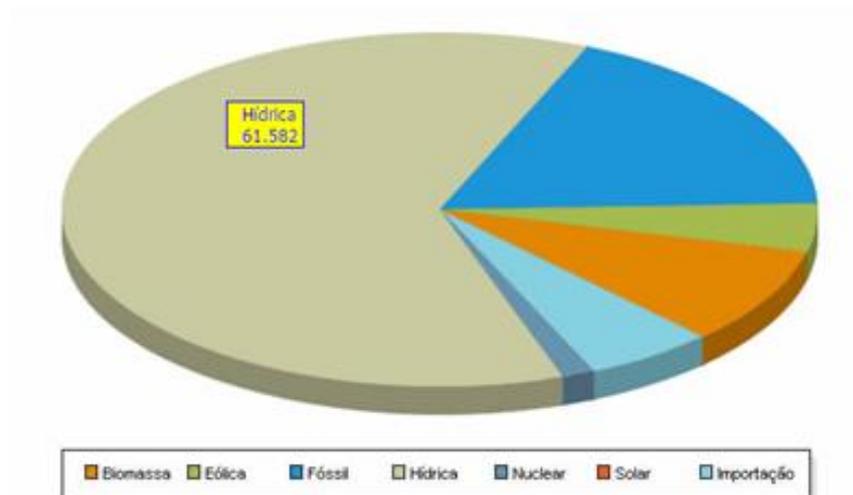
1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

Apesar de o Brasil ser um país rico em fontes de recursos energéticos, durante as últimas décadas, o país tem baseado sua matriz energética principalmente em suas fontes hídricas (EPE, 2015). Essa realidade, até recentemente, correspondia a um cenário de grande confiabilidade. Porém, a falta de planejamento para expansão da geração, aliada à escassez de chuvas e ao aumento do consumo de energia, têm alterado essa realidade' (TANCREDI, et al., 2013). Mesmo sendo previsto por diferentes relatórios que esse quadro viria a ocorrer, pouco foi feito para diversificar e expandir a matriz energética, adequando, desta maneira, o sistema de geração ao aumento da demanda.

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a geração hídrica corresponde a praticamente 61,6% da geração do país, como mostra a Figura 1. Analisando usinas hidroelétricas leiloadas de 2000 a 2012, tem-se um total de 42 empreendimentos, que foram construídos totalizando 28.834,74 MW de capacidade instalada. No entanto, apenas 10 dessas usinas possuem reservatórios, correspondendo a um total de 1.940,60 MW de capacidade instalada. Conseqüentemente, durante períodos de seca, a maioria desses novos empreendimentos não será capaz de produzir energia (TANCREDI, et al., 2013).

Figura 1: Matriz de energia elétrica brasileira



Fonte: Adaptado de (EPE, 2015).

Entre as outras fontes energéticas de forte confiabilidade, as termoelétricas nucleares são a opção mais barata (TANCREDI, et al., 2013). No entanto, esse tipo de geração enfrenta uma grande resistência da população, principalmente por medo dos riscos relacionados a acidentes e aos resíduos tóxicos que devem ser armazenados em depósitos especiais. Já as termoelétricas a gás natural, óleo diesel e óleo combustível são mais poluentes que as opções anteriores e apresentam custo elevado, chegando a três vezes o preço do kWh das termoelétricas nucleares (TANCREDI, et al., 2013).

Assim, surge como alternativa a utilização de outras fontes renováveis para geração de energia. No caso específico do Brasil, as energias eólica e solar representam alternativas de grande potencial, devido aos bons mapas de capacidade de geração (PEREIRA, et al., 2006). Atualmente, a energia eólica representa um total de 4,5% da geração do país, enquanto a solar corresponde a uma porcentagem muito menor (não sendo apresentada na Figura 1, pois corresponde a apenas 0,014% do total). Esses dois tipos de fontes têm por característica a dependência com relação a fenômenos climáticos. Ainda que esse fato lhes conceda uma menor confiabilidade em termos de previsão em curto prazo, é possível alcançar previsões satisfatórias ao longo de períodos maiores de tempo. Nesse sentido, é ainda importante lembrar que essas duas fontes energéticas podem ser consideradas complementares em questão dos picos de potência de geração, uma vez que a energia eólica tem picos durante a noite, enquanto a solar, durante as primeiras horas da tarde.

A geração de energia solar, no entanto, segue sendo cara e dependente de concessões do governo para ser competitiva no mercado. O investimento nesse tipo de geração envolve desafios econômicos associados ao alto custo de investimento em equipamentos (painéis fotovoltaicos, inversores e medidores bidirecionais) e à adequação do sistema elétrico de potência atual a essas novas tecnologias (TOLMASQUIM, 2012).

Mesmo assim, as perspectivas da geração solar são animadoras. No Leilão de Energia de Reserva de 2014, a energia solar disputou sozinha uma parte do leilão, resultando em um total de 889,6 MW de energia solar a um preço médio final de R\$ 215/MWh. Posteriormente, foi leiloada também a energia eólica um preço de R\$ 144/MWh para 769,1 MW instalados. O total de potência solar leiloada corresponde a uma capacidade muito significativa frente ao total desse tipo de energia atualmente instalada no Brasil. De acordo com o presidente da

Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o Engenheiro Mauricio Tiomno Tolmasquim, os leilões para energia solar sem competição com outras fontes seguirão ocorrendo anualmente.

Um advento que a energia eólica e a solar trazem é que elas não precisam ser produzidas em grandes usinas. Assim, a micro e minigeração distribuídas são uma realidade para esses tipos de geração, em especial para a energia solar, tendo em vista que, na grande maioria dos casos, a instalação de painéis é mais eficiente que a de pequenas turbinas. A possibilidade de utilizar pequenas unidades geradoras é um fator que favorece a inserção dessas fontes no mercado.

Levando em consideração o que foi discutido nos parágrafos anteriores, pode-se afirmar que esforços para aproveitar o potencial das energias eólica e solar devem ser utilizados no planejamento da otimização da matriz energética brasileira. Neste sentido, o governo, em 2012, por meio da ANEEL, com a Resolução 482, criou uma regulamentação que incentiva o desenvolvimento de micro e minigerações distribuídas por meio do sistema de compensação energética. Esse sistema visa transformar o consumidor final de energia, de apenas um simples consumidor de energia, como um potencial gerador para sua própria demanda. A Resolução 482 representa um passo importante para a alteração do cenário nacional atual de geração e distribuição de energia proveniente de fontes renováveis. Sendo assim, essa resolução justifica um estudo de caso como o que foi realizado no presente trabalho.

1.2 JUSTIFICATIVA

Por meio da empresa Magmattec, na qual foi realizado o estágio obrigatório, foi apresentado o caso de uma Casa de Bombas de um sistema de esgoto pluvial de um município da região da Grande Porto Alegre. Em períodos de chuvas intensas, nos quais o sistema de esgoto é incapaz de absorver toda a água das chuvas, o sistema aciona bombas que têm a função de succionar o excedente de água e despejar em um rio que corre próximo à cidade. Essas bombas possuem potência alta, o que acarreta em grandes gastos com o consumo de energia elétrica. Como essas bombas são acionadas poucas vezes ao ano, o engenheiro responsável pela unidade contatou a Magmattec, a fim de projetar um sistema de microgeração utilizando energia solar na tentativa de diminuir os gastos com o consumo de energia elétrica.

1.3 OBJETIVO

O objetivo principal do presente trabalho é analisar a viabilidade técnica e econômica da utilização de um sistema de geração alternativa, baseado em energia solar, para uma casa de bombeamento de esgoto pluvial.

Para essa finalidade, foram revisados os fundamentos da geração de energia fotovoltaica, e, posteriormente, é proposto um projeto de microgeração baseado nos requisitos impostos pela AES-Sul, que é a distribuidora de energia da região. Para os cálculos de viabilidade econômica, foram utilizados indicadores que servem para analisar se o investimento é viável ou não.

1.4 ORGANIZAÇÃO

O trabalho é dividido de forma que primeiro seja criada e consolidada a fundamentação teórica. A seguir, é estudada a instalação elétrica dos painéis solares, e uma vez calculada a potência que pode ser instalada, será calculado o tempo de retorno de investimento. Para isso, obtém-se a seguinte estrutura.

No Capítulo 2 serão revisados os conceitos teóricos da geração de energia baseada em células fotovoltaicas, estudando o seu princípio de funcionamento e as diferentes opções que o estado da arte com relação a essa tecnologia nos oferece.

No Capítulo 3 são apresentados os cálculos para o dimensionamento do sistema, obtendo a potência total que deverá ser instalada. Utilizando dados da irradiação solar incidente no local, será calculada a energia que se espera gerar com o sistema.

O Capítulo 4 trata da instalação do projeto elétrico da microgeração, principalmente no que diz respeito aos requisitos necessários para a conexão com a rede. A norma técnica da AES-Sul de Conexão de Minigeração e Microgeração Distribuída da AEL-Sul servirá como guia. Tendo todos os componentes do sistema escolhidos, será calculado o tempo de retorno do investimento, utilizando como referência os indicadores econômicos.

Finalizando, no Capítulo 5 serão expostas as principais conclusões atingidas a partir do trabalho realizado e dos resultados obtidos, juntamente com a proposta de cenários que melhorariam a viabilidade do projeto.

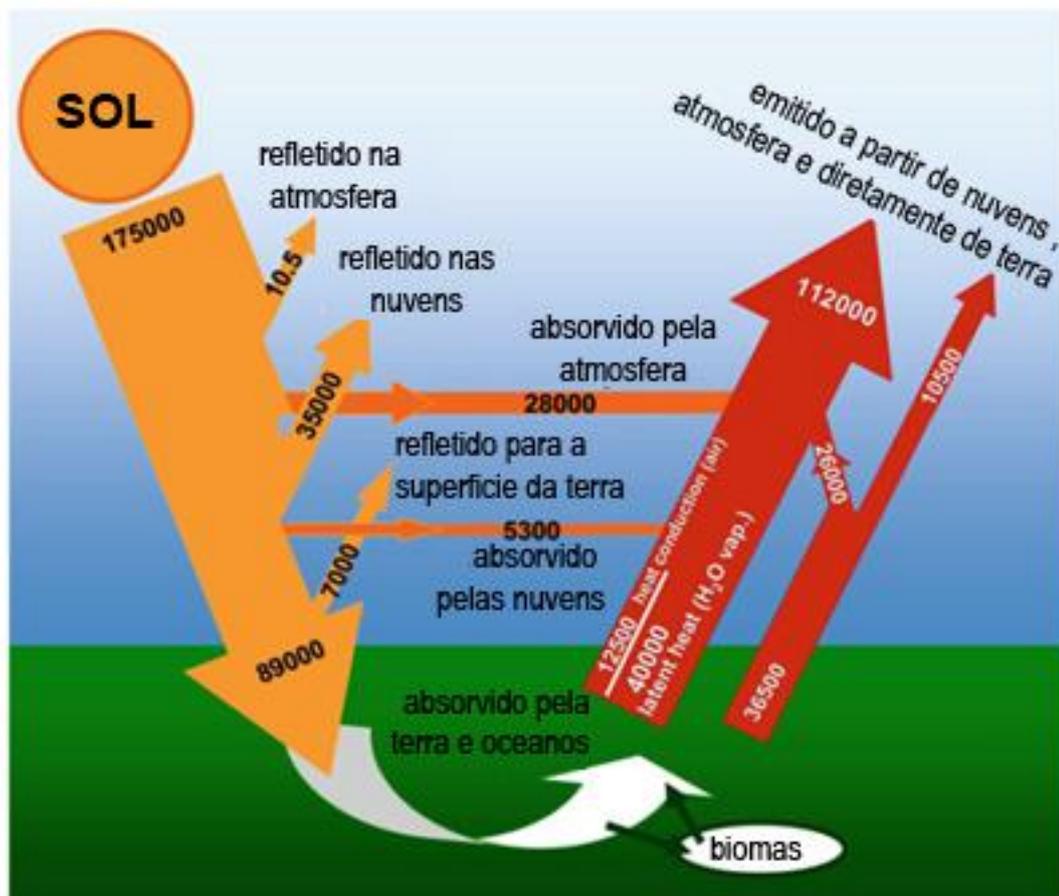
2 ENERGIA SOLAR

2.1 FONTE ENERGÉTICA PRIMÁRIA

A Terra recebe na atmosfera, ao redor do total do globo, em média 175000 TWh/ano de energia proveniente do sol. Isso corresponde a uma quantidade quatro vezes maior que o consumo de energia global, que corresponde a aproximadamente 15 TWh/ano (GOTTFRIED, 2015).

A radiação solar é levemente refletida e absorvida na atmosfera. O mesmo processo de absorção e reflexão acontece tanto nas nuvens quanto na superfície terrestre, como ilustrado na Figura 2.

Figura 2: Fluxo da radiação solar



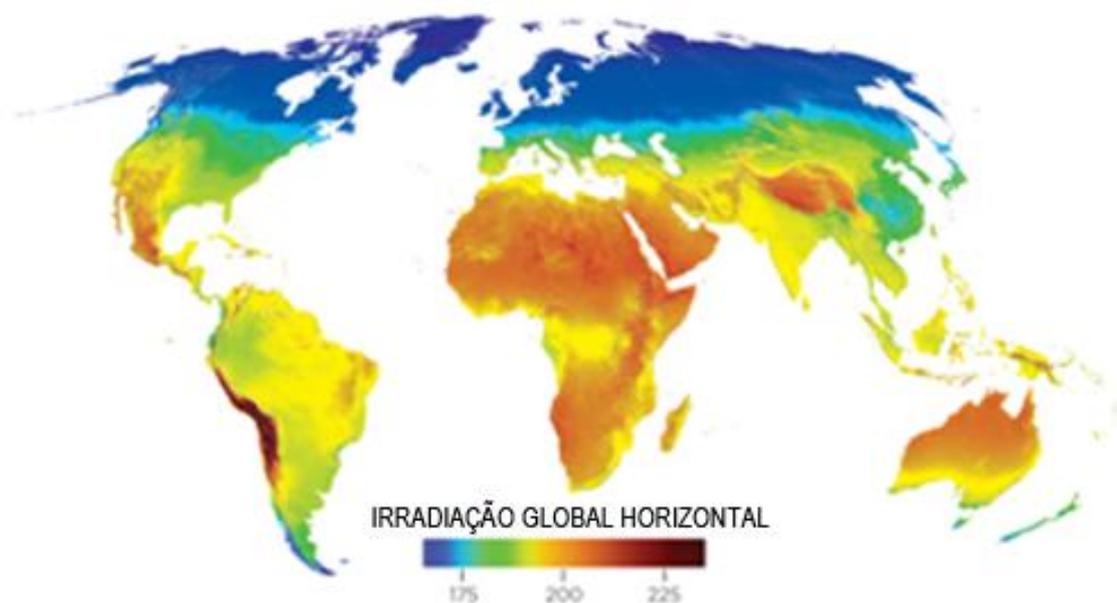
Fonte: Adaptado de GOTTFRIED, 2015.

