

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA
ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

SISTEMAS FOTOVOLTAICOS OFF-GRID PARA USO EM
BOMBEAMENTO DE ÁGUA COM INVERSOR DE
FREQUÊNCIA EM SUBSTITUIÇÃO AO GERADOR DIESEL:
UM ESTUDO DE CASO NO SERTÃO DA BAHIA

MARCEL TAVARES COELHO

São Paulo
Dezembro 2017

**PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA
ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**SISTEMAS FOTOVOLTAICOS OFF-GRID PARA USO EM
BOMBEAMENTO DE ÁGUA COM INVERSOR DE
FREQUÊNCIA EM SUBSTITUIÇÃO AO GERADOR DIESEL:
UM ESTUDO DE CASO NO SERTÃO DA BAHIA**

MARCEL TAVARES COELHO

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - PECE, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Especialista em Energia Renovável, Geração Distribuída e em Eficiência Energética

Orientador: Prof. Dr. Gustavo de Andrade Barreto

São Paulo
Dezembro 2017

EU AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES
TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

Coelho, Marcel Tavares

Sistemas Fotovoltaicos Off-Grid para uso em bombeamento de água com inversor de
frequência em substituição ao gerador diesel: Um estudo de caso no sertão da Bahia / Coelho,
Marcel Tavares

Orientador: Prof. Dr. Gustavo de Andrade Barreto - São Paulo, 2017.

79f.: il.; 30 cm.

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 fotovoltaica 2. Bombeamento em comunidades 3. Aplicações Off-grid 4. Método
Topsis 5. Inversor de Frequência

I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. PECE – Programa de Educação Continuada
em Engenharia.

DEDICATÓRIA

À minha esposa e cachorros (Borges, Nina e Pulga), por me acompanhar e incentivar nas noites de execução deste trabalho e durante todos meus estudos para concluir com êxito as diversas disciplinas do curso.

AGRADECIMENTOS

À Deus, especialmente, por me dar o devido ânimo, dedicação e força para seguir sempre adiante na execução, pesquisa e elaboração do trabalho, sem importância ao tamanho da dificuldade em todos os períodos do curso e da vida, mesmo com todas as atividades rotineiras profissionais.

Agradeço imensamente a minha família e esposa por suportar as diversas ausências pelo excesso de trabalho e estudos, sempre me incentivado a continuar.

Aos professores da USP, em especial ao professor Dr. Gustavo de Andrade Barreto, que com boa vontade e dedicação aceitou me orientar neste trabalho de conclusão, bem como me auxiliou de maneira incisiva e persistente, me fazendo analisar diversas situações com outras visões, contribuindo de forma honrosa na finalização deste trabalho. Aos seus e-mails de motivações, com diversos exemplos, me fazendo perseverar na execução do trabalho.

.

RESUMO

Coelho, Marcel Tavares. **Sistemas Fotovoltaicos Off-Grid para uso em bombeamento de água com inversor de frequência em substituição ao gerador diesel: Um estudo de caso no sertão da Bahia**. 2017 – 79f. Monografia – PECE – Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da USP, São Paulo.

O Brasil, mesmo apresentando uma matriz de energia elétrica majoritariamente renovável, sendo a energia hídrica predominante, possui muitos entraves econômicos e técnicos à utilização de outras fontes renováveis como energia eólica e fotovoltaica em aplicações cotidianas, visto muitas vezes as dificuldades técnicas ou estritamente falta de conhecimento da tecnologia. Assim, o objetivo deste estudo foi aplicar o sistema de bombeamento solar off-grid em poços rurais profundos existentes, sem realizar a troca do sistema de bombas completo, e sim trocando o atual uso de geradores diesel como fonte de energia elétrica para o uso de energia fotovoltaica com tecnologia off-grid. Assim a tecnologia fotovoltaica pode ser aplicada em áreas remotas e ensolaradas, locais estes onde há dificuldade em ter eletricidade, que muitas vezes apenas tem a tecnologia de geradores a diesel como forma de bombeamento de caixa d'água, causando diversos impactos ambientais, por ser uma energia fóssil e extremamente poluidora e cara. Ainda que exista a utilização da energia renovável como forma de substituir o diesel para o bombeamento da caixa d'água, o estado da arte da literatura não analisa essa substituição mantendo a bomba já existente no local com potências elevadas e altas alturas manométricas, mas sim obtendo bombas novas com tecnologias de controle que muitas vezes limitam a capacidade dos poços pela potência. Nesse contexto, o trabalho tem a finalidade de integrar tecnologias e demonstrar, através de uma análise multicritério, que a substituição do combustível diesel por outra fonte renovável em bombas instaladas, sem modificação dos equipamentos existentes, apresenta-se como uma alternativa competitiva, renovável, econômica e com grande impacto social. Para este estudo foi escolhido o Topsis (do inglês, “*Technique for Order Preference by Smilarity to Ideal Solution*”), adequado para modelar valores de critérios quantitativos conhecidos, visto que avalia o desempenho das alternativas através da similaridade com a solução ideal.

Palavras-chave: Energia fotovoltaica, Bombeamento em comunidades, Aplicações Off-grid, Método Topsis, Inversor de Frequência.

ABSTRACT

Coelho, Marcel Tavares. **Off-Grid Photovoltaic Systems for use in water pumping with frequency inverter to replace the diesel generator: Case study in Bahia backlands.** 2017 – 79 pages. Monograph – PECE – Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da USP, São Paulo.

Brazil, even though it presents a mostly renewable matrix of electricity, but hydric, still has many obstacles (economic and technical), in use of photovoltaic energy in everyday applications, whether off-grid or on-grid, where often seen the difficulties apply techniques or strictly lack of knowledge of the technology. Thus, the objective of this study was apply the off-grid solar pumping system to existing deepwater wells, without performing the complete pump system change, but only replacing the current use of diesel generators as an electric source for the use of panels photovoltaic systems with off-grid technology. This photovoltaic technology was applied in remote sunny locations, great for generating solar energy, where there are difficulties in having electricity, which often uses the technology of diesel generators as the way to pump water, causing various impacts environmental, for being a fossil energy and extremely polluting and expensive. Although there is the use of renewable energy as a way of replacing diesel to pump the water tank, the state of the art literature does not analyze this replacement keeping the existing pump in place with high powers and high manometric heights, but getting new pumps with control technologies that often limit the capacity of the wells in power way to analysis. In this context, the purpose of the work is to integrate technologies and demonstrate, through a multicriteria analysis, that the substitution of diesel fuel by another renewable source, in installed pumps, without modification of the existing equipment, presents itself as a competitive, renewable, economic and socially. For this study, Topsis ("Technique for Order Preference by Simple to Ideal Solution") suitable for modeling precisely quantitative criteria values, since it evaluates the performance of the alternatives through the similarity with the ideal solution.

Keywords: Photovoltaic energy, Pumping in villages, Off-grid applications, Topsis method, Frequency Inverter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Capacidade Global de captação de Energia Solar.....	16
Figura 2.1 - Primeiros testes práticos com células solares na Bell Laboratories.....	22
Figura 2.2 - Lançamento do satélite Vanguard 1 com seis placas solares.....	22
Figura 2.3 - Placa Monocristalina (a) Placa Policristalina (b) Placa de filme fino(c).....	23
Figura 2.4 - Ilustração do método de testes em uma placa fotovoltaica em STC.....	25
Figura 2.5 - Ilustração do método de dimensionamento em uma placa fotovoltaica em NOCT.....	26
Figura 2.6 - Características construtivas do motor CC e motor CA.....	28
Figura 2.7 - Exemplo de uma instalação com bomba de corrente contínua (pequena potência) ...	29
Figura 2.8 - Exemplo de instalação de uma bomba submersível CA de vários estágios.....	30
Figura 2.9 - Estágios de um inversor de frequência.....	32
Figura 2.10 – Forma de ligação de um inversor de frequência Solar nas placas.....	35
Figura 2.11 - Filtro Senoidal em bancada (a) Filtro dV/dt instalado em painel a parte.....	41
Figura 2.12 - Esquemático completo da ligação de bombeamento solar.....	43
Figura 2.13 - Esquema elétrico de instalação dos equipamentos no bombeamento solar.....	43
Figura 2.14 - Exemplo de estruturas de fixação para estacionamento.....	45
Figura 2.15 - Exemplo de cabeamento de corrente contínua.....	45
Figura 4.1 - Localização de Muquém de São Francisco na Bahia e no Brasil.....	54
Figura 4.2 - Caixa d'água de 10.000 litros para abastecimento central da comunidade.....	55
Figura 4.3 - Preço médio do diesel nos postos por capital (referência 1. Semestre 2017)	55
Figura 4.4 - Modelo do gerador diesel utilizado na comunidade.....	56
Figura 4.5 – Bomba submersa de 3CV/2,2kW.....	58
Figura 4.6 - Movimento do sol no verão e inverno.....	62
Figura 4.7 - Índice de irradiação média da cidade.....	63
Figura 4.8 – Estrutura de fixação para as placas na região, mesa com 8 placas.....	64
Figura 4.9 - Arranjo elétrico para a instalação bomba solar de 3CV / 220Vca.....	66
Figura 4.10 – Esquemático simplificado da instalação.....	67
Figura 4.11 - Arranjo de montagem civil da instalação.....	68
Figura 4.12 – Local da instalação na comunidade, com visto da caixa ao fundo.....	68
Figura 4.13 - Instalação solar na comunidade.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Média de eficiência dos painéis fotovoltaicos atuais.....	24
Tabela 2.2 - Vantagens e Desvantagens das tecnologias de placas solares.....	24
Tabela 2.3 - Comparação Condições STC e NOCT.....	27
Tabela 2.4 - Correlação de tensão da bomba, inversor de frequência e campo fotovoltaico.....	35
Tabela 4.1 - Características elétricas do gerador existente na comunidade.....	57
Tabela 4.2 - Características elétricas da bomba submersa.....	57
Tabela 4.3 - Matriz de Decisão da Fonte.....	59
Tabela 4.4 - Matriz Normalizada.....	60
Tabela 4.5 - Matriz Ponderada.....	60
Tabela 4.6 - Coeficiente de Aproximação.....	61
Tabela 4.7 - Quadro resumo da instalação solar fotovoltaica.....	67
Tabela 4.8 - Custo de implantação de sistema solar fotovoltaico.....	70

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1 - Irradiação solar mínima para iniciar o motor CC.....	31
Gráfico 2.2 - Controle da tensão/frequência do motor pelo tempo com PWM.....	34
Gráfico 2.3 - Curva de eficiência da bomba pela velocidade de bombeamento e carga.....	36
Gráfico 2.4 - Rastreamento solar conforme os diferentes níveis de irradiação solar.....	37
Gráfico 2.5 - Rastreamento solar MPPT4 com efeito sobre o sombreamento.....	38
Gráfico 2.6 - Sinal de onda de saída de um inversor solar sem filtro dV/dt	39
Gráfico 2.7 - Sinal de onda de saída de um inversor solar com filtro dV/dt	40
Gráfico 2.8 - Sinal de onda de saída de um inversor solar com filtro senoidal.....	40
Gráfico 3.1 - Mercado mundial de bombeamento solar (números pelos anos)	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

°C	Escala de grau Celsius, unidade de medida de temperatura
A	Ampére, unidade de corrente elétrica
AC	Alternating Current
AHP	Analytic Hierarchy Process
AM	Massa de Ar
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BID	Banco Internacional de Desenvolvimento
CA	Corrente Alternada
CAPEX	Despesas de capital ou investimento em bens de capital
CC	Corrente Contínua
CCi	Coeficiente de Aproximação
CERB	Companhia de Engenharia Hídrica e de Saneamento da Bahia
CO ₂	Dióxido de Carbono
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito
CV	Cavalo-Vapor, unidade de medida de potência
DC	Direct Current
DOL	Direct On-line
DR	Disjuntor Residual
DSS	Decision Support Systems
EP	Escola Politécnica
G°T	Maximun Irradiance in tests
HSP	Horas de Sol Pleno
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
Imp	Maximum Peak Current
IP	Grau de proteção de equipamentos
Isc	Short Circuit Current
I-V	Corrente x Tensão
KVA	Quilo Volt-Ampere, unidade de medida de potência aparente
kW	Quilo-Watt, unidade de potência correspondente a 10 ³ watts
kWh/m ² .dia	Quilo-Watt hora/metro quadrado por dia
m ²	Metro-quadrado, unidade de medida de área

mca	Metros de coluna d'água
MCDA	Multiple-Criteria Decision Analysis
MPPT	Maximum Power Point Tracker
NIS	Solução Ideal Negativa
NOCT	Nominal Operating Cell Temperature
PECE	Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica
PID	Controlador proporcional integral derivativo
PIS	Solução Ideal Positiva
Pmp	Maximun Peak Power
P-V	Potência x Tensão
PWM	Pulse-Width Modulation
rpm	Rotações por Minuto
STC	Standard Test Conditions
TOPSIS	Technique for order performance by similarity to ideal solution
USP	Universidade de São Paulo
V	Volt, unidade de diferença de potencial elétrico
Vmp	Maximun Peak Voltage
Voc	Open Circuit Voltage
VPL	Valor Presente Líquido
Wp	Watt pico

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 Identificação do tema.....	17
1.2 Delimitação do Trabalho	17
1.3 Objetivo da pesquisa	18
1.3.1 Objetivos gerais.....	18
1.3.2 Objetivos específicos.....	18
1.4 Metodologia de Pesquisa	19
1.5 Estrutura do trabalho.....	19
 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1 Componentes de um sistema de bombeamento d'água por energia renovável ...	21
2.1.1 Energia Solar – Placas Fotovoltaicas.....	21
2.1.2 Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos por aplicação de métodos de laboratórios (STC) e condições normais de operação (NOCT).....	25
2.1.3 Motores Elétricos	27
2.1.4 Bombas de poços	29
2.1.5 Controlador para bombeamento (controle da velocidade do motor)	30
2.1.5.1 Controlador CC/CC para bombeamento	31
2.1.5.2 Inversores de frequência para uso em bombeamento solar.....	32
2.1.5.3 Algoritmo de controle especial para otimização do ponto de trabalho	36
2.1.5.4 Filtros de saída dV/dt e proteção CC	39
2.1.5.5 Válvula Solenoide	44
2.1.5.6 Sensores de atuação.....	44
2.1.5.7 Estruturas de fixação das placas.....	44
2.1.5.8 Cabeamento corrente continua (até o inversor de frequência).....	45
2.2 Método TOPSIS para escolha da decisão do melhor método de bombeamento .	46
2.2.1 Construção do algoritmo.....	46
2.2.2 Definição dos Pesos	48

3.	ESTUDO DE MERCADO DE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO SOLAR	49
3.1	Histórico das instalações de bombeamento solar fotovoltaico	49
3.2	Bombeamento Solar no mundo	49
3.3	Bombeamento Solar no Brasil	51
4.	ESTUDO DE CASO	52
4.1	Metodologia	52
4.2	Local da pesquisa, implantação e coleta dos dados	52
4.3	Análise da comunidade e do cenário atual em campo	53
4.4	Aplicação do método Topsis para decisão do melhor método de bombeamento	58
4.5	Instalação do bombeamento solar fotovoltaico com uso de inversor solar	62
4.6	Análise financeira da instalação do bombeamento solar fotovoltaico	69
5.	ANÁLISE DOS DADOS	72
6.	CONCLUSÃO	75
	REFERÊNCIAS	76

1. INTRODUÇÃO

Diante de um cenário global de crescente demanda de energia e evidente preocupação dos países com os impactos ambientais e mudanças climáticas, diversas medidas estão sendo tomadas com a finalidade de incentivar o crescimento econômico aliado à sustentabilidade, onde cada vez mais o uso de energia renovável vem sendo colocado como solução ao uso de fontes fósseis ou poluentes.

Com o desenvolvimento em diversas indústrias, mesmo com a atual crise estabelecida em diversas localidades do mundo desde 2015, a necessidade de uso de energia elétrica no mundo vem crescendo ano a ano, no qual percebemos diariamente a necessidade de uso de fontes renováveis versus ao tradicional uso de combustíveis fósseis, tais como: diesel, petróleo e outras fontes de energia, muitas vezes queimados em caldeiras para cogeração ou geração direta. Esta energia muitas vezes é utilizada para geração de campo magnético pela aplicabilidade de geradores elétricos como fonte de energia elétrica, assim como citado por FITZGERALD, JR. e Umans (2006).

Além de todos problemas de poluição causada pelos combustíveis fósseis, um importante fator observado é o aquecimento global que o planeta Terra vem sofrendo na média de 0,076°C por cada década, conforme SPENCER da Universidade do Alabama. Assim como definido por GOLDEMBERG (2017), uma das formas de reduzir este aumento constante de temperatura, é o uso de energia solar fotovoltaica. Conforme observado na figura 1.1, na média anual a Terra recebe 80 mil vezes mais energia do Sol do que todas as outras fontes renováveis somadas podem produzir no mesmo período.

Como é de fato conhecido, a energia solar recebida pela Terra é cerca de 5 mil vezes maior do que o consumo mundial de eletricidade e energia térmica somados, que demonstra que se todas as residências do mundo possuísem instalados sistemas de geração fotovoltaica em seus locais de consumo, seríamos independentes de uso de energia fóssil no mundo, compartilhando este uso de energia com a energia hídrica durante os períodos que a energia fotovoltaica não fosse suficiente para atender a demanda exigida e nos períodos noturnos.

