



**Universidade Federal de Campina Grande**  
**Centro de Engenharia Elétrica e Informática**  
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Tallys Lins Almeida Barbosa

**RELATÓRIO DE ESTÁGIO**

Campina Grande, Paraíba  
Outubro de 2016

Tallys Lins Almeida Barbosa

## RELATÓRIO DE ESTÁGIO

*Trabalho de Conclusão de Curso  
submetido à Unidade Acadêmica de  
Engenharia Elétrica da Universidade  
Federal de Campina Grande como  
parte dos requisitos necessários para  
a obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Orientador:

Professor Dr. Montiê Alves Vitorino

Campina Grande, Paraíba  
Outubro de 2016

Tallys Lins Almeida Barbosa

## RELATÓRIO DE ESTÁGIO

*Trabalho de Conclusão de Curso  
submetido à Unidade Acadêmica de  
Engenharia Elétrica da Universidade  
Federal de Campina Grande como  
parte dos requisitos necessários para  
a obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Aprovado em     /     /

**Professor Avaliador**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador

**Professor Dr. Montiê Alves Vitorino**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Orientador, UFCG

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força e coragem durante toda esta longa caminhada.

Aos meus pais, **José Lins** e **Rosimeire Almeida**, pelas inúmeras demonstrações de amor e compreensão, sendo eles os meus alicerces para me tornar tudo aquilo que sou hoje. Por terem educado a mim e aos meus irmãos em um ambiente de carinho, colocando-nos a certeza de que apenas nós podemos escrever nosso próprio destino.

Aos meus irmãos, **Tellys Lins**, **Tarcyó Lins**, **Thayse Lins** e **Tullyo Lins** pelos incentivos em todas as horas, mostrando sempre a força de uma família unida na busca de superar desafios. Tenho orgulho de fazer parte dessa grande e apaixonante família que a cada dia me surpreende com sua vontade de vencer e superar desafios.

A minha namorada, **Rebeca Melo** por ter estado comigo lado a lado nas muitas dificuldades dessa jornada, sempre com palavras de força e carinho.

Aos meus avós, **Aristófanés Almeida** e **Maria Almeida**, em especial a minha avó, por me surpreender em um dos momentos mais difíceis, representando para mim símbolo de uma mulher guerreira e apaixonante.

Aos professores, **Gutemberg Gonçalves** pela determinação e empenho que sempre demonstrou na tentativa de solucionar meus questionamentos, e em especial ao meu orientador **Montiê Alves**, onde não mediu esforços para que eu conseguisse êxito de terminar esse estágio.

E aos meus **amigos e colegas** que sempre estiveram ao meu lado nessa longa trajetória, dando-me a certeza de que a nossa amizade não é apenas passageira, mas para toda uma vida.

Quem estuda e não pratica o  
que aprendeu, é como o homem  
que lava e não semeia.

Provérbio Árabe

## RESUMO

O presente trabalho foi desenvolvido durante a atividade de Estágio Supervisionado, realizado no Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamento de Máquinas (LEIAM), que pertence ao Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da Universidade Federal de Campina Grande. O período de realização deste trabalho foi do dia 22/07/2016 ao dia 23/09/2016 totalizando assim 182 horas de atividades. O trabalho consistiu em estudar a utilização da energia solar fotovoltaica em aplicações de bombeamento de água com o objetivo de realizar manobras em um sistema de bombeamento fotovoltaico com motor de indução e sem baterias, presente na bancada *Sistema de Bombeamento para Ensaios*. Foi desenvolvido ainda uma melhoria no acervo documental, bem como no emulador do sistema fotovoltaico que se encontra disponível no LEIAM, inserindo melhorias no 'de controle, bem como no *hardware*.

**Palavras-chave:** LEIAM, sistema de bombeamento, energia solar fotovoltaica.

## ABSTRACT

This work was developed during supervised training activity held in the Industrial Electronics Laboratory and Machine drive (read), which belongs to the Department of Electrical Engineering (DEE), Federal University of Campina Grande. The period of this work was the day 07/22/2016 to 09/23/2016 days totaling 182 hours of activities. The work was to study the use of photovoltaic water pumping applications in order to perform maneuvers on a photovoltaic pumping system with induction motor and without batteries, on the countertop this pumping system for testing. It was also developed an improvement in the document collection, as well as the photovoltaic system emulator which is available in read, inserting improvements in the control *software* as well as *hardware*.

**Keywords:** LEIAM, Pumping System, photovoltaic solar energy.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sistema de bombeamento Fotovoltaico. ....	13
Figura 2: (a) Curva I-V típica de um painel fotovoltaico. (b) Curva P-V típica de um painel fotovoltaico. ....	15
Figura 3: Gerador fotovoltaico conectado a uma carga através de um conversor. ....	17
Figura 4: Conversor push-pull alimentado em corrente. ....	18
Figura 5: Inversor trifásico tipo fonte de tensão. ....	19
Figura 6: Curvas de torque por velocidade retórica para diferentes frequências de alimentação do estator para um motor de quatro polos. ....	21
Figura 7: Curva para controle V/f. ....	22
Figura 8: Curva de torque por frequência de alimentação estatórica. ....	22
Figura 9: Curva de potência mecânica por frequência de alimentação estatórica. ....	23
Figura 10: Partes da bomba centrífuga. ....	24
Figura 11: Processador digital de sinais (TMS320F28335). ....	26
Figura 12: Sistema de Bombeamento para Ensaios. ....	27
Figura 13: Representação do sistema de bombeamento fotovoltaico com sistema hidráulico. ....	27
Figura 14: Circuito hidráulico. ....	28
Figura 15: Esquema hidráulico do sistema de bombeamento. ....	29
Figura 16: Componentes do sistema hidráulico. ....	30
Figura 17: <i>Layout</i> 3D do sistema de bombeamento para ensaios. ....	31
Figura 18: Vista frontal do sistema de bombeamento para ensaios. ....	31
Figura 19: Vistas laterais do sistema de bombeamento para ensaios. ....	32
Figura 20: Vista frontal 2D do sistema de bombeamento para ensaios. ....	32



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>9</b>
1.1 OBJETIVOS	10
1.2 LABORATÓRIO DE ELETRÔNICA INDUSTRIAL E ACIONAMENTO DE MÁQUINAS – LEIAM	10
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>11</b>
2.1 SISTEMAS DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA	11
2.2 SISTEMAS DE BOMBEAMENTO	12
2.3 SISTEMA DE BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO	12
2.3.1 Gerador Fotovoltaico	13
2.3.2 Conversor CC-CC	16
2.3.2.1 Conversor Elevador CC-CC	16
2.3.3 Inversor	18
2.3.4 Motor de Indução	20
2.3.5 Bomba centrífuga	23
2.3.5.1 Partes da Bomba	24
2.3.5.2 Princípios de Funcionamento	25
2.4 DSP	25
<b>3. ATIVIDADES DESENVOLVIDAS</b>	<b>26</b>
3.1 ESQUEMA DO SISTEMA HIDRÁULICO	29
3.2 LAYOUT 3D	30
3.3 OPERAÇÃO DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO	33
<b>4. CONCLUSÃO</b>	<b>34</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>35</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O sistema de geração de energia elétrica tem se tornado um problema global devido à dificuldade no atendimento dos consumidores em detrimento à poluição gerada pela maioria das fontes de energia. A questão ambiental é cada vez mais evidente. Estudos mostram, por exemplo, que o consumo de energia mundial vem seguindo o nível de concentração de dióxido de carbono na atmosfera e com ele o crescente índices de problemas respiratórios.

A energia renovável é aquela que provém de meios naturais e inesgotáveis, a exemplo da energia hidráulica, eólica e solar.

No Brasil, a maior parte da energia produzida em seu território é proveniente das usinas hidrelétricas. Apesar de ser dita como uma forma de geração de energia renovável, é constante críticas ao seu uso, pois a exemplo de sua construção, uma usina hidrelétrica é capaz de alagar uma área bastante vasta, ocasionando uma grande degradação ambiental.

Atualmente a energia fotovoltaica é dita como uma das formas de energia com mais capacidade de expansão, devido a sua enorme potência disponível do sol, baixa poluição e pouco ruído na conversão de energia (BHATNAGAR e NEMA, 2013). Por ter uma ótima posição geográfica, ao está territorialmente entre as linhas de capricórnio e equador, o Brasil é um país que possui grande área com radiação solar incidente, o que vem atraindo grande interesse em pesquisas científicas, sejam elas no meio acadêmico ou industrial.