Como pode ser observado na Figura 3, o valor da irradiação solar no Brasil é muito maior que a média da maioria dos países europeus, onde a exploração desse recurso já está

muito mais avançada, e estes também recebem bastante incentivo para implementação (TOLMASQUIM, 2012).

O Brasil é um país de grande extensão territorial, todavia, não possui grandes discrepâncias nos valores anuais de radiação solar, o que indica boa distribuição de irradiação solar ao longo do ano. Como mostrado na Figura 4, o local com maior irradiação solar se localiza no norte da Bahia, perto da fronteira com o Piauí, um local de clima semiárido com poucas chuvas ao longo do ano, com uma média de 6,5 kWh/m². Já a menor média de irradiação solar é a do estado de Santa Catarina, com um valor de 4,25kWh/m², caracterizado justamente por ter chuvas bem distribuídas no decorrer do ano (PEREIRA et al, 2006).

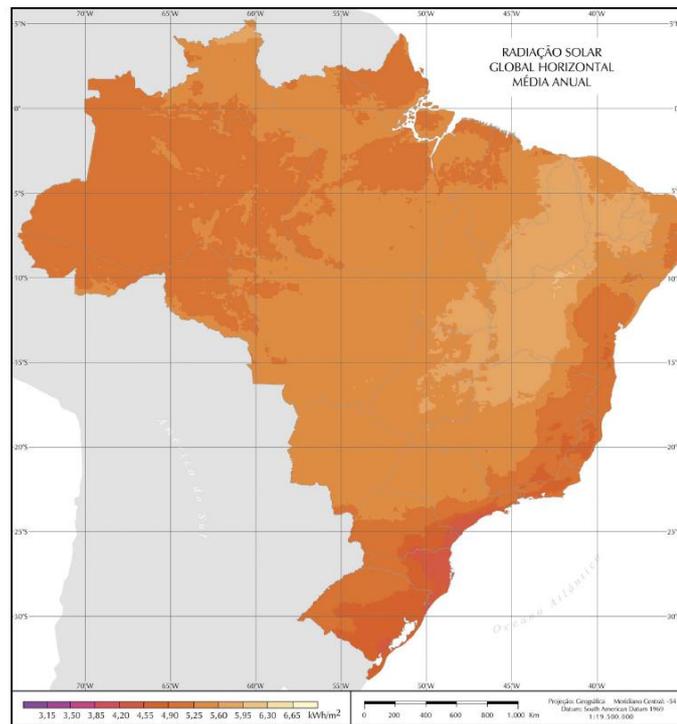
Figura 3: Mapa de irradiação solar



Fonte: Adaptado de VAISALA, 2015.

A partir da irradiação solar, pode-se gerar diretamente tanto energia térmica, através principalmente do aquecimento de água que depois fica armazenada em recipientes isolados termicamente, como energia elétrica, por meio do efeito fotovoltaico. O interesse deste trabalho reside na conversão direta de energia solar em elétrica, logo a análise da geração de energia será restrita à conversão de energia solar por meio do efeito fotovoltaico (PEREIRA et al, 2006).

Figura 4: Radiação solar:média anual do Brasil



Fonte: Adaptado de PEREIRA et al, 2006.

2.2 EFEITO FOTOVOLTAICO

O efeito fotovoltaico é um fenômeno em que determinados materiais, também conhecidos por semicondutores, ao serem expostos à radiação solar, geram uma diferença de potencial ou uma corrente, gerando assim energia. Este fenômeno é similar ao efeito fotoelétrico, com a diferença que a movimentação de cargas livres no efeito fotovoltaico ocorre dentro do material, enquanto no efeito fotoelétrico há liberação de elétrons do material exposto à radiação (ZILLES et al, 2012).

A descoberta dos efeitos fotovoltaico e fotoelétrico foi feita pelo francês Alexandre Edmond Becquerel, em 1839, durante o seu estudo sobre o efeito da luz em células eletrolíticas. Posteriormente, Albert Einstein descreveu o fenômeno em um artigo sobre a natureza da luz, em 1905 (ZILLES et al, 2012).

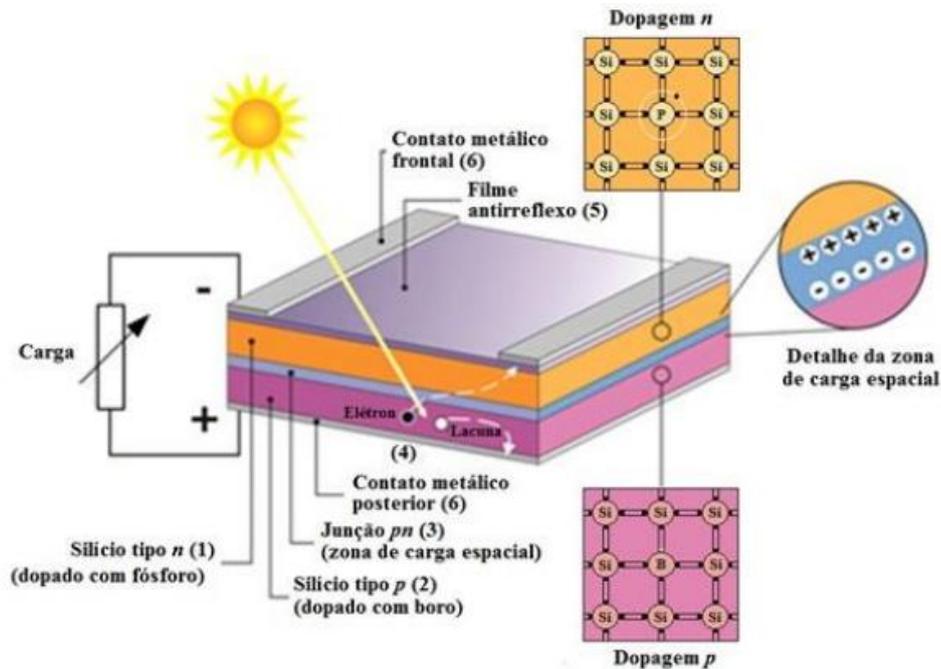
O efeito fotovoltaico é um fenômeno que ocorre a nível atômico em materiais semicondutores, envolvendo as estruturas que compõem os átomos. Materiais semicondutores são aqueles cujas bandas de condução encontram-se inicialmente vazias e as bandas de valência completamente preenchidas. Esse tipo de material possui uma distância entre bandas (*bandgap*) de aproximadamente 1eV. Assim, em um estado não excitado o material semicondutor comporta-se como um isolante, mas com o aumento da irradiação ele torna-se um condutor. Esse processo ocorre ao receber fótons dentro da frequência de luz visível. O elétron deixa no local onde se encontrava uma lacuna de carga positiva ao se agitar e mudar de posição. Se o elétron seguir sendo excitado continuará a se mover, deixando lacunas que são sucessivamente preenchidas por outros elétrons em movimento. Esse efeito é chamado de recombinação, que mantém o material eletricamente neutro (ZILLES et al, 2012).

Para poder usufruir da corrente elétrica que circula dentro do material, torna-se necessário perturbar esse equilíbrio. O processo de desequilibrar essa tendência do material a se neutralizar chama-se dopagem. A dopagem é um acréscimo de carga que desequilibra o material, e isso pode ser feito tanto com cargas positivas (as lacunas) como com cargas negativas (os elétrons), ambas chamadas de cargas livres (ZILLES et al, 2012).

Juntando dois materiais com dopagens opostas, cria-se a junção PN, onde elétrons livres dos semicondutores migrarão para o lado preenchendo as lacunas, gerando uma corrente, denominada corrente de deriva. No entanto, essa movimentação não ocorre indefinidamente, pois essa movimentação de cargas gera um campo elétrico que cria uma corrente no sentido inverso da corrente original (ZILLES et al, 2012).

Se incidirmos fótons para forçar essa movimentação, em algum momento as cargas livres pararão de se movimentar. Porém, se ligarmos terminais nas distintas camadas, aproveitaremos o potencial gerado entre uma camada e outra (ZILLES et al, 2012). Esse processo está representado na Figura 5.

Figura 5: Efeito fotovoltaico



Fonte: (PINHO, et al, 2014).

2.3 TIPOS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

As células fotovoltaicas podem ser formadas por diversos materiais, embora a tecnologia que tem predominado no mercado tem sido as células de silício cristalizado, devido à sua relação de custo-benefício. Nesta seção, serão descritos os diferentes tipos de células encontradas comercialmente. Cabe mencionar que existem células com eficiência maior do que as que serão apresentadas, porém elas ainda não são economicamente viáveis e, por isso, optou-se em não descrevê-las (RODRIGUES, 2015).

Atualmente, a maioria dos painéis solares é feita de alguma forma de silício. A principal diferença entre as células compostas de silício é o nível de pureza do mesmo. Essa pureza significa um melhor alinhamento das moléculas de silício, de modo que quanto mais puro for o material melhor será a conversão de energia. A pureza é obtida através de tratamentos químicos e térmicos.

2.3.1 Células Fotovoltaicas de Silício Poli e Monocristalino

O silício é o segundo elemento em maior abundância na superfície terrestre, logo se encontra em quantidades quase infinitas. No entanto, no estado em que é encontrado contém demasiadas impurezas para ser utilizado nas células. Após ser tratado, ele é resfriado, cristalizado e cortado no formato de lâminas para ser utilizado nas células (Blue-sol, 2012).

O silício purificado sofre tratamento térmico em um cadinho e depois é trabalhado para obter um material na forma adequada. Através de tratamentos térmicos sequenciais, esse cubo possuirá uma única orientação. Como o silício possui a propriedade de se cristalizar livremente, ocorre a formação de vários cristais dentro do cubo formado, recebendo por isso a denominação de policristalino. A existência de vários cristais aumenta as perdas por recombinação, fazendo com que esse material seja menos eficiente que o silício monocristalino (COLAFERRO, 2012).

O silício para células monocristalinas é encontrado após a purificação da forma do silício formado por policristais. Para causar a transformação, utiliza-se o processo de Czochralsky, no qual o silício é derretido em um cadinho de quartzo, em temperaturas por volta de 1400°C. Ao aquecer, o silício é derramado em recipientes longitudinais, com a intenção de formar cristais únicos. Esses cristais serão posteriormente fatiados em waffers, e, por último, será aplicada uma camada de material antirreflexo, formando assim a célula monocristalina (COLAFERRO, 2012).

2.3.2 Células Fotovoltaicas de Película Fina

Por utilizar menos matéria-prima e gastar menos energia para fabricação, acreditava-se que as células de película fina seriam um concorrente forte para as células de silício cristalizado. Por exemplo, para trabalhar com o silício cristalizado, precisa-se trabalhar com temperaturas na volta de 1400°C; já para os materiais de película fina, o aquecimento não supera os 600°C. No entanto, ao comparar com o rendimento das células de silício, a economia não recompensa o rendimento baixo desse tipo de material ao comparar com silício cristalizado (COLAFERRO, 2012).

2.3.2.1 Células Fotovoltaicas de Silício Amorfo

Diferentemente dos outros tipos de silício, esse material não é formado por cristais e sim por uma rede irregular. Esse silício amorfo é feito em reatores de plasma. O seu processo de fabricação cria substratos leves e não transparentes, que facilitam a sua instalação. No entanto, embora seja mais fácil de trabalhar com esse tipo de material para instalação, ele possui uma eficiência muito baixa. Sua eficiência é ainda menor nos primeiros 12 meses devido ao efeito da degradação induzida pela luz (COLAFERRO, 2012).

2.3.2.2 Células Fotovoltaicas de CIS/CIGS

Essas células são fabricadas com substrato de vidro, o qual é revestido com uma camada de molibdênio. Esse tipo de célula não possui degradação por radiação solar. No entanto, por conter óxido de zinco na sua fundação, é necessária uma boa isolação para não oxidar e assim tornar o módulo da célula inútil. Esses módulos fotovoltaicos são os mais baratos dentre as tecnologias de película fina e obtêm uma eficiência de até 11%. Ainda assim, possui um custo maior que o silício e utiliza índio, um material não tão abundante na natureza, que é muito visado graças ao seu uso em telas *touchscreen* capacitivas (COLAFERRO, 2012).

2.3.3 Células Fotovoltaicas Híbridas

As células híbridas são um casamento entre as células de películas finas e as de silício cristalizado. Essas células são formadas de núcleos de silício cristalizado, revestidas por películas de silício amorfo. Elas não possuem degradação por luz, e comparando ao silício cristalizado, possuem um rendimento melhor em altas temperaturas (temperaturas maiores que 25°C) (COLAFERRO, 2012).

2.3.4 Comparação do Rendimento das Diferentes Células Fotovoltaicas

Para ter uma ideia melhor de como uma tecnologia se compara com outra, utiliza-se a Tabela 1 para avaliar as diferentes eficiências.

Tabela 1: Comparação do rendimento de diferentes células.

Material da Célula	Eficiência em Módulos Comerciais
Silício policristalino	13%
Silício monocristalino	14%
Silício amorfo	7,5%
CIS/CIGS	10%
Célula solar híbrida	15,2%

Fonte: Adaptado de RODRIGUES, 2015.

2.4 SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE ELÉTRICA

Um sistema de geração fotovoltaico consiste não só na célula, mas também em algum meio de utilizar essa energia gerada. Há duas formas de utilizar a energia. A primeira seria conectando os painéis a baterias, o que possibilita usar a energia gerada quando houver demanda. A segunda forma é conectar os painéis à rede elétrica por meio de inversores, cuja função é transformar a tensão contínua gerada nos painéis em corrente alternada (PEREIRA, et al, 2006). Como o objetivo deste trabalho reside no estudo de conexão direta com a rede, será focada a bibliografia para o estudo de inversores.

2.4.1 Painel Fotovoltaico

A célula fotovoltaica não se comporta como uma fonte elétrica convencional. A tensão de saída varia 'muitas vezes', os painéis também apresentam correntes de saídas muito baixas. Logo, na maioria dos casos, torna-se necessário fazer associações entre os mesmos para obter uma potência considerável (ZILLES et al, 2012).

Os painéis fotovoltaicas estão representadas conforme a Figura 6.

Figura 6: Representação do painel fotovoltaico



Fonte: Adaptado de MpptSolar., 2015.

