

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
IFG CAMPUS GOIÂNIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

Licínio de Moraes Santos

ESTUDOS DE MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS PELA APLICAÇÃO DE ÁGUA

Goiânia, 2018.

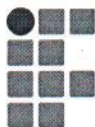


SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
IFG CAMPUS GOIÂNIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

Licínio de Moraes Santos

ESTUDOS DE MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS PELA APLICAÇÃO DE ÁGUA

Goiânia, 2018.



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese | <input type="checkbox"/> Artigo Científico |
| <input checked="" type="checkbox"/> Dissertação | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia – Especialização | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input type="checkbox"/> TCC - Graduação | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do(a) Autor(a):

Matrícula: **Licínio de Moraes Santos**

Título do Trabalho: **Estudos de Melhoria da Eficiência Energética em Painéis Fotovoltaicos pela aplicação de água.**

Restrições de Acesso ao Documento

Documento confidencial: Não Sim, justifique: _____

Informe a data que poderá ser disponibilizado no ReDi/IFG: **20 / 04 / 2018**

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia, 20 / 04 / 2018.
Local Data

Licínio de Moraes Santos

Assinatura do(a) Autor(a) e/ou Detentor dos Direitos Autorais

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
IFG CAMPUS GOIÂNIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

Licínio de Moraes Santos

ESTUDOS DE MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS PELA APLICAÇÃO DE ÁGUA

Programa de Pós-Graduação stricto sensu em Tecnologia de Processos Sustentáveis do IFG (PPGTPS-IFG) - Dissertação de Mestrado Profissional. Área de Concentração: Tecnologia de Sistemas de Produção Limpa. Linha de Pesquisa: Energias Renováveis e Engenharia Econômica Aplicada.

Orientador: Prof. Dr. Aylton José Alves

Coorientador: Prof. Dr. José Luis Domingos

Goiânia, 2018.

S2373e Santos, Licínio de Moraes

Estudos de melhoria da eficiência energética em painéis fotovoltaicos pela aplicação de água / Licínio de Moraes Santos. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2018.

96f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Aylton José Alves

Coorientador: Prof. Dr. José Luis Domingos

Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis, Coordenação do Programa de Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

1. Eficiência energética. 2. Painéis fotovoltaicos. 3. Arrefecimento. I. Alves, Aylton José (orientador). II. Domingos, José Luis (Coorientador). III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis. IV. Título.

CDD 621.312 44



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
IFG CÂMPUS GOIÂNIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

Licínio de Moraes Santos

**“ESTUDOS DE MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM
PAINÉIS FOTOVOLTAICOS PELA APLICAÇÃO DE ÁGUA”**

Programa de Pós-Graduação *stricto sensu* em
Tecnologia de Processos Sustentáveis do IFG
(PPGTPS - IFG) - Dissertação de Mestrado
Profissional. Área de Concentração: Tecnologia de
Sistemas de Produção Limpa. Linha de Pesquisa:
Energias Renováveis e Engenharia Econômica
Aplicada.

Prof(a). Dr(a). AYLTON JOSÉ ALVES (presidente e orientador – PPGTPS IFG)

Assinatura

Prof(a). Dr(a). JOSÉ LUIS DOMINGOS (coorientador – PPGTPS IFG)

Assinatura

Prof(a). Dr(a). GHUNTER PAULO VIAJANTE (avaliador – IFG)

Assinatura

Prof(a). Dr(a). PEDRO JOSÉ ABRÃO (avaliador – IFG)

Assinatura

Prof(a). Dr(a). JOSÉ WILSON LIMA NERYS (avaliador externo – IFG)

Assinatura

Aprovado em: 27/02/2018

Dedico este trabalho à minha família, orientador e coorientador, amigos e principalmente à minha querida esposa Adelainne Cristinne por sua compreensão, incentivo e apoio que foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

AGRADECIMENTOS

À minha querida esposa Adelainne Cristinne, que a meu lado suportou e superou as dificuldades impostas para que eu alcançasse os objetivos propostos.

A todos os meus familiares pelo apoio e compreensão pelos vários momentos em que estive ausente.

Ao orientador, Prof. Dr. Aylton José Alves, pela orientação, oportunidade e por sempre acreditar em mim. Já temos muitos anos de caminhada, desde o meu curso técnico.

Ao coorientador Prof. Dr. José Luis Domingos e aos professores Elder Geraldo Domingues e Wesley Pacheco Calixto, por contribuírem para que os resultados desta dissertação fossem alcançados.

A todos os membros, professores e secretários, do mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis, por toda orientação e apoio necessários para a condução e finalização desta pesquisa.

A todos os colegas do mesmo programa de mestrado, pelos momentos juntos e pelas grandes contribuições durante o tempo em que cursamos as disciplinas.

Agradeço imensamente aos companheiros de trabalhos e projetos Calebe Abrenhosa Matias, Dayane Martins Salles e Rafael da Silva Ferraz pela grande contribuição no decorrer dos trabalhos de pesquisas.

A todos os professores, pesquisadores, estagiários, alunos de iniciação científica e colegas que integram o Núcleo de Estudos Experimentais e Tecnológicos do IFG – NEXT, por suas contribuições.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) e ao Instituto Federal de Goiás (IFG) pelo apoio financeiro e incentivo à pesquisa.

EPÍGRAFE

“O Sol, que é a sabedoria, que é a luz, ilumina a todos, indistintamente, é uma Lei do universo, só que alguns se colocam de costas para o Sol, e veem apenas suas sombras.”

Lúcia H. Galvão

Título: Estudos de Melhoria da Eficiência Energética em Painéis Fotovoltaicos pela Aplicação de Água

Autor: Licínio de Moraes Santos

Orientador: Aylton José Alves

Coorientador: José Luis Domingos

RESUMO

Este trabalho apresenta estudos para a implementação de arrefecimento em painéis fotovoltaicos para melhoria de sua eficiência energética. Primeiramente realizou-se medições da potência instantânea e temperatura em dois painéis fotovoltaicos, onde um dos painéis foi submetido a um processo de arrefecimento com aplicação de água de reuso sobre sua superfície frontal, enquanto no outro analisou-se as mesmas variáveis com o painel em condições naturais (sem arrefecimento). No painel com arrefecimento aplicou-se diferentes vazões de água e ao final foram feitas comparativas dos resultados nos dois painéis para conhecimento da melhor vazão. Em seguida, utilizando-se da mesma metodologia, realizou-se medições, comparando um grupo de seis painéis submetidos ao arrefecimento com outro grupo de seis painéis sem arrefecimento. Como forma de otimizar eletricamente o processo, realizou-se também um estudo para efficientizar o recalque de água utilizada no arrefecimento dos painéis. Onde realizou-se modificações na altura geométrica do sistema e diferentes tipos de sistemas de bombeamento, com velocidade constante e velocidade variável utilizando-se de um inversor de frequência. Através das mudanças realizadas no sistema de bombeamento verificou-se que houve melhoras significativas tanto no caso da modificação da altura geométrica quanto no caso da variação da velocidade do motor trifásico. Com o arrefecimento, observa-se uma melhoria no rendimento do sistema em aproximadamente 6,08%; e do ganho de energia obtido apenas 14,2% são gastos no sistema de bombeamento. Para possibilitar a automação e supervisão do processo, foi montada uma rede Modbus para a aquisição de dados e o desenvolvimento e implementação de um sistema supervisório. Ao final foi realizada uma análise da viabilidade técnica para verificação da possibilidade de implementação de arrefecimento em um sistema de maior porte.

Palavras-Chave: Eficiência Energética. Painéis Fotovoltaicos. Arrefecimento. Sistema de Bombeamento. Viabilidade Técnica.

TITLE: STUDIES OF ENHANCED ENERGY EFFICIENCY IN PHOTO-VOLTAIC PANELS BY WATER APPLICATION
AUTHOR: LICÍNIO DE MORAES SANTOS
ADVISER: AYLTON JOSÉ ALVES
CO-ADVISER: JOSÉ LUIS DOMINGOS

ABSTRACT

This work presents studies for the implementation of cooling in photo-voltaic panels to improve their energy efficiency. Firstly, measurements of the instantaneous power and temperature were carried out on two photo-voltaic panels, where one of the panels was subjected to a cooling process with application of reuse water on its frontal surface, while in the other one the same variables were analyzed, with the panel under environmental conditions (without cooling). In the cooled panel, different water flows were applied, and at the end comparative analyzes of the results were made in the two panels to know the best flow rate. Then, using the same methodology, a group of six panels submitted to cooling with another group of six panels without cooling was compared. As a way to optimize the entire process as a whole, a study was also carried out to improve the water pumping recharge to be used in the panel cooling process. In this case the methodology done modifications in the geometrical height of the system and different types of pumping systems, with speed constant and variable speed by means of the use of a frequency inverted. Through the changes made in the pumping system, it was verified that there were significant improvements both in the case of the elevation of the structure and in the case of speed variation of the three-phase motor. With cooling, an improvement in system performance is observed around 6.08%; and of the energy gain obtained only 14.2% are spent on the pumping system. To enable process automation and supervision, a Modbus network was set up for data acquisition and installation of supervisory software. At the end, a technical feasibility analysis is performed to verify the possibility of implementing cooling in a larger system.

Keywords: Energy Efficiency. Photo-voltaic panels. Cooling. Pumping System. Technical viability.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Estrutura básica de uma célula fotovoltaica | 23 |
| Figura 2 - Estruturas de banda de energia (a) condutores, (b) semicondutores e (c) isolantes. | 26 |
| Figura 3 - Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica ideal..... | 27 |
| Figura 4 - Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica real..... | 29 |
| Figura 5 - Curva característica I-V-P de um módulo fotovoltaico | 30 |
| Figura 6 - Influência da irradiância solar em uma célula fotovoltaica a 25 °C | 32 |
| Figura 7 - Influência da temperatura na célula fotovoltaica com irradiância de 1000 W/m ² | 33 |
| Figura 8 - Associação série-paralelo com diodo de by-pass. | 34 |
| Figura 9 - Representação da ligação de um diodo de bloqueio. | 35 |
| Figura 10 - Diagrama de um sistema isolado com instalações <i>cc</i> e <i>ca</i> | 36 |
| Figura 11 - Sistema fotovoltaico com medição bidirecional..... | 37 |
| Figura 12 - Principais funções dos conversores estáticos. | 38 |
| Figura 13 - Exemplo de Conversor Boost com painel fotovoltaico. | 39 |
| Figura 14 - Curvas de potência para diferentes irradiâncias e para diferentes temperaturas. .. | 40 |
| Figura 15 - Arquitetura simplificada de um sistema de supervisão | 45 |
| Figura 16 - Temperaturas diárias (máxima, média e mínima), Goiânia, ao longo de 2017. | 48 |
| Figura 17 - Sistema energético generalizado..... | 50 |
| Figura 18 - Eficiência de células fotovoltaicas ao longo dos anos. Fonte: Butz, 2017 | 51 |
| Figura 19 - Exemplo de sistema com diferentes alturas geométricas..... | 54 |
| Figura 20 - Local de instalação dos painéis fotovoltaicos no Campus Goiânia, obtido pelo Google Earth com adaptações | 57 |
| Figura 21 - Direção dos painéis fotovoltaicos, obtido pelo Google Earth com adaptações | 57 |
| Figura 22 - Diagrama de instalação elétrica do sistema de geração fotovoltaica..... | 58 |
| Figura 23 - Circuito hidráulico com suas dimensões. | 60 |
| Figura 24 - Calha de recolhimento da água aplicada sobre os painéis. | 60 |
| Figura 25 - Estrutura metálica construída para os reservatórios (10.000 litros)..... | 61 |
| Figura 26 - Perfil quadrado de alumínio perfurado para aplicação de água..... | 61 |
| Figura 27 - Tubulação e mangueiras ligadas ao perfil de aplicação de água em um painel.... | 62 |
| Figura 28 - Instalações para aplicação de água em grupo de seis painéis. | 64 |
| Figura 29 - Estrutura montada para a aquisição de dados. | 65 |
| Figura 30 - Fluxograma do sistema de geração com a rede Modbus RTU. | 66 |
| Figura 31 - Tela inicial do supervisor para o sistema fotovoltaico. | 67 |
| Figura 32 - Tela de gráficos do sistema supervisor para o sistema fotovoltaico..... | 68 |
| Figura 33 - Recorte da tela de configuração do driver de comunicação no E3 Studio | 69 |
| Figura 34 - Fluxograma de acionamento da válvula para o arrefecimento | 69 |
| Figura 35 - Gráficos com vazão de 0,14 litro/min, em 17/07/2017 | 71 |
| Figura 36 - Gráficos com vazão de 0,38 litro/min, em 18/07/2017 | 71 |
| Figura 37 - Gráficos com vazão de 0,61 litro/min, em 20/07/2017 | 72 |
| Figura 38 - Gráficos com vazão de 1,10 litro/min, em 21/07/2017 | 72 |
| Figura 39 - Temperatura nos painéis ao longo de um dia e uma noite..... | 74 |
| Figura 40 - Temperaturas nos painéis fotovoltaicos no horário entre as 07 e as 17 horas. | 74 |
| Figura 41 - Potência x Vazão para bombas monofásica e trifásica | 76 |
| Figura 42 - Gráficos de Potências, Temperaturas e Ganho, em 09/10/2017. | 78 |
| Figura 43 - Gráficos de Potências, Temperaturas e Ganho, em 14/10/2017. | 78 |
| Figura 44 - Gráficos de Potências, Temperaturas e Ganho, em 16/10/2017..... | 79 |
| Figura 45 - Gráficos de Potências, Temperaturas e Ganho, em 17/10/2017..... | 79 |
| Figura 46 - Gráficos de Potências, Temperaturas e Ganho, em 18/10/2017..... | 80 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Nebulosidade, insolação e radiação solar..... | 46 |
| Tabela 2 - Vazões de aplicação de água sobre os painéis | 63 |
| Tabela 3 - Relação entre o ganho de potência (com o arrefecimento) com a vazão aplicada .. | 73 |
| Tabela 4 - Medições da bomba trifásica..... | 75 |
| Tabela 5 - Ganho de potência (com o arrefecimento) com a vazão de 0,14 litro/min | 80 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|----------------|---|
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| As | Arsênio |
| CA | Corrente Alternada |
| C | Carbono |
| CC | Corrente Contínua |
| CdTe | Telureto de Cádmiio |
| CELG | Centrais Elétricas de Goiás |
| CIs | Circuitos Integrados |
| CNPq | Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico |
| DPS | Dispositivos de Proteção contra Surtos |
| eV | eletron-Volt |
| <i>FF</i> | Fator de forma |
| GaAs | Arseneto de Gálio |
| GaN | Nitreto de Gálio |
| Ge | Germânio |
| IFG | Instituto Federal de Goiás |
| <i>Imp</i> | Corrente no ponto de máxima potência |
| <i>Isc</i> | Corrente de curto circuito |
| MPPT | <i>Maximum Power Point Tracking</i> |
| NExT | Núcleo de Estudos Experimentais e Tecnológicos |
| P | Fósforo |
| <i>P&O</i> | Perturbe e Observe |
| PLCs | <i>Programmable Logic Controllers</i> |
| <i>Pmp</i> | Ponto de máxima potência |
| PV | Painel Fotovoltaico |
| PVT | Painel Fotovoltaico/Térmico |
| RTUs | <i>Remote Terminal Units</i> |
| SCADA | <i>Supervisory Control and Data Acquisition</i> |
| Se | Selênio |
| SFCR | Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede |

| | |
|----------|------------------------------------|
| SFI | Sistemas Fotovoltaicos Isolados |
| Si | Silício |
| STC | Condições – padrão de ensaio |
| V_{mp} | Tensão no ponto de máxima potência |
| V_{oc} | Tensão de circuito aberto |
| W_p | <i>watts-pico</i> |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|------------------|------------------------------|
| A | Ampère |
| cm | Centímetros |
| cm ² | Centímetros quadrados |
| CV | Cavalo-vapor |
| G | Irradiância |
| H | Altura |
| Hz | Hertz |
| k | Constante de Boltzman |
| kVA | Quilovolt-ampère |
| kW | Quilowatts |
| <i>mm</i> | Milímetros |
| <i>n</i> | Semicondutores tipo <i>n</i> |
| η | Eficiência / Rendimento |
| °C | Graus Celsius |
| <i>p</i> | Semicondutores tipo <i>p</i> |
| <i>pn</i> | Junção <i>pn</i> |
| Q | Vazão |
| rpm | Rotação por minuto |
| s | Segundo |
| <i>Si</i> | Silício |
| V | Volt |
| W | Watts |
| W/m ² | Watts por metro quadrado |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 16 |
| 1.1 | OBJETIVO GERAL | 20 |
| 1.2 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 20 |
| 1.3 | ESTRUTURA DO TRABALHO..... | 20 |
| 2 | FUNDAMENTOS DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA..... | 22 |
| 2.1 | EFEITO FOTOVOLTAICO | 22 |
| 2.2 | GERAÇÃO FOTOVOLTAICA | 24 |
| 2.3 | CÉLULAS, MÓDULOS E ARRANJOS FOTOVOLTAICOS | 24 |
| 2.3.1 | <i>Células Fotovoltaicas</i> | 25 |
| 2.3.2 | <i>Princípio de Funcionamento de uma Célula Fotovoltaica</i> | 25 |
| 2.3.3 | <i>Modelagem e Circuito Equivalente de uma Célula Fotovoltaica</i> | 27 |
| 2.3.4 | <i>Módulos Fotovoltaicos</i> | 34 |
| 2.3.5 | <i>Arranjos Fotovoltaicos</i> | 35 |
| 2.4 | SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ISOLADOS E CONECTADOS À REDE | 35 |
| 2.4.1 | <i>Sistemas Fotovoltaicos Isolados ou Autônomos</i> | 35 |
| 2.4.2 | <i>Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede</i> | 36 |
| 2.5 | CONVERSORES ESTÁTICOS | 37 |
| 2.5.1 | <i>Conversores cc-cc aplicados aos Sistemas Fotovoltaicos</i> | 38 |
| 2.5.2 | <i>Técnicas de MPPT</i> | 39 |
| 2.5.3 | <i>Inversores</i> | 40 |
| 2.6 | SISTEMAS DE AQUISIÇÃO DE DADOS E SISTEMAS DE SUPERVISÃO | 42 |
| 2.6.1 | <i>Sistema de Aquisição de Dados</i> | 42 |
| 2.6.2 | <i>Sistemas de Supervisão</i> | 43 |
| 2.7 | DADOS CLIMÁTICOS DA REGIÃO DA CIDADE DE GOIÂNIA | 46 |
| 2.7.1 | <i>Radiação Solar, Insolação e Nebulosidade</i> | 46 |
| 2.7.2 | <i>Temperatura Ambiente na Região da Cidade de Goiânia</i> | 47 |
| 3 | EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO SISTEMA | 50 |
| 3.1 | EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM CÉLULAS E PAINÉIS FOTOVOLTAICOS | 50 |
| 3.1.1 | <i>Parâmetros que afetam a Eficiência de Sistemas Fotovoltaicos</i> | 52 |
| 3.2 | EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO | 52 |
| 3.3 | TRANSFERÊNCIA DE CALOR | 55 |
| 4 | METODOLOGIA..... | 56 |
| 4.1 | PLANTA PILOTO DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA | 56 |
| 4.1.1 | <i>Características Técnicas e de Projeto da Planta Piloto de Geração Fotovoltaica</i> 57 | |
| 4.1.2 | <i>Conexão com a Rede da Concessionária e Regularização</i> | 59 |
| 4.2 | SISTEMA DE SUPRIMENTO DE ÁGUA | 59 |
| 4.2.1 | <i>Sistema de Bombeamento</i> | 60 |
| 4.2.2 | <i>Método de Aplicação de Água sobre os Painéis Fotovoltaicos</i> | 61 |
| 4.2.3 | <i>Crítérios para Definir a Necessidade de Aplicação de Água</i> | 62 |
| 4.2.4 | <i>Método para a Definição da Vazão de Água a ser aplicada sobre os Painéis</i> .. | 62 |
| 4.2.5 | <i>Implementação do Sistema para Grupo de Seis Painéis</i> | 63 |
| 4.3 | SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS E SUPERVISÃO | 64 |
| 4.3.1 | <i>Rede Modbus RTU – RS 485 para Aquisição de Dados</i> | 65 |
| 4.3.2 | <i>Implementação do Software de Supervisão para o Sistema de Geração</i> | 66 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 70 |

| | |
|--|-----------|
| 5.1 ANÁLISE DO GANHO ENERGÉTICO, DEFINIÇÃO DA VAZÃO DE ÁGUA A SER APLICADA, ANÁLISE DA NECESSIDADE DE APLICAÇÃO DE ÁGUA E OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO | 70 |
| 5.1.1 <i>Análise do Ganho Energético</i> | 70 |
| 5.1.2 <i>Definição da Vazão de Água a ser aplicada</i> | 73 |
| 5.1.3 <i>Análise da Necessidade de Aplicação de Água</i> | 73 |
| 5.1.4 <i>Motobomba monofásico</i> | 75 |
| 5.1.5 <i>Motobomba trifásico</i> | 75 |
| 5.1.6 <i>Definições e Conclusões do Sistema de Arrefecimento</i> | 76 |
| 5.2 ANÁLISE COMPARATIVA DOS DADOS COM A IMPLEMENTAÇÃO DO ARREFECIMENTO NO GRUPO DE SEIS PAINÉIS | 77 |
| 5.3 VIABILIDADE TÉCNICA DE IMPLEMENTAÇÃO DA PLANTA..... | 81 |
| 6 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS | 83 |
| 6.1 PUBLICAÇÕES OBTIDAS..... | 84 |
| 6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 84 |
| REFERÊNCIAS | 85 |
| APÊNDICE A – ESQUEMÁTICO DA PLACA DE POTÊNCIA..... | 89 |
| APÊNDICE B – ESQUEMÁTICO DA PLACA DE CONVERSÃO RS-232 PARA RS-485 | 90 |
| APÊNDICE C – ESQUEMÁTICO DA PLACA DE TEMPERATURAS | 91 |
| ANEXO A – CÓDIGO PLACA DE TEMPERATURA COM ATMEGA 328..... | 92 |
| ANEXO B – CÓDIGO PLACA DE TENSÃO E CORRENTE COM ATMEGA 328 | 93 |
| ANEXO C – CÓDIGO MATLAB PARA GERAÇÃO DOS GRÁFICOS..... | 94 |
| RESUMO DO CURRÍCULO LATTES | 96 |

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica desempenha papel indispensável na vida humana, sendo de fundamental importância integrar seu enfoque no contexto do desenvolvimento sustentável. Este fato requer uma abordagem holística e multidisciplinar, num cenário composto por características e problemas de ordem tecnológica, econômica, social, política e ambiental.