Vale salientar que esse tipo de energia tem sido bastante utilizado em lugares remotos e com difícil acesso às linhas de transmissão, pois sua instalação em pequena escala não requer grandes investimentos. Contudo, a baixa eficiência dos painéis fotovoltaicos gera uma enorme dificuldade para se ter um bom controle do sistema de geração. Devido a essa preocupação, já existe um grande interesse em se criar estratégias de controle aplicadas aos sistemas de geração fotovoltaica.

Como cita (SANTOS, 2016), o controle da geração fotovoltaica empregada para o acionamento de um motor de indução acoplado em um sistema de bombeamento de água é uma ótima aplicação da energia elétrica

fotovoltaica isolada, e sua otimização se torna bastante interessante, no ponto de vista acadêmico.

### 1.1. OBJETIVOS

O presente trabalho tem por objetivo estudar a utilização da energia solar fotovoltaica em aplicações de bombeamento de água a fim de realizar manobras em um sistema de bombeamento fotovoltaico com motor de indução trifásico e sem baterias, presente em uma das bancadas experimentais do laboratório. Desenvolver melhorias no acervo documental, bem como a atualização do emulador de sistemas fotovoltaico que se encontra disponível no LEIAM, inserindo melhorias no *software* de controle, bem como no *hardware*.

As atividades foram realizadas no período de 22/07/2016 a 23/09/2015 (tempo total de nove semanas) e foram divididas nos seguintes blocos:

- Avaliação da bancada (1 semana)
- Revisão bibliográfica (1 semanas)
- Documentação em forma de esquemáticos do Esquema Hidráulico e de *Layouts* 3D (4 semanas)
- Acionamento e melhorias no *hardware* e *software* do sistema (2 semanas)
- Escrita do relatório (1 semana)

### 1.2. LABORATÓRIO DE ELETRÔNICA INDUSTRIAL E ACIONAMENTO DE MÁQUINAS – LEIAM

O Estágio Supervisionado foi realizado no Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamento de Máquinas (LEIAM) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), na sala de Sistemas Fotovoltaicos. O LEIAM é um laboratório voltado para a pesquisa e desenvolvimento nas áreas de pesquisa de qualidade de energia, fontes alternativas de energia e acionamento e controle de máquinas elétricas. Conta para isso com a colaboração de professores e alunos de graduação e pós-graduação.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. SISTEMAS DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Devido a suas dimensões, o Brasil ainda apresenta inúmeras comunidades sem acesso à luz elétrica. E por estarem em lugares distantes dos grandes centros urbanos, os sistemas fotovoltaicos empregados são, na maioria das vezes, sistemas fotovoltaicos autônomos de pequena potência destinados principalmente, à iluminação, refrigeração e bombeamento de água.

A caracterização dos sistemas fotovoltaicos isolados se dá por possuírem como fonte apenas os painéis solares associadas a reguladores de tensão, o que na maioria de suas aplicações se faz necessário o uso de bancos de baterias de forma a garantir o fornecimento de energia durante a noite ou em períodos com baixa incidência solar.

Porém, como se sabe, a maioria dos equipamentos domésticos advém de uma energização por tensão alternada, fazendo surgir a necessidade de dois outros elementos em sua instalação: o conversor elevador; e um inversor, responsáveis pela elevação e conversão em sinal alternado do nível CC gerado nos painéis.

Com baixa eficiência dos painéis fotovoltaicos e a instabilidade das mudanças de potência gerada, esta última, devido as variações atmosféricas ou pela mudança carga, gera uma grande dificuldade para se ter um bom controle do sistema de geração. Por isso, visando aumentar a eficiência do sistema é necessário garantir que este sempre opere, com o maior tempo possível, no ponto de máxima potência dos painéis.

Tendo por objetivo, garantir o funcionamento dos módulos fotovoltaicos no ponto de máxima potência (MPP), mesmo com as variações tempestivas, utiliza-se algoritmos de busca como técnica de procura contínua do ponto de máxima potência. Esses algoritmos de controle são conhecidos como MPPT (*maximum power point tracking*), garantindo que o gerador fotovoltaico forneça a máxima potência ao sistema independentemente da carga ou de condições climáticas.

## 2.2. SISTEMAS DE BOMBEAMENTO

O objetivo do sistema de bombeamento é coletar a água de reservatório inferior, ou reservatório de sucção, e transportá-la até o reservatório superior, ou reservatório de recalque. A função da bomba é fornecer a energia cinética ao líquido, vencendo as resistências do encanamento, seus acessórios e desníveis entre os reservatórios. A classificação dos sistemas de bombeamento se dará mediante as formas com as quais a bomba é acionada, sejam elas eólicas, manuais ou elétricas.

A utilização de cata-vento como fonte de energia e captação de água é uma prática hoje em dia muito empregada. Contudo, esta solução se mostra inviável em algumas localidades, uma vez que para se aplicar esta solução se deve ter condições permanentes de conduções do vento.

O acionamento das bombas por motores elétricos a partir da rede elétrica é a forma mais aplicável, devido a facilidade de instalação e manutenção do sistema bomba-motor. Porém, vale salientar que em bolsões populacionais onde a energia elétrica ainda não se faz presente, uma forma alternativa é a implantação do sistema de bombeamento fotovoltaico, que se utiliza de painéis solares como forma de geração de energia para o sistema de bombeamento.

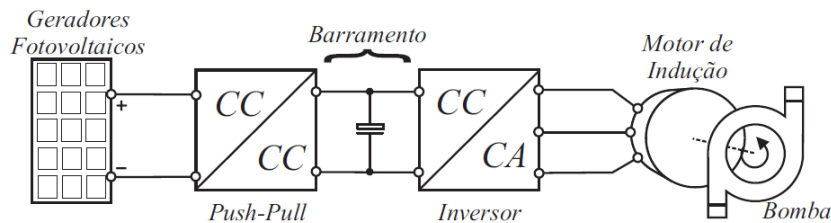
## 2.3. SISTEMA DE BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO

A configuração do sistema de bombeamento fotovoltaico usada no projeto desenvolvido não utiliza o sistema de baterias. Na prática, os dispositivos necessários para a funcionamento da energia fotovoltaica no bombeamento são os geradores fotovoltaicos, conversor CC/CC com característica elevadora, conversor CC/CA, motor de indução; e bomba centrífuga.

Os painéis solares, chamados também de geradores fotovoltaicos, tem a função de converter a energia luminosa incidente sobre ele em energia elétrica, efeito chamado de fotoelétrico. O conversor CC/CC possui dois objetivos no sistema fotovoltaico. Um de manter o gerador fotovoltaico operando sempre no ponto de máxima potência e a outro de garantir que a tensão de saída seja suficientemente elevada de tal forma que o conversor CC/CA, inversor, converta

a tensão CC do barramento em uma tensão CA compatível com o acionamento do motor de indução, que por sua vez está acoplado a uma bomba centrífuga, responsável por bombeamento da água entre reservatórios.

Figura 1: Sistema de bombeamento Fotovoltaico.



Fonte: VITORINO, M. A. *Sistema de bombeamento fotovoltaico com motor de indução e sem baterias*. 2008.

### 2.3.1. Gerador Fotovoltaico

Um painel fotovoltaico é composto por alguns conjuntos de células fotovoltaicas, na qual cada uma delas tem capacidade de gerar potência entre 1 e 2W, correspondente a uma tensão de 0,5 V e uma corrente entre 2 e 4A. De forma para que se tenha níveis maiores de tensão e corrente, faz-se necessária a associação de várias células, através de ligações série e paralelo, formando os painéis fotovoltaicos.

Verifica-se, portanto, que o número de células em um modulo fotovoltaico é determinado pelas necessidades de tensão e corrente da carga que se deseja energizar. De maneira geral, um painel fotovoltaico é constituído por cerca de 33 a 36 células ligadas em série, resultando em tensão suficiente para alimentar, por exemplo uma bateria de 12V.