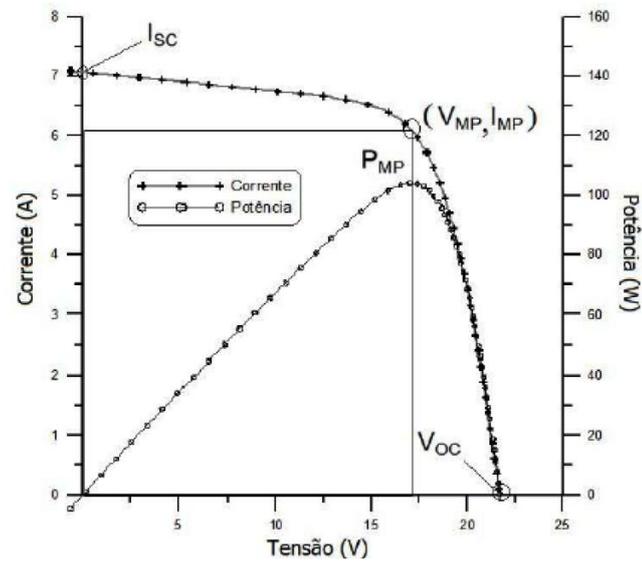
2.4.1.1 Curvas Características

Cada painel possui curvas de relação corrente por tensão, potência por tensão e rendimento por temperaturas específicas. Não é possível obter qualquer valor fora das curvas do modelo do módulo, e essa é uma característica dos módulos fotovoltaicos (ZILLES et al, 2012).

O entendimento das curvas características é um dos conhecimentos mais importantes para o dimensionamento dos projetos. De forma geral, as curvas são fornecidas pelos fabricantes dos módulos (ZILLES et al, 2012).

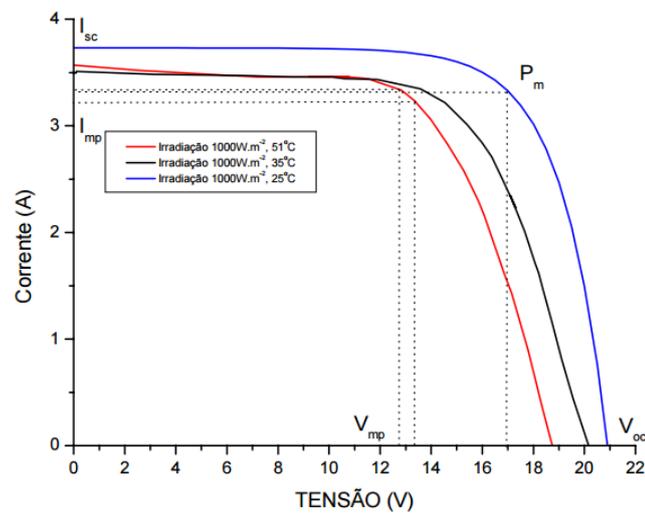
Uma curva típica de tensão por corrente e outra de potência por tensão estão representadas na Figura 7. Nessa figura os pontos I_{SC} , e V_{OC} representam respectivamente os valores de corrente de curto-circuito e de tensão em circuito aberto. Já o ponto P_{MP} corresponde à situação na qual o módulo fornece a máxima potência. Assim, de forma ideal, deveria ser sempre trabalhado sobre este ponto. É importante ressaltar que a relação de corrente por tensão é afetada pela temperatura na qual o módulo trabalha, diminuindo de eficiência à medida que a temperatura aumenta (ZILLES, et al., 2012). Essa relação pode ser observada na Figura 8.

Figura 7: Curva I x V e curva P x V típicas de um módulo fotovoltaico.



Fonte: Adaptado de PINHO et al, 2014.

Figura 8: Curvas características de I x V em diferentes temperaturas de operação.



Fonte: Adaptado de GNOATTO et al, 2005.

2.4.1.2 Associações

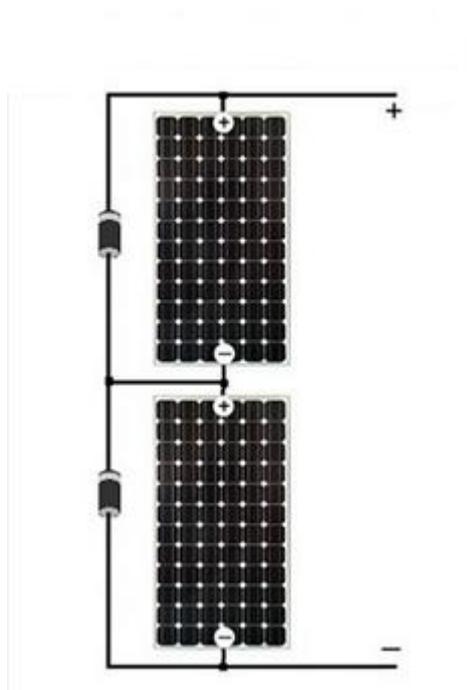
Pelo fato de os módulos individuais terem tensão e correntes baixas, é comum fazer associações para obter tensões e correntes de saídas maiores. As associações são de três tipos: associação em série, associações em paralelo e associação mista.

A associação em série está ilustrada na Figura 9. Esse tipo de associação é feito para obter uma tensão maior, e esse tipo de conexão gera perdas de energia menores ao longo dos cabos. A tensão resultante de saída será a somatória das tensões dos módulos individuais.

A associação em paralelo manterá a mesma tensão nos painéis que estiverem conectados e aumentará a corrente de saída resultante. A corrente de saída resultante será a somatória das correntes dos módulos. Esse tipo de ligação está exemplificado na Figura 10.

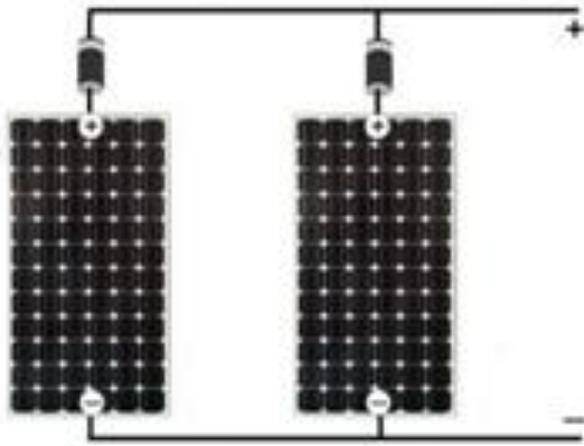
Como as tensões e correntes nominais dos painéis são baixas, ambas necessitam ser aumentadas. A ligação mais comum quando se conectam os painéis é a mista, assim suprindo os valores necessários de tensão e corrente de saída. Na figura 11 está exemplificada essa ligação.

Figura 9: Associação em série



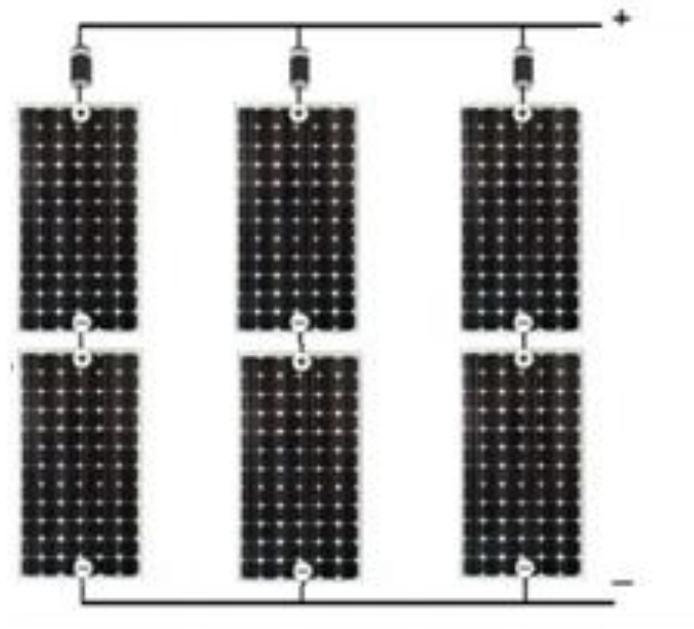
Fonte: Adaptado de MpptSolar, 2015.

Figura 10: Associação em paralelo



Fonte: Adaptado de MpptSolar, 2015.

Figura 11: Associação mista



Fonte: Adaptado de MpptSolar, 2015.

2.4.1.3 Orientação dos Módulos

Para obter o maior rendimento dos painéis, é necessário considerar a orientação dos raios solares incidentes sobre o planeta. Para o uso de energia fotovoltaica, pode-se considerar que os raios solares incidem sempre de forma paralela sobre a Terra até chegar à atmosfera. Ao atravessar a atmosfera, muitos raios são desviados e refletidos em direções aleatórias. Mesmo assim, a maioria deles permanece na sua trajetória inicial em linha reta, chamada radiação direta. É possível posicionar os módulos de forma a maximizar a captação da radiação direta, maximizando o rendimento (RODRIGUES, 2015).

Para instalar os módulos fotovoltaicos, podem ser utilizados sistemas de rastreamento de radiação. Esses sistemas possuem liberdade de se mover ao longo do dia e assim aproveitar à medida das horas a melhor radiação para determinado instante. Se não houver esse sistema, a melhor forma de instalar os painéis é posicioná-los em direção ao Norte Geográfico da Terra (para localidades abaixo da linha do equador)(RODRIGUES, 2015).

De forma prática, os módulos fotovoltaicos são instalados direcionados ao Norte geográfico, e com uma inclinação α em relação ao solo. A maioria dos fabricantes adota uma regra simples para o posicionamento dos módulos, onde o ângulo em relação ao solo não pode ser menor que 10° , e α s específicos são designados pela latitude do local (RODRIGUES, 2015).

2.4.2 Inversores

Inversores são conversores do tipo CC-CA, que são responsáveis por fazer a ligação dos módulos fotovoltaicos à rede elétrica. A saída do inversor funciona como se fosse uma fonte de tensão, com controle da corrente de saída para ajustar a potência.

O inversor deve fornecer uma tensão (ou corrente) alternada, com frequência de 60Hz ou 50Hz de acordo com o valor da rede local, forma e amplitude definidas por algum sistema de controle. Em princípio, a saída deve ser independente de eventuais alterações na alimentação CC, na carga (situação de operação ilhada) ou na rede CA. Dado que a grande maioria das cargas é alimentada em corrente alternada, a aplicação desses conversores se dá tanto em sistemas isolados quanto nos interligados com a rede (Pomílio, 2013).

A saída do inversor deveria possuir uma forma de onda senoidal perfeita; no entanto, os inversores em geral injetam uma quantidade não desprezível de harmônicas na rede. Com o

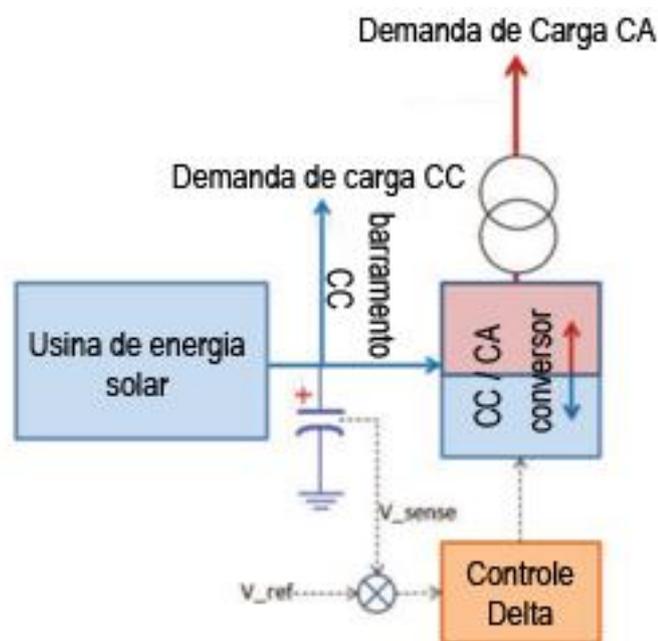
avanço tecnológico dos dispositivos semicondutores, técnicas de chaveamento têm se tornado mais eficientes e minimizado o conteúdo harmônico dos inversores.

Existem diferentes tipos de inversores. Para sistemas de micro e minigeração ligados diretamente à rede de distribuição são utilizados Inversores "Tie Grid". Esses têm a função de sincronizar o sistema com a rede, além da função primária da conversão do modo contínuo para o alternado. Esse modelo de inversor que o estudo foca-se.

2.4.2.1 Topologia dos Inversores Tie Grid

Os inversores Tie Grid consistem em dois blocos principais: o conversor CC/AC e o sincronizador. A simplificação de um sistema de microgeração fotovoltaica é representada na Figura 12.

Figura 12: Sistema de microgeração fotovoltaico.



Fonte: Adaptado de CHAUDHARI, 2015.

A sincronização com a rede é feita por um sistema de controle implementado em diferentes estágios: estágio de potência, de frequência, de fase e de tensão. Esses sistemas de controle devem ser robustos e possuir um rápido tempo de resposta. Atrasos no tempo de

resposta do sincronizador do inversor conectado à rede podem danificar a saída de potência do inversor (CHAUDHARI, 2015).

2.4.2.2 Requisitos de Qualidade

Os inversores devem atender alguns requisitos técnicos para a instalação, de forma que sejam conectados à rede elétrica seguramente. Esses parâmetros são estipulados principalmente pelos documentos: Módulo 8 do Prodist, ABNT NBR 16149 (referente às características de conexão), ABNT NBR 161509 (referente aos ensaios de conformidade) e ABNT NBR IEC 62116 (referente aos ensaios de anti-ilhamentos dos inversores). Entre os principais aspectos abordados nessas normas estão os padrões de qualidade de energia elétrica, como limites de tensão, cintilação, frequência, distorção harmônica, fator de potência, entre outros.

2.4.2.2.1 Sistema Anti-Ilhamento

Uma das características mais importantes é que os inversores possuem a capacidade de detectar de forma rápida uma situação de ilhamento. O ilhamento é uma situação que ocorre quando uma parte da rede distribuição se isola eletricamente da subestação de energia à qual está conectada, porém segue sendo abastecida por geradores distribuídos nas vizinhanças, chamados de geradores ilhados. Se esses geradores não forem desligados, diversos problemas podem ocorrer: a qualidade de energia elétrica da rede ilhada pode ficar fora do controle da concessionária. Embora a mesma continue responsável por esse controle; o serviço de manutenção da concessionária pode oferecer riscos desconhecidos aos trabalhadores, pois regiões podem seguir energizadas sem a concessionária ter conhecimento; o sistema ilhado pode não possuir aterramento adequado. Hoje, a maioria dos fabricantes já instala um sistema de anti-ilhamento nos inversores comerciais (PITOMBO, 2010).

2.4.2.2.2 Qualidade da Tensão

Referente à qualidade de tensão, quando a tensão da rede sai da faixa de operação especificada na Tabela 2, o sistema de geração distribuída deve interromper o fornecimento de energia à rede.

Tabela 2: Parâmetros de Tensão.

Tensão no ponto Comum de conexão (% em relação à V nominal)	Tempo máximo de desligamento (1)
$V < 80\%$	0,4 s
$80\% \leq V \leq 110\%$	<i>Regime normal de Operação</i>
$110\% < V$	0,2 s

(1) O tempo máximo de desligamento refere-se ao tempo entre o evento anormal de tensão e a atuação do sistema de geração distribuída (cessar o fornecimento de energia elétrica). O sistema de geração distribuída deve permanecer conectado à rede, afim de monitorar os parâmetros da rede e permitir a 'reconexão' do sistema quando as condições normais forem restabelecidas

Fonte: NBR 16149 (ABNT, 2013).