A questão energética tem influenciado as mudanças de paradigma que estão ocorrendo na humanidade, já que o suprimento eficiente e confiável de energia é considerado uma das condições básicas para o desenvolvimento econômico. Diversos problemas e desastres ecológicos e humanos das últimas décadas têm relação íntima com o suprimento de energia, oferecendo motivação e argumentos em favor do desenvolvimento sustentável (REIS, 2011).

A eletricidade pode ser produzida de muitas formas. Grande parte da energia elétrica produzida em todo o planeta tem origem na queima de combustíveis fósseis e na energia nuclear. Apenas uma pequena parte tem origem em fontes renováveis. Cerca de 80% da energia elétrica consumida no mundo é produzida a partir da queima do carvão, do petróleo, do gás natural e a partir de usinas nucleares, ou seja, a partir de fontes não renováveis, poluidoras e perigosas (VILLALVA, 2015).

As fontes renováveis de energia são consideradas inesgotáveis para os padrões humanos de utilização. A energia solar é um exemplo desse tipo de energia, que pode ser aproveitada diretamente para aquecimento ou geração de eletricidade. Segundo Villalva (2015), o sol é a principal fonte de energia do nosso planeta. A superfície da Terra recebe anualmente uma quantidade de energia solar, nas formas de luz e calor, suficiente para suprir milhares de vezes as necessidades mundiais durante o mesmo período. Apenas uma pequena parcela dessa energia é aproveitada.

De acordo com Reis (2011), os sistemas para geração de eletricidade baseados no uso da energia transmitida à terra pelo Sol podem ser de dois tipos principais: sistemas fotovoltaicos, que efetuam a transformação da energia solar em elétrica diretamente; e sistemas termosolares, em que a energia solar é usada para produzir o vapor que acionará uma termelétrica ou uma máquina (motor Stirling, por exemplo) a vapor.

Nos sistemas fotovoltaicos a energia solar pode ser convertida diretamente em eletricidade utilizando-se das tecnologias de células solares, que possuem diversas aplicações, desde sistemas rurais isolados (iluminação, bombeamento de água etc.), serviços profissionais (retransmissores de sinais, aplicações marítimas etc.), até aplicações de médio porte como sistemas de geração para comercialização (REIS, 2011).

Basicamente os sistemas de geração fotovoltaica são compostos por painéis fotovoltaicos. Um painel fotovoltaico (PV) representa um conjunto feito de várias células fotovoltaicas projetadas para converter a radiação solar em energia elétrica pelo efeito fotovoltaico. A característica mais importante de um painel fotovoltaico é a eficiência de conversão, que expressa a quantidade de radiação solar que se transforma em energia elétrica, em certas condições. Os valores máximos típicos da eficiência são alcançados entre 14% e 17%, no caso de células solares de silício monocristalino. A radiação solar que não é convertida em eletricidade é quase inteiramente transformada em calor (POPOVICI, 2015).

Estudos teóricos e experimentais de sistemas solares híbridos fotovoltaicos/térmicos (PVT), visando um melhor aproveitamento energético, foram documentados já em meados da década de 1970. Em diferentes ocasiões alguns pesquisadores apresentaram estudos e dados com o uso de água ou ar como refrigerante em sistemas solares. Wolf (1976) analisou um coletor térmico de placa plana com transferidor de calor através de um circuito líquido, sendo que o coletor continha, em vez da superfície de absorção usual, uma matriz solar de silício. Florschuetz (1975) apresentou um modelo para avaliação preliminar de um sistema de refrigeração para retirar calor de células solares submetidas a níveis concentrados de irradiação solar, com base no conceito de condutância térmica, onde são analisados esquemas de resfriamento ativo e passivo, tanto com ar quanto com água. Hendrie (1979) também realizou experimentos com sistemas solares híbridos PVT, chegando a eficiências térmicas máximas entre 40% e 45,2% para os coletores com líquidos em conjunto com ar, sem produção de energia elétrica, e diminuíram para a faixa entre 32,9% e 40,4% quando era produzida energia elétrica. Já a eficiência elétrica máxima foi de 6,8%.

Já na década de 1980 os trabalhos de pesquisa que se seguiram foram principalmente em coletores de placas planas, como as contribuições de Braunstein e Kornfeld (1986). Neste trabalho apresenta-se uma análise teórica do coletor PVT usando um modelo de simulação. Este modelo apresenta o coletor PVT dividido em uma matriz de unidades coletoras PVT's "pequenas", cada uma composta por várias camadas. O balanço energético de cada unidade de coletor PVT "pequeno" é estudado pela análise das energias que entram e deixam cada uma de suas camadas. Mais tarde, o processo foi aplicado ao próprio coletor PVT. Um coletor PVT foi projetado e construído e apresentou uma série de experimentos em condições de carga variáveis, níveis de insolação e outras condições climatológicas.

Ainda na década de 1980 foram realizados estudos incluindo análise de desempenho em sistemas PVT de concentração de luz. O'leary e Clements (1980) fizeram estudos em células fotovoltaicas dentro de uma pilha composta do receptor para um sistema de energia elétrica.

ca fotovoltaica de concentração que foi modelado como uma combinação de eletricidade e gerador de calor residual. Al-Baali (1986) utilizou um sistema constituído por dois estágios: um sistema de circulação de água foi necessário para superar a degradação em Voc (Tensão de circuito aberto) com temperatura de painel e, ao mesmo tempo, foi utilizado um espelho refletor para aumentar a radiação solar na superfície do painel, ou seja, para aumentar a Isc (Corrente de curto circuito). Com isso foi possível obter um aumento da potência e da água quente.

Na década seguinte, Prakash (1994) realizou análise transitória em um coletor PVT convencional projetado para aquecimento de ar e água, respectivamente. O sistema investigado consistiu em um painel de células solares para geração de eletricidade, por meio do qual se fez fluir o ar ou água em um duto colocado abaixo da superfície em que as células solares foram montadas para extrair calor do sistema, assim esfriando as células e aumentando a eficiência. O modelo matemático desenvolvido para prever o desempenho do sistema baseia-se em equações de equilíbrio de energia escritas para os vários nós do sistema e as equações diferenciais acopladas obtidas são resolvidas usando a técnica de diferença finita de *forward step marching*, onde foram previstas as temperaturas das células solares e do fluido de saída em função do tempo. Ao final, o desempenho do sistema PVT foi comparado com o de um painel fotovoltaico convencional. Bergene e Lovvik (1995) propuseram um modelo físico detalhado de um sistema coletor PVT de placa plana para avaliação de desempenho onde são apresentados algoritmos para fazer previsões quantitativas em relação ao desempenho do sistema. O modelo baseia-se em uma análise das transferências de energia devido à condução, convecção e radiação e prevê a quantidade de calor que pode ser extraída do sistema, bem como a saída de energia (dependente da temperatura).

Segundo Ito (2004), de um modo geral, os esforços em pesquisas e desenvolvimentos nos sistemas coletores PVT nos primeiros 25 anos, mais ou menos, foi em melhorar o custo desempenho em relação aos sistemas térmicos e fotovoltaicos convencionais. Para aplicações de projetos de construção real, os sistemas PVT a ar foram adotados mais facilmente nos países europeus e mercados norte-americanos, embora a maior eficiência dos sistemas PVT à água foram confirmados. Não obstante esta vantagem, o uso de painéis PVT à água em casas já foram vendidos comercialmente no Japão no final dos anos 90, mas o trabalho de construção foi interrompido em curto espaço de tempo devido à falta de demanda do mercado para sustentar sua lucratividade.

Atualmente muitos estudos têm sido realizados com o objetivo de promover a melhoria da eficiência energética em painéis fotovoltaicos. As características elétricas das células

fotovoltaicas podem ser alteradas devido a fatores intrínsecos e extrínsecos. Alguns fatores são resultantes do processo de fabricação e do material utilizado, e outros são fatores ambientais, tais como a radiação solar e a temperatura ambiente (SHARMA et al., 2015). Os estudos relacionados com a melhoria da eficiência pela diminuição de temperatura têm atuado principalmente em diferentes formas de arrefecimento dos painéis, utilizando-se de um fluido refrigerante, na grande maioria água (na sua parte frontal ou traseira), ou por meio de ventilação, natural ou forçada (MATIAS et al., 2016; DUBEY, SARVAIYA e SESHADRI, 2013). Matias (2016), apresenta o desenvolvimento de um aparato de arrefecimento que utiliza água num painel fotovoltaico comercial para analisar o aumento da eficiência através da diminuição da temperatura de operação. O sistema permite a aplicação de um fluxo de água reuso, à temperatura ambiente, sobre a superfície frontal de painel fotovoltaico. Através da utilização deste sistema de arrefecimento do módulo fotovoltaico, obteve-se uma melhoria líquida na eficiência de conversão de energia de 16,66%.

Já com relação a melhoria da eficiência dos painéis comerciais pela irradiação solar, os estudos que se tem feito são, em sua maioria, relacionados a dispositivos de rastreamento solar (KELLY e GIBSON, 2009).

Diante de um cenário onde é constante a busca do aproveitamento de energias renováveis de forma sustentável, economicamente viável, que ajude na expansão do uso destas formas de energia, na conservação das fontes de energia e no aumento da eficiência energética de dispositivos de conversão de energia, este trabalho apresenta a implantação de um sistema otimizado de geração fotovoltaica, onde foram analisados diversos valores de vazão para arrefecimento de painéis, indicando os valores ideais para máxima eficiência energética e menor utilização de recursos naturais.

Considerando que sistemas fotovoltaicos têm sua eficiência prejudicada pela elevação de temperatura, pretende-se neste trabalho desenvolver uma metodologia que produza melhorias na eficiência de painéis fotovoltaicos, pela utilização de água de reuso no arrefecimento dos painéis, em especial nos horários de maior temperatura do dia.

O trabalho também contribui no fornecimento de material de estudos e pesquisas para a comunidade acadêmica. Vale ressaltar ainda que o sistema implementado é parte integrante de uma planta piloto de 4,62 kWp, instalada na instituição de ensino e pesquisa, e compõe as estruturas laboratoriais do laboratório de fontes alternativas de energia do Núcleo de Estudos Experimentais e Tecnológicos (NEXt) do Instituto Federal de Goiás (IFG).

1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem por objetivo os estudos e a implementação de uma técnica para melhoria da eficiência de painéis fotovoltaicos baseado na diminuição da temperatura de operação por meio do arrefecimento com água de reuso (água da chuva).

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Apresenta-se os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver estudos e técnicas para promover a melhoria da eficiência de painéis fotovoltaicos;
- Desenvolver estudos para melhoria de eficiência do sistema de bombeamento da água a ser aplicada nos painéis;
- Implementar processo de aquisição de dados, supervisão e controle com a utilização de software supervisorio;
- Realizar uma análise comparativa da eficiência do sistema, com os painéis em temperatura ambiente e submetidos a resfriamento com aplicação de água de reuso;
- Analisar a viabilidade de implementação de arrefecimento de painéis fotovoltaicos em sistemas de maior porte.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O primeiro capítulo apresenta uma introdução enfatizando o estado da arte em relação ao assunto a ser tratado nesta dissertação, bem como os objetivos gerais e objetivos específicos do trabalho.

O capítulo 2 apresenta os fundamentos da energia solar fotovoltaica, enfatizando os conceitos mais relevantes relativos aos assuntos a serem abordados neste trabalho. São tratados assuntos como: efeito fotovoltaico; dados climáticos; células, módulos e arranjos fotovoltaicos; sistemas isolados e conectados à rede; conversores, sistema de aquisição de dados e supervisórios.

O capítulo 3 continua apresentando a fundamentação teórica, porém agora enfatizando os conceitos relativos à eficiência energética, onde são tratados os assuntos relacionados à eficiência energética em sistemas fotovoltaicos, sistemas de bombeamento e trata também sobre transferência de calor.

O capítulo 4 apresenta a metodologia de desenvolvimento da pesquisa, onde detalha-se a planta de geração fotovoltaica e suas características; o sistema de suprimento de água e suas

características e aspectos; o sistema de aquisição de dados junto ao sistema de supervisão e controle.

No capítulo 5 (Resultados e Discussão) são apresentados os resultados com suas respectivas análises. São analisados os dados relacionados ao sistema de bombeamento, os volumes a serem aplicados no arrefecimento e a relação desses com os ganhos de potência obtidos.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões e considerações finais, onde também são apresentadas as publicações obtidas e as sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTOS DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

O Sol fornece energia na forma de radiação, que é base da vida na Terra, e é hoje uma das alternativas energéticas mais promissoras para prover a energia necessária ao desenvolvimento humano. Quando se fala em energia, deve-se lembrar de que o Sol é responsável pela origem de praticamente todas as outras fontes de energia na Terra (PINHO, 2014).

A energia solar fotovoltaica é obtida através da conversão direta da luz em eletricidade (Efeito Fotovoltaico), sendo a célula fotovoltaica, um dispositivo fabricado com material semicondutor, o componente fundamental desse processo de conversão (PINHO, 2014).

De acordo com Pinho (2014), o efeito fotovoltaico, primeiramente descoberto por Edmond Becquerel em 1839, implica no aparecimento de uma diferença de potencial nos terminais de uma célula eletroquímica causada pela absorção de luz. Em 1876 foi concebido o primeiro aparato fotovoltaico advindo dos estudos da física do estado sólido e apenas em 1956, iniciou-se a produção industrial, seguindo o crescimento da área de eletrônica.

Inicialmente, o desenvolvimento da tecnologia apoiou-se na busca por empresas do setor de telecomunicações, de fontes de energia para sistemas instalados em localidades remotas. O segundo agente impulsionador foi a chamada “corrida espacial”. A célula fotovoltaica era, e continua sendo, o meio mais adequado (menor custo, peso e segurança) para fornecer a quantidade de energia necessária para longos períodos de alimentação de equipamentos eletrônicos no espaço (PINHO, 2014).

2.1 EFEITO FOTOVOLTAICO

O efeito fotovoltaico ocorre em materiais da natureza denominados semicondutores que se caracterizam pela presença de bandas de energia onde é permitida a presença de elétrons (banda de valência) e de outra onde totalmente “vazia” (banda de condução).

O semicondutor mais usado é o silício. Seus átomos se caracterizam por possuírem quatro elétrons que se ligam aos vizinhos, formando uma rede cristalina. Ao adicionarem-se átomos com cinco elétrons de ligação, como o fósforo, por exemplo, haverá um elétron em excesso que não pode ser emparelhado e que fica “sobrando”, fracamente ligado a seu átomo de origem. Isto faz com que, com pouca energia térmica, este elétron se livre, indo para a banda de condução. Diz-se assim que o fósforo é um dopante doador de elétrons e denomina-se dopante n ou impureza n (CRESESB-CEPEL, 2008). A Figura 1 ilustra uma célula fotovoltaica em corte, onde pode-se ver os semicondutores tipo n e tipo p .

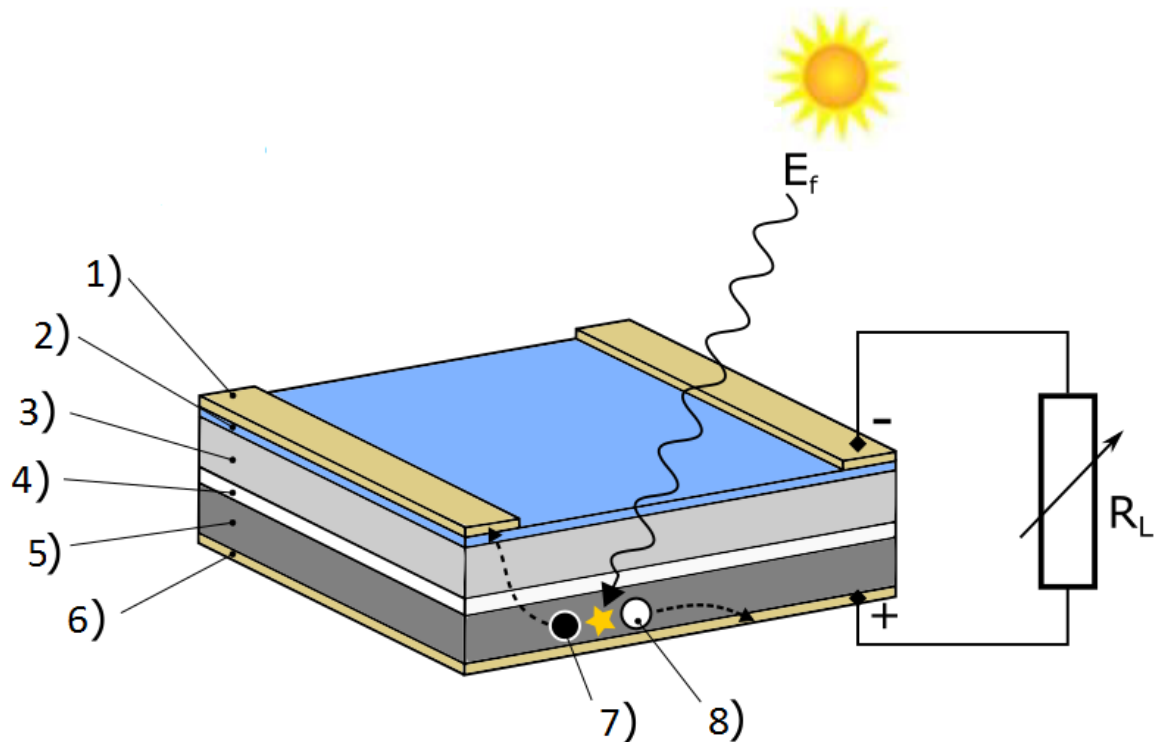


Figura 1 - Estrutura básica de uma célula fotovoltaica

1) contato metálico frontal; 2) filme antirreflexo; 3) silício tipo n (dopado com fósforo); 4) zona de carga espacial, onde se forma a junção pn e o campo elétrico; 5) silício tipo p (dopado com boro); 6) contato metálico posterior; 7) e 8) geração de par de elétron-lacuna.