Segundo a análise proposta por *Gow e Manning (2016)*, a corrente fornecida a partir um modulo fotovoltaico pode ser descrita conforme:

$$I = n_p \left[ I_L - I_s \left[ e^{\frac{q \left( \frac{V}{n_s} + I \frac{n_s}{n_p} \right)}{nkT}} - 1 \right] - \frac{V + I \frac{R_s}{n_p}}{R_p} \right] \quad (1)$$

Onde,

$n_s$ : número de células conectadas em série do painel fotovoltaico.

$n_p$ : número de células conectadas em paralelo do painel fotovoltaico

Os principais parâmetros de um módulo solar fornecidos pelos fabricantes, considerando a condição padrão de teste (“standard test condition” ou STC), definida pela norma IEC 61215: 1000 W/m<sup>2</sup> de potência luminosa incidente total, com uma distribuição espectral conhecida como massa de ar 1.5 (“air mass” 1.5 ou AM 1.5) e temperatura das células de 25 °C, são descritos:

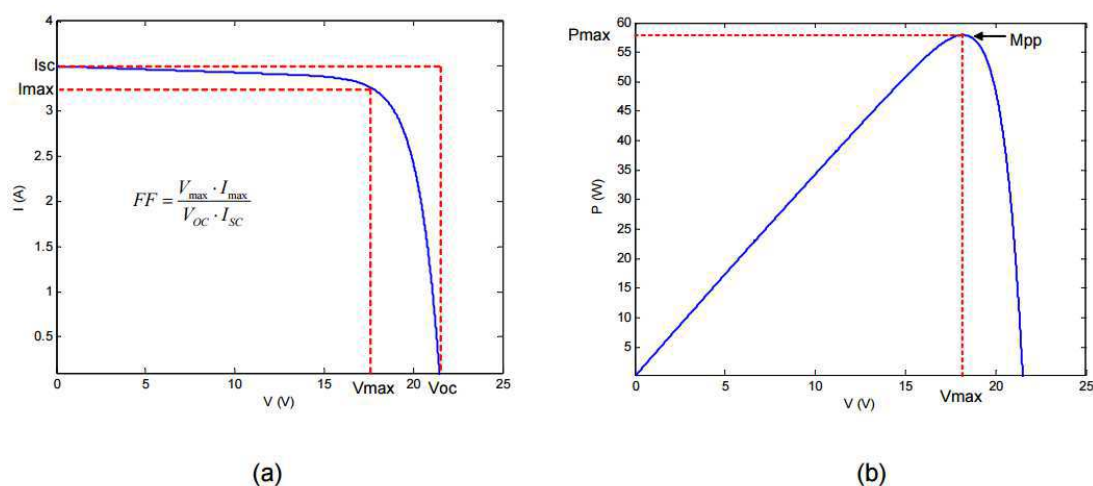
- **Corrente de curto-circuito** ( $I_{SC}$ ): Valor de corrente máxima, na qual a corrente da carga é igual a corrente fornecida pelo gerador fotovoltaico.
- **Tensão de circuito aberto** ( $I_{OC}$ ): Valor máximo da tensão nos terminais do módulo fotovoltaico, quando nenhuma carga está conectada a ele.
- **Ponto de Máxima Potência** (MPP): Ponto da curva  $I$ - $V$ , sob efeito de dada condição climática, em que a potência fornecida a carga pelo gerador fotovoltaico é tida como máxima, com valores de tensão e corrente máximos.
- **Tensão de máxima potência** ( $V_{max}$ ): Tensão no ponto de máxima potência.
- **Corrente de máxima potência** ( $I_{max}$ ): Corrente no ponto de máxima potência.
- **Temperatura normal de operação** (NOCT): Temperatura de operação nominal da célula fotovoltaica (*normal operating cell temperature*), medida com 800 W/m<sup>2</sup> de potência luminosa incidente total, temperatura ambiente de 20 °C e vento de 1m/s.
- **Fator de forma** (FF): Relação entre a potência no MPP e o produto da corrente de curto-circuito vezes a tensão de circuito aberto.

Sobre cada ponto da curva  $I$ - $V$  que define o funcionamento do módulo fotovoltaico, o produto corrente versus tensão representa a potência produzida para aquela condição de operação. Como se sabe, para cada condição climática, só existe um ponto na curva  $I$ - $V$  onde a potência máxima pode ser alcançada. Este ponto corresponde ao produto em que a tensão e corrente serão de

potência máxima.

Como ilustração são mostradas as curvas características de  $I$ - $V$  e  $P$ - $V$  nas figuras 2.5(a) e 2.5(b), respectivamente, para um gerador fotovoltaico, sob as condições padrão de testes. Verifica-se que o ponto de corrente máxima é dado pela própria corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ). Porém, neste ponto a potência fornecida é zero, uma vez que a tensão nos terminais do gerador também será zero. Do mesmo modo, o valor máximo de tensão ocorre em circuito aberto ( $V_{oc}$ ), o que gera uma corrente nula, e por consequência a potência também.

Figura 2: (a) Curva  $I$ - $V$  típica de um painel fotovoltaico. (b) Curva  $P$ - $V$  típica de um painel fotovoltaico.



Fonte: SEGUEL, J. I. L. *Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital*. 2009.

Os valores de FF para células fotovoltaicas comerciais ficam entre 70 e 80%, e representam o quanto a curva característica se aproxima de um retângulo no diagrama  $I$ - $V$ .

Observando as características das curvas  $P$ - $V$  e  $I$ - $V$  no sentido da tensão crescente, ver-se que potência e tensão fornecida pelo gerador têm o comportamento quase que linear, com a corrente praticamente constante ponto de máxima potência (MPP), que a tensão e corrente são máximas. Após esse ponto a corrente tende a diminuir exponencialmente, fazendo que a potência diminua rapidamente, cabendo ao modulo um comportando de uma fonte de tensão.



### 2.3.2. Conversor CC-CC

Os conversores têm por função adequar a potência elétrica disponível no sistema fotovoltaico em determinados níveis desejáveis a carga que se deseja energizar. Isso se dá mediante a estratégias de comando para abertura e fechamento das chaves semicondutoras de potência, capazes de elevar ou abaixar um determinado nível de tensão ou corrente contínua, ou mesmo de transformar uma tensão alternada em contínua ou uma tensão contínua em alternada com a amplitude e frequência desejadas.

Nas aplicações mais comuns, os sistemas fotovoltaicos utilizam apenas dois tipos de conversores: conversores CC/CC e os conversores CC/CA. Como este trabalho considera apenas a adequação da potência fornecida pelo arranjo fotovoltaico diretamente a carga, serão apresentadas apenas as descrições dos conversores CC/CC e CC/A no processo de conversão, desconsiderando o controle de carregamento do banco de baterias pelo barramento CC/CC.

Quanto aos modos de operação os conversores podem ser de modo tensão ou modo corrente. No primeiro, a variável a ser controlada é a tensão de saída do conversor, operando este como uma fonte de tensão. Já no modo corrente o controle se dá pela corrente de saída, se comportando como uma fonte de corrente equivalente.

Como já discutido, os conversores CC/CC têm por função ajustar os níveis de tensão e corrente de entrada e ajustar a um outro valor de tensão ou de corrente contínua nos terminais de saída de acordo com as exigências do sistema. As suas topologias os conversores CC/CC podem ser classificados quanto a relação entre a tensão de saída e de entrada: o conversor abaixador de tensão, denominado como *Step-down* ou *Buck*; o conversor elevador de tensão, também conhecido como *Step-up* ou *Boost*; e o conversor abaixador-elevador ou “Buck-Boost.

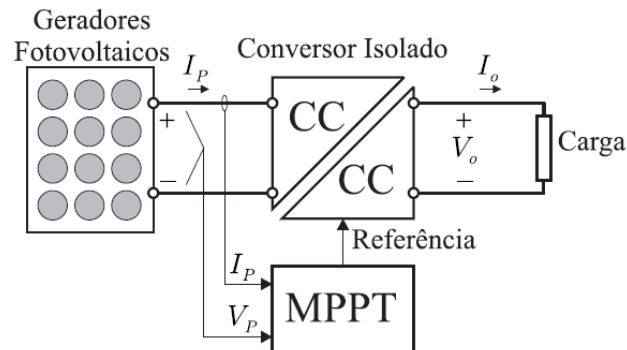
#### 2.3.2.1 Conversor Elevador CC-CC

Como a saída dos geradores fotovoltaicos apresentam uma baixa tensão, a utilização de um conversor CC/CC se torna indispensável, a fim de este gere

uma então suficientemente alta para a energização da carga. Graças a isso é possível dizer que há um barateamento nos custos de instalação do sistema, uma vez que se evita a associação em série de painéis para se elevar a tensão de saída.