2.4.2.2.2 Qualidade da Frequência

Os parâmetros de qualidade de frequência verificam as condições de operação para sub e sobrefrequência. Se a frequência da rede cair abaixo de 57,5 Hz, o sistema de geração distribuída deve parar o fornecimento de energia elétrica em até 0,2 s. O sistema somente pode voltar a funcionar quando a frequência retornar para 59,9 Hz, respeitando o tempo de reconexão de 20 s a 300 s, chamado de tempo de reconexão, após a retomada das condições normais de tensão e frequência da rede (ABNT, 2013).

Já para o caso se sobrefrequência, quando o valor ultrapassar 60,5 Hz e permanecer abaixo de 62 Hz, o sistema de geração distribuída deve reduzir a potência injetada na rede seguindo a seguinte relação (ABNT, 2013):

$$\Delta P = [f_{rede} - (f_{nominal} + 0,5)] \times R \quad (1)$$

Sendo:

ΔP é a variação da potência ativa injetada (em%) em relação à potência ativa injetada no momento em que a frequência excede 60,5 Hz (Pm);

f_{rede} é a frequência da rede;

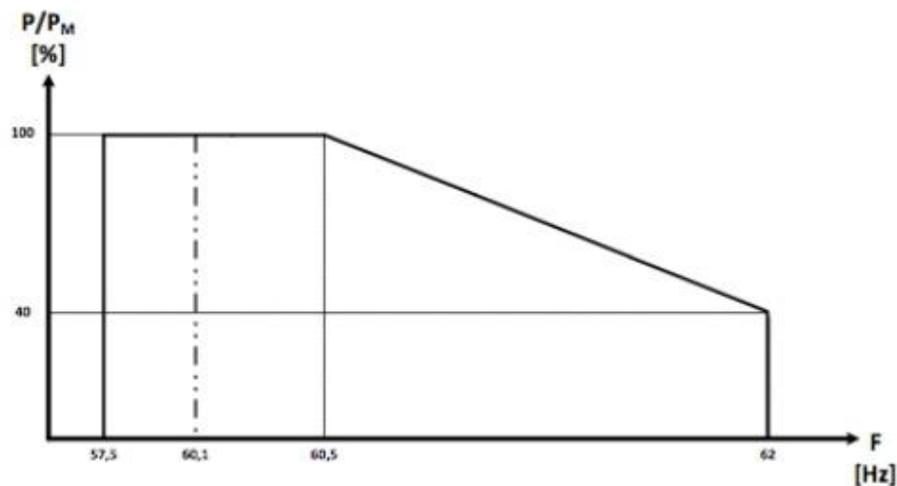
$f_{nominal}$ é a frequência nominal da rede;

R é a taxa de redução desejada da potência ativa injetada (em % Hz) ajustada em - 40% Hz. A resolução da medição de frequência deve ser $\leq 0,01$ Hz.

Caso a frequência da rede chegue a ultrapassar 62 Hz, o sistema de geração distribuída deve cessar o fornecimento de energia à rede elétrica em até 0,2 s. O sistema deve voltar a fornecer energia quando a frequência retornar para 60,1 Hz, respeitando o tempo de reconexão. O gradiente de elevação da potência ativa injetada na rede deve ser de até 20% de P_m por minuto (ABNT, 2013).

A Figura 13 ilustra a curva de operação dos sistemas fotovoltaicos em função da frequência da rede para a desconexão por sobre/subfrequência.

Figura 13: Curva de operação do sistema de geração distribuída em função da frequência da rede para desconexão por sobre/subfrequência.



Fonte: NBR 16149 (ABNT, 2013)

2.4.2.2.3 Qualidade da Forma de Onda

A distorção harmônica total de corrente deve ser inferior a 5 %. Na potência nominal do sistema de geração distribuída, cada harmônica individual deve estar limitada aos valores apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Limites de distorção Harmônica de Corrente.

Harmônicas ímpares	Limite de distorção
3° a 9°	< 4,0%
11° a 15°	< 2,0%
17° a 21°	< 1,5%
32° a 33°	< 0,6%
Harmônicas Pares	Limite de distorção
2° a 8°	< 1,0%
10° a 32°	< 0,5%

Fonte: NBR 16149 (ABNT, 2013).

2.4.2.2.4 Fator de potência

O sistema de geração deve manter um limite de fator de potência quando vier a operar com uma potência injetada 20% maior que a nominal do gerador. Esse limite varia de acordo com a potência instalada do sistema. Há três faixas de variação de FP correspondentes a faixas de capacidade de potência instalada, como pode ser conferido na Tabela 4.

Tabela 4: Limites de operação de FP para diferentes faixas de potência instalada.

Faixa de Potência	Limite de FP
$P \leq 3 \text{ kW}$	0,98 capacitivo ou indutivo
$3 \text{ kW} \leq P \leq 6 \text{ kW}$	0,95 capacitivo ou indutivo
$6 \text{ kW} < P$	0,92 capacitivo ou indutivo

Fonte: NBR 16149 (ABNT, 2013).

3 METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA

3.1 METODOLOGIA

O estudo da viabilidade foi solicitado pela prefeitura devido aos grandes gastos com o seu consumo de energia. A RES 482/2012 da ANEEL fornece a base para o sistema de compensação realizado, possibilitando uma diminuição do consumo de energia demandada, utilizando a energia gerada. No entanto, essa resolução não prevê compensação monetária caso ocorra um excedente de energia gerada. Como o sistema de geração fotovoltaico possui um longo período útil, é importante dimensioná-lo de forma correta, tendo como objetivo gerar créditos para a demanda atual e futura.

A previsão do aumento da demanda é uma necessidade importante, uma vez que o aumento do volume de aparelhos eletroeletrônicos na maioria das instalações elétricas é uma realidade. Porém, isso não se aplica à Casa de Bombas, uma vez que é uma instalação simples com o único objetivo de manter as bombas de bombeamento em local seguro. O local possui um galpão onde ficam alojadas as bombas e os transformadores, uma recepção de entrada, e um alojamento onde ficam armazenados os utensílios de limpeza. Na Figura 14 pode-se ver toda a instalação da Casa de Bombas, com uma imagem de satélite. Na Figura 15 é mostrado o espaço físico dentro do galpão onde as bombas estão alojadas.

Figura 14: Casa de bombas vista de satélite



Fonte: Google Earth.

Por esse motivo, fazer uma estimativa realista do consumo médio dessa instalação é mais importante do que prever um possível aumento de demanda. Assim, não se comete o erro de super ou subestimar o sistema fotovoltaico.

A metodologia para o dimensionamento do sistema seguirá a seguinte abordagem: baseado no histórico de consumo dos últimos dois anos da casa de bombas, será calculada qual a demanda média da mesma. Com esse valor, será calculada a potência necessária para redzir mensalmente a demanda. No entanto, devido ao espaço disponível de telhado, não será possível instalar todos o kiloWatts necessários. Assim, será projetado o máximo de potência que pode ser instalada no telhado, considerando que deve sobrar espaço para trabalhar com os arranjos. A partir da potência que será possível instalar, será calculada a energia que esse sistema consegue gerar.

3.2 ESTUDO DE CASO

Para o cálculo da demanda, foram computadas as medições de consumo de energia de maio de 2013 a abril de 2015. Esses valores, juntos com alguns valores tarifados estão apresentados na Tabela 5.

Pelos valores apresentados na Tabela 5, chega-se a uma média de consumo de 32.325,54 kWh por mês ao longo dos anos de 2013, 2014 e 2015. Esse consumo equivale a um gasto anual de R\$ 291.109,66. Nota-se uma grande variação entre os meses, o que agrega um valor 'aleatório' ao sistema. Por isso, ao invés de utilizar uma média simples, foi feita a análise estatística, para agregar um maior valor de confiança ao estudo.

Utilizando uma aproximação matemática, foi gerado o gráfico da Figura 16 a partir da função 'normplot' do Matlab. Essa função plota uma distribuição de probabilidade normal, assim retiraram-se alguns valores de consumo nos abaixo de 90 %, referentes aos meses de Novembro, Outubro e Agosto de 2014; e Novembro de 2013. Com esses valores, obtem-se uma média de consumo de 25.206,05 kWh ao mês. Fazendo um cálculo do valor do kWh perante o consumo encontra-se um gasto anual de R\$ 226.994,64.

Idealmente, o objetivo seria ter uma geração que fosse capaz de suprir a demanda normal mensal. Para esse fim, seria necessário instalar um total de 233,4 kW de pico de energia solar. Porém, a principal alternativa de projeto é instalar os painéis fotovoltaicos

somente na área útil do telhado do galpão, o qual possui aproximadamente 350 m². Para essa área, independentemente do painel utilizado, não será possível instalar esse valor de potência. Contudo, ainda é possível instalar aproximadamente 60 kW de pico de geração dependendo dos painéis utilizados, o que já é uma perspectiva interessante.

O telhado terá que ter a sua estrutura reforçada, uma vez que ele é formado por telhas finas, que não resistiriam à carga dos painéis. Também não se tem informações sobre a inclinação do telhado, que não pode ser acessado na visita à Casa de Bombas. Assim, trabalha-se com a hipótese que o reforço da estrutura já será construído para aproveitar o ângulo ótimo de conversão para os painéis.

Figura 15: Galpão da casa de bombas



Fonte: Autor.

Isso acarretará em um custo maior no investimento inicial, além dos componentes do sistema. Será agregado um valor referente a essa obra; no entanto, ela não será revisada tecnicamente. Essa abordagem é devida que o interesse do estudo reside na viabilidade técnica e econômica do projeto elétrico, e esse tipo de trabalho foge ao tema apresentado.

Tabela 5: Histórico de Consumo.

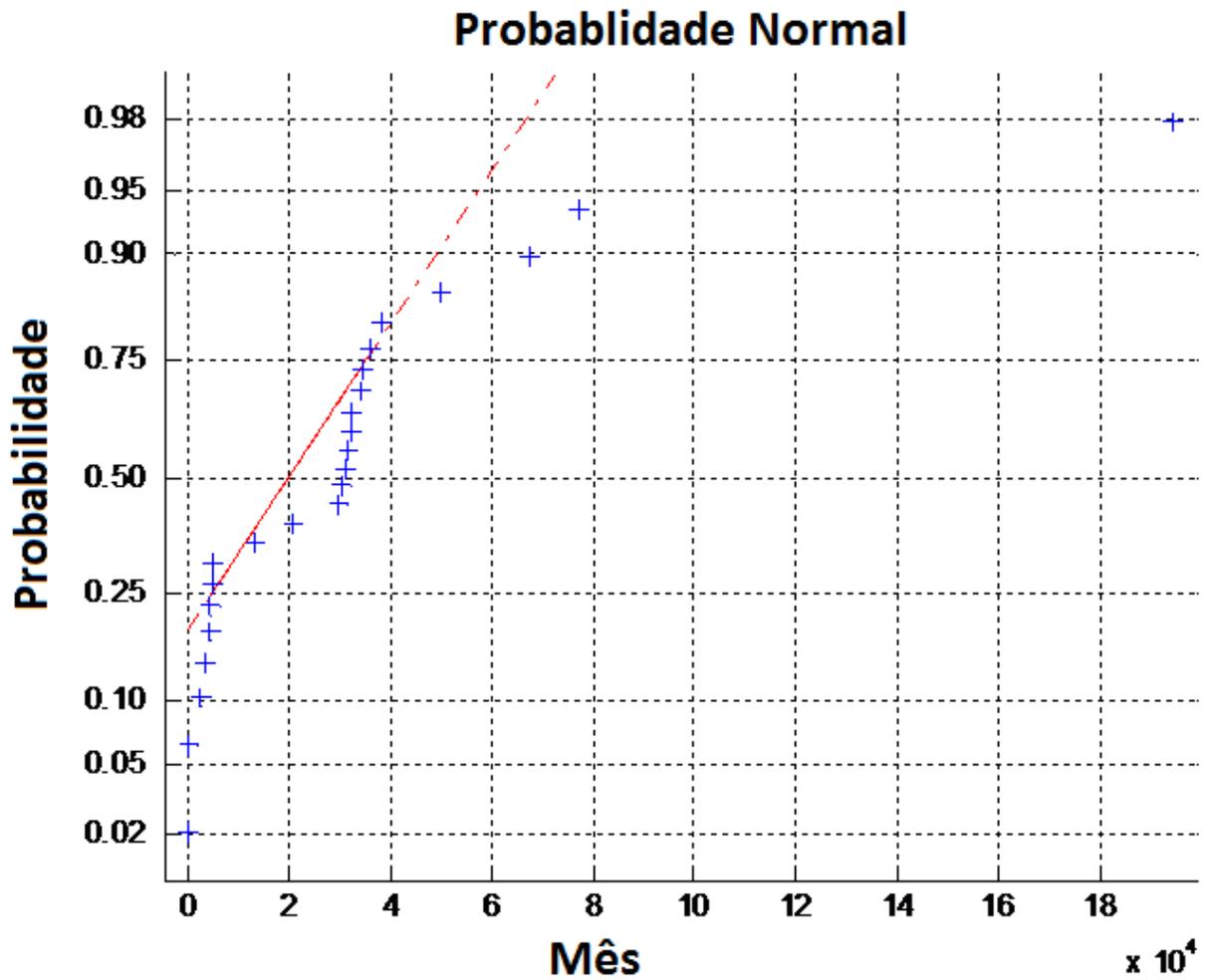
Mês	Descrição	Consumo (kWh/mês)	Tarifa (R\$)	Despesa Total ¹
Abr/15	Ponta	318	0,8743335	13.224,27
	Fora de Ponta	3.859	0,325087	
Mar/15	Ponta	520	0,823143	16.431,20
	Fora de Ponta	12.538	0,283284	
Fev/15	Ponta	1.677	0,784654	26.225,89
	Fora de Ponta	19.296	0,219085	
Jan/15	Ponta	4.625	0,708184/0,735054 ²	36.529,62
	Fora de Ponta	45.408	0,178341/0,205210	
Dez/14	Ponta	313	0,728795	12.469,28
	Fora de Ponta	3.206	0,183530	
Nov/14	Ponta	10.149	0,735340	85.042,06
	Fora de Ponta	184.224	0,185178	
Out/14	Ponta	0	-	10.999,96
	Fora de Ponta	0	-	
Set/14	Ponta	2.299	0,723875	20.319,84
	Fora de Ponta	29.261	0,182291	
Ago/14	Ponta	0	-	-
	Fora de Ponta	0	-	
Jul/14	Ponta	2.358	0,723310	21.065,02
	Fora de Ponta	32.160	0,182148	
Jun/14	Ponta	2.214	0,703551	19.734,14
	Fora de Ponta	30.029	0,177173	
Mai/14	Ponta	2.078	0,677133	18.068,29
	Fora de Ponta	28.013	0,169793	
Abr/14	Ponta	251	-	-
	Fora de Ponta	2.016	-	
Mar/14	Ponta	2.159	-	-
	Fora de Ponta	28.954	-	
Fev/14	Ponta	2.024	-	-
	Fora de Ponta	27.475	-	
Jan/14	Ponta	339	-	-
	Fora de Ponta	4.224	-	
Dez/13	Ponta	2.527	-	-
	Fora de Ponta	31.258	-	
Nov/13	Ponta	5.818	-	-
	Fora de Ponta	71.501	-	
Out/13	Ponta	4.026	-	-
	Fora de Ponta	31.987	-	
Set/13	Ponta	3.796	-	-
	Fora de Ponta	63.533	-	
Ago/13	Ponta	2.390	-	-
	Fora de Ponta	35.712	-	
Jul/13	Ponta	681	-	-
	Fora de Ponta	31.296	-	
Jun/13	Ponta	484	-	-
	Fora de Ponta	4.474	-	
Mai/13	Ponta	445	-	-
	Fora de Ponta	3898	-	

Fonte: Autor.

