

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA - DAELT
CURSO ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ELIELTON DE SOUZA POLITYTO
NICOLE POLITYTO CREMASCO**

**ESTUDO DE VIABILIDADE DE PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
POR BOMBEAMENTO DE ÁGUA COM ENERGIA SOLAR**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2018

**ELIELTON DE SOUZA POLITYTO
NICOLE POLITYTO CREMASCO**

**ESTUDO DE VIABILIDADE DE PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
POR BOMBEAMENTO DE ÁGUA COM ENERGIA SOLAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Assade Leludak

CURITIBA

2018

Elielton de Souza Polityto
Nicole Polityto Cremasco

Estudo de viabilidade de produção de energia elétrica por bombeamento de água com energia solar

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 13 de junho de 2018.

Prof. Antônio Carlos Pinho, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa. Annemarlen Gehrke Castagna, Mestre
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Jorge Assade Leludak, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Carlos Henrique Karam Salata, Esp.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Bruno Akihiro Tanno Iamamura, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Marco Antonio Buseti de Paula, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica

RESUMO

CREMASCO, Nicole Polityto; POLITYTO, Elielton de Souza. **Estudo de Viabilidade de Produção de Energia Elétrica por Bombeamento de Água com Energia Solar**. 2018. 100 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

O presente trabalho apresenta um estudo referente à análise técnica da efetividade da implantação de um sistema de bombeamento para acumulação de energia advinda de fontes solares. Durante o desenvolvimento do estudo são expostos conceitos acerca da utilização de sistemas solares fotovoltaicos para geração de energia elétrica e algumas topologias possíveis para esse tipo de sistema. Ao longo do trabalho são também apresentados diferentes modelos de bombas e turbinas hidráulicas assim como máquinas elétricas. O foco consiste em seu princípio de funcionamento e a melhor aplicação juntamente a arranjos fotovoltaicos. Em termos práticos, foi construído um protótipo capaz de bombear determinado volume de água e posteriormente gerar energia elétrica através do fluxo de água na turbina de um gerador de corrente contínua. Foram realizadas medições para o sistema e comparados valores de tensão e corrente tanto para bombeamento quanto para geração. Os resultados evidenciaram um baixo rendimento, e uma alternativa apresentada no decorrer do trabalho foi a utilização da matriz com ímãs de Halbach para potencializar o campo magnético do gerador e elevar o rendimento do sistema.

Palavras-chave: Rendimento. Armazenamento de energia. Sistemas fotovoltaicos. Bombeamento. Geração.

ABSTRACT

CREMASCO, Nicole Polityto; POLITYTO, Elielton de Souza. **Feasibility Study of Electric Energy Production by Water Pumping with Solar Energy**. 2018. 100 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

The present work presents a study regarding the technical analysis of the effectiveness of the implantation of a pumping system for accumulation of energy from solar sources. During the development of the study are exposed concepts about the use of solar photovoltaic systems for electricity generation and some possible topologies for this type of system. Throughout the work are also exposed different models of pumps and hydraulic turbines, electric machines. The focus is on its principle of operation and the best application use together with photovoltaic systems. In practical terms, a prototype was built capable of pumping a certain volume of water and then generating electricity through the water flow in the turbine of a direct current generator. Several measurements were made for the system and voltage and current values were compared for both pumping and generation. The results showed a low yield, and an alternative presented during the work was the use of the matrix with Halbach magnets to potentiate the magnetic field of the generator and raise the efficiency of the system.

Keywords: Yield. Energy storage. Photovoltaic systems. Pumping. Generation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1. Consumo per capita em função do PIB brasileiro. | 14 |
| Figura 2. Componentes da radiação solar. | 20 |
| Figura 3. Capacidade instalada global de sistemas solares térmicos. | 21 |
| Figura 4. Constituição interna de uma célula fotovoltaica. | 22 |
| Figura 5. Célula fotovoltaica composta por Silício monocristalino. | 23 |
| Figura 6. Célula fotovoltaica de silício policristalino. | 24 |
| Figura 7. Célula de filme fino. | 24 |
| Figura 8. Exemplo de um painel fotovoltaico. | 25 |
| Figura 9. Relação entre corrente e tensão em uma célula fotovoltaica. | 26 |
| Figura 10. Influência da temperatura na operação de um módulo fotovoltaico. | 27 |
| Figura 11. Tipos de sistemas fotovoltaicos. | 29 |
| Figura 12. Topologia de um sistema fotovoltaico conectado à rede. | 30 |
| Figura 13. Sistema fotovoltaico autônomo instalado no litoral paranaense. | 31 |
| Figura 14. Esquema de um sistema fotovoltaico isolado. | 32 |
| Figura 15. Subdivisão das máquinas hidráulicas geratrizes. | 39 |
| Figura 16. Bomba volumétrica com indicação de fluxo. | 40 |
| Figura 17. Classificação das turbinas hidráulicas. | 42 |
| Figura 18. Funcionamento de um turbina Pelton, exemplo de turbina de ação. | 43 |
| Figura 19. Funcionamento de uma turbina de reação Francis. | 43 |
| Figura 20. Campo magnético em condutores percorridos por corrente elétrica. | 46 |
| Figura 21. Elementos constituintes de uma máquina elétrica de corrente contínua. | 47 |
| Figura 22. Representação de uma máquina de corrente contínua elementar. | 48 |
| Figura 23. Configuração dos ímãs na matriz de Halbach. | 51 |
| Figura 24. Corte transversal de um motor tubular com matriz de Halbach e influência nos fluxos. | 51 |
| Figura 25. Configuração de uma matriz de Halbach. | 52 |
| Figura 26. Gerador elementar. | 52 |
| Figura 27. Regra da mão esquerda (Força de Laplace). | 53 |
| Figura 28. Motor elétrico elementar. | 54 |
| Figura 29. Medição da tensão de saída do gerador. | 59 |
| Figura 30. Seleção de diferentes dispositivos para bombeamento do sistema. | 62 |
| Figura 31. Bomba JT-500. | 65 |
| Figura 32. Dados de placa da bomba JT-500. | 65 |
| Figura 33. Bomba hidráulica utilizada. | 66 |
| Figura 34. Bomba no reservatório. | 66 |
| Figura 35. Bateria de 12 V utilizada para acionar a bomba. | 67 |
| Figura 36. Gerador de corrente contínua F-50. | 68 |
| Figura 37. Turbina acoplada ao gerador. | 68 |
| Figura 38. Detalhes do gerador F-50. | 68 |

| | |
|--|----|
| Figura 39. Montagem do gerador. | 69 |
| Figura 40. Níveis de medição do reservatório de bombeamento. | 71 |
| Figura 41. Protótipo montado para o sistema de bombeamento. | 71 |
| Figura 42. Montagem do protótipo. | 74 |
| Figura 43. Gerador em funcionamento. | 74 |
| Figura 44. Primeira fase da desmontagem do gerador. | 79 |
| Figura 45. Segunda fase da desmontagem do gerador. | 79 |
| Figura 46. Rotor do gerador. | 79 |
| Figura 47. Turbina com o ímã original. | 80 |
| Figura 48. Processo de retirada dos ímãs do gerador. | 80 |
| Figura 49. Turbina, parte restante do ímã e alguns dos materiais utilizados. | 80 |
| Figura 50. Etapa inicial da montagem de matriz de Halbach. | 81 |
| Figura 51. Matriz com ímãs de Halbach. | 82 |
| Figura 52. Anomalia na matriz de Halbach. | 82 |
| Figura 53. Procedimento para a montagem da matriz de Halbach. | 83 |
| Figura 54. Matriz de Halbach com ímas de 12 x 4 x 2 mm. | 83 |
| Figura 55. Ímãs escolhidos para segunda tentativa de montagem da matriz de Halbach. | 84 |
| Figura 56. Cola de araldite. | 84 |
| Figura 57. Matriz de Halbach montada com ímas de 5 x 4 x 2 mm. | 85 |
| Figura 58. Matriz de Halbach no rotor. | 86 |
| Figura 59. Encaixe entre rotor e estator. | 86 |
| Figura 60. Polaridade do primeiro ímã utilizado. | 87 |
| Figura 61. Polaridade do segundo ímã utilizado. | 87 |
| Figura 62- Protótipo com lâmpada de carga. | 88 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1. Dimensões do reservatório de bombeamento..... | 72 |
| Tabela 2. Faixas de medição do reservatório de bombeamento..... | 72 |
| Tabela 3. Medições das grandezas elétricas do circuito de bombeamento. | 73 |
| Tabela 4. Vazão calculada para o sistema de bombeamento..... | 73 |
| Tabela 5. Medição de tensão a vazio do gerador..... | 75 |
| Tabela 6. Vazão volumétrica calculada para o sistema de geração a vazio. | 75 |
| Tabela 7. Valores medidos para uma carga de 2,18 k | 75 |
| Tabela 8. Potência elétrica gerada para uma carga de 2,18 k | 76 |
| Tabela 9. Valores medidos para uma carga de 100 | 76 |
| Tabela 10. Potência elétrica gerada para uma carga de 100 | 76 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|------|-----------------------------------|
| BNE | Balanço Energético Nacional |
| IGBT | Insulated Gate Bipolar Transistor |
| PIB | Produto Interno Bruto |
| CC | Corrente Contínua |
| CA | Corrente Alternada |
| SIN | Sistema Interligado Nacional |
| PVC | Policloreto de Vinila |

LISTA DE ACRÔNIMOS

| | |
|-------|--|
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| CEMIG | Companhia Energética de Minas Gerais |
| COPEL | Companhia Paranaense de Energia Elétrica |
| NdFeB | Neodímio Ferro Boro |
| ONS | Operador Nacional do Sistema Elétrico |
| SFVCR | Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede |
| SFI | Sistema Fotovoltaico Isolado |
| UTFPR | Universidade Tecnológica Federal do Paraná |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 11 |
| 1.1 TEMA | 11 |
| 1.1.1 Delimitação do Tema | 13 |
| 1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS | 14 |
| 1.3 OBJETIVOS | 16 |
| 1.3.1 Objetivo geral..... | 16 |
| 1.3.2 Objetivos específicos | 16 |
| 1.4 JUSTIFICATIVA | 16 |
| 2 REFERENCIAL TEÓRICO | 18 |
| 2.1 ENERGIA SOLAR..... | 18 |
| 2.1.1 Radiação solar | 18 |
| 2.1.2 Sistemas para conversão de energia solar em energia elétrica | 20 |
| 2.1.3 Células e módulos fotovoltaicos..... | 21 |
| 2.1.4 Fatores que influenciam a eficiência de um módulo fotovoltaico | 26 |
| 2.2 INVERSORES | 28 |
| 2.3 TOPOLOGIA DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS..... | 28 |
| 2.3.1 Sistemas fotovoltaicos conectados à rede | 29 |
| 2.3.2 Sistemas fotovoltaicos isolados | 31 |
| 2.4 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA | 32 |
| 2.4.1 Baterias..... | 34 |
| 2.4.2 Uso da água para geração de energia potencial | 35 |
| 2.5 ANÁLISE DOS TIPOS DE MÁQUINAS HIDRÁULICAS | 38 |
| 2.5.1 Bombas de deslocamento positivo | 39 |
| 2.5.2 Bombas centrífugas | 41 |
| 2.6 TURBINAS HIDRÁULICAS..... | 42 |
| 2.7 MÁQUINAS ELÉTRICAS PARA CONVERSÃO DE ENERGIA | 44 |
| 2.7.1 Máquinas elétricas de corrente contínua | 46 |
| 2.7.2 Circuito magnético do motor com configuração Halbach..... | 50 |
| 2.7.3 Geradores de Corrente Contínua a Ímã Permanente | 52 |
| 2.7.4 Motor de corrente contínua a ímãs permanentes..... | 53 |
| 2.8 MICROGERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA | 54 |
| 2.8.1 Centrais hidrelétricas | 55 |
| 2.8.2 Microgeração Hidrelétrica | 56 |
| 3 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA - CRITÉRIOS PARA DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA..... | 58 |
| 3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS | 58 |
| 3.2 DIMENSIONAMENTO DO PROTÓTIPO | 59 |
| 3.2.1 Sistema de bombeamento | 61 |
| 3.2.2 Sistema de geração | 63 |

| | |
|---|-----------|
| 3.3 MONTAGEM DO PROTÓTIPO | 64 |
| 3.3.1 Produção do sistema de bombeamento | 64 |
| 3.3.2 Produção do sistema de geração | 67 |
| 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS..... | 70 |
| 4.1 MEDIÇÕES REALIZADAS PARA O SISTEMA DE BOMBEAMENTO | 70 |
| 4.2 MEDIÇÕES REALIZADAS PARA O SISTEMA DE GERAÇÃO..... | 73 |
| 4.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA OS SISTEMAS SIMULADOS | 76 |
| 4.4 IMPLEMENTAÇÃO DA MATRIZ DE HALBACH NO PROTÓTIPO | 78 |
| 4.4.1 Análise dos resultados obtidos com a matriz com ímas de Halbach | 87 |
| 4.5 TESTE DO GERADOR COM UMA CARGA DE NATUREZA DISTINTA..... | 88 |
| 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 90 |
| 5.1 CONCLUSÕES..... | 90 |
| 5.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS | 91 |
| REFERÊNCIAS..... | 92 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

A demanda por fontes de geração de energia é crescente em escala global. De acordo com Ely (2014) a geração de energia até 2040 será de aproximadamente $4 \cdot 10^{13}$ kWh. Diante da crescente preocupação mundial com as mudanças do clima global, em especial o aquecimento do planeta e a emissão de gases de efeito estufa, as fontes de energia renováveis se tornam uma questão cada vez mais relevante (TOMALSQUIM *et al.*, 2007). Nessas circunstâncias, a utilização delas se faz necessária em um contexto de preservação ambiental.

No Brasil 64% da energia gerada é proveniente de fontes hídricas de acordo com Ministério de Minas e Energia – MME (2016). “O Brasil faz parte do grupo de países em que a produção de eletricidade é maciçamente proveniente de usinas hidrelétricas” (MME, 2007). Porém, quando há falta desta forma de energia, ocorrem os alertas de racionamentos e a utilização de fontes de energia mais caras e poluentes, como por exemplo as termelétricas, que servem como suplementação do sistema (TANCREDI E ABBUB, 2013). Desse modo, é pertinente o estudo de viabilidade de fontes de energia menos poluentes e mais baratas e que possam suprir pelo menos parte da falta das hidrelétricas em períodos de estiagem.

Para Swart *et al.* (2014, p. 138), vários fatores são favoráveis à utilização da energia solar fotovoltaica, como seu elevado rendimento e o baixo custo de manutenção dos arranjos fotovoltaicos. Para Moraes (2015, p. 30), a redução de preços no setor e o desenvolvimento tecnológico dos materiais semicondutores, utilizados na fabricação de painéis fotovoltaicos, possibilitou o aumento da participação na oferta total de energia no mundo de energia solar. Outro fator favorável a esta forma de geração de energia é que o próprio consumidor pode obter módulos fotovoltaicos, que dentre as formas de geração de energia renováveis são as que mais facilmente são adaptadas às edificações brasileiras (COSTA *et al.*, 2014). Além disso, segundo Ricardo *et al.* (2015) o Brasil possui grande potencial para a geração de energia por meio de sistemas fotovoltaicos, pois há altas taxas de irradiação solar em todo território. Segundo dados do MME (2017), referentes ao

Balanço Energético Nacional (BNE) para o ano-base de 2016, a oferta interna bruta de energia solar para o ano de 2016 foi de 85 GWh.

Porém, para Da Silva (2008, p. 11), energias advindas de fontes renováveis, tais como solar e eólica, precisam ser consumidas quando estão disponíveis. Contudo nem sempre a disponibilidade vem de encontro ao consumo. Segundo Swart *et al.* (2014, p.138), para a aplicação de sistemas de conversão de energia solar em energia elétrica é necessário estudos e pesquisas para que o custo de armazenamento de energia solar seja menor do que o de combustíveis fósseis. Sendo assim, faz-se necessário o desenvolvimento de técnicas capazes de armazenar a energia produzida de forma a reduzir perdas e custos.

O desenvolvimento e a otimização de tecnologias avançadas de armazenamento de energia são fundamentais para permitir a expansão massiva dos centros produtores de energia de origem renovável, de pequena e grande escala de potência, e a sua perfeita integração no Sistema Elétrico de Energia (SEE), com otimização do seu aproveitamento operacional e econômico. (COUTO, 2012, p.17)

Em conformidade a Couto (2012, p. 18), com o aumento da integração das redes de distribuição, são necessárias formas de integração dos centros produtores de baixa potência ao sistema elétrico. A eficiência da geração e armazenamento de energia advinda de fontes alternativas permitem confiabilidade e estabilidade ao sistema elétrico, além da incorporação dos centros de produção solar às redes de distribuição.

Uma maneira de armazenamento de energia, de acordo com Mierzwa (2002), que pode ser utilizada no campo das energias renováveis, é o emprego da água para o armazenamento e conversão de energia. Ainda conforme Mierzwa (2002), a aplicação da água como forma de armazenamento de energia ocorre com a utilização da energia cinética da vazão turbinada de uma coluna d'água sendo empregada com a finalidade de causar rotação a um eixo, que posteriormente provocará variação de um fluxo magnético e efetuará a conversão de energia. Miranda (2011), afirma que uma central hidráulica com bombeamento tem como objetivo o armazenamento de energia por potencial hídrico de jusante para montante do curso da água. Para Miranda (2011), a capacidade de armazenamento de

energia da água depende do volume de água armazenada e da altura da queda d'água.

O seu princípio de funcionamento consiste em bombear água de um reservatório a uma cota inferior para um reservatório a uma cota superior. Esta operação é realizada normalmente nas horas de vazio, consumindo assim energia excedente da rede elétrica. Esse volume de água armazenado no reservatório de cota superior é posteriormente turbinado especialmente nas horas de ponta, ou de cheia, produzindo energia para injetar na rede elétrica (MIRANDA, 2011,p.8).

Segundo Martins (2007, p. 2), o armazenamento de energia pela água ocorre quando se aumenta a altura da coluna d'água no momento em que a produção é superior ao consumo e recuperada posteriormente quando a produção não satisfaz o consumo.

1.1.1 Delimitação do Tema

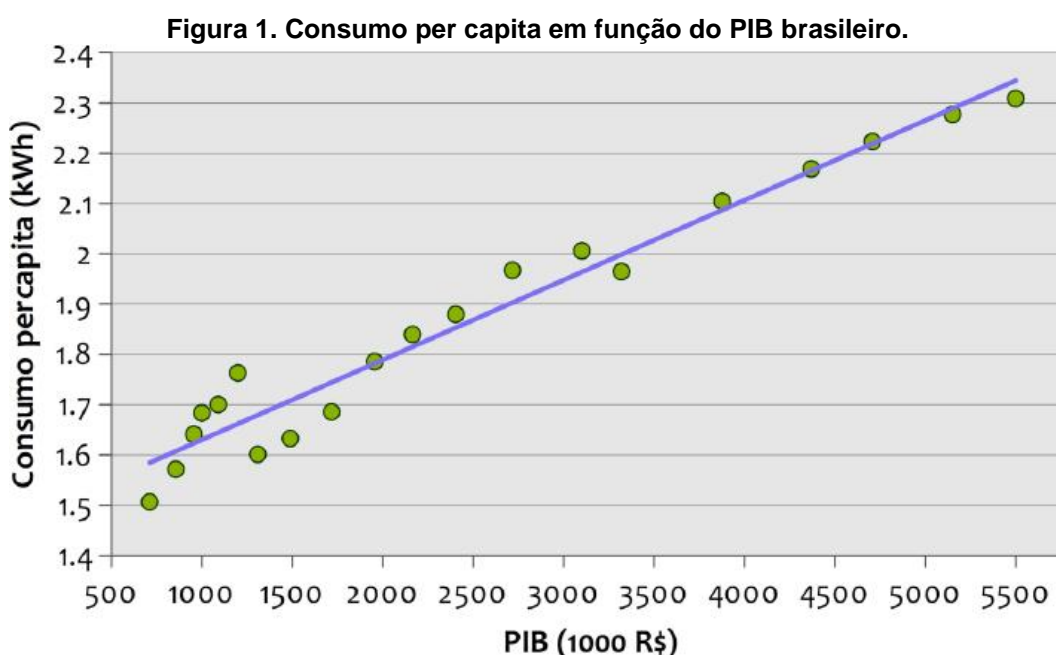
Neste trabalho será estudada a quantidade de energia proveniente de arranjos fotovoltaicos necessária para bombear água a um reservatório elevado, com finalidade de reaproveitamento desta água para geração de energia, da qual espera-se ser próxima ao valor utilizado para o bombeamento ao reservatório. O intuito é verificar a viabilidade técnica e econômica deste tipo de armazenamento utilizando materiais disponíveis no comércio e com baixo custo, de modo que esse equipamento possa ser montado em escala doméstica. Em relação aos tipos de sistemas fotovoltaicos, os sistemas fotovoltaicos isolados são colocados como foco da pesquisa, pois é uma topologia que necessita de algum sistema par acumulação de energia.

Para isto serão utilizadas as medições já realizadas nos painéis fotovoltaicos instalados na UTFPR Câmpus Curitiba.

Um sistema fechado será construído e designado de protótipo, com o intuito de estudar o consumo e produção de energia elétrica através do bombeamento de água para ser armazenada em um reservatório e posteriormente utilizar esta água para a produção de energia elétrica.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

O crescimento populacional, aliado a melhorias na qualidade de vida, aumento da renda e acesso a infraestruturas básicas, como moradia, transporte e saneamento básico da população brasileira impõem uma maior demanda por energia ao sistema elétrico brasileiro (PEREIRA *et al.*, 2017). A figura 1 apresenta uma relação entre o aumento do PIB e o consumo de energia elétrica no Brasil.



Fonte: Pereira *et al.*, 2017

Segundo Tiepolo (2014, p. 3), a principal fonte geradora de energia do Brasil é a hidráulica, por conta das grandes bacias hidrográficas do país. Contudo, sistemas de geração de energia elétrica por fontes hidroelétricas são diretamente sujeitos à influência de fatores climáticos, sendo assim os períodos de seca designam uma situação crítica à segurança da eficiência energética nacional (PEREIRA *et al.*, 2017). Quando ocorrem períodos de estiagem e o nível das barreiras diminui, a alternativa mais comum para a geração de energia elétrica é a utilização das usinas termelétricas.

Para Tancredi *et al.* (2013, p. 7), com o despacho de todas as usinas termelétricas do país, pode-se gerar em média 13200 MW para suprir baixos níveis ocasionais nos reservatórios das usinas hidrelétricas. Conforme citam os autores, embora essa operação supra o abastecimento necessário, ela é demasiadamente

cara e poluente. Segundo dados apresentados por Pereira *et al.* (2017, p. 12) na edição de 2017 do atlas solar fotovoltaico brasileiro, no ano de 2015 a oferta de energia gerada por usinas termoeletricas chegou a corresponder a 26% da oferta interna de energia brasileira, em contrapartida a um decréscimo de 19% na geração de energia elétrica por fontes hidráulicas. Ainda, Pereira *et al.* (2017) afirmam que durante esse mesmo período as emissões de carbono na geração de energia elétrica subiram de 82 para 137 kgCO₂/MWh.

Tendo em vista as adversidades encontradas na utilização das termoeletricas, assim como a relativa dependência da matriz energética brasileira por fontes hidráulicas, suscetíveis a variações climáticas, surge a necessidade de encontrar alternativas para solucionar o problema da geração de energia.

Uma alternativa para a diversificação do sistema elétrico brasileiro é o aproveitamento da energia advinda da radiação solar em energia elétrica por meio de sistemas fotovoltaicos. Segundo Moraes (2015) o Brasil possui grande potencial para esta forma de geração. Para elucidar o potencial solar do Brasil, no local com menor incidência de raios solares do país, é possível gerar mais energia a partir de sistemas fotovoltaicos do que na Alemanha, um dos principais pólos de geração de energia solar fotovoltaica no planeta.