Como visto na seção 2.3.1, o ponto de operação de um sistema fotovoltaico é diretamente dependente da curva  $I \times V$ , em que para se ter o MPP os valores que compõe esse ponto deveram ser máximos em tensão e corrente. Contudo, o que se sabe é que para cada carga inserida no sistema o ponto de operação deverá ser mudado, o que surge uma perspectiva de controle, uma vez que se deseja sempre manter o sistema operando com sua potência máxima. O conversor CC/CC tem, então, a função de controlar o ponto de operação mediante o controle de suas chaves semicondutoras, de forma que o sistema fotovoltaico sempre opere no máximo ponto de operação. Na figura 3 é mostrado uma ilustração desse sistema.

Figura 3: Gerador fotovoltaico conectado a uma carga através de um conversor CC-CC.



Fonte: VITORINO, M. A. *Sistema de bombeamento fotovoltaico com motor de indução e sem baterias*. 2008.

Para escolher qual topologia do conversor CC/CC se enquadra melhor no sistema fotovoltaico, leva-se em conta os parâmetros de segurança, redução de custos, dimensões, e isolamento galvânica (PIMENTEL; CAVALCANTE, 2011).

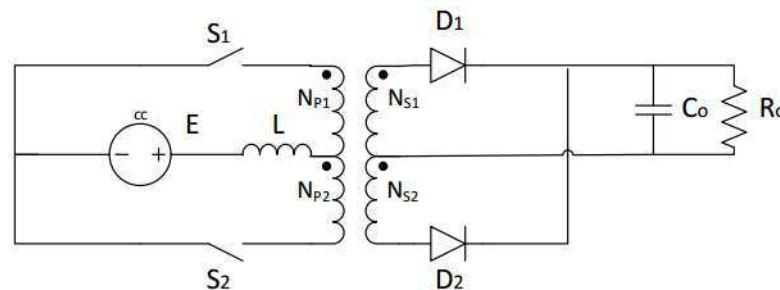
No que concerne à segurança, o conversor deve manter o isolamento elétrico entre a saída do conversor e a entrada em corrente contínua do gerador fotovoltaico. Para isso a solução na implementação pode ser feita de duas formas: a primeira, utilizando um conversor CC-CC isolado ou; a segunda com a adição de um transformador na saída CA do sistema.

No entanto, como o sistema deve operar em frequências relativamente altas as dimensões do transformador na saída CA, suas dimensões seriam maiores e um também maior. Logo, o conversor CC/CC isolado soluciona as necessidades propostas, além de ter um elevado ganho de tensão por possuir em sua estrutura, um transformador de alta frequência, o que reduz ainda mais suas dimensões.

Dentre as topologias de conversores CC/CC isolados, o conversor *push-pull* é o que melhor se adequa aos sistemas fotovoltaicos. É caracterizado como um conversor elevador, e possui em sua estrutura duas chaves de comutação para o controle da tensão de saída. Isto lhe permite baixo estresse de corrente, além de circuitos simples de disparo. Por possuir um único indutor na entrada, possibilita o processo de desligamento do conversor com a remoção da energia armazenada no indutor.

O conversor push-pull com entrada em corrente é incluído na categoria de conversor CC isolados. Esta topologia é representada na figura 4.

Figura 4: Conversor push-pull alimentado em corrente



Fonte: MENEZES, T. L. *Conversor push-pull alimentado em corrente aplicado a correção do fator de potência de fontes de alimentação*. 2016.

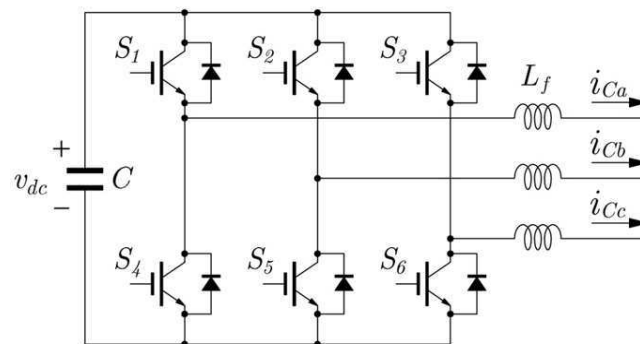
### 2.3.3. Inversor

Os inversores são responsáveis pela conversão dos níveis contínuos de tensão ou corrente em níveis alternados, apresentando simetria em amplitude, por isso também são conhecidos como Conversores CC/CA. Com relação a frequência os inversores esta pode ser classificados de frequência fixa ou variável, na qual sua escolha depende do tipo de carga que se deseja energizar.

Nesta aplicação, a operação se deu por inversores com frequência variável, pois se deseja o controle de velocidade de motores a partir das variações de frequência.

Os conversores CC/CA ainda são classificados quanto a natureza de inversão, podendo ser inversor de tensão ou inversores de corrente. Caso seja de tensão, o conversor possuirá em sua entrada uma fonte de tensão ou um capacitor de valor elevado que a substitui. Analogamente, os de corrente possuem em sua entrada uma fonte de corrente ou um indutor de valor elevado. Um exemplo de conversor de tensão mais comumente visto em controle de velocidade de motores de indução é visto na figura 5.

Figura 5: Inversor trifásico tipo fonte de tensão



Fonte: GONÇALVES, L. G. O. *Projeto de um inversor multiníveis híbrido para média tensão industrial*. 2011.

Operando em condições normais, o conversor deve fornecer uma tensão ou corrente com frequência, amplitude e forma bem definidas por algum sistema de controle. Uma vez que se tem uma tensão no lado CC, quando um interruptor da semiponte superior e outro da semiponte inferior, em que ambos não sejam do mesmo ramo, estiverem em condução, esta tensão CC da entrada será, então, refletida na saída alternada.

Como forma de evitar variações bruscas de corrente na saída do conversor CC/CA, são inseridos, geralmente, indutores como forma de limitar a corrente nas situações em que a tensão alternada da saída for diferente do valor contínuo da entrada.

Os diodos têm por função garantir ao circuito a característica de bidirecionalidade no sentido da corrente, necessária à correta operação do conversor.

#### 2.3.4. Motor de Indução

Os motores elétricos são responsáveis pela conversão de energia elétrica em energia mecânica, em especial os motores de indução usam para isso indução de corrente alternada em seu estator ao que irá induzir o rotor.

A forma de produção do conjugado mecânica do motor se dá pela defasagem em atraso do campo girante do rotor em relação ao campo girante de estator, onde ambos possuem a mesma velocidade síncrona. Com o atraso do campo girante do rotor evita-se que os condutores deste acompanhem a velocidade do campo girante do estator, pois, caso contrário, estariam em repouso em relação ao campo do estator, eliminando qualquer indução de corrente.

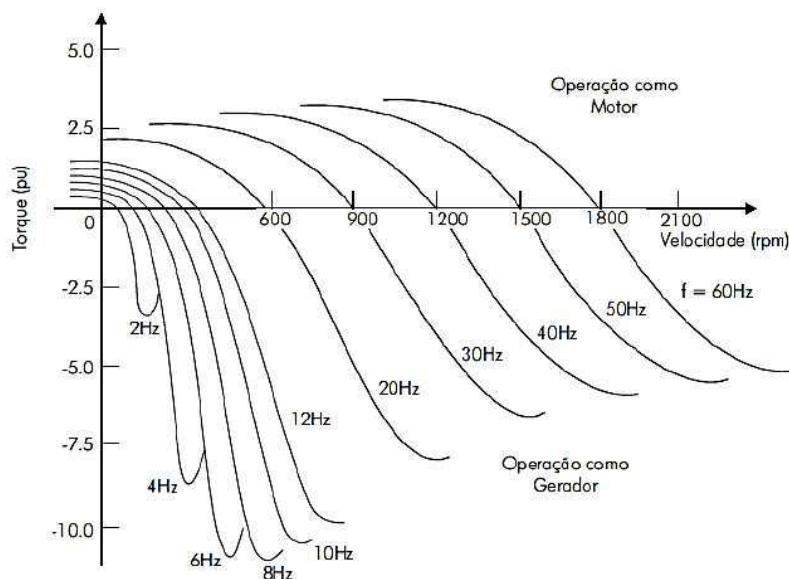
Conclui-se que o rotor do motor de indução sempre terá velocidade menor que a velocidade síncrona do campo do estator. A esta diferença de velocidade dar-se a definição de escorregamento, dado por (2):

$$\omega' = \omega_s - \omega_r \quad (2)$$

Como citado por *Stephan* (2013) ao considerar que a frequência de entrada nas bobinas do estator é mantida alta e a razão entre tensão e frequência de entrada é tida constante, a curva do conjugado mecânica só dependerá do escorregamento inerente a própria máquina de indução.