(1) Na despesa total estão computados os valores de FER, e da demanda fora de ponta, que é fixa em 700 kW ao mês.

(2) Os valores em vermelho representam o consumo em bandeira vermelha para os meses em que há divisão entre bandeira verde e vermelha.

Figura 16: Gráfico da probabilidade normal.



Fonte: Autor.

3.3 HISTÓRICO DE RADIAÇÃO SOLAR

Novo Hamburgo, onde é localizada a Casa de Bombas, fica na latitude de $29^{\circ} 40' 24''$ S e longitude de $51^{\circ} 07' 50''$ W. A intensidade da radiação solar varia bastante com a localidade. Utilizar dados a radiação correta é essencial para o estudo de viabilidade. Para seguir a mesma metodologia, iremos computar a média da radiação solar utilizando o mesmo período de tempo que a média da demanda.

Esses dados usados serão provenientes da base de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar e do "software" RADISOL, desenvolvido pelo Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Com essas diferentes fontes de dados, utiliza-se a média das fontes como valor de radiação. Esses dados estão presentes na Tabela 6.

Nota-se que as variações entre os dados das diferentes referências não possuem grandes variações. Como referência adicional, a Tabela 7 apresenta a comparação, entre as diferentes referências, dos dados de radiação inclinada na latitude local 30°S para a cidade de Porto Alegre, que fica a aproximadamente 37 km de Novo Hamburgo e possui dados medidos, não interpolados.

Ao analisarmos a Tabela 7, percebe-se mais uma vez que os valores entre as referências são similares, e também são similares entre as cidades próximas.

A literatura ainda sugere um ângulo ótimo para o arranjo solar, que produz uma quantidade maior de energia média anual. Para ambos, o valor desse ângulo fica próximo aos 25°, obtendo assim uma média levemente superior. Utilizando o RADIASOL para a comparação, obtém-se uma produção média superior com a inclinação de 25° para Porto Alegre. Entretanto, como a diferença é pequena e este estudo é preliminar, serão utilizados os valores para inclinação de 30° para os cálculos de energia subsequente.

3.4 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA

O objetivo desta seção é dimensionar e escolher os equipamentos que irão compor o sistema de microgeração da Casa de Bombas. Primeiramente, serão escolhidos os painéis, e em função destes será selecionado o tipo de inversor. Com esses dois componentes podem ser dimensionadas as perdas do sistema. Assim, podemos estimar a geração real esperada. Uma vez com esses valores, pode-se iniciar o estudo de viabilidade econômica.

Tabela 6: Base Comparação dos dados de radiação global média diária, com painéis inclinados em 30°, para Novo Hamburgo, em kWh/(m².dia).

Mês	Atlas Solar	Radisol	Média
Janeiro	5,44	5,42	5,43
Fevereiro	5,22	5,56	5,39
Março	4,76	5,17	4,96
Abril	4,34	4,81	4,57
Maio	3,50	4,04	3,77
Junho	2,94	3,55	3,24
Julho	3,60	3,98	3,79
Agosto	3,84	4,23	4,03
Setembro	4,29	4,73	4,51
Outubro	5,15	5,39	5,27
Novembro	5,57	5,63	5,60
Dezembro	5,84	5,82	5,83
Média	4,54	4,86	4,70

Fonte: Autor.

Tabela 7: Base Comparação dos dados de radiação global média diária, com painéis inclinados em 30°, para Porto Alegre, em kWh/(m².dia).

Mês	Atlas Solar	Radisol	Média
Janeiro	5,67	5,55	5,61
Fevereiro	5,44	5,47	5,45
Março	4,96	5,15	5,05
Abril	4,52	4,74	4,63
Maio	3,65	3,96	3,80
Junho	3,06	3,43	3,24
Julho	3,75	3,99	3,87
Agosto	4,00	4,25	4,12
Setembro	4,47	4,72	4,59
Outubro	5,37	5,46	5,41
Novembro	5,80	5,77	5,78
Dezembro	6,08	5,98	6,03
Média	4,73	4,87	4,80

Fonte: Autor.

3.4.1 Painéis Fotovoltaicos

O principal componente a ser escolhido do sistema são os painéis fotovoltaicos; e a partir deles dimensiona-se todo o projeto. Para obter uma comparação de parâmetros entre os módulos, será utilizada a tabela presente na Figura 17. Ela foi retirada da primeira edição da revista Fotovolt, publicada em Agosto de 2015. Nela podem ser encontrados diferentes módulos comercializados no país, também encontram-se características importantes como: massa, rendimento, parâmetros elétricos e dimensões dos módulos.

Em função da área disponível para o projeto e do rendimento do módulo, foi escolhido o modelo YGE 72 CELL SERIES, tipo YL310P-35b. Esse modelo possui potência nominal de 310 Wp a condições de teste padrão: irradiação solar de 1000 W/m², temperatura da célula de 25°C e distribuição espectral AM = 1,5.

Considerando que a área útil do telhado comportaria um total de 214 painéis, decidiu-se trabalhar com 194 painéis, obtendo assim um espaço maior para poder trabalhar com os arranjos. Esses serão escolhidos no próximo capítulo, em função do inversor escolhido.

O orçamento para o investimento de aquisição dos módulos atribui-se à empresa WEG. Posteriormente, esse valor será utilizado no cálculo de viabilidade econômica. O orçamento, o qual já inclui o inversor, está apresentado na Figura 18.

3.4.2 Inversores

Por se tratar de um projeto com potência mais elevada, há uma limitação do número de opções do mercado. Por isso, escolheu-se trabalhar com um fabricante brasileiro de grande confiabilidade no mercado. Na Tabela 8, estão presentes algumas especificações de inversores, retiradas do catálogo da WEG.

Pelo valor de potência máxima, foi escolhido o modelo SIW700 T050-22. De acordo com os limites do inversor, escolheu-se trabalhar com um arranjo misto de 14 fileiras de módulos em paralelo, com cada fileira contendo um total de 14 módulos. Vale ressaltar que, na maior parte do tempo, o inversor não estará atuando com a carga máxima. Mesmo assim, ele não perde o rendimento, como pode ser observado na Figura 19. A Tabela 9 compara os limites impostos pelo inversor e o valor final dos arranjos.

Figura 17: Tabela comercial de módulos fotovoltaicos

Módulos fotovoltaicos																	
Empresa/site/telefone	Tipo de Fabricante Importador/representante empresa	Fabricante estrangeiro/país de origem	Descrição dos módulos				Características elétricas (1)						Outras características				
			Modelo	Tipo de célula		Nº de células por módulo	Rendimento do módulo (%)	Potência máxima		Tensão de máx. potência (V)	Corrente de máx. potência (A)	Tensão de máx. potência (V)	Corrente de máx. potência (A)	Dimensões (mm) A x L x P	Massa (kg)	Garantia contra defeito (anos)	Garantia de desempenho (anos/% da potência nominal)
				Silício monocristalino	Silício policristalino			Filme fino (silício amorfo)	Wp								
3B Energy 3-b-energy.com (41) 3013-7383		Yingli, Solar World/China, Alemanha, EUA	Diversos		60	72	15,5	310	1	30,9	8,41	38,9	8,98	1.650 x 990 x 40	20	10	25/80,7
Alternative Energy www.ae.eco.br (51) 3062-4411		Jinko/China	JKM260P-60				15,9	260	+3	31,1	8,98	38,6		1.650 x 992 x 156	19	10	25/80
Anauger www.anauger.com.br (11) 4591-1661		Sunflower/China	Anauger 175Wp		72	72	13,6	175	+/-3	35,7	4,9	44,6	5,2	1.580 x 808 x 35	16	5	25/80
Base www.myenergy.com.br (11) 3045-8235		Xunlight Kunshan/China	Módulos flexíveis		7 a 28	7 a 28	7	72 ou 144	+/-10	17,60 ou 35,20	4,09	24,2 ou 48,4	5,1	2.741 ou 5.392 x 378 x 1,5	2,5 a 5,3	10	10/90 e 25/80
BYD www.byd.com (19) 3514-2550			P6C-36-MBB Series 24BB				16,75	330	+5	37,16	8,88	46,71	9,32	1.991 x 995 x 30	33	12	10/90 e 30/83
Canadian Solar www.canadiansolar.com (11) 5096-0525		Canadian Solar/Canadá	CS6P-260P			60	16,42	315	+1,5	36,6	8,61	45,1	9,18	1.954 x 982 x 40	22	10	25/80
Compactia www.compactia.com (41) 3045-1031		Vários/China, Portugal, Canadá			60	60	15,5	250								25	25/80
C.P Hood www.hoodenergiasolar.com.br (11) 2509-0845		Yingli, Kameo, Solar World/China, Alemanha	Diversos		36 e 72	36 e 60	88	50 a 320		21 e 42	9			147 x 67 x 30	12	4	25/80
CTC chinatradercenter.com.br (11) 3504-0988		Znshine PV-Tech/China	ZXP6-36-60-72/P				13,48 a 15,71	70 a 305	+/-3	17,9 a 37,1	3,91 a 8,41	22,25 a 45,3	4,2 a 8,89	775 a 1.957 x 670 a 992 x 52 a 194	8 a 24	1	10/110
Dinamica Trade www.dinamicatrade.com.br (11) 4808-5504		Zocen/China	ZPC6-60P			60	15,37	250	+/-3			37,3	8,73	1.640 x 992 x 45	19,5	25	25/80
Ecoa www.ecoenergias.com.br (47) 3025-2700		Econoss Energy/China	EN156P-60-250			60	15,4	250	2	30,4	8,23	37,6	8,81	1.640 x 992 x 40	19	10	25/80
Eco www.eco.eng.br (41) 3213-3300		Hareon, Astronergy/China	3BB HR-250P / Eco-A300P		60 e 72	15,40	250 e 300	2 e 3	29,98 e 35,74	8,34 e 8,4	37,41 e 45,16	8,79 e 9,27	1.636 x 992 x 45 e 1.956 x 994 x 50	19,5 e 23,5	10	25/80	
Energy Team www.etfx.com.br (71) 4042-9042		Vigest Solar/Espanha	VG		36 a 72	36 a 72	15,1 a 15,5	150 e 250	+3	17,9 a 36,2	8,28 a 8,38	22,2 a 44,88	8,85 a 9,05	1.478 a 1.957 x 674 a 992 x 35 a 50	12 a 28	12	12/90 e 15/80
		HJA/Inglaterra	TKA		60 e 72	60 e 72	15,4 e 15,5	250 e 300	+5	30,4 a 36,5	7,73 e 8,22	37,6 a 43,8	8,34 a 9,04	1.640 x 992 x 40 e 1.956 x 992 x 45	19 e 27	10	10/90 e 25/80
Frato www.frato.com.br (11) 3619-3556			Hetech Energy		36 e 46	36 e 46	11,8 a 14	30 e 45	1 e 3	18,61 e 18,40	1,65 e 2,34	22,71 e 22,6	1,81 e 2,57	540 x 470 x 25 e 670 x 480 x 30	2,7 e 4,5	1	10/90
Genyx www.genyx.com.br (31) 9791-7775		Chinoland/China					15 a 17	50 a 315	+3	Vários	Vários	Vários		Vários		10	20/80
Globo Brasil www.paineisglobobrasil.com.br (19) 3849-7766					60	60	15,39	250	3	30,5	8,2	37,7	8,85	1.640 x 990 x 35	25		
Grameyer www.grameyer.com.br (47) 3374-6380		Daqo New Energy/China	DQ260MSC			60	16	260	3	30,7	8,47	37,4	8,89	1.640 x 992 x 35	18	10	25/80
			DQ250PSC			60	15,4	250	3	30,5	8,2	37,2	8,72	1.640 x 992 x 35	18	10	25/80
Loja Elétrica www.lojaeletrica.com.br (31) 3218-8000		Elektra/China	EKPF - 300M, 250M		60 e 72	60 e 72	15,4 e 15,5	250 e 285,5	3	29,44 e 35,3	7,92 e 8,09	37,36 e 44,81	8,5 e 8,69	1.650 x 992 x 50 e 1.956 x 992 x 50	19 e 23,5	10	25/80
LS Energia contato@ldavantisolar.com.br (11) 5185-2898		Jiangsu Aiduo Photovoltaic Technology/China			60 e 72	60 e 72	15,5 a 16,2	250 a 305	+/-3	30,4 a 36,2	8,23 a 8,50	36,9 a 44,8	8,81 a 9,16	1.638 a 1.954 x 982 x 40 a 45	18,5 a 26	12	25/80
Minasol www.minasolpaineis.com.br (34) 4105-1100			MS 150		36	36	17,8	150	+/-3	18,5	8,11	23,6	8,3	1.485 x 685 x 40	11,9	5	25/80

(1) Standard Test Conditions (condições de teste padrão): irradiação solar 1000W/m², temperatura da célula de 25°C e distribuição espectral AM = 1,5.

Fonte: FOTOVOLT, 2015.

Figura 18: Orçamento para os módulos fotovoltaicos

4. CONDIÇÕES GERAIS DE VENDAS			
4.1. PREÇOS			
<p>Seguem abaixo as condições comerciais para o fornecimento dos equipamentos descritos no capítulo 2. O serviço de instalação e comissionamento não está incluso na proposta.</p>			
ITEM	QTD	DESCRIÇÃO	PREÇO (R\$)
1		Gerador fotovoltaico	R\$ 274.833,00
TOTAL			R\$ 274.833,00
<ul style="list-style-type: none"> • <u>PREÇOS</u> <p>Os preços apresentados nesta proposta estão expressos em REAIS (R\$) e são válidos para as quantidades e especificações indicadas, diretamente vinculados ao cumprimento dos eventos financeiros previstos nas condições de pagamento.</p> <p>Os preços serão revisados nos casos de desequilíbrio econômico/financeiros das prestações de cada uma das partes na hipótese de onerosidade excessiva superveniente, especialmente em caso de alteração na legislação que crie ou modifique tributos e/ou obrigações legais, ou ainda outras medidas de ordem econômica, que desequilibrem a relação das partes.</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>REAJUSTE DE PREÇOS</u> <p>Os preços apresentados nesta proposta são fixos durante a validade da proposta.</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>CONDIÇÕES DE PAGAMENTO</u> <ul style="list-style-type: none"> • 100% com o pedido de compra. • <u>IMPOSTOS</u> <ul style="list-style-type: none"> • ICMS: isento para gerador fotovoltaico, conforme legislação vigente. • PIS/COFINS: 9,25% incluso no(s) preço(s) dos produtos conforme legislação vigente. • IPI: isento para gerador fotovoltaico, conforme legislação vigente. 			