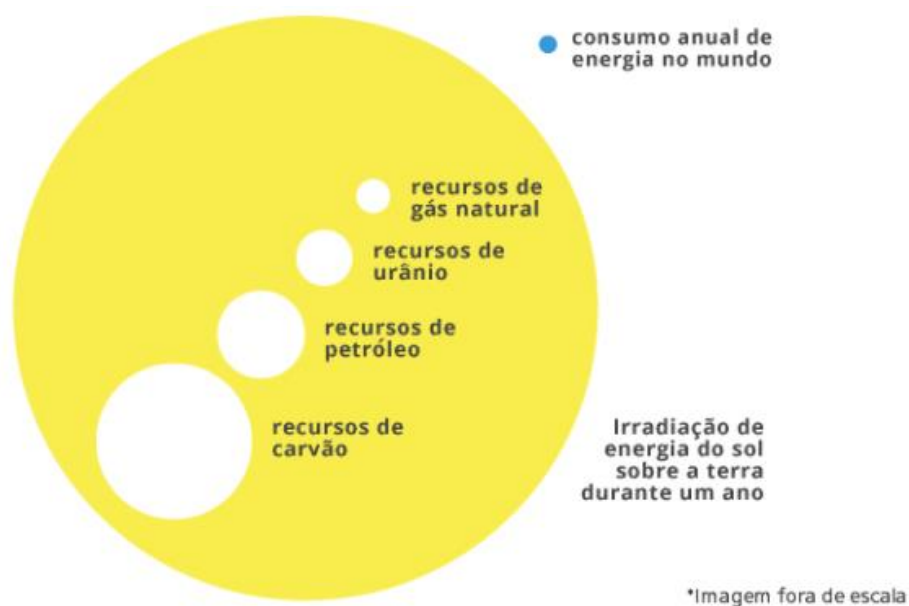


Figura 1.1: Capacidade Global de captação de Energia Solar

Fonte: ENERGIA HELIOTERMICA, 2018

Aliando este potencial solarimétrico alto em diversas localidades do mundo, vemos hoje sistemas de energia para comunidades isoladas que podem se basear na geração de energia elétrica por fonte solar, ainda usando combustíveis fósseis e, neste caso, o consumo de combustível é porção significativa dos recursos da comunidade isolada, apresentando um valor alto no transporte, armazenamento e reposição destes combustíveis nestas comunidades (PEILLÓN et al, 2013).

Estas comunidades, muitas vezes não possuem eletricidade da rede elétrica tradicional e contam com geradores diesel para realizar o trabalho de abastecimento de energia em toda a comunidade, no qual bomba de elevação de água potável dos poços submersos, muitas vezes profundos, representa na média um consumo de 35% da energia gasta pelos geradores, sendo que o uso de energia fotovoltaica ou até mesmo eólica, representaria uma redução significativa no consumo deste combustível, bem como um aumento na vida útil do equipamento.

Há algum tempo, os sistemas de suprimento de energia alternativa, não renovável e descentralizados, têm sido utilizados para o atendimento a comunidades mais isoladas. Diversos sistemas têm sido relatados por muitos autores, os quais descrevem métodos que demonstram serem aqueles sistemas economicamente viáveis e/ou tecnicamente factíveis. O avanço da tecnologia, principalmente nas áreas solar e eólica, vem criando

opções para a geração de eletricidade de forma não poluente, como forma de substituição aos sistemas hoje existentes com geradores diesel (MARINI; ROSSI, 2002).

Assim, o bombeamento de água utilizando energia renovável apresenta vantagens em relação aos sistemas tradicionais, no qual podemos citar o frete e o custo dos combustíveis para motor diesel que são significativos e estas tecnologias também geram outros impactos como o ruído e poluição do ar para as comunidades. Sistemas eólicos ou solares fotovoltaicos são amigáveis ao ambiente, com baixa manutenção e custo operacional significativamente menor do que o custo operacional de fornecimento de combustível (MEAH, et all, 2008).

1.1 Identificação do tema

O tema do trabalho se baseia na análise técnica e econômica de uso de energia renovável em bombeamento de água em poços profundos existentes em comunidades do sertão da Bahia, comparando algumas fontes de energia elétrica, tais como: solar fotovoltaica e eólica versus a atual instalação com uso de geradores diesel.

Serão estudados poços que hoje já possuem este sistema de bombeamento diesel e através do método multi-critério de escolha a decisões, Topsis, iremos comparar a substituição da fonte de energia elétrica nas bombas para uma fonte renovável, sem alterar os motores existentes e sim apenas mudando a fonte de energia elétrica.

1.2 Delimitação do Trabalho

Este trabalho está delimitado na análise técnica-econômica de substituição de fonte de energia elétrica para alimentação de bombas de poços profundos existentes em comunidades remotas do sertão da Bahia, no qual não possuem energia elétrica em suas residências pela rede da concessionária local, sendo categorizado comunidade isolada, por uma fonte renovável, sendo a solar fotovoltaica a principal fonte sugerida e a eólica e diesel a energia pra comparação, sem alterar a parte mecânica da instalação, apenas substituindo a fonte de energia elétrica nestes motores das bombas.

Serão estudados poços com bombas de recalque instalados e funcionando nas comunidades e que possuem potências entre 2,2kW (quilo Watt) a 12,5kW alimentados por gerador a diesel, que na média representa 35% do consumo do diesel destas comunidades, que utilizam desta fonte para abastecimento geral.

1.3 Objetivo da pesquisa

1.3.1 Objetivos gerais

O objetivo geral é demonstrar através do método Topsis que a substituição da fonte de energia a diesel por um renovável, seja solar ou eólica, sem trocar a mecânica dos motores das bombas dos poços profundos existentes, se torna uma solução barata e viável a médio prazo nestes locais, que apresenta um índice de irradiação solar bem elevado, reduzindo em pelo menos 35% o uso de diesel nos geradores.

1.3.2 Objetivos específicos

Este trabalho apresenta como em como objetivos específicos:

- Alimentar os motores das bombas de água com fonte renovável, solar fotovoltaica e/ou eólica;
- Demonstrar a possibilidade de não intervenção mecânica nos motores locais, mesmo em poços profundos com potências de motores elevados;
- Demonstrar a economia de 35% do diesel nos geradores elétricos, deixando este diesel para uso em outras cargas nas comunidades;
- Demonstrar o quanto de energia fóssil será reduzido nas comunidades, bem como a redução do consumo de combustível para frete para os locais de consumo;
- Diminuição da poluição sonora nos locais instalados.

1.4 Metodologia de Pesquisa

A metodologia empregada neste trabalho foi de análise de obras e literaturas dos assuntos propostos e conforme Yin, 2005, será aplicado em um estudo de caso na comunidade remota no sertão da Bahia que hoje utiliza-se de geradores para produção e utilização de energia elétrica, iniciando os estudos por trechos e inserções literárias e posteriormente analisando dados coletados em campo para uma comparação das inserções literárias pelos dados recebidos.

1.5 Estrutura do trabalho

Este trabalho foi dividido em 06 capítulos para um melhor entendimento do tema proposto, conforme descrição abaixo:

No capítulo 1, Introdução é demonstrado de forma clara o ambiente e cenário de estudo, assim como definindo os objetivos gerais e específicos, bem como, apresentando as delimitações da pesquisa, através de sua metodologia.

No capítulo 2, Revisão Bibliográfica do tema, é mostrado de forma clara todos os tópicos e temas propostos e estudados, com aprofundamento através de literatura relacionada, aliando o estado da arte do estudo pela tecnologia já existente, detalhando os procedimentos, materiais e cálculos propostos para argumentação do trabalho.

No capítulo 3, Estudo de Mercado de Sistemas de Bombeamento Solar, é mostrado o potencial energético mundial e do Brasil em sistemas de bombeamento versus a capacidade de geração da fonte, através de estudos e experiência de outros países no tema proposto.

No capítulo 4, Estudo de caso, é apresentado um resumo das comunidades, sua forma de consumo, o ambiente inserido de uso de diesel nos locais e aplicação da fonte renovável nos motores, aplicando o método Topsis para mostrar de forma clara que uso de energia renovável será uma solução para redução do consumo do diesel. Neste mesmo capítulo será apresentado todas as fases do estudo de caso, mostrando os estágios do projeto, as observações e as sugestões de melhoria propostas com seus resultados.

No capítulo 5, Análise dos dados, é realizada uma análise dos dados obtidos e resultados alcançados.

No capítulo 6, Conclusão, são feitas todas as considerações finais do estudo de caso, e também será apresentado sugestões para continuidade na preservação ambiental destas localidades.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Componentes de um sistema de bombeamento d'água por energia renovável

2.1.1 Energia Solar – Placas Fotovoltaicas

Como princípio básico de conversão de energia, as células solares fotovoltaicas são responsáveis pela captação da energia luminosa no decorrer do dia e conversão em energia elétrica, pelo movimento ordenado dos elétrons.

Ainda que o estudo do efeito fotovoltaico tenha sido estudado e descoberto no ano de 1839 pelo físico francês Edmund Becquerel, a fonte de energia solar na concepção de fonte única e primária na geração de energia elétrica é muito pequena, sendo combustíveis fósseis ou de biomassa utilizados em larga escala.

No ano de 1905, Albert Einstein em umas de suas diversas teses, redigiu a natureza da luz e o efeito fotoelétrico nos elementos químicos, fazendo como que as irradiações solares sobre as placas destes materiais movimentassem os elétricos, produzindo a eletricidade, trabalho que o premiou com o Nobel em 1921 (NOBEL,2016).

Historicamente o laboratório Bell nos Estados Unidos em 1954 produziu a primeira placa de silício para geração elétrica, através do pesquisador e químico Calvin Fuller, através do processo de dopagem do silício, realizando primeiros experimentos com seus equipamentos de telecomunicações com tecnologia da época, conforme mostra figura 2.1, que podemos ver o teste prático e funcional da geração de energia elétrica.

As primeiras células fotovoltaicas, assim como esperado, tinham problemas de dopagem de composição, no qual foram aprimorados mistura química proposta por Fuller que dopou silício, em suas proporções com arsênio e boro, obtendo células que exibiam boa eficiência, porém algo inicial menor que 12% de aproveitamento, conforme relatado na época.

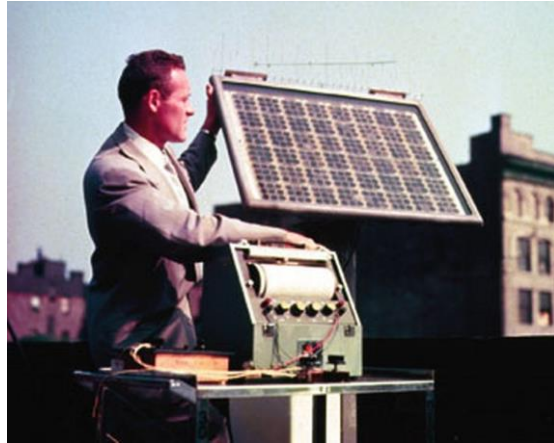


Figura 2.1: Primeiros testes práticos com células solares na Bell Laboratories

Fonte: Buch-Der, 2017

Em 17 de março de 1958 o satélite americano US Vanguard1, assim como demonstra a figura 2.2, se consagra o primeiro satélite equipado com seis painéis solares que foi lançado ao espaço, que ficou em órbita por muito tempo, sendo parte do programa aeroespacial até 2010 (NREL, 2014), no qual permanece orbitando a Terra, porém fora de operação e comunicação com a Terra.

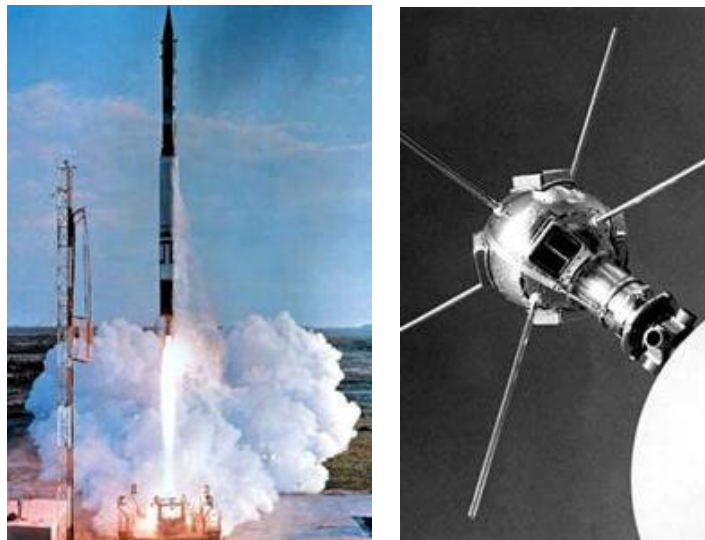


Figura 2.2: Lançamento do satélite Vanguard 1 com seis placas solares

Fonte: Accur8, 2017

Pelo seu tipo e dopagem de fabricação das células, existem tecnologias variadas empregadas para construção das placas, sendo que as mais usuais, comparando sua eficiência por tecnologia empregada estão demonstradas na tabela 1, assim como mencionado por Villalva e Gazoli, 2012, explícito no trecho abaixo:

“... atualmente existem diversas tecnologias para a fabricação de células e módulos fotovoltaicos. As tecnologias de células mais comuns encontradas no mercado são: silício monocristalino, silício policristalino e filme fino de silício...” (Villalva e Gazoli, 2012).

Com a evolução da tecnologia, diferentes dopagens foram sendo propostas e atualmente um painel de uso em larga escala, seja industrial ou residencial, apresenta eficiência energética conforme sua tecnologia de construção, sendo: Monocristalino, policristalino e tecnologia de filme fino (amorfo), como podemos observar na figura 2.3:

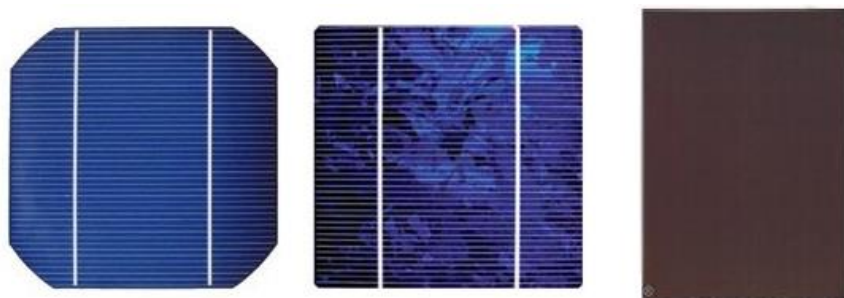


Figura 2.3: Placa Monocristalina (a) Placa Policristalina (b) Placa de filme fino(c)

Fonte: Compilado do CRESESB, 2014

Atualmente suas eficiências são bem diferentes conforme tecnologia, assim conforme tabela 2.1, vemos a capacidade de transformar a radiação solar recebida em energia elétrica, no qual para melhor ilustrar foi feito uma compilação do Manual de Engenharia fotovoltaica do CRESESB, 2014, sendo que podemos analisar os diferentes níveis de eficiência de uma placa solar testada em laboratório e seu uso prático.

Tabela 2.1: Média de eficiência dos painéis fotovoltaicos atuais

Tecnologia	Eficiência Laboratório (%)	Eficiência Prática (%)
Silício Monocristalino	14 ~ 21 %	~18%
Silício Policristalino	13 ~ 18 %	~16%
Silício Amorfo	6 ~ 13 %	~10%

Fonte: Compilado do CRESESB, 2014

Para melhor entendimento da aplicabilidade de cada tecnologia, segue uma descrição das vantagens de cada tecnologia na tabela 2.2, compilado do Manual de Engenharia Fotovoltaica do CRESESB, 2014.

Tabela 2.2: Vantagens e Desvantagens das tecnologias de placas solares

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens
Silício Monocristalino	- Maior eficiência (entre 14% e 21%); - Ocupam menos espaço; - Vida útil maior (30 anos); - Funcionam melhor com pouca luz.	- São mais caros que o policristalino; - Processo Czochralski resulta em grandes lingotes cilíndricos. Quatro lados são cortados dos lingotes para fazer as lâminas de silício, resultando perdas do silício.
Silício Policristalino	- Maior aproveitamento do silício residual, menos perdas; - Mais baratos; - Garantia de produção por 25 anos.	- Menor eficiência, devido mistura dos cristais (entre 13% e 18%) - Menor pureza do silício. - Menos Watts/hora/m².
Silício Amorfo	- Produção em escala, mais baratos de fabricar do que os cristalinos; - Aparência homogênea é que o torna bonito; - Podem ser flexíveis; - Suporta altas temperaturas e sombreamento de árvores.	- Exigem uma grande quantidade de espaço, por concentrar menos W/ m²; - Menos eficiência por m², custo com estrutura de instalação, mão-de-obra e cabeamento maior; - Menor vida útil.

Fonte: Compilado do CRESESB, 2014

2.1.2 Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos por aplicação de métodos de laboratórios (STC) e condições normais de operação (NOCT)

Com a finalidade de uma padronização nas potências nas placas solares para definição da qualidade das placas, pela emissão da irradiação versus o resultado que elas dispõem em eficiência, foi determinado um padrão de ensaio, chamado STC, do inglês “*Standard Test Conditions*”.

Conforme indicado em (CRESESB, 2014), as condições STC para irradiação são:

- Irradiância solar de 1000 W/m^2 ;
- Distribuição espectral para AM 1,5;
- Temperatura da célula de 25°C .

Assim com a emissão da irradiação em 1000 W/m^2 , os valores de potência máxima em watt-pico (Wp) e de eficiência das células são extraídos nessas condições e informados pelo fabricante no laboratório para aprovação e comparação das qualidades dos materiais, conforme demonstra a figura 2.4:

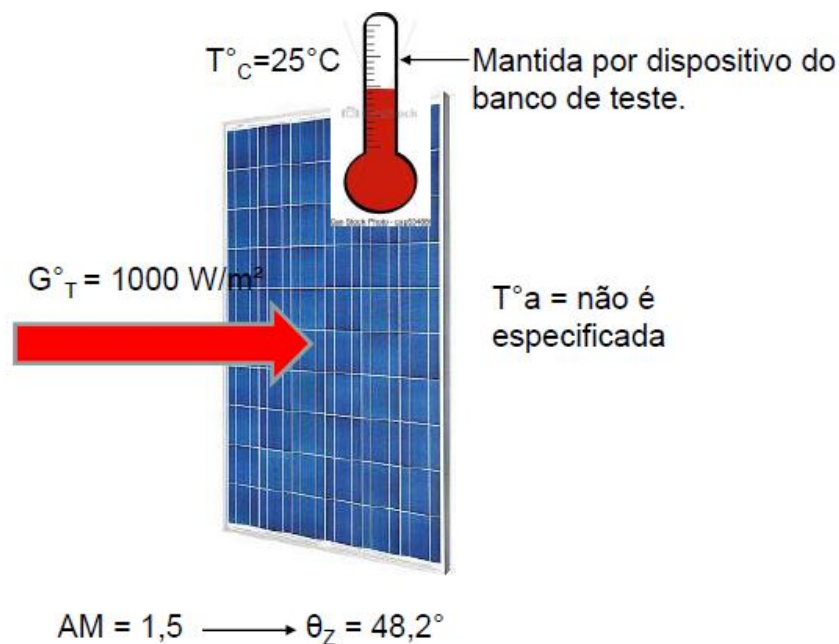


Figura 2.4: Ilustração do método de testes em uma placa fotovoltaica em STC

Fonte: Compilado do livro de Zilles, et al., 2012

Com base nos resultados obtidos nas condições STC vemos que as premissas adotadas são praticamente ideais, porém as células normalmente não trabalham na temperatura de 25 °C e muito menos estarão submetidas a distribuição espectral ou massa de ar de 1,5, assim para demonstrar uma situação um pouco mais perto da realidade do campo de instalação, foi estabelecido uma nova condição de trabalho para testes das placas, denominada NOCT, do inglês “*Nominal Operating Cell Temperature*”, que pré-determina uma condição para de operação da placa, deixando os cálculos de dimensionamento solar mais próximos da realidade de produção, conforme figura 6:

- Irradiância de 800 W/m²;
- Temperatura ambiente de 20 °C;
- Vento incidente com velocidade de 1 m/s.