Todavia os arranjos fotovoltaicos geram energia apenas durante o período em que há sol, pois o seu funcionamento é baseado na conversão de energia proveniente da radiação solar em energia elétrica, utilizando geralmente silício como material conversor (MEDEIROS, 2012). Pereira *et al.* (2017), afirmam que a energia solar é uma fonte intermitente de energia, pois possui uma variada modulação na quantidade de energia elétrica produzida, com uma considerável correlação com as condições meteorológicas do local em que a instalação fotovoltaica é realizada. Essa correlação explicita que a quantidade de energia elétrica convertida a partir de sistemas fotovoltaicos tem ponto mínimo ou nulo durante o período da noite ou durante períodos chuvosos ou nublados. Contudo os horários de pico de demanda por energia elétrica coincidem com o período noturno. Sendo assim, para o caso de horários de pico, entre as 18 e 22h, não há como utilizar diretamente a energia dos módulos fotovoltaicos (CABELLO, 2013).

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Estudo de viabilidade de aproveitamento da energia elétrica gerada por fonte solar, na forma de acumuladores de energia.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Revisar a teoria da geração de energia elétrica por fonte solar e sua eficiência;
2. Estudar os tipos de bombas d'água para reuso como gerador de energia;
3. Projetar e montar um sistema fechado para bombeamento de água e reaproveitamento para geração de energia elétrica por fonte solar;
4. Realizar ensaios e medições para determinar qual a quantidade de energia que poderia ser gerada a partir de um sistema solar fotovoltaico;
5. Verificar a viabilidade da técnica proposta.

1.4 JUSTIFICATIVA

Atualmente existe a necessidade e o intuito de aumentar de maneira significativa a participação de fontes renováveis de energia para a produção de eletricidade (DA SILVA, 2008, p.11). Uma destas fontes é a energia solar, cujo aproveitamento depende da irradiação solar, que varia de acordo com as coordenadas geográficas do local. Para Tiepolo *et al.* (2016), a média de irradiação solar total anual no Paraná em comparação à Europa é apenas menor do que a irradiação encontrada no Chipre e em Malta.

O estado do Paraná possui elevado potencial para geração de energia solar fotovoltaica. Segundo Tiepolo *et al.* (2014), em comparação a outras fontes renováveis de energia, como a energia eólica e a energia proveniente de biomassa, a energia solar fotovoltaica se mostra a mais propícia no estado do Paraná. Para

Tiepolo *et al.* (2014), o estado possui uma média anual de irradiação solar aproximadamente 52% maior do que a Alemanha. Pereira *et al.* (2017, p. 58), frisam a conveniência da aplicação de sistemas solares fotovoltaicos para a diminuição dos picos de demanda do Sistema Interligado Nacional (SIN) nas regiões Sul e Sudeste do Brasil. Tal utilidade ocorre, segundo os autores, porque entre os períodos entre março e dezembro ocorrem picos de demanda registrados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e durante esses meses também são registrados os valores máximos de irradiação solar para essas regiões. Para Tiepolo *et al.* (2014), a geração de energia por sistemas fotovoltaicos é conveniente por conta da possibilidade de instalação dos painéis fotovoltaicos próximo aos centros consumidores, como forma de geração distribuída.

Contudo, mesmo com um maior aproveitamento, em decorrência de menos perdas, relacionado à geração distribuída, ainda continua existindo um problema: essa fonte de energia não está sempre disponível (DA SILVA, 2008, p.11). Tal fato indica a adoção de técnicas para o armazenamento de energia proveniente dos painéis fotovoltaicos.

A função desempenhada pelos sistemas de armazenamento de energia no SEE é de extrema importância, pois permite compensar e regular as flutuações de disponibilidade operacional, diárias e anuais, das centrais produtoras de energia renovável, tais como energia solar e eólica, em que estão instalados. (COUTO, 2012, p. 1)

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesse capítulo do trabalho consta o embasamento teórico e a revisão bibliográfica acerca do tema apresentado no trabalho de conclusão de curso. Há como objetivo pesquisar e expor os seguintes temas:

- a. Energia solar;
- b. Inversores;
- c. Topologia dos sistemas fotovoltaicos;
- d. Armazenamento de energia;
- e. Análise dos tipos de máquinas hidráulicas;
- f. Turbinas hidráulicas;
- g. Máquinas elétricas para conversão de energia;
- h. Microgeração de energia.

2.1 ENERGIA SOLAR

O Sol pode ser descrito como uma fonte de energia abundante. A maioria das fontes energéticas são oriundas direta ou indiretamente do Sol, por exemplo, o ciclo das águas, a indução da circulação atmosférica, e inclusive o surgimento dos combustíveis fósseis são influenciados pela radiação solar como fonte de energia (CRESESB, 2014, p.47). Segundo CRESESB (2014), o Sol é a principal fonte de energia para a Terra e a radiação solar é uma fonte energética inesgotável, existindo assim um grande potencial de utilização a partir de sistemas de captação e conversão em outra forma de energia. A energia advinda do Sol que atinge o planeta Terra é transmitida a partir da radiação solar, que é formada por ondas eletromagnéticas com diferentes frequências.

2.1.1 Radiação solar

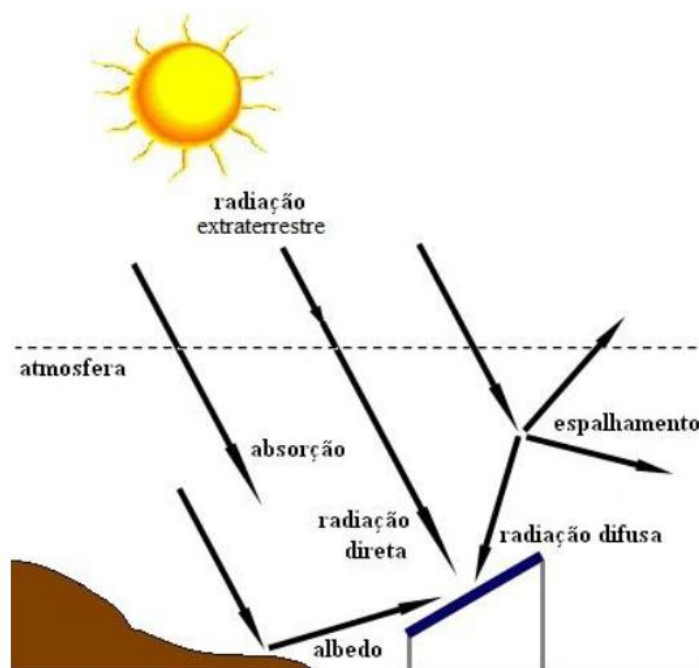
A radiação solar como fonte para conversão de energia é um recurso considerável. Diariamente incide sobre a superfície da terra mais energia vinda da radiação solar do que a demanda anual de todos os habitantes do nosso planeta (RÜTHER, 2004). Considerando a geometria terrestre e uma potência por unidade

de área de 1.367 W/m^2 advinda do Sol, a potência total disponibilizada pelo Sol à Terra, no topo da atmosfera terrestre é de 174 mil TW (CRESESB, 2014, p. 76). Conforme CRESESB (2014, p. 76), a potência por unidade de área média do fluxo de energia advindo da radiação solar na parte superior da atmosfera terrestre corresponde a 1.367 W/m^2 , essa medida recebe a denominação de constante solar. Em condições de céu claro, a máxima potência por unidade de área medida na superfície terrestre é de 1.000 W/m^2 (MANRIQUE, 2015 p. 21).

Existem determinadas denominações para quantificar os níveis de radiação solar, entre elas estão a irradiância e a irradiação. Segundo Manrique (2015, p. 21), a irradiância solar é a potência solar por unidade de área, tendo como unidade W/m^2 . A irradiação é a grandeza utilizada para quantificar a energia solar por unidade de espaço durante um determinado tempo, com unidade Wh/m^2 (MANRIQUE, 2015).

A radiação solar incidente sobre a superfície terrestre é constituída por uma componente direta e por uma componente difusa. A componente direta é oriunda diretamente da direção do Sol, enquanto a componente difusa atinge a superfície terrestre em todas as direções após sofrer espalhamento na atmosfera terrestre (CRESESB, 2014, p. 77). A figura 2 apresenta as componentes da radiação solar incidente.

Figura 2. Componentes da radiação solar.



Fonte: CRESESB, 2014

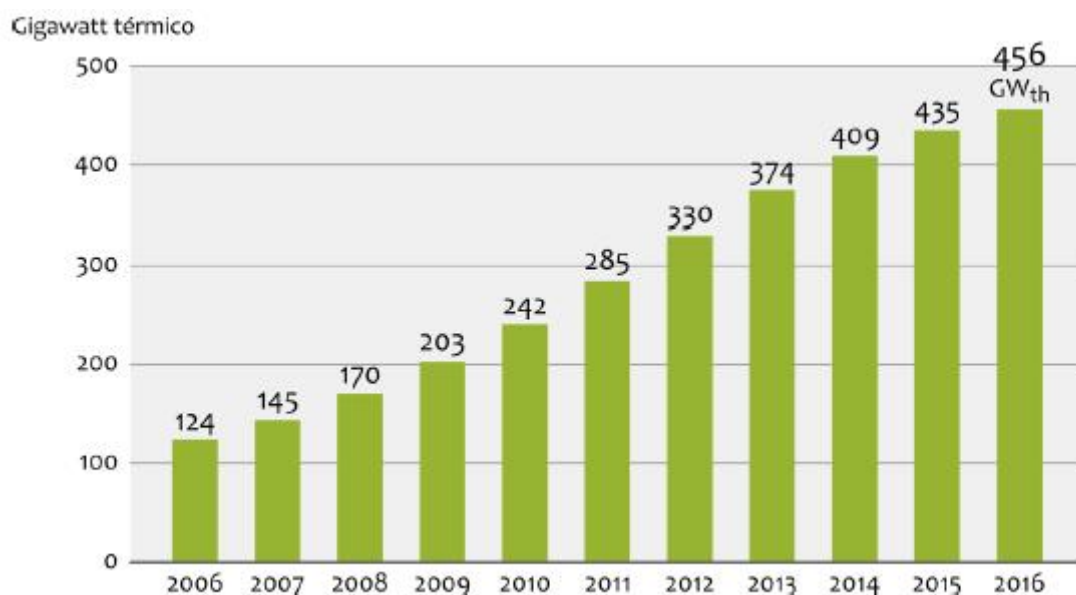
2.1.2 Sistemas para conversão de energia solar em energia elétrica

Os aproveitamentos mais difundidos da energia advinda da radiação solar podem ser descritos, de maneira simplificada, em termos de energia solar térmica e energia solar fotovoltaica. Segundo CRESESB (2014), a energia solar térmica é utilizada geralmente para aplicações relacionadas a aquecimento de água e outros fluidos, enquanto que a energia solar fotovoltaica converte a energia da radiação solar em eletricidade.

Para CRESESB (2014, p. 48), o foco da técnica de conversão da energia da radiação solar em energia térmica é baseado na capacidade de um determinado corpo absorver a radiação solar incidente sob a forma de calor. Os equipamentos mais empregados com esse fim são os coletores solares, que são dispositivos amplamente utilizados para aquecimento de água em residências e centros comerciais. Como não utilizam energia da rede elétrica, são uma alternativa de eficiência energética. A capacidade mundial instalada de coletores térmicos alcançou a marca de 456 GWth, com a predominância da China no mercado global e com o Brasil ocupando a 30ª colocação em termos de captação de energia solar térmica per capita no mundo (PEREIRA *et al.*, 2017). A figura 3 apresenta um gráfico

com a potência instalada mundial de sistemas solares térmicos entre os períodos de 2006 e 2016.

Figura 3. Capacidade instalada global de sistemas solares térmicos.



Fonte: Pereira et al., 2017

Segundo Pereira *et al.* (2017), em âmbito nacional, a utilização de sistemas de aquecimento de água a partir da conversão da energia solar possui uma boa viabilidade econômica pois pode substituir o emprego de chuveiros elétricos, já que os gastos com aquecimento de água correspondem a 24% do total de energia elétrica consumida no setor residencial.

Em contrapartida aos sistemas solares térmicos, os sistemas solares fotovoltaicos utilizam a energia advinda da radiação solar para produzir eletricidade e não como uma fonte de calor. O dispositivo básico utilizado como forma de conversão da energia solar em energia elétrica é a célula fotovoltaica. Sendo o conjunto de células fotovoltaicas interconectadas denominado de módulo ou painel fotovoltaico.

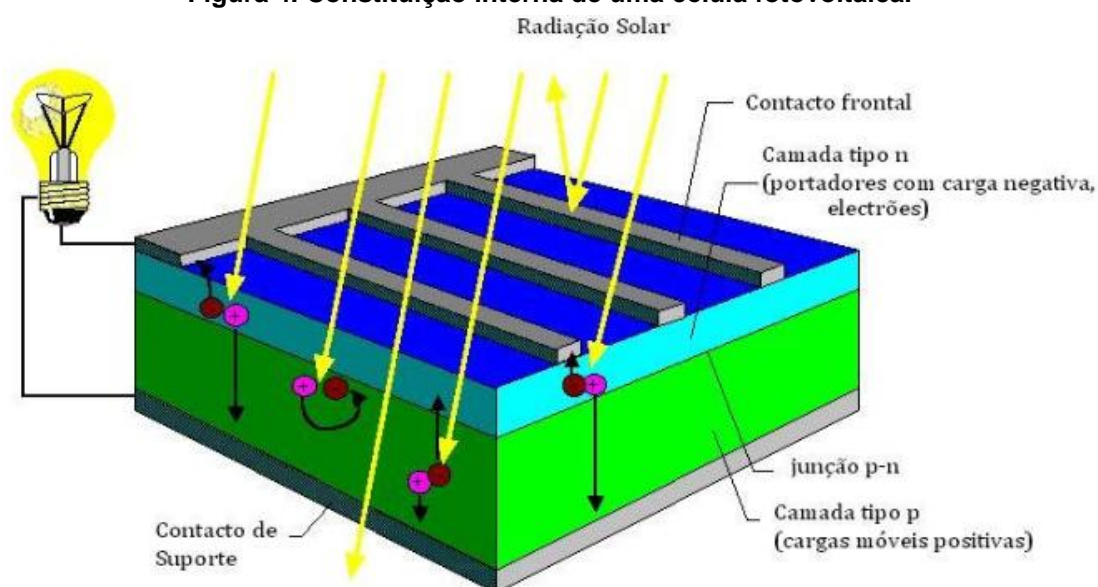
2.1.3 Células e módulos fotovoltaicos

O fenômeno físico que torna possível a conversão da energia oriunda da radiação solar em eletricidade é o efeito fotoelétrico. Esse fenômeno foi descoberto

pelo físico e cientista francês Alexandre Edmond Bequerel em 1839. Em seus experimentos, Bequerel observou que ao iluminar uma solução ácida surgia uma diferença de potencial entre seus terminais (CRESESB, 2014, p. 103). Segundo CRESESB (2014, p. 18), o efeito fotoelétrico é o surgimento de uma diferença de potencial nos terminais de um material semiconductor em decorrência da absorção da radiação da luz solar.

A estrutura de uma célula fotovoltaica é composta por duas camadas de material semiconductor P e N, uma grade de coletores metálicos superior e uma base metálica inferior (VILLALVA; GAZOLI, 2012). A figura 4 ilustra a constituição de uma célula fotovoltaica com fluxo de corrente contínua.

Figura 4. Constituição interna de uma célula fotovoltaica.



Fonte: Castro, 2013

Segundo Villalva e Gazoli (2012, p. 65), a grade superior e a base são compostos metálicos e desempenham o papel de terminais elétricos que fazem a coleta da corrente elétrica produzida pela luz. A base inferior da célula fotovoltaica é composta por uma película de prata ou de alumínio, enquanto que a parte superior é constituída por finos contatos elétricos. Uma célula fotovoltaica comercial possui ainda uma camada de material antirreflexivo, necessária para evitar a reflexão e aumentar a absorção de luz pela célula solar (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

As junções P-N presentes em uma célula fotovoltaica são compostas por materiais semicondutores (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2005). Esses materiais não podem ser classificados como isolantes ou condutores e possuem suas

características influenciadas pela adição de impurezas em sua composição. As camadas semicondutoras das células fotovoltaicas são constituídas por diversos materiais, sendo o Silício sendo o material mais comum, pelo fato de ser uma matéria-prima barata e abundante (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Há diversas tecnologias utilizadas na fabricação de células e módulos fotovoltaicos. As tecnologias de células fotovoltaicas mais comuns encontradas no mercado são a do silício monocristalino, a do silício policristalino e a do filme fino de silício (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

As células fotovoltaicas compostas por silício monocristalino, expostas na figura 5, são caracterizadas por uma organização molecular homogênea e uma única estrutura cristalina (MANRIQUE, 2015). Segundo Villalva e Gazoli (2012, p. 70), as células de silício monocristalino são as mais eficientes produzidas em escala comercial, porém possuem um custo de produção mais elevado do que os outros tipos de células.

Figura 5. Célula fotovoltaica composta por Silício monocristalino.



Fonte: Manrique, 2015

Segundo Manrique (2015, p. 23), as células fotovoltaicas policristalinas, apresentadas na figura 6, são compostas por um lingote formado por pequenos cristais de Silício com diferentes orientações e tamanhos. Viana (2008), afirma que na tecnologia policristalina o painel é constituído por um número muito elevado de pequenos cristais da espessura de um fio de cabelo humano, porém há descontinuidades na estrutura molecular que dificultam o movimento de elétrons e encorajam a recombinação com as lacunas, o que reduz a potência de saída. As células de silício policristalino possuem eficiências comerciais entre 13% e 15% (MANRIQUE, 2015, p. 23).

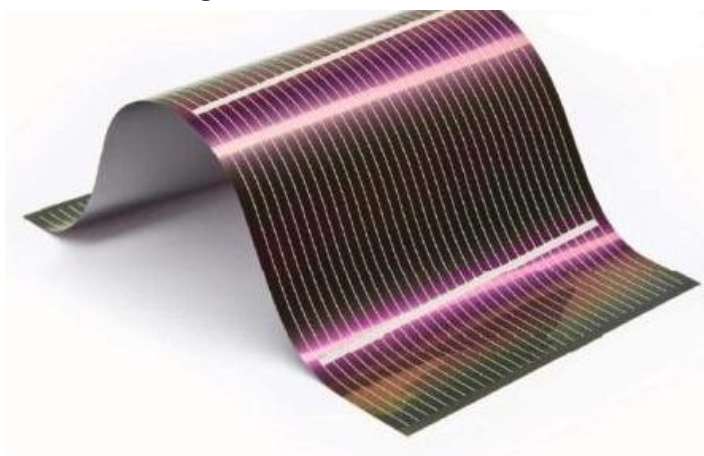
Figura 6. Célula fotovoltaica de silício policristalino.



Fonte: Manrique, 2015

A fabricação de células fotovoltaicas a partir da tecnologia de filmes finos é uma técnica mais recente do que a fabricação por cristais de silício. Segundo Villalva e Gazoli (2012, p. 72), os filmes finos consomem menos energia e possuem uma complexidade menor em sua fabricação, o que torna seu custo mais baixo em relação às tecnologias com cristais de silício. Contudo, Villalva e Gazoli (2012) citam que esses dispositivos têm baixa eficiência e sofrem degradação de uma maneira mais acelerada do que as células fotovoltaicas compostas por silício cristalino. A figura 7 ilustra uma célula fotovoltaica a filmes finos.

Figura 7. Célula de filme fino.



Fonte: Manrique, 2015

As células fotovoltaicas são o componente básico de um sistema de geração de energia solar fotovoltaica, porém de maneira isolada produzem pouca eletricidade, insuficiente para suprir as demandas geralmente relacionadas a sistemas solares fotovoltaicos. Villalva e Gazoli (2012, p. 76) indicam que uma célula

fotovoltaica isolada fornece uma tensão de aproximadamente 0,7 Volts. Logo, existe a necessidade de agrupamento das células fotovoltaicas como o intuito de atingir níveis de corrente e tensão adequados a aplicações residenciais, comerciais ou mesmo industriais. Segundo Urbanetz (2010, p. 35), as células fotovoltaicas podem ser conectadas eletricamente em série e em paralelo a fim de formar um módulo fotovoltaico. A conexão dos módulos fotovoltaicos origina os painéis fotovoltaicos, conforme é ilustrado na figura 8.

Figura 8. Exemplo de um painel fotovoltaico.



Fonte: Urbanetz, 2010

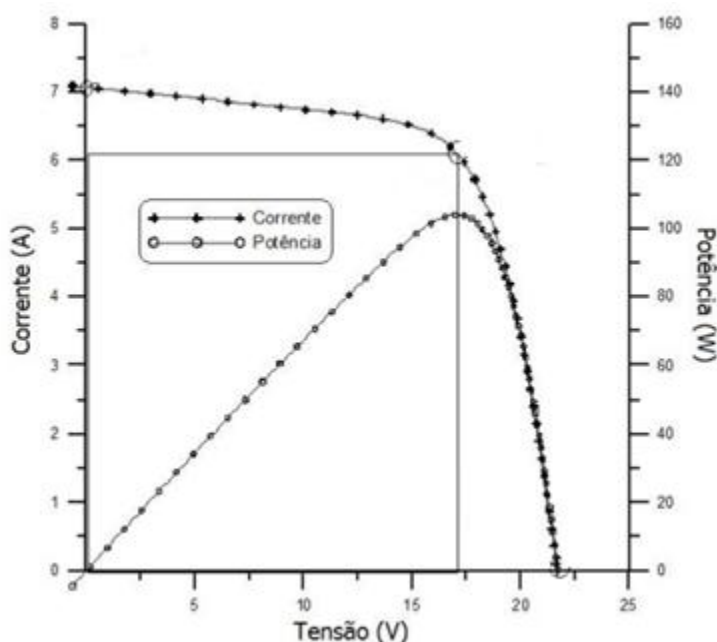
Arranjo fotovoltaico é a denominação dada a um agrupamento de módulos fotovoltaicos. Em um arranjo fotovoltaico, os módulos solares podem estar conectados em série, em paralelo, ou em ambas as configurações. A escolha da maneira pela qual é realizada essa conexão é feita a partir das características pelas quais o sistema em questão está submetido. Para Villalva e Gazoli (2012, p. 88), a conexão dos módulos em série é comum em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, enquanto a conexão em paralelo é geralmente utilizada em sistemas fotovoltaicos autônomos, por conta das características de tensão e corrente presentes em cada sistema.

Na conexão em paralelo, o sistema fotovoltaico fornece uma tensão de saída que é igual à tensão individual de cada módulo, enquanto a corrente fornecida é a soma das correntes presentes em cada módulo. No caso da conexão em série dos módulos fotovoltaicos, a corrente elétrica a que o sistema fotovoltaico é submetido é

constante e igual à corrente que circula por cada módulo, enquanto que a tensão de saída é igual a soma das tensões de cada módulo conectado em paralelo.

Em relação a seu funcionamento, os painéis fotovoltaicos possuem um comportamento diferente de uma fonte elétrica convencional. Em um módulo fotovoltaico, a tensão de saída não é constante. Villalva e Gazoli (2012, p. 77), afirmam que a corrente e tensão nos terminais de um módulo fotovoltaico dependem do aparelho que está conectado a seus terminais. Como pode ser visto na figura 9, se um dispositivo que demanda muita corrente for conectado a um módulo fotovoltaico a tensão de saída tende a diminuir, enquanto que se um aparelho que possua uma tensão elevada for conectado a um módulo fotovoltaico, o módulo da corrente elétrica é propenso a decrescer. Em sistemas fotovoltaicos, a potência elétrica produzida depende dos parâmetros de tensão e corrente da carga conectada ao sistema, existindo um ponto de máxima potência para o sistema.

Figura 9. Relação entre corrente e tensão em uma célula fotovoltaica.