Uma vez alterada a frequência de alimentação do rotor, a curva de Torque versus velocidade é apenas deslocada horizontalmente para um novo ponto de velocidade síncrona cruzando o eixo da velocidade de rotor, como é ilustrado na figura 6.

Figura 6: Curvas de torque por velocidade retórica para diferentes frequências de alimentação do estator para um motor de quatro polos.



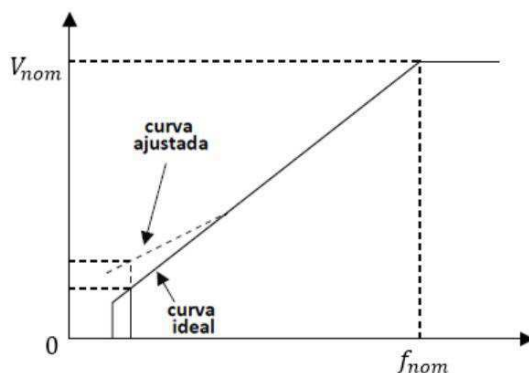
Fonte: STEPHAN, R. M. *Acionamento, Comando e Controle de Máquinas Elétricas*. 2013.

Como se observa nas diversas curvas para diferentes frequências, essa premissa é válida até uma frequência mínimo uma vez que abaixo dela essa característica não mais é alcançada, pelo fato de que a parcela resistiva passa a apresentar um valor considerável na impedância estatórica, causando uma grande queda de tensão, resultando em uma diminuição do fluxo de entreferro e consequentemente reduz o conjugado do motor.

É a partir desse conceito que se baseiam as estratégias de controle da velocidade do motor. Essa técnica de manter fluxo de entreferro constante mantida a razão entre tensão e frequência de alimentação é conhecida como controle escalar.

Uma vez que está razão deve ser considerada constante e linear é possível relacionar o aumento proporcional entre tensão e frequência a partir da curva mostrada na figura 7:

Figura 7: Curva para controle V/f.

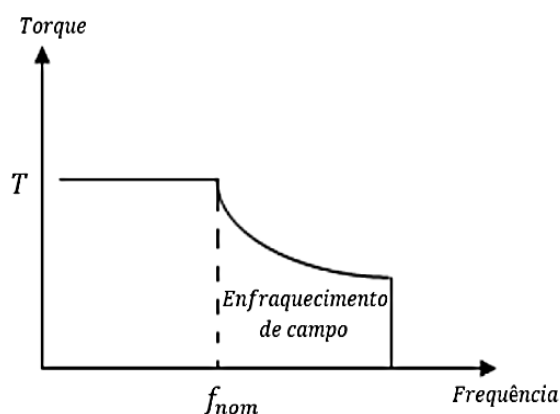


FITZGERALD, A.E.; KINGSLEY, C.; UMANS, S.D. *Máquinas Elétricas - Com Introdução à Eletrônica de Potência*. 2008.

Contudo, é importante frisar que após atingir a frequência nominal do motor o comportamento da curva deixa de ser linear, uma vez que a tensão fornecida ao rotor chega a seu valor nominal, forma que mesmo que se aumente a frequência a tensão permanecerá constante, gerando o que se chama de região de enfraquecimento do campo (FITZGERALD, 2008).

Esta região possui uma relação entre torque e frequência caracterizada por uma curva de natureza hiperbólica, devido à manutenção da tensão em seu valor nominal e o aumento de frequência. Essa característica é ilustrada na figura 8.

Figura 8: Curva de torque por frequência de alimentação estatórica



FITZGERALD, A.E.; KINGSLEY, C.; UMANS, S.D. *Máquinas Elétricas - Com Introdução à Eletrônica de Potência*. 2008.

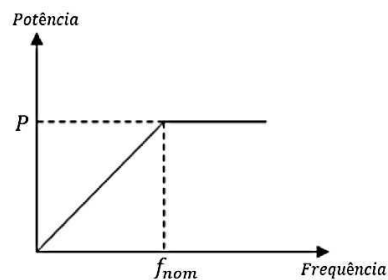
Como descreve Fitzgerald (2008), a potência mecânica no eixo do rotor é definida como:

$$P_{mec} = T_{mec} \times \omega_r$$

Onde,  $T_{mec}$  é o torque mecânico e  $\omega_r$  a frequência de rotação do rotor.

Sendo assim, ao operar na região de enfraquecimento de campo o valor da potência mecânica no rotor é dita constante uma vez que a velocidade e torque são proporcional e inversamente proporcional, respectivamente, à frequência de alimentação nesta região, como mostra a figura 9:

Figura 9: Curva de potência mecânica por frequência de alimentação estatórica



FITZGERALD, A.E.; KINGSLEY, C.; UMANS, S.D. *Máquinas Elétricas - Com Introdução à Eletrônica de Potência*. 2008.

### 2.3.5 Bomba centrífuga

Bombas são operatrizes hidráulicas capazes de transferir energia ao fluido de forma a transportá-lo de um ponto a outro. Estas recebem energia de uma fonte mecânica e fornecem ao fluido sob forma de energia de pressão, energia cinética ou ambas.

Em especial, as bombas centrífugas norteiam seu funcionamento na transferência de energia motora ao fluido em forma de energia cinética. E por sua vez a energia cinética projeta o fluido e transformada em energia potencial, também chamada de pressão de energia.

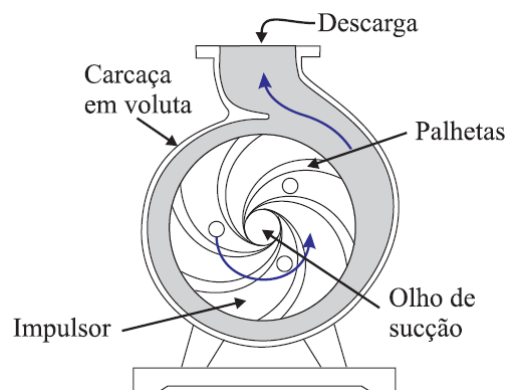
Como foi dito, a bomba centrífuga ou não, precisa de um componente mecânico rotacional para funcionar, por isso é inserido geralmente o eixo motor elétrico responsável por gerar atrás de sua rotação a energia cinética necessária ao movimento do fluido.



### 2.3.5.1 Partes da Bomba

A seguir são mostradas as partes básicas para o funcionamento da bomba, relacionadas a partir da figura 10.

Figura 10: Partes da bomba centrífuga



Fonte: VITORINO, M. A. *Sistema de bombeamento fotovoltaico com motor de indução e sem baterias*. 2008.

- **Descarga:** Região da bomba centrífuga responsável pelo escoamento do fluido bombeado.
- **Carcaça em voluta:** é responsável pela contenção do fluido bombeado bem como provê oportunidade para a conversão da energia cinética contida no fluido em energia de pressão.
- **Impulsor:** Consiste em um disco perpendicular ao eixo de rotação, composto por pás curvadas em direção contrária ao movimento. Tem por objetivo aumentar a região de contato do fluido com o rotor.
- **Olho de sucção:** Orifício responsável pela injeção do fluido a ser transportado.
- **Palhetas:** tem a função de transformar a energia mecânica do rotor em energia cinética e potência.

### 2.3.5.2 Princípios de Funcionamento

Como já relatado, a bomba centrífuga transfere energia cinética para o fluido transformando-a em energia potencial, aplicando, para isso, os conceitos vistos pelo princípio de Bernoulli.

Ao acionar o eixo rotativo da bomba, a rotação do rotor fará com que se transfira ao fluido, por meio das palhetas, energia cinética. Por sua vez, o fluido entra no olho de sucção onde escoar em direção ao diâmetro externo pelos canais formados entre as palhetas do rotor. A partir daí o fluido deixa o rotor com velocidade e deve ser convertida em energia potencial de pressão, realizado nas partes não rotativas.