Desta forma, com as condições STC, temos as condições de balização de potência por testes de laboratórios, que estabelecem as potências máximas da placa, logo por NOCT vemos o comportamento mais próximo do real de produção de uma célula em campo, no qual fica mais claro na figura 2.5 estas diferenças.

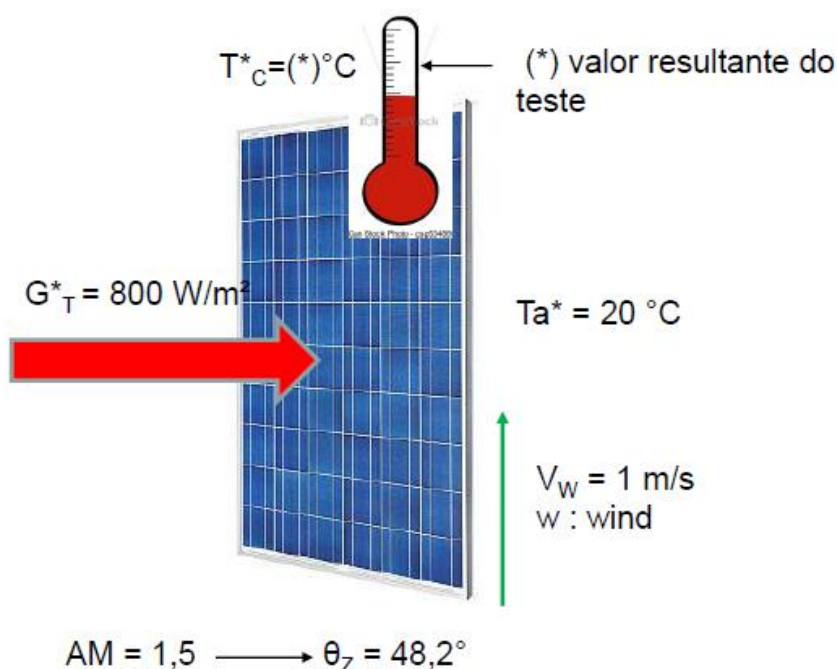


Figura 2.5: Ilustração do método de dimensionamento em uma placa fotovoltaica em NOCT

Fonte: Compilado do livro de Zilles, et al., 2012

Segue na tabela 2.3 uma comparação das principais características técnicas da placa do fabricante Canadian, modelo CS-6P 250W de silício policristalino, que neste caso obtém-se 72,4% de rendimento na condição NOCT para a STC.

Tabela 2.3: Comparação Condições STC e NOCT

STC		NOCT	
I°_{SC}	8,87 A	I°_{SC}	7,19 A
V°_{OC}	37,2 V	V°_{OC}	34,2 V
I°_{MP}	8,30 A	I°_{MP}	6,6 A
V°_{MP}	30,1 V	V°_{MP}	27,5 V
P°_{MP}	250 W	P°_{MP}	181 W
G°_T	1000 W/m ²	G°_T	800 W/m ²
$T^{\circ}C$	25°C	$T^{\circ}C$	45°C
$P^{\circ}_{MP} (NOCT) / P^{\circ}_{MP} (STC) = 0,724$ ou 72,4% de diferença			

Fonte: Compilado do livro de Zilles, et al., 2012

2.1.3 Motores Elétricos

São responsáveis em transformar a energia mecânica para a bomba proveniente da alimentação pela energia elétrica. No mercado podemos encontrar dois tipos de motores para esta funcionalidade, sendo: motores de corrente alternada (CA) e de corrente contínua (CC), conforme figura 2.6. O processo pelo qual cada tipo de motor transforma a energia elétrica em energia mecânica está além do escopo deste trabalho, então nos concentraremos apenas na comparação das vantagens e desvantagens dos motores.

A faixa de potência de trabalho para motores CA é muito maior se comparados com motores CC, seja em base de custo ou facilidade de operação, então a escolha da tecnologia se baseia muito em alguns fatores de campo sendo:

- Profundidade de bombeamento do poço;
- Altura manométrica de elevação da água;
- Custo pela intervenção, em caso de troca de motores.



Motor CC

Motor CA

Figura 2.6: Características construtivas do motor CC e motor CA
 Fonte: Compilado do livro de FITZGERALD e UMANS, 2006

Por tendência do mercado, os motores CA são mais baratos do que os motores CC para potência acima de 300W, o que faz que cerca de 90% dos motores elétricos que são fabricados no mundo sejam CA, e isto se repete no mundo de bombeamento de poços profundos de água, foco do estudo do trabalho.

Para o mundo de fotovoltaico, a tendência é invertida, porque a maioria dos bombeamentos são de pequena potência e o acoplamento com motores CC do fotovoltaico é muito mais fácil e direta, porém o problema se concentra em poços profundos de produção para comunidades com potência acima de 3CV ou 2,2kW, no qual motores CC não possuem larga escala de fabricação e consequentemente são caros.

Os motores CA podem ser classificados em: assíncronos ou síncronos.

Motores assíncronos possuem características de possuir escorregamento e podem operar diretamente conectado à rede (“DOL”, do inglês “*Direct On-line*”), ou através de inversor de frequência, que permitem variar a velocidade, conforme necessidade. Além de permitir variar velocidade na operação, os inversores de frequência minimizam os picos de corrente na partida, que serão base do estudo proposto.

Para o bombeamento solar, os motores assíncronos são geralmente utilizados devido a seu preço mais baixo, embora os motores de ímãs permanentes sejam cada vez mais usados devido à sua maior eficiência que permite aumentar a altura do bombeamento da água para o mesmo número de placas solares fotovoltaicas.

Os motores geralmente são fornecidos para operar em várias tensões de operação (115 V, 230 V, 400 V, 500 V, 575 V, etc...) e podem ser monofásicos e trifásicos. O inversor de frequência deve ser selecionado com uma tensão de saída de acordo com a

classificação nominal do motor. Assim, um motor de 400V_{CA}, exigirá um inversor de frequência de 380-480 VCA e um motor de 525-690 VCA necessitará de um inversor de 525-600 VCA, por exemplo.

Os motores de corrente contínua podem ser construídos com escovas ou livre de escovas e são mais caros comumente que os motores CA, devido a sua característica construtiva e por exigir um custo de manutenção maior, pelo desgaste natural das escovas com o funcionamento do campo magnético, o que dificulta em muito sua utilização em bombas submersas de água pelo difícil acesso ao motor para manutenção.

Como definição o termo “rpm” (rotação por minuto), é definido pela velocidade de rotação do motor no campo girante, sendo dependente do número de pólos do motor e da frequência de alimentação da rede elétrica.

Os motores sem escova requerem eletrônica de controle mais complexa que adicionam custo.

Em ambos os casos, o alcance da potência é limitado, conforme figura 2.7.



Figura 2.7: Exemplo de uma instalação com bomba de corrente contínua (pequena potência)

Fonte: Ciclo Vivo, 2017

2.1.4 Bombas de poços

O tipo de tecnologia escolhida da bomba depende da fonte e origem da água no seu estado de bombeamento, sendo:

- Bombas de superfície são usadas para coletar água de uma lagoa, rio, lago ou poços de superfície;

- Bombas submersíveis são usadas para coletar água de poços mais profundos, com retirada de água em lençóis freáticos de grande produção.

O inconveniente maior no uso de bombas submersíveis é a necessidade da extração completa do tubo para a sua manutenção, detalhe observado e evitado no estudo de caso, sendo principal ponto de discussão, pois serão propostas formas de controlar e acionar estas bombas sem intervir na instalação atual.

As bombas de superfície usadas para bombeio de água podem ser centrífugas ou helicoidais, de deslocamento positivos, ou seja, bombeiam água do poço para cima, independentemente de sua posição.

As bombas submersíveis podem ser de estágio único mais usados para esgoto, drenagem e bombeamento industrial ou de múltiplos estágios submersíveis, muito úteis para escavar poços de água e petróleo, com acesso a fontes de água subterrâneas, pela sua capacidade de potência e perfuração, vide exemplos nas figuras 2.8.



Figura 2.8: Exemplo de instalação de uma bomba submersível CA de vários estágios

Fonte: do Autor

2.1.5 Controlador para bombeamento (controle da velocidade do motor)

São equipamentos eletrônicos de controle, cujo objetivo é otimizar a potência extraída do gerador fotovoltaico e ajustar a velocidade da bomba de acordo com ele, para

que possa otimizar o fluxo de água bombeada pela potência máxima recebida. Pode incorporar funções adicionais, como a detecção de bomba seca, por meio de sondas de nível ou eletronicamente e funcionamento por horário determinado.

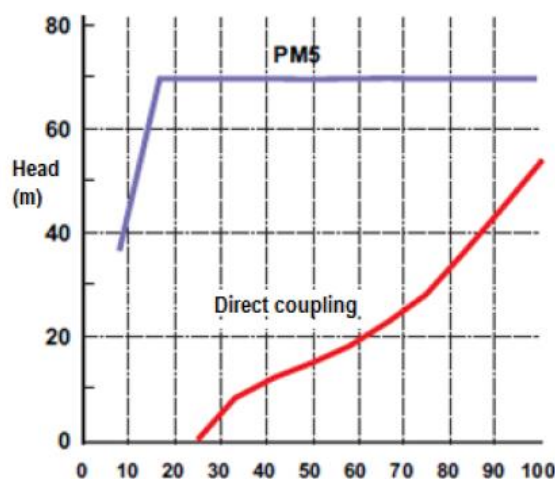
2.1.5.1 Controlador CC/CC para bombeamento

Para motores de corrente contínua, são utilizados conversores CC/CC em vez de acoplamento direto dos módulos no motor. Esses conversores definem a tensão de operação do gerador fotovoltaico e convertem a corrente, conforme a irradiação crescente na parte solar, aumentando a tensão aplicada ao motor. Isso permite começar com uma irradiação mais baixa do que o necessário, fato que não aconteceria com o acoplamento direto.

A baixa intensidade e tensão moderada que caracterizam a baixa irradiação são transformadas em alta corrente e baixa tensão no lado do motor, que permite o funcionamento do motor em baixa velocidade, pois mantém a potência necessária de partida do motor.

No gráfico 2.1, podemos observar a irradiação mínima necessária para começar a funcionar um motor CC no acoplamento direto das placas fotovoltaicas e com uso de conversores externos CC.

Gráfico 2.1: Irradiação solar mínima para iniciar o motor CC



Fonte: Vacon/Danfoss, 2017

2.1.5.2 Inversores de frequência para uso em bombeamento solar

Os inversores de frequência, termo muito utilizado no mercado brasileiro, são produtos muito utilizados na indústria para controlar a velocidade de motores elétricos para quaisquer tipos de aplicação.

Sua vantagem principal é possibilitar uma rampa de partida dos motores, (sem picos de corrente da inércia no motor) e assim reduzir o consumo de energia em inúmeras aplicações, tais como: bombas, ventiladores, compressores, correias transportadoras, etc.

No caso de sistemas de bombeamento solar, eles são usados para acoplar a potência das placas solares ao motor da bomba CA.

O inversor de frequência é constituído de 3 estágios, retificador, barramento CC e parte inversora, conforme demonstrado na figura 2.9 abaixo:

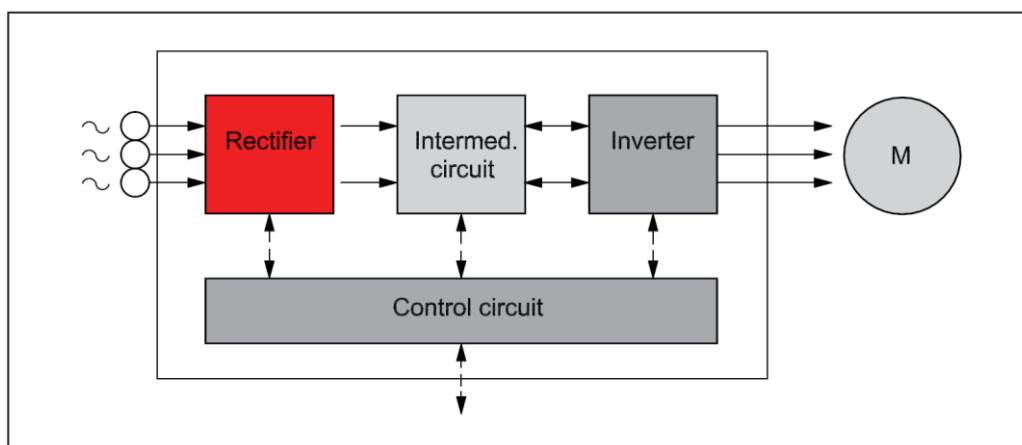


Figura 2.9: Estágios de um inversor de frequência

Fonte: Compilado do livro de VICK e NEAL, 2012

Os inversores são projetados para serem alimentados pela rede elétrica, seja monofásico ou trifásico.

Com a alimentação do estágio do retificador, é feita a conversão de tensão e corrente alternada da rede para tensão e corrente contínua para o próximo estágio do inversor, o barramento comum CC, através do chaveamento de IGBT's, SCR's ou tiristores. O que define a tecnologia é a forma de controle, sendo que temos dois tipos de retificador, sendo:

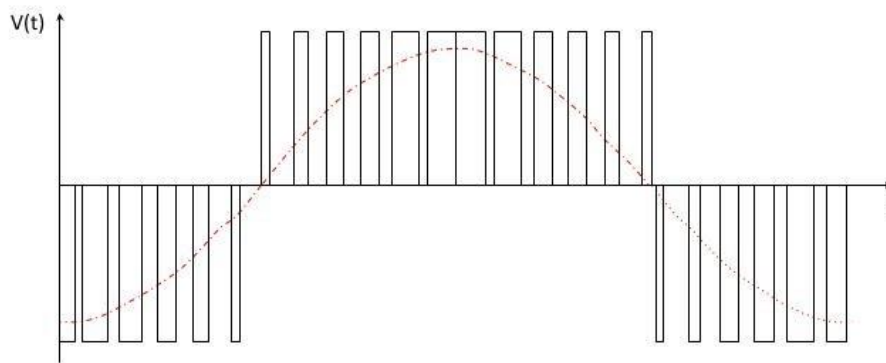
- Não-Regenerativo (Front-End - NFE): É formado por diodos, no caso em que é do tipo "não controlado", ou, para maiores potências por uma combinação de diodos e tiristores (também chamado SCR), caso em que é do tipo "semi-controlado".
- Regenerativo (Active Front End - AFE): Formado por IGBTs, normalmente. Entre seus pontos fortes é que ele permite a regeneração para a rede da energia da concessionária através da geração de energia pela inércia da carga quando é frenado. Apresenta uma baixa taxa de harmônicos na rede, devido sua construção possuir filtros de harmônicas. Entre as suas desvantagens estão os preços mais alto e maiores perdas de energia do que o tipo de NFE, o que significativamente afeta o desempenho do inversor de frequência.

Os inversores de frequência também possuem um circuito intermediário CC com capacitores, que serve como armazenamento de energia, que também podem incluir filtros de CC (chokes) para redução de harmônicos. Este circuito intermediário é o único meio para conectar as placas fotovoltaicas, pois nele estão disponíveis terminais de conexão CC (terminais positivos e negativos), usado para aplicações específicas. Como podemos alimentar diretamente no barramento CC através dos pólos positivos e negativos, podemos concluir que com placas fotovoltaicas, eliminamos a necessidade de conversão CA para CC, pois já recebemos a tensão contínua nas placas.

Este estágio intermediário CC é responsável pela manutenção do nível CC no último estágio do inversor, a ponte inversora formada por IGBT's, que transforma a energia CC do circuito intermediário, através do controle PWM (do inglês, "*Pulse-Width Modulation*"), em uma saída de CA para o motor, com tensão e frequência variável. O PWM é responsável por permitir este controle, pois controla o tamanho e altura do pulso na saída do motor, conforme mostrado no gráfico 2.2.

O inversor de frequência altera continuamente a frequência de saída e, portanto, a velocidade da bomba de acordo com a potência disponível nas placas solares. Esta faixa de frequência variável, geralmente de 30 a 50 Hz para bombas submersíveis, permite bombear água com baixas irradiações. Abaixo de 30 Hz, as bombas submersíveis não são suficientemente resfriadas e seus rolamentos podem ser danificado por alta temperatura.

Gráfico 2.2: Controle da tensão/frequência do motor pelo tempo com PWM



Fonte: Compilado do livro de MEAH, et al, 2008

De acordo com as leis de afinidade para bombas centrífugas, a altura manométrica é proporcional a velocidade de bombeamento, pressão estática para o quadrado de velocidade e potência para o cubo da velocidade.

Normalmente os inversores de frequência de baixa tensão possuem uma enorme faixa de potência, de 0,18 kW a vários MW, portanto pode cobrir qualquer sistema de bombeamento com motores CA.

Eles podem ser monofásicos ou trifásicos e sua tensão de saída podem ser:

- 105-120V_{CA};
- 200-240V_{CA};
- 380-480V_{CA};
- 525-69V_{CA}.

A tensão para o inversor de frequência e a bomba devem ser correlacionadas para evitar possíveis queimas ou danificar o sistema.