Fonte: Adaptado de CRESESB, 2014

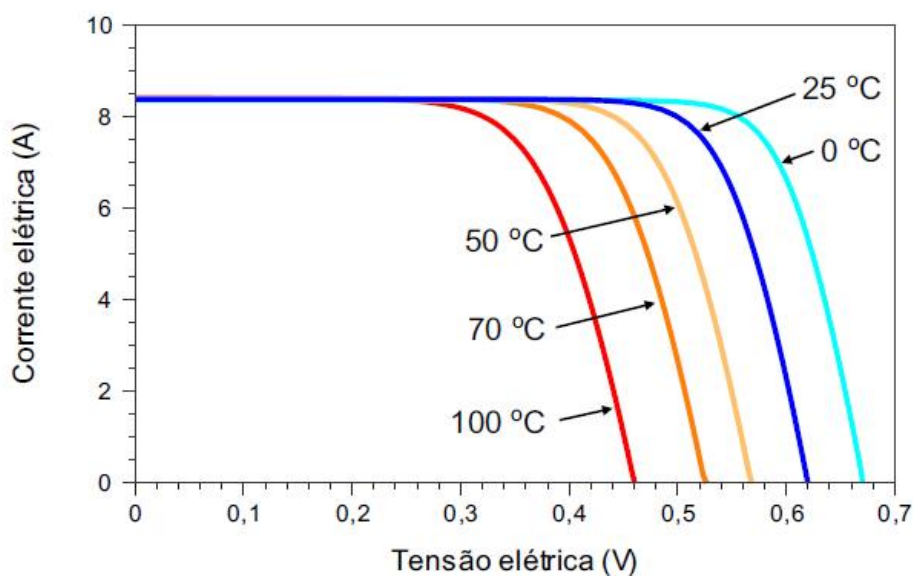
2.1.4 Fatores que influenciam a eficiência de um módulo fotovoltaico

A eficiência em relação à conversão de energia das células solares é relacionada a uma série de fatores. Segundo (CRESESB, 2014, p. 124), a temperatura a que as células fotovoltaicas estão submetidas, a irradiância incidente

e sua distribuição espectral são alguns dos fatores que mais influenciam na operação e rendimento dos sistemas fotovoltaicos.

A influência da temperatura na eficiência dos sistemas fotovoltaicos ocorre em consequência da alteração da tensão de saída do módulo fotovoltaico. A tensão de uma célula fotovoltaica diminui significativamente com o aumento da temperatura, enquanto que a corrente sofre uma pequena alteração, quase desprezível (CRESESB, 2014). Segundo Villalva e Gazoli (2012, p. 80), com o aumento da temperatura, ocorre também uma diminuição na potência fornecida, pois a potência é o produto da tensão e da corrente do módulo. A figura 10 ilustra a relação entre corrente e tensão de saída de um módulo fotovoltaico e a temperatura a que o módulo está submetido.

Figura 10. Influência da temperatura na operação de um módulo fotovoltaico.



Fonte: CRESESB, 2014

Quanto ao efeito da irradiância incidente na eficiência de um módulo fotovoltaico, a corrente elétrica fornecida pelo módulo aumenta linearmente com o acréscimo da irradiância solar incidente (CRESESB, 2014, p. 125). Logo, para que o sistema fotovoltaico tenha uma maior eficiência quanto à conversão de energia solar em energia elétrica, deve-se posicionar o módulo de modo que o montante de radiação solar incidente seja máximo. Nesse contexto, a instalação de um módulo fotovoltaico deve levar em consideração o ângulo do módulo em relação ao solo. Quanto ao ângulo de incidência dos raios solares, a produção de energia elétrica

ocorre de forma mais eficiente quando os raios solares são projetados perpendicularmente ao plano do painel fotovoltaico (RICARDO *et al.*, 2015, p.42). A latitude do local influencia diretamente na escolha do ângulo de inclinação do módulo fotovoltaico, isso ocorre devido à declinação solar, que é o ângulo dos raios solares com relação ao equador (RICARDO *et al.*, 2015, p.42).

2.2 INVERSORES

A tensão de saída dos módulos fotovoltaicos se apresenta na forma contínua, porém a maioria dos aparelhos eletrodomésticos é construída para operar com tensões alternadas em seus terminais. Assim, é necessária a utilização de um dispositivo que realize a conversão dos níveis de tensão contínuos para tensões alternadas (VILLALVA; GAZOLI, 2012). Nos sistemas fotovoltaicos, a saída para esse problema é geralmente a utilização de inversores de frequência. Como a rede convencional se apresenta na forma alternada e a produção das placas fotovoltaicas possui forma contínua, é necessária a utilização de inversores de frequência, que possuem a função de alterar a forma de corrente e tensão contínua em alternada (GONÇALVES; PEREIRA, 2008).

Os inversores de frequência são formados basicamente por uma ponte retificadora e capacitores de filtro, que alimentam um barramento DC, que por sua vez alimenta transistores IGBT's (*Insulated Gate Bipolar Transistors*) que são comandados através de uma lógica de controle (RODRIGUES, 2007).

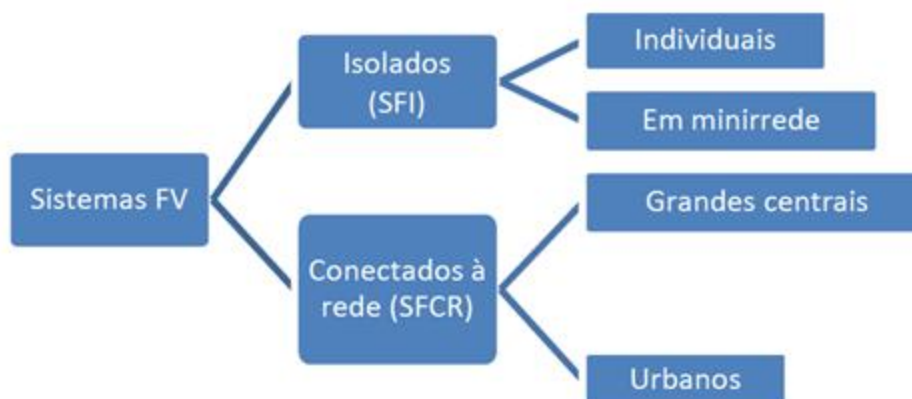
Segundo CRESESB (2014, p. 239), alguns critérios que indicam a qualidade de um inversor de frequência são a eficiência na conversão de energia, alta confiabilidade e baixa manutenção e o baixo conteúdo harmônico das formas de onda senoidais.

2.3 TOPOLOGIA DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Os sistemas fotovoltaicos para geração de energia elétrica podem ser classificados em relação à maneira pela qual são conectados ao sistema de fornecimento de energia elétrica: como sistemas fotovoltaicos conectados à rede, e

sistemas fotovoltaicos isolados ou autônomos, assim como apresentado na figura 11.

Figura 11. Tipos de sistemas fotovoltaicos.



Fonte: Urbanetz, 2010

2.3.1 Sistemas fotovoltaicos conectados à rede

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede são caracterizados por possuírem alguma conexão direta à rede de fornecimento de energia elétrica. São sistemas geralmente empregados em centros urbanos como uma forma de geração descentralizada de energia elétrica. Segundo Villalva e Gazoli (2012), os sistemas fotovoltaicos conectados à rede operam em paralelo à rede elétrica, empregados em locais já previamente atendidos pelo sistema elétrico de potência, tendo como função diminuir o consumo de energia da rede pública ou mesmo gerar excedentes de energia.

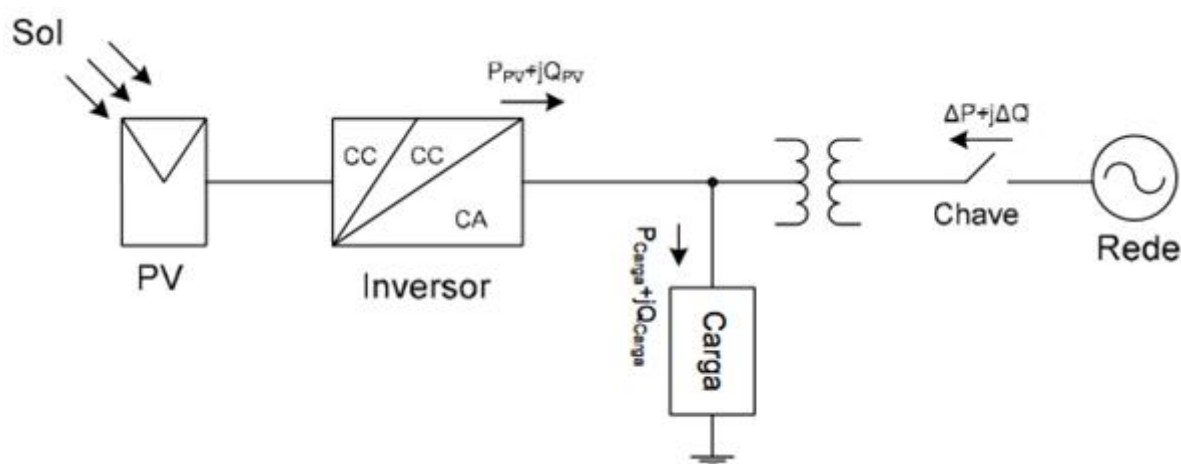
Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede são vistos como uma forma de geração distribuída ao longo de alimentadores da rede elétrica de distribuição, em baixa ou média tensão e contribuem para disponibilizar a energia próximo ao ponto de consumo. (URBANETZ, 2010, p. 37)

Urbanetz (2010, p. 37) afirma que as principais vantagens de sistemas fotovoltaicos conectados à rede consistem na ausência de sistemas de armazenamento de energia e no fato de esses sistemas possuírem elevada produtividade, pois toda a energia gerada pelo módulo é utilizada.

No Brasil, a utilização de sistemas fotovoltaicos conectados à rede teve um marco em abril de 2012, quando a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) publicou a resolução nº 482. Quando esta norma entrou em vigor, houve a regulamentação da produção de energia elétrica por parte do consumidor, fato que incentivou a utilização de microgeradores e minigeradores de eletricidade baseados em fontes alternativas de energia conectados à rede elétrica. A referida resolução possibilita que micro e mini sistemas fotovoltaicos sejam construídos por usuários e empresas, visando a produção de eletricidade para consumo próprio (VILLALVA; GAZOLI, 2012). Essa resolução possibilita também o sistema de compensação de energia elétrica. Nesse mecanismo, a potência ativa que a unidade consumidora injeta na rede de distribuição é entregue a companhias distribuidoras como forma de empréstimo gratuito. A unidade consumidora passa a ter um crédito de energia que pode ser consumido em um prazo de sessenta meses.

Quanto à sua topologia, em sistemas fotovoltaicos conectados à rede são empregados um painel fotovoltaico e um inversor de frequência, além de elementos de proteção elétrica e possíveis automações. A figura 12 ilustra a disposição de um sistema fotovoltaico conectado à rede.

Figura 12. Topologia de um sistema fotovoltaico conectado à rede.



Fonte: Brito, 2013

2.3.2 Sistemas fotovoltaicos isolados

Em contrapartida aos sistemas fotovoltaicos conectados à rede, os sistemas fotovoltaicos isolados ou autônomos não possuem uma interligação direta à rede de distribuição ou de transmissão de energia elétrica. Segundo Villalva e Gazoli (2012, p. 99), os sistemas fotovoltaicos autônomos são utilizados em locais que não podem ser atendidos pela rede elétrica e podem ser aproveitados para fornecer energia elétrica para zonas rurais, praias, ilhas ou qualquer localidade em que a energia elétrica não esteja disponível.

Segundo a edição 299 da Revista de distribuição dirigida da Companhia Paranaense de Energia Elétrica (2012), a companhia instalou no ano de 2012 sistemas fotovoltaicos isolados nas ilhas de Superagui, Ilha das Peças e na Ilha do Mel, sistemas que integram o projeto luz para todos. Cada unidade consumidora pode consumir um montante de até 45 kW/h do sistema. Esses sistemas permitem a eletrificação de localidades em que o relevo e a demanda por energia não favorecem a geração ou transmissão de energia elétrica pela rede elétrica convencional, justificando assim a utilização de sistemas fotovoltaicos isolados. A figura 13 apresenta um arranjo fotovoltaico instalado no litoral paranaense pelo programa luz para todos.

Figura 13. Sistema fotovoltaico autônomo instalado no litoral paranaense.

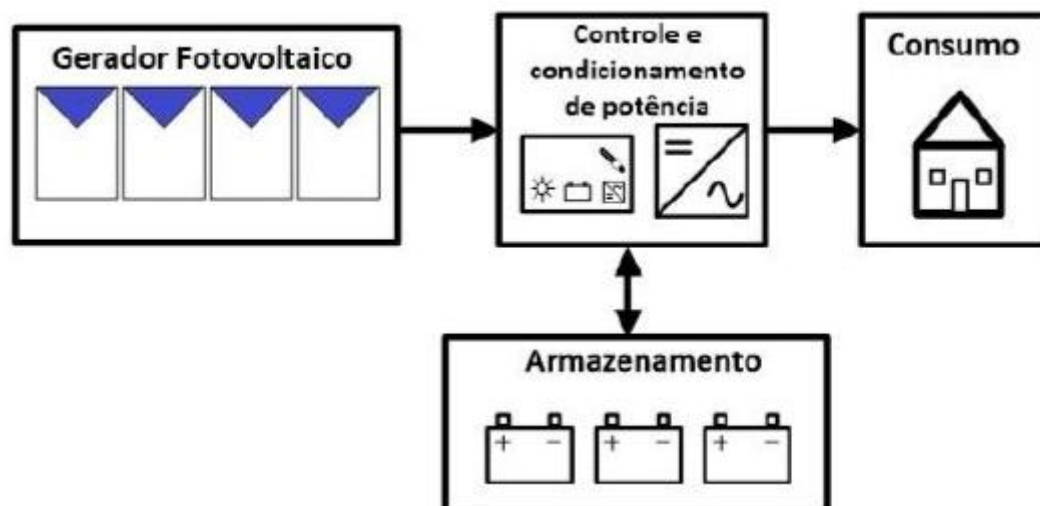


Fonte: Companhia Paranaense de Energia Elétrica (COPEL)

Villalva e Gazoli (2012, p. 102) afirmam que um sistema fotovoltaico autônomo geralmente é composto por um arranjo de módulos fotovoltaicos, um

controlador de carga, um inversor de frequência e por um sistema de armazenamento de energia. A figura 14 ilustra a topologia de um sistema fotovoltaico isolado.

Figura 14. Esquema de um sistema fotovoltaico isolado.



Fonte: Adaptado CRESESB, 2014

Por conta da ausência de interconexão com a rede elétrica de distribuição de energia elétrica e da característica intermitente e aleatória da energia solar ao longo do tempo, essa topologia de sistema fotovoltaico resulta em uma fonte de energia descontínua. Segundo Silva (2014), nestes sistemas é necessária a utilização de armazenadores de energia em situações em que a carga é requisitada, não somente durante o período em que a energia é produzida.

2.4 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

A geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis, como a energia eólica, a biomassa e a energia solar fotovoltaica é intermitente, isto é, tais recursos não estão sempre disponíveis e o montante de energia convertido em energia elétrica é variável. Segundo Couto (2012), os sistemas de armazenamento de energia possuem elevada importância em relação a fontes renováveis de energia, pois permitem compensar as flutuações de disponibilidade operacional dos recursos relacionados a essas formas de geração de energia elétrica.

Projetos de pesquisa e desenvolvimento de tecnologias relacionadas a acumuladores de energia têm recebido importância crescente de entidades

relacionadas ao setor energético. A COPEL, Companhia Paranaense de Energia Elétrica, investirá ao longo dos próximos 4 anos 70 milhões de reais em projetos de pesquisa e desenvolvimento relacionados à otimização dos conceitos de redes inteligentes (*smart grids*) e geração distribuída, inscritos na chamada 021/2016 da Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL. Ao todo foram selecionados 23 projetos com propostas para inserção de sistemas de armazenamento de energia no setor elétrico brasileiro. Outro investimento relacionado a acumuladores de energia consta na aprovação por parte da ANEEL de um investimento de 21 milhões de reais em uma parceria entre a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) e a empresa Alsol Energias Renováveis para pesquisa e desenvolvimento de sistemas de armazenamento de energia fotovoltaica para uso em horários cuja demanda por energia elétrica é elevada.

Em relação ao armazenamento de energia proveniente da radiação solar, é possível notar que a geração de energia varia de acordo com o horário ou época do ano porque existe variação de incidência dos raios solares (SILVA, 2014, p.28). Como o fluxo de elétrons depende da luz que incide na célula fotovoltaica, então a intensidade da corrente gerada vai aumentar ou diminuir em conformidade à intensidade da luz (AFONSO, 2009). Sendo assim, a potência de saída dos módulos fotovoltaicos é relacionada à quantidade de radiação solar incidente, e como essa fonte de energia não está sempre disponível, há uma flutuação na quantidade de radiação solar convertida em energia elétrica.

Em sistemas fotovoltaicos isolados da rede, a utilização de sistemas de armazenamento de energia tem por objetivo suprir a demanda por energia elétrica em períodos com pouca ou nenhuma incidência de radiação solar, como em dias nublados, chuvosos ou durante a noite. Parte da energia solar convertida em eletricidade é armazenada durante o dia em acumuladores de energia estando disponível para utilização em momentos em que a demanda supere a geração de energia. Segundo Villalva e Gazoli (2012, p. 103), sistemas de armazenamento de energia solar são importantes para o suprimento contínuo de energia em períodos de baixa incidência de raios solares e para evitar desperdícios em momentos em que a geração de energia supere o consumo. Os sistemas de armazenamento são utilizados para melhorar a operação do sistema em diferentes horizontes temporais, contribuindo para a melhoria da qualidade de serviço e qualidade da onda, dando

contribuição significativa para a gestão de reservas e contribuindo para o aumento da segurança de abastecimento (DA SILVA, 2008, p.11).

Alguns sistemas de armazenamento são baterias e bombeamento de água, os quais são apresentados a seguir.

2.4.1 Baterias

Grande parte dos sistemas fotovoltaicos que aplicam sistemas de armazenamento de energia utilizam baterias ou bancos de baterias para seu funcionamento. O armazenamento de energia utilizando este tipo de tecnologia é realizado através de reações eletroquímicas no interior dos acumuladores (baterias), tendo a capacidade de transformar energia química em energia elétrica e vice-versa (COUTO, 2012, p.10).

De acordo com Ruiz (2013) as baterias são compostas por uma ou mais células eletroquímicas, sendo que cada célula é constituída por um líquido, ou um eletrólito sólido, em conjunto com um eletrodo positivo (ânodo) e um eletrodo negativo (cátodo). Segundo CRESESB (2014, p. 164), as baterias são capazes de armazenar energia a partir de processos eletroquímicos de oxidação e redução.

As baterias podem ser classificadas como recarregáveis e não recarregáveis. As baterias não recarregáveis podem fornecer energia apenas uma vez e são empregadas em sistemas de baixo consumo, enquanto as baterias recarregáveis, também chamadas de acumuladores de energia, são utilizadas em sistemas de potência mais elevada e acumulam energia por longos períodos, como é o caso de sistemas fotovoltaicos (CRESESB, 2014).

Comercialmente existem baterias de sódio-enxofre, de lítio, de níquel e de chumbo (RUIZ, 2013). As baterias de chumbo-ácido são a tecnologia mais empregada em sistemas fotovoltaicos. Essa constituição de baterias é menos eficiente em relação a algumas tecnologias mais modernas, como as baterias de íons de lítio, contudo a bateria de chumbo-ácido é mais utilizada por conta de sua viabilidade financeira em sistemas fotovoltaicos (CRESESB, 2014). Aliadas ao fator financeiro, as características de carga em sistemas fotovoltaicos influenciam na predominância das baterias de chumbo-ácido nesses sistemas. Em aplicações que necessitam de injeção de potência durante períodos mais longos e com potências

não muito elevadas, que recai no caso de sistemas fotovoltaicos, a utilização de baterias de chumbo-ácido possui o melhor custo-benefício (COUTO, 2012).

Sistemas fotovoltaicos que utilizam baterias como forma de armazenamento estão sujeitos a sobrecargas e subcargas nas baterias devido aos módulos fotovoltaicos variarem a quantidade de energia gerada em função da temperatura (CRESESB, 2014). Nesse tipo de sistema, uma solução para o problema da variação de carga nas baterias pode ser o emprego de controladores de carga. Esses dispositivos têm por objetivo proteger as baterias do sistema contra cargas e descargas excessivas, aumentando sua vida útil (CRESESB, 2014).

Segundo Couto (2012), as baterias são frequentemente associadas à energia renovável em decorrência da sua flexibilidade e aplicação em áreas diversas. Porém, mesmo sendo amplamente utilizadas como acumuladores de energia, as baterias segundo CRESESB (2014) devem ser instaladas em local fechado e com ventilação, além do fato de que o local de instalação não deve ser úmido e não deve oferecer condições que podem deteriorar as baterias. Outra condição negativa das baterias é o fato de que a temperatura altera sua capacidade de armazenamento. Segundo CRESESB (2014, p. 167), temperaturas mais baixas do que as especificadas pelos fabricantes acarretam capacidades significativamente menores nas baterias, enquanto temperaturas mais elevadas induzem um pequeno aumento na capacidade, mas em contrapartida diminuem a vida útil da bateria. A principal desvantagem da utilização, segundo Robin (2013), é o fato de que a vida útil é reduzida em situações de grande amplitude. Silva (2010) alega que as baterias de chumbo podem realizar cerca de 200 ciclos de carga e descarga completos, e atingir até 600 ciclos com descarga de 60% e quando descarregadas acumulam sulfato, fato que reduz seu período de vida.

2.4.2 Uso da água para geração de energia potencial

Como as baterias não possuem longa vida útil e podem ser extremamente poluentes dependendo da forma como forem descartadas, tornam-se necessários a pesquisa e o desenvolvimento de diferentes formas de armazenamento de energia que sejam mais duradouras e gerem menos impacto ambiental.

A utilização de sistemas hidráulicos é uma forma de armazenar energia que pode ter longa vida útil e não é composta por elementos químicos que precisam de cuidados especiais para o descarte.

Os sistemas de bombeamento de água para armazenamento de energia potencial utilizam da diferença de altura entre dois pontos para armazenar energia potencial gravitacional. Segundo Ruiz (2013, p. 46), um sistema de armazenamento de energia por bombeamento é composto por dois reservatórios com diferentes cotas, um sistema de tubulação, bombas para a ação motora e turbinas para ação geradora de eletricidade.

A partir das equações da conservação da energia, explicita-se a energia potencial gravitacional de uma massa de água a partir da equação 1, em que o termo E_p designa a energia potencial acumulada pela coluna d'água, m a massa de água, g a aceleração da gravidade e h a altura da coluna d'água.

$$E_p = m \cdot g \cdot h \quad (1)$$

Por definição, a potência é a taxa de variação da energia em relação ao tempo, conforme a equação 2:

$$P = \frac{dE_p}{dt} \quad (2)$$

Ao inserir a equação 1 no escopo da equação 2, é obtida a equação da potência fornecida por uma coluna d'água em termos da variação da massa, aceleração da gravidade e da diferença de cotas da coluna d'água, conforme a equação 3.

$$P = \frac{d(m \cdot g \cdot h)}{dt} \quad (3)$$

Considerando-se que a massa é o produto entre a massa específica e o volume de um corpo, e que a aceleração da gravidade e a altura da coluna d'água são constantes, obtém-se a equação da potência obtida a partir do armazenamento

de energia a por meio de uma coluna d'água, conforme a equação 4, em que o termo ρ descreve a massa específica do fluido, g a aceleração da gravidade, q a vazão da água e h a altura da coluna d'água.

$$P = \rho \cdot g \cdot q \cdot h \quad (4)$$

A partir da equação 4 nota-se que a potência fornecida por uma coluna d'água é proporcional à diferença de cotas e à vazão, e conseqüentemente ao volume do fluido.

A energia armazenada pela água devido à energia potencial gravitacional pode ser convertida em energia cinética ao liberar o volume de fluido que está sob a coluna d'água. Segundo Cunha (2007), pode-se converter energia potencial, proveniente da altitude em que o líquido se encontra, em energia cinética na qual ocorre o movimento da água. Tal energia cinética pode ser utilizada em turbinas hidráulicas que acionem máquinas capazes de converter energia cinética em eletricidade.

Neste trabalho serão utilizados dispositivos para bombeamento de água que serão acionados a partir de uma corrente elétrica equivalente à fornecida por painéis fotovoltaicos, com o intuito de armazenar a energia fornecida pelo arranjo fotovoltaico e compreender a viabilidade técnica dessa forma de armazenamento.