Fonte: Autor.

3.4.3 Energia Gerada pelo Sistema

Para o cálculo de energia gerada pelo sistema, serão utilizados dois métodos conceituais. Primeiramente, usaremos um método mais simplificado, que utiliza como base o fator de capacidade, que é a razão entre a energia produzida e a energia máxima que poderia ser produzida operando em potência nominal todo o tempo. Esse fator é apresentado na Equação (2).

Tabela 8: Especificações de Inversores

MODELO	SIW700 T050-22	SIW700 T060-22	SIW700 T125-22
ENTRADA (CC)			
Potência Máxima Recomendada (kW)	65	80	160
Corrente Máxima Recomendada (A)	180	220	445
Tensão Máxima	800		
Faixa de Cobertura de P_{MP} (V)	360-700		
Eficiência (%)	>99,8		
SAÍDA (CA)			
Potência Nominal (kVA)	50	60	125
Corrente Nominal Alternada (A)	130	160	331
Corrente Máxima Alternada (A)	144	178	388
Tensão de Saída Trifásica	220		
Frequência Nominal	60Hz		
Fator de Potência	0,9 indutivo - 0,9 capacitivo		
Distorção Harmônica Total	<3%		
Eficiência Máxima	97,8%		

Fonte: Próprio Autor.

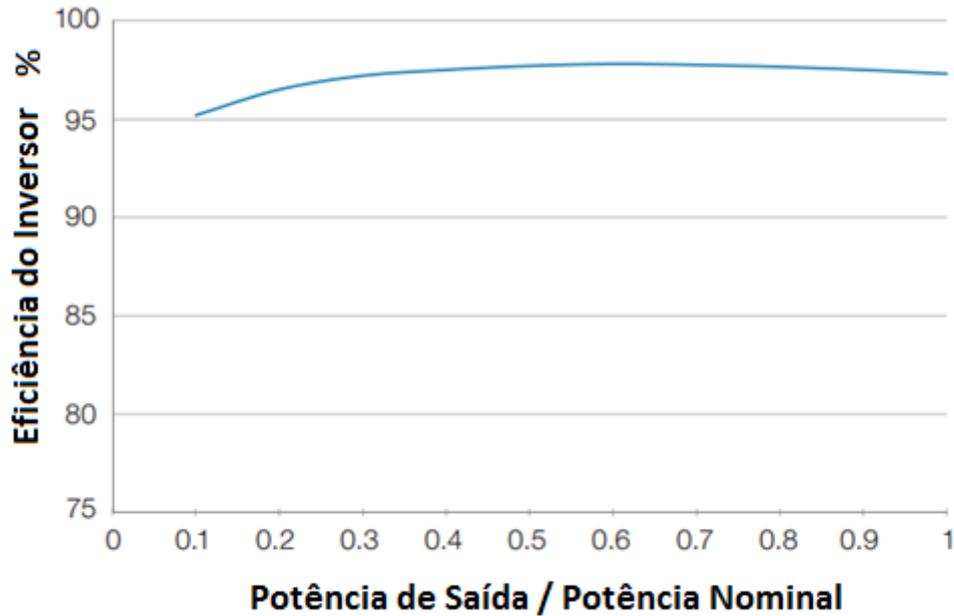
Tabela 9: Comparação Entre Arranjo e Inversor.

Parâmetros	Valores de Entrada do Inversor	Parâmetros do Arranjo
Tensão	800,0	432,6
Corrente	180,0	117,4

Fonte: Próprio Autor

$$FC = \frac{E}{P_N t} \quad (2)$$

Figura 19: Rendimento do Inversor em Função da Potência de Saída pela Potência Nominal.



Fonte: Adaptado (WEG, 2015).

A partir de um fator de capacidade de referência para projetos solares, é possível estimar a energia produzida conhecendo apenas a potência nominal do projeto. Fatores de capacidade típicos de projetos solares variam de 12% a 16%, sendo adotado no cálculo o valor de 15% que é uma referência do LABSOL-UFRGS.

O segundo método envolve o cálculo de energia a partir da radiação solar incidente no local e das perdas e eficiências associadas ao projeto. O cálculo da energia produzida por um painel é dada pela Equação (3), em função da irradiação solar, multiplicada pela área total dos painéis e pela eficiência de conversão dos painéis.

$$E_{\text{painéis}} = A_{\text{painéis}} G_{\text{solar}} \eta_{\text{painéis}} \quad (3)$$

Destaca-se que os fabricantes dos painéis costumam fornecer duas eficiências testadas para duas condições diferentes, STC e NOCT. As condições STC são condições quase ideais,

que não são atingidas em projetos reais. Já as condições NOCT se aproximam às condições reais, que consideram a perda de potência conforme o aumento da temperatura do painel e serão adotadas para este estudo.

Para estimar a energia que é fornecida à rede elétrica, ainda temos que considerar as perdas elétricas do cabeamento e do inversor, além de outras perdas devido a sombras e efeitos de temperatura. Desse modo, a Equação 4 apresenta a energia injetada na rede como função das eficiências do inversor, das perdas no cabeamento e da eficiência do arranjo.

$$E_{rede} = E_{painéis} \eta_{painéis} \eta_{cabos} \eta_{arranjo} \quad (4)$$

Para essas eficiências são utilizados valores típicos para as perdas elétricas, fornecidos pela empresa SICES. O estudo mais detalhado sobre considerações de sombra sobre o arranjo deve ser feito em um estudo posterior, onde a reforma do telhado já tenha sido planejada. Assim, na Tabela 10 estão apresentados os valores das eficiências utilizadas nos cálculos.

Tabela 10: Eficiências Utilizadas na Estimativa da Geração de Energia Elétrica.

Eficiência NOCT do painel	15,0%
Eficiência do inversor (máx. 97,3%)	95,0%
Eficiência de perdas elétricas	98,0%
Eficiência do arranjo, sombras	95,0%

Fonte: Próprio Autor.

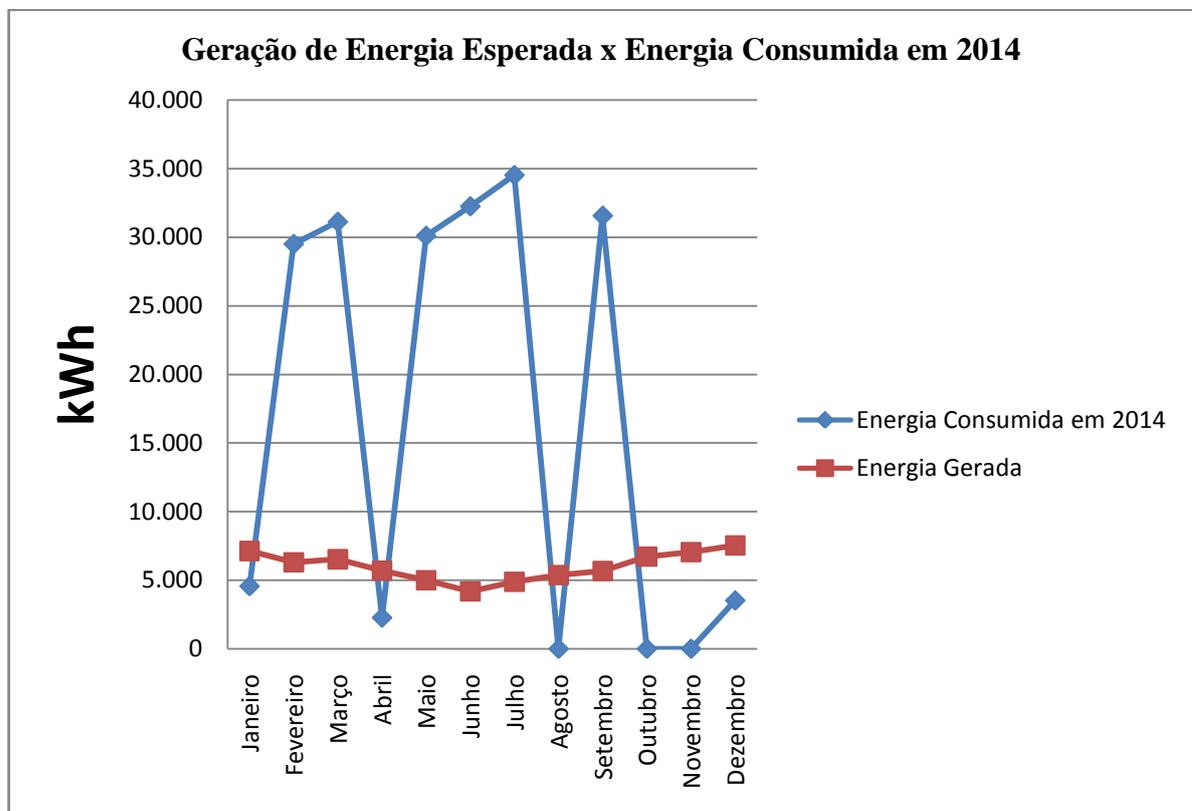
Para o cálculo simplificado, utilizando a referência do fator de capacidade de 15%, obtém-se uma estimativa de produção anual de energia do sistema de 60,5 kWp, que é de 79.893.324 kWh. Utilizando uma média mensal simples obtemos o valor de 6.657.777 kWh.

Para o segundo método de cálculo, serão utilizadas as médias das radiações diárias da Tabela 6, e a partir desses valores médios diários obteremos os valores mensais e anuais de geração de energia bruta dos painéis. Aplicando as eficiências da Tabela 10, obtém-se a energia injetada na rede pelo sistema de 60 kWp. Os valores obtidos pelo sistema para as

estimativas da produção média anual e das médias mensais estão apresentados na Tabela 11 e no gráfico da Figura 20.

Calculando o fator de capacidade do sistema, chega-se a um valor de aproximadamente 14,8%. Esse valor é muito próximo do valor utilizando o cálculo simplificado. Com essa geração de energia média, reduz-se um pouco mais que 25% do total da energia demandada na casa de bombas.

Figura 20: Geração de energia estimada



Fonte: Próprio Autor.

Tabela 11: Valores obtidos utilizando as eficiências do sistema.

Mês	Nº dias	Radiação Inclinada Mensal kWh/(m ² .mês)	Radiação Total dos Painéis kWh/mês	Energia Bruta dos Painéis kWh/mês	Energia Líquida para a Rede kWh/mês
Janeiro	31	167,8	58730	8809	7791,56
Fevereiro	28	148,4	51940	7791	6890,75
Março	31	153,6	53760	8064	7132,20
Abril	30	134,1	46935	7040	6226,75
Maiο	31	117,5	41125	6168	5455,95
Junho	30	98,4	34440	5166	4569,07
Julho	31	114,9	40215	6032	5335,22
Agosto	31	126,4	44240	6636	5869,21
Setembro	30	133,4	46690	7003	6194,24
Outubro	31	158,3	55405	8310	7350,44
Novembro	30	165,8	58030	8704	7698,69
Dezembro	31	177,4	62090	9313	8237,32
Total (kWh/ano)	365	1696	593600	89040	78751,43
Média (kWh/mês)	30,4	141,3	49467	7420	6562,62

Fonte: Próprio Autor.

4 PROJETO ELÉTRICO

4.1 CONEXÃO DE MICROGERAÇÃO DISTRIBUÍDA À REDE

Uma vez tendo o dimensionamento do projeto pronto resta detalhá-lo para obter o custo real do sistema como um todo. Esse sistema deve respeitar certos padrões, especificados pela distribuidora local. No caso da casa de bombas, a distribuidora local é a AES-SUL. Logo, para os procedimentos de conexão, serão seguida a norma NTD 014.001 (AES-SUL, 2012).

A norma tem como objetivo estabelecer características básicas para a conexão da rede elétrica da AES-SUL com os sistemas de microgeração e minigeração distribuída. Isso é obtido explicitando padrões de outras regras, como a NBR5419, IEX 62109-2, de forma a simplificar as diretrizes que devem ser seguidas. Algumas definições dos principais termos utilizados pela norma estão apresentados na Tabela 12. Esses termos foram estabelecidos no PRODIST.

Tabela 12: Definição dos Termos.

Acessada	Distribuidora de energia elétrica em cujo sistema elétrico o Acessante conecta suas instalações.
Acessante	Consumidor, central geradores, distribuidora, agente importador ou exportador de energia, cujas instalações se conectem ao sistema de distribuição, individualmente ou associado a outros.
Acesso	Disponibilização do sistema elétrico de distribuição para a conexão de instalações de unidade consumidora, central geradora, distribuidora, ou agente importador ou exportador de energia, individualmente ou associados, mediante o ressarcimento dos custos de uso e, quando aplicável, conexão.
Acordo operativo	Acordo celebrado entre o Acessante e a AES SUL, que descreve e define as atribuições, responsabilidades e o relacionamento técnico-operacional e comercial do ponto de conexão e instalações de conexão.

Fonte: (AES SUL, 2015).

A AES-SUL define que projetos com potência de pico instalada abaixo de 75 kW devem ser instalados a baixa tensão. O projeto da Casa de Bombas possui 60,5 kWp e deverá ser instalado na faixa de baixa tensão. No entanto, o local tem acesso à média tensão devido à grande potência das bombas. Assim, a geração deve ser conectada ao barramento de baixa tensão dos transformadores. Não seria necessário, portanto, criar um novo ponto de acesso.

4.2 ENVIO DA PROPOSTA DE CONEXÃO

Ao ter o projeto pronto, deve ser feita uma solicitação de acesso à rede de distribuição da ANEEL por meio de correspondência registrada. Nessa solicitação, devem estar preenchidos os anexos I, II, III ou IV que podem ser encontrados na página da Acessada, além do Documento de Responsabilidade Técnica, fornecido pelo Conselho Regional habilitador, e da Licença Ambiental de Operação, ou dispensa da mesma, emitida pelo órgão ambiental responsável.

Essa documentação deve conter no mínimo: Ficha de Dados Cadastrais do Empreendimento conforme anexo IV; Formulário para Registro do empreendimento na ANEEL, conforme anexos I, II, III ou IV; Indicação do ponto de conexão pretendido, se existente; Projeto das instalações de conexão, incluindo memorial descritivo, localização, arranjo físico, esquemas e demais itens relacionados em Requisitos de Projeto.