A tensão CA de saída do inversor está relacionada com a do barramento CC intermediário, de acordo com a fórmula:

$$V_{AC,max} \approx 1.1 \frac{V_{DC}}{\sqrt{2}}$$

(2.1)

Assim a faixa de tensão de saída do inversor de frequência envolve uma faixa de tensão no barramento CC intermediário e, portanto, no valor de V_{mp} (tensão máxima de pico) no lado do gerador fotovoltaico, que podemos ver na figura 2.10:

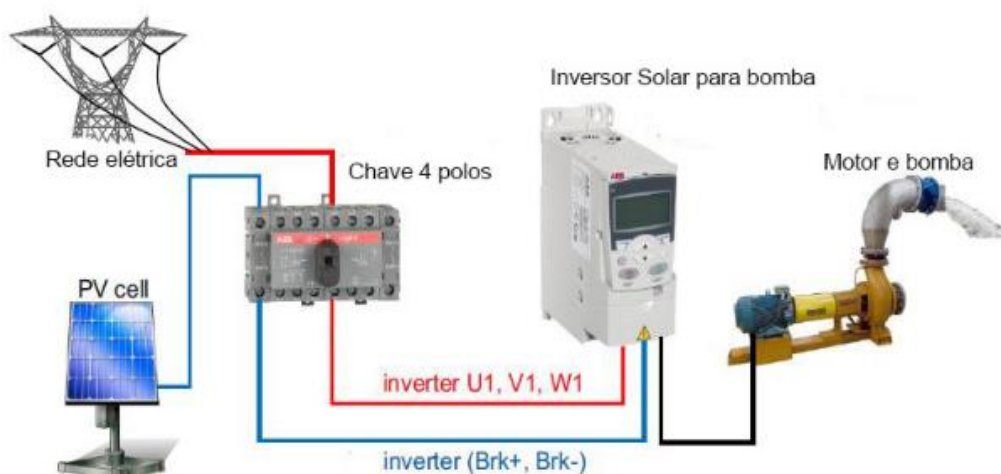


Figura 2.10: Forma de ligação de um inversor de frequência Solar nas placas

Fonte: ABB, 2017

Há também um limite de tensão V_{oc} (tensão de circuito aberto) máximo da linha de painéis instalado, chamado “*String*” (tradução literária como “linha”), que deve ser respeitado quando dimensionamento, para não exceder a tensão máxima do barramento CC do inversor de frequência. Todos esses pontos são mostrados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Correlação de tensão da bomba, inversor de frequência e campo fotovoltaico

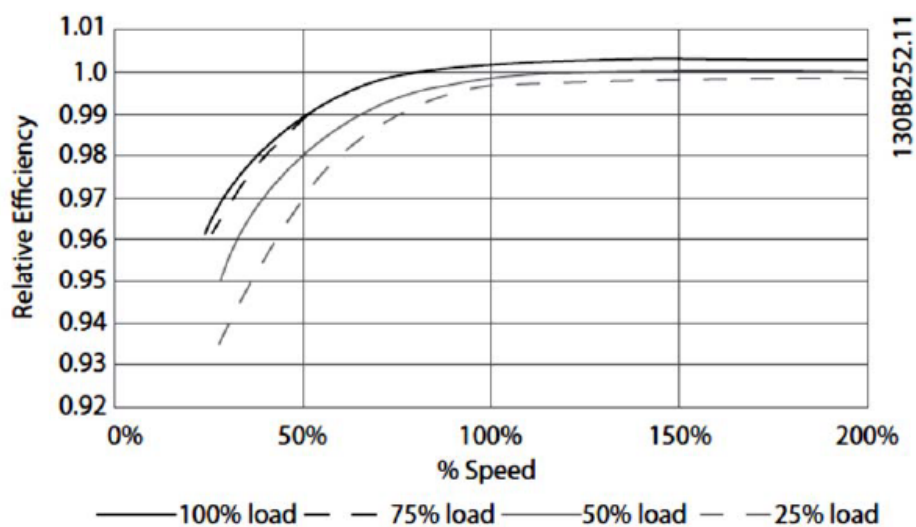
<i>Tensão do Inversor</i>	<i>Tensão na Bomba</i>	<i>Voc, max</i>	<i>Potência Solar</i>
200/240VCA	230VCA	400VCC	2,4kWp
380/480VCA	400VCA	800VCC	4,8kWp
525/690VCA	575VCA	1000VCC	6kWp

Fonte: do autor

Para um determinado inversor de frequência, a eficiência varia com os seguintes parâmetros, como mostrado no gráfico 2.3:

- Carga até 75% da potência nominal: a eficiência aumenta com a carga, sendo que a partir deste ponto a carga quase não tem influência;
- Frequência de saída: até a frequência nominal, a eficiência aumenta linearmente com a frequência, daí em diante a frequência quase não tem influência
- Frequência de comutação dos IGBTs: quanto maior a frequência de comutação menor a eficiência;
- Tensão do motor.

Gráfico 2.3: Curva de eficiência da bomba pela velocidade de bombeamento e carga



Fonte: Compilado do livro de MEAH, et all, 2008

2.1.5.3 Algoritmo de controle especial para otimização do ponto de trabalho

Alguns controladores no mercado fazem o gerador solar funcionar em constante de tensão contínua, através de um PID (Controlador proporcional integral derivativo), variando a tensão e a frequência aplicadas à bomba.

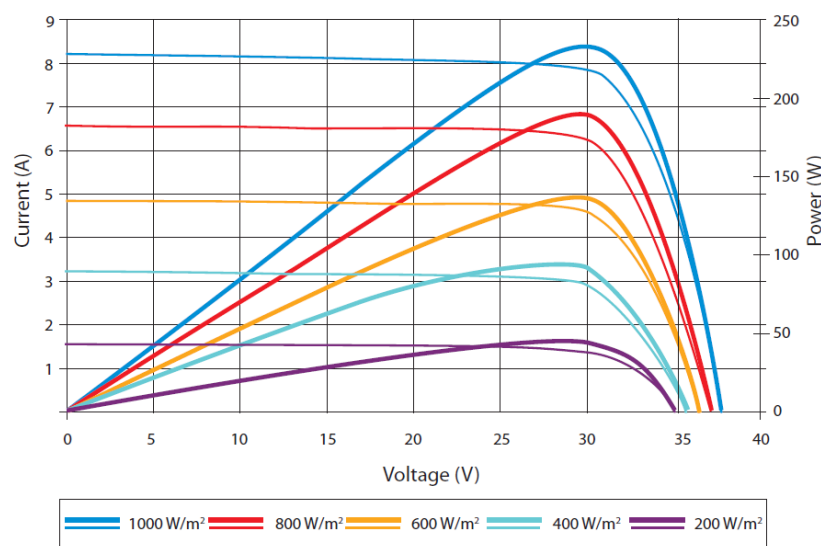
O ponto de ajuste para tensão contínua constante pode ser corrigido em alguns modelos dependendo da temperatura da célula, conectando um sensor de temperatura nas placas e no controlador. Isso aumenta a eficiência de bombeamento do sistema.

Ainda mais eficiente é a utilização de rastreamento do ponto de poder máximo algoritmo (também chamado de “MPPT”), porque ele rastreia o melhor ponto V_{mp} , com as variações não só devido à temperatura, mas também pela irradiância.

Além disso, é aplicado à curva I-V (corrente-tensão) real do campo do gerador, que é afetado por "incompatibilidade", tolerância dos módulos em seus valores I (corrente), V (tensão) e P (potência) e outros efeitos.

Suponha que o MPPT tenha encontrado o ponto de máxima potência #1 e quer determinar se é o ponto correto. Ele se move para #2 e encontra menos potência. Volta para #1, que é agora #3. Para confirmar que o MPPT é na verdade correto, assim ele se move para #4. Ele então mede a potência menor e decide voltar. Se o nível de irradiação mudar, o seguidor muda para #5 e considera essa direção de rastreamento como perfeita. Continuará a se mover assim, até aumentar os níveis de irradiação, quando o MPPT passa para #6, #7 e #8 e se move muito rápido longe do V_{mp} , como podemos observar no gráfico 2.4.

Gráfico 2.4: Rastreamento solar conforme os diferentes níveis de irradiação solar
Current-Voltage & Power-Voltage Curve(230-20)



Fonte: ABB, 2017

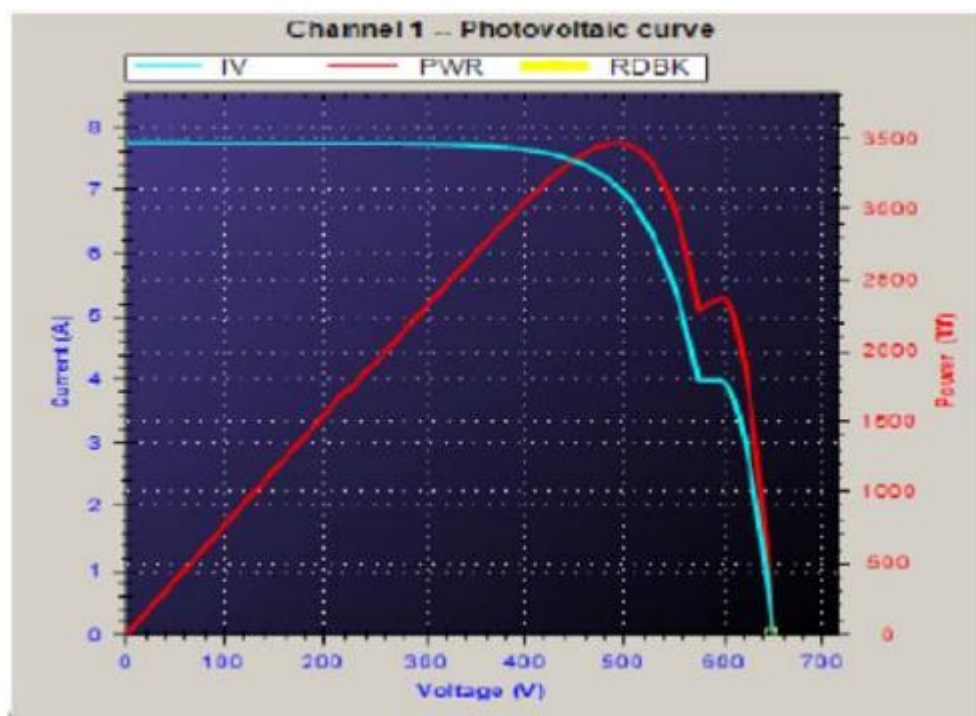
Porém, nem todos os algoritmos MPPT são tão bons e alguns dos modelos que são promovidos como MPPT, como o Altivar 312 da Schneider Electric, usa na realidade o descrito anteriormente PID para tensão CC constante. E muitos daqueles que

implementam um algoritmo MPPT não são capazes de seguir convenientemente variações repentinas de irradiação (em dias parcialmente nublados) e pode derivar no que é chamado de "acompanhamento lateral", onde o ponto de operação está se afastando de V_{mp} progressivamente sob mudança condições de irradiação.

Outro problema ocorre no caso de sombreamento parcial do gerador fotovoltaico: I-V e as curvas P-V são modificadas, aparecendo o que são chamadas máximas locais, como mostrado na Figura 13. A maioria dos algoritmos MPPT não é capaz de detectar que eles estão funcionando em um máximo local e isso pode levar a perdas de energia significativas durante condições de sombreamento parcial em relação ao valor P_{mp} real (e mesmo com respeito à operação constante de tensão CC).

Assim foi desenvolvido pelo fabricante Vacon/Danfoss um algoritmo chamado MPPT4, que evita o acompanhamento lateral e a operação em um único máximo local, que podemos ver o comportamento no gráfico 2.5.

Gráfico 2.5: Rastreamento solar MPPT4 com efeito sobre o sombreamento



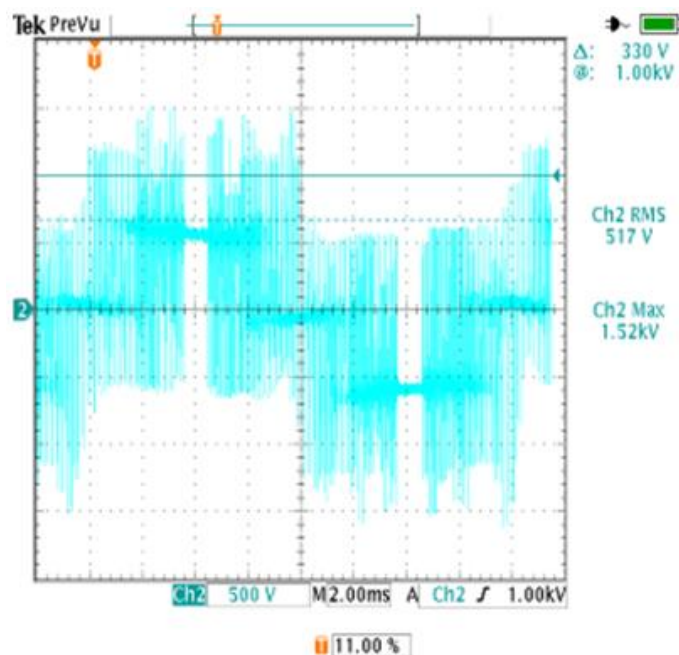
Fonte: Vacon/Danfoss, 2017

2.1.5.4 Filtros de saída dV/dt e proteção CC

Os inversores de frequência, devido à modulação por largura de pulso, também conhecido por PWM na saída do motor, produzem picos de tensão e valores instantâneos elevados de aumento de tensão (dV / dt) quando os IGBT's são chaveados (liga e desliga do IGBT). Isso pode produzir um estresse relevante no isolamento dos enrolamentos do motor, especialmente no caso de bombas submersas que normalmente não possuem isolamento adequado para estes picos, o que diminuiria em muito tempo sua vida útil.

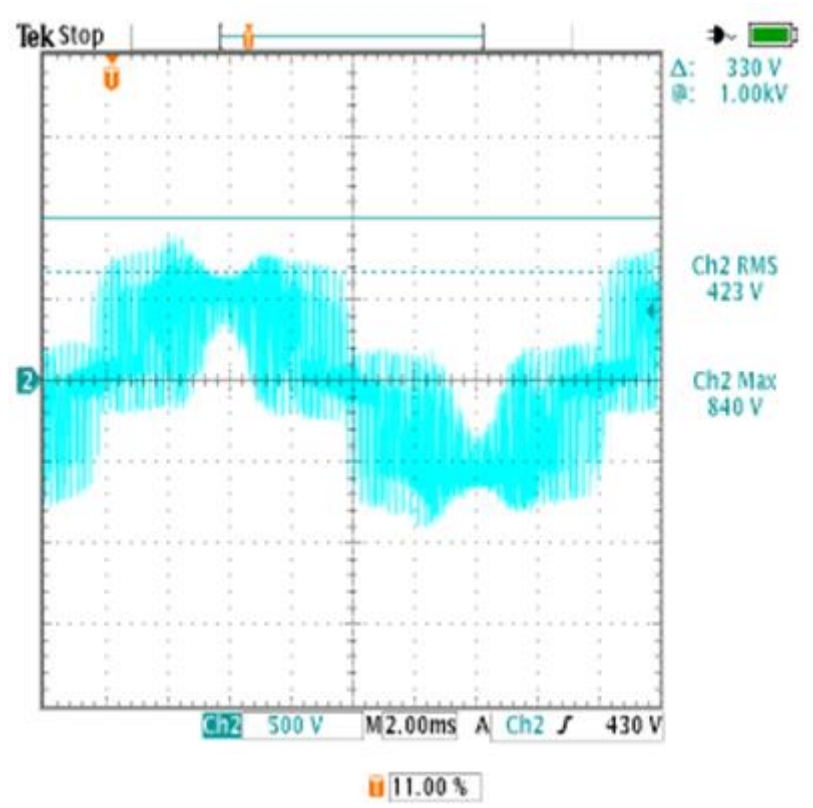
Por esse motivo, fabricantes de bombas submersíveis e inversores recomendam instalar um filtro na saída do inversor, que pode ser dV/dt (um pouco mais barato e menor fisicamente) ou filtro senoidal (melhores características, porém mais caro). Suas formas de onda podem ser vistas nos gráficos 2.6, 2.7 e 2.8, com detalhe para o gráfico 6 sem uso de filtros, no gráfico 7 corrigindo a saída com uso de filtro dV/dt, com algumas distorções, porém já corrigido com filtro senoidal, uma forma de onda bem corrigida e sem nenhum estresse mecânico ao motor.

Gráfico 2.6: Sinal de onda de saída de um inversor solar sem filtro dV/dt



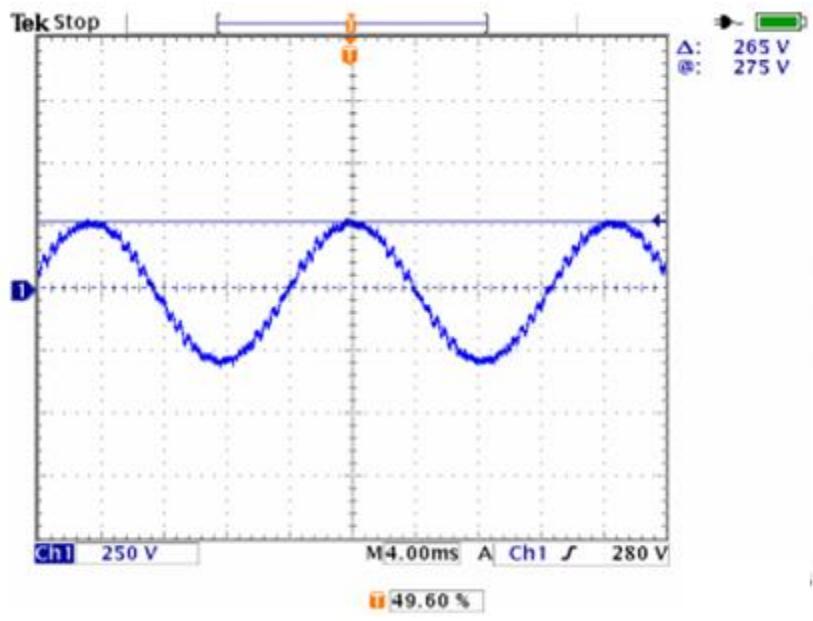
Fonte: do Autor.

Gráfico 2.7: Sinal de onda de saída de um inversor solar com filtro dV/dt



Fonte: do Autor.

Gráfico 2.8: Sinal de onda de saída de um inversor solar com filtro senoidal



Fonte: do Autor.

Estes filtros são elementos volumosos que geram calor, por isso devem ser instalados ao ar livre com grau de proteção elevado (recomenda-se IP-54 ou superior), como mostrado na Figura 2.11.