Nas seções seguintes são apresentados os equipamentos a serem utilizados no sistema de bombeamento de água, no caso máquinas hidráulicas motrizes, e no sistema que compreende as máquinas hidráulicas geratrizes, no caso as turbinas do sistema. Também serão expostos conceitos sobre as máquinas elétricas que são empregadas no sistema com função motora e com função geradora.

2.5 ANÁLISE DOS TIPOS DE MÁQUINAS HIDRÁULICAS

De acordo com Oliveira (2008), as máquinas hidráulicas são equipamentos cujo principal objetivo é a troca de energia mecânica entre o fluido e um de seus órgãos. Segundo Macintyre (1997, p.37), as máquinas hidráulicas podem ser classificadas em três grupos:

-) Máquinas motrizes: são máquinas que convertem energia hidráulica em trabalho mecânico, de modo geral são destinadas a acionar outras máquinas, como geradores de eletricidade. São os principais tipos de máquinas motrizes as turbinas hidráulicas e as rodas d'água.
-) Máquinas geratrizes: são máquinas hidráulicas que convertem trabalho mecânico em energia hidráulica, estão inseridas nessa categoria todas as bombas hidráulicas.
-) Máquinas mistas: equipamentos que transformam energia hidráulica em outra forma de energia. Funcionam como transformadores hidráulicos.

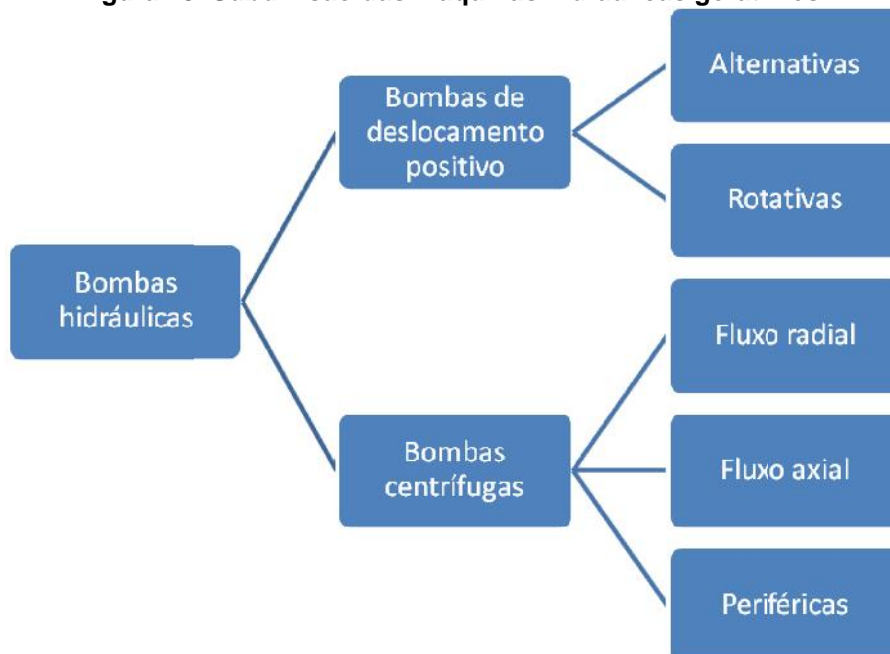
As máquinas geratrizes, também denominadas bombas, têm por função realizar o deslocamento de um fluido por escoamento, lhe comunicando energia em forma de energia potencial de pressão e cinética (MACINTYRE, 1997). É a partir do bombeamento que uma coluna d'água ganha altura, e conseqüentemente energia potencial para que seja possível o armazenamento de energia.

As bombas podem ser classificadas pela maneira pela qual cedem energia hidráulica ao fluido presente no sistema, podendo ser classificadas em (MACINTYRE, 1997):

-) Bombas de deslocamento positivo ou volumétricas: as variações de pressão no fluido são causadas por variações no volume a que o fluido está submetido no interior da bomba.
-) Turbobombas ou bombas centrífugas: bombas que possuem um dispositivo rotatório composto por pás e que exercem sobre o fluido forças que lhe imprimem aceleração. Esse dispositivo, o rotor, transmite aceleração ao líquido, para que este adquira energia cinética.

A figura 15 apresenta uma classificação mais detalhada das bombas de deslocamento positivo e das bombas centrífugas.

Figura 15. Subdivisão das máquinas hidráulicas geratrizes.

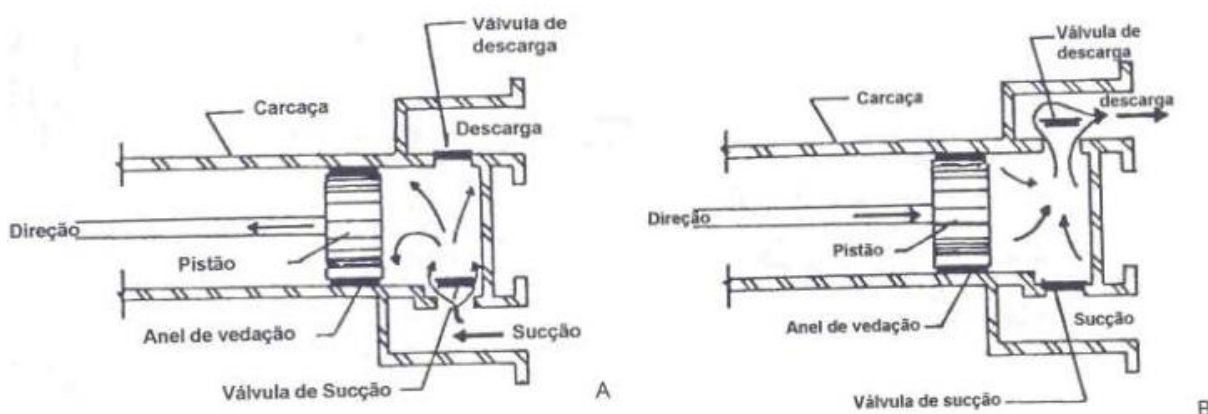


Fonte: Adaptado de Meléndez, 2009

2.5.1 Bombas de deslocamento positivo

Nas bombas de deslocamento positivo, o líquido é submetido a uma pressão interna e pelo fato de estar confinado atinge uma cota mais elevada e a vazão de fluido é proporcional à velocidade do acionador da máquina (MELÉNDEZ, 2009). Para que as bombas de deslocamento positivo sejam capazes de fornecer energia mecânica ao fluido, essas bombas precisam de um dispositivo de acionamento. As bombas volumétricas podem ser acionadas por motores elétricos, motores de combustão interna e pela ação do vapor (MACINTYRE, 1997). Segundo Zanirato *et al.* (2011, p. 27), o termo volumétrico utilizado para designar as bombas de deslocamento positivo é utilizado por conta de o fluido ocupar e desocupar inteiramente o espaço interior do dispositivo. A figura 16 denota essa característica das bombas de deslocamento positivo.

Figura 16. Bomba volumétrica com indicação de fluxo.



Fonte: Zanirato et al. 2011

O principal atributo que distingue as bombas de deslocamento positivo das turbobombas é o fato de que nas bombas de deslocamento positivo, a partícula líquida em contato com o órgão que comunica energia ao fluido tem uma trajetória similar a esse órgão, o que não ocorre em turbobombas (MACINTYRE, 1997). Quanto ao fluxo de fluido em uma bomba de deslocamento positivo, a vazão de líquido é constante (MOREIRA, 2012).

Segundo Sousa (2014) esse tipo de bomba é adequado quando se quer atingir grandes alturas manométricas com pequenos volumes de água sem perder em eficiência. Outra importante característica das bombas de deslocamento positivo, que as torna menos acessíveis, é o fato de que elas são sensíveis a areia e lodo presentes na água (MELENDÉZ, 2009).

As bombas de deslocamento positivo podem ser categorizadas entre bombas volumétricas alternativas e bombas volumétricas rotativas, conforme a figura 15. Para Macintyre (1997) os processos que acontecem nas bombas alternativas são decorrentes dos movimentos do pistão existente na bomba. Segundo Black (1979), elas possuem movimento alternativo no pino do pistão, que depois é convertido em movimento circular. Para que uma bomba alternativa funcione é necessário que ela tenha três elementos rotativos: pistão ou embolo, válvula de admissão e válvula de descarga (BLACK, 1979).

Segundo Macintyre (1997) o escoamento de bombas rotativas ocorre em decorrência de forças cuja ação ocorre segundo a direção do escoamento, provenientes de peças dotadas de movimento de rotação. Para Black (1979) este tipo de bomba caracteriza-se pelo fornecimento de energia ao fluido e pelo fato de que colhe continuamente a água da câmara.

2.5.2 Bombas centrífugas

As bombas centrífugas, ou turbobombas, são máquinas hidráulicas geratrizes compostas por um dispositivo rotatório provido de pás que tem por objetivo exercer forças sobre o líquido em contato com as pás (MACINTYRE, 1997). Neste tipo de bombas a parte responsável pela transmissão de energia, o impulsor, se move sempre em movimento rotativo e as mudanças de direção e valor da velocidade do fluido possuem papel essencial (MATAIX, 1986). As forças exercidas pelo rotor sobre o líquido têm a finalidade de fornecer aceleração e conseqüentemente energia cinética ao fluido.

Outro componente importante presente nas bombas centrífugas é o difusor, no qual é realizada a maior parte da transformação da energia cinética do líquido que sai do rotor em energia de pressão, de modo a fazer com que o líquido seja capaz de escoar com velocidade razoável ao atingir a boca de saída da bomba (MACINTYRE, 1997). Segundo Cervan (2013), outras partes que compõe este tipo de bomba são o eixo, o selo mecânico, a carcaça, o ventilador, os rolamentos, o capacitor e o estator.

As bombas centrífugas atendem a aplicações que exigem grandes vazões e pequenas alturas manométricas, a altura é mantida constante ao projetar esse tipo de bomba (SOUSA, 2014). As curvas de desempenho das bombas centrífugas comerciais são sempre estabelecidas de forma experimental e utilizam a água como líquido de teste (SIRINO, 2013). Para Gouvea (2008), há fatores que podem alterar a curva característica de uma bomba, tais como a mudança da propriedade dos fluidos, variação dos níveis dos vasos de sucção e descarga e a variação de pressão nos vasos de sucção.

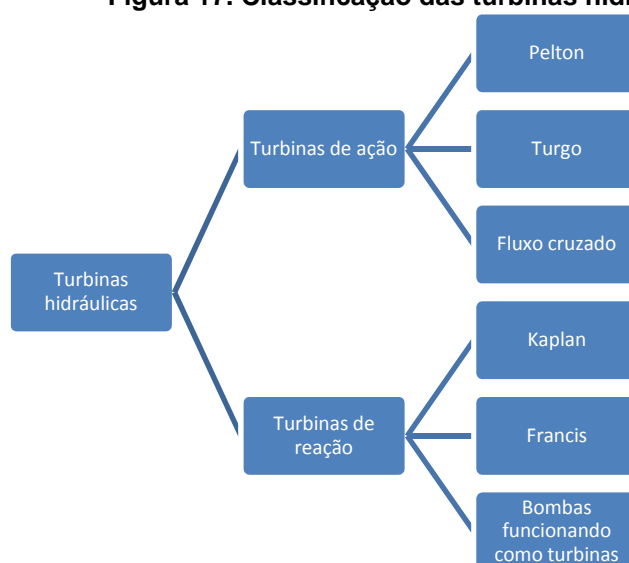
2.6 TURBINAS HIDRÁULICAS

As turbinas hidráulicas são máquinas motrizes hidráulicas cuja função é converter a energia cinética gerada pela velocidade do escoamento da água em trabalho mecânico (PEREIRA, 2015). As primeiras turbinas hidráulicas a serem utilizadas em aplicações práticas foram as rodas d'água, cuja utilização ocorre desde a Antiguidade, em que sua utilização atendia a demandas para produção primária, tais como moinhos de cereais e pequenas oficinas (MACINTYRE, 1983).

Os principais tipos de turbinas hidráulicas são as turbinas Pelton, Francis, Propeller, Kaplan, Bulbo, Deriaz e Fluxo Cruzado (PEREIRA, 2015).

Segundo Elbatran *et al.* (2014), as turbinas hidráulicas podem ser subdivididas em duas categorias, as turbinas de ação e as turbinas de reação. Para Pereira (2015, p. 42) o critério para classificação das turbinas hidráulicas é relacionado à forma como ocorre o escoamento de líquido no interior da turbina. A figura 17 apresenta a classificação das turbinas hidráulicas.

Figura 17. Classificação das turbinas hidráulicas.



Fonte: Adaptado de Elbatran *et al.*, 2014

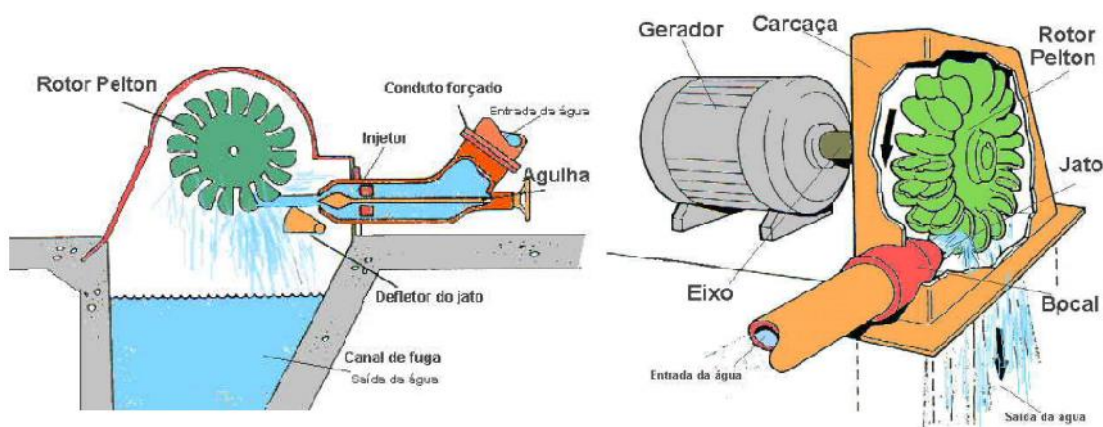
As turbinas de ação são caracterizadas por seu baixo custo e elevada simplicidade e são utilizadas em quedas médias e elevadas (ELBATRAN *et al.*, 2014). As turbinas Pelton, Turgo e turbinas de fluxo cruzado são exemplos de turbinas de ação.

Segundo Pereira (2015, p. 42), nas turbinas de ação a energia potencial útil da queda d'água é inteiramente transmitida ao rotor da turbina na forma de energia

cinética. O dispositivo rotatório da turbina é acionado mediante o fluxo de água contra as pás por meio de injetores (COSTA, 2003).

Segundo Macintyre (1983), as turbinas Pelton são as principais turbinas de ação. A figura 18 apresenta alguns componentes e o funcionamento básico de um turbina de ação de tipo Pelton.

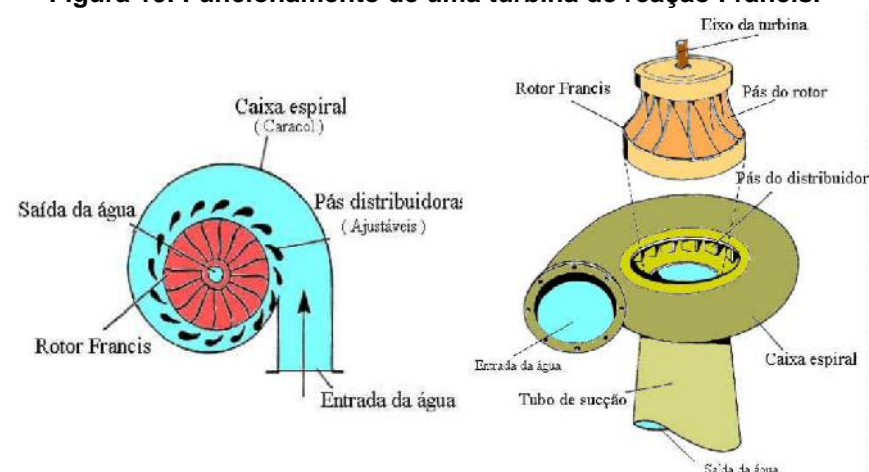
Figura 18. Funcionamento de um turbina Pelton, exemplo de turbina de ação.



Fonte: Mello (2000)

Nas turbinas de reação parte da energia potencial da queda d'água é convertida em energia cinética e parte em energia sob a forma de pressão ao entrar em contato com o rotor da turbina (PEREIRA, 2015). Segundo Elbatran *et al.* (2015), em comparação às turbinas de ação, as turbinas de reação possuem melhor rendimento em sistemas com baixa queda e elevada vazão. São alguns modelos de turbinas de reação as turbinas Kaplan, Francis, Bulbo e Deriaz. A figura 19 apresenta o funcionamento de uma turbina hidráulica do tipo Francis.

Figura 19. Funcionamento de uma turbina de reação Francis.



Fonte: Mello (2000)

2.7 MÁQUINAS ELÉTRICAS PARA CONVERSÃO DE ENERGIA

Para que as máquinas hidráulicas realizem a conversão de energia mecânica em energia elétrica e vice-versa, são necessários equipamentos que de alguma forma façam a interação entre essas duas formas de energia. A partir da conversão eletromecânica de energia, um sistema hidráulico torna-se capaz de armazenar energia elétrica na forma de energia potencial e utilizá-la em momentos com demanda apropriada por energia elétrica.

A fim de que as máquinas hidráulicas motrizes possam comunicar energia ao fluido na forma de energia cinética, aumentando a coluna d'água e conseqüentemente sua energia potencial, é necessário algum dispositivo de acionamento dessas máquinas hidráulicas.

A partir do momento em que as máquinas hidráulicas geratrizes bombearam um certo volume de água a uma determinada altura, essa massa adquire energia potencial gravitacional. Para que essa energia armazenada seja utilizada na forma de energia elétrica, é necessário que a energia cinética adquirida a partir da atuação das máquinas hidráulicas geratrizes, no caso as turbinas, seja convertida em energia elétrica.

Uma alternativa para converter energia elétrica em mecânica e vice-versa em sistemas hidráulicos consiste na utilização de máquinas elétricas. Para Kosow (1982), ocorrem nas máquinas elétricas duas ações distintas: a ação motora e a ação geradora. A ação geradora consiste em uma força mecânica que move o rotor, induzindo uma força eletromotriz e conseqüentemente produzindo eletricidade, enquanto a ação motora ocorre quando há movimento rotativo gerado a partir do fornecimento de energia elétrica à máquina.

Segundo Fitzgerald *et al.* (1975), a equação que explica quantitativamente o funcionamento e o princípio físico presente nas máquinas elétricas é a lei de Faraday-Lenz, definida pela equação 5.

$$e = - \frac{d}{dt} \quad (5)$$

Sendo que e corresponde à força eletromotriz induzida, Φ ao fluxo magnético e t ao tempo. A equação 5 explicita que uma variação temporal do fluxo magnético origina uma determinada diferença de potencial.

A partir da lei de Faraday-Lenz obtém-se uma análise quantitativa da tensão induzida a partir de variações no fluxo magnético a que determinado equipamento está submetido. A partir das leis de Faraday-Lenz, nota-se que a conversão eletromecânica de energia em máquinas elétricas ocorre mediante variações no fluxo magnético associadas ao movimento mecânico (FITZGERALD *et al.*, 1975).

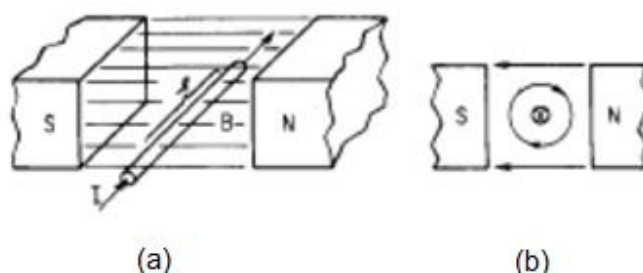
As máquinas elétricas podem ser subdividas com base em sua excitação e na maneira pela qual ocorre a interação entre a variação do fluxo magnético e o movimento mecânico, características construtivas e o movimento do dispositivo rotatório da máquina. Segundo Fitzgerald *et al.* (1975), de maneira elementar, as máquinas elétricas podem ser classificadas como:

-) Máquinas síncronas: a forma de onda da indução magnética tem natureza aproximadamente senoidal, assim como a tensão induzida. Nesse tipo de máquina a frequência elétrica é sincronizada com a velocidade mecânica do rotor. Comumente possuem ação geradora e motora.
-) Máquinas de corrente contínua: são caracterizadas por uma distribuição de fluxo magnético no entreferro similar a uma onda com o topo achatado, mesma forma de onda da tensão induzida. Possuem escovas e comutadores que realizam a retificação da forma de onda de natureza alternada para contínua. Há máquinas de corrente contínua de ação geradora e máquinas de corrente contínua de ação motora.
-) Máquinas de indução: são equipamentos em maioria utilizados como motores, mas também podem possuir ação geradora. Nesses dispositivos existe a presença de correntes alternadas tanto no estator quanto no rotor. A corrente é fornecida diretamente ao estator e surge no rotor devido a um campo magnético girante induzido pela corrente do estator.

2.7.1 Máquinas elétricas de corrente contínua

Em máquinas elétricas de corrente contínua, uma tensão contínua é aplicada a uma bobina, fato que faz com que exista corrente nela e conseqüentemente seja induzido um campo magnético. Esta bobina é então submersa em um campo magnético externo uniforme, fato que faz com que em cada condutor seja solicitada com uma força perpendicular ao campo e à corrente, que é dirigida no sentido induzido e que faz com que haja torque, sendo esse fenômeno denominado força de Laplace (MARTIGNONI, 1977). Segundo Kosow (1982), o torque é definido como a tendência do acoplamento mecânico produzir rotação. A figura 20 exemplifica o fluxo magnético em um condutor submetido a um campo magnético e o campo magnético gerado por um condutor no qual circula corrente elétrica.

Figura 20. Campo magnético em condutores percorridos por corrente elétrica.



Fonte: Kosow, 1982

Considerando que o condutor possui um movimento rotatório em um campo magnético há variação no fluxo magnético e conseqüentemente é criada uma tensão induzida senoidal de acordo com as leis de Faraday e de Lenz, equação 5, apresentada na página 46.

Em relação aos aspectos construtivos, as máquinas de corrente contínua, assim como os outros tipos de máquinas elétricas, são compostas por um rotor e um estator.

O rotor é a porção da máquina elétrica de corrente contínua que possui rotação. Essa fração do equipamento é responsável por produzir a ação necessária à comutação e contém os condutores que providenciam o torque eletromagnético. Em relação a seu aspecto construtivo, o rotor de máquinas de corrente contínua, segundo Postali (2012, p. 30), consiste basicamente da armadura e do comutador. Para Lopes (2008), a armadura é o componente da máquina elétrica que interage com o fluxo magnético para gerar torque e segundo Postali (2012, p. 30), o

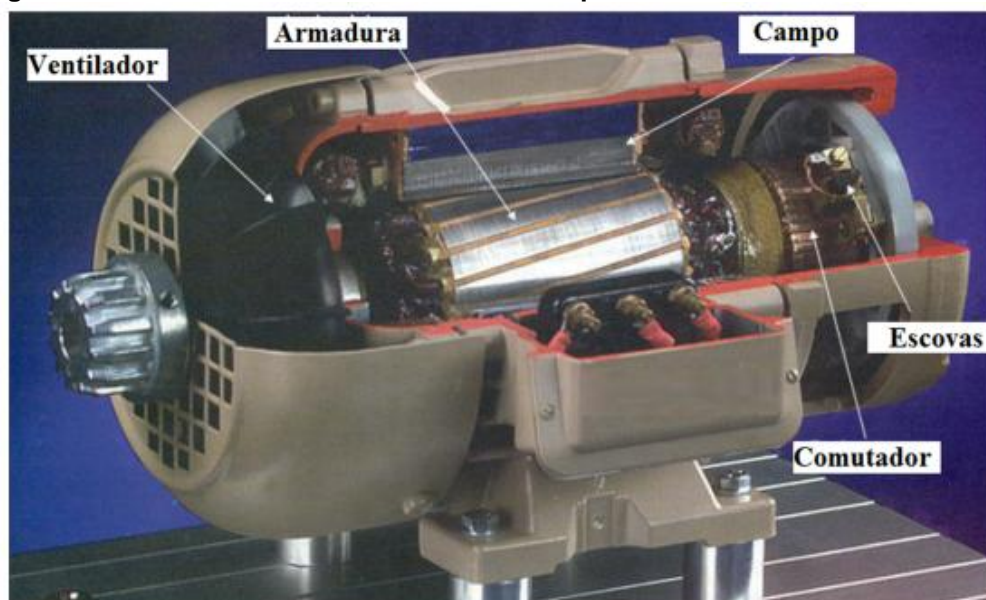
comutador é responsável pelo chaveamento sequencial das bobinas da armadura que estão no eixo da armadura.