Existem duas formas mais frequentes de se regenerar partes da energia cinética fornecida ao sistema, uma por meio de uma carcaça com formato espiral, conhecido como voluta, que termina em um bocal de recalque. A outra é através de uma série de palhetas, chamada de difusor, que serve como um canal de retorno do fluido a outro rotor ou a um coletor espiral, muito semelhante a uma voluta.

## 2.4 DSP

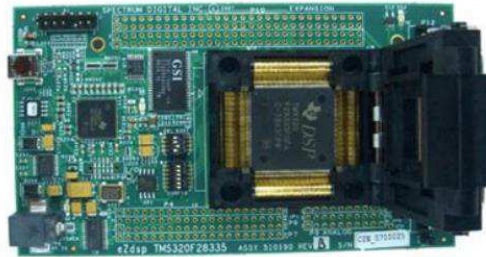
Os DSPs ou Processador Digital de Sinais (Digital Signal Processor) são classificados como super microprocessadores programáveis, devido a sua alta velocidade de processamento e operação em tempo real. Com a evolução ocorrida nos sistemas de processamento de sinais, o que antes era feito de maneira analógica e com precisão não tão elevada, hoje é feito de forma digital, controlada e com a velocidade de processamento bem superior, esta evolução se devendo ao surgimento dos DSPs.

Estes são caracterizados por serem dispositivos programáveis e que possuem seu próprio código de instruções, onde cada fabricante confecciona um processador que detém seu próprio protocolo de programação. Contudo, alguns DSPs podem ser programados em algumas linguagens de baixo nível, a exemplo de assembly, C, C++, Visual DSP++ 3.5. Há também alguns desenvolvedores que dispõem o uso de compiladores para a interface de ferramentas como o

Matlab/Simulink e LabView para a criação de diagramas de blocos e criação de projetos em DSP.

Um exemplo típico de um kit para implementação de processamento é o TMS320F28335, que tem como desenvolvedor a *Texas Instruments*<sup>TM</sup>, tratado na figura 11.

Figura 11: Processador digital de sinais (TMS320F28335)



Fonte <http://www.8051faq.com.cn/manager/download/TMDXEZ28335.html>. 2007.

### 3. ATIVIDADES DESENVOLVIDAS

As atividades desenvolvidas ao longo do estágio se basearam, além de pesquisas bibliográficas sobre sistemas fotovoltaicos, consistiu no aprimoramento do acervo documental e simulações referente a planta de *Sistema de Bombeamento para Ensaio*, mostrada na figura 12, onde se refere a uma aplicação de um sistema fotovoltaico com a energização de um motor de indução para um sistema de bombeamento, sem a necessidade de acumuladores de carga.

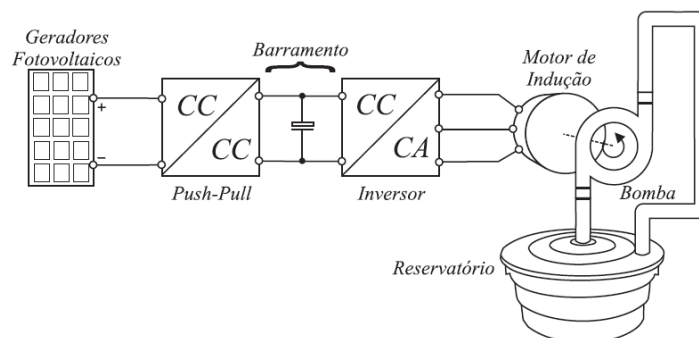
Figura 12: Sistema de Bombeamento para Ensaio



Fonte: Própria do autor

Como dito, o *Sistema de Bombeamento para Ensaio* não se utiliza de baterias para a acumulação de carga, ou seja, toda energia gerada pelos painéis fotovoltaicos é fornecida diretamente a carga. No que tange a parte elétrica, é constituído basicamente de quatro estágios: geradores fotovoltaicos; conversor CC/CC; inversor CC/CA; e motor de indução trifásico, representado na figura 13.

Figura 13: Representação do sistema de bombeamento fotovoltaico com sistema hidráulico.



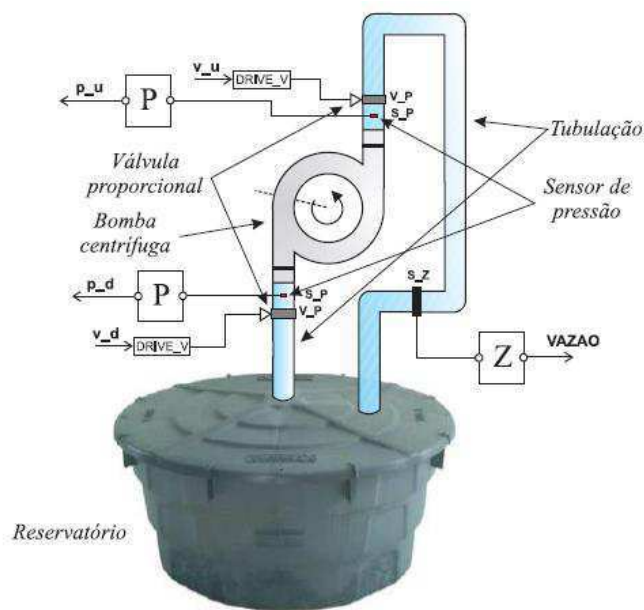
Fonte: VITORINO, M. A. *Sistema de bombeamento fotovoltaico com motor de indução e sem baterias*. 2008.

Possui ainda uma gama de sensores, responsáveis pela medição das características dinâmicas de funcionamento, como valores de tensão e corrente no circuito e medições das características atmosféricas e hidráulicas do sistema solar e de fluído que compõem o sistema.

O controle do *Sistema de Bombeamento para Ensaios DPS* é dado pelo DSP TMS320F2812 da *Texas Instruments*™ e tem por objetivo se comunicar com o computador de forma a realizar o processo de controle e monitoramento das variáveis do processo, sob dadas condições de simulação.

O sistema circuito hidráulico, é em si, uma simulação de um sistema hidráulico real, pensando nisso foi projetado para que este tenha um par de válvulas proporcionais que tem o objetivo de realizar simulações nos quais o sistema sofra com perturbações e variações de pressão inerentes ao funcionamento da bomba, no que se refere ao distanciamento ou elevação no processo de bombeamento. Esse sistema é ilustrado na figura 13.

Figura 14: Circuito hidráulico.



Fonte: VITORINO, M. A. *Sistema de bombeamento fotovoltaico com motor de indução e sem baterias*. 2008.

A seguir, serão relatadas as principais atividades desenvolvidas ao longo do período de estágio.