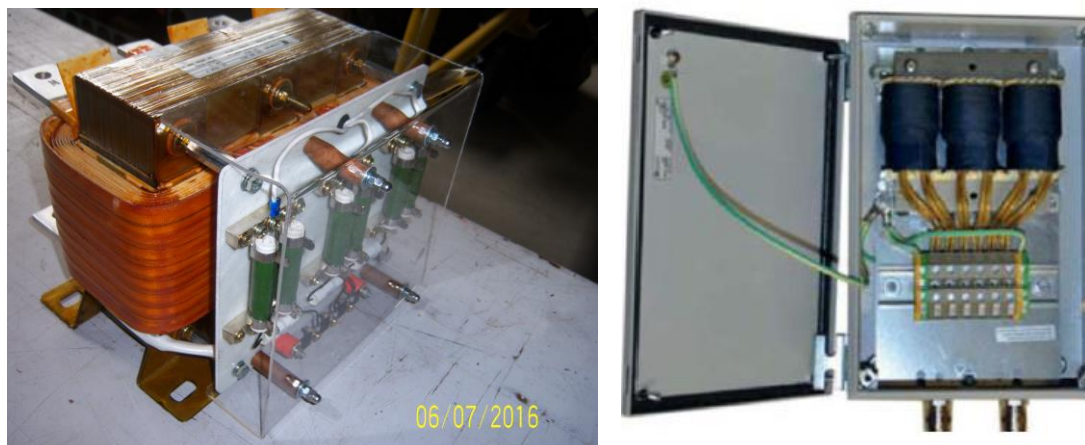


Figura 2.11: Filtro Senoidal em bancada (a) Filtro dV/dt instalado em painel a parte

Fonte: do Autor.

Para proteção e manobra no lado CC da instalação, deve ser instalado um interruptor CC com capacidade de carga para permitir desconectar com segurança o gerador fotovoltaico do inversor.

Embora as instalações de bombeamento solar estejam normalmente usando configuração flutuante (nenhum pólo aterrado), o que os torna seguros em caso de uma falha à terra, seus níveis de operação de tensão CC, especialmente para aqueles com Voc até 800Vcc ou 1.000Vcc, é muito perigoso em caso de uma falha ou até mesmo se a instalação não tiver qualquer tipo de elemento de proteção específico.

Como os dispositivos residuais (DR's) utilizados para CA não funcionam em CC, é necessário incorporar a instalação um monitor de resistência de isolamento que mede constantemente resistência de isolamento entre o gerador fotovoltaico e o sistema de terra do local. Quando o isolamento atingir nível mínimo, o sistema pode gerar um alarme ou desconectar diretamente o gerador fotovoltaico, de modo que a tensão é reduzida para zero até que a falha seja corrigida.

Além disso, a proteção contra surtos deve ser instalada no arranjo do gerador fotovoltaico para poder atuar como uma antena para receber surtos de origem atmosférica (raios).

Quando há três ou mais strings de conexão dos painéis solares em paralelo, também é necessário instalar um fusível em cada pólo de cada string, para evitar danos em caso de curto-circuito em uma das strings, que podem produzir uma alta corrente inversa, prejudicando os módulos, cabeamento e colocando em risco a segurança pessoal.

A conexão paralela das strings seria após os fusíveis e o resto das proteções seriam instaladas nesta linha comum: proteção contra sobretensão, interruptor CC e o dispositivo de monitoramento de resistência de isolamento.

A tendência no mercado de plantas fotovoltaicas conectadas à rede nos últimos anos foi para operar em tensões CC cada vez maiores, para economia de cabos, devido menor número de strings. O padrão atual de tensão na parte CC é comum em 1000Vcc, embora já existam componentes e plantas em operação até 1500 Vcc. Essa tendência não existe no bombeamento solar, porque as potências unitárias das instalações são, em geral, pequenas. Operação em 1000 Vcc é, no entanto, uma opção interessante para sistemas de bombeamento de média e alta potência, a fim de reduzir custos em proteções CC, cabos de strings e também reduzir perdas no cabeamento.

Podemos ver abaixo nas figuras 2.12 e 2.13, o diagrama típico da instalação usada no estudo de caso, com proteção CC através da caixa de comando e alimentação da bomba em corrente contínua pelas placas fotovoltaicas:

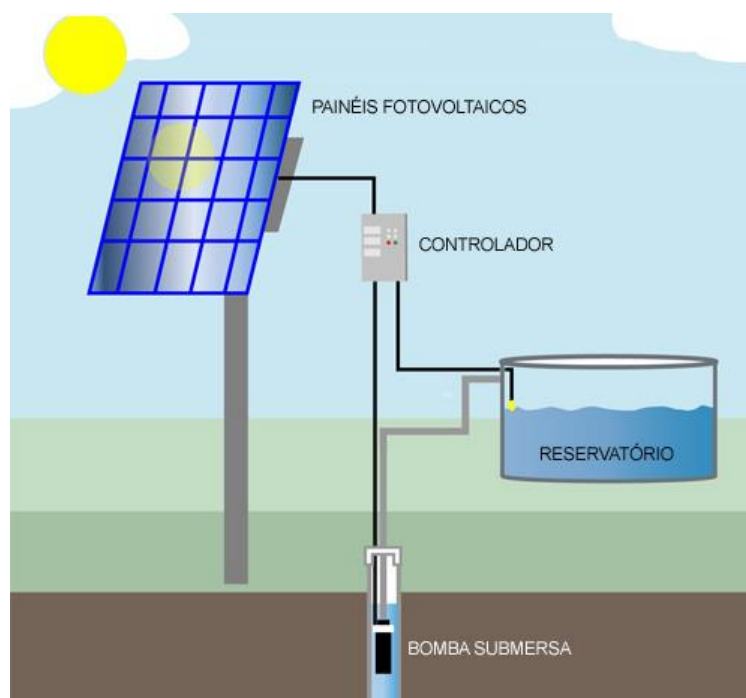


Figura 2.12: Esquemático completo da ligação de bombeamento solar

Fonte: Compilado do livro de MEAH, et all, 2008



Figura 2.13: Esquema elétrico de instalação dos equipamentos no bombeamento solar

Fonte: do Autor

2.1.5.5 Válvula Solenóide

As válvulas solenóides são dispositivos eletromecânicos que são acionados ao passar uma corrente elétrica por uma bobina solenoide mudando o estado da válvula, criando assim o sistema de abertura e fechamento. Essas válvulas são normalmente usadas para enchimento e esvaziamento de tanques, mas seu uso é muito mais abrangente em diversas áreas, têm diversas aplicações, com água, ar, gases etc.

2.1.5.6 Sensores de atuação

O sensor de atuação de nível pode ser usado tanto na parte superior quanto na inferior dos reservatórios, mantendo-o sempre em posição vertical, ele funciona como uma chave, ligando e desligando chaves, bombas ou envia um sinal para o microcontrolador, caso haja idéia de alguma automatização futura.

2.1.5.7 Estruturas de fixação das placas

As estruturas de fixação das placas podem ser postes com revestimento anticorrosivo dos perfis com base nos resultados da análise mecânica e química do solo no local. Para melhor efeito do anticorrosivo, recomenda-se realizar um teste de extração das estacas de teste com a medição dos esforços e deslocamentos horizontais e verticais sobre as estacas por amostragem.

As estacas são cravadas em solo até uma profundidade de 1,5m – 2,0m, conforme a carga de vento e o perfil da estaca usada, conforme mostrado na figura 2.14.

O processo de cravamento pode ser feito por um equipamento bate-estacas, desenvolvido especificamente para a construção de plantas fotovoltaicas em solo.

A operação do equipamento deve ser por equipe treinada e com experiência no cravamento de postes / estacas para sistemas fotovoltaicos.



Figura 2.14: Exemplo de estruturas de fixação para estacionamento

Fonte: do Autor.

2.1.5.8 Cabeamento corrente contínua (até o inversor de frequência)

Para a conexão de uma série de módulos fotovoltaicos à caixa de junção das séries de placas ou módulos solares, utiliza-se um cabo especial, com isolamento duplo, unipolar e resistente aos raios ultravioletas (UV) e às intempéries. Este tipo de cabo resiste às temperaturas entre -5°C a 120°C , conforme especificações da norma UL4703 e requisitos do TÜV 2 Pfg 1169/08.2007, vide figura 2.15 para detalhes. A seção transversal é de 6 mm^2 , conforme a queda de tensão e as perdas ôhmicas projetadas. Estes cabos serão encaminhados por terra, protegidos por eletrodutos de PEHD corrugados, ou fixados adequadamente sob as mesas com abraçadeiras de nylon.



Figura 2.15: Exemplo de cabeamento de corrente contínua

Fonte: Altri Bombas, 2017

2.2 Método TOPSIS para escolha da decisão do melhor método de bombeamento

Os sistemas de apoio à decisão (DSS, do inglês: “*Decision Support Systems*”) e análise de decisão multicritérios (MCDA, do inglês: “*Multiple-Criteria Decision Analysis*”) têm interessado pesquisas recentes (GARCÍA-CASCALES; LAMATA, 2012). A metodologia Topsis foi desenvolvida por Hwang e Yoon, 1981, e tem por objetivo classificar as melhores opções para um cenário de estudo. Em sua forma original, o método busca escolher as opções que fiquem à menor distância da solução ótima e que fiquem à maior distância da pior solução. Behzadian, 2012, realizou um levantamento indicando as áreas de aplicação desta metodologia.

A AHP (“*Analytic Hierarchy Process*”) é uma metodologia utilizada para apoio a solução de problemas de tomada de decisão a partir da priorização das alternativas. Saaty, 1980, foi o pioneiro nesta tecnologia e desde então a AHP tem sido utilizada diversas aplicações relacionadas à tomada de decisão. A análise AHP estrutura o problema em uma hierarquia de diferentes níveis (objetivo, critérios, subcritérios e alternativas) e são comparados em pares de um mesmo nível hierárquico. A escala de Saaty de 1 a 9 é utilizada para representar a preferência entre os dois elementos a serem comparados (POHEKAR; RAMACHANDRAN, 2004) e (HERVA; ROCA, 2013).

Suganthi, Iniyan e Samuel, 2015 colocam que, com os recursos computacionais disponíveis, as aplicações de sistemas de apoio à decisão ganharam impulso. Dentre as diversas aplicações possíveis destacam-se a otimização da utilização de energia renovável, o suporte a máquinas, a otimização de partículas quânticas, pesquisas com abelhas, colônias de formigas, sistema de controle de energia, redução de emissões, entre outros usos. Entretanto, não é relatado um método sedimentado para aplicação, mesmo que correlata, à seleção de modelo de bombeamento de água para comunidades remotas.

2.2.1 Construção do algoritmo

A construção do algoritmo do método Topsis deve seguir os seguintes passos, conforme teoria que o anuncia:

- Construir a matriz de decisão com m alternativas e n critérios, sendo que a intersecção entre cada alternativa e critério é dada por x_{ij} , para o qual a matriz $(x_{ij})_{m \times n}$ é obtida;
- Obter a matriz normalizada e ponderada através da equação:

$$r_{ij} = \frac{w_j x_{ij}}{\sqrt{\sum x_{ij}^2}} \quad (2.2)$$

- Identificar a Solução Ideal Positiva (PIS) e a Solução Ideal Negativa (NIS) para cada x_{ij} ;
- Obter a distância da Solução Ideal Positiva (PIS) e a distância da Solução Ideal Negativa (NIS), com base em distância Euclidiana, através das equações:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (n_{ij} - n_j^+)^2} \text{ e } D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (n_{ij} - n_j^-)^2} \quad (2.3)$$

- Obter a similaridade para a posição ideal através do Coeficiente de Aproximação (CCi):

$$CC_i = \frac{D_i^-}{(D_i^+ + D_i^-)} \quad (2.4)$$

2.2.2 Definição dos Pesos

Pela definição de pesos não há um método consensual teórico determinado, mas várias propostas de procedimentos para este efeito podem ser encontradas na literatura (von Winterfeldt & Edwards, 1986; Malczewski, 1999). É possível agrupar os métodos de definição de pesos em algumas categorias, como métodos baseados em ordenação de critérios (Stillwell et al., 1981), em escalas de pontos (Osgood et al., 1957), em distribuição de pontos (Easton, 1973) e comparação de critérios par a par (Saaty, 1977).

Neste trabalho, o método aplicado é o de comparação par a par no contexto do processo de tomada, com dois decisores, cujo resultado é um auto vetor que identifica a ordem de prioridade entre as alternativas, em percentuais.

3. ESTUDO DE MERCADO DE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO SOLAR

3.1 Histórico das instalações de bombeamento solar fotovoltaico

Assim como descreve Fedrizzi (2003), mesmo que o bombeamento fotovoltaico seja uma tecnologia recente, foi graças a grandes projetos, “na maioria das vezes implantados em zonas rurais de países em desenvolvimento, com o suporte dos países produtores dos equipamentos”, que foram conquistados ganhos comerciais e tecnológicos, pela necessidade destas comunidades de obter água.

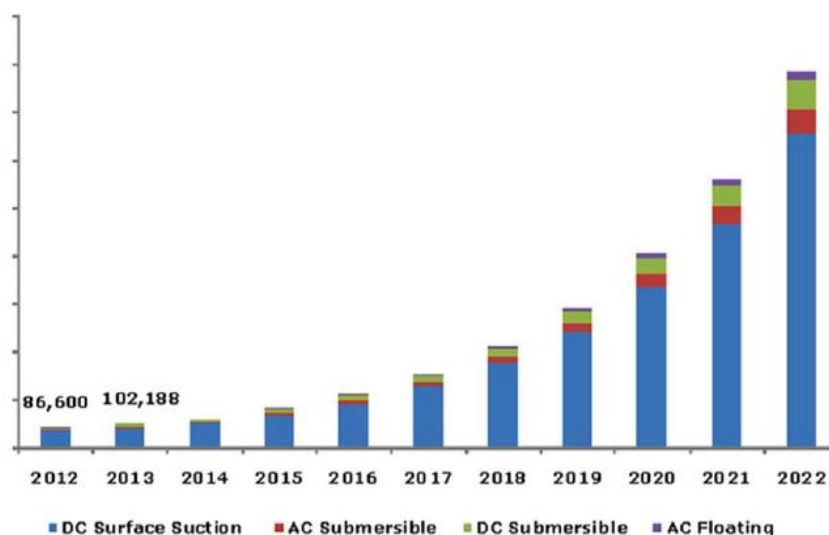
As primeiras aplicações comerciais do bombeamento fotovoltaico datam de 1978. Na ilha de Córsega, dando continuidade a sua tese de doutorado, a engenheira Dominique Campana desenvolveu e instalou o primeiro sistema de utilização a campo de que se tem registro. Com módulos da empresa Philips e bomba em corrente contínua desenvolvida em conjunto com engenheiros da empresa Guinard, o sistema abastecia uma fazenda de criação de ovelhas. Após essa primeira experiência, alguns outros sistemas foram instalados na Europa. No entanto, “o primeiro empreendimento em larga escala se deu no continente africano, mais especificamente em Mali” (BARLOW et al., 1991; MALBRANCH et al., 1994; PERLIN, 1999 apud FEDRIZZI, 2003).

3.2 Bombeamento Solar no mundo

De acordo com estudo GRAN VIEW RESEARCH, 2016, o mercado global de bombas solares aumentará de 102.188 unidades em 2013 para mais de 1.500.000 em 2022, com uma distribuição entre as diferentes tecnologias que são mostradas no gráfico 3.1, embora as bombas de sucção de superfície CC sejam, de longe, as mais frequentes (80%), a tendência é uma crescente quota de mercado das bombas submersíveis, especialmente em CA, que permitem bombear água subterrânea de uma profundidade

maior e, portanto, estão melhor adaptados ao cenário de escassez de água progressiva que vivemos.

Gráfico 3.1: Mercado mundial de bombeamento solar (números pelos anos)



Fonte: GRAN VIEW RESEARCH, 2016

Ainda no gráfico 9, pode-se ver que o potencial mercado de bombeamento solar em 2022 com inversores de frequência será de cerca de 150.000 unidades / ano (se adicionarmos bombas submersíveis e de superfície CA).

Entre as causas citadas por GRAN VIEW RESEARCH, 2016, para prever uma expansão tão grande do mercado, inclui as seguintes razões:

- Maiores atividades agrícolas e de irrigação em muitos países da Ásia-Pacífico, Oriente Médio e África;
- Estabelecimento de metas de redução para as importações de petróleo bruto e cotas de carbono em vários países.
- Aumentos de subsídios e incentivos para que os agricultores instalem sistemas de bombeamento solar em diferentes países, como China, Brasil, Índia, Bangladesh e Paquistão.

Desde 2001 tem relatos de projetos de grande proporção, no qual foram realizados dois grandes projetos de bombeamento fotovoltaico, ambos contando com a participação espanhola. O primeiro deles, nas Filipinas, sendo que em sua primeira fase foram

instalados 122 sistemas em comunidades rurais do Programa de Reforma Agrária local. O segundo – Projeto MEDA (Programa de Bombeamento Fotovoltaico em Países Mediterrâneos, Região Mediterrânea do Marrocos, Argélia e Tunísia (EUROPAID, 2002), que beneficiará países norte-africanos como Marrocos, Argélia e Tunísia – encontra-se em fase de elaboração e negociação entre as partes e deverá contar com, pelo menos, 9.000kWp de potência instalada em comunidades rurais de baixa renda (EUROPAID, 2002).

3.3 Bombeamento Solar no Brasil

No Brasil, conforme relata SALAMONI, et al, 2007, com todas as dificuldades de conhecimento da tecnologia de bombeamento fotovoltaico, com pouca adesão, mesmo que não esteja amplamente difundida pelas empresas, conta com uma quantidade grande de sistemas instalados por meio de programas educacionais e institucionais, para o abastecimento de comunidades rurais, muitas vezes pobres, localizadas em locais com população com baixo poder aquisitivo.

Em locais com difícil acesso à energia elétrica, base de nosso estudo, a opção fotovoltaica se mostra como umas das mais eficientes e com resultado imediato para abastecimento de populações remotas, que hoje utilizam-se do diesel, como é o fato relatado no estudo de caso.

A grande vantagem do sistema de bombeamento fotovoltaico, é o fato do recurso solar ocorrer todo dia, com mais ou menos abundância, porém em todo globo terrestre e sua utilização se torna uma boa solução para todas aplicação, com um bom dimensionamento do sistema. Outro ponto importante, é evitar uso de diesel em geradores, deixando de gastar com aquisição e transporte de combustível, bem como a emissão de gases poluentes e de ruído na geração.

Por se tratar de uma tecnologia consolidada tecnicamente, com alta confiabilidade e vida útil do gerador fotovoltaico de mais de 25 anos, sua utilização se torna inquestionável. Ainda que o custo de investimento (CAPEX) seja alto, ainda se tornando uma grande barreira a ser derrubada, uma produção em escala, e em parte, incentivos governamentais para sua produção e/ou aquisição, poderiam alavancar ainda sua expansão de utilização.