A parte das máquinas elétricas que não possui movimento é denominada estator. Segundo Kosow (1982), o estator é composto por enrolamentos de campo, que formam os pólos, interpolo, escovas, anéis de escovas e a carcaça. Segundo Fitzgerald *et al.* (1975), a função de cada um dos componentes do estator é:

-) Enrolamentos de campo: componentes responsáveis por induzir o campo magnético do estator pela excitação das bobinas de campo.
-) Pólos: região que permite alocação dos enrolamentos de campo.
-) Interpolos: componente da máquina responsável pela indução eletromagnética adequada na zona de comutação.
-) Escovas: mantêm contato firme com os segmentos do comutador e as partes mecânicas e são acopladas na carcaça.

A figura 21 apresenta uma máquina elétrica de corrente contínua em corte com a indicação dos componentes apresentados, tanto do estator quanto do rotor de uma máquina elétrica de corrente contínua.

Figura 21. Elementos constituintes de uma máquina elétrica de corrente contínua.



Fonte: Postali, 2012

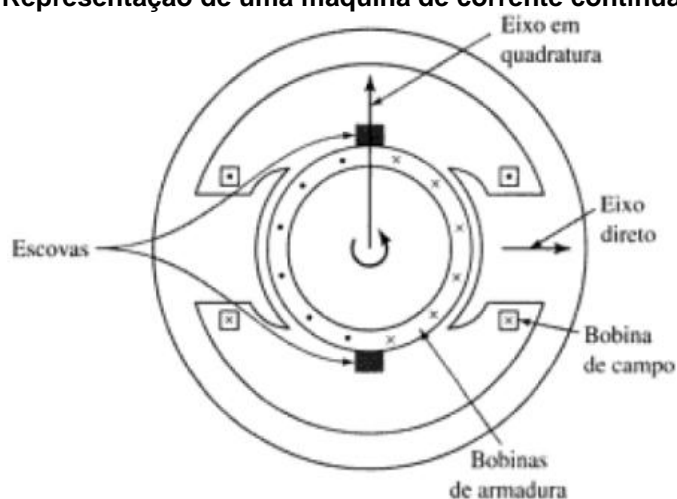
Segundo Fitzgerald *et al.* (1975), por mais que se deseje uma tensão contínua nos enrolamentos da armadura de uma máquina de corrente contínua, a tensão induzida em uma bobina é de natureza alternada, logo para se obter correntes na forma contínua é necessário que a forma de onda da tensão seja retificada. Em

maquinas de corrente contínua, a retificação é realizada por comutadores e escovas (MARTIGNONI, 1977).

Na máquina de C.C. convencional, a retificação é provida mecanicamente por meio de um comutador, que é um cilindro formado de lâminas de cobre, isoladas uma das outras por mica, e montada sobre o eixo do rotor, mas dele isoladas. As escovas de carvão ou grafite, estacionárias, são mantidas apoiadas contra a superfície do comutador, e ligam o enrolamento aos terminais externos da armadura (FITZGERALD, 1975, p. 144).

A figura 22 apresenta uma máquina de corrente contínua elementar e os elementos para conversão da tensão na forma alternada para a forma contínua.

Figura 22. Representação de uma máquina de corrente contínua elementar.



Fonte: Fitzgerald et al., 1975

Para Fitzgerald *et al.* (1975), o fluxo magnético a que as bobinas da armadura de uma máquina elétrica estão submetidas é resultado da força magnetomotriz combinada dos elementos de todos os enrolamentos da máquina, sendo que a maior parte da força magnetomotriz efetiva é fornecida pelos enrolamentos de campo. Sendo assim, outra importante característica das máquinas de corrente contínua, a qual serve também como forma de classificação destas máquinas é a forma com que o enrolamento de campo é excitado para que haja a geração de uma força magnetomotriz.

Segundo Iorra (2013), há cinco formas de excitação dos enrolamentos de campo de uma máquina de corrente contínua, sendo elas a excitação por derivação, em série, composta, independente e por ímãs permanentes.

Para as primeiras quatro formas de excitação dos enrolamentos de campo, o campo magnético é produzido por meio de bobinas percorridas por corrente contínua, denominadas bobinas de excitação (MARTIGNONI, 1997).

No caso das máquinas com ímãs permanentes não há um circuito elétrico, composto por bobinas que servem somente para a excitação, como nas outras formas. Contudo, o fluxo magnético é proporcionado pela atuação de ímãs permanentes. De acordo com Iorra (2013), em máquinas elétricas com esse tipo de excitação não há como controlar a velocidade pela variação do campo, que nas outras formas era realizada pela variação de corrente.

A utilização de ímãs permanentes em máquinas elétricas possui algumas vantagens em relação à excitação do campo magnético por meio de bobinas de campo no que se refere a sistemas de pequeno porte. Maia (2011, p. 6) explica que há de se destacar a simplificação do sistema e o menor volume ocupado pela máquina elétrica com a utilização de ímãs permanentes como sistema para excitação do campo magnético. O autor ainda destaca salienta que com a evolução dos ímãs de terras raras, como por exemplo os ímãs de neodímio-ferro-boro (NdFeB) durante a década de 1980 e o avanço tecnológico relacionado ao desenvolvimento de ímãs sintetizados, elevou-se a viabilidade financeira de sistemas que utilizem ímãs permanentes.

Conforme Iorra (2013), no que se refere à utilização de máquinas elétricas a ímãs permanentes em sistemas hidráulicos, a utilização de máquinas de corrente contínua excitadas a ímã permanente para essa forma de aproveitamento de energia é um sistema conveniente. Iorra (2013) afirma que em sistemas em que a pressão e a vazão de água são similares nos momentos em que há bombeamento de água, mas esses períodos de bombeamento ocorrem com uma frequência variável, a utilização de ímãs permanentes é pertinente do ponto de vista técnico. Além disso, a utilização de máquinas de corrente contínua é favorável ao escopo deste trabalho, pois esses equipamentos, apesar de possuírem um custo mais elevado em relação às máquinas de corrente alternada, têm um controle mais simples, não sendo necessário dispositivos auxiliares para partida.

2.7.2 Circuito magnético do motor com configuração Halbach

Tendo em vista as vantagens da utilização de máquinas de corrente contínua com ímãs permanentes em sistemas hidráulicos, almeja-se a otimização do rendimento da máquina. Segundo Fitzgerald *et al.* (1975), o conjugado eletromagnético e a tensão gerada dependem da variação dos fluxos concatenados com os enrolamentos da máquina. Como a potência de saída é diretamente proporcional ao conjugado magnético, os fluxos são um importante fator no rendimento da máquina.

A equação 7 apresenta a relação entre uma força magnetomotriz e o fluxo magnético é:

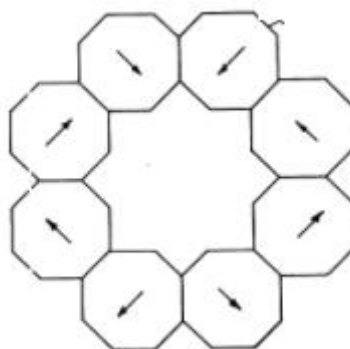
$$F_{mm} = R \cdot \Phi \quad (7)$$

Sendo F_{mm} a força magnetomotriz, R a relutância, capacidade de um material de se opor à concentração de linhas de campo magnético, e Φ o fluxo magnético. Segundo Fitzgerald *et al.* (1975), as forças magnetomotrizes especificadas nos enrolamentos os fluxos dependem das relutâncias dos trechos de ferro dos circuitos magnéticos e dos entreferros. Em superfícies com maior relutância o fluxo magnético tende a ser menor, tal qual ocorre no ar, enquanto em superfícies ferromagnéticas o fluxo consegue passar com mais facilidade.

Para otimizar a questão do fluxo magnético em uma máquina a ímãs permanentes é possível realizar uma diferente configuração dos ímãs para reduzir o tamanho do caminho com maior relutância entre os ímãs, para melhor aproveitamento do fluxo. Segundo Yan *et al.* (2013), a matriz Halbach pode aumentar o componente radial do fluxo densidade que é importante para a geração de força axial, assim como também diminui o componente radial da força local que causa vibrações.

O conjunto de Halbach é construído organizando a direção de magnetização de cada ímã, que aumenta o campo magnético em um lado da matriz de ímãs, enquanto cancela o campo para aproximadamente zero no outro lado (ZHAO, 2015). É possível visualizar o conjunto de Halbach na figura 23.

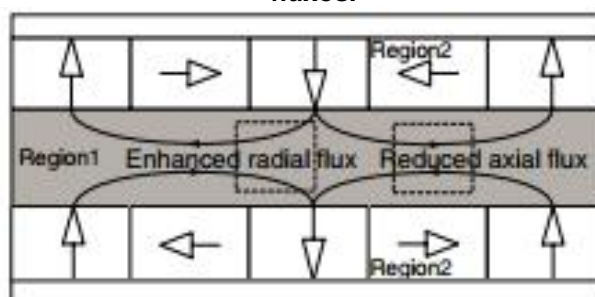
Figura 23. Configuração dos ímãs na matriz de Halbach.



Fonte: Merritt (1998)

Segundo Yan *et al.* (2013) há diversas aplicações para a matriz de Halbach na otimização de fluxo, tal qual em motores tubulares, nos quais gera redução do fluxo axial e aumento no fluxo radial. A figura 24 ilustra o corte transversal de um motor com a matriz de Halbach.

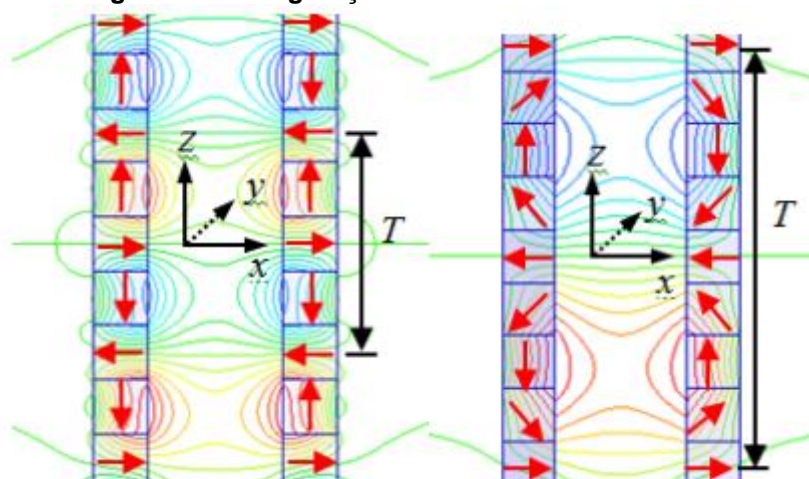
Figura 24. Corte transversal de um motor tubular com matriz de Halbach e influência nos fluxos.



Fonte: Yan *et al.* (2013)

Para Zhao (2015) há diferentes configurações de fluxo utilizando-se a matriz Halbach, tais quais a configuração com quatro peças, na qual a magnetização do ímã tem orientação de 90° em relação ao ímã adjacente, e a configuração com oito peças, na qual a magnetização do ímã tem orientação de 45° em relação ao ímã permanente. É possível visualizar os fluxos em duas diferentes orientações de ímãs na matriz de Halbach na figura 25.

Figura 25. Configuração de uma matriz de Halbach.

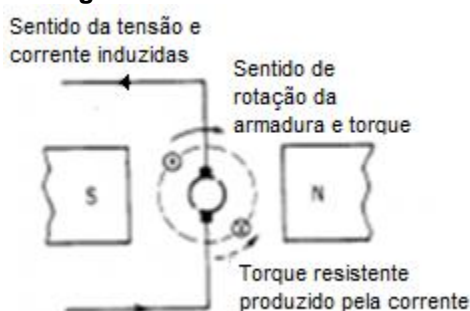


Fonte: Zhao (2015)

2.7.3 Geradores de Corrente Contínua a Ímã Permanente

O movimento do gerador de corrente contínua é baseado no fato de que o movimento relativo, que se cria pela aplicação de uma força mecânica entre os condutores da armadura e o campo magnético, dá origem a uma força eletromotriz, sendo assim quando uma carga elétrica é ligada aos terminais da armadura, é verificada uma corrente elétrica, e então há produção de energia elétrica (KOCK, 2014). A figura 26 ilustra o gerador elementar.

Figura 26. Gerador elementar



Fonte: Alterado de Kosow, 1982

Quando uma máquina é operada como gerador a corrente da armadura tem o mesmo sentido da fem gerada, e a fem gerada E_g é maior que a tensão V_a dos terminais da armadura que é aplicada à carga (KOSOW, 1982, p.30). Sendo assim para um gerador a equação básica é:

$$E_g = V_a + I_a \cdot R_a \quad (8)$$

Sendo E_g a força eletromotriz gerada, V_a a tensão aplicada, I_a a corrente da armadura e R_a a resistência da armadura.

Em geral no gerador CC, o rotor é induzido e o campo magnético permanece estacionário (KOCK, 2014). Mantendo-se constante a rotação o valor da fem é diretamente proporcional ao fluxo da máquina e, portanto, ao valor de indução existente no circuito magnético (MARTIGNONI, 1977, p.112).

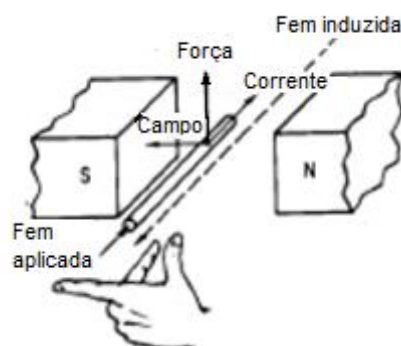
Segundo Fitzgerald *et al.* (1975), geradores CC são uma boa solução quando há necessidade de energia elétrica, em corrente contínua, em regiões afastadas da rede de distribuição de energia elétrica.

2.7.4 Motor de corrente contínua a ímãs permanentes

O motor elétrico é um elemento de trabalho que converte energia elétrica em energia mecânica, que pode ser gerada basicamente de duas formas: linear e rotativa (SILVA, 2012).

Segundo Kosow (1982), no motor elétrico é o torque eletromagnético o agente que produz a rotação. O motor de corrente contínua tem funcionamento que se baseia na regra de Fleming, na qual a força será perpendicular ao campo magnético e ao fio (LOPES, 2008). A força de Laplace é representada na figura 27.

Figura 27. Regra da mão esquerda (Força de Laplace).



Fonte: Alterado de Kosow, 1982

Para Martignoni (1977) quando a máquina atua como motor o sentido induzido de giro do motor é inverso ao sentido de um gerador. Segundo Kosow

(1982) quando uma máquina CC é operada como motor a fem gerada é sempre menor que a tensão nos terminais e se opõe à corrente de armadura. Sendo assim a equação básica do motor é:

$$V_a = E_c + I_a \cdot R_a \quad (9)$$

Sendo V_a a tensão nos terminais, E_c a fem gerada, I_a a corrente de armadura e R_a a resistência de armadura. Um exemplo de motor elementar é representado pela figura 28.

Figura 28. Motor elétrico elementar.



Fonte: Alterado de Kosow, 1982

Para Martignoni (1977) não há grandes diferenças estruturais entre um motor de corrente contínua e um gerador de corrente contínua, sendo possível a utilização de uma mesma máquina funcionando como ambos.

2.8 MICROGERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA

De acordo com o artigo 2º de ANEEL (2012), microgeração distribuída de energia é a classificação dada a centrais geradoras cuja potência é igual ou inferior 75 kW, além de utilizar cogeração qualificada ou fontes de energia renováveis.

Segundo COPEL (2017), há três formas de microgeração: os empreendimentos com múltiplas unidades consumidoras, geração compartilhada e autoconsumo remoto.

Em empreendimentos com múltiplas unidades consumidoras, a utilização de energia elétrica é realizada de forma independente, no qual as instalações de uso comum são uma unidade consumidora e cada fração com uso individualizado representa uma unidade consumidora (ANEEL, 2012).

Para COPEL (2017) a geração compartilhada caracteriza-se por reunião de consumidores presentes em uma mesma área de concessão que tenha unidade de microgeração distribuída em local diferente das unidades consumidoras nas quais a energia excedente será compensada.

Segundo ANEEL (2012), o autoconsumo remoto ocorre quando um indivíduo que possui unidade com microgeração distribuída em local diferente das unidades consumidoras, dentro da mesma área de concessão ou permissão, nas quais a energia excedente será compensada.

Na microgeração as fontes de produção de eletricidade são localizadas junto aos locais de consumo e são constituídas por equipamentos de pequena escala, nomeadamente painéis solares, micro-eólicas, micro-turbinas (MOREIRA, 2010, p. 19).

Segundo Staffell *et al.* (2015), a microgeração de energia residencial é uma forma de reduzir a demanda por energia e também uma maneira de se utilizar sistemas renováveis de energia ou utilizar combustíveis com bom rendimento. Moreira (2010) afirma que algumas tecnologias aplicáveis no setor residencial são pilhas de combustíveis, motores alternativos, microturbinas eólicas, painéis solares térmicos e painéis solares fotovoltaicos.

2.8.1 Centrais hidrelétricas

Segundo Pires (2014), o funcionamento de centrais hidrelétricas baseia-se na retenção de água em um reservatório, que posteriormente pode ser canalizada e cuja energia potencial gravitacional pode ser transformada em energia cinética em decorrência da velocidade da queda, que impulsionará as turbinas. A energia hidrelétrica é gerada pelo aproveitamento do fluxo das águas em uma usina na qual as obras civis – que envolvem tanto a construção quanto o desvio do rio e a formação do reservatório – são tão ou mais importantes que os equipamentos instalados. Pequenas centrais hidrelétricas têm geração com potência entre 1,1 MW

e 30 MW, centrais geradoras hidrelétricas produzem até 1 MW e usinas hidrelétricas possuem geração de mais de 30 MW (PEREIRA, 2015).

Para produzir a energia hidrelétrica é necessário integrar a vazão do rio, a quantidade de água disponível em determinado período de tempo e os desníveis do relevo, sejam eles naturais, como as quedas d'água, ou criados artificialmente (ANEEL, 2008, p.50).

Três tipos de centrais hidrelétricas são fio-de-água, acumuladoras e reversíveis (ANEEL, 2008).

Nas centrais fio-de-água há declive pouco acentuado, na qual a energia cinética associada e o caudal do rio é a principal fonte geradora de energia (PIRES, 2014). Porém, Farret (1999) afirma que em centrais fio-de-água não há aproveitamento de todo o volume de água.

Nas centrais acumuladoras a água se encontra em níveis superiores (PIRES, 2014). Geralmente são localizados na cabeceira dos rios e dado o seu grande porte permitem o acúmulo de grande quantidade de água e funcionam como estoques a serem utilizados em períodos de estiagem (ANEEL, 2008, p.53).

Em relação às usinas reversíveis, Canales *et al.* (2015) afirmam que a principal função é operar em conjunto com fontes de energia intermitentes com o intuito de moderar as diferenças periódicas na disponibilidade de energia.

Segundo Canales *et al.* (2015), uma usina hidrelétrica reversível é constituída pelos seguintes componentes: os reservatórios (superior e inferior), os condutos hidráulicos e as instalações eletromecânicas para bombeamento e turbinamento.

2.8.2 Microgeração Hidrelétrica

As microcentrais hidrelétricas são uma forma de geração de energia elétrica que se localizam próximas ao local consumidor. Para Aneel (2008) quanto maior o centro gerador de energia hidrelétrica, mais distante ele tende a estar das zonas urbanas. A geração de energia em pequena escala é mais indicada para a instalação em locais de difícil acesso e pequenas comunidades, o que não

desqualifica sua utilização como gerador auxiliar na rede de distribuição principal (SOSNOSKI, 2015, p.33).

Alguns dos equipamentos que compõem microcentrais hidrelétricas comuns são os sistemas de regulação, as válvulas borboleta, as rodas de água e as turbinas hidráulicas (FARRET, 1999).

Para MME (1985), os sistemas de regulação tem a finalidade de manter a rotação, e a frequência dentro dos limites aceitáveis, sendo que nas microcentrais hidrelétricas esta função é desempenhada por reguladores de velocidade.

As válvulas borboleta têm por finalidade bloquear a entrada de fluxo de água em caso de manutenção, quando a microcentral possui tubulação forçada metálica (MME, 1985).

Segundo Souza (2011), as rodas d'água são máquinas motrizes rudimentares, que podem ser consideradas como um tipo de hidroturbina, as quais extraem energia útil da água que escoar num sistema de tubulação, onde esta energia é transformada em energia cinética de rotação.

Para Sosnoski (2015) é possível a utilização de mini e micro turbinas no caso da microgeração em sistema de abastecimento de água.

Em decorrência da criação das mini e micro turbinas, a microgeração de energia hidrelétrica passou a ser mais acessível e sendo assim possui diversas aplicações. Para Iorra (2013), é possível realizar microgeração de energia elétrica a partir do sistema hidráulico predial. Segundo Sosnoski (2015), microcentrais hidrelétricas podem ser colocadas em desmembramentos do rio principal, assim como podem ser utilizadas em um sistema que atue juntamente ao sistema de abastecimento de água.

3 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA - CRITÉRIOS PARA DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA

O protótipo construído e analisado foi concebido a partir de duas seções separadas. Uma parcela do equipamento consistiu em um sistema para bombeamento de água, enquanto a outra parte do protótipo foi responsável pela geração de energia a partir da energia armazenada pelo sistema de bombeamento. A atuação do circuito de geração é considerada a partir de um volume de água deslocado a determinada altura, adquirindo assim energia potencial gravitacional. Para o armazenamento dessa quantidade de energia, um determinado volume de fluido deve adquirir a altura projetada para o protótipo. Por isso foi necessária a utilização de dispositivo para o bombeamento de água.

Com o intuito de conceber uma análise quantitativa em relação ao desempenho de um sistema para acumulação de energia por uma coluna d'água, foram realizadas algumas medições relativas a ambos os sistemas presentes no protótipo. Para avaliar o rendimento do sistema e conseqüentemente sua viabilidade técnica, a potência utilizada para bombeamento da água foi comparada aos valores de saída do gerador quando há vazão em sua turbina.

A altura manométrica, vazão e as máquinas elétricas selecionadas para o sistema foram escolhidas de modo que idealmente o gerador do protótipo possua uma tensão de saída igual a 12 V em tensão contínua, simulando a tensão proveniente de um módulo fotovoltaico operando a vazio. Esse nível tensão é o mesmo presente no acionamento do motor elétrico que está acoplado à bomba hidráulica do sistema de bombeamento.

3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Para a produção do protótipo foram utilizados equipamentos hidráulicos, tubos, conexões e reservatórios, e equipamentos elétricos, máquinas elétricas e instrumentos de medição.