Fonte: PINHO, 2014; com adaptações.

Se por outro lado introduzem-se átomos com apenas três elétrons de ligação, como é o caso do boro, haverá uma falta de um elétron para satisfazer as ligações com os átomos de silício da rede. Esta falta é denominada buraco ou lacuna e ocorre que, com pouca energia luminosa, um elétron de um sítio vizinho pode passar a esta posição, fazendo com que o buraco se desloque. Diz-se, portanto, que o boro é um aceitador de elétrons ou um dopante p .

Se partindo de um silício puro, forem introduzidos átomos de boro em uma metade e de fósforo na outra, será formado o que se chama junção pn . O que ocorre nesta junção é que elétrons livres do lado n passam ao lado p onde encontram os buracos que os capturam; isto faz com que haja um acúmulo de elétrons no lado p , tornando-o negativamente carregado e uma redução de elétrons do lado n , que o torna eletricamente positivo. Estas cargas aprisionadas dão origem a um campo elétrico permanente que dificulta a passagem de mais elétrons do lado n para o lado p ; este processo alcança um equilíbrio quando o campo elétrico forma uma barreira capaz de barrar os elétrons livres remanescentes no lado n (CRESESB-CEPEL, 2008).

Se uma junção *pn* for exposta a fótons com energia maior que o *gap*, ocorrerá a geração de pares elétron lacuna. Se isto acontecer na região onde o campo elétrico é diferente de zero, as cargas são aceleradas, gerando assim uma corrente através da junção. Este deslocamento de cargas dá origem a uma diferença de potencial elétrico ao qual chamamos de Efeito Fotovoltaico. Se as duas extremidades do “pedaço” de silício forem conectadas por um fio, haverá uma circulação de elétrons. Esta é a base do funcionamento das células fotovoltaicas (CRESESB-CEPEL, 2008).

2.2 GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Define-se como gerador fotovoltaico qualquer dispositivo capaz de converter energia solar em eletricidade por meio do efeito fotovoltaico, sendo a célula fotovoltaica o dispositivo que constitui a unidade básica de conversão de energia. Porém, a célula atinge valores de tensão da ordem de 0,5 V a 1,5 V, segundo as várias tecnologias existentes, que são incompatíveis com equipamentos elétricos de condicionamento de potência e armazenamento de energia. Assim, é necessária a adoção de alternativas para tornar esse dispositivo aplicável para a geração de energia em quantidades consideráveis para uso contínuo (ZILLES, 2015).

De acordo com Zilles (2015) é necessária a associação de várias células em série e/ou paralelo para se obterem tensões e correntes utilizáveis na prática. Além do mais, essa associação deve estar protegida para que possa ser exposta às intempéries, uma vez que as células fotovoltaicas são objetos frágeis e sensíveis à corrosão, o que faz com que sejam protegidas dos rigores climáticos (umidade, variações de temperaturas etc.). Os agrupamentos de células, comumente chamados de módulos, podem ser fabricados em diversas potências, capazes de gerar corrente em baixa tensão quando expostos à luz solar. Esses módulos constituem a unidade básica de geradores fotovoltaicos de maior potência, à medida que a energia requerida aumenta.

2.3 CÉLULAS, MÓDULOS E ARRANJOS FOTOVOLTAICOS

No sistema fotovoltaico, a transformação da radiação solar em eletricidade é direta. Para tanto, é necessário adaptar um material semicondutor (geralmente o silício) para que na medida em que é estimulado pela radiação, o fluxo eletrônico (partículas positivas e negativas) seja permitido.

Todas as células fotovoltaicas têm, pelo menos, duas camadas de semicondutores: uma positivamente carregada e outra negativamente carregada, formando uma junção eletrônica.

Quando a luz do sol atinge o semicondutor na região dessa junção, o campo elétrico existente permite o estabelecimento do fluxo eletrônico, antes bloqueado, e dá início ao fluxo de energia na forma de corrente contínua. Quanto maior a intensidade de luz, maior o fluxo de energia elétrica. Um sistema fotovoltaico não precisa do brilho intenso do sol para operar. Ele também pode gerar eletricidade em dias nublados (ANEEL, 2008).

2.3.1 Células Fotovoltaicas

Os primeiros dispositivos que podem ser denominados de células solares ou células fotovoltaicas foram fabricados em selênio e desenvolvidos por C. E. Frits em 1883. Nos anos 1950, foram fabricadas nos Laboratórios Bell, nos Estados Unidos, as primeiras células fotovoltaicas baseadas nos avanços tecnológicos na área de dispositivos semicondutores. Estas células fotovoltaicas foram fabricadas a partir de lâminas de silício cristalino e atingiram uma eficiência de conversão de energia solar em elétrica, relativamente alta para a época, de 6%, com potência de 5 *mW* e área de 2 *cm*² (PINHO, 2014).

De acordo com Pinho (2014), diversas tecnologias de fabricação de células fotovoltaicas foram desenvolvidas nos últimos 60 anos e as células fotovoltaicas fabricadas a partir de lâminas de silício cristalino (monocristalino ou policristalino) dominam o mercado mundial atualmente. As outras tecnologias comercializadas são baseadas em filmes finos de telureto de cádmio (*CdTe*), disseleneto de cobre índio e gálio (*CIGS*), silício amorfo hidrogenado (*a-Si:H*), silício microcristalino (*μc-Si*) e silício crescido em fitas (*Si-fitas*). Células fotovoltaicas multijunção de alta eficiência, células baseadas em corantes (*DSSC* – Dye Sensitized Solar Cells) ou polímeros também estão sendo desenvolvidas.

2.3.2 Princípio de Funcionamento de uma Célula Fotovoltaica

Ainda de acordo com Pinho (2014) na natureza existem materiais classificados como semicondutores, que se caracterizam por possuírem uma banda de valência totalmente preenchida por elétrons e uma banda de condução “vazia” (sem elétrons) na temperatura do zero absoluto (0 *K*). Assim sendo, um semicondutor comporta-se como um isolante a 0 *K*.

Na tabela periódica, os elementos semicondutores pertencem principalmente aos grupos 14 a 16 (antigos grupos IV A a VI A), incluindo Carbono (*C*), Silício (*Si*), Germânio (*Ge*), Arsênio (*As*), Fósforo (*P*), Selênio (*Se*) e Telúrio (*Te*). Além destes, existe um grande número de compostos binários, ternários e até quaternários, incluindo elementos de diversos grupos da tabela periódica, que também são semicondutores. Uma forma comum de denominação destes compostos é feita pelos grupos (da classificação antiga) a que pertencem os ele-

mentos que os formam. Assim, por exemplo, o Arsenieto de Gálio ($GaAs$) e o Nitreto de Gálio (GaN) são conhecidos como semicondutores do tipo III-V, o Telureto de Cádmiu ($CdTe$) como do tipo II-VI e o Disseleneto de Cobre-Índio como I-III-(VI). Como exemplo de semicondutores quaternários, pode-se citar o $InGaAsP$ e o $AlInGaN$, utilizados para a fabricação de LEDs (PINHO, 2014).

A separação entre as duas bandas de energia permitidas dos materiais semicondutores, denominada de banda proibida (band-gap, ou simplesmente gap) e representada por E_g , pode atingir até 3 eV (elétron-volt), diferenciando estes materiais dos considerados isolantes, onde a banda proibida supera este valor. A Figura 2 apresenta a estrutura de separação de bandas de energia para condutores, semicondutores e isolantes.

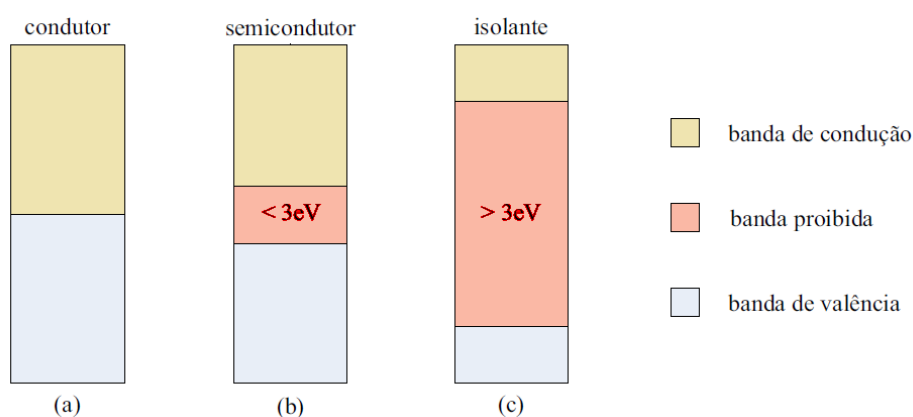


Figura 2 - Estruturas de banda de energia (a) condutores, (b) semicondutores e (c) isolantes.

Fonte: Pinho, 2014; com adaptações.

As bandas são, na realidade, compostas por um conjunto de inúmeros valores discretos permitidos de energia bastante próximos, por isso muitas vezes são consideradas como contínuas (PINHO, 2014).

Segundo Pinho (2014), os elétrons e lacunas foto-gerados podem mover-se dentro do material e aumentam sua condutividade elétrica, o que é denominado de efeito fotocondutivo. Este efeito é aproveitado para fabricação de componentes eletrônicos denominados fotocélulas ou fotoresistores (LDRs), no qual a resistência elétrica varia em função da luminosidade incidente. Contudo, para o aproveitamento de corrente e tensão elétricas é necessário aplicar um campo elétrico, a fim de separar os portadores, o que se consegue através da chamada junção pn . Para construí-la, é necessário introduzir impurezas de forma controlada no semicondutor, ou seja, realizar a dopagem, que consiste na introdução de pequenas quantidades de outros elementos, denominados impurezas ou dopantes, que mudam drasticamente as propriedades elétricas do material intrínseco (material sem dopagem, denominado de tipo i), confor-

me pôde ser observado na Figura 1, onde é mostrada a estrutura física de uma junção pn de uma célula fotovoltaica.

Na prática, para se obter a junção pn da célula parte-se, por exemplo, de uma lâmina de silício cristalino já previamente dopada, em sua fabricação, com átomos do tipo p e se introduzem átomos do tipo n , de forma a compensar a região previamente dopada e obter uma região tipo n na lâmina (por isso a maior concentração do dopante tipo n). Isto é feito na prática por meio da introdução do material em um forno a alta temperatura contendo um composto de Fósforo em forma gasosa. Da mesma maneira, também se pode formar a junção pn em uma lâmina de silício tipo n , com introdução posterior de átomos tipo p .

2.3.3 Modelagem e Circuito Equivalente de uma Célula Fotovoltaica

2.3.3.1 Modelagem de uma Célula Fotovoltaica

A corrente elétrica em uma célula fotovoltaica pode ser considerada como a soma da corrente de uma junção pn no escuro (diodo semiconductor) com a corrente gerada pelos fótons absorvidos da radiação solar. Considerando a célula fotovoltaica como sendo um diodo cuja a junção P-N pode ser exposta à radiação solar, tem-se que, a corrente resultante (I) que a célula é capaz de entregar para uma carga, é dada como a soma algébrica da corrente fotogerada (I_L) quando a junção da célula está iluminada e a corrente da célula com a junção no escuro (I_D) (HECKTHEUER, 2001), conforme Figura 3 e apresentado em (2.1).

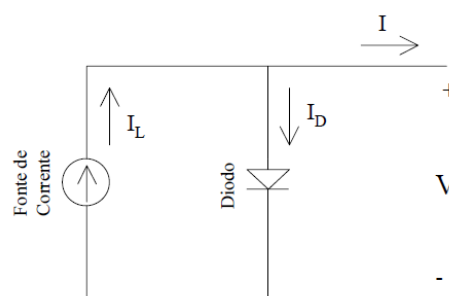


Figura 3 - Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica ideal

$$I = I_L - I_D(V) \quad (2.1)$$

onde I é a corrente da célula fotovoltaica, I_L é a corrente fotogerada e $I_D(V)$ é a corrente da célula no escuro.

Uma boa aproximação para determinar a corrente da célula no escuro é considerar (2.2), usando-se uma única exponencial, como:

$$I_D(V) = I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{e \cdot V}{m \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] \quad (2.2)$$

onde I_0 é a corrente de saturação reversa, e é a carga elétrica do elétron, V é a tensão nos terminais da célula, m é o fator de idealidade do diodo, k é a constante de Boltzman e T é a temperatura da junção da célula.

Desta forma, tem-se que (2.1) pode ser escrita como (2.3):

$$I = I_L - I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{e \cdot V}{m \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] \quad (2.3)$$

Considerando como positiva a fotocorrente, o primeiro quadrante dos eixos cartesianos para a curva característica I - V da célula corresponde ao funcionamento da célula comportando-se como gerador (tensão e corrente positivas).

2.3.3.2 Circuito Equivalente de uma Célula Fotovoltaica

Nem toda a corrente estabelecida pelas células reais é fornecida para a carga. Essas células apresentam fugas de corrente que são proporcionais a tensão. Para representar estas fugas, é adicionada ao circuito equivalente uma resistência em paralelo com o diodo. Para células de boa qualidade, as fugas de corrente são muito pequenas e, portanto, a resistência paralela tende ao infinito. Um outro fator que deve ser levado em conta é a queda de tensão ocasionada pela circulação de corrente através da própria célula, grade de metalização da sua face frontal e contatos elétricos. Para levar em conta essa queda de tensão, é acrescentada uma resistência série ao circuito equivalente. Células fotovoltaicas de boa qualidade apresentam baixos valores de resistência série.

Levando em consideração esses fatores, que possuem um caráter distribuído através da célula, mas que para efeitos práticos, na maioria dos casos, podem ser considerados concentrados em duas únicas resistências denominadas de resistência paralela e série. A Figura 4 apresenta o circuito equivalente de uma célula fotovoltaica não ideal.

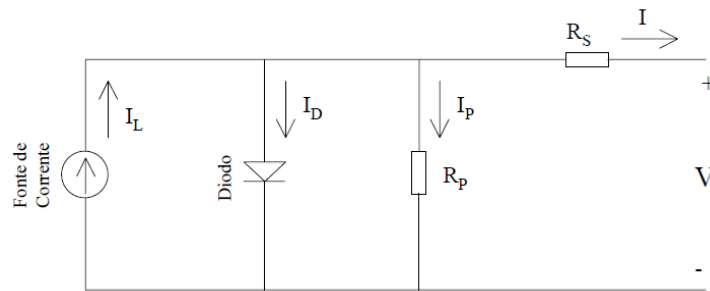


Figura 4 - Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica real

Analisando um dos nós do circuito equivalente da célula, a equação da corrente elétrica que a mesma fornece para uma carga a uma determinada tensão de polarização é dada por (2.4):

$$I = I_L - I_0 \cdot \left\{ \left[\exp \frac{e \cdot (V + I \cdot R_S)}{m \cdot k \cdot T} \right] - 1 \right\} - \frac{V + I \cdot R_S}{R_P} \quad (2.4)$$

onde I é a corrente total disponibilizada, e I_0 é a corrente de saturação reversa

2.3.3.3 Modelagem de um Módulo Fotovoltaico

A equação característica de uma célula fotovoltaica, dada por (2.4), pode ser adaptada para módulos fotovoltaicos que nada mais são do que uma associação de células.

Quando a tensão, corrente e resistências são referidas como sendo a de um módulo, o fator (mkT/e) deve ser multiplicado pelo número de células associadas em série no módulo, definindo-se então (2.5):

$$V_t = N_s \cdot \left(\frac{m \cdot k \cdot T}{e} \right) \quad (2.5)$$

Onde V_t é a tensão total e N_s é o número de células fotovoltaicas associadas em série.

Usando a definição dada por (2.5), a equação característica de um módulo fotovoltaico passa a ser (2.6):

$$I = I_L - I_0 \cdot \left\{ \left[\exp \frac{(V + I \cdot R_S)}{V_t} \right] - 1 \right\} - \frac{V + I \cdot R_S}{R_P} \quad (2.6)$$

Onde R_S é a resistência série e R_P é a resistência paralela do módulo fotovoltaico.

2.3.3.4 Curva Característica I-V-P de Módulos Fotovoltaicos

A curva característica de um módulo fotovoltaico, com os principais pontos de polarização do mesmo, é mostrada na Figura 5, onde apresenta-se a curva $I-V-P$ típica de um módulo fotovoltaico de Si . Deve-se observar que, apesar de ser normalmente apresentada no primeiro quadrante, fisicamente a curva $I-V$ se situa na realidade no quarto quadrante, por se tratar de um gerador, onde, a corrente tem sentido inverso (é negativa). Também na Figura 5 encontram-se destacados: a corrente de curto circuito (I_{sc}), a tensão de circuito aberto (V_{oc}), o ponto de máxima potência (P_{mp}), também apresenta a corrente e a tensão no ponto de máxima potência (I_{mp} e V_{mp}).

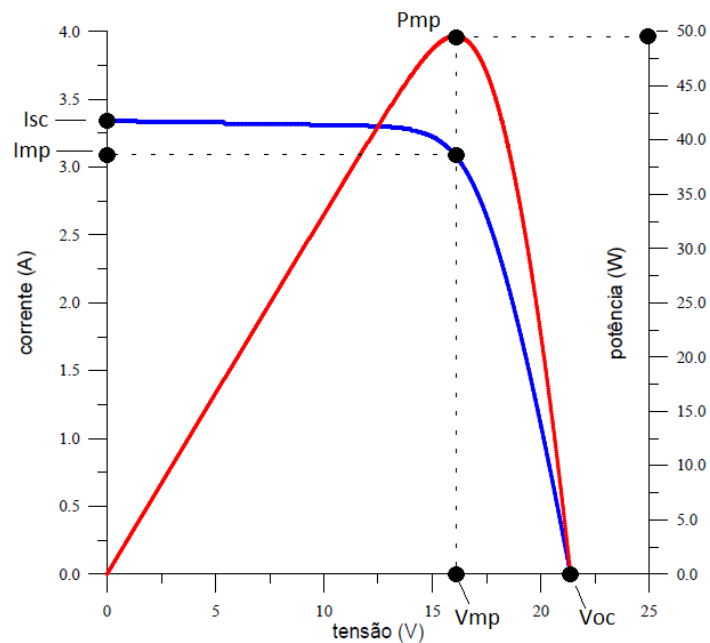


Figura 5 - Curva característica I-V-P de um módulo fotovoltaico

Para os painéis e células fotovoltaicas de uso terrestre, sem concentração da energia solar, a curva $I-V$ é medida em condições-padrão de ensaio: irradiância de 1.000 W/m^2 , espectro solar AM 1,5 e temperatura da célula fotovoltaica de 25°C . Para essa medição, geralmente, utiliza-se um simulador solar e um sistema de medição automatizado (PINHO, 2014).

2.3.3.5 Parâmetros elétricos

Conforme Pinho (2014), a partir da curva I - V mostrada na Figura 5, podem ser determinados os parâmetros elétricos que caracterizam as células ou módulos fotovoltaicos: tensão de circuito aberto (V_{oc}), corrente de curto-circuito (I_{sc}), fator de forma (FF), que é a razão entre a máxima potência da célula e o produto da corrente de curto circuito com a tensão de circuito aberto, e eficiência (η), que é o parâmetro que define o quão efetivo é o processo de conversão de energia solar em energia elétrica. Pode ser definida por (2.7):

$$\eta = \frac{I_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{A \cdot G} \cdot 100\% = \frac{P_{MP}}{A \cdot G} \cdot 100\% \quad (2.7)$$

onde A (m^2) é a área da célula e G (W/m^2) é a irradiância solar incidente. A unidade de medida da potência da célula e do módulo fotovoltaico é o Wp (*watt-pico*), que é associada às condições-padrão de ensaio (STC).