4. ESTUDO DE CASO

4.1 Metodologia

Baseado na obra literária de Silva e Menezes (2001), a pesquisa obtida neste trabalho com o intuito de expressar a importância do uso de energia fotovoltaica off-grid nas aplicações de bombeamento, pode-se classificar por exploratória, com conceitos aplicados de forma descritiva.

Exploratória, de forma concisa, porque será investigada uma comunidade remota no município de Muquém de São Francisco na Bahia, com atendimento pela empresa de saneamento CERB (Companhia de Engenharia Hídrica e de Saneamento da Bahia), no qual as informações serão coletadas e analisadas, com convivência no dia a dia da comunidade.

Assim Yin (2005), define a pesquisa como aplicada, uma vez que sua necessidade foi surgida através da necessidade de resolver um problema real que ocorre na comunidade, pois utiliza diesel para abastecer sua necessidade de extração de água.

Esta definição nos remete a um estudo de caso, com uma pesquisa de campo intensa, já que foi visitado e convivido com esta comunidade no período de aplicação.

Acreditando na verdadeira importância do estudo caso, este trabalho foi baseado neste tipo de método de pesquisa, onde apesar da pouca influência exercida do pesquisador sobre a situação da comunidade, ela é de extrema importância para uma conceitualização teórica e verificação da prática aplicada.

Para uma validação e confiabilidade maior do estudo de caso, serão aplicadas pesquisas de campo com perguntas específicas, e na medida do possível será adequada a teoria com a prática.

4.2 Local da pesquisa, implantação e coleta dos dados

Este estudo de caso aplicado foi diretamente de uma comunidade no sertão da Bahia, na cidade de Muquém de São Francisco, composta de 6 famílias com 4 pessoas

integrantes em cada família, totalizando 24 pessoas consumindo a água, antes abastecida por energia proveniente do diesel e após implantação, por energia fotovoltaica. O estudo de caso, bem como as potências implementadas foram definidas para comunidades de no máximo 30 pessoas, afim de delimitar o estudo como um todo.

Todas as informações extraídas e inseridas no trabalho foram realizadas através de coletas de campo e entrevistas previamente estabelecidas, com a companhia de abastecimento CERB, porém para este projeto temos como papel decisor da implantação alguns órgãos, sendo:

- Projeto financiado pelo BID (Banco Internacional de Desenvolvimento);
- Idealizado pelo Governo da Bahia diretamente atuando na intermediação;
- Executado pela CERB, atuando como engenharia e implantação do projeto.

Além das entrevistas realizadas a observação pessoal foi de extrema importância para os pontos relatados no trabalho, conforme Yin (2005), sendo que as duas práticas, entrevistas e observação nos darão argumentos e material para uma conclusão objetiva e realística.

Vergara (2000), esclarece em sua obra que um trabalho para ter um embasamento mais generalista do assunto, deverá ser pesquisado mais de uma fonte dentro do mesmo ramo, porém como este trabalho foi limitado apenas a aplicação da comunidade estudada de forma única pode-se assim analisar os dados de forma qualitativa e não quantitativa, sendo que serão suficientes para uma estruturação dos dados coletados e uma conclusão bem concisa com a realidade pesquisada.

4.3 Análise da comunidade e do cenário atual em campo

A comunidade eleita para ser implantada a tecnologia de bombeamento solar situa-se no município de Muquém de São Francisco, com população estimada de pouco mais de 11.544 pessoas, conforme CENSO do IBGE de 2011, em uma área territorial de 3.638,1 km².

Com altitude de 434 metros de altitude, Muquém de São Francisco tem as seguintes coordenadas geográficas: Latitude: 12° 3' 54" Sul, Longitude: 43° 32' 33" Oeste, conforme pode-se observar sua localização no Bahia e no Brasil, na figura 4.1.

O município dista em 710km da capital da Bahia, Salvador, sendo um enclave grande o abastecimento do diesel nos geradores, que são provenientes da capital. Faz parte da mesorregião Geográfica do Vale São-Franciscano da Bahia, região econômica do Médio São Francisco, possuindo características típicas de uma região semiárida.

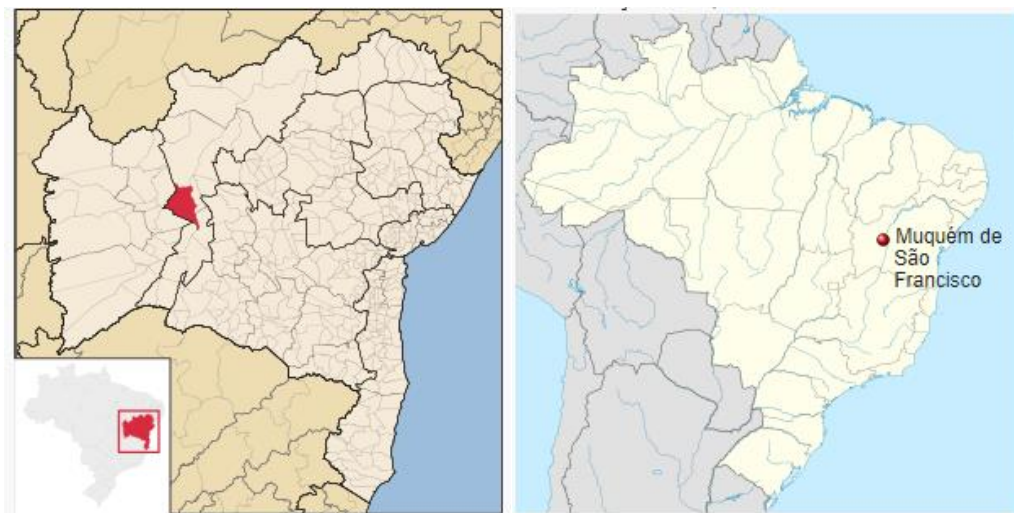


Figura 4.1: Localização de Muquém de São Francisco na Bahia e no Brasil

Fonte: Wikipedia, 2017

Assim o estudo de caso aplica-se para uma comunidade composta de 6 famílias, no qual possui 4 pessoas cada: 24 pessoas na totalidade. Cabe ressaltar que este estudo de caso pode-se aplicar para comunidade de no máximo 30 pessoas adultas, ou seja, o monitoramento constante das comunidades para não ultrapassar o limite de abastecimento de água é papel das frentes de apoio social e demográfico do Governo do Estado da Bahia.

Devido a população atual desta comunidade, foi instalado pela empresa de abastecimento de água CERB, uma caixa de abastecimento central de 10.000 litros, conforme pode-se observar na figura 4.2, que possui automação para bombeamento em caso de esvaziamento de água, porém com energia proveniente do gerador diesel



Figura 4.2: Caixa d'água de 10.000 litros para abastecimento central da comunidade

Fonte: do autor

Com a distância de 710km da capital, como citado anteriormente, hoje existe um abastecimento de diesel nos geradores atuais a cada 4 meses, o que gera um custo considerável para manutenção do bombeamento, pois conforme figura 4.3, podemos ver que o custo do diesel na capital baiana tem um custo alto, em torno de R\$ 2,77 por litro.

Preço Médio Diesel S10 nos Postos (R\$/litro) – Por UF
– Pesquisa ANP – Análises ILOS

UF	R\$/litro
AMAPA	R\$ 3,28
ACRE	R\$ 3,27
MATO GROSSO	R\$ 3,09
RONDONIA	R\$ 3,04
RORAIMA	R\$ 3,02
MATO GROSSO DO SUL	R\$ 3,00
DISTRITO FEDERAL	R\$ 2,95
PARA	R\$ 2,90
RIO GRANDE DO NORTE	R\$ 2,89
AMAZONAS	R\$ 2,88
GOIAS	R\$ 2,87
RIO GRANDE DO SUL	R\$ 2,83
RIO DE JANEIRO	R\$ 2,82
MINAS GERAIS	R\$ 2,82
CEARA	R\$ 2,81
PIAUÍ	R\$ 2,81
SERGIPE	R\$ 2,81
TOCANTINS	R\$ 2,78
ESPIRITO SANTO	R\$ 2,78
SANTA CATARINA	R\$ 2,78
ALAGOAS	R\$ 2,78
BAHIA	R\$ 2,77
PARAIBA	R\$ 2,75
SAO PAULO	R\$ 2,75
MARANHAO	R\$ 2,73
PERNAMBUCO	R\$ 2,69
PARANA	R\$ 2,69

↑ Diesel mais caro

Figura 4.3: Preço médio do diesel nos postos por capital (referência 1. Semestre 2017)

Fonte: Ilos, 2017

O diesel, proveniente da capital baiana, tem a função de abastecer um gerador elétrico da marca Toyama de 10kVA, com disponibilidade de potência máxima de 9KVA em 220V e tanque de abastecimento de 25 litros de diesel, modelo qual podemos ver na figura 4.4.

Este gerador possui uma autonomia de trabalho de 8 horas/dia com 25 litros, gerando 220V/127V para abastecimento integral das necessidades da comunidade no período de 8 horas, tais como: chuveiro, uso de eletrodomésticos, iluminação, entre outros e também é responsável por suprir o bombeamento de água para a caixa central.

Normalmente em dia típico, a comunidade utiliza o gerador por 8 hora por dia, realizando um controle para não ultrapassar estas horas de consumo.



Figura 4.4: Modelo do gerador diesel utilizado na comunidade

Fonte: Toyama, 2017

As características elétricas deste gerador podem ser observadas na tabela 4.1, sendo que a autonomia de 6,5 a 8 horas deste gerador é principal gargalo para a comunidade.

Com a autonomia de 6,5 a 8 horas, o gerador tem a necessidade de abastecimento diário, no qual a reposição e abastecimento de diesel para a comunidade ocorre na periodicidade de 4 meses, ou seja, 3 vezes por ano.

Tabela 4.1: Características elétricas do gerador existente na comunidade

Marca / modelo:	Toyama / TDWG12000SG
Tipo:	2 Cilindros, refrigerado à água, 4 tempos
Cilindrada:	794 cc
Capacidade de combustível:	25 litros
Capacidade tanque de óleo:	2,27 litros
Autonomia:	6,5 a 8 horas
Frequência nominal:	60 HZ
Tensão nominal:	110Vac / 220 Vac
Corrente nominal:	78,2 A / 39,1 A
Potência emergência:	10.000 Watts
Potência limitada:	9.000 Watts
Potência contínua:	8.500 Watts
Comprimento (C x L x A):	1350 x 650 x 760 mm
Peso:	310 kg
Regulador automático de tensão:	AVR

Fonte: Compilado do datasheet do gerador da Toyama modelo TDWG12000SG, 2017

A bomba utilizada para elevar a água do poço até a caixa d'água central possui uma potência de 3CV ou 2,2kW, com altura manométrica de 60 metros (MCA = metros de coluna d'água) e vazão de 3,6m³/h, o que no final representa algo em torno de 35% de consumo de diesel no dia, visto que necessita na média 2,77 horas para abastecimento total da caixa de 10.000 litros.

Para constatação dos cálculos abaixo, utilizou-se a bomba Altri, no qual podemos ver as principais características elétricas e mecânicas na tabela 4.2:

Tabela 4.2: Características elétricas da bomba submersa

Marca / Modelo:	Altri / 4ATM10-08
Potência:	3CV/2,2kW
Corrente:	15,6A (mono) / 12,8 (tri)
MCA (metros coluna d'água):	60 metros
Vazão:	3,6m ³ /h
Rotação:	3.450 rpm

Fonte: Compilado do datasheet da bomba submersa da Altri modelo 4ATM10-08, 2017

Estes dados foram coletados em campo, por um período de 30 dias, para análise da necessidade da comunidade, por um técnico capacitado na análise e manuseio dos valores em bomba de 3CV conforme figura 4.5.



Figura 4.5: Bomba submersa de 3CV/2,2kW

Fonte: Altri Bombas, 2017

4.4 Aplicação do método Topsis para decisão do melhor método de bombeamento

Nesse estudo de caso seguiram-se exatamente os cinco passos demonstrados na metodologia Topsis. Primeiramente, foram definidas as alternativas para substituição do diesel como fonte de energia para bombeamento existente da caixa d'água.

Uma delas é fonte solar fotovoltaica mantendo a bomba já existente no local (**X**), a outra é a energia solar fotovoltaica substituindo a bomba existente por uma bomba nova (**Y**). A terceira alternativa é a substituição do diesel pela energia eólica (**Z**) e a última é manter o combustível diesel (**V**). O diesel foi considerado uma alternativa, pois há a possibilidade das demais alternativas não compensarem a substituição do combustível, no caso dele aparecer em primeiro lugar no ranking do resultado do modelo aplicado:

Para as quatro fontes de energia escolhidas como alternativas é importante levar em consideração além do custo de implantação e o custo de manutenção, o fator ambiental, visto que o financiamento do projeto viria do Banco Internacional de

Desenvolvimento, que coloca como condição de empréstimo a fonte de energia ser renovável e ter menor impacto ambiental possível no local. Portanto, os critérios definidos para a modelagem foram: impacto ambiental, custo de implantação e custo de manutenção.

A Tabela 4.3 demonstra a matriz de decisão elaborada, por fonte conforme acima:

Tabela 4.3: Matriz de Decisão da Fonte

<i>Fonte</i>	<i>Impacto Ambientalm (1 a 10)</i>	<i>Custo Implantação</i>	<i>Custo Manutenção</i>
X	2,0000	R\$ 24.600,0000	R\$ 2.000,0000
Y	2,0000	R\$ 49.200,0000	R\$ 2.000,0000
Z	6,0000	R\$ 45.000,0000	R\$ 3.000,0000
V	9,0000	R\$ 0,0000	R\$ 8.800,0000

Fonte: do autor

Para definição do custo de implantação foi considerado o custo total da implementação das quatro alternativas, no qual manter o diesel como fonte de energia isentaria de novos investimento, mesmo que o propósito seja uso de energia renovável. Fica claro que implantar o sistema de bombas fotovoltaicas com inversor com controle MPPT se torna vantajoso, no quesito implantação, pois pouco modifica a bomba existente, isto quando comparado com as outras tecnologias.

Para o custo de manutenção, percebemos o quanto oneroso é manter o sistema com diesel, justificando a razão de eleger novos métodos para sua substituição. O custo de manutenção para as demais fontes renováveis, representa um custo mínimo de manter funcionando o ano todo, mostrando o quanto eficaz financeiramente estes métodos representam aos interessados.

Para o impacto ambiental foi estabelecida uma escala de 1 a 10, sendo 1 menor e 10 maior impacto ambiental, considerando ruído, área utilizada e emissão de CO₂.

Elaborada a matriz de decisão, o segundo passo foi normalizá-la e ponderá-la através da equação:

$$r_{ij} = \frac{w_j x_{ij}}{\sqrt{\sum x_{ij}^2}} \quad (4.1)$$

A tabela 4.4 mostra a matriz normalizada conforme teoria.

Tabela 4.4: Matriz Normalizada

<i>Fonte</i>	<i>Impacto Ambiental (1 a 10)</i>	<i>Custo Implantação</i>	<i>Custo Manutenção</i>
X	0,1789	0,3461	0,2058
Y	0,1789	0,6923	0,2058
Z	0,5367	0,6332	0,3087
V	0,8050	0,0000	0,9055

Fonte: do autor

Para ponderar a matriz foi preciso estabelecer o peso de cada critério. Nessa etapa o papel de definição dos pesos é dos decisores, aqueles que possuem responsabilidade sobre a decisão que será tomada. Os decisores escolhidos foram:

- Governo da Bahia juntamente com o Banco Internacional de Desenvolvimento (BID);
- Engenheiros com responsabilidades técnicas e ambientais;

Os primeiros são os responsáveis pelo financiamento e execução do projeto (âmbito econômico), enquanto os segundos pela viabilidade técnica e ambiental (âmbito técnico). Dessa forma, através do método Topsis, definiu-se o vetor de pesos **43%, 12% e 45%**, respectivamente aos critérios impacto ambiental, custo de implantação e custo de manutenção. A Tabela 4.5 mostra a matriz ponderada do método aplicado.

Tabela 4.5: Matriz Ponderada

<i>Fonte</i>	<i>Impacto Ambiental (1 a 10)</i>	<i>Custo Implantação</i>	<i>Custo Manutenção</i>
X	0,0776	0,0416	0,0918
Y	0,0776	0,0832	0,0918
Z	0,2328	0,0761	0,1377
V	0,3492	0,0000	0,4040

Fonte: do autor

Concluída a matriz ponderada, o próximo passo do algoritmo foi identificar a solução ideal positiva (PIS) e a solução ideal negativa (NIS) através da definição dos melhores e piores valores (desempenhos) alcançados pelas alternativas durante a

avaliação em relação a cada critério de decisão. Assumindo que cada critério possua uma escala crescente ou decrescente, o método calcula os resultados pela comparação de distâncias Euclidianas entre as alternativas reais e ideais, as chamadas distância PIS e distância NIS.

Finalmente, obtém-se a similaridade para a posição ideal através do Coeficiente de Aproximação (CCi), resultando no vetor final conforme tabela 4.6.

Tabela 4.6: Coeficiente de Aproximação

<i>Fonte</i>	<i>CCi</i>
X	0,9091
Y	0,8326
Z	0,6191
V	0,1674

Fonte: do autor

Conforme resultado final da aplicação do modelo, o ranqueamento final obtido mostrou que a melhor alternativa para substituição do diesel no bombeamento da caixa d'água é a energia solar fotovoltaica mantendo a bomba já existente no local.

Em segundo lugar, revelou-se a alternativa da energia solar fotovoltaica substituindo a bomba existente por uma bomba nova. A diferença entre as duas apareceu no custo de implantação, visto que nos outros dois critérios o desempenho das alternativas é o mesmo. O custo para implementar uma nova bomba abrange tanto o custo de aquisição dessa bomba quanto o custo de retirada da bomba já instalado no local, além de toda mobilização de caminhões especiais e mão-de-obra especializada para implantação da bomba nova no local, que muitas vezes por diferenças de tamanho físico, requerem novas perfurações de poços.

A terceira alternativa do ranking foi a energia eólica, que apresentou custo de manutenção relativamente baixo, mas que foi contrabalanceada pelo alto custo de implantação. Além disso, no critério de impacto ambiental a fonte eólica ficou atrás da solar fotovoltaica, pois apresentou mais fatores impactantes, como ruído, a necessidade de utilização de uma porcentagem do diesel, emitindo, portanto, uma parcela de gases poluentes, e o confronto com aves no local devido à altura dos geradores.