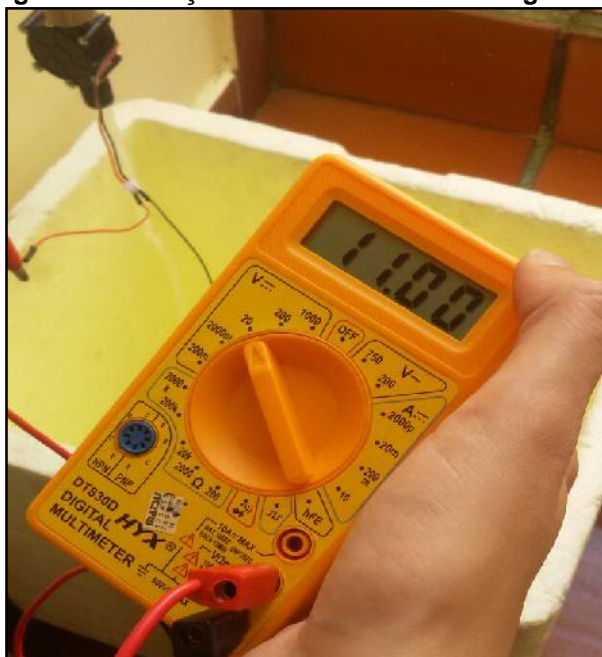
Quanto aos materiais hidráulicos empregados, foi necessária a utilização de tubos e conexões em PVC para o estabelecimento de uma correta coluna d'água ao sistema de geração e mangueiras para o sistema de bombeamento. Para o

armazenamento de água necessário para o protótipo utilizou-se dois reservatórios cilíndricos: um superior e o outro inferior.

Em relação a parte elétrica do protótipo, houve utilização de máquinas elétricas tanto no sistema de bombeamento quanto no sistema de geração. No sistema de geração foi empregado um gerador de corrente contínua com uma turbina hidráulica conectada e tensão de nominal igual a 12 V. Para o equipamento de bombeamento do protótipo foi utilizada uma bomba de deslocamento positivo acionada por um motor de corrente contínua com tensão de entrada igual a 12 V.

Foram utilizados equipamentos eletrônicos adicionais para a medição dos valores de corrente e tensão do circuito e para simulação de cargas no sistema de geração. Em relação à determinação das grandezas elétricas do protótipo, foi utilizado um multímetro e para a simulação das respostas dos circuito em relação a diferentes cargas foram utilizados resistores cerâmicos. A figura 29 apresenta uma medição do circuito de geração.

Figura 29. Medição da tensão de saída do gerador.



Fonte: Autoria própria.

3.2 DIMENSIONAMENTO DO PROTÓTIPO

Para o dimensionamento das tubulações e a seleção da altura da coluna d'água, o protótipo foi inicialmente considerado um sistema conservativo. Logo, a energia cinética na tubulação de entrada do gerador é igual à energia potencial

gravitacional armazenada no reservatório superior do sistema. Portanto, a altura da coluna d'água do sistema pode ser obtida como uma função da energia cinética requerida na entrada do gerador. As equações 10 a 12 apresentam uma análise quantitativa dos conceitos considerados, em que E_{pg} e E_c designam a energia potencial gravitacional e a energia cinética, m a massa e v a velocidade.

$$E_{pg} = E_c \quad (10)$$

$$E_{pg} = m \cdot g \cdot h \quad (11)$$

$$E_c = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad (12)$$

Para dado volume, a massa de um fluido pode ser expressa a partir de sua massa específica, conforme a equação 13, em que m representa a massa, V o volume e μ a massa específica do fluido em questão.

$$\mu = \frac{m}{V} \quad (13)$$

Ao substituir a equação 13 nas equações 10 e 11, encontra-se uma relação entre o volume de água presente no reservatório superior do sistema, a altura da coluna d'água e a energia potencial gravitacional armazenada pelo sistema, conforme apresentado na equação 14.

$$E_{pg} = \mu \cdot V \cdot g \cdot h \quad (14)$$

Para o desenvolvimento do protótipo foi considerada uma queda d'água de 2,5 metros e um volume de 20 litros armazenados no reservatório superior do sistema e para as tubulações, foi selecionado um tubo de PVC com diâmetro de $\frac{3}{4}$ ". Considerando a massa específica e a aceleração da gravidade como constantes e iguais a 1000 kg/m^3 e $9,81 \text{ m/s}$ respectivamente, encontra-se uma estimativa da energia potencial gravitacional armazenada pela coluna d'água do sistema.

$$E_{pg} = 490 \text{ J}$$

A partir da simplificação de que o sistema é conservativo, a energia cinética aplicada à turbina do gerador deve ser igual à energia potencial gravitacional armazenada no reservatório superior. Contudo, essa simplificação advém de um sistema ideal, sem perdas, o que não é o caso do protótipo em questão. Além das perdas provenientes da perda de carga nas tubulações, há de se considerar o rendimento do gerador adotado, além de erros de medição e manuseio dos equipamentos. Portanto, a energia cinética aplicada à turbina do gerador tende a ser menor do que a energia potencial gravitacional do reservatório superior. A partir das diferenças entre a energia potencial gravitacional no reservatório superior e a energia elétrica produzida nos terminais do gerador é possível obter uma análise quantitativa em relação à capacidade de geração de energia elétrica do protótipo.

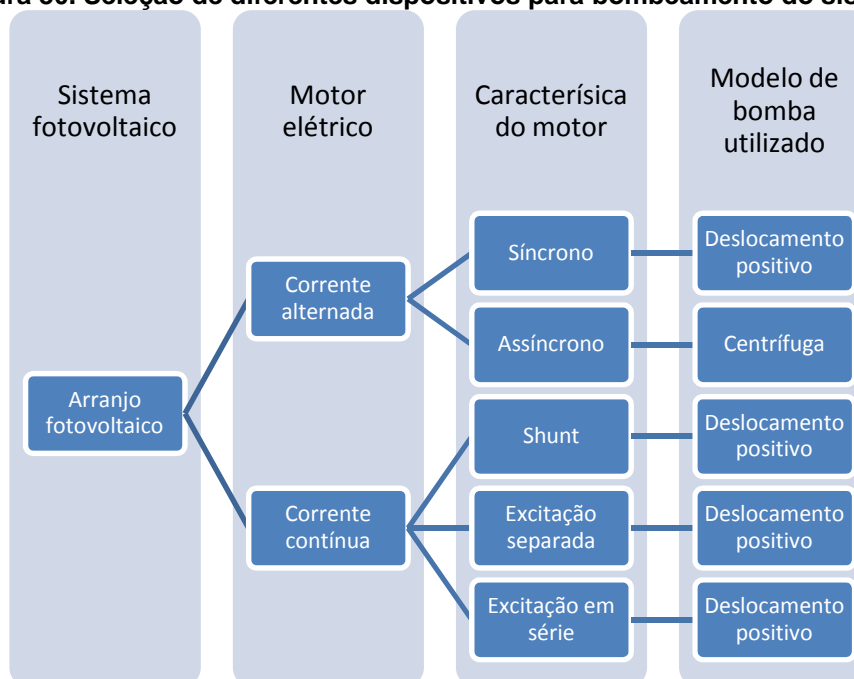
Com base nos valores de corrente e tensão de saída dos sistemas de bombeamento e de geração do protótipo, é possível encontrar uma relação entre a potência necessária para bombear a água ao reservatório superior do sistema e a energia produzida pelo gerador. Desse modo, é possível obter uma análise da viabilidade técnica do uso de um gerador e de um motor de corrente contínua a imã permanente para conversão de energia armazenada por algum sistema fotovoltaico.

3.2.1 Sistema de bombeamento

Um sistema de bombeamento pode possuir diversas topologias, sendo essas configurações selecionadas em função de variáveis como vazão, altura de recalque, complexidade do sistema e fatores econômicos (MONACHESI, 2005). Segundo Argaw (2004), o arranjo mais simples para bombeamento de água a partir de sistemas fotovoltaicos consiste em um arranjo fotovoltaico conectado diretamente a um motor de corrente contínua e uma bomba hidráulica. Esse arranjo é utilizado em pequenas aplicações, além do fato de que é economicamente competitivo para aplicações domésticas. Para Argaw (2004), conjuntos de bombeamento mais robustos utilizam sistemas de armazenamento baseados em baterias e inversores de frequência para converter a corrente contínua das baterias em corrente alternada e acionar motores elétricos de indução acoplados ao conjunto de bombeamento. A

figura 30 apresenta a seleção de dispositivos de bombeamento em função de diferentes configurações de um arranjo fotovoltaico.

Figura 30. Seleção de diferentes dispositivos para bombeamento do sistema.



Fonte: Adaptado de Argaw, 2004

Para a implementação do protótipo, foi selecionada uma bomba de deslocamento positivo acionada através de um motor de corrente contínua cuja excitação ocorre por ímãs permanentes. A escolha da natureza do sinal de tensão e a forma de excitação dos motores elétricos foi realizada visando a garantir um controle e acionamento mais simples ao sistema. Segundo Fitzgerald *et al.* (1975), as máquinas de corrente contínua possuem vantagens em relação ao controle de velocidade pois seu princípio de operação é independente de um campo magnético girante, diferentemente de motores de indução. Por seu controle ser realizado a partir da variação da corrente de campo, as máquinas de corrente contínua podem ser controladas a partir de reostatos de campo.

Em relação ao tipo de bomba utilizado no projeto, houve a seleção entre os dois modelos de bombas que são mais comumente utilizados em sistemas de bombeamento por arranjos fotovoltaicos, as bombas de centrífugas e as bombas de deslocamento positivo ou bombas volumétricas. Segundo Argaw (2004, p. 25), as bombas centrífugas possuem uma operação ideal para médias e elevadas quedas d'água, enquanto as bombas de deslocamento positivo são ideais para menores demandas de água e alturas manométricas. Conforme Stinson *et al.* (2003), quando

as bombas centrífugas são operadas sob baixa potência, essas passam a ter uma brusca diminuição no volume bombeado, sendo esse um fator que dificulta seu uso em relação a arranjos fotovoltaicos, pois esses sistemas possuem uma elevada variação temporal na potência produzida. Para Stinson *et al.* (2003), as bombas de deslocamento positivo possuem uma menor velocidade de bombeamento, mas possuem um comportamento satisfatório sob condições de baixa potência.

A opção por uma bomba de deslocamento positivo ocorreu por conta dos parâmetros construtivos do protótipo, que é um sistema de microgeração provido de uma pequena vazão e uma pequena queda d'água. Além disso, ao considerar um sistema com uma determinada intermitência na produção de energia, como é o caso de um arranjo fotovoltaico, as bombas de deslocamento positivo não sofrem tanto dos mesmos problemas que as bombas centrífugas no que diz respeito a variações de potência proveniente do sistema fotovoltaico.

3.2.2 Sistema de geração

A capacidade de armazenamento energético depende de dois parâmetros: altura de queda da água e o volume de água armazenada (DA SILVA, 2008, p. 18). Para a seção de geração do protótipo, foi selecionado um sistema com base nas equações para conversão de energia, considerando a queda d'água e volume armazenado, conforme a equação 14. O intuito do conjunto de geração foi converter um montante de energia potencial gravitacional armazenada no reservatório superior sob a forma de uma coluna d'água em energia cinética aplicada à turbina hidráulica que ficava acoplada à entrada do gerador.

No que diz respeito às máquinas elétricas utilizadas, o sistema geração é basicamente composto por uma turbina hidráulica, cuja vedação utilizada foi conectada à extremidade do gerador na qual deveria sair a água após passar pela máquina, e um gerador de corrente contínua. As turbinas hidráulicas tem como função transferir potência mecânica ao rotor do gerador. Conforme Lopes (2011), o funcionamento de uma turbina se baseia na transferência da quantidade de movimento d'água para o rotor em forma de torque e velocidade de rotação. Em relação ao gerador, a partir do movimento do rotor e da excitação do campo magnético deste elemento, surge uma diferença de potencial nos terminais do

estator. Como a turbina era acoplada ao gerador elétrico o torque dela foi convertido em energia elétrica por meio do gerador elétrico.

Para facilitar o cálculo do volume de água do sistema, os reservatórios selecionados tinham formato cilíndrico. O formato dos reservatórios permitiu o estabelecimento de faixas para medição da corrente elétrica gerada em função da coluna d'água aplicada à turbina do gerador. A partir das diferentes faixas de valores estabelecidas para o volume da água foi possível mensurar a potência elétrica produzida em função do montante de água armazenada na seção superior do protótipo. Foram realizadas as medições de tempo de vazão entre as faixas, e os valores de tensão e corrente em cada uma delas para posterior cálculo de quantidade de potência gerada.

3.3 MONTAGEM DO PROTÓTIPO

O protótipo foi montado em partes separadas, sendo uma seção relativa ao sistema de bombeamento, e uma relativa ao sistema de geração. Os sistemas foram compostos por:

-) Bomba hidráulica;
-) Gerador de corrente contínua;
-) Bateria de 12 V;
-) Tubos e conexões em PVC;
-) Reservatórios de água.

3.3.1 Produção do sistema de bombeamento

A primeira bomba utilizada no decorrer do trabalho foi uma bomba do fabricante Quanzhou Jovtop Eletronics Company. Essa empresa é situada na China e apresenta em seu catálogo diversos equipamentos relacionados ao aproveitamento de energia por fontes solares, incluindo sistemas de bombeamento e arranjos fotovoltaicos de baixa potência. O modelo selecionado para a bomba foi o JT-500. Segundo dados fabricante, para esse equipamento o acionamento é realizado por um motor de corrente contínua provido de escovas. Em condições nominais, a tensão de entrada da bomba é igual a 12 V e a potência consumida pelo

equipamento é igual a 15 W. A altura máxima bombeada pela bomba é de 5 metros a uma vazão de 600 litros por hora. A figura 31 apresenta a bomba utilizada JT-500 enquanto a figura 32 ilustra os dados de placa da bomba.

Figura 31. Bomba JT-500.



Fonte: Autoria própria

Figura 32. Dados de placa da bomba JT-500.



Fonte: Autoria própria

Inicialmente, a bomba foi conectada a uma mangueira de $1/2$ " e acionada por fonte de tensão contínua. Contudo, ao alimentar o equipamento com uma fonte de tensão de 12 V e uma corrente de 1,25 A, o resultado obtido não foi satisfatório. Nesses níveis de corrente e tensão, o equipamento está submetido às suas condições nominais, tendo uma potência igual a 15 W aplicada em seus terminais de entrada. Nesse cenário, o volume de água bombeado deveria alcançar uma altura de 5 metros, conforme mostrado nos dados de placa do equipamento na figura 32. Contudo, a altura bombeada não ultrapassou 1 metro para as condições citadas. Como a altura projetada para bombeamento de água do sistema é igual a 2,5 metros, esse mau funcionamento inviabilizou a utilização da bomba JT-500 no projeto. Alguns fatores como manuseamento e transporte inadequados do equipamento, sobreaquecimento dos enrolamentos e defeitos nas escovas do motor foram levantados como possível causa dessa anomalia.

Tendo em vista os imprevistos ocorridos com a bomba JT-500, optou-se pela utilização de um equipamento com maior robustez para a seção de bombeamento

do protótipo a ser utilizado para as medições. A bomba hidráulica então selecionada para o sistema de bombeamento foi uma bomba modelo 360 GPH Bilge Pump. Esse equipamento pertence a uma classe de bombas do fabricante Rule-Industries que partem do modelo 360 GPH e chegam ao modelo 1100 GPH. A sigla GPH significa *Gallons Per Hour*, e indica a vazão da bomba. Segundo manual do fabricante, para uma altura de 2 metros, a bomba é capaz de bombear água a uma vazão de 150 *Gallons Per Hour*, algo em torno de 11 litros por minuto. Contudo, no catálogo do produto não é especificada a vazão correspondente a uma altura de 2,5 metros, mas sim a altura máxima para o funcionamento da bomba, que é de 3,5 metros.

A figura 33 ilustra a bomba antes de ser instalada no sistema de bombeamento, enquanto a figura 34 apresenta a bomba submersa no reservatório inferior do sistema.

Figura 33. Bomba hidráulica utilizada.



Fonte: A autoria própria

Figura 34. Bomba no reservatório.



Fonte: A autoria própria

Para o acionamento da bomba foi utilizada uma bateria recarregável selada do fabricante Rontek, modelo RT12V2.2. Esse exemplar é constituído por células de chumbo-ácido, possui uma tensão de saída igual a 12 V e pode fornecer uma corrente igual a 2,2 Ampères durante uma hora. A bateria é utilizada como simulação do fornecimento de potência de um arranjo fotovoltaicos à bomba. Na figura 35 é apresentada a bateria utilizada no protótipo.

Figura 35. Bateria de 12 V utilizada para acionar a bomba.



Fonte: Autoria própria

3.3.2 Produção do sistema de geração

Para o sistema de geração, a máquina elétrica selecionada para o protótipo foi um gerador de corrente contínua a ímãs permanentes sem escovas. A opção pela excitação a ímãs permanentes se deve ao fato de esses equipamentos não necessitarem de uma fonte externa para a excitação do campo magnético.

O modelo de gerador utilizado foi o F-50, uma máquina de corrente contínua à ímãs permanentes cuja geração nominal de tensão é igual a 12 V e potência nominal de saída de 10 W. Segundo o fabricante, a pressão de operação do gerador varia de 0,05 MPa a 0,6 MPa e possui vida útil de mais de 3000 horas. Contudo, nos catálogos do fabricante não é informada a velocidade do gerador. Esse equipamento possui em seu interior uma pequena turbina hidráulica dotada de pás, na qual são acoplados os ímãs. Como o fluxo de água que chega à tubulação de entrada do gerador é unidirecional, a turbina converte essa energia mecânica em um movimento rotatório. Sendo o estator composto pelos ímãs, e acoplado à turbina, há movimentação dos ímãs juntamente ao movimento rotórico. O movimento relativo entre o rotor e o estador do gerador faz com que ocorra uma variação temporal no fluxo magnético no interior do gerador e segundo as leis de Faraday-Lenz, seja induzida uma força eletromotriz nos terminais do estator. A figura 36 apresenta o gerador, enquanto na figura 37 é ilustrada a turbina conectada mecanicamente aos ímãs permanentes do rotor do gerador utilizado no protótipo.

Figura 36. Gerador de corrente contínua F-50.



Fonte: Autoria própria

Figura 37. Turbina acoplada ao gerador.



Fonte: Autoria própria

Na figura 38, são ilustrados os detalhes do gerador. O equipamento foi desmontado, sendo possível notar os terminais de saída do gerador conectados ao estator e o detalhe das tubulações de entrada e saída de água, assim como a localização da turbina no interior da máquina.

Figura 38. Detalhes do gerador F-50.



Fonte: Autoria própria

Para o estabelecimento da coluna d'água ao protótipo, o gerador foi conectado a um tubo de PVC com diâmetro de $\frac{3}{4}$ por meio de conexões do tipo rosca e vedações adequadas para evitar vazamentos no equipamento. A figura 39 representa a forma como a ligação do gerador foi realizada.

Figura 39. Montagem do gerador.



Fonte: Autoria própria

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para exame do rendimento, níveis de tensão, corrente e potência consumida pelo protótipo de bombeamento e pelo sistema de geração, foi adotado um padrão de procedimento para medição das grandezas elétricas e mecânicas. Os reservatórios foram subdivididos em diferentes níveis, e para cada faixa arbitrada foram coletados valores de corrente e tensão. Além disso, foi mensurado o tempo para que a água ultrapassasse cada nível dos reservatórios e também o tempo para que todo o volume fosse bombeado e também o período requerido para esse mesmo volume atravessasse a turbina do gerador. A partir desses dados relativos ao período de funcionamento dos equipamentos é possível ter uma noção sobre a vazão volumétrica de ambos os sistemas.

4.1 MEDIÇÕES REALIZADAS PARA O SISTEMA DE BOMBEAMENTO

Para o armazenamento da água a ser bombeada, foi utilizado um reservatório cilíndrico com dimensões capazes de atender um volume de 20 litros de água, volume total do fluido presente no protótipo. O reservatório adotado possui como dimensões um diâmetro de 29,5 centímetros e altura de 33,4 centímetros. A equação 15 apresenta o procedimento para o cálculo do volume de um reservatório cilíndrico, em que r designa o raio da base, h a altura do reservatório e V o volume do cilindro.

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (15)$$

Considerando as dimensões do reservatório, o volume total que o reservatório pode comportar é igual 22,83 litros. Não foi necessário preencher todo o recipiente com água, pois o volume escolhido para as medições foi de 20 litros. A partir desse valor o reservatório foi dividido em 5 níveis de medição a partir da altura do cilindro. Essa subdivisão foi realizada com o intuito de analisar se um menor volume a ser bombeado influencia nos valores de corrente do motor elétrico da bomba, no tempo necessário para bombear todo o fluido ao reservatório superior e na vazão proporcionada pelo sistema de bombeamento. As figuras 40 e 41

apresentam o reservatório inferior do sistema com as demarcações para os níveis em que foram recolhidas amostras e o protótipo de bombeamento montado, respectivamente.

Figura 40. Níveis de medição do reservatório de bombeamento.



Fonte: Autorial própria

Figura 41. Protótipo montado para o sistema de bombeamento.



Fonte: Autorial própria

Para cada uma das faixas de medição apresentadas na figura 40 corresponde um volume de água demarcado de maneira uniforme desde o volume total do reservatório até que o reservatório fique vazio. Considerando a equação 15, para um volume igual a 20 litros e um diâmetro de 29,5 centímetros, a altura da água no reservatório deve ser igual a 29,26 centímetros. Esse valor foi subdividido em cinco níveis de altura, distantes 7,32 centímetros cada, desde a referência até a altura total para o volume desejado. A tabela 1 apresenta as dimensões do reservatório de bombeamento.

Tabela 1. Dimensões do reservatório de bombeamento.

| Dimensões do reservatório de bombeamento | |
|--|-----------------------|
| Diâmetro | 29,5 cm |
| Raio | 14,8 cm |
| Altura | 29,3 cm |
| Volume total | 20,00 dm ³ |
| Intervalo de volume | 5,00 dm ³ |
| Intervalo de altura | 7,3 cm |

Fonte: Autoria própria

A tabela 2 ilustra a divisão do reservatório nos níveis de medição adotados para o protótipo de bombeamento. Como o volume total foi considerado 20 litros, variando a altura em níveis igualmente espaçados, pode-se deduzir que para cada faixa de medição corresponde um volume de 5 litros.

Tabela 2. Faixas de medição do reservatório de bombeamento.

| Subdivisão dos níveis do reservatório de bombeamento | | |
|--|----------|--------------------|
| Nível | Altura | Volume |
| 5 | 29,26 cm | 20 dm ³ |
| 4 | 21,95 cm | 15 dm ³ |
| 3 | 14,63 cm | 10 dm ³ |
| 2 | 7,32 cm | 5 dm ³ |
| 1 | 0,00 cm | 0 dm ³ |

Fonte: Autoria própria

Foram realizadas três medições para cada nível demarcado no reservatório. Sendo assim, foi necessário que a bomba deslocasse o volume de água ao reservatório superior três vezes. Em cada medição, foram auferidos valores de corrente e tensão consumidos pela bomba, o tempo necessário para bombear a água entre os níveis demarcados e o tempo total para bombear os 20 litros de água presentes no reservatório. Na tabela 3 são apresentados valores de corrente e o tempo necessário para deslocar a água entre as faixas de medição do reservatório inferior para as três medições realizadas no estudo.

Tabela 3. Medições das grandezas elétricas do circuito de bombeamento.

| Nível | Altura | Medição 1 | | Medição 2 | | Medição 3 | |
|-------|---------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
| | | Corrente | Tempo | Corrente | Tempo | Corrente | Tempo |
| 5 | 29,26cm | 1,79 A | 0 s | 1,58 A | 0 s | 1,61 A | 0 s |
| 4 | 21,95cm | 1,62 A | 82 s | 1,66 A | 87 s | 1,58 A | 92 s |
| 3 | 14,63cm | 1,60 A | 154 s | 1,61 A | 154 s | 1,54 A | 151 s |
| 2 | 7,32cm | 1,59 A | 232 s | 1,59 A | 229 s | 1,50 A | 230 s |
| 1 | 0,00cm | 1,58 A | 308 s | 1,58 A | 307 s | 1,48 A | 306 s |

Fonte: Autoria própria

A tensão de saída da bateria se manteve aproximadamente constante durante o experimento, com valores de 11,94 V para a primeira medição, 11,90 V para a segunda medição e 11,88 V para a terceira medição.

A partir do intervalo de tempo entre cada nível de medição e da consideração de que cada nível é igualmente espaçado, contendo um volume igual a 5 litros pode-se calcular a vazão bombeada para cada nível e para as três medições realizadas. A tabela 4 apresenta os dados de vazão volumétrica calculados.