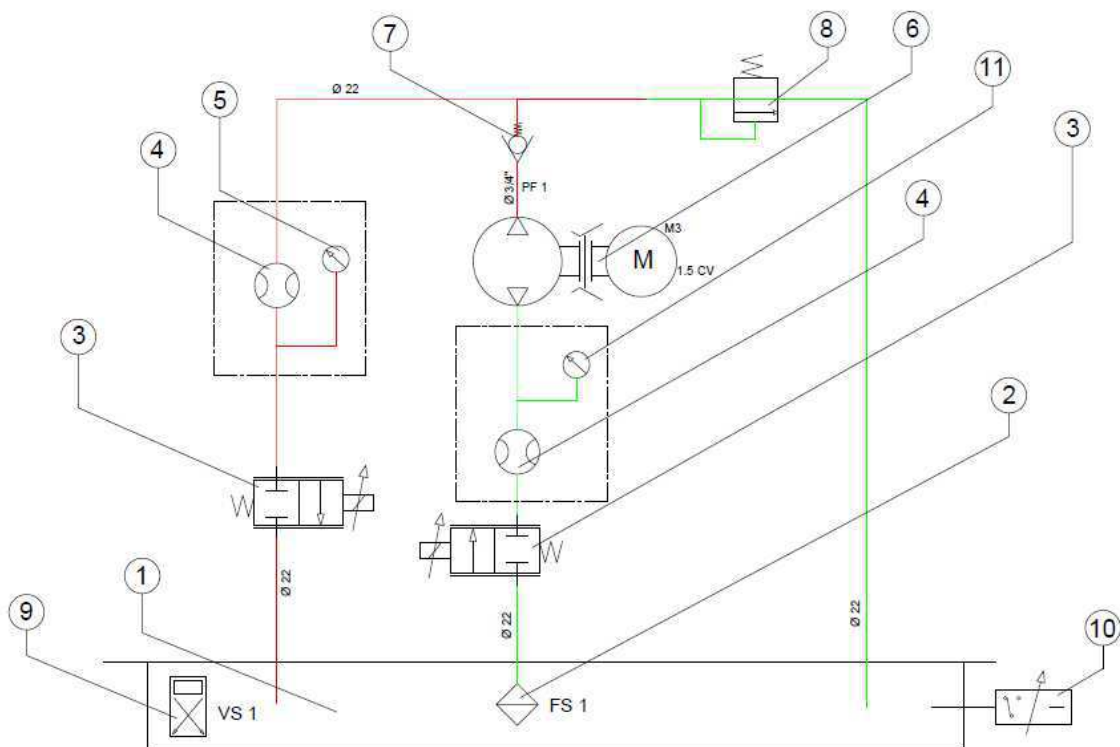
### 3.1. ESQUEMA DO SISTEMA HIDRÁULICO

Antes de iniciar a descrição da atividade, é importante ressaltar que torna-se como referência o que foi descrito por *Montiê* (2008), onde este apresenta-se com desenvolvedor do processo e por conseguinte fonte primeira para a busca do acervo documental de toda planta de bombeamento fotovoltaico.

Outro ponto importante, é que vale ressaltar que o circuito a ser apresentado já possuía nos documentos que concernem ao sistema de bombeamento, contudo, a fim de tornar seu conteúdo mais profissional e de mais fácil manipulação em adaptações futuras, o novo circuito foi transcrito no AutoCAD em plataforma 2D, tendo como fabricante a Autodesk.

Buscando o retratar de forma próxima as informações contidas no desenho original, de forma a interferir o mínimo possível, o *layout* do circuito hidráulico não teve quaisquer alterações, sendo o resultado apresentado na figura 15, com seus respectivos elementos assinalados na figura 16:

Figura 15: Esquema hidráulico do sistema de bombeamento.



Fonte: Própria do autor.

Figura 16: Componentes do sistema hidráulico

Item	Referência	Descrição	Fabricante
1	744H9504-1	Reservatório 60 litros	PARKER
2	XX	Filtro de sucção	PARKER
3	830VSN12T34AMH000	Válvula série 830 3/4"NPT 4-20mA	PARKER
4	SCFT-060-32-07	Sensor de vazão	PARKER
5	SCP-006-44-07	Transdutor de pressão 0 a 10V	PARKER
6	647-003023	Motobomba 1,5 cv trifásico REF. SMH2-5	ANDRES
7	613-PN16DN20	Válvula de retenção 3/4"NPT	MIPEL
8	627-0136	Válvula de alívio MIPEL 3/4"BSP	MIPEL
9	600-VB127T/2	Visor de nível com termômetro	HDA
10	SCLSD-250-10-07	Sensor de nível digital	PARKER
11	SCPSD-016-14-15	Transdutor de pressão digital	PARKER

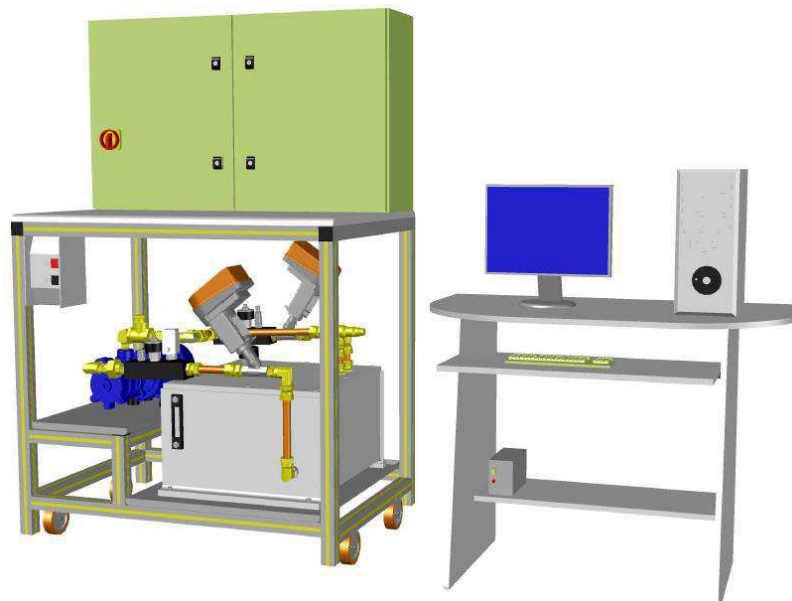
Fonte: VITORINO, M. A. *Sistema de bombeamento fotovoltaico com motor de indução e sem baterias*. 2008.

### 3.2. LAYOUT 3D

Dentre as atividades mais complexas do período de estágio, encontra-se em confeccionar o *layout* em 3D do *Sistema de Bombeamento para Ensaio*, já mostrado na figura 12, dada a riqueza de detalhes das tubulações e sensores.

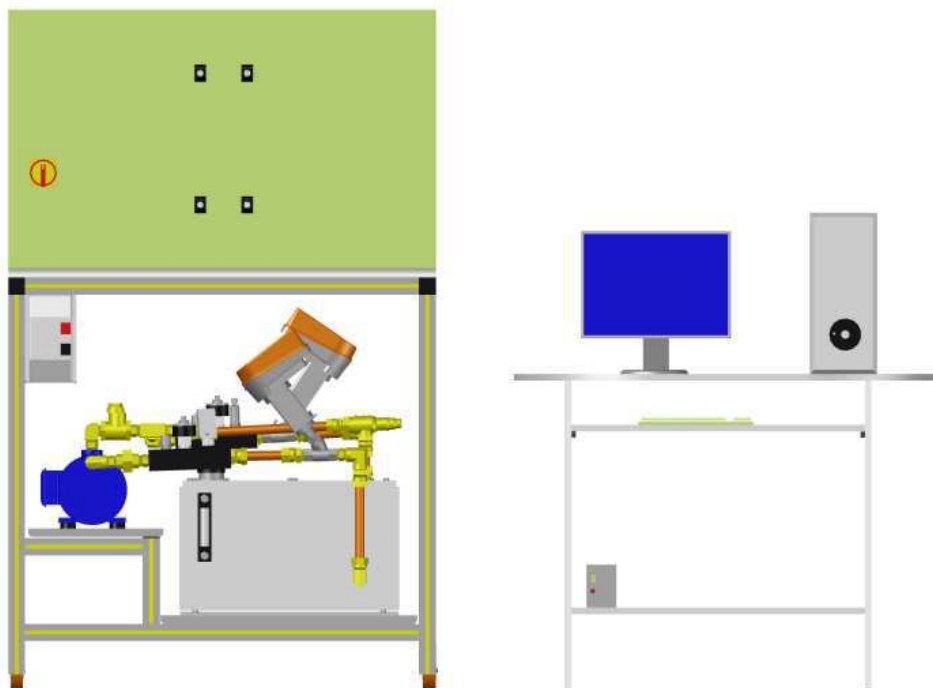
Do mesmo modo que o circuito hidráulico, o *layout* da planta também foi executado com o AutoCAD. No entanto, buscando retratar de forma mais fiel seus componentes, foi construído em plataforma 3D, tendo como resultado a sequência das figuras 17, 18 e 19.