Por último, ficou o diesel, reforçando a necessidade de substituição do combustível visto que dentre as quatro alternativas ele apresentou o pior desempenho.

Com base nestes resultados obtidos pelo método multi-critério de apoio a decisão Topsis, partiu-se então para a aplicação do bombeamento solar, sem substituir as bombas existentes, com aplicação de inversor solar com controle MPPT.

4.5 Instalação do bombeamento solar fotovoltaico com uso de inversor solar

Assim como esperado e comprovado pelo método Topsis, partiu-se para a instalação solar fotovoltaico, sem substituição da bomba existente.

O primeiro passo para implantação do sistema foi a verificação do melhor ângulo de instalação das placas na região, sendo que pela localização geográfica da região, no qual temos para a cidade de Muquém de São Francisco:

- Latitude: 12° 3' 54" Sul;
- Longitude: 43° 32' 33" Oeste.

Define-se desta forma o ângulo de 12° 3' 54", voltado para face Norte como o mais adequado para a região, visto o movimento anual do sol ao redor da Terra, conforme as quatro estações do ano, sendo que podemos observar este fenômeno na figura 22.

Nesta figura 4.6 podemos observar que uma vez estabelecido a instalação para a face norte com o ângulo aproximado de 12°, teremos um melhor desempenho da potência solar no ano todo, garantido o bombeamento correto da água.

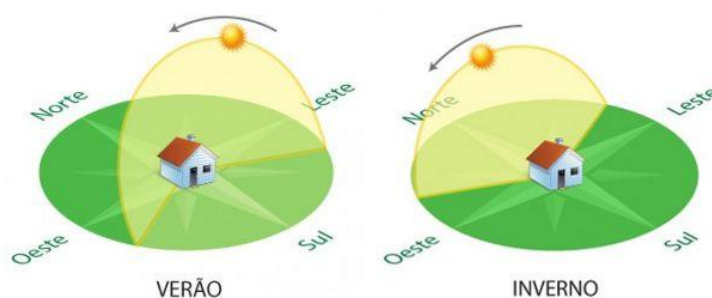


Figura 4.6: Movimento do sol no verão e inverno

Fonte: Cursos-Construir, 2017

Com as informações de localização geográfica, através do site do CRESESB pode-se determinar a irradiação média da cidade, sendo que pelo ângulo de 12°, temos uma irradiação média de 5,63kWh/m².dia, índice muito bom para produção solarimétrica se comparado com diversas outras regiões do Brasil, veja na figura 4.7 para averiguação de dados, podendo gerar mais de 5 horas de sol pleno por dia.

Cálculo no Plano Inclinado

Estação: Bom Jesus da Lapa
Município: Bom Jesus da Lapa, BA - BRA
Latitude: 13,2° S
Longitude: 43,418055° O
Distância do ponto de ref. (12,068261° S; 43,55186° O): 126,8 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
✓	Plano Horizontal	0° N	6,06	5,64	5,64	5,22	5,06	4,78	5,31	5,83	5,67	5,42	5,64	6,11	5,53	1,33
✓	Ângulo igual a latitude	12° N	5,67	5,44	5,66	5,50	5,58	5,40	5,97	6,30	5,80	5,30	5,33	5,66	5,63	1,00
✓	Maior média anual	13° N	5,63	5,42	5,66	5,51	5,62	5,44	6,02	6,33	5,80	5,28	5,29	5,62	5,63	1,05
✓	Maior mínimo mensal	11° N	5,70	5,47	5,67	5,48	5,55	5,35	5,92	6,27	5,80	5,31	5,36	5,70	5,63	,95

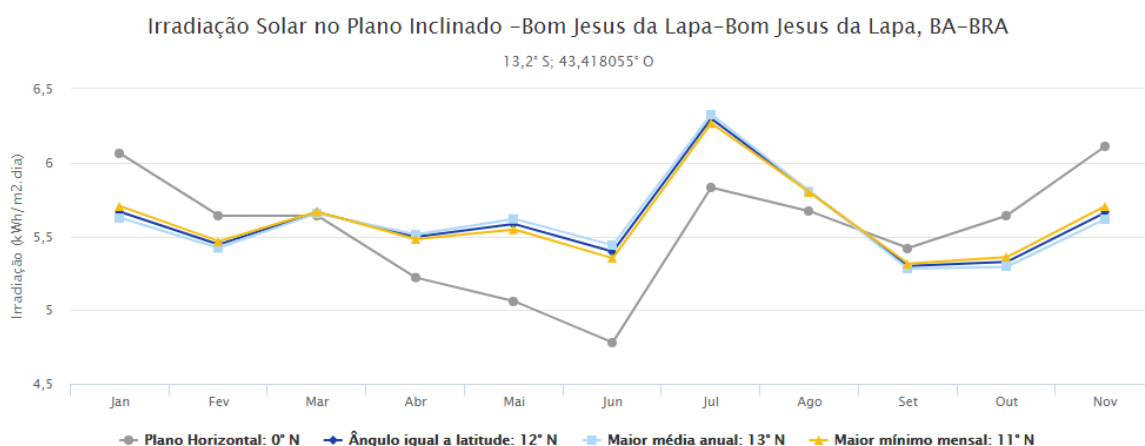


Figura 4.7: Índice de irradiação média da cidade

Fonte: CRESESB, 2017

Como forma de comprovar a média de horas de sol pleno (HSP), podemos aplicar o método pelo STC ou NOCT, sendo:

STC: irradiação média de 5,63kWh/m².dia / 1kW/ m² = 5,63 horas por dia;

NOCT: STC x 0,724= 4,07 horas por dia.

Em ambos os casos, a quantidade de horas de sol pleno de exposição diária é elevada, muito acima da média nacional.

Para a instalação das placas, fotovoltaicas, foram construído estruturas de fixação na modalidade de solo, conforme podemos observar na figura 4.8, no qual estes pilares

são posicionados no solo, para a melhor irradiação possível, desviando a instalação de sombras ou intempéries na fixação.



Figura 4.8: Estrutura de fixação para as placas na região, mesa com 8 placas

Fonte: do Autor

Uma vez definido o local da instalação, melhor ângulo e forma de fixação pela estrutura, foram feitos os cálculos para quantidade adequada de placas para bombeamento pelo período mínimo necessário para completar a caixa d'água, através da aquisição de um modelo de placa fotovoltaica de 320W com as seguintes características elétricas:

- Potência nominal de 320W;
- Corrente máxima de pico de 9,01A (Imp);
- Corrente de curto circuito de 9,93A (Isc);
- Tensão máxima de pico de 35,55Vcc (Vmp);
- Tensão de curto circuito de 45,79 Vcc (Voc).

Com este modelo definido, pode-se calcular a necessidade de placas pelas características da bomba e do inversor.

Para garantir o nível mínimo de tensão no inversor (Vcc no inversor) afim de iniciar o controle da bomba, necessitamos de 1,35x a tensão nominal da rede, pois este fator representa $\sqrt{2}$ (valor médio do sinal) multiplicado pela perda de conversão de energia interna do inversor em 4,5% (dados do fabricante):

$$\sqrt{2} \times 0,95 = 1,35$$

$$V_{ca} \text{ da rede} \times 1,35 = 220 \times 1,35 = 297V_{cc} \text{ (Vcc no inversor)}$$

O primeiro parâmetro da tensão pode ser atendido com:

$$V_{cc} \text{ no inversor} / V_{mp} = 297 / 35,55 = 8,35 \text{ placas}$$

$$V_{cc} \text{ no inversor} / V_{oc} = 297 / 45,97 = 6,46 \text{ placas}$$

Desta forma, podemos concluir que para atender nível de tensão mínimo, devemos ter entre 6,46 placas e 8,35 placas, no qual foi estabelecido 8 placas como resultado mais plausível.

Para atender o segundo parâmetro de corrente, temos que a bomba necessita de 12,8A para 220V trifásico, corrente do motor de nossa instalação. Com 8 placas temos uma corrente de 9,01A, no qual atenderá em condição um pouco abaixo da máxima da bomba, porém satisfatória para funcionamento da bomba pelo nível de irradiação do local, assim foi mantido o arranjo com 8 placas.

Para atender o terceiro parâmetro de potência, multiplica-se a potência da placa pela quantidade estabelecida:

$$P_{placa} \times \text{Número de placas} = 320 \times 8 = 2.560W$$

Como temos potência da bomba em 2.200W ou 3CV, atendemos com 8 placas o requerido pela bomba.

Como um quarto parâmetro, podemos averiguar a necessidade de horas de sol pleno na instalação pela vazão requerida da bomba para completar a caixa d'água. A bomba utilizada possui vazão de 3,6m³/h ou 3600 litros/h, na altura manométrica da instalação de 60 metros, sendo que para completar os 10.000 litros, teremos:

$$10.000 / 3600 = 2,77 \text{ horas de vazão a plena carga}$$

Como teremos no mínimo 4 horas de sol pleno, pelo método NOCT e 5,63 horas pelo método STC, atendemos também este requisito com 8 placas de arranjo.

Finalmente pela teoria da Lei de Ohm, corrente em série se mantém e tensão em série se soma, definindo de forma teórica o melhor arranjo para a instalação completa, conforme figuras 4.9 e 4.10.

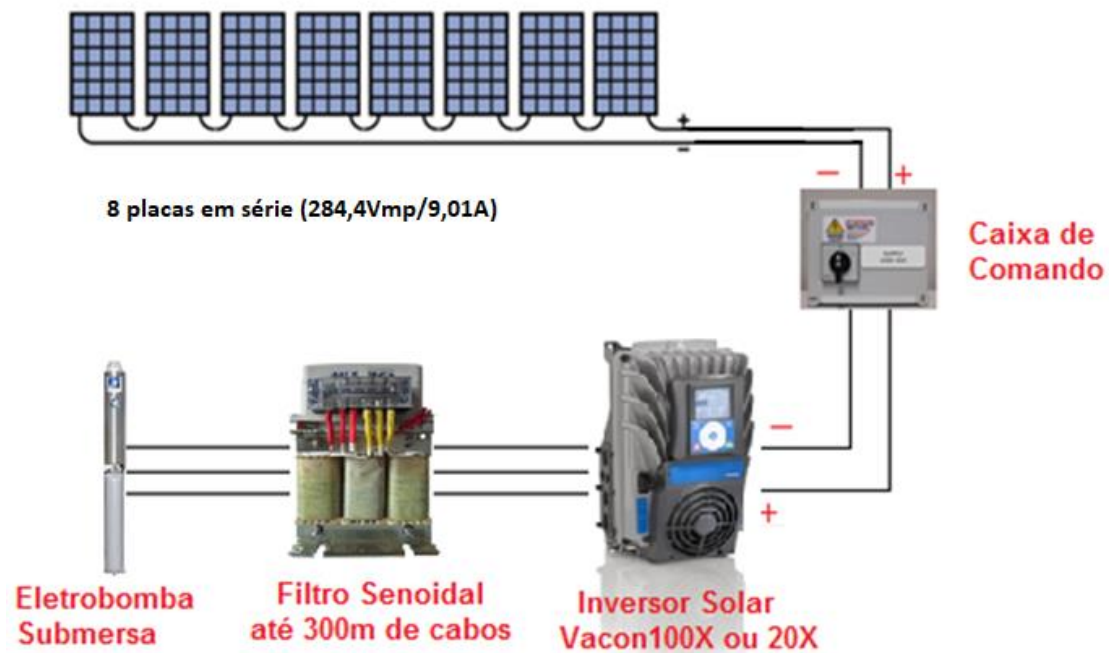


Figura 4.9: Arranjo elétrico para a instalação bomba solar de 3CV / 220Vca

Fonte: do Autor

Após toda análise técnica, a instalação deve conter, em diagramas de bloco:

- 8 placas solares fotovoltaicas de 320Wp em série;
- Caixa de comando e proteção;
- Inversor solar com controle MPPT, afim de otimizar o uso do inversor e controle da aplicação;
- Controle por sensores de nível e fluxo com válvula de atuação para encher o reservatório, quando receber o sinal que está no nível mínimo (existente);
- Filtro Senoidal para filtragem das harmônicas;
- Eletrobomba submersível de 3CV/220Vca (existente).

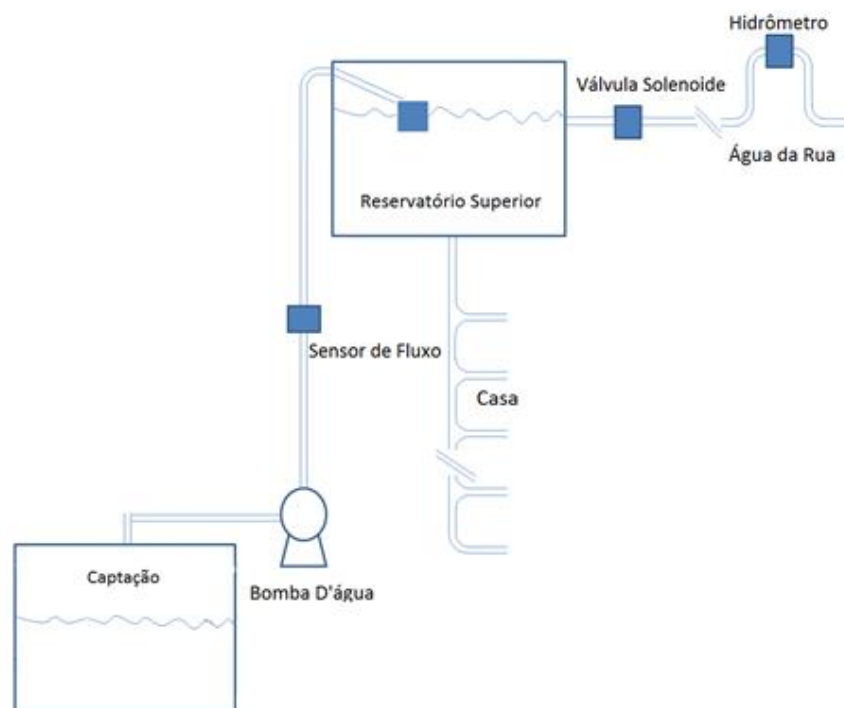


Figura 4.10: Esquemático simplificado da instalação

Fonte: do Autor

Assim segue os parâmetros atendidos para a instalação fotovoltaica na tabela 4.7.

Tabela 4.7: Tabela resumo da instalação solar fotovoltaica

<i>Tabela Resumo da Instalação</i>	
Números de Placas pela Tensão:	8 placas em série
Números de Placas pela Corrente:	8 placas em uma única fileira
Potência mínima:	$2.200\text{W} / 8 \text{ placas} = 2.560\text{W}$
Horas necessárias para vazão:	2,77 horas
Horas disponíveis de sol pleno	Entre 4,07 e 5,63 horas

Fonte: do Autor

Nas figuras 4.11 e 4.12, podemos ver o arranjo de montagem em campo das placas em mesas, com exemplo de instalação para futuras ampliações.

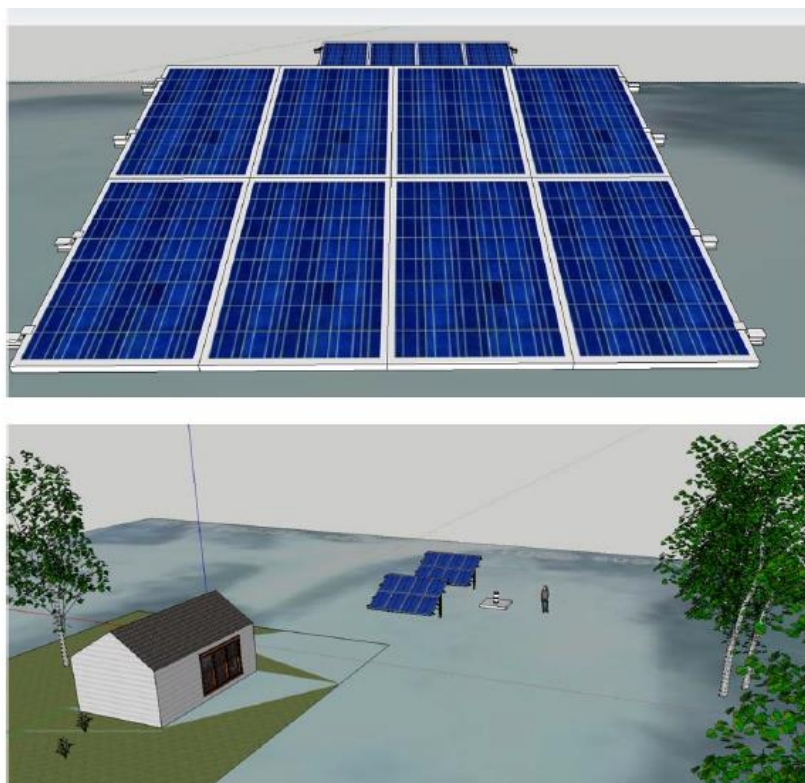


Figura 4.11: Arranjo de montagem civil da instalação

Fonte: do Autor



Figura 4.12: Local da instalação na comunidade, com visto da caixa ao fundo

Fonte: do Autor

4.6 Análise financeira da instalação do bombeamento solar fotovoltaico

Para efeito de análise financeira do projeto, levou-se em consideração diversos fatores, no qual o principal objetivo do trabalho era a redução dos gastos com o diesel nos geradores, visando aumentar o período de abastecimento do combustível e de forma direta ajudar o meio ambiente com uso de energia renovável e limpa.

Como efeito de memorial de cálculo, foi feito um passo a passo dos custos com o diesel atual, bem com os transportes, custo de reabastecimento entre outros.