Tabela 4. Vazão calculada para o sistema de bombeamento.

| Nível | Altura | Medição 1 | Medição 2 | Medição 3 |
|-------|---------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | | Vazão volumétrica | | |
| 5 | 29,26cm | 0,000 dm ³ /s | 0,000 dm ³ /s | 0,000 dm ³ /s |
| 4 | 21,95cm | 0,061 dm ³ /s | 0,057 dm ³ /s | 0,054 dm ³ /s |
| 3 | 14,63cm | 0,069 dm ³ /s | 0,075 dm ³ /s | 0,085 dm ³ /s |
| 2 | 7,32cm | 0,064 dm ³ /s | 0,067 dm ³ /s | 0,063 dm ³ /s |
| 1 | 0,00cm | 0,066 dm ³ /s | 0,064 dm ³ /s | 0,066 dm ³ /s |

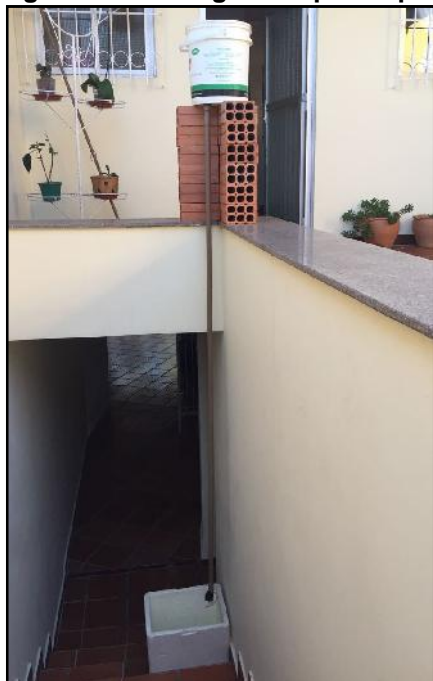
Fonte: Autoria própria

4.2 MEDIÇÕES REALIZADAS PARA O SISTEMA DE GERAÇÃO

Após as medições do sistema de bombeamento, procedeu-se à análise das grandezas relacionadas ao sistema de geração para que fosse possível comparar os dois sistemas. Nas medições do sistema de geração foi mantido o mesmo procedimento adotado para o protótipo do sistema de bombeamento. A forma e as medidas do reservatório do sistema foram preservadas para que fosse viável mensurar a influência do volume armazenado na produção de corrente elétrica por parte do gerador. A figura 42 apresenta a diferença de cotas entre o reservatório superior do sistema e a tubulação de entrada do gerador. É possível observar na

figura 43 as conexões em PVC para o estabelecimento da coluna d'água. Foi utilizado um tubo de PVC com 2,5 metros de comprimento e com $\frac{3}{4}$ " de diâmetro.

Figura 42. Montagem do protótipo.



Fonte: Autoria própria

Figura 43. Gerador em funcionamento.



Fonte: Autoria própria

O procedimento para coleta de dados consistiu na medição da tensão a vazio do gerador e na determinação experimental dos níveis de tensão e corrente do gerador submetido a dois valores de carga resistiva. Quanto às faixas arbitradas para a medição, foi adotado o mesmo reservatório utilizado para o circuito de bombeamento, sendo assim considerados os valores das tabelas 1 e 2 para medição dos valores de tensão, corrente e para o cálculo da vazão do sistema.

Inicialmente foi medida a tensão à vazio do gerador e o tempo necessário para que o volume presente no reservatório superior atravessasse completamente a turbina do gerador. Os níveis de tensão e os intervalos de tempo mensurados são expostos na tabela 5.

Tabela 5. Medição de tensão a vazio do gerador.

| Nível | Altura | Medição 1 | | Medição 2 | | Medição 3 | |
|-------|----------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|
| | | Tempo | Tensão | Tempo | Tensão | Tempo | Tensão |
| 5 | 29,26 cm | 0 s | 10,52 V | 0 s | 10,04 V | 0 s | 10,40 V |
| 4 | 21,95 cm | 38 s | 10,59 V | 38 s | 10,16 V | 42 s | 10,15 V |
| 3 | 14,63 cm | 90 s | 10,42 V | 91 s | 9,95 V | 95 s | 9,97 V |
| 2 | 7,32 cm | 141 s | 10,18 V | 141 s | 9,79 V | 145 s | 9,87 V |
| 1 | 0,00 cm | 174 s | 10,08 V | 176 s | 9,67 V | 176 s | 9,69 V |

Fonte: Autoria própria

Considerando o mesmo padrão de cálculo do circuito de bombeamento, a vazão volumétrica calculada em cada nível para as três medições realizadas é apresentada na tabela 6.

Tabela 6. Vazão volumétrica calculada para o sistema de geração a vazio.

| Nível | Altura | Medição 1 | Medição 2 | Medição 3 |
|-------|----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | | Vazão volumétrica | | |
| 5 | 29,26 cm | 0,000 dm ³ /s | 0,000 dm ³ /s | 0,000 dm ³ /s |
| 4 | 21,95 cm | 0,132 dm ³ /s | 0,132 dm ³ /s | 0,119 dm ³ /s |
| 3 | 14,63 cm | 0,096 dm ³ /s | 0,094 dm ³ /s | 0,094 dm ³ /s |
| 2 | 7,32 cm | 0,098 dm ³ /s | 0,100 dm ³ /s | 0,100 dm ³ /s |
| 1 | 0,00 cm | 0,152 dm ³ /s | 0,143 dm ³ /s | 0,161 dm ³ /s |

Fonte: Autoria própria

A primeira carga conectada aos terminais de saída do gerador foi um resistor *shunt* com resistência nominal de 2,18 k de potência 1/4W. Os valores de tensão e corrente mensurados para essa carga são apresentados na tabela 7.

Tabela 7. Valores medidos para uma carga de 2,18 k

| Nível | Medição 1 | | | Medição 2 | | | Medição 3 | | |
|-------|-----------|--------|----------|-----------|--------|----------|-----------|--------|----------|
| | Duração | Tensão | Corrente | Duração | Tensão | Corrente | Duração | Tensão | Corrente |
| 5 | 0 s | 8,48 V | 0,0039 A | 0 s | 8,24 V | 0,0038 A | 0 s | 8,15 V | 0,0037 A |
| 4 | 55 s | 8,05 V | 0,0037 A | 39 s | 8,10 V | 0,0037 A | 38 s | 7,93 V | 0,0036 A |
| 3 | 88 s | 7,98 V | 0,0037 A | 99 s | 7,99 V | 0,0037 A | 91 s | 7,80 V | 0,0036 A |
| 2 | 136 s | 7,81 V | 0,0036 A | 141 s | 7,78 V | 0,0036 A | 141 s | 7,68 V | 0,0035 A |
| 1 | 171 s | 7,65 V | 0,0035 A | 175 s | 7,66 V | 0,0035 A | 176 s | 7,58 V | 0,0035 A |

Fonte: Autoria própria

Considerando níveis de tensão e corrente contínuos nos terminais de saída do gerador, é possível calcular a potência elétrica produzida pelo gerador. A tabela 8 apresenta a potência elétrica calculada para as três medições.

Tabela 8. Potência elétrica gerada para uma carga de 2,18 k

| Nível | Medição 1 | Medição 2 | Medição 3 |
|-------|-----------|-----------|-----------|
| 5 | 0,033 W | 0,031 W | 0,030 W |
| 4 | 0,030 W | 0,030 W | 0,029 W |
| 3 | 0,029 W | 0,029 W | 0,028 W |
| 2 | 0,028 W | 0,028 W | 0,027 W |
| 1 | 0,027 W | 0,027 W | 0,026 W |

Fonte: Autoria própria

A segunda carga conectada ao gerador foi um resistor *shunt* com resistência nominal de 100 de potência 20W. O processo para aquisição dos dados foi similar ao apresentado para o resistor *shunt* de 2,18 k . A tabela 9 apresenta os níveis de tensão e corrente do sistema.

Tabela 9. Valores medidos para uma carga de 100

| Nível | Medição 1 | | | Medição 2 | | | Medição 3 | | |
|-------|-----------|--------|----------|-----------|--------|----------|-----------|--------|----------|
| | Duração | Tensão | Corrente | Duração | Tensão | Corrente | Duração | Tensão | Corrente |
| 5 | 0 s | 2,00 V | 0,020 A | 0 s | 2,06 V | 0,0206 A | 0 s | 2,03 V | 0,0203 A |
| 4 | 55 s | 1,97 V | 0,020 A | 36 s | 1,99 V | 0,0199 A | 39 s | 2,02 V | 0,0202 A |
| 3 | 88 s | 1,93 V | 0,019 A | 80 s | 1,97 V | 0,0197 A | 138 s | 1,97 V | 0,0197 A |
| 2 | 136 s | 1,91 V | 0,019 A | 140 s | 1,85 V | 0,0185 A | 171 s | 1,89 V | 0,0189 A |
| 1 | 171 s | 1,84 V | 0,018 A | 172 s | 1,86 V | 0,0186 A | 201 s | 1,85 V | 0,0185 A |

Fonte: Autoria própria

Os níveis potência calculados para o as medições apresentadas na tabela 9 são ilustrados na tabela 10.

Tabela 10. Potência elétrica gerada para uma carga de 100 .

| Nível | Medição 1 | Medição 2 | Medição 3 |
|-------|-----------|-----------|-----------|
| 5 | 0,040 W | 0,042 W | 0,041 W |
| 4 | 0,039 W | 0,040 W | 0,041 W |
| 3 | 0,037 W | 0,039 W | 0,039 W |
| 2 | 0,036 W | 0,034 W | 0,036 W |
| 1 | 0,034 W | 0,035 W | 0,034 W |

Fonte: Autoria própria

4.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA OS SISTEMAS SIMULADOS

A partir das informações alcançadas através da implementação do protótipo, é possível perceber diferenças importantes quanto ao funcionamento dos sistemas de bombeamento e geração e conseqüentemente quanto à viabilidade técnica e comercial do conjunto averiguado.

Analisando primeiramente o sistema de bombeamento, na tabela 3 a variação de corrente entre os 5 níveis de medição não apresentou diferenças significativas, contudo foi observada uma tendência a diminuição nos níveis de corrente demandados à bomba conforme o volume a ser bombeado decrescia. Entre as 3 medições houve uma pequena diminuição nos valores de corrente para acionamento do motor por conta de variações da tensão proveniente da bateria.

Dado as três medições realizadas, o tempo médio para bombear o volume total ao reservatório superior a 2,5 metros foi de 5 minutos e 7 segundos, enquanto a corrente média para acionamento da bomba foi de 1,64 A na primeira medição, 1,61 A na segunda medição e 1,54 A na terceira medição. As variações da corrente de alimentação da bomba acarretaram variações proporcionais na vazão entre os diferentes níveis de medição.

Em relação ao desempenho do sistema de geração, mostrou-se uma eficiência consideravelmente baixa se comparada à potência e ao tempo necessários para bombear o mesmo volume de água à mesma altura. No que diz respeito aos valores de corrente e tensão de saída do gerador, essas grandezas tiveram seu comportamento relacionado às cargas associadas em cada medição. Para uma impedância mais elevada associada ao circuito houve obtenção de tensão mais elevada, todavia foram encontrados valores menores de corrente. No caso de associação de impedância reduzida ao circuito ocorreu diminuição da tensão, porém houve um acréscimo no valor da corrente. Essa diferença é observada nas tabelas 7 e 9 para resistências de 2,18 k e 100 respectivamente. Contudo, mesmo com diferentes cargas, a potência de saída do gerador não ultrapassou o valor de 0,04 W de acordo com a tabela 8 e a tabela 10. A potência produzida pelo gerador, se comparada à potência necessária para bombear água ao reservatório superior, mostrou-se portanto muito pequena. Ao se comparar por exemplo a potência elétrica resultante do produto entre a corrente média entre os níveis da primeira medição e a tensão média da primeira medição, obtém-se uma potência de 19,3 W necessária ao bombeamento de 20 litros de água. Em relação à vazão, mesmo com um potência de entrada mais elevada, a bomba levou um tempo maior para bombear os 20 litros de água se comparado ao sistema de geração. Para o sistema de bombeamento, conforme indicado anteriormente, foi necessário um tempo médio de 5 minutos e 7 segundos para a execução de uma medição, enquanto que para o sistema de geração o tempo médio foi de 2 minutos e 55 segundos. Esses intervalos indicam

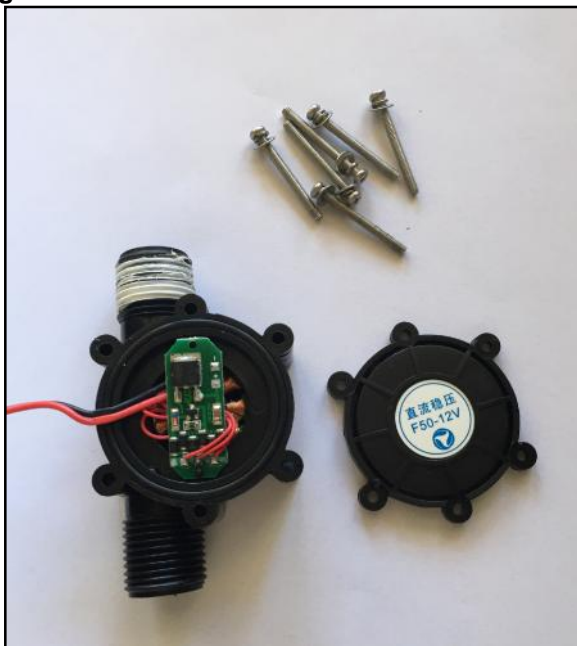
uma vazão quase duas vezes maior para o protótipo de geração. Essa diferença indica que para que o sistema de bombeamento alcance uma vazão semelhante à do sistema de geração, seria necessário um maior fornecimento de potência à bomba e conseqüentemente um menor rendimento ao sistema.

Tendo em vista o baixo rendimento, a utilização da matriz com ímãs de Halbach pode ser uma alternativa para se buscar uma maior eficiência ao sistema de geração. Conforme apresentado na seção 2.7.2, segundo Yan *et al.* (2016) a implementação da matriz de Halbach tende a elevar a densidade de fluxo magnético e de energia no interior do gerador. Após as medições com o gerador em suas configurações de fábrica, procedeu-se a modificações na estrutura do estator do gerador, buscando a implementação da matriz com ímãs de Halbach e um aumento na eficiência do sistema.

4.4 IMPLEMENTAÇÃO DA MATRIZ DE HALBACH NO PROTÓTIPO

Para a execução da matriz com ímãs de Halbach, foi inicialmente realizado um processo de desmontagem do gerador com o intuito de separar o rotor e o estator do aparelho para que fosse possível ter acesso aos ímãs fornecidos de fábrica ao equipamento. Primeiramente foi desmontado o gerador, e a parte referente a tubulação e ao rotor foram retiradas. O processo de desmontagem do gerador é representado nas figuras 44 e 45.

Figura 44. Primeira fase da desmontagem do gerador.



Fonte: Autoria própria

Figura 45. Segunda fase da desmontagem do gerador.



Fonte: Autoria própria

Após o processo descrito pelas figuras 44 e 45, o rotor foi separado do restante da máquina. A figura 46 ilustra o rotor do gerador ligado à turbina hidráulica utilizada no gerador após a desmontagem do protótipo.

Figura 46. Rotor do gerador.



Fonte: Autoria própria

O rotor da máquina estava acoplado ao cilindro em que as pás das turbinas se encontravam. Foi constatado que os ímãs presentes no estator da máquina eram ímãs de ferrite e haviam dois pólos magnéticos, um pólo norte e um pólo sul.

Os ímãs de formato semi-cilíndrico eram colados às paredes internas da turbina, por isto foi necessário quebrá-los para a realização da montagem da matriz de Halbach no local em que ele estava. A turbina com os ímãs originais é representada na figura 47.

Figura 47. Turbina com o ímã original.



Fonte: Autoria própria

Os instrumentos utilizados para retirar o ímã foram um alicate, uma chave de fenda e furadeira. Durante o processo houve o desgaste da haste interna da turbina. As figuras 48 e 49 representam o processo.

Figura 48. Processo de retirada dos ímãs do gerador.



Fonte: Autoria própria

Figura 49. Turbina, parte restante do ímã e alguns dos materiais utilizados.



Fonte: Autoria própria

A escolha dos ímãs a serem utilizados na confecção da matriz de Halbach se baseou na altura da turbina do gerador: foram escolhidos ímãs de neodímeo de 12 x 4 x 2 mm.

Primeiramente os ímãs foram posicionados de acordo com a configuração de Halbach em um plano horizontal, para que fossem analisadas as polaridades para evitar possível atração e repulsão dos ímãs no momento em que fossem colocados na turbina. A primeira fase do processo é representada pela figura 50.

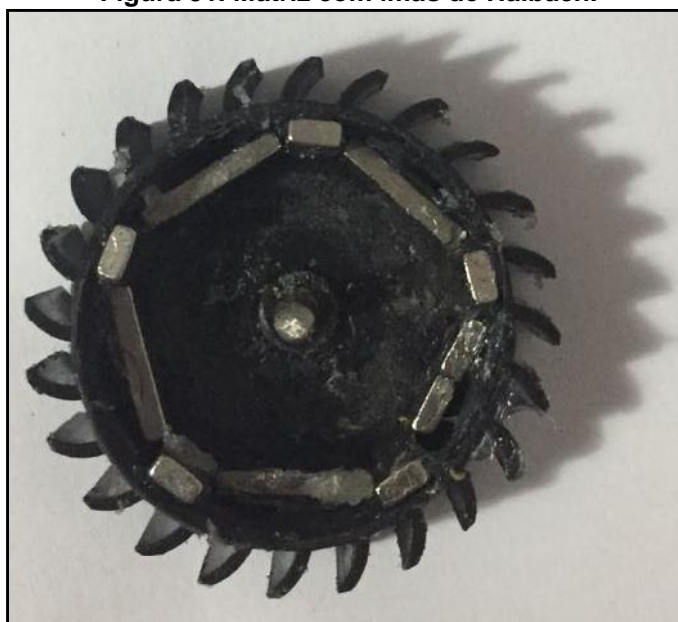
Figura 50. Etapa inicial da montagem de matriz de Halbach.



Fonte: Autoria própria

Posteriormente três ímãs agrupados na posição correta foram separados, expostos a cola de silicone e colocados na turbina. Após isto foram colocados os outros ímãs, em pares, de acordo com a polaridade analisada anteriormente, sem aguardar o tempo de secagem do silicone dos ímãs que foram colocados antes. Em decorrência do fato de que o último ímã não possuía o tamanho adequado para fechar a matriz de ímãs, deixou-se no primeiro momento a matriz incompleta. A configuração dos ímãs neste primeiro momento pode ser visualizada na figura 51.

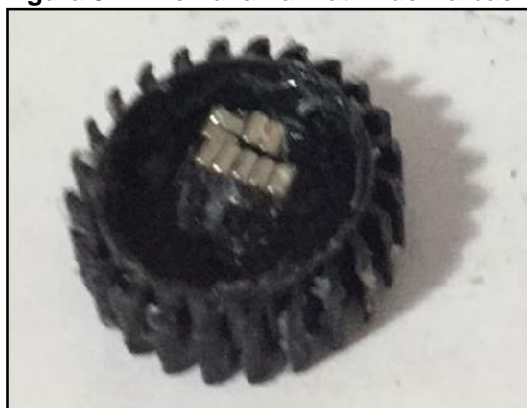
Figura 51. Matriz com ímãs de Halbach.



Fonte: Autoria própria

O problema encontrado nesta situação, em decorrência dos fatos de que não houve o tempo adequado de espera para a secagem do silicone e que a matriz estava incompleta, foi o fato de que os ímãs não permaneceram na configuração de Halbach. Não era esperada uma força de atração tão intensa entre os ímãs. Por conta da força magnética dos ímãs e da fraca atuação do silicone, que não tinha secado, os ímãs se uniram no meio da turbina depois de alguns segundos do posicionamento do último ímã antes da lacuna. A situação é expressa na figura 52.

Figura 52. Anomalia na matriz de Halbach.



Fonte: Autoria própria

O processo foi realizado novamente, porém, utilizando o tempo de espera de secagem dos três primeiros ímãs e posteriormente de cada par de ímãs colocados. Para evitar que algum dos ímãs sofresse atração ou repulsão a outro ímã e fosse

desposicionado, utilizou-se uma rolha colocada no centro da turbina. Esta configuração pode ser visualizada na figura 53.

Figura 53. Procedimento para a montagem da matriz de Halbach.



Fonte: Autoria própria

Para que não houvesse lacuna na turbina no último ímã utilizou-se dois ímas de 5 x 4 x 2 mm, posicionados um ao lado do outro, em posição horizontal, de forma a preencher o espaço entre o primeiro e o último ímã de 12 x 4 x 2 mm colocados. A matriz de Halbach final é representada pela figura 54.

Figura 54. Matriz de Halbach com ímas de 12 x 4 x 2 mm.



Fonte: Autoria própria

Após a inserção dos ímas neodímio no interior do gerador, foi realizada a tentativa de inserir o estator na máquina conforme suas configurações de fábrica. Contudo, por questões construtivas, com os ímas inseridos, não foi possível efetuar

o processo. Logo, a solução encontrada foi utilizar ímãs com um comprimento menor e lixar as partes plásticas da máquina de modo a aumentar a área útil para a inserção dos ímas. A figura 55 ilustra os novos ímas inseridos no rotor do gerador.

Figura 55. Ímãs escolhidos para segunda tentativa de montagem da matriz de Halbach.



Fonte: Autoria própria

Para que fosse possível colar os ímãs de maneira mais efetiva do que com a cola de silicone, foi utilizada uma cola de material mais apropriado para essa aplicação. A cola escolhida foi a cola de araldite, apresentada na figura 56.

Figura 56. Cola de araldite.



Fonte: Autoria própria

Após o processo de colagem dos ímas, parte da matriz de Halbach, com os ímas colados pode ser apresentada na figura 57.

Figura 57. Matriz de Halbach montada com ímas de 5 x 4 x 2 mm.



Fonte: Autoria própria

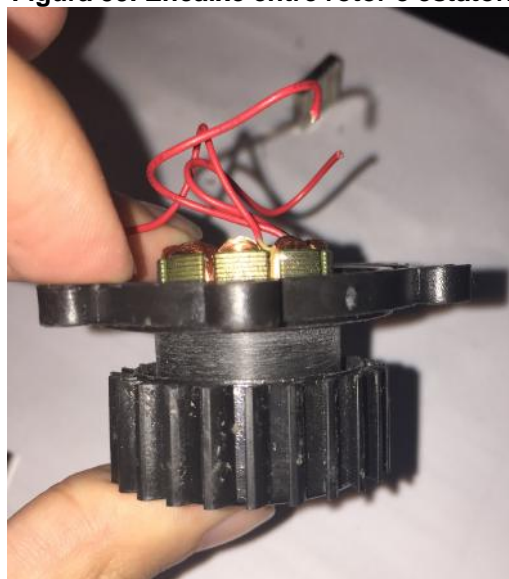
Os ímas com as dimensões de 5 x 4 x 2 mm são os ímas de neodímio com as menores extensões encontrados comercialmente no Brasil, pois são equipamentos importados. Esses materiais foram a saída para a adaptação da matriz de Halbach no gerador utilizado nas medições do sistema de geração. Contudo, com a matriz de Halbach inserida no rotor da máquina, não foi possível a conexão das partes do equipamento previamente desmontadas. Ao encaixar o rotor novamente no estator, o rotor não foi capaz de rotacionar no interior do gerador, pois por conta de características construtivas do equipamento o encaixe da peça não foi possível. A figura 58 apresenta o rotor do equipamento com os ímas conectados por meio da cola araldite, na qual é possível perceber que ao lado direito a colagem não foi suficiente para manter os ímãs na posição, enquanto a figura 59 ilustra a tentativa de conexão entre o rotor e o estator do equipamento.

Figura 58. Matriz de Halbach no rotor.



Fonte: Autoria própria

Figura 59. Encaixe entre rotor e estator.