Figura 17: *Layout 3D* do sistema de bombeamento para ensaios



Fonte: Própria do autor

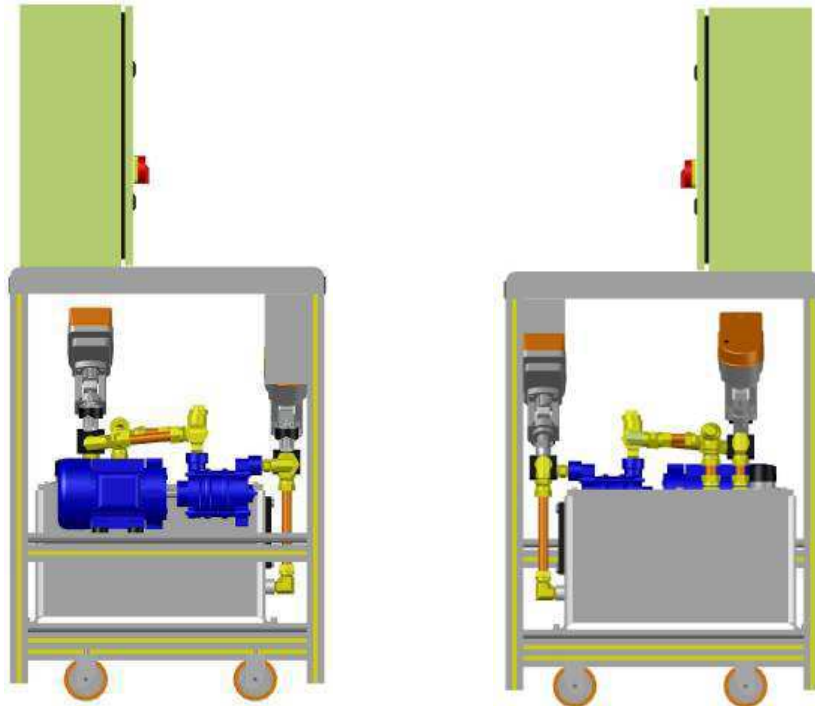
Figura 18: Vista frontal do sistema de bombeamento para ensaios



Fonte: Própria do autor



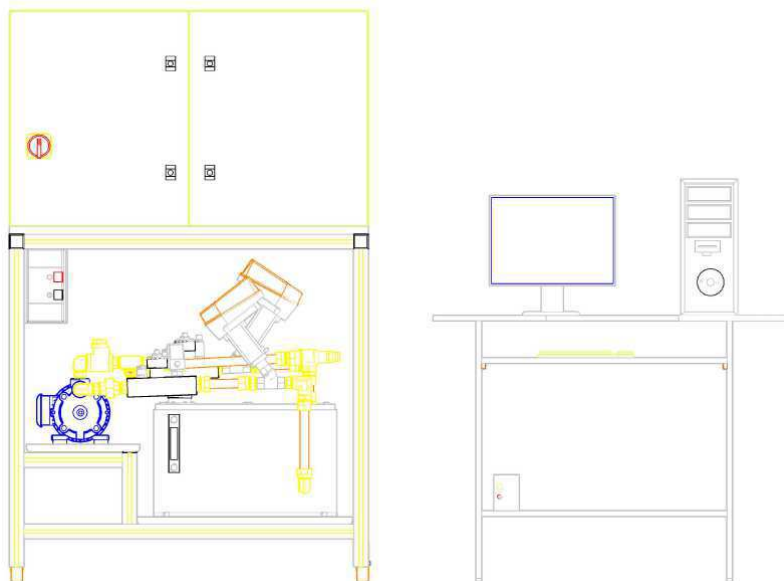
Figura 19: Vistas laterais do sistema de bombeamento para ensaios



Fonte: Própria do autor

O AutoCAD em plataforma 3D permite que seus desenhos com essa formatação possam ser expressos por diferentes topologias, dentre elas a própria projeção 2D. Com o auxílio dessa ferramenta, foi plotado na figura 20 a vista frontal do sistema de bombeamento utilizando o desenho em 3D convertido em 2D.

Figura 20: Vista frontal 2D do sistema de bombeamento para ensaios



Fonte: Própria do autor

### 3.3. OPERAÇÃO DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO

Devido à complexidade de instalação do sistema fotovoltaico e o alto custo associado a ele, bem como das tempestividades que o sistema fotovoltaico impõe, foi utilizado para simular os painéis fotovoltaicos o emulador E4360A, no qual desempenha as mesmas funções e atributos dos geradores fotovoltaicos.

O processador utilizado no sistema é o DSP com o kit de desenvolvimento TMS320F2812 da *Texas Instruments*<sup>TM</sup>, no qual o ambiente de programação é o *Code Composer Studio*<sup>TM</sup> - CCS, onde são aceitas as linguagens C e C++.

Sempre sob a supervisão do professor Montiê Alves Vitorino, foram realizadas algumas simulações na planta de *Sistema de Bombeamento para Ensaios*, onde foram aferidas medições das tensões e correntes na entrada do motor de indução a fim de verificar seu comportamento diante a variação do controle de velocidade. Foram ainda inseridas perturbações ao sistema de bombeamento com o fechamento parcial das válvulas com o objetivo de analisar o comportamento da bomba diante do aumento da resistência da tubulação.

Contudo começa-se a se deparar com alguns problemas elétricos na planta. Após alguns testes verificou-se que um dos circuitos integrados estava danificado, o que demandou alguns dias de atraso até a chegada do componente para realização de novos testes.

Como se analisou, ao ter havido a troca do componente as variáveis do sistema começaram a ser lidas, contudo ainda não se estava tendo um controle mais refinado das válvulas proporcionais e nem no motor de indução trifásico. Realizando o teste de continuidade no rastreando possíveis problemas, foram observados que alguns cabos de conexão entre os terminais do DSP e os drives de controle da planta estavam partidos, onde se foi listado com a perspectiva de substituição desses cabos de conexão.

Diante do exposto, e da iminência de conclusão do período de estágio não se pode prosseguir na realização de novos ensaios, ficando listados os problemas ocorridos e a perspectiva de soluções futuras.

#### 4. CONCLUSÃO

O estágio deve despertar, no ainda aluno, a capacidade de aplicar além dos conhecimentos teóricos adquiridos ao longo do curso, o desenvolvimento de um raciocínio cognitivo, na busca de soluções práticas em problemas cotidianos, inerente a vida profissional.

Ao longo do estágio desenvolvido no LEIAM pude envolver esses dois conceitos à medida que precisei solucionar problemas técnicos com o arcabouço teórico e somado a isso, a perspicácia na velocidade em ver qual a melhor metodologia para a solução desse mesmo problema.

Em contrapartida, fica o legado para o laboratório a medida que todo o trabalho feito deverá ser usado em pesquisas futuras e assim gerando, a continuidade no aprimoramento das pesquisas no que se refere aos sistemas de bombeamento fotovoltaico.

Os *layouts* em 2D e 3D produzidos, servirão em uma demonstração ilustrativa da planta *Sistema de Bombeamento para Ensaio* de forma a facilitar o entendimento para futuro pesquisadores que busquem realizar novas pesquisas na planta ou mesmo adquirir, assim como eu, os primeiros conceitos sobre esse sistema.

Mesmo com as limitações de prazo, acredita-se que o trabalho proposto deixa o primeiro passo tomado para um melhor aproveitamento do sistema de bombeamento fotovoltaico, de forma a tornar esse recurso acessível não apenas para alunos estagiários, mas também de alunos e pesquisadores de graduação e pós-graduação desta mesma instituição.

## REFERÊNCIAS

BHATNAGAR; NEMA, R. K. Maximum power point tracking control techniques: state-of-the-art in photovoltaic applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 23, p. 224–241, 2013.

FITZGERALD, A.E.; KINGSLEY, C.; UMANS, S.D. **Máquinas elétricas - com introdução à eletrônica de potência**. 6ª ed., Bookman, 2008.

GONÇALVES, L. G. O. **Projeto de um inversor multiníveis híbrido para média tensão industrial**. Dissertação – Universidade Federal de Minas Gerais, 122. 2011

J. A. Gow and C. D. Manning, “Development of a Photovoltaic Array Model for Use in Power Electronics Simulation Studies,” IEE Proc. On Electric Power Applications, vol. 146, no. 2, p. 193-200, Março de 1999.

MENEZES, T. L. **Conversor push-pull alimentado em corrente aplicado a correção do fator de potência de fontes de alimentação**. 2016. 95 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.

PIMENTEL, C. E. F.; CAVALCANTE, T. T. **Projeto e desenvolvimento de um conversor cc-cc sepic com isolamento galvânica em alta frequência**. 2011. 108 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

SANTOS, F. A. F. **Modelagem, análise e experimentação de sistema fotovoltaico isolado baseado em plataforma de simulação com diagrama de bloco**. Dissertação – Universidade Federal da Paraíba, 84. 2016.

SEGUEL, J. I. L. **Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital**. 2009. 222 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2009.

STEPHAN, R. M. **Acionamento, comando e controle de máquinas elétricas.** Ciência Moderna, 2013.

VITORINO, M. A. **Sistema de bombeamento fotovoltaico com motor de indução e sem baterias.** 2008.172 f. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.