De forma indireta, estamos considerando o custo de manutenção no valor estimado de R\$ 8.800,00, valor este informado pela equipe técnica da CERB, para manter funcionando o sistema diesel, sem contar o abastecimento do combustível, conforme histórico de uso do sistema:

Custo do Diesel direto:

- Capacidade do tanque do gerador a diesel: 25 litros
- Custo do diesel: R\$ 2,77/litro
- Custo do tanque: $2,77 \times 25 = \text{R\$ } 69,25/\text{tanque no gerador}$
- Autonomia media atual: 1 dia (8 horas de consumo)
- Abastecimentos mensais: 30x por mês (750 litros/mês)
- Custo mensal diesel: $69,25 \times 30 = \text{R\$ } 2.077,50$
- Custo anual de diesel: $2.077,50 \times 12 = \text{R\$ } 24.930,00$

Transporte para abastecimento:

- Caminhão de abastecimento: 20.000 litros (para 15 cidades)
- Frete Salvador/Muquém: R\$3,00/km (médio)
- Custo viagem: $\text{R\$ } 3,00 \times 710 = \text{R\$ } 2.130,00$
- Quantidade destinada a Muquém: 2.250 litros
- Autonomia: 3 meses
- Média viagens/ano: $12 \text{ meses} / 3 \text{ meses} = 4 \text{ viagens/ano}$
- Frete distribuído entre 15 cidades
- Custo frete anual: $(\text{R\$ } 2.130,00/15) \times 4 = \text{R\$ } 568,00$

Manutenção no sistema gerador:

- Manutenção estimada anual: **R\$ 8.800,00**

Custo total anual para Sistema com gerador diesel:

- $\text{R\$ } 24.930,00 + \text{R\$ } 568 + \text{R\$ } 8.800 = \text{R\$ } 34.498,00$

Baseado neste custo, temos a conclusão que se torna viável a instalação de sistema solar fotovoltaico, no qual é apresentado na tabela 4.8 os custos gerais de materiais, implantação e comissionamento do sistema para bombeamento da eletrobomba de 3CV.

Tabela 4.8: Custo de implantação de sistema solar fotovoltaico

<i>Material</i>	<i>Descrição</i>	<i>Qtde</i>	<i>Valor Unitário</i>	<i>Valor Total</i>
	Placa 320WATTS / 9,01A (Imp) / 9,93A (Isc) / 35,55Vcc (Vmp) / 45,79 Vcc (Voc)	8	R\$ 1.125,00	R\$ 9.000,00
	8 placas em série (284,4Vmp/9,01A)			
Para eletrobomba submersa 4" com motor elétrico assíncrono, trifásico, 3HP 220 V / 12,80 A / 60Hz / 3450 RPM ALIMENTAÇÃO MONOFASICA REDE 220Vca	Inversor de frequência alimentação monofásica CA/CC, distância máxima de instalação entre inversor e eletrobomba: 120m, modelo: VACON0100-3L-0011-2-X (para uso ao tempo com grau de proteção IP-66)	1	R\$ 5.000,00	R\$ 5.000,00
	Filtro Senoidal até 10A (até 300m)	1	R\$ 1.600,00	R\$ 1.600,00
	Caixa para proteção IP-66 (uso ao tempo) para filtro senoidal até 10A	1	R\$ 2.500,00	R\$ 2.500,00
	Instalação e Comissionamento em campo (materiais e mão de obra)	1	R\$ 6.500,00	R\$ 6.500,00

Fonte: do Autor

Como o gerador possui uma autonomia de 8 horas por dia, uma vez instalado o sistema teremos uma redução de 2,77 horas de uso do gerador, tempo necessário para abastecer a caixa d'água de 10.000 litros com a vazão da bomba de 3.600 litros/hora, pois este tempo será usado energia renovável proveniente do sol, sendo:

- Autonomia atual / horas liberadas do uso da bomba: $2,77 / 8 = 0,35$ ou **35% de redução**

Desta forma, com o novo cenário depois da instalação teremos:

- Custo do projeto Solar: R\$ 24.600,00 (instalado);
- $2,77 \text{ horas} / 8 = 35\%$ de redução de consumo;
- Custo anual do abastecimento: R\$ 34.498,00;
- Economia de 35%: R\$ 12.074,30
- Novo custo do abastecimento: R\$ 22.423,70
- Payback simples: $\text{R\$ } 24.600,00 / \text{R\$ } 12.074,30 = 2,03$ anos
- Aumento da autonomia do gerador: $3 \text{ meses} \times 1,35 = 4,05$ meses
- Média de viagens por ano: $12 \text{ meses} / 4 \text{ meses} = 3$ viagens por ano

Podemos ver na figura 4.13 a instalação do sistema com ampliação em outra comunidade.



Figura 4.13: Instalação solar na comunidade

Fonte: do Autor

5. ANÁLISE DOS DADOS

O presente estudo de caso teve como objetivo principal buscar uma solução sustentável com atendimento a diferentes opiniões de decisores, como forma de resolver um presente problema em comunidade remotas do sertão, especificamente na cidade de Muquém de São Francisco na Bahia, que seria a redução do uso de geradores à diesel.

Pode-se perceber com o acompanhamento do estudo em campo que os decisores, que eram: BID, Governo da Bahia e CERB, opinavam e discursavam de forma diferente, apesar de objetivar um único ponto em comum, que seria a substituição do gerador diesel, altamente poluente e custoso por uma fonte renovável com custo de manutenção bem menor.

Assim, como descrito no projeto, foi utilizando o método TOPSIS como forma de decisão, método este que consegue conciliar e colocar pesos nos fatores de decisão: impacto ambiental, custo de implantação e custo de manutenção, de forma mais clara e evidente para a melhor solução ao problema, mesmo que os decisores não tenham a capacitação técnica adequada para avaliar o problema, em todos os seus pontos técnicos.

Conforme resultado final da aplicação do modelo, o ranqueamento final obtido mostrou que a melhor alternativa para substituição do diesel no bombeamento da caixa d'água é a energia solar fotovoltaica mantendo a bomba já existente no local.

Em segundo lugar, revelou-se a alternativa da energia solar fotovoltaica substituindo a bomba existente por uma bomba nova. A diferença entre as duas apareceu no custo de implantação, visto que nos outros dois critérios o desempenho das alternativas é o mesmo. O custo para implementar uma nova bomba abrange tanto o custo de aquisição dessa bomba quanto o custo de retirada da bomba já instalado no local, além de toda mobilização de caminhões especiais e mão-de-obra especializada para implantação da bomba nova no local, que muitas vezes por diferenças de tamanho físico, requerem novas perfurações de poços.

A terceira alternativa do ranking foi a energia eólica, que apresentou custo de manutenção relativamente baixo, mas que foi contrabalanceada pelo alto custo de implantação. Além disso, no critério de impacto ambiental a fonte eólica ficou atrás da solar, pois apresentou mais fatores impactantes, como ruído, a necessidade de utilização de uma porcentagem do diesel, emitindo, portanto, uma parcela de gases poluentes, e o confronto com aves no local devido à altura dos geradores. Por último, ficou o diesel,

reforçando a necessidade de substituição do combustível visto que dentre as quatro alternativas ele apresentou o pior desempenho.

Dessa forma, a análise multicritério aplicada às diferentes técnicas de avaliação proporcionou ao modelo consistência nos processos de ordenação das alternativas para a decisão de uma fonte de energia renovável na no bombeamento da caixa d'água em locais remotos do sertão nordestino. O modelo proposto pode ser aplicável em qualquer sistema ou região com a substituição dos dados correspondentes à área desejada.

Conclusivamente, a aplicação do método definida, percebeu-se que o uso de inversor de frequência em bombas existentes de 2,2kW com controle solar MPPT, sem substituir a atual instalação e com uso de energia fotovoltaica como fonte de energia, era a melhor solução para os problemas de redução do diesel usado nos geradores atuais, poluentes ambientalmente, visualmente e sonoro.

Seu baixo custo de implantação, girando em torno de R\$ 24.000,00, quase metade para os demais métodos e seu custo operacional baixo, na ordem de R\$ 2.000,00, deixou o solar fotovoltaico na frente das opiniões de substituição das bombas e da eólica, pois a implantação se tornou rápida e de retorno imediato, no qual mesmo com potências baixas ou elevadas, o uso do inversor desenvolvido com controle MPPT para qualquer potência de corrente alternada, acaba por justificar seu empregabilidade nestas aplicações, pois não se faz necessário intervenção civil ou mecânica no poço e sim apenas inserção de caixas elétricas de comando com inversor.

Pode-se perceber, que a bomba neste caso específico representava 35% do consume das comunidades, pois em quase 2,77 horas necessárias para realizar o enchimento do tanque, o diesel era gasto, reduzindo o tempo de necessidade de envio de combustível para a comunidade que acontecia na ordem de 3 vezes ao ano, pois a comunidade utilizava o gerador por 8 horas pela noite.

Assim, diminuindo a necessidade de 2,77 horas no gerador, a economia de 35% é direta, estendendo necessidade de reposição de diesel para 4 meses.

Outro fator bem importante com esta implantação, foi o baixo payback simples do projeto, girando em torno de 2 anos, período mais que satisfatório para implantação de quaisquer projeto de eficiência energética no Brasil.

Assim, o projeto se justifica, no qual pode-se citar algumas as desvantagens do uso de diesel na instalação:

- Combustíveis fósseis são recursos finito que sofrem uma série de taxações sendo cada vez mais difícil prever o seu preço;

- Produzem ruídos elevados que podem prejudicar a audição;
- Emitem uma quantidade perigosa de gases nocivos à saúde;
- Produzem fumaça;
- O serviço de pós-venda dos geradores com custo elevado, pois seus componentes são caros e de difícil manuseio;
- O processo de instalação é lento e tem um custo elevado em relação a solar;
- Custo de manutenção alto e revisões frequentes;
- Requer cuidados adicionais e medidas de segurança para prevenir incêndios, vazamentos e contaminação.

Em contrapartida, podemos citar as vantagens do uso de bombeamento solar:

- Redução de emissão de CO₂;
- Uso de bombas d'água convencionais;
- Adequação para áreas isoladas, onde não há rede elétrica;
- Energia limpa e solução ecológica;
- Alto potencial energético diário;
- Zero Ruído na fonte de energia;
- Baixo custo de manutenção;
- Não dependência de energia convencional ou gerador a diesel;
- Uso da comunidade toda com armazenamento nas caixas d'água individuais e central;
- Dimensionado para atender a comunidade com reserva estratégica de 30% do volume;
- Capacidade de fornecimento ininterrupto para uso durante o dia inclusive.

Desta forma ficou evidente concluir que para a viabilização de um projeto renovável, em especial o fotovoltaico, temos a análise financeira econômica futuro (VPL) versus o investimento (CAPEX), vide anexo ao trabalho, como fatores predominantes na análise dos investidores para o sucesso ou fracasso do projeto, porém chegou ao objetivo principal do projeto que seria a substituição do diesel, elemento caro e não renovável por uma fonte renovável, com baixo custo de implantação e manutenção e atendendo a necessidade da comunidade em locais onde o sol é privilegiado para aplicações fotovoltaicas, além de todas as vantagens listadas acima.

6. CONCLUSÃO

Mesmo em um país tropical do tamanho geográfico do Brasil e potencial energético privilegiado se comparado com diversos outros países do mundo, ainda temos pouco projetos de energia renovável, especificamente solar fotovoltaica, no qual pelo site da ANEEL pode-se verificar que a fonte solar não ultrapassa 0,3% da matriz energética brasileira.

Vários motivos podem ser discursados, tais como pontos técnicos ou políticos, seja por desconhecimento da tecnologia, falta de incentivos ou pela falta de aplicabilidade desta fonte nos projetos governamentais. Ainda hoje se investe muito em fontes de gerações poluentes ou devastadoras de recursos ambientais, sendo que a solar fotovoltaica poderia ser uma solução rápida e de custo relativamente razoável em situações específicas, como mostrou neste estudo de caso em bombas submersas de elevação de água, no qual com a ajuda da academia e da indústria, desenvolvendo um projeto de inversor de frequência mais tecnológico e com mais recursos.

O estudo de caso mostrou de forma clara, que embasado pelo método Topsis, mesmo com pouco conhecimento dos decisores da tecnologia, mas apoiado em deduções e aplicabilidade teóricas, pode-se justificar uso de energia renovável em projetos fotovoltaicos, com baixo custo empregado e usando o que já estava instalado.

Ainda no estudo, podemos observar o grande valor social e econômico para a comunidade remota e isolada no sertão da Bahia, no qual foi aplicado uma tecnologia com uso de um fonte abundante na região, o sol. No mesmo tempo, foi reduzido em 35% o uso de um fonte poluidora, como o diesel, que além de cara, com difícil acesso de abastecimento pode causar danos a saúde humana.

Desta forma verifica-se que a tecnologia apesar de viável, tem um caminho bem grande a percorrer para quebrar a barreira do conhecimento na academia com aplicabilidade no cotidiano da sociedade, pois verifica-se ainda uma utilização baixa da solução, apesar do constante crescimento que estamos vendo nas instalações.

Outro ponto observado, é a conscientização da comunidade para o consumo adequado do diesel, sendo que o caminhão alterou sua rota para apenas 3 viagens ao ano.

Como sugestão de trabalho futuro, para melhor aproveitamento das demais horas de trabalho proveniente pela irradiação solar na região, quase 4 horas na média de sobra, sugere-se após o enchimento da caixa d'água, utilizar o sistema para prover energia elétrica no local, seja por armazenamento em bateria ou uso de inversor híbrido.

REFERÊNCIAS

ABB, disponível em: <http://new.abb.com/low-voltage/pt/industries/solar>. Acesso em 01/10/2017 às 19:51.

Accur8, disponível em: http://www accur8.com/Vanguard_2.htm. Acesso em 24/09/2017 às 20:48.

Altri Bombas, disponível em: <http://altri.com.br/wp-content/uploads/2014/03/9pg-bomba-sub-4AT10.pdf>. Acesso em 29/10/2017 às 20:25.

BEHZADIAN, M. E. A. A state-of the-art survey of TOPSIS applications, Expert Systems with Applications, v. 39, p. 13051-13069, 2012.

CicloVivo, disponível em: <http://ciclovivo.com.br/noticia/captador-de-agua-movido-a-energia-solar-e-alternativa-para-producao-rural/>. Acesso em 01/10/2017 às 18:15.

CRESESB (Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito) Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro, 2014. 530 p. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf.

Cursos-Construir, disponível em: <http://cursos.construir.arq.br/como-distribuir-os-ambientes-do-projeto-em-relacao-ao-norte-e-ao-sol/>. Acesso em 29/10/2017 às 22:14.

ENERGIA HELIOTERMICA, disponível em: <http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/energia-heliotermica/o-sol-fonte-de-energia>. Acesso em 28/01/2018 às 10:00.

FEDRIZZI, M. C. Fornecimento de água com sistemas de bombeamento fotovoltaico – dimensionamento simplificado e análise de competitividade para sistemas de pequeno porte. 1997. 123 f Dissertação (Mestrado 1997) –Universidade de São Paulo, São Paulo.

FITZGERALD, A.; JR, C. K.; UMANS, S. D. Máquinas Elétricas. 6ª ed. São Paulo: Bookman, 2006

GARCÍA-CASCALES, S. M.; LAMATA, M. T. On rank reversal and Topsis method. *Mathematical and Computer Modelling*, v. 56, p. 123 – 132, 2012.

GOLDEMBERG, J. LUCON, O. Energia e meio ambiente no Brasil. Dossiê Energia, Estudos avançados v.21 n.59, São Paulo 2007

GRAN VIEW RESEARCH (2016). Solar pumps market analysis and segment forecasts to 2022.

HERVA, M.; ROCA, E. Review of combined approaches and multi-criteria analysis for corporate environmental evaluation. *Journal of Cleaner Production*, v. 39, p. 355-371, janeiro 2013.

HWANG, C. L.; YOON, K. P. Multiple attributes decision making methods and applications, Berlin: Springer-Verlag, 1981.

Ilos, disponível em: <http://www.ilos.com.br/web/mais-aumentos-no-preco-do-diesel-em-2017/>. Acesso em 29/10/2017 às 18:16.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Sinopse do Senso Demográfico de 2011. Rio de Janeiro, 2011.

Khammas, A.A.W. Buch der Synergie, disponível em: http://www.buch-der-synergie.de/c_neu_html/c_04_02_sonne_geschichte_2.htm. Acesso em 23/09/2017 às 21:45.

Malczewski, J. (1999). GIS and Multicriteria Decision Analysis. John Wiley & Sons, New York.

MARINI, J. A.; ROSSI, L. A. Projeto de sistemas fotovoltaicos para oferta de energia elétrica a comunidades rurais.. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas. Proceedings online. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022002000200046&lng=en&nrm=abn>. Acessado em 23/09/2017 às 01:43.

MEAH, K.; FLETCHER, S.; ULA, S. Solar photovoltaic water pumping for remote locations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.12, p.472–487, 2008.

PEILLÓN, M.; SÁNCHEZ, R.; TARQUIS, A. M.; GARCÍA-FERNÁNDEZ, J. L. The use of wind pumps for greenhouse microirrigation: A case study for tomato in Cuba. *Agricultural Water Management*, v. 120 p.107– 114, 2013.

POHEKAR, S. D.; RAMACHANDRAN, M. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning – A review. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 8, p. 365-381, 2004.

SAATY, T. L. *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill, New York, 1980.

Saaty, T.L. (1977). A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures. *Journal of Mathematical Psychology*, v. 15 , p. 234-281, 1977.

SALAMONI, I.; RÜTHER, R. Potencial Brasileiro da Geração Solar Fotovoltaica conectada à Rede Elétrica: Análise de Paridade de Rede. IX Encontro Nacional e V Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído. Ouro Preto, 2007.

SILVA, Edna L., MENEZES, Esteia M., *Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação*. 3a Ed. Florianópolis: Editora Atual, 2001.

Spencer, R.W; Braswell, W.D.; Christy, J.R.; Hnilo, J., 2007. Cloud and radiation budget changes associated with tropical intraseasonal oscillations. *Geophys. Res. Lett.*, Vol34, L15707, doi: 10.1029/2007GL029698.

Toyama Geradores, disponível em: <http://www.toyama.com.br/?menu=produtos&marca=GERADORES&mega=59>. Acesso em 29/10/2017 às 18:45.

Vacon/Danfoss, disponível em: <http://drives.danfoss.com/products/vacon/#/>. Acesso em 01/10/2017 às 20:20.

Villalva, M., & Gazoli, J. (2012). *Energia Solar Fotovoltaica Conceitos e Aplicações*. São Paulo, Brasil: Érica Ltda.

VICK, B. D.; NEAL, B. A. Analysis of off-grid hybrid wind turbine/solar PV water pumping systems. *Solar Energy*, v. 86, p. 1197–1207, 2012.

von Winterfeldt, D. & Edwards, W. (1986). *Decision Analysis and Behavioural Research*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

YIN, Robert K. *Estudo de caso: planejamento e métodos*. 3ª ed. Porto Alegre: Ed. Bookman, 2005.

Zilles, Roberto; Macêdo, Wilson Negrão; Galhardo, Marcos André Barros; Oliveira, Sérgio Henrique Ferreira de: *Sistemas Fotovoltaicos Conectados À Rede Elétrica*. Oficina de Textos. São Paulo. 2012.