Caso seja enviada a documentação para a Solicitação de Acesso e falem documentos, a AES-SUL notificará o Acessante que faltam documentos e quais são eles.

Ao receber a Solicitação de Acesso, a Acessada deve emitir um documento formal de nomeado Parecer de Acesso. Nele estão contidas as informações referentes às condições de acesso, indicando as características na Tabela 13. O parecer de acesso deve ser enviado no máximo em 30 dias após o recebimento da Solicitação de Acesso, senão forem necessárias obras no sistema de distribuição. Caso sejam necessárias obras, o prazo é estendido até 180 dias após o recebimento.

Tabela 13: Informações do Parecer de Acesso.

Definição do ponto de conexão.
Características do sistema de distribuição acessado e do ponto de conexão, como tensão nominal e características de desempenho.
A relação das obras e serviços necessários no sistema de distribuição acessado, com a informação dos prazos para sua conclusão, especificando as obras de responsabilidade do Acessante e aquelas de responsabilidade da Acessada.
Informações gerais relacionadas ao ponto de conexão.
Os modelos dos contratos a serem celebrados.
As tarifas de uso aplicáveis.
As responsabilidades do Acessante.

Fonte: AES SUL, 2015.

Uma vez que o Acessante atender as obras que foram solicitadas, deverá comunicar a AES-SUL para marcar uma vistoria e, conseqüentemente, obter a Liberação de Operação. Esse agendamento deve ser marcado no mínimo com 15 dias de antecedência. Para centrais geradoras classificadas como microgeração conectadas por inversor, o mesmo deve estar certificado pelo INMETRO.

Tabela 14: Liberação para operação em teste.

Quitação pelo Acessante de todos os débitos com a AES Sul relacionados ao acesso da central geradora.
Todos os projetos aprovados.
Estarem concluídas todas as obras referentes ao processo de conexão.
Em caso de obras no sistema elétrico executadas por terceiro, as instalações deverão estar incorporadas pela AES Sul.
Apresentação da Licença Ambiental de Operação ou dispensa, emitida pelo órgão ambiental.
Assinatura dos Contratos e do Acordo Operativo ou Relacionamento Operacional.
Conformidade das instalações com o Projeto.

Fonte: AES SUL, 2015.

No caso da microgeração, a aprovação do ponto de conexão será concedida pelo relatório da vistoria. Uma vez aprovada, há duas etapas a mais para ocorrer a liberação: a Liberação para operação em teste e a Liberação para operação comercial. Em cada etapa são exigidos diferentes procedimentos, esses estão apresentados nas Tabelas 14 e 15.

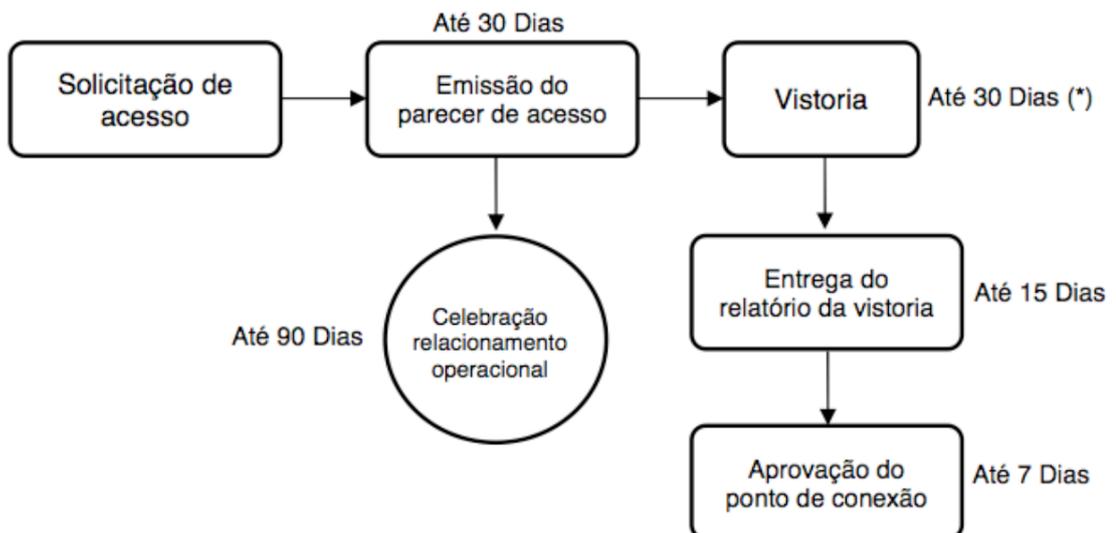
Tabela 15: Liberação para operação comercial.

Operação satisfatória durante o período de testes.
Apresentação da versão "como construído" dos projetos.
Inexistência de pendências de ordem técnica e comercial.
Regularidade de documentação perante ANEEL, incluindo o ofício.

Fonte: AES SUL, 2015.

Para exemplificar o processo de liberação, na Figura 21 está representado um fluxograma o qual indica a sequência de ações para obter a aprovação de conexão com a rede.

Figura 21: Fluxograma etapas do processo de liberação de conexão

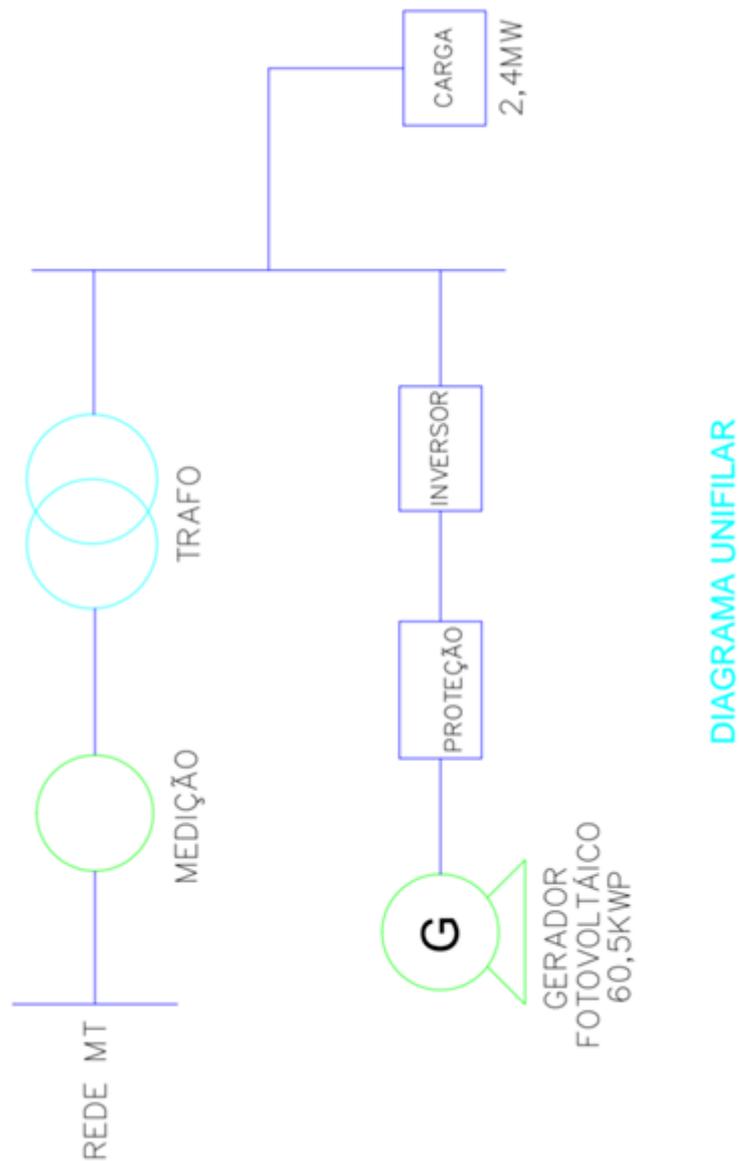


Fonte: (Aneel)

4.3 DIAGRAMA UNIFILAR

Dois dos principais documentos da solicitação são o Diagrama Unifilar e Diagrama Esquemático, pois o dimensionamento da instalação elétrica e sua proteção baseiam-se nos mesmos. O Diagrama Unifilar do projeto está representado na Figura 22.

Figura 22: Diagrama Unifilar.



Fonte: Próprio Autor.

4.4 REQUISITOS DE MEDIÇÃO

As entradas dos sistemas, como a disposição das caixas de medições e transformadores para instrumento, devem atender às especificações da norma RIC MT. Na norma, estão descritos quais materiais devem ser utilizados nos painéis de medição, assim como quais modelos utilizar dependendo da posição da instalação dos mesmos.

De forma geral, na entrada do medidor deve ser instalado um elemento de seccionamento e desconexão considerando o fluxo de geração de energia. 'Este elemento trata-se de uma chave seccionadora manual, sem fusíveis e com dispositivo cadeado, instalado junto à entrada de serviço, de forma que fique acessível à AES-Sul para eventual necessidade de desconexão da central geradora durante manutenção em seu sistema.'

Os aparelhos de medição devem atender as mesmas especificações dos aparelhos já instalados, pois serão instalados na média tensão e pertencem ao mesmo nível de tensão. Deve-se acrescentar o medidor bidirecional que seja capaz de distinguir a energia elétrica ativa consumida da energia elétrica ativa injetada. A responsabilidade da troca do medidor pertence à Acessada.

4.5 REQUISITOS DE PROTEÇÃO

Na Figura 23 está representado um exemplo de proteção exigido pela AES-Sul; nele estão contidos os pontos de atuação para os geradores conectados ao sistema de distribuição.

Os requisitos de proteção que o inversor deve cumprir foram descritos na seção 2.4.2.2. Vale ressaltar que o 'inversor deve possuir um elemento de interrupção automático acionado pela proteção do mesmo. Deve ser instalado um equipamento de seccionamento visível na entrada de serviço entre o disjuntor da unidade consumidora e as instalações do Acessante'.

4.6. ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Nesta seção, será realizado o estudo de viabilidade econômica, baseando-se em indicadores econômicos utilizados para análise de projetos, como: VPL (valor Presente Líquido), o TIR (Taxa Interna de Retorno) e o Método do tempo de recuperação de capital (Payback). Todos os indicadores e suas formulações foram retirados de Filomena, 2013.

O valor de todos os equipamentos listados até então serão incluídos como investimento inicial. É importante ressaltar que o objetivo deste trabalho não é entregar o projeto elétrico pronto, logo alguns itens específicos estão contemplados em divisões maiores. Os valores do investimento inicial total estão computados na Tabela 16.

Para o valor da instalação elétrica, mão de obra e projeto, foram utilizados os valores utilizados pela empresa SICES, especializada em projetos de energia solar. Assim pode-se atribuir valores reais de mercado para esses itens do orçamento.

Um dos mais importantes fatores neste estudo é a tarifa da energia elétrica cobrada pela Acessada. Em seguida, serão analisadas as tarifas aplicadas pela AES-SUL nos últimos anos. O aumento anual dessa tarifa também será levado em consideração, baseado no aumento médio dos últimos anos.

Serão considerados dois cenários para o cálculo do aumento médio da tarifa. O primeiro cenário baseia-se no aumento da tarifa anunciada pela AES Sul de 6,95% do ano de 2015, aprovada pela ANEEL. No entanto, ao analisarmos o aumento da tarifa dos últimos anos, nota-se que o valor real superou muito esses 7%. Em março de 2015, a ANEEL aprovou revisão extraordinária que aumentou a tarifa em 39,5%. Assim, justifica-se estudar um cenário economicamente pessimista, com um aumento superior à média anunciada. Para esse cenário, escolheu-se trabalhar com um aumento médio de 10% ao ano.

Tabela 16: Investimento Inicial.

Item	Empresa Consultada	Modelo	Custo Total (R\$)
Sistema			
Fotovoltaico - Módulos e Inversores	WEG	-	274.833,00
Instalação Elétrica	SICES	-	40.000,00
Mão de Obra e Projeto	SICES	-	47.224,95
Reforço Estrutural	-	-	25.000,00
Total	-	-	387057,95

Fonte: Próprio Autor.

4.6.1 VPL

O método VPL é um dos mais utilizados para o estudo da viabilidade de projetos. A metodologia desse tipo de estudo é calcular o valor presente líquido de um projeto através da diferença entre o valor presente das entradas líquidas de caixa do projeto e o investimento inicial requerido para iniciar o mesmo. O VPL é calculado da seguinte forma:

$$VPL = I_0 + \frac{R_1 a}{(1+i)^1} + \frac{R_1 a^2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{R_1 a^n}{(1+i)^n} \quad (4)$$

Onde:

I_0 = investimento inicial

R_1 = receita (valor anual)

i = TMA (Taxa Mínima de Atratividade)

a = aumento anual médio da tarifa de energia elétrica

$n = \text{vida útil estimada}$

O VPL pode assumir três diferentes significados. Obtendo um valor positivo de VPL, pode-se afirmar que o investimento no projeto é economicamente viável; se o VPL for nulo, significa que fazer o investimento ou não é indiferente. E por último, caso o valor do VPL seja negativo, o investimento não é viável.

O TMA (Taxa Mínima de Atratividade) representa o retorno mínimo que uma empresa ou pessoa física exige para a locação do capital. Para o caso da Casa de Bombas, é adotado o valor de 14,25% referente à Taxa Selic.

Considerou-se como tempo de vida útil um período de 20 anos. Embora o fornecedor informe uma garantia de 25 com até 80% do rendimento inicial, optou-se por diminuir esse tempo para atribuir à queda do rendimento em um período total.

Para o cenário A, foi utilizado o valor de 6,55% para o aumento anual da tarifa de energia elétrica. Esse valor foi obtido do aumento anual da tarifa da AES-Sul durante o ano de 2015. Também se usou como comparação um estudo realizado pelo SINDAST em 2013, que contempla o período de 1997 a 2007. O valor de receita considera o valor economizado pela geração fotovoltaica, considerando que esse valor é diminuído pelo ICSM, ao qual foi atribuído um valor de 30%.

Para o cenário B, foi utilizado o valor de 10% para o aumento anual da tarifa de energia elétrica. Esse valor foi obtido considerando o aumento real da tarifa da AES-Sul durante os anos de 2015, contemplado a revisão extraordinária da tarifa de 39,5%. O valor de receita considera o valor economizado pela geração fotovoltaica, utilizando a mesma metodologia do primeiro cenário.

Para ambos os cenários, foram obtidos valores positivos de VPL. No primeiro cenário, foi obtido um VPL positivo de 35.071,17. Já para o segundo cenário, foi obtido um VPL de 170.613,32. Isso demonstra que, para ambos cenários, o investimento é economicamente viável.