2.3.3.6 Parâmetros externos que afetam as características elétricas

O desempenho das células fotovoltaicas é influenciado pela irradiância incidente e sua distribuição espectral, bem como pela temperatura de operação da célula, inclusive em condições de irradiância de até 1 sol (ou 1 X), que corresponde a $1.000 W/m^2$. Em condições de concentração da radiação solar, o que implica na utilização de dispositivos ópticos (lentes ou espelhos) para obtenção de níveis de irradiância superiores aos naturais, a eficiência das células fotovoltaicas pode aumentar se a temperatura for controlada. Nos casos de alta irradiância, a resistência série (R_s) torna-se um fator que pode reduzir a eficiência, se a célula fotovoltaica não for projetada para essas condições (PINHO, 2014).

Por outro lado, quando incidem baixos valores de radiação solar, a resistência paralela (R_p) pode reduzir ainda mais a potência elétrica gerada (PINHO, 2014).

2.3.3.7 Influência da irradiância solar

A Figura 6 mostra como a irradiância solar incidente afeta a curva I - V de uma célula fotovoltaica de silício, mantida na temperatura de $25^\circ C$. A radiação solar incidente em uma célula fotovoltaica provoca o aparecimento de uma corrente fotogerada que é diretamente proporcional a esta radiação. Já a corrente de curto-circuito da célula, desprezando os efeitos da sua resistência série, também varia na mesma proporção da radiação.

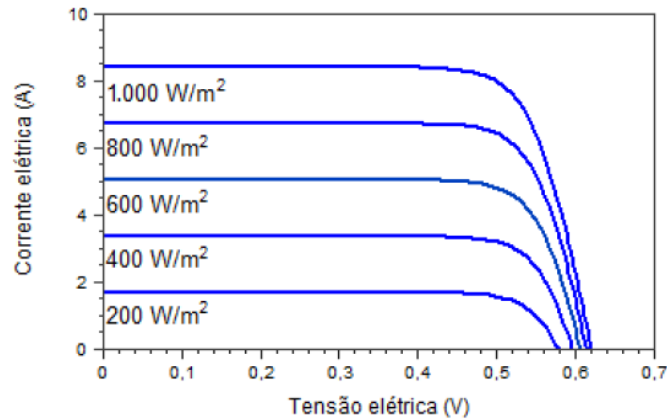


Figura 6 - Influência da irradiância solar em uma célula fotovoltaica a 25 °C

Quando ao módulo fotovoltaico não é conectado nenhuma carga, a corrente através de seus terminais é nula. Enquanto o módulo permanecer em circuito aberto, este se polariza em uma tensão chamada tensão de circuito aberto (V_{OC}), na qual a corrente fotogerada é compensada praticamente toda pela corrente de polarização do diodo em módulos de boa qualidade (R_p alta). Desta forma, considerando que (V_{OC}/R_p) é muito menor que I_L e $I_0 \exp(V_{OC}/V_T)$, e (2.6) assume a forma (2.8):

$$V_{OC} = V_t \cdot \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right) \quad (2.8)$$

Portando a variação da tensão de circuito aberto da célula, em função da variação da radiação incidente, pode ser determinada a partir de (2.8) e é dada por (2.9):

$$\Delta V_{OC} = \frac{m \cdot k \cdot T}{e} \ln\left(\frac{G_1}{G_2}\right) \quad (2.9)$$

Onde ΔV_{OC} é a variação da tensão de circuito aberto, G_1 é a irradiância inicial e G_2 a irradiância final.

Verifica-se que para níveis de irradiância entre 1000 W/m² e 700 W/m², a tensão de circuito aberto é pouco afetada pela irradiância. Para valores baixos de irradiância, ela vai diminuindo e decresce de forma exponencial chegando a zero na condição de completa escuridão ($G = 0$ W/m²). Estas variações na tensão de circuito aberto não dependem da área da célula e sim do material de que são feitas as células (HECKTHEUER, 2001).

2.3.3.8 Influência da temperatura

As variações da irradiância solar incidente e da temperatura ambiente afetam a temperatura de operação das células fotovoltaicas que compõem os módulos fotovoltaicos. A Figura 7, mostra curvas I - V para diversas temperaturas da célula fotovoltaica, com irradiância de 1.000 W/m^2 (PINHO, 2014).

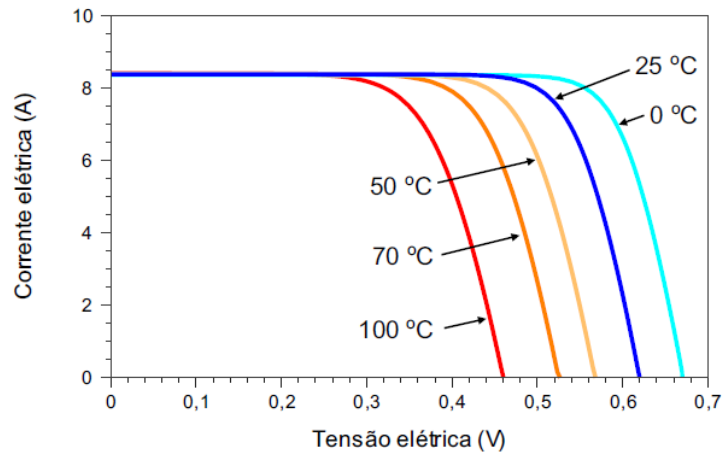


Figura 7 - Influência da temperatura na célula fotovoltaica com irradiância de 1000 W/m^2 .

Com relação a corrente fotogerada em uma célula, um aumento da sua temperatura faz com que o *gap* de energia do material semiconductor diminua e por consequência, essa corrente tem um pequeno acréscimo.

Em função das variações acima citadas, são definidos dois coeficientes térmicos para os módulos fotovoltaicos. O primeiro, representado por β , fornece a variação da tensão de circuito aberto de um módulo em função da variação de temperatura (T). Este coeficiente é definido por (2.10):

$$\beta = \frac{\partial V_{oc}}{\partial T} \quad (2.10)$$

O segundo coeficiente, representado por α , fornece a variação da corrente de curto-circuito de um módulo em função da variação da temperatura e é definido por (2.11):

$$\alpha = \frac{\partial I_{sc}}{\partial T} \quad (2.11)$$

Para células de silício monocristalino, valores típicos de α e β , são de, respectivamente, $0,0003 \cdot I_{sc} / ^\circ C$ e $-2 \text{ mV}/^\circ C$.

2.3.4 Módulos Fotovoltaicos

Por causa baixa tensão e baixa corrente de saída em uma célula fotovoltaica, normalmente agrupa-se várias células formando um módulo. Os arranjos das células nos módulos podem ser feitos conectando-as em série ou em paralelo. Ao conectar as células em paralelo, soma-se as correntes de cada módulo e a tensão do módulo é exatamente a tensão da célula. A corrente produzida pelo efeito fotovoltaico é contínua. Pelas características típicas das células (corrente máxima por volta de 3A e tensão muito baixa, em torno de 0,7 V) este arranjo não é utilizado salvo em condições muito especiais. A conexão mais comum de células fotovoltaicas em módulos é o arranjo em série. Este consiste em agrupar o maior número de células em série onde soma-se a tensão de cada célula (CRESESB-CEPEL, 2008).

Quando uma célula fotovoltaica dentro de um módulo, por algum motivo, estiver encoberta, a potência de saída do módulo cairá drasticamente que, por estar ligada em série, comprometerá todo o funcionamento das demais células no módulo. Para que toda a corrente de um módulo não seja limitada por uma célula de pior desempenho (o caso de estar encoberta), usa-se um diodo de passo ou de “by-pass”. Este diodo serve como um caminho alternativo para a corrente e limita a dissipação de calor na célula defeituosa. Geralmente o uso do diodo by-pass é feito em agrupamentos de células o que o torna muito mais barato comparado ao custo de se conectar um diodo em cada célula (CRESESB - CEPEL, 2008). A Figura 8 apresenta uma ligação do diodo de by-pass.

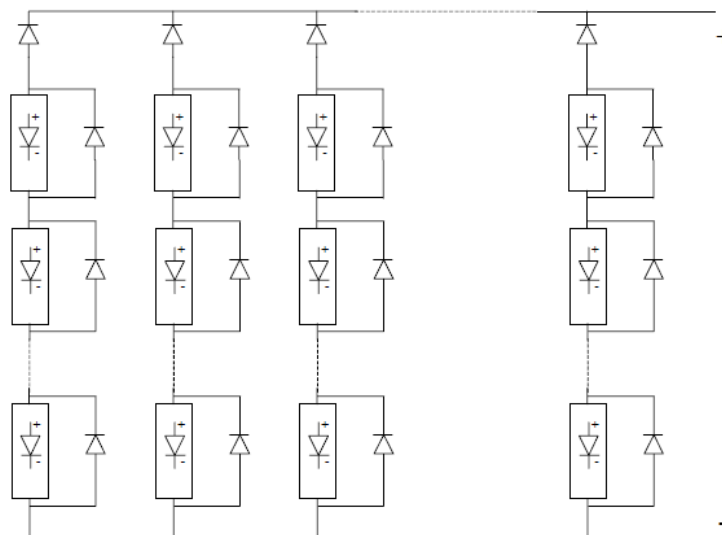


Figura 8 - Associação série-paralelo com diodo de by-pass.

Um outro problema que pode acontecer é quando surge uma corrente negativa fluindo pelas células, ou seja, em vez de gerar corrente, o módulo passa a receber muito mais do que

produz. Esta corrente pode causar queda na eficiência das células e, em caso mais drástico, a célula pode ser desconectada do arranjo causando assim a perda total do fluxo de energia do módulo. Para evitar esses problemas, usa-se um diodo de bloqueio impedindo assim correntes reversas que podem ocorrer caso liguem o módulo diretamente em um acumulador ou bateria (CRESESB-CEPEL, 2008). A Figura 9 apresenta a representação da ligação de um diodo de bloqueio.

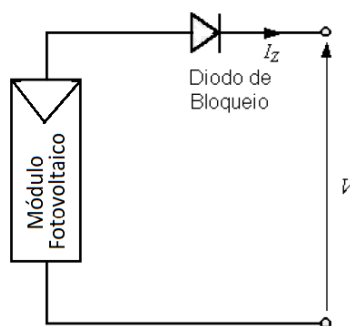


Figura 9 - Representação da ligação de um diodo de bloqueio.

2.3.5 Arranjos Fotovoltaicos

Arranjo Fotovoltaico é o conjunto formado por módulos fotovoltaicos ligados eletricamente entre si e que funcionam como um único gerador de energia elétrica. Como dito anteriormente os módulos podem ser ligados entre si em paralelo ou em série, dependendo da sua aplicação. Quando é feita a ligação em série, as tensões são somadas e a corrente permanece inalterada. Quando se tem uma ligação em paralelo, as tensões nas células são iguais e as correntes são somadas (CRESESB-CEPEL, 2008).

2.4 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ISOLADOS E CONECTADOS À REDE

A energia elétrica gerada pode ser entregue à rede de distribuição (baixa tensão ou média tensão) ou utilizada para alimentar cargas em rede isolada. Essa é a principal razão pela qual se distinguem dois tipos de sistemas de energia solar fotovoltaica em Sistemas Fotovoltaicos Isolados (SFI) ou Autônomos e Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR) (GAZOLI, 2011).

2.4.1 Sistemas Fotovoltaicos Isolados ou Autônomos

Este sistema é totalmente dependente da presença da luz do sol para funcionamento, pois a energia elétrica armazenada pela bateria é finita. Além disso, durante a noite o sistema só opera se a bateria estiver carregada. É muito utilizado em localidades onde a energia elétrica não chega através da rede pública de distribuição, como em comunidades isoladas. Os sis-

temas isolados caracterizam-se por possuírem, minimamente, um módulo solar fotovoltaico, uma bateria ou um conjunto de baterias para armazenar a energia elétrica e um controlador de carga para gerenciar a energia elétrica armazenada na bateria e protegê-la contra cargas e descargas excessivas. Quando se necessita de energia elétrica em corrente alternada, utiliza-se, também, um inversor *CC-CA* para a conversão da corrente contínua da bateria em corrente alternada (GAZOLI, 2011). A Figura 10 apresenta um exemplo de um sistema isolado.

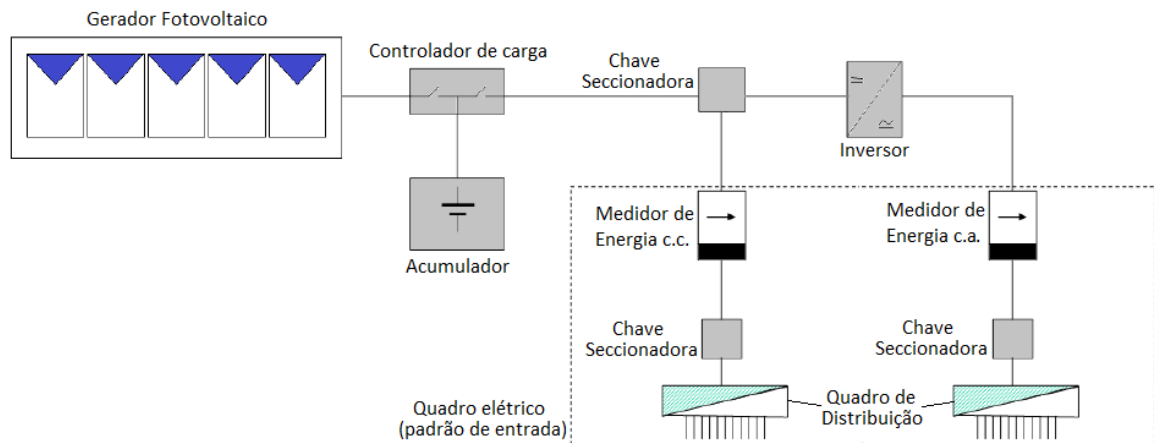


Figura 10 - Diagrama de um sistema isolado com instalações *cc* e *ca*.
Fonte: GAZOLI, 2011

2.4.2 Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede

Os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCCR) dispensam o uso de acumuladores, pois a energia por eles produzida pode ser consumida diretamente pela carga, ou injetada diretamente na rede elétrica convencional, para ser consumida pelas unidades consumidoras conectadas ao sistema de distribuição. Estes sistemas são basicamente de um único tipo e são aqueles em que o gerador fotovoltaico representa uma fonte complementar ao sistema elétrico ao qual está conectado (GAZOLI, 2011).

Instalações deste tipo vêm se tornando cada vez mais populares em diversos países europeus, Japão, Estados Unidos, e mais recentemente no Brasil. As potências instaladas vão desde poucos *kWp* em instalações residenciais, até alguns *MWp* em grandes sistemas operados por empresas (GAZOLI, 2011).

Com o objetivo de reduzir os custos a tempo para a conexão da microgeração e mini-geração; compatibilizar o Sistema de Compensação de Energia Elétrica com as condições Gerais de Fornecimento (Resolução Normativa nº 414/2010); aumentar público-alvo; melhorar as informações na fatura, a ANEEL publicou a Resolução Normativa nº 687/2015 revisan-

do a Resolução Normativa nº 482/2012. Também devem atender aos Procedimentos de Distribuição (PRODIST), Módulo 3, e às normas de acesso das distribuidoras locais.

2.4.2.1 Medição bidirecional de registros independentes

De acordo com Pinho (2014), conforme exemplificado pela Figura 11, a energia consumida e a energia injetada na rede de distribuição são registradas separadamente pelo medidor bidirecional (ou por dois medidores que medem a energia em cada sentido). A cada instante apenas o registro em um dos sentidos será realizado, dependendo da diferença instantânea entre a demanda e a potência gerada pelo sistema fotovoltaico.

Este é o tipo de registro requerido pela Aneel na regulamentação em vigor. A Aneel estipulou ainda, pela Resolução Normativa Nr. 569 de 23 de julho de 2013, que as unidades consumidoras do grupo B, onde os consumidores residenciais estão incluídos, não podem ser cobradas pelo excedente de reativos devido ao baixo fator de potência.

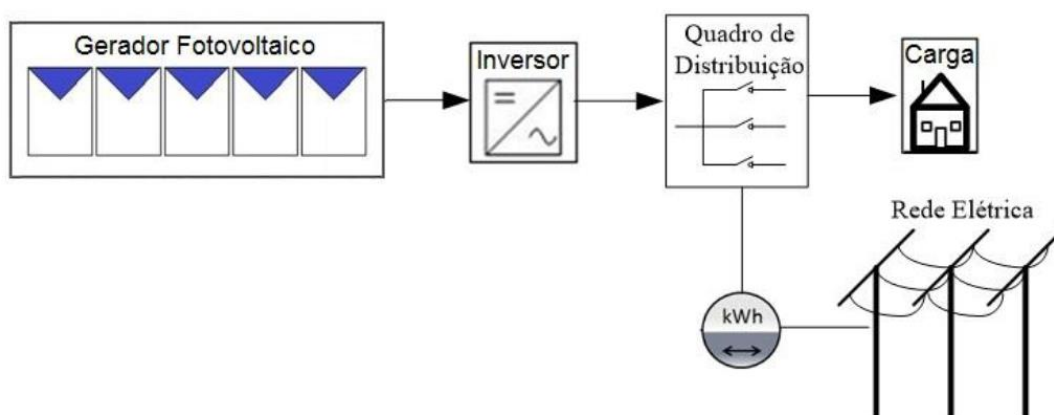


Figura 11 - Sistema fotovoltaico com medição bidirecional.
Fonte: PINHO, 2014

2.5 CONVERSORES ESTÁTICOS

Um conversor estático pode ser definido como um sistema, constituído por elementos passivos (resistores, capacitores e indutores) e elementos ativos (interruptores), tais como Diodos, Tiristores, Transistores, GTO's, Triacs, IGBT's e MOSFET's, associados segundo uma lei preestabelecida (BARBI, 2006).

Os conversores realizam o tratamento eletrônico da energia elétrica. São empregados para o controle de fluxo da energia elétrica entre dois ou mais sistemas elétricos (BARBI,

2006). As principais funções realizadas pelos conversores estáticos estão representadas na Figura 12.

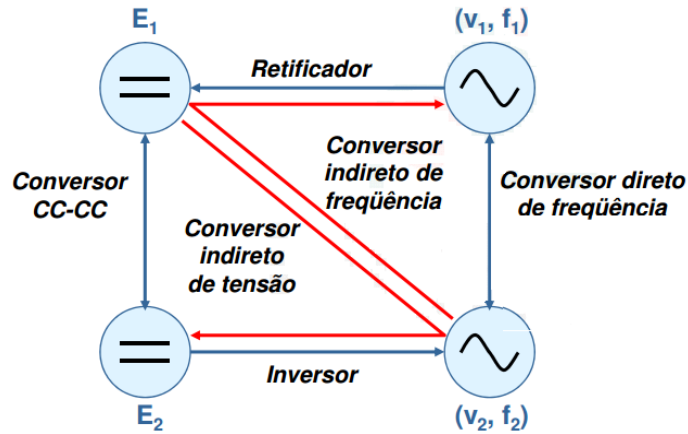


Figura 12 - Principais funções dos conversores estáticos.
Fonte: BARBI, 2006

2.5.1 Conversores *cc-cc* aplicados aos Sistemas Fotovoltaicos

Conversores *cc-cc* são circuitos eletrônicos que convertem uma tensão ou corrente contínua com uma determinada amplitude em outra tensão ou corrente contínua com amplitude diferente. Estes circuitos realizam a conversão aplicando tensão contínua pulsante num componente indutivo como bobina ou transformador, com uma determinada frequência, fazendo com que o fluxo de corrente seja armazenado e mais tarde libertado para uma saída. Existem dois grupos distintos de conversores, os isolados e os não isolados, pelo que a principal diferença se dá com relação ao uso de transformadores de alta frequência nos conversores isolados, de forma a evitar o uso de um *duty-cycle* (que define a parcela de tempo em que um sistema ou componente está no estado ativo) muito grande ou muito pequeno, conforme as tensões de entrada e saída (COSTA E SILVA, 2012).

O conversor *cc-cc* é um dispositivo de eletrônica de potência, que apresenta uma ou mais chaves controladas, por meio das quais se pode modificar o valor de tensão de saída em relação à tensão de entrada, de acordo com as necessidades. Nos casos em que a tensão de saída do conversor apresenta um valor inferior à tensão aplicada no mesmo, este é conhecido como conversor *Buck*, e no caso contrário, conversor *Boost*. Os conversores *Buck-Boost*, combinam as características de abaixadores e elevadores e são usados para converter uma tensão de entrada em um valor menor ou maior, de acordo com a necessidade (CARRIJO, 2010).

Normalmente para aplicações em sistemas fotovoltaicos são utilizados conversores *Buck* ou *Boost* que conectam o painel fotovoltaico à carga (CARRIJO, 2010). Desta forma, na Figura 13 é apresentado um esquema do circuito de potência equivalente do painel fotovoltaico, o conversor *Boost* e a carga.

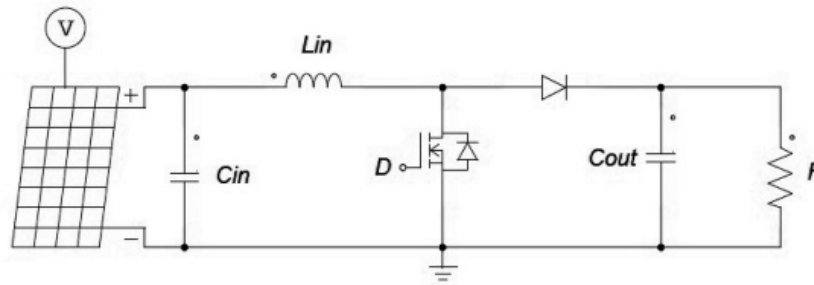


Figura 13 - Exemplo de Conversor Boost com painel fotovoltaico.

Neste caso, o conversor tem por objetivo alterar a tensão de alimentação da carga, variando a razão cíclica da chave D . Isto é feito de acordo com a curva característica do Sistema de Geração fotovoltaica/carga. Assim, para que independente das condições ambientais (irradiação solar e temperatura) e da carga conectada, o painel fotovoltaico forneça sempre a máxima potência.

2.5.2 Técnicas de MPPT

Devido a não linearidade da relação entre os parâmetros de saída das células fotovoltaicas causadas por variações climáticas (irradiação solar e temperatura) é necessária a utilização de técnicas de extração da máxima potência (MPPT – *Maximum Power Point Tracking*) para maximizar a produção de energia elétrica por um sistema fotovoltaico e aumentar a eficiência global do sistema (SPADUTO, 2013).

A Figura 14 ilustra as curvas de potência com a variação de irradiação e temperatura, respectivamente. Analisando as figuras supracitadas, observa-se que tensão e a corrente gerada em um módulo fotovoltaico são extremamente dependentes da insolação diária e da temperatura ambiente e apresentam um comportamento não linear, surgindo, portanto, a necessidade de se implementar técnicas de controle que sejam capazes de rastrear o ponto de máxima potência (MPPT), destacado em vermelho na Figura 14, em qualquer condição de irradiação e/ou temperatura (SPADUTO, 2013).

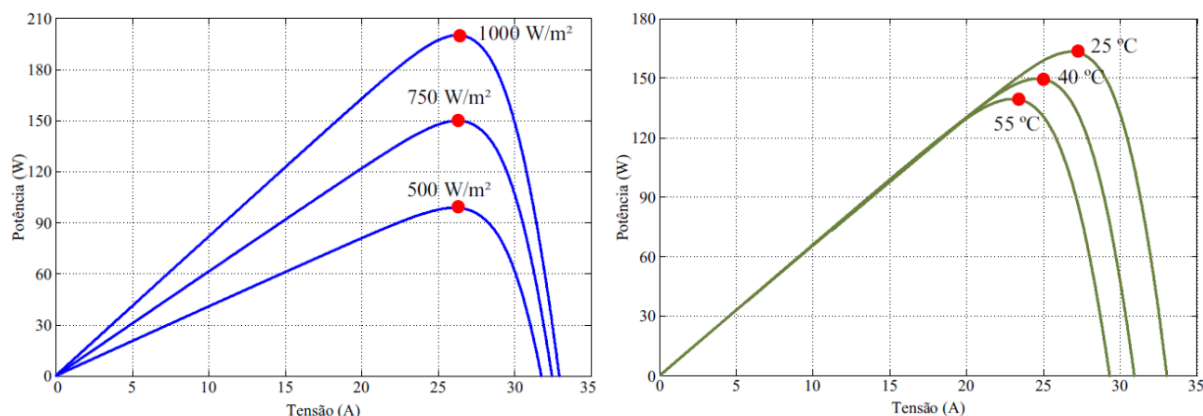


Figura 14 - Curvas de potência para diferentes irradiâncias e para diferentes temperaturas.

De acordo com Spaduto (2013), há nove técnicas de MPPT amplamente difundidas na literatura que se destacam, são elas:

1. Razão Cíclica Fixa;
2. Tensão Constante;
3. Perturbe e Observe (*P&O*);
4. Perturbe e Observe (*P&O*) Modificado;
5. Condutância Incremental;
6. Condutância Incremental Modificada;
7. Método Beta;
8. Oscilação do Sistema;
9. Correlação de Ripple.

Dentre os métodos citados, o Beta é o que apresenta melhor desempenho no rastreamento do ponto de máxima potência, porém, o *P&O* merece uma maior atenção por ser de fácil implementação e é uma das técnicas mais utilizadas para o rastreamento do MPPT. A técnica *P&O* opera periodicamente incrementando ou decrementando a tensão de saída terminal do módulo e comparando a potência obtida no ciclo atual com a potência do ciclo anterior. Caso ocorra alteração, como por exemplo, um aumento de potência, o ponto de operação é movido nesta direção; caso contrário, o ponto de operação é movido na direção oposta (FARRANDA, 2008).

2.5.3 Inversores

Um inversor é um dispositivo eletrônico que fornece energia elétrica em corrente alternada (*ca*) a partir de uma fonte de energia elétrica em corrente contínua (*cc*). A energia *cc*

pode ser proveniente, por exemplo, de baterias, células a combustível ou módulos fotovoltaicos. A tensão ca de saída deve ter amplitude, frequência e conteúdo harmônico que sejam adequados às cargas a serem alimentadas. Adicionalmente, no caso de sistemas conectados à rede elétrica a tensão de saída do inversor deve ser sincronizada com a tensão da rede (PINHO; GALDINO, 2014).

Segundo Pinho (2014), para os sistemas fotovoltaicos, os inversores podem ser divididos em duas categorias com relação ao tipo de aplicação: SFIs (Sistema Fotovoltaicos Isolados) e SFCRs (Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede). Embora os inversores para SFCRs compartilhem os mesmos princípios gerais de funcionamento que os inversores para SFIs, eles possuem características específicas para atender às exigências das concessionárias de distribuição em termos de segurança e qualidade da energia injetada na rede.

Os inversores modernos utilizam chaves eletrônicas de estado sólido e o seu desenvolvimento está diretamente ligado à evolução da eletrônica de potência, tanto em termos de componentes (especialmente semicondutores) quanto das topologias de seus circuitos de potência e controle. Enquanto os primeiros inversores para uso em sistemas fotovoltaicos eram meras adaptações de circuitos já existentes, os circuitos mais modernos são desenvolvidos levando em conta a complexidade e as exigências de sua aplicação específica. Desta forma, no decorrer de poucas décadas, as topologias foram sendo otimizadas e os custos de fabricação reduzidos, enquanto as eficiências de conversão evoluíram até chegar a valores próximos a 99 % em alguns inversores para conexão à rede elétrica (PINHO, 2014).

Os inversores são construídos com auxílio de dispositivos semicondutores de potência, que constituem chaves eletrônicas controláveis, podendo ser colocados em estado de condução ou de bloqueio por meio de um sinal de controle, e permitem assim a conversão de tensão cc para ca e vice-versa.

Uma chave ideal teria as seguintes características:

- Bloqueia elevadas tensões diretas e reversas, com corrente de fuga desprezível;
- Conduz elevadas correntes, com queda de tensão desprezível (baixa resistência);
- Chaveia instantaneamente (mudando estado de condução para bloqueio, ou vice-versa);
- Necessita de baixíssima potência para o sinal de controle;

Obviamente, as chaves reais disponíveis apenas se aproximam destas características, e a pesquisa de novos dispositivos semicondutores é contínua. Os dispositivos que vêm sendo

utilizados em inversores são aqueles denominados de tiristores (SCR, TRIAC e GTO) e também os chamados de transistores (BJT, MOSFET e IGBT) (BARBI, 2006).

2.6 SISTEMAS DE AQUISIÇÃO DE DADOS E SISTEMAS DE SUPERVISÃO

Atualmente os sistemas de supervisão e controle possuem, entre outros elementos, sistemas digitais compostos por computadores, controladores e respectivos softwares. Estes são ligados a sensores e atuadores, que permitem construir sistemas e aparelhos autômatos, que diante de uma determinada situação de um sistema respondem com ações físicas a esta situação. Deste modo, são utilizados elementos de eletrônica para prototipagem e pode ser utilizada por pesquisadores e projetistas (designers) de diversas áreas (RALMEMAN, 2014). O custo dos circuitos também é relativamente baixo. Devido a isso é possível desenvolver pesquisas utilizando ferramentas computacionais sem depender unicamente de profissionais especializados em determinadas áreas, como eletrônica, por exemplo (BANZI, 2011).

2.6.1 Sistema de Aquisição de Dados

São dispositivos usados em instrumentação científica e englobam conjuntos de processos de coleta de sinais que medem condições físicas do mundo real. Convertem os sinais coletados, primeiramente em sinais elétricos e em seguida em valores numéricos digitais. Estes dados podem ser armazenados em um computador para análise e tratamento posterior (EMILIO, 2013).

Um sistema de aquisição de dados é geralmente composto por: sensores e transdutores (que convertem os parâmetros físicos em sinais elétricos), circuitos de tratamento de sinais (que processam e condicionam os sinais dos sensores de forma a possibilitar a conversão em valores digitais), conversores analógico-digitais (que transformam os sinais analógicos condicionados dos sensores em valores digitais), e interfaces de comunicação com um computador. Adicionalmente a parte de hardware, os sistemas de aquisição de dados trabalham paralelamente com sistemas de software ou aplicativos para possibilitar a comunicação e interação com computadores (EMILIO, 2013).

Os sistemas de aquisição modernos são formados por circuitos eletrônicos complexos com base em unidades centrais de processamento (UCP) denominadas microprocessadores ou microcontroladores, geralmente proprietários, direcionados a tarefas específicas, de alto custo, e cujos projetos e esquemas são de divulgação reservada ou restrita.

Recentemente foram criados projetos que possibilitam e facilitam o acesso à programação de microcontroladores a um público amplo. Em particular, o Projeto Arduino é uma

plataforma eletrônica de prototipagem de acesso aberto que disponibiliza de forma livre sistemas compostos de placas de circuito impresso compatíveis que possuem como componente base microcontroladores da série Atmel, com suporte de entrada/saída embutido, e uma linguagem de programação padrão juntamente a um ambiente de desenvolvimento. O projeto cria ferramentas de hardware e software direcionadas ao uso de microcontroladores que sejam acessíveis, de baixo custo, flexíveis, compatíveis e fáceis de usar, voltados para uma ampla maioria de usuários que não possuem esse nível de acesso a sistemas proprietários (SILVA e CHOQUE, 2016).

2.6.2 Sistemas de Supervisão

Os sistemas supervisórios permitem que sejam monitoradas e rastreadas informações de um processo produtivo ou instalação física. Tais informações são coletadas através de equipamentos de aquisição de dados e, em seguida, manipulados, analisados, armazenados e, posteriormente, apresentados ao usuário. Estes sistemas também são chamados de SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) (DANEELS, 2000).

Os primeiros sistemas SCADA, basicamente telemétricos, permitiam informar periodicamente o estado corrente do processo industrial, monitorando sinais representativos de medidas e estados de dispositivos, através de um painel de lâmpadas e indicadores, sem que houvesse qualquer interface aplicacional com o operador.

Atualmente, os sistemas de automação industrial utilizam tecnologias de computação e comunicação para automatizar a monitoração e controle dos processos industriais, efetuando coleta de dados em ambientes complexos, normalmente dispersos geograficamente, e a respectiva apresentação de modo amigável para o operador, com recursos gráficos elaborados (interfaces homem-máquina) e conteúdo multimídia (DANEELS, 2000).

De acordo com Daneels (2000), para permitir isso, os sistemas SCADA identificam as *tags*, que são todas as variáveis numéricas ou alfanuméricas envolvidas na aplicação, podendo executar funções computacionais (operações matemáticas, lógicas, com vetores ou strings, etc.) ou representar pontos de entrada/saída de dados do processo que está sendo controlado. Neste caso, correspondem às variáveis do processo real (ex: temperatura, nível, vazão etc.), se comportando como a ligação entre o controlador e o sistema. É com base nos valores das *tags* que os dados coletados são apresentados ao usuário.

Os sistemas SCADA podem também verificar condições de alarmes, identificadas quando o valor da *tag* ultrapassa uma faixa ou condição preestabelecida, sendo possível pro-

gramar a gravação de registros em Bancos de Dados, ativação de som, mensagem, mudança de cores, envio de mensagens por e-mail, celular, etc. (DANEELS, 2000).

Os sistemas SCADA são compostos basicamente por dois componentes, os componentes físicos e os componentes lógicos, sendo eles descritos a seguir:

i. Componentes físicos de um sistema de supervisão

Os componentes físicos de um sistema de supervisão podem ser resumidos, de forma simplificada, em: sensores e atuadores; rede de comunicação; estações remotas (aquisição/control); de monitoração central (sistema computacional SCADA).

Os sensores são dispositivos conectados aos equipamentos controlados e monitorados pelos sistemas SCADA, que convertem parâmetros físicos, tais como, velocidade, nível e temperatura, para sinais analógicos e digitais legíveis pela estação remota. Os atuadores são utilizados para atuar sobre o sistema, ligando e desligando determinados equipamentos (DANEELS, 2000).

O processo de controle e aquisição de dados se inicia nas estações remotas, PLCs (*Programmable Logic Controllers*) e RTUs (*Remote Terminal Units*), com a leitura dos valores atuais dos dispositivos que a ele estão associados e seu respectivo controle. Os PLCs e RTUs são unidades computacionais específicas, utilizadas nas instalações fabris (ou qualquer outro tipo de instalação que se deseje monitorar) para a funcionalidade de ler entradas, realizar cálculos ou controles, e atualizar saídas (DANEELS, 2000).

A diferença entre os PLCs e as RTUs é que os primeiros possuem mais flexibilidade na linguagem de programação e controle de entradas e saídas, enquanto as RTUs possuem uma arquitetura mais distribuída entre sua unidade de processamento central e os cartões de entradas e saídas, com maior precisão e sequenciamento de eventos.

A rede de comunicação é o meio por onde as informações fluem dos PLCs/RTUs para o sistema SCADA e, levando em consideração os requisitos do sistema e a distância a cobrir, pode ser implementada através de cabos Ethernet, fibras ópticas, linhas dial-up, linhas dedicadas, rádio modems, etc. (DANEELS, 2000).

ii. Componentes lógicos de um sistema SCADA

Os componentes lógicos de um sistema SCADA geralmente dividem suas principais tarefas em blocos ou módulos, que vão permitir maior ou menor flexibilidade e robustez, de acordo com a solução desejada. A Figura 15 mostra uma arquitetura simplificada de um sistema de supervisão. Em linhas gerais, pode-se dividir essas tarefas em (DANEELS, 2000):

- Núcleo de processamento;
- Comunicação com PLCs/RTUs;
- Gerenciamento de Alarmes;
- Históricos e Banco de Dados;
- Lógicas de programação interna (*scripts*) ou controle;
- Interface gráfica;
- Relatórios;
- Comunicação com outras estações SCADA;
- Comunicação com Sistemas Externos/Corporativos;
- Outros.

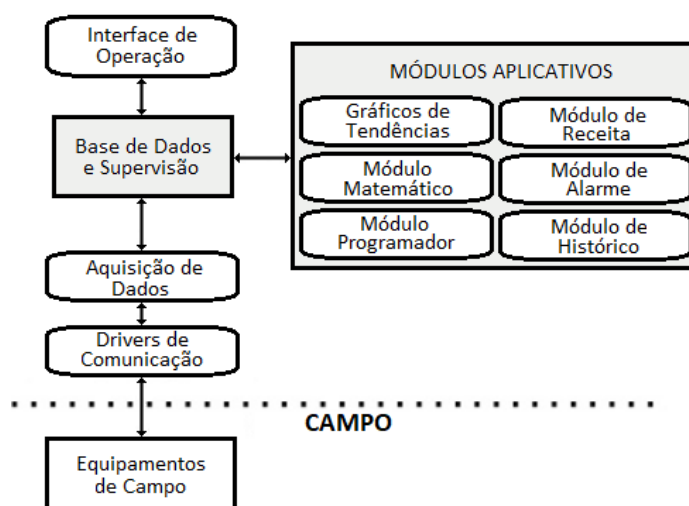


Figura 15 - Arquitetura simplificada de um sistema de supervisão

A regra para o funcionamento de um sistema SCADA parte dos processos de comunicação com os equipamentos de campo, cujas informações são enviadas para o núcleo principal do software. O núcleo é responsável por distribuir e coordenar o fluxo dessas informações para os demais módulos, até chegarem na forma esperada para o operador do sistema, na interface gráfica ou console de operação com o processo, geralmente acompanhadas de gráficos, animações, relatórios, etc., de modo a exibir a evolução do estado dos dispositivos e do processo controlado, permitindo informar anomalias, sugerir medidas a serem tomadas ou reagir automaticamente (DANEELS, 2000).

As tecnologias computacionais utilizadas para o desenvolvimento dos sistemas SCADA têm evoluído bastante nos últimos anos, de forma a permitir que, cada vez mais, aumente sua confiabilidade, flexibilidade e conectividade, além de incluir novas ferramentas que permitem diminuir cada vez mais o tempo gasto na configuração e adaptação do sistema às necessidades de cada instalação.

2.7 DADOS CLIMÁTICOS DA REGIÃO DA CIDADE DE GOIÂNIA

A cidade de Goiânia situa-se geograficamente na latitude 16° 40' 48" sul e na longitude de 49° 15' 18" oeste. Localiza-se numa linha divisória imaginária entre a zona tropical e a subtropical.

Segundo Fernandes (2002) ao analisar os dados climáticos da região, verificou que é muito difícil seu enquadramento entre as duas divisões clássicas de climas quentes, isto é, quente e úmido ou quente e seco. Há realmente, um conjunto de características bastante peculiares que impossibilitam uma classificação tão singela. Em termos gerais, a região onde se encontra Goiânia apresenta duas características significativas: a continentalidade, pois está muito afastada do litoral atlântico; e a grande regularidade do processo cíclico dos deslocamentos das massas de ar o que, conjugado com outros fatores, implica em um regime pluviométrico muito bem definido, apresentando uma estação chuvosa (tendo 5 meses com precipitação na casa dos 200 *mm* mensais) e uma estação seca (com 3 meses praticamente secos e 2 meses de pouca chuva); além disso um regime de ventos com predominâncias de direção bastante evidentes.

Ao abordar os dados climáticos da região no seu conjunto, verifica-se que será bastante coerente abandonar a clássica divisão anual das 4 estações com picos de calor no verão e de frio no inverno e adotar a ideia acima definida de um clima composto de 2 estações: a estação das chuvas e a estação da seca. Corroborando com isto verifique-se que as maiores temperaturas anuais ocorrem entre os meses de setembro e outubro (FERNANDES, 2002).

2.7.1 Radiação Solar, Insolação e Nebulosidade

Os dados de nebulosidade, insolação e radiação solar da cidade de Goiânia/GO estão apresentados na Tabela 1, há uma relação entre eles muito importante, talvez até óbvia, e de grande significado para o trato com as condições climáticas (FERNANDES, 2002).

Tabela 1 - Nebulosidade, insolação e radiação solar

| | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Nebulosidade (%) | 80 | 77 | 74 | 60 | 49 | 43 | 38 | 34 | 50 | 67 | 78 | 80 |
| Insolação (h/mês) | 177 | 162 | 188 | 233 | 267 | 275 | 288 | 299 | 211 | 207 | 178 | 161 |
| Rad. Solar (w/m ² .dia) | 3285 | 3148 | 2451 | 3120 | 3077 | 2708 | 3301 | 3473 | 3198 | 2871 | 3077 | 3361 |

Segundo Fernandes (2002), na latitude de Goiânia a diferença aproximada do tamanho do dia na época do solstício de inverno (junho) e o tamanho do dia na época do solstício de verão (dezembro) é de duas horas. Com essa informação seria presumível imaginar que no

verão haveria maior tempo de insolação e no inverno menor. Neste caso, entretanto, reparando-se no desenvolvimento da nebulosidade e tendo em vista a dicotomia entre as estações (inverno seco e verão chuvoso) pode-se constatar que durante o período chuvoso, embora os dias sejam maiores a insolação é bem menor (em dezembro tem-se 161 *h/mês*), por causa da grande nebulosidade no verão e a baixa nebulosidade no período seco (em agosto tem-se 299 *h/mês*). A insolação efetiva, ou seja, o percentual da duração do dia com sol direto, na época seca, chega a ser de mais de 90%.

A radiação solar global é a soma da radiação direta do sol e a radiação difusa proveniente da atmosfera. Dependendo das condições do céu (limpo, encoberto, etc.) a composição entre direta e difusa pode mudar bastante. Assim, num dia de céu claro a composição é aproximadamente 1/10 de difusa e 9/10 de radiação direta; a componente difusa vai aumentando à medida que o céu se apresente nublado (as nuvens brancas irradiam muito mais radiação difusa que o céu azul) e obviamente, quando o céu estiver totalmente encoberto só teremos a radiação difusa que pode ser relativamente intensa (nebulosidade clara: forte mormaço) ou fraca (nebulosidade mais escura). De qualquer forma pode-se afirmar que, num mesmo local, o céu encoberto proporciona menor radiação global e o céu limpo maior, pois a radiação direta do sol é muito intensa (FERNANDES, 2002).

Ainda de acordo com Fernandes (2002) há uma conjugação interessante e ao reparar-se no desenvolvimento ao longo do ano da radiação global, na Tabela 1 verifica-se que os valores mensais variam muito pouco: quando os dias são menores tem-se menos nuvens e, portanto, muito sol (a radiação direta é cerca de 70% da global) e quando os dias são maiores tem-se muitas nuvens e menos sol direto (a radiação direta é cerca de 35% da global). Isto é extraordinariamente importante, embora pareça óbvio depois de explicado e é, depois da variação sazonal da amplitude térmica diária, a mais peculiar característica decorrente da dicotomia entre a estação seca e a chuvosa.

2.7.2 Temperatura Ambiente na Região da Cidade de Goiânia

A temperatura exerce grande influência sobre os processos dinâmicos que ocorrem entre a atmosfera e as plantas, animais, solo, água, entre outros. Para demonstrar as características da variação de temperatura ao longo do ano, são demonstrados, na Figura 16, gráficos diários e mensais ao longo de um ano. Os gráficos foram extraídos do site do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) onde podem ser observados os dados de temperatura: as linhas de temperaturas diárias (máxima, média e mínima), lidas ao longo do ano de 2017 na estação meteorológica localizada em Goiânia.

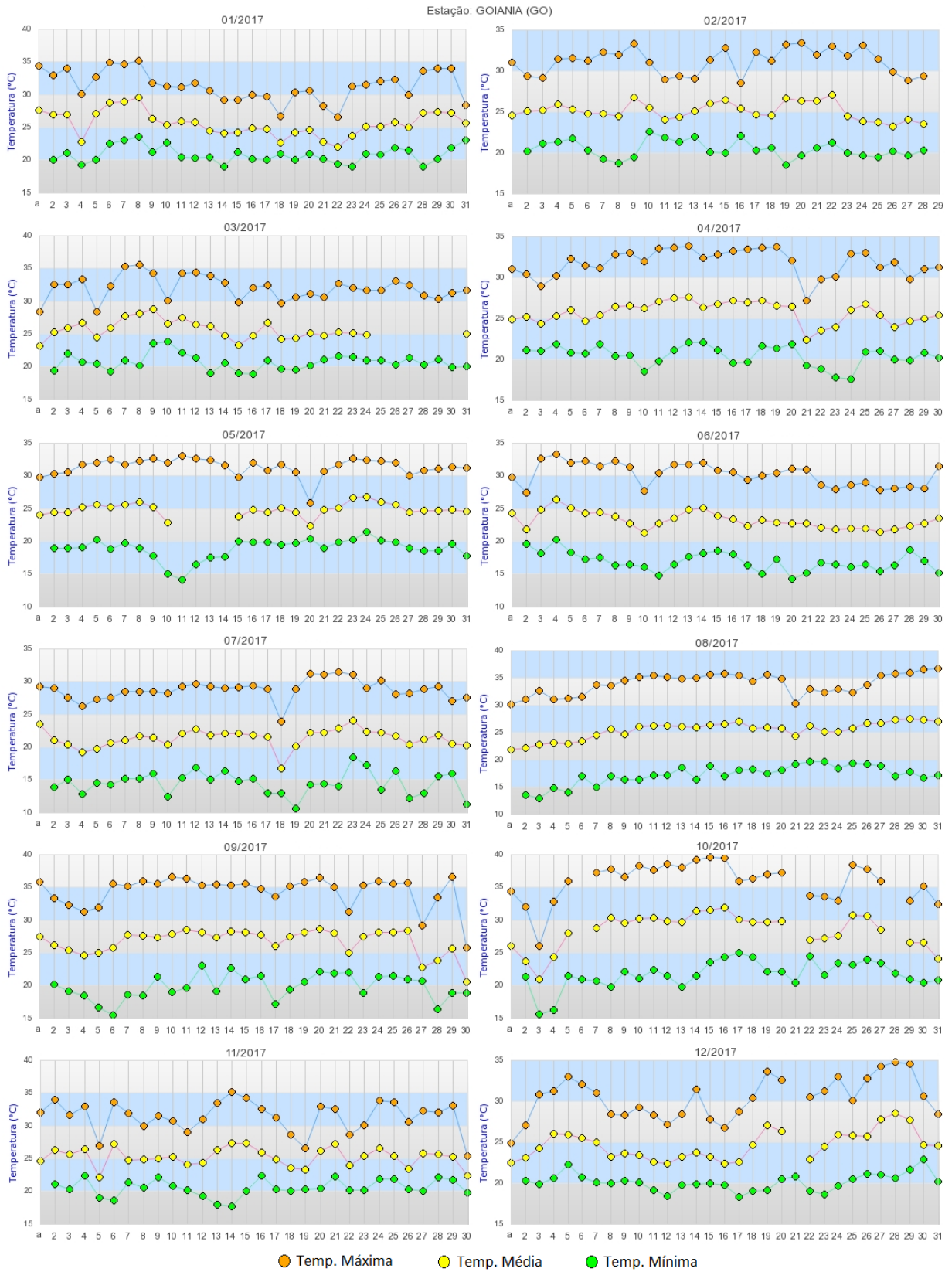


Figura 16 - Temperaturas diárias (máxima, média e mínima), Goiânia, ao longo de 2017.

Fonte: INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), com adaptações.

Na Figura 16, em alguns meses são observados falta de dados em determinados dias de alguns meses, o site do INMET de onde foram extraídos os dados, não esclarece o real motivo, deduz-se que, essas faltas são possivelmente decorrentes de falhas em sensores dos equipamentos de aquisição desses dados.

3 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO SISTEMA

A Lei da Conservação de Energia é também conhecida como Primeira Lei da Termodinâmica e permite efetuar balanços energéticos, determinar perdas e quantificar fluxos. Baseia-se também nesta lei, o conceito de desempenho ou eficiência energética de um sistema, relacionando o efeito energético útil com o consumo no sistema, como se explicita na Figura 17 e Equação (3.1), válida para um sistema em regime permanente, isto é, quando não há variação da energia no sistema (VIANA, 2012).

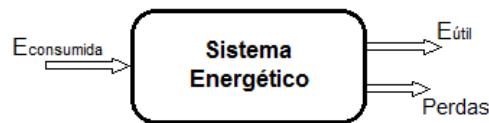


Figura 17 - Sistema energético generalizado.

$$\eta_{energ} = \frac{E_{util}}{E_{consumida}} = \frac{E_{consumida} - Perdas}{E_{consumida}} \quad (3.1)$$

Segundo Viana (2012), a outra lei física básica dos processos energéticos é a Lei da Dissipação da Energia, a qual, em todos os processos reais de conversão energética, sempre deve existir uma parcela de energia térmica como produto. Se o objetivo do processo é transformar energia mecânica em calor, tal conversão pode ser total, como ocorre nos freios. Mas se o propósito for o inverso, a conversão de energia térmica em energia mecânica será sempre parcial, pois uma parcela dos resultados deverá sempre ser calor. Em outras palavras, existem inevitáveis perdas térmicas nos processos de conversão energética, que se somam às outras perdas inevitáveis decorrentes das limitações tecnológicas e econômicas dos sistemas reais, tais como isolamento térmico imperfeito, atrito, perdas de carga e inércias, entre outras.

3.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM CÉLULAS E PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Os painéis e células fotovoltaicas são, em sua maioria, fabricados a partir de materiais semicondutores, e os mais utilizados para fabricação dessas células, são: silício (Si) cristalino (c-Si), multicristalino (m-Si), amorfo (a-Si) e microcristalino (μ -Si); telúrio (Te); cádmio (Cd); cobre (Cu); índio (I); gálio (Ga); selênio (Se), entre outros (RÜTHER, 2004).

Alguns dos fatores que contribuem para que o silício seja o material mais tradicional é que este, além de não ser tóxico, é o segundo elemento mais abundante da Terra com mais de 28% da massa da crosta terrestre (BUTZ, 2002). A Figura 18 apresenta de forma cronológica a evolução da eficiência de diferentes tecnologias de células fotovoltaicas até o ano 2017.

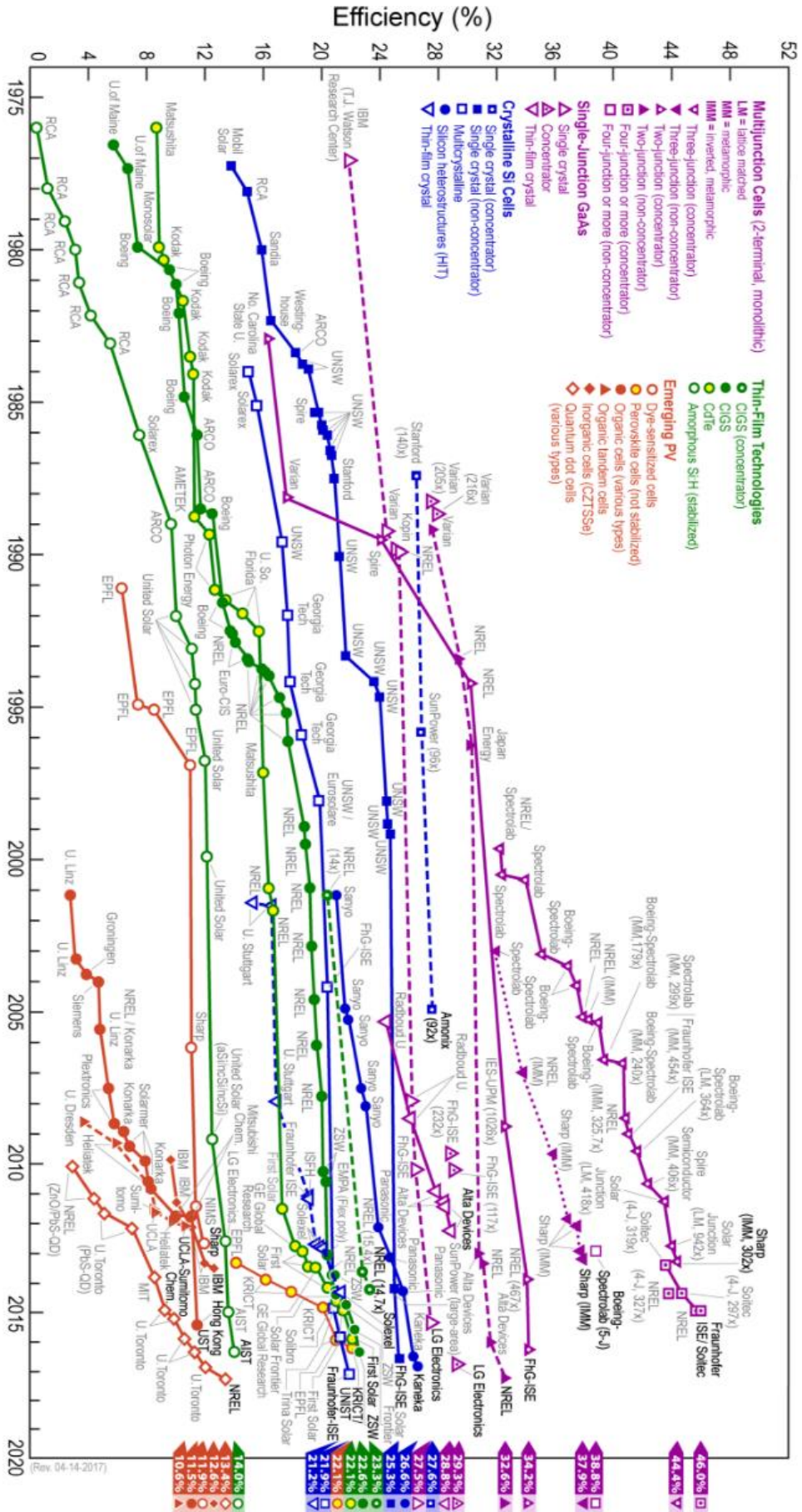


Figura 18 - Eficiência de células fotovoltaicas ao longo dos anos. Fonte: Butz, 2017

3.1.1 Parâmetros que afetam a Eficiência de Sistemas Fotovoltaicos

De acordo com R  ther (2004), vários parâmetros podem afetar a eficiência do conjunto de módulos solares fotovoltaicos. O principal deles    o parâmetro da radia  o solar, que depende fundamentalmente da localiza  o geográfica da instala  o, bem como de sua inclina  o e orienta  o. A temperatura dos painéis, o sombreamento parcial, as resistências dos condutores e o estado de limpeza dos painéis também influenciam a performance do sistema gerador fotovoltaico.

Os efeitos da inclina  o e orienta  o dos painéis na eficiência do gerador dependem da razão entre a radia  o direta e difusa locais, bem como da fra  o de albedo (reflexão dos arredores), que    característica do ambiente que circunda a instala  o. Como regra, a inclina  o ótima com rela  o    horizontal para incidência solar máxima em regime anual    dada pela latitude local. A orienta  o ideal    a de uma superfície voltada para o equador (norte geográfico para instala  es no hemisfério sul e sul geográfico para instala  es no hemisfério norte) (RÜTHER, 2004).

Em situa  es onde ocorrerem obstáculos físicos, ou padrões climáticos diários ou sazonais an  malos, estes parâmetros devem obviamente ser levados em considera  o. Além disso, fachadas voltadas para o leste ou oeste podem ter performance satisfatória mesmo quando instaladas em ângulos inclinados ou na vertical, com rendimentos da ordem de 60% em rela  o a uma orienta  o ótima, devido ao baixo ângulo do sol no início e final do dia (RÜTHER, 2004).

O sombreamento    uma questão crítica. Um gerador fotovoltaico apresenta performance ótima quando iluminado homogeneamente. Dada a característica construtiva da maioria dos módulos fotovoltaicos, em que as células solares individuais são conectadas em série, uma pequena sombra sobre uma destas células, como a sombra projetada por uma antena, chaminé ou poste, pode reduzir acentuadamente o rendimento de todo o sistema. Isto se deve ao fato de que a célula sobre a qual incidir a menor quantidade de radia  o    que determinar   a corrente e, portanto, a potência de opera  o de todo o conjunto a ela conectado em série (RÜTHER, 2004).

3.2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO

Atualmente o abastecimento de água para os diversos sistemas, depende praticamente em sua totalidade de sistemas de bombeamento. O uso de bombas de água tornou-se indispensável e como consequência, também o uso da energia elétrica para o acionamento dos motores

que fazem funcionar as bombas. E uma importante contribuição, nesse contexto, consiste em reduzir ao máximo o uso irracional da energia, se não pela consciência ambiental da necessidade de deixar para as futuras gerações um planeta em melhores condições de habitabilidade, ao menos pela redução dos custos dos serviços, que, em última análise, serão sempre pagos pela sociedade, não importando se o arranjo para a prestação desse benefício venha a ser patrocinado pelo público ou pelo privado (MONACHESI, 2005).

Ao se utilizar de uma bomba hidráulica visa-se, especificamente, o recalque de determinada vazão em certa altura manométrica, de modo a se obter o máximo rendimento. Entretanto, esta bomba poderá ser posta a recalcar vazões maiores ou menores que aquela para a qual foi projetada mudando, com a variação da vazão, a altura manométrica, a potência necessária ao acionamento e o rendimento. Desta forma, cada bomba tem seu campo de aplicação em termos de grandeza, que interferem em seu funcionamento. A representação gráfica deste campo é chamada curva característica da bomba (ALVES, 2002).

Segundo Viana (2012), bombas são máquinas nas quais a movimentação do fluido é produzida por forças que se desenvolvem na massa líquida, em consequência da rotação de rotor com um certo número de pás especiais. A distinção entre os diversos tipos de bombas de fluxo é feita, fundamentalmente, em função da forma como o rotor cede energia ao líquido, bem como pela orientação do líquido ao passar pelo rotor. O rotor é a parte da bomba mais importante, pois ele realiza grande parte da transformação de energia mecânica em energia de pressão.

Grande parte dos projetos de sistemas de bombeamento são concebidos de forma superdimensionados em relação a demanda real do processo. Normalmente na indústria, nas empresas de saneamento e em outras aplicações, as instalações de bombeamento operam suas máquinas na rotação constante e, para obter a variação de vazão, principalmente na sua diminuição, utilizam válvulas que estrangulam a tubulação, aumentando a pressão da bomba causando aumento das perdas do sistema (VIANA, 2012).

Essa prática, normalmente, penaliza energeticamente a instalação se comparada com a variação de vazão através da rotação variável. Portanto, pode-se obter uma boa eficiência energética variando-se a rotação das bombas para obter uma variação de sua vazão, em vez de utilizar válvulas de estrangulamento. Neste caso utiliza-se inversores de frequência para proporcionar a variação na rotação dessas bombas (VIANA, 2012).

Ao diminuir a velocidade de rotação da bomba, conseqüentemente haverá uma diminuição no valor da potência e no valor da vazão. Da mesma forma, uma redução na altura geométrica proporcionará uma redução na altura manométrica total, possibilitando também

uma diminuição da velocidade de rotação da bomba e uma redução da potência do sistema. Essas reduções nos parâmetros do sistema podem ser verificadas com base na utilização das leis de similaridade, demonstradas nas Equações (3.2), (3.3) e (3.4) (SANTOS, 2017):

$$\frac{Q1}{Q} = \frac{n1}{n} \quad (3.2)$$

$$\frac{H1}{H} = \left(\frac{n1}{n}\right)^2 \quad (3.3)$$

$$\frac{P1}{P} = \left(\frac{n1}{n}\right)^3 \quad (3.4)$$

onde Q representa a vazão da bomba; $Q1$ é a vazão da bomba modificada por $n1$; H é a altura manométrica; $H1$ é a altura manométrica modificada por $n1$; n é a rotação da bomba; $n1$ é a rotação da bomba modificada; P é a potência necessária ao acionamento da bomba e $P1$ é a potência modificada por $n1$.

Outro fator que se pode atuar para melhorar a eficiência energética dos sistemas de bombeamento seria, quando possível, uma adequação da altura geométrica e uma consequente alteração na altura manométrica, de forma que o valor dessa altura fique o menor possível, uma vez que esse valor tem influência direta no consumo da bomba, atuando assim na diminuição das perdas do sistema de bombeamento (SANTOS, 2017). A Figura 19 mostra um exemplo de um sistema com diferentes alturas geométricas, onde inicialmente a altura geométrica era de 7,9 metros e após a colocação do sistema com tubulações e bomba por sobre uma estrutura metálica, essa altura geométrica diminuiu para 4,4 metros.

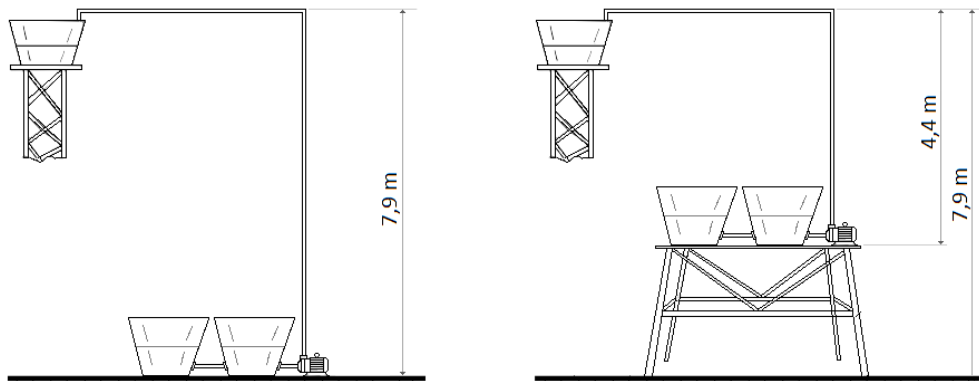


Figura 19 - Exemplo de sistema com diferentes alturas geométricas

3.3 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A transferência de calor de um ponto a outro de um meio se dá através de três processos diferentes: convecção, radiação e condução.

A convecção ocorre tipicamente em um fluido, e se caracteriza pelo fato de que o calor é transferido pelo movimento do próprio fluido, que constitui uma corrente de convecção. Um fluido aquecido localmente em geral diminui de densidade e, por conseguinte tende a subir sob o efeito gravitacional, sendo substituído por um fluido mais frio, o que gera naturalmente correntes de convecção. O borbulhar da água fervente em uma panela é o resultado de correntes de convecção (NUSSENZVEIG, 2014).

A radiação transfere calor de um ponto a outro através da radiação eletromagnética. A radiação térmica é emitida de um corpo aquecido e ao ser absorvida por outro corpo pode aquecê-lo, convertendo-se em calor. O aquecimento solar é uma forma de aproveitamento da radiação solar para a produção de calor. Um ferro em brasa emite radiação térmica e aquece a região que o rodeia (NUSSENZVEIG, 2014).

A condução de calor só pode acontecer através de um meio material, sem que haja movimento do próprio meio. Ocorre tanto em fluidos quanto em meios sólidos sob o efeito de diferenças de temperatura. A energia propaga-se em virtude da agitação molecular. Esse processo é mais eficiente em materiais como os metais, que são bons condutores de calor (NUSSENZVEIG, 2014).

De acordo com Marques (2008), no caso dos painéis fotovoltaicos, parte da energia solar absorvida é convertida em energia térmica, fazendo com que o painel sofra um aquecimento, que é indesejável, uma vez que esse aquecimento provocará uma queda na quantidade de energia gerada pelo painel fotovoltaico.

Segundo Matias (2016), no caso do arrefecimento de painéis fotovoltaicos pela aplicação de água sobre sua superfície frontal, haverá um processo de transferência de calor da superfície do painel para a água, ou seja, a água absorverá calor do painel fotovoltaico pelos processos de convecção e de condução de calor, o que provocará uma melhora nos níveis de tensão e potência, assim haverá um aumento na energia gerada, e conseqüentemente, uma melhora na eficiência do painel.

4 METODOLOGIA

Para a realização desse trabalho utilizou-se a estrutura de uma planta piloto, instalada sobre o telhado do Laboratório de Fontes Alternativas de Energia do Núcleo de Estudos Experimentais e Tecnológicos (NExT) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG). Para possibilitar uma melhoria de rendimento em painéis fotovoltaicos em parte dessa planta piloto, foi utilizada uma técnica de arrefecimento por meio da aplicação de água na superfície frontal do painel fotovoltaico, que foi testada e desenvolvida em uma fase laboratorial anterior a sua implementação, no qual são observadas as condições de parâmetros como temperatura, tensão, corrente e potência, de acordo com a quantidade de água aplicada.

Para possibilitar o arrefecimento dos painéis fotovoltaicos foi construído um sistema de abastecimento de água, que utiliza a água proveniente de um sistema de captação de água da chuva que fica armazenada em reservatórios de 10.000 litros.

Para analisar o comportamento do processo de geração fotovoltaica, que foi submetido a adequações para possibilitar o arrefecimento de parte dos painéis, foi desenvolvido um sistema de aquisição e processamento de dados, composto por sensores de temperatura, sensores de tensão e corrente e placas eletrônicas, formando uma rede de dados; além da implementação de um sistema supervisor responsável pela operação, supervisão e controle do sistema como um todo.

4.1 PLANTA PILOTO DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Para a instalação do sistema fotovoltaico, escolheu-se um local com boa incidência de radiação solar ao longo de todo ano e que não apresentava risco de sombras proveniente de árvores, de tubulações de ventilação ou de qualquer estrutura existente que pudesse causar sombras sobre os painéis. O local escolhido foi o telhado metálico localizado acima do laboratório do núcleo de pesquisa do IFG, como pode ser visto na Figura 20. A instalação foi feita utilizando métodos que melhor atendessem aos critérios técnicos, a praticidade e a localização do laboratório. O local possui uma incidência de radiação solar durante todo o dia. Foram montados com uma inclinação de 17° (para a latitude da cidade de Goiânia), na direção de 18° a oeste do norte geográfico, seguindo a direção do telhado, conforme pode ser observado na Figura 21.



Figura 20 - Local de instalação dos painéis fotovoltaicos no Campus Goiânia, obtido pelo Google Earth com adaptações



Figura 21 - Direção dos painéis fotovoltaicos, obtido pelo Google Earth com adaptações

As etapas de orçamento, projeto, aquisição de materiais/equipamentos, execução e montagem do sistema de geração, contou com assessoria técnica e de mão de obra da empresa Sustenergyn Energia Solar, que é parceira do IFG no projeto de pesquisa aprovado na Chamada CNPq-SETEC/MEC N° 17/2014, com o título “Estudos de viabilidade técnica e econômica, do uso de água para melhoria da eficiência da conversão de painéis fotovoltaicos”.

4.1.1 Características Técnicas e de Projeto da Planta Piloto de Geração Fotovoltaica

A planta piloto de geração fotovoltaica é composta por um sistema de geração com 18 painéis fotovoltaicos com potência de $4,62kWp$. No diagrama apresentado na Figura 22, encontram-se representados os principais elementos que compõem o sistema de geração. Tem-se três grupos de painéis fotovoltaicos, sendo que dois grupos possuem 6 painéis de 265 W, e um grupo de 6 painéis de 240 W, num total de 18 painéis; cada grupo de 6 painéis conectados em série, estão ligados um inversor monofásico de 2000 W, num total de 3 inversores, cada um ligado a uma das fases da rede. Na mesma figura tem-se representados os DPS (Dispositivos de Proteção contra Surto) dos lados *cc* e *ca* da instalação, também os disjuntores de proteção no quadro geral, onde ocorre a conexão com a rede de distribuição da concessionária.

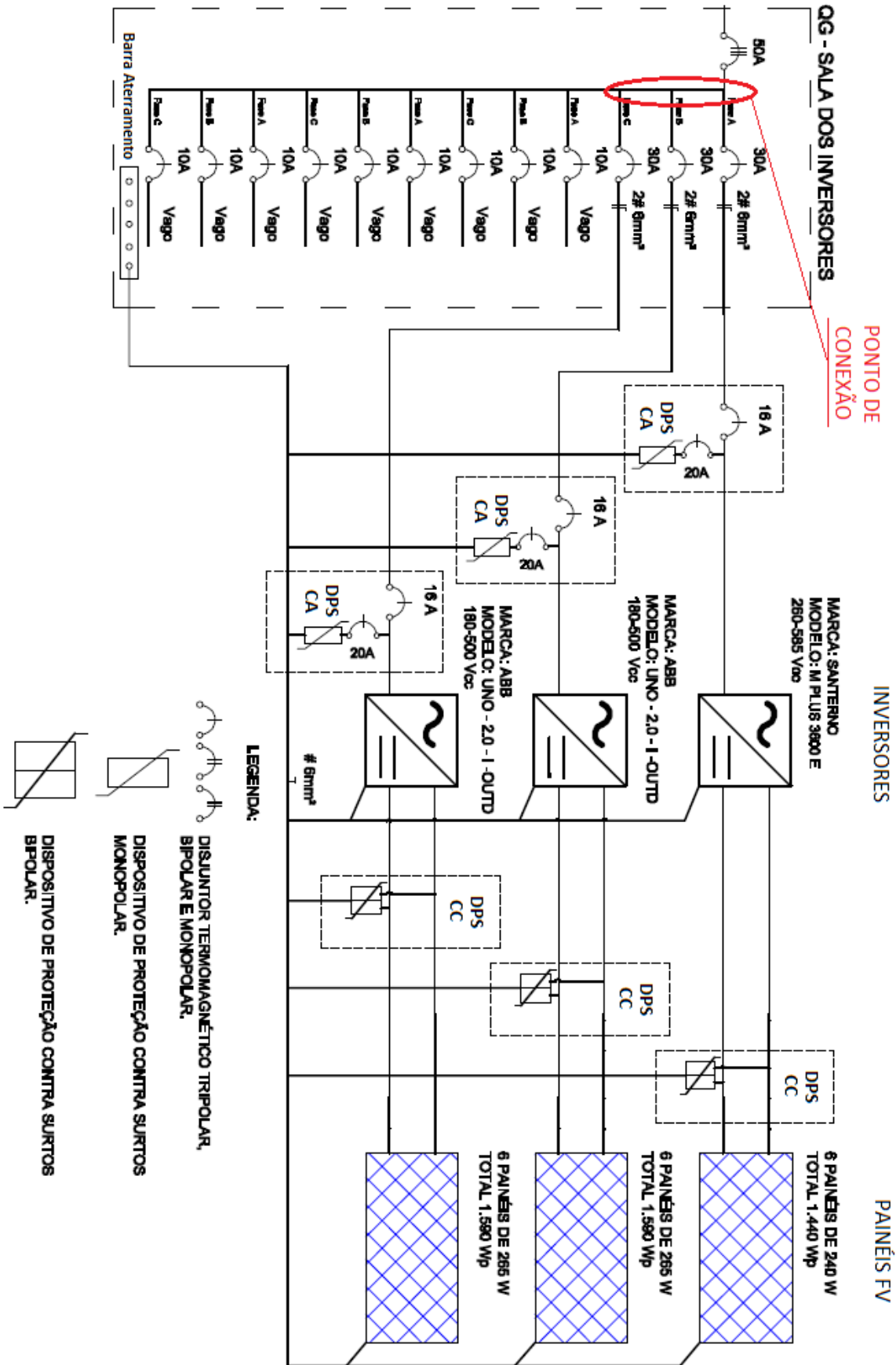


Figura 22 - Diagrama de instalação elétrica do sistema de geração fotovoltaica

4.1.2 Conexão com a Rede da Concessionária e Regularização

Uma posição ideal de interconexão entre a rede de distribuição da concessionária e a saída do inversor é um ponto entre o disjuntor geral da edificação e o quadro geral de distribuição. Conforme pode ser observado em destaque na Figura 22, na instalação realizada no laboratório do IFG, a interconexão é feita no quadro geral de distribuição do referido laboratório, que por sua vez está conectado ao quadro geral da subestação de energia do IFG. Este quadro está localizado próximo de onde estão instalados os inversores.

4.2 SISTEMA DE SUPRIMENTO DE ÁGUA

Um sistema de suprimento de água para o arrefecimento dos painéis fotovoltaicos foi desenvolvido, de forma a captar a água da chuva proveniente das calhas presentes no telhado, no qual se encontra instalada a planta piloto de geração fotovoltaica.

O sistema foi construído de tal forma que, a água captada pelas calhas é canalizada e depositada em reservatórios com capacidade para 10.000 litros. Desses, a água é elevada até uma caixa d'água de 500 litros por meio de um sistema de bombeamento. A caixa d'água de 500 litros está localizada a uma altura superior aos painéis a serem arrefecidos e, por meio da ação da gravidade, abastece o sistema responsável pela aplicação direta de água sobre os painéis. Após arrefecer os painéis através da injeção de água sobre a superfície frontal dos mesmos, a água é captada por uma calha junto aos painéis, e novamente pela ação da gravidade, retorna para os reservatórios de 10.000 litros por meio de uma canalização específica.

A Figura 23 mostra um diagrama representativo do circuito hidráulico do sistema que abastece água para o arrefecimento dos painéis fotovoltaicos da planta piloto, onde: 1 são os painéis a serem arrefecidos; 2 é a caixa d'água de 500 litros; 3 são os reservatórios de 5.000 litros cada; 4 é o conjunto motobomba acionado por inversor de frequência; e 5 é a estrutura metálica construída para possibilitar a elevação das caixas d'água. A Figura 24 mostra a calha de recolhimento da água aplicada sobre os painéis arrefecidos.

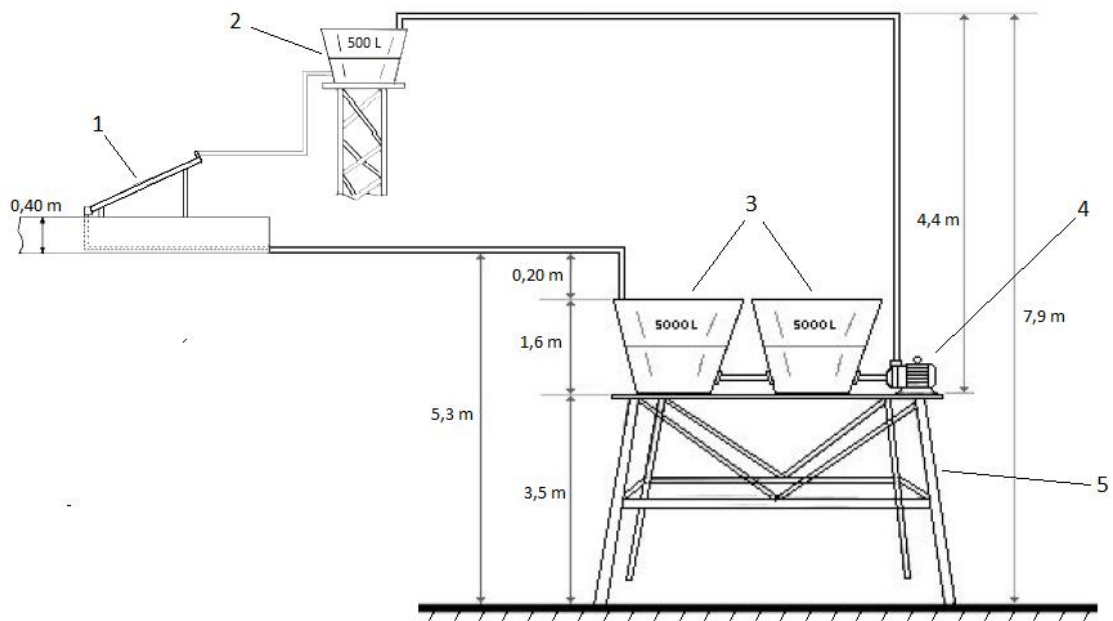


Figura 23 - Circuito hidráulico com suas dimensões.



Figura 24 - Calha de recolhimento da água aplicada sobre os painéis.

4.2.1 Sistema de Bombeamento

Para a definição e montagem do sistema de bombeamento são realizados estudos técnicos para a sua efficientização, baseados na avaliação da eficiência energética do bombeamento de volumes de água necessários para o arrefecimento dos painéis fotovoltaicos, montados sobre o telhado. Uma estrutura metálica é construída para promover a elevação dos reservatórios de 10.000 litros, de forma a diminuir a altura geométrica do sistema como um todo e assim proporcionar uma diminuição das perdas do sistema. Essa estrutura pode ser observada na Figura 25.



Figura 25 - Estrutura metálica construída para os reservatórios (10.000 litros).

Nos estudos técnicos realizados são testadas duas bombas distintas, sendo uma monofásica de 3/4 CV (550W) e uma trifásica de 1/3 CV (250W). Na bomba trifásica, com auxílio de um inversor de frequência (da WEG CFW100) são testadas rotações variadas e com um analisador de energia (Fluke) são extraídos dados para análise. A aquisição de dados nos diferentes cenários, com motores monofásico e trifásico e em velocidades variadas, são feitas utilizando-se de um medidor de vazão (hidrômetro) além do inversor de frequência para variar a frequência/velocidade e o analisador de energia para medir as tensões, correntes e potências.

4.2.2 Método de Aplicação de Água sobre os Painéis Fotovoltaicos

O método de aplicação de água sobre os painéis fotovoltaicos foi obtido de forma empírica em laboratório, em testes com apenas um painel. Foi utilizado um perfil de alumínio quadrado com dimensão de 13 mm de lado, sendo que neste foram feitos diversos furos de 3 mm de diâmetro em uma de suas faces, e esses furos equidistantes em aproximadamente 20 mm um do outro. A Figura 26 mostra um desses perfis já instalado sobre o painel solar, e a Figura 27 mostra a tubulação e as mangueiras ligadas ao perfil de alumínio.



Figura 26 - Perfil quadrado de alumínio perfurado para aplicação de água.



Figura 27 - Tubulação e mangueiras ligadas ao perfil de aplicação de água em um painel.

4.2.3 Critérios para Definir a Necessidade de Aplicação de Água

No local onde a planta piloto está instalada, foram feitas medições ao longo de alguns dias no mês de julho de 2017 (especificamente nos dias 17 e 18) e observou-se que, ao longo do período de 24 horas, os painéis fotovoltaicos são expostos a temperaturas variadas. Portanto para definir a necessidade ou não da aplicação de água ao longo de um período determinado, foram feitas medições da tensão, corrente, temperatura dos painéis e temperatura da água usada para o arrefecimento, e de posse dos dados chega-se também aos dados da potência e do ganho de potência nesse período.

As leituras foram realizadas utilizando-se apenas dois painéis, sendo que um deles estava submetido ao arrefecimento com aplicação de água e o outro estava em suas condições naturais (sem arrefecimento). Para fazer as leituras das variáveis foi utilizada uma estrutura de aquisição de dados, que será apresentada detalhadamente em tópico seguinte.

4.2.4 Método para a Definição da Vazão de Água a ser aplicada sobre os Painéis

O método para definir a vazão de água a ser aplicada sobre os painéis fez uso da estrutura montada para a aquisição de dados conforme apresentada no item 4.2.3 e demonstrada na Figura 29. A escolha da vazão mais adequada, tem o objetivo de se obter um melhor ganho de potência, com um menor uso de recursos e com um menor custo. Para isso, utilizou-se de dois painéis fotovoltaicos, sendo cada um de 265 *Watts*, dois microinversores APsystems AY500 de 500 *Watts* cada.

Um dos painéis foi submetido a diferentes taxas de fluxo de água, variando-se a vazão da válvula que aplica água sobre o perfil perfurado, em seguida foram feitas medições das variáveis de temperatura, tensão, corrente e potência em ambos os conjuntos de painéis (sem

arrefecimento e com arrefecimento). Essas medições foram feitas na segunda quinzena do mês de julho de 2017, em dias diferentes, nos horários das 09:00 h as 17:00 h, com as taxas de fluxo por painel de 0,14 litro/min, 0,38 litro/min, 0,61 litro/min e 1,1 litro/min, conforme pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2 - Vazões de aplicação de água sobre os painéis

| Dia | 1° | 2° | 3° | 4° |
|---------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Vazões (litro/min) | 0,14 | 0,38 | 0,61 | 1,10 |

Ao promover o escoamento de água por sobre o painel fotovoltaico com a utilização de um perfil quadrado de alumínio perfurado, observa-se que, quando a vazão da água era muito baixa (abaixo de 0,8 litro/min), não havia uma boa distribuição de água sobre a superfície do painel, em virtude da baixa pressão da água (sujeita a ação da gravidade). Então para possibilitar a variação dessa vazão a níveis inferiores a 0,8 litro/min adotou-se um método de variação da vazão por pulsos com a utilização de uma placa eletrônica de temporização, responsável pelo acionamento da válvula solenoide que possibilita a aplicação de água sobre o painel.

Dessa forma regulou-se o escoamento com uma vazão máxima de aproximadamente 1,5 litro/min e a regulagem em vazões inferiores a esse valor foi obtida por meio da pulsação dos tempos de “ON/OFF” de acordo com o valor que se desejava. Os valores testados estão listados na Tabela 2.

4.2.5 Implementação do Sistema para Grupo de Seis Painéis

Nesta etapa a vazão utilizada foi aquela determinada nos testes com dois painéis. Fez-se novamente as medições, porém desta vez comparando um grupo de seis painéis com arrefecimento em relação a outro grupo de seis painéis sem arrefecimento.

Para o suprimento de água nessa nova configuração, foi necessário a ampliação das instalações, necessárias para suprir seis painéis, em vez de apenas um painel como descrito anteriormente. Para isso foram providenciados os demais perfis quadrados de alumínio (que são responsáveis pela aplicação de água direta sobre os painéis), ampliou-se as tubulações de PVC, mangueiras, válvulas solenoides, conexões e outros acessórios, conforme pode ser observado na Figura 28.



Figura 28 - Instalações para aplicação de água em grupo de seis painéis.

Para o sistema de bombeamento (caixas d'água, tubulações, bomba hidráulica e demais acessórios) utilizou-se o mesmo sistema já implementado para o suprimento com apenas um painel, pois, por se tratar de uma estrutura mais robusta, essa parte das instalações já tinha sido projetada e construída de maneira a suportar de forma satisfatória a aplicação de arrefecimento no grupo dos painéis instalados.

4.3 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS E SUPERVISÃO

Para obter os dados foi utilizada a estrutura onde se encontram instalados os painéis fotovoltaicos, montada sobre o telhado, e são verificadas as ações do efeito da temperatura sobre a potência dos painéis. Também foram utilizados: sensores de temperatura, para captar a temperatura do painel com arrefecimento, do painel sem arrefecimento e da água de saída; um conjunto composto por uma placa eletrônica e uma válvula, para o controle de vazão da água por pulsos; uma placa eletrônica para a aquisição dos dados de tensão e corrente; uma interface de comunicação, que colhe todos os dados e disponibiliza a um computador via comunicação serial RS-232; e um computador para análise dos dados coletados. Nos APÊNDICES A, B e C encontram-se representados os esquemáticos que foram utilizados para confecção das placas eletrônicas com os microcontroladores ATmega 328P; e nos ANEXOS A e B encontram-se os códigos que foram utilizados nessas placas.

As temperaturas dos painéis foram medidas por sensores LM35 e a temperatura de saída da água medida com um sensor a prova d'água DS18B20.

A Figura 29 mostra a configuração em que foram feitas as medições: 1 é o painel fotovoltaico; 2 é o perfil quadrado perfurado; 3 são os sensores de temperatura do painel e de saída da água; 4 é a válvula de controle de vazão da água; 5 é a placa de dados e comunicação; e 6 é o computador para processamento dos dados.

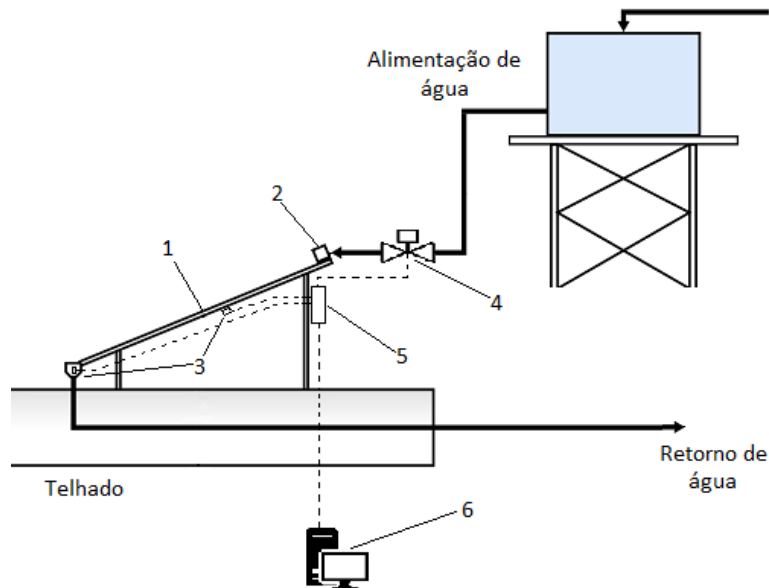


Figura 29 - Estrutura montada para a aquisição de dados.

4.3.1 Rede Modbus RTU – RS 485 para Aquisição de Dados

O Modbus é um dos protocolos mais utilizados em automação industrial, devido à sua simplicidade e facilidade de implementação, podendo ser utilizado em diversos padrões de meio físico, como o RS – 485 que é muito utilizado na indústria e, sem dúvida, é um dos padrões mais utilizados pelo protocolo Modbus. Esse padrão permite trabalhar com taxas de comunicação que podem chegar a 12Mbps e em alguns casos até 50Mbps.

A planta de geração fotovoltaica apresentada nesse trabalho é composta de alguns sistemas: (i) Sistema hidráulico, que envolve toda a circulação de água, incluindo o bombeamento, o controle de nível dos reservatórios, o controle de vazão de água aplicado sobre os painéis; (ii) O sistema de geração propriamente dito (sistema de potência); (iii) sistema de aquisição de dados. Para possibilitar a aquisição de dados, automação e a integração de todos os sistemas que compõem a planta de geração fotovoltaica fez-se necessária a implementação de

uma Rede Modbus RTU – RS 485, composta por placas microcontroladas (APÊNDICES A, B e C). A Figura 30 apresenta o fluxograma do sistema com a rede Modbus para a aquisição de dados que possibilita a comunicação entre os dispositivos que integram o sistema implementado.

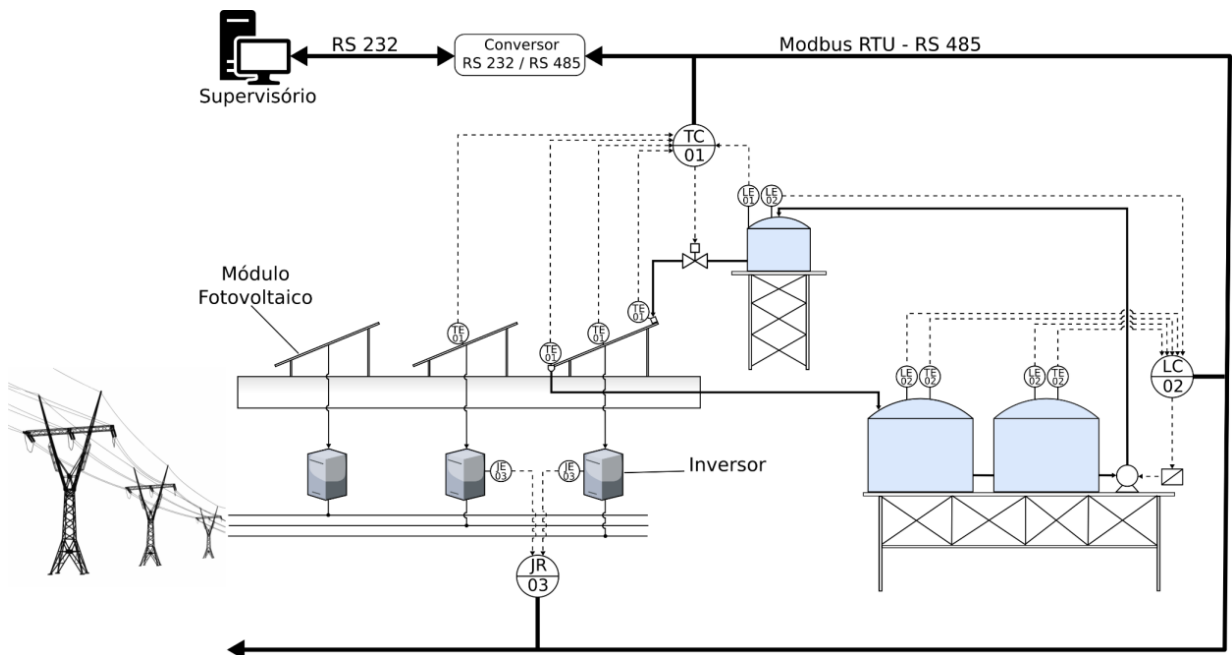


Figura 30 - Fluxograma do sistema de geração com a rede Modbus RTU.

4.3.2 Implementação do Software de Supervisão para o Sistema de Geração

Conforme destacado no item 4.3.1 e ilustrado na Figura 30, foi montada uma Rede Modbus RTU – RS 485 para a aquisição de dados do sistema de geração, e utilizando-se desta mesma rede implementou-se o sistema supervisório para promover a automação e a integração com o sistema de geração; e promover também a interação entre o sistema de geração com o operador, uma vez que esse tipo de software oferece ferramentas que possibilitam uma interação com o sistema por meio de telas, botões, *displays*, gráficos, etc.

O software supervisório adotado para controlar e supervisionar o sistema de geração apresentado nesse trabalho é o Elipse E3, visto que suas especificações atendem satisfatoriamente as necessidades do projeto. As Figuras 31 e 32 mostram a tela principal e a tela de gráficos, com seus respectivos “objetos tela”, que foram desenvolvidas no software supervisório para a aplicação no sistema fotovoltaico. A Figura 33 apresenta um recorte na tela de configuração do driver de comunicação do E3 Studio do software de supervisão Elipse E3.

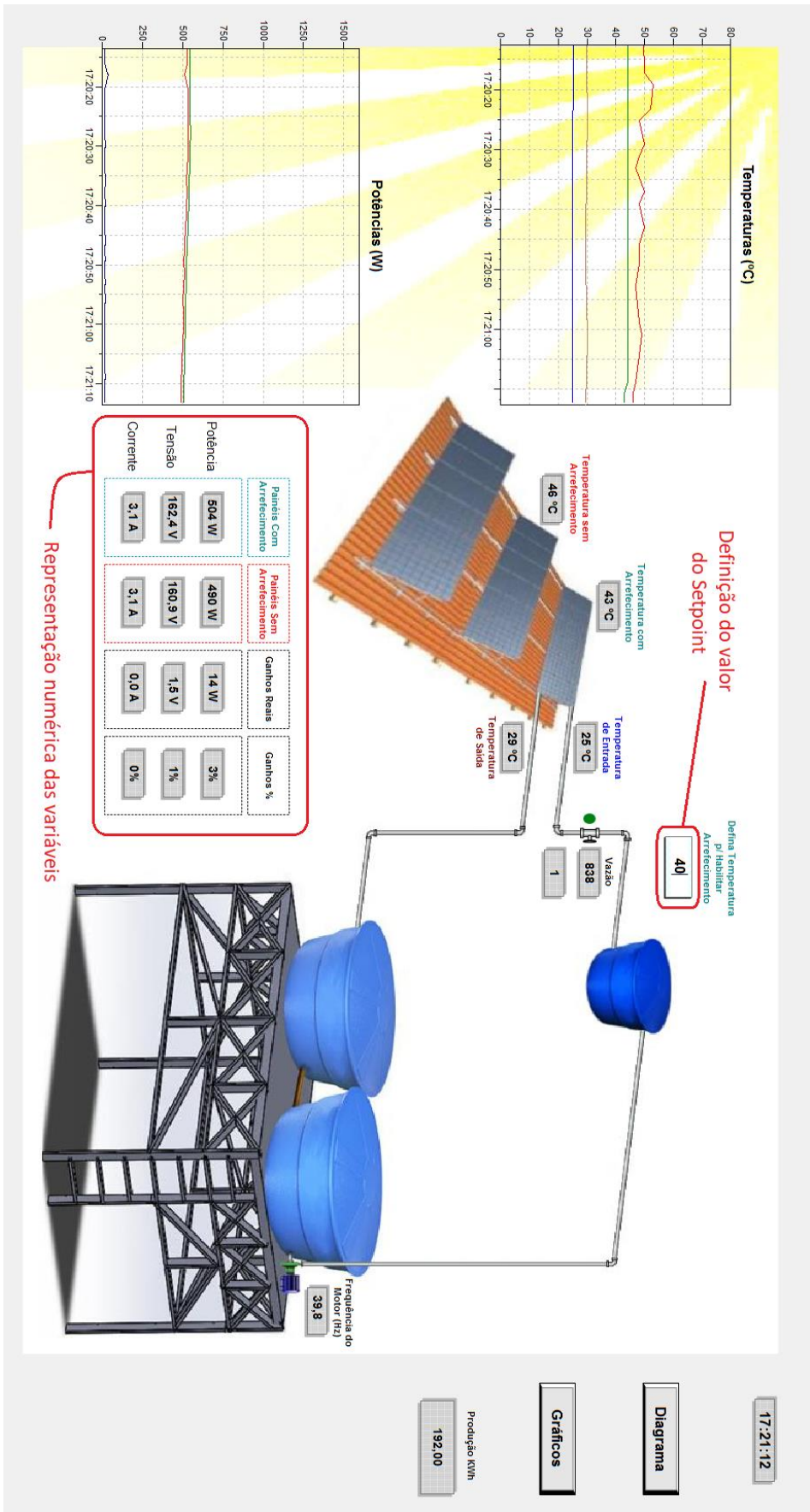


Figura 31 - Tela inicial do supervisório para o sistema fotovoltaico.

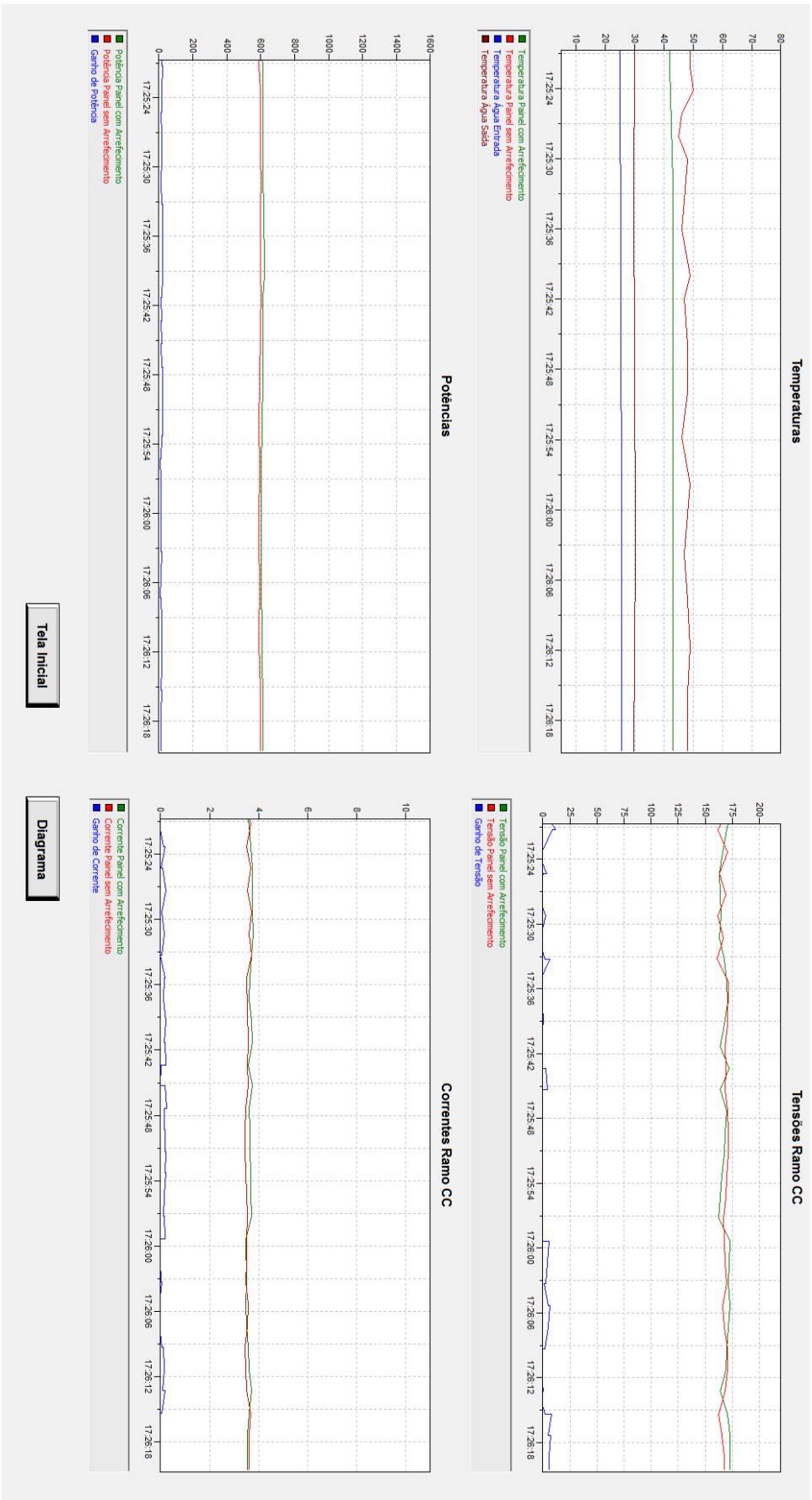


Figura 32 - Tela de gráficos do sistema supervisor para o sistema fotovoltaico.

| Nome | Dispo... | Item | P1/N1... | P2/N2... | P3/N3... | P4/N4... | Ta... | Var... | Leitura? | Escrita? | Escala? | Min. UE | Máx. UE | UE | Min. E/S | Máx. E/S |
|----------|----------|------|----------|----------|----------|----------|-------|--------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------|---------|----|----------|----------|
| Driver1 | | | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | | |
| • VOLT1 | | | 4 | 3 | 0 | 1 | | 2000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | 0 | 1 | | 0 | 100 |
| • AMP1 | | | 4 | 3 | 0 | 2 | | 2000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | 0 | 1 | | 0 | 100 |
| • VOLT2 | | | 4 | 3 | 0 | 3 | | 2000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | 0 | 1 | | 0 | 100 |
| • AMP2 | | | 4 | 3 | 0 | 4 | | 2000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | 0 | 1 | | 0 | 100 |
| • POT1 | | | 4 | 3 | 0 | 5 | | 2000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 0 | 1 | | 0 | 1 |
| • POT2 | | | 4 | 3 | 0 | 6 | | 2000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 0 | 1 | | 0 | 1 |
| • TEMP1 | | | 6 | 3 | 0 | 1 | | 1980 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 0 | 1000 | | 0 | 1000 |
| • TEMP2 | | | 6 | 3 | 0 | 2 | | 1980 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 0 | 1000 | | 0 | 1000 |
| • TEMPAG | | | 6 | 3 | 0 | 3 | | 1980 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 0 | 1 | | 0 | 2000 |
| • VALV | | | 6 | 3 | 0 | 4 | | 1980 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 0 | 1000 | | 0 | 1000 |

Figura 33 - Recorte da tela de configuração do driver de comunicação no E3 Studio

Por meio das telas criadas no software supervisor é possível visualizar e monitorar em tempo real as principais variáveis que compõem a planta de geração, com seus elementos principais. Também é possível intercambiar entre as três telas criadas (Tela Inicial, Tela de Gráficos e Tela de Diagrama), possibilitando uma melhor visualização do processo como um todo. Além disso é possível interagir com a planta por meio de um objeto de *setpoint*, onde pode-se definir o valor pelo qual, a partir de uma determinada temperatura do painel fotovoltaico sem arrefecimento, a válvula solenoide de liberação de água para o arrefecimento deverá ser acionada. Na Figura 31 pode ser observado os valores de temperatura e em destaque o objeto de *setpoint*. Na mesma figura também podem ser observados em destaque os valores das variáveis de potência, tensão, corrente e os ganhos obtidos do processo de arrefecimento. Na Figura 34 é demonstrado o fluxograma de funcionamento da válvula solenoide responsável pela liberação de água para o arrefecimento dos painéis, onde observa-se a relação entre o *setpoint* de temperatura e o acionamento da válvula.