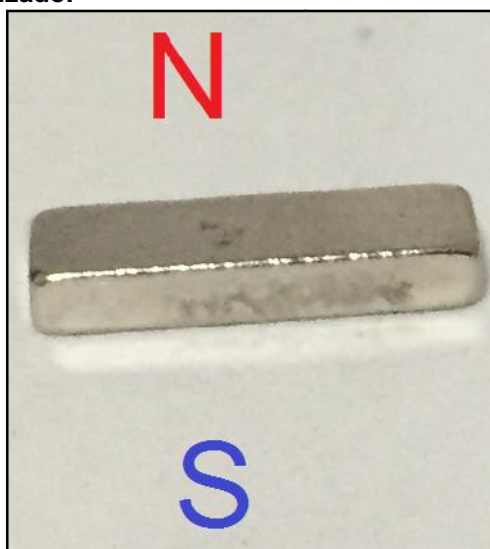


Fonte: Autoria própria

Apesar das medidas utilizadas para aumento de área livre na turbina, o problema persistiu e não houve espaço para encaixar a parte restante do gerador à turbina. Tal fato inviabilizou a realização da matriz de Halbach mecanicamente.

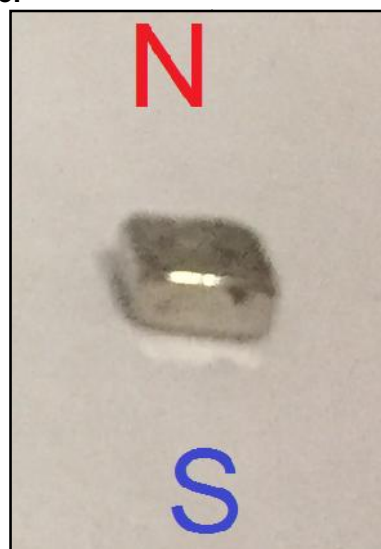
Após a constatação deste problema, percebeu-se pela montagem dos ímãs que a polaridade deles era diferente da constatada anteriormente. Com isto verificou-se que a montagem realizada anteriormente não respeitava os critérios da matriz de Halbach. A representação dos pólos dos ímãs é ilustrada nas figuras 60 e 61.

Figura 60. Polaridade do primeiro ímã utilizado.



Fonte: Autoria própria

Figura 61. Polaridade do segundo ímã utilizado.



Fonte: Autoria própria

4.4.1 Análise dos resultados obtidos com a matriz com ímas de Halbach

A montagem e o ensaio dos resultados apresentados por meio da matriz de Halbach não pôde ser realizada a tempo hábil para essa monografia. O gerador F-50 utilizado no trabalho não foi capaz de suportar a alteração de seus ímas de fábrica, ímas de ferrite em formato semi-cilíndrico, para ímãs de neodímio na forma da matriz com ímas de Halbach.

Algumas das principais desvantagens da utilização da matriz de Halbach foram encontradas durante o período de montagem. As principais dificuldades encontradas no momento em que se realiza a construção são a necessidade de montar a matriz com os ímãs magnetizados, o combate às forças de repulsão entre os ímãs na montagem, e a necessidade de assegurar que todos os ímãs estão fixos durante a execução da construção da matriz.

4.5 TESTE DO GERADOR COM UMA CARGA DE NATUREZA DISTINTA

Após verificar a baixa corrente de saída do gerador e portanto uma pequena potência convertida pelo equipamento, procedeu-se à análise com um outro gerador do mesmo modelo. O intuito dessa análise consistiu em verificar se havia algum defeito no equipamento utilizado para as primeiras medições ou se as primeiras cargas resistivas utilizadas causaram algum curto circuito nos terminais do gerador.

O equipamento foi submetido às mesmas condições de potência de entrada do primeiro gerador em sua turbina, mas conectado a uma outra carga. Após as medições realizadas com as cargas resistivas, utilizou-se uma lâmpada OSRAM SK7506, para 12 V, de potência 21 W, na saída do gerador. O sistema é representado pela figura 62.

Figura 62- Protótipo com lâmpada de carga



Fonte: Autoria própria

Mesmo com uma outra carga e um outro exemplar do mesmo gerador sendo utilizados, foi constatada uma tensão muito baixa e não foi encontrada nenhuma corrente na carga. A tensão medida foi igual 0,02 V e o amperímetro conectado à lâmpada não apresentou nenhuma corrente.

A partir dessas medições foi verificado que o baixo rendimento do circuito ocorreu por conta das características do sistema e não de uma anomalia que possa ter ocorrido no gerador.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

O aumento na demanda por energia elétrica em ordem global requer um crescimento proporcional na oferta de energia. Para que o sistema de fornecimento de energia elétrica seja capaz de suprir as necessidades residenciais, comerciais e industriais, é preciso que o sistema de geração de energia elétrica forneça elevada confiabilidade e segurança operacional aos consumidores.

Em âmbito nacional, a atuação satisfatória do sistema de geração elétrica é afetado pela dependência da geração por fontes hidráulicas. Essas fontes de energia são relacionada a fatores ambientais, como o regime de chuvas. Tendo em vista a submissão da matriz hidrelétrica brasileira em relação a fatores temporais, é necessário buscar formas de diversificação do sistema de geração de energia elétrica.

Fontes renováveis de energia são alternativas para o sistema de geração de energia elétrica em âmbito nacional. A geração de energia solar térmica, solar fotovoltaica e eólica são exemplos de fontes alternativas para geração de energia. Contudo, essas formas de produção de energia elétrica possuem uma adversidade, pois são diretamente relacionadas a condições ambientais, como a intensidade dos ventos e a incidência de raios solares. De modo a maximizar o aproveitamento de energia por essas fontes, podem ser utilizados sistemas de armazenamento de energia para que nos momentos em que a produção de energia não coincidir com o consumo essa energia produzida seja acumulada para uso posterior.

Há diversos meios de realizar o armazenamento de energia, porém ainda existe a busca pelo meio com maior eficiência e menor impacto ambiental. Especificamente, em relação aos sistemas fotovoltaicos isolados, os sistemas de acumulação mais empregados são bancos de baterias. Contudo, foi abordado no trabalho que a utilização de bancos de baterias necessita de locais apropriados para instalação e para descarte, acarretando danos no que diz respeito a questões ambientais. Logo, o presente estudo buscou a análise técnica da utilização de um sistema com características diferentes de sistemas acumulação de energia por baterias. Foi considerado portanto um sistema de acumulação de energia a partir de

equipamentos para bombeamento de água e posterior geração de energia por meio de máquinas elétricas.

A partir dos resultados obtidos pela implementação do protótipo foram constatados alguns conceitos referentes ao sistema cuja análise foi proposta. Os valores necessários para a realização do bombeamento foram consideravelmente superiores aos encontrados na geração. A tensão de saída do sistema de geração se manteve inferior à tensão nominal para acionamento do sistema de bombeamento. A maior tensão medida com o gerador operando a vazio não superou 10,5 V, tensão ligeiramente menor do que a tensão para acionamento da bomba, que é de 12 V. A corrente produzida pelo sistema de geração, independentemente da carga conectada aos terminais do gerador, foi de menor intensidade do que a corrente necessária para bombear o volume de água projetado para o reservatório superior. Mesmo com valores mais elevados de corrente e tensão necessários para o sistema de bombeamento, a vazão encontrada para o protótipo de geração foi maior.

Com base nos dados obtidos e nos cálculos realizados, nota-se que inúmeras variáveis afetam no desempenho do sistema. Há de se considerar perdas nas máquinas elétricas, nas tubulações e conexões para o aproveitamento de energia do sistema. Com o experimento obtido, é possível inferir que para o sistema hidráulico tivesse maior armazenamento seria necessário que houvesse um reservatório de maior tamanho, posicionado em maior altura, e que o gerador utilizado tivesse maior rendimento.

5.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Dado a importância do estudo das formas de armazenamento em caso de sistemas de geração fotovoltaica em sistemas isolados, o estudo de condições mais apropriadas para um maior rendimento de fontes hidráulicas possui grande relevância. Uma das propostas para trabalhos futuros é o estudo das fontes hidráulicas para armazenamento utilizando maiores alturas, reservatórios de maior volume e gerador de maior eficiência.

A outra proposta para trabalhos futuros é a implementação de um gerador, de tamanho compatível com os ímãs de neodímio, utilizando a matriz de Halbach.

REFERÊNCIAS

AFONSO, D. A. D., **Modelação e Controle Analógico de um Sistema de Microgeração a Energia Solar**. Tese (Mestrado) - Faculdade de Engenharia do Porto. 2009.

ARGAW, Neway. **Renewable energy water pumping systems handbook**. Technical report, National Renewable Energy Laboratory. 2004

BLACK, O. P., **Bombas**. Livro Técnico S/A. 1ª Edição. Rio de Janeiro, 1979.

Brasil. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica**. 3ª edição, 2008. Brasília, 2008. Retirado de:
<<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas3ed.pdf>> Acesso em 08 out. 2017 às 15:01.

Brasil. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa nº 482**. 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. 17 DE ABRIL DE 2012. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bren2012482.pdf>> Acesso em 5 jun. 2017 às 17:41.

Brasil. Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional 2016**: Ano base 2015 / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: EPE, 2016. Retirado de: https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2016.pdf. Acesso em 10 mai. 2017 às 15:45.

Brasil. Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional 2017**: Ano base 2016 / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: EPE, 2017. Retirado de: https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2017.pdf. Acesso em 2 jun. 2017 às 18:53.

Brasil. Ministério de Minas e Energia. Eletrobrás. **Manual de Microcentrais Hidrelétricas**. Brasília, 1985.

Brasil. Ministério de Minas e Energia. **Matriz Energética Nacional 2030** / Ministério de Minas Energia; colaboração Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME: EPE, 2007. Retirado de:
<http://www.mme.gov.br/documents/1138787/1732860/Matriz+Energ%C3%A9tica+Nacional+2030/39d39feb-1307-4f4f-9658-039b86b94bbd?version=1.0>. Acesso em 10 jun. de 2017 às 19:14.

BRITO, M. A. G. **Inversores Integrados Monofásicos e Trifásicos para Aplicações Fotovoltaicas: Técnicas para obtenção de MPPT, detecção e proteção de ilha, sincronização e paralelismo com a rede de distribuição de energia elétrica.** Tese(Doutorado)- Universidade Estadual Paulista. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Ilha da Solteira, 2013.

BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos.** Prentice Hall, 8ª edição. São Paulo, 2005.

CABELLO, A. F.; POMPERMAYER, F. M. **Energia fotovoltaica ligada à rede elétrica: atratividade para o consumidor final e possíveis impactos no sistema elétrico.** 2013. Retirado de:
http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/963/1/TD_1812.pdf. Acesso em 20 de abr. 2017 às 18:43.

CANALES, A. F.; BELUCO, A.; MENDES, C. A. B.; **Usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil e no mundo: aplicação e perspectivas.** Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental. Santa Maria, 2015.

CASTRO, R., **Energias Renováveis e Produção Descentralizada: Introdução a energia Fotovoltaica.** IBT, 2008.

CERVAN, A. P. B., **Sistema De Deteccion De Fallas Para Una Bomba Centrifuga.** Trabalho de Conclusão de Curso- PontificiaUniversidadCatolica Del Peru. Lima, 2013.

COSTA, A. S. **Turbinas hidráulicas e condutos forçados.** Universidade Federal de Santa Catarina. Grupo de Sistemas de Potência. Departamento de Engenharia Elétrica. 2003.

COSTA, T.M.G.; SOUZA, M.E. M.; SILVA, S.R.; **Uma Discussão quanto a Inserção de Sistemas Fotovoltaicos em Redes Elétricas–Um Estudo de Caso.** Simpósio Brasileiro de Energia Elétrica. Foz do Iguaçu–PR, 2014.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA ELÉTRICA. **Revista de distribuição dirigida da Companhia Paranaense de Energia Elétrica, COPEL, Edição 299.** Disponível em:<<http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2Fdocs%2FB57635122BA32D4B03257B630044F656>> Acesso em 12 de set. de 2017.

Centro de pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL); Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sergio de Salvo Brito (CRESESB); Grupo de Trabalho de Energia Solar (GTES). **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL- CRESESB, 2014.

COUTO, J.R.C., **Armazenamento de energia**. Dissertação (Mestrado)-Universidade do Porto. Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, 2012.

CUNHA, A.P.P; **Ambiente**. Editora Garamond. 2007. Retirado de: <https://books.google.com.br/books?id=bENVLMpg2j8C&pg=PA160&dq=%C3%A1gua+energia+potencial&hl=pt-BR&sa=X&ved=0ahUKEwjpxevi6onVAhVHIpAKHcDjDmk4ChDoAQg9MAU#v=onepage&q=%C3%A1gua%20energia%20potencial&f=false>.

DA SILVA, B. F. G., **Estudo de soluções alternativas de armazenamento de energia para diferentes horizontes temporais**. Tese (Doutorado)-Universidade do Porto. Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, 2008.

ELBATRAN, A.H.; YAAKOB, O. B.; AHMED, Y. M.; SHABARA, H. M. **Operation, performance and economic analysis of flow head micro-hydropower turbines for rural and remote areas: a review**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 43, 2014.

ELY, F.; SWART, J.W.; **Energia solar de terceira geração**. O setor elétrico, IEEE.

FARRET, F. A., **Aproveitamento de Pequenas Fontes de Energia Elétrica**. Editora da Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 1999.

FITZGERALD, A.E.; KINGSLEY, C.J.; KUSKO, A. **Máquinas elétricas**. Editora McGraw-Hill. 1ª Edição, Rio de Janeiro, 1975.

GONÇALVES, O. L. S. ; PEREIRA, F. F.; **Dimensionamento de Inversores para Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica: Estudo de Caso do Sistema de Tubarão - SC**. *Revista Brasileira de Energia*, v. 14, n. 1, p. 25-45, 2008.

GOUVEA, M. M. R., **Estudo De Confiabilidade em Bombas Centrífugas**. Trabalho de Conclusão de Curso- Universidade São Francisco. Campinas, 2008.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **INPE aprimora dados para melhor uso da energia solar no Brasil**. 2017. Retirado de: <http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod_Noticia=4486>. Acesso em 20 de abr. 2017 às 18:43.

IORRA, P. R. Q. **Análise do Potencial da Microgeração Hidroelétrica Predial**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013.

JANNUZZI, M. G.; VARELLA, F. K.; GOMES, R. D. M., Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica no Brasil: panorama da atual legislação. **International Energy Initiative para an América Latina (IEI-LA) e Universidade Estadual de Campinas (Unicamp)**, 2009.

KOCK, J., **Micro Central Hidrelétrica com Turbina Hidrocinética**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2014.

LOPES, J. **Estratégias de Gerenciamento de Potência em Ônibus de Transporte Urbano Elétrico Híbrido Série**. Tese (Mestrado)-Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, 2008.

LOPES, R., **Comissionamento de Turbinas Hidráulicas: Ensaio de Faixa Operativa, Índice Test e Rejeição de Carga**. Trabalho de Conclusão de Curso- Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, 2011.

MACINTYRE, A. J., **Bombas e Instalações de Bombeamento**. LTC-Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 2ª Edição. Rio de Janeiro, 1997.

MACINTYRE, A. J., **Máquinas Motrizes Hidráulicas**. Editora Guanabara dois S.A. 1ª edição. Rio de Janeiro, 1983.

MAIA, T. A. C.; **Projeto e construção de um gerador a ímãs permanentes de fluxo axial para turbina eólica de pequena potência**. Dissertação (Doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.

MANRIQUE, A. K. R.; **Diretrizes para a Sustentabilidade de uma Minirrede de Sistemas Solares Fotovoltaicos em uma Região Isolada da Colômbia**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Programa de Pós-

Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, 2015;

MARTIGNONI, A., **Máquinas Elétricas de Corrente Contínua**. Editora Globo. 3ª Edição. Porto Alegre, 1977.

MATAIX, C., **MECANICA DE FLUIDOS Y MAQUINAS HIDRAULICAS**. Ediciones Del Castillo. 2ª edição. Madrid, 1986.

MEDEIROS, N. A. C., Ferreira, J. R. da R. P. **Sistema de observação e análise para parques fotovoltaicos**. Tese (Mestrado)- Universidade do Porto. Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, 2012.

MELENDÉZ, T. A. F., **Avaliação de Sistemas Voltaicos de Armazenamento**. Tese(Mestrado)- Universidade de São Paulo. Programa de Pós-Graduação em Energia. São Paulo, 2009.

MELLO, A. G. J.; **A Turbina de Fluxo Cruzado (Michell - Banki) Como Opção Para Centrais Hidráulicas de Pequeno Porte**. Dissertação(Doutorado) - Universidade de São Paulo. Programa Interunidade de Pós Graduação em Energia. São Paulo, 2000.

MERRITT, B. T.; DREIFUERST, G. R.; POST, R. F.; The RegentsOf The UniversityOfCalifornia. **Halbach array DC motor/generator**. US 5705902 A. 3 fev. 1995, 6 jan. 1998.

MIERZWA, J.C., HESPANHOL, I. **Água na indústria: uso racional e reúso**. São Paulo, 2002.

MONACHESI, Marcelo G.; **Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento**; pp. 63-80, Junho, 2005.

MORAIS, L. C.; **Estudo sobre o panorama da energia elétrica no Brasil e tendências futuras**. Tese (Mestrado)- Universidade Estadual Paulista. São Paulo. Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, 2015.

MOREIRA, D. F. S., **Implementação de Microgeração no Sector Residencial**. Tese(Mestrado)-Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2010.

MOREIRA, I. S., **Sistemas Hidráulicos Industriais**. Senai- SP Editora. 2ª edição. São Paulo, 2012.

OLIVEIRA, A. F. M., **Recuperação de Energia Hidráulica em Sistemas de Distribuição de Água**. Tese (Mestrado)-Universidade do Porto. Porto, 2008.

PEREIRA, E. B; MARTINS F. R; GONÇALVES, A. R.; COSTA R. S.; LIMA, F. J. L; RÜTHER, R.; ABREU, S.L; TIEPOLO, G.M; PEREIRA, S.V e SOUZA, J.G. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. INPE 2017

PIRES, I. F., **Otimização de um sistema hidroelétrico com reservatórios em cascata e bombagem**. Tese(Mestrado)- Instituto Politécnico de Bragança. Bragança, 2014.

PEREIRA, B. S. A., **Modelagem Matemática Para Otimização de um Potencial Hidráulico Utilizando Turbinas Francis e Kaplan**. Tese(Mestrado)- Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, 2015.

POSTALI, F. B. **Estratégia de Controle de Máquinas Elétricas Utilizando a Teoria Não-Falseada**. Tese(Mestrado)- Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Cornélio Procópio, 2012.

RAMOS, R. A. V., SILVA, D. B. C.; **Máquinas Hidráulicas e Térmicas**.Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, 2009.

RICARDO, G.; MACHADO, I.C.L.; ZEM, V.R.H.; **Estudo da complementariedade entre as fontes eólica e solar fotovoltaica na matriz elétrica do estado do Paraná**. Trabalho de Conclusão de Curso- Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.

ROBIN G.; RUELLAN M.; MULTON B.; BEN AHMED H.; **Solutions de stockage de l'énergiepourlessystèmes de productionintermittente d'électricitérenouvelable** IRISA - Institut de Recherche em Informatique et Systèmes Aléatoires, 2003.

RODRIGUES, W., **Critérios para o Uso Eficiente de Inversores de Frequência em Sistemas de Bombeamento de Água**. Tese (Doutorado)- faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2007.

RUIZ, M. P.O., **Modelagem preliminar de um Sistema Híbrido Solar/Biomassa com Acumulação Hidráulica: Estudo de caso de uma Comunidade Isolada.** Tese (Mestrado)-Universidade Federal de Itajubá. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Itajubá, 2013.

SANTOS, F. F., **Utilização de Energia Fotovoltaica para a eficiência energética de uma moradia.** Tese (Mestrado)-Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Portugal, 2011.

SILVA, C. J. N. **Caracterização de um Conjunto Didático para Ensaio de Motor de Corrente Contínua.** Trabalho de Conclusão de Curso- Universidade São Francisco. Itatiba, 2012.

SILVA, E. P. **Estudo da Viabilidade do Uso de Energia Solar Fotovoltaica no Carregamento de Baterias para Fins Diversos.** Trabalho de Conclusão de Curso de Pós-Graduação- Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2010.

SILVA, R. J., **Dimensionamento de um Sistema Fotovoltaico para Atender uma Demanda de Iluminação.** Trabalho de Conclusão de Curso- Universidade Estadual de Londrina. Londrina, 2014.

SIRINO, T., **Estudo Numérico Da Influência Da Viscosidade No Desempenho De Uma Bomba Centrífuga Submersa.** Tese(Mestrado)- Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

SOSNOSKI, A. S. K. B., **Produção de Energia por Mini e Micro Hidrelétricas na Rede de Distribuição de Água.** Tese(Mestrado)- Universidade de São Paulo. São Paulo, 2015.

SOUSA, M. L. A, **Uso De Bombeamento Fotovoltaico Para Irrigação De Unidades De Produção Agrícola De Pequeno Porte.** Trabalho de Conclusão de Curso-Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2014.

SOUZA, J. C., **Desenvolvimento de aplicativo de análise técnica e econômica para adaptação de uma roda d'água acionada por cima para geração de energia elétrica no meio rural.**Trabalho de Conclusão de Curso- Universidade Estadual de Paulista-UNESP. Guaratinguetá, 2011.

STAFFELL, I.; BRETT, D. J. L.; BRANDON, N. P.; HAWKES, A. D.; **Domestic Microgeneration: Renewable and Distributed Energy Technologies, Policies and Economics.** Routledge, 1ª edição. New York, 2015

STINSON, C.W.; BUTLER, R.; WINNET, R.; **Guide to Solar - Powered water pumping systems in New York State.** Nysesda, 2003.

TANCREDI, M.; ABBUD, O. A. **Por que o Brasil está trocando as hidrelétricas e seus reservatórios por energia mais cara e poluente?**2013. Retirado de: http://www2.senado.leg.br/bdsf/bitstream/handle/id/496199/TD128-MarcioTancredi_OmarAbbud.pdf?sequence=1. Acesso em 30 de abr. 2017 às 19:00.

TIEPOLO, G.M; JUNIOR, J.U.; PEREIRA, E.B.; PEREIRA, S.V.; ALVES, A.R.; **"Comparação do potencial fotovoltaico do Paraná com outros estados e Europa"**. VI Congresso de Energia Solar, Belo Horizonte, 2016.

TIEPOLO, G.M; JUNIOR, O.C.; JUNIOR, J.U; **"Estudo do potencial de participação das fontes renováveis de energia na matriz elétrica do estado do Paraná"**, 2014. IX Congresso brasileiro de planejamento energético.

TOLMASQUIM, M. T.; GUERREIRO, A.; GORINI, R.; **Matriz energética brasileira: uma prospectiva.** Novos estud. - CEBRAP, São Paulo, n. 79, p. 47-69, Nov. 2007. Retirado de: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010133002007000300003&lng=en&nrm=iso. Acesso em 16 mai. 2017 às 21:45.

URBANETZ, J.; **Sistemas fotovoltaicos conectados a redes de distribuição urbanas: usa influência na qualidade de energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade.** Tese de doutorado – UFSC, Florianópolis Santa Catarina, 2010.

VASCONCELOS MIRANDA, A.M., **Tecnologias de armazenamento de energia - Identificação do potencial e aplicações.** Dissertação (Mestrado)-Universidade do Porto. Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, 2011.

VIANA, F. M. M. C. **Optimização de configuração de um projecto tipo para microgeração fotovoltaica.** Dissertação (Mestrado)-Universidade do Porto. Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, 2008.

VILLALVA, Marcelo G.; GAZOLI, Jonas R. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações.** São Paulo: Érica, 2012.

YAN, L.; ZHANG, L.; PENG, J.; JIAO, Z.; **Electromagnetic Linear Machines with Dual Halbach Array: Design and Analysis**. Springer. 2016. ISBN: 9811023093

YAN, L.; Zhang, L.; Wang, T.; Jiao, Z.; Chen, C.; Chen, M.; **Magnetic Field of Tubular Linear Machines with Dual Halbach Array**. Progress In Electromagnetics Research, Vol. 136, 283–299. 2013

ZHAO, W., **Design Optimization of a Linear Generator with Dual Halbach Array for Human Motion Energy Harvesting**. Tese(Mestrado)- Universidade de Nebraska. Lincoln, 2015.