4.6.2 TIR

O método TIR calcula um valor de taxa que torne o VPL nulo. Obtendo essa taxa, compara-se ela com a TMA da empresa. Quando o valor de TIR calculado superar o TMA, significa que o projeto é viável; já se ele for menor, o projeto não será viável. Este método é muito similar ao VPL; a diferença consiste nas diferentes variáveis de entrada para poder fazer uma análise com a mesma função.

$$0 = I_0 + \frac{R_1 a}{(1+i)^1} + \frac{R_1 a^2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{R_1 a^n}{(1+i)^n} \quad (5)$$

Utilizando os mesmos valores que no cálculo do VPL, obteve-se um TIR de aproximadamente 15,18% para o primeiro cenário. Já para o segundo cenário, obtemos um TIR de 18,91%. Esse valor é maior que a TMA estipulada, o que mais uma vez indica que os investimentos são economicamente viáveis.

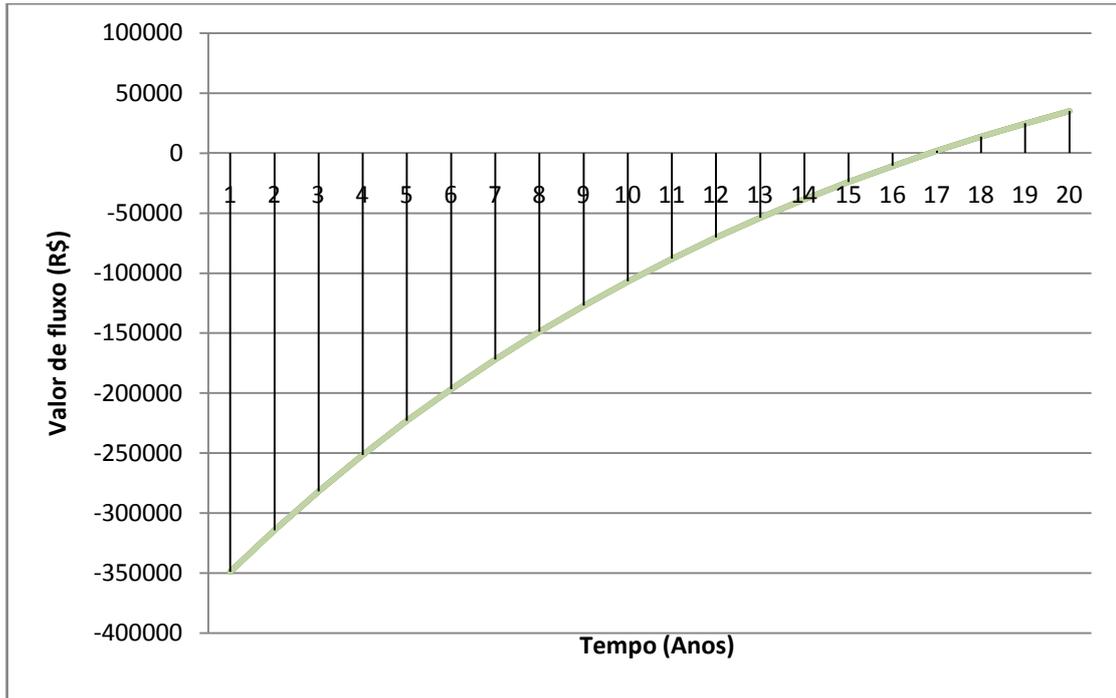
4.6.3 Payback

O método de Payback calcula o tempo de retorno do investimento inicial realizado. É um método limitado no sentido que sua análise não engloba correções monetárias, riscos, entre outros fatores. Existe o método do Payback Modificado que leva em consideração a TMA, no entanto, esse indicador não é muito utilizado pelos economistas, pois acaba não sendo determinante por conta própria. Assim, escolheu-se trabalhar só com o método do Payback simples para obtermos o tempo de retorno de investimento.

$$\sum_n R_n = I_0 \quad (6)$$

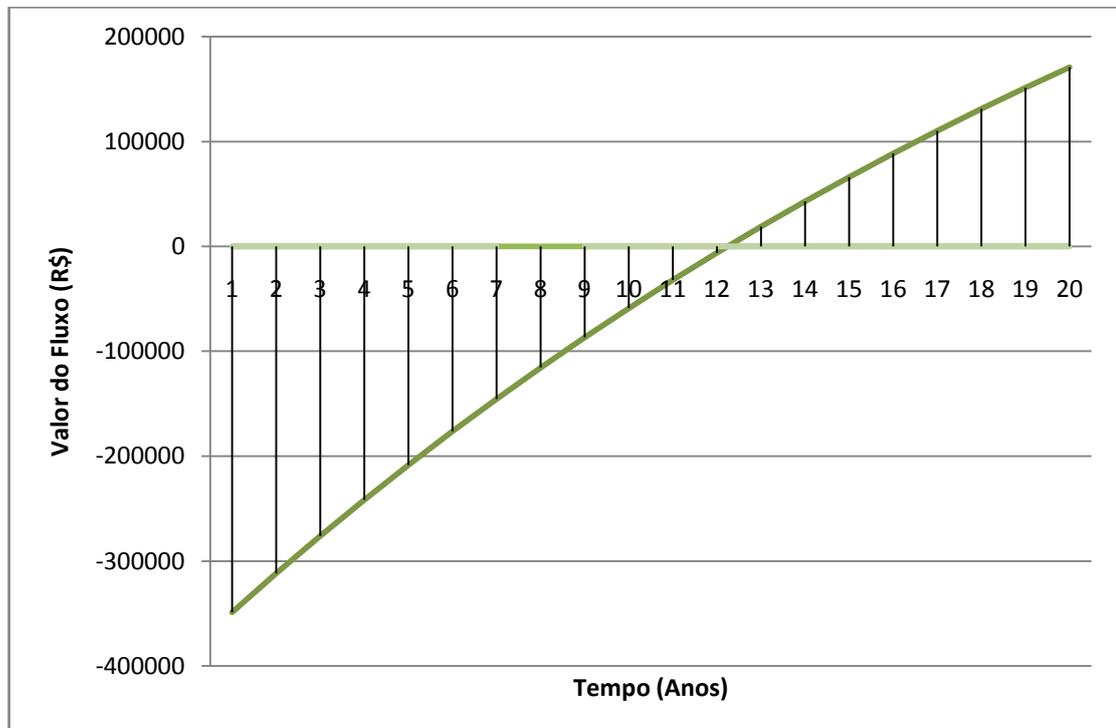
O tempo de retorno para o primeiro e para o segundo cenários estão apresentados nas Figuras 24 e 25 respectivamente. O segundo cenário apresenta um período de retorno de 13 anos. Já o primeiro cenário possui um período maior, que corresponde a 17 anos.

Figura 24: Tempo de Payback Cenário A



Fonte: Próprio Autor.

Figura 25: Tempo de Payback do Segundo Cenário.



Fonte: Próprio Autor

Tabela 17: Tempo de Retorno do Cenário A e B

Tempo	Fluxo de Caixa Cenário A	Fluxo de Caixa do Cenário B
1	-349929,9	-348727,7
2	-315228,2	-311742,4
3	-282794,3	-276054,8
4	-252479,9	-241619,4
5	-224146,7	-208392,3
6	-197665	-176331
7	-172913,9	-145394,7
8	-149780,4	-115543,9
9	-128158,6	-86740,47
10	-107949,9	-58947,69
11	-89061,75	-32130,1
12	-71408	-6253,47
13	-54907,94	18715,2
14	-39486,18	42807,78
15	-25072,24	66055,01
16	-11600,26	88486,54
17	991,31	110131,01
18	12760,01	131016,02
19	23759,61	151168,22
20	34040,39	170613,32

Fonte: Autor

4.6.4 Comparação dos Cenários

Os indicadores analisados apontam que o investimento é viável para ambos os cenários. Com TIR's de 15,18 e 18,9 %, os cenários analisados possuem uma taxa de atratividade maior que a poupança, que em 2014 chegou a 7,16%. No entanto, ao analisar o mercado, nota-se uma disparidade com os projetos atualmente realizados. De acordo com

engenheiros da SICES, os projetos vendidos e instalados possuem em média um tempo de retorno entre seis e oito anos.

Tomando esses valores como referência, mesmo considerando um cenário pior economicamente, o investimento ainda possui um tempo de retorno demasiadamente alto para despertar um investimento real.

5 CONCLUSÃO

5.1 DISCUSSÃO

Nos dois cenários analisados, a taxa de atratividade foi maior que a da poupança no ano de 2014. Porém, como analisado nos resultados, o tempo do retorno não é satisfatório se comparado a projetos comercializados atualmente. Mesmo no pior cenário econômico, para o qual o projeto se torna mais viável, o tempo do retorno seria de 13 anos, que é um período extenso, ainda mais em obras públicas, onde o planejamento a longo prazo não costuma ser tão visado quanto resultados a curto e médio prazo.

Outro aspecto importante é o de que o período atual da economia não é favorável para a instalação de sistemas fotovoltaicos, pois, como a grande maioria dos módulos ainda é importada, os custos importação têm um impacto significativo sobre a viabilidade do uso desta tecnologia. Neste sentido, deve-se mencionar que de 2014 para 2015 o aumento nos preços dos módulos superou os 35%.

O incentivo do desenvolvimento da energia fotovoltaica no país tem ocorrido gradativamente, mas faltam alguns pontos que ainda ficam pendentes. Os inversores e os módulos fotovoltaicos são isentos de ICMS e IPI, o que constitui um fator favorável. No entanto, alguns aspectos muito importantes no projeto de micro e minigeração distribuída ainda necessitam de reformas para alcançar a viabilização de investimentos nesta área. Neste sentido, a questão principal relacionada à microgeração é a necessidade de pagar impostos mesmo sobre a parcela da energia consumida que corresponde à quantidade de energia devolvida pela microgeração à rede. Nos estados do Maranhão, Bahia, Mato Grosso, São Paulo, Pernambuco, Goiás, Rio Grande do Norte, Tocantins, Ceará e Distrito Federal já não é mais realizada a cobrança deste imposto. No Rio Grande do Sul, com o valor do ICMS para a energia elétrica em 30%, tal imposto tem um grande impacto nos indicadores de viabilidade de projetos de microgeração. Por exemplo, no primeiro cenário analisado no presente trabalho, se não fosse cobrado o ICMS sobre o que foi gerado, o tempo de retorno do projeto cairia de 17 para 10 anos.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

O trabalho abordou o pior caso de geração em termos de não considerar o fluxo direto que pode ocorrer dos geradores a carga. Para isso, seria necessário um estudo do histórico do consumo de energia da Casa de Bombas em função do tempo. Comparando isso com a irradiação solar ao longo do dia, seria possível considerar esse fluxo direto de energia que não chega à rede e, assim, acaba não sendo contabilizada pela concessionária. Portanto, sugere-se que os responsáveis pela instalação estudada neste trabalho gerem um banco de dados com a dados de distribuição de consumo por hora ao longo dos turnos da manhã e da tarde. Estes dados permitiriam um aumento confiabilidade das previsões de viabilidade efetuadas no presente trabalho.

Um aspecto importante a salientar é que além de ser um investimento econômico, um investimento em energia renovável também é um investimento em marketing. Com a preocupação sócio-ambiental sendo amplamente discutida, a certificação ambiental é sempre um dos itens em destaque usados pelas empresas que comercializam esse tipo de geração. Portanto, seria importante estabelecer indicadores de forma tal que esta variável possa ser inserida na análise de viabilidade de projetos de microgeração.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. RESOLUÇÃO NORMATIVA 482. BRASÍLIA, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16149 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS - CARACTERÍSTICAS DA INTERFACE DE CONEXÃO COM A REDE ELÉTRICA DE DISTRIBUIÇÃO. BRASÍLIA, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 62116 PROCEDIMENTO DE ENSAIO DE ANTI-ILHAENTO PARA INVERSORES DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A REDE ELÉTRICA. BRASÍLIA, 2012.

AES SUL. NORMA TÉCNICA NTD 014.001 CONEXÃO DE MINIGERAÇÃO E MICROGERAÇÃO DISTRIBUÍDA. PORTO ALEGRE, 2012.

CASARO, M. MARCIO; MARTINS, C. DENIZAR. PROCESSAMENTO ELETRÔNICO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM SISTEMAS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA, UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ. 2010.

CHAUDHARI, PUSHKAR; RANE, PARIS; BAWANKAR, AMIT; SHETE, AMIT; SHETE, PRANIT; KALANGE, KUNDAN; MOGHE, ARCHIT; PANDA, JYOTIPRAKASH; KADROLKAR, ADITYA; GAIKWAD, KISHOR; BHOR, NAVNATH; NIKAM, VAIBHAV. DESIGN OF CONTROL SYSTEMS FOR GRID INTERCONNECTION AND POWER CONTROL OF A GRID TIE INVERTER FOR MICROGRID APPLICATION. PUNE COLLEGE OF ENGINEERING. 2015.

COLAFERRO, R. JOSÉ; COLAFERRO, O. LUIS. TIPOS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS. BLUE-SOL EDUCACIONAL. 2012.

TANCREDI, MARCELO; ABBUD, A. OMAR. POR QUE O BRASIL ESTÁ TROCANDO AS HIDROELÉTRICAS E SEUS RESERVATÓRIOS POR ENERGIA MAIS CARA E POLUENTE. NÚCLEO DE ESTUDOS E PESQUISA, SENADO FEDERAL. 2013.

FILOMENA, P. TIAGO. **NOTAS DE AULA ENGENHARIA ECONÔMICA.** UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. 2013.

GNOATTO, ESTOR; DALLACORT, RIVANILDO; RICIERI, P. REINALDO; SILVA, L. SUEDEMIO; FERRUZI, YURI. **DETERMINAÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA DE UM PAINEL FOTOVOLTAICO EM CONDIÇÕES REAIS DE TRABALHO.** UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ. 2005.

GOTTFRIED, H. BAUER. **PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONVERSION.** SPRINGER. 2015.

PEREIRA, B. ENIO; MARTINS, R. FERNANDO; ABREU, L. SAMUEL; RUTHER RICARDO. **ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR.** SWERA. 2006.

PINHO, T. JOÃO; GALDINO, A. MARCO. **MANUAL DE ENGENHARIA PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.** GTES. 2014.

PITOMBO, O. SÉRGIO. **PROTEÇÃO ADAPTATIVA ANTI-ILHAMENTO DE GERADPRES SÍNCRONOS DISTRIBUÍDOS.** ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. 2010.

POMÍLIO, J. A. **ELETRONICA DE POTENCIA PARA GERAÇÃO, TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.** UNICAMP. 2013

RODRIGUES, J. LETÍCIA. **NOTAS DE AULA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.** UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. 2015.

TOLMASQUIM, T. MAURÍCIO. **ANÁLISE DA INSERÇÃO DA GERAÇÃO SOLAR NA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA.** EPE. 2015.

ZILLES, ROBERTO; MACÊDO, N. WILSON; GALHARDO, A. B. MARCOS; OLIVEIRA, H. F. SÉRGIO. **SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA.** OFICINA DE TEXTOS. 2012.

REVISTA FOTOVOLT EM ELETRICIDADE MODERNA. ANO 1 VOLUME 1. 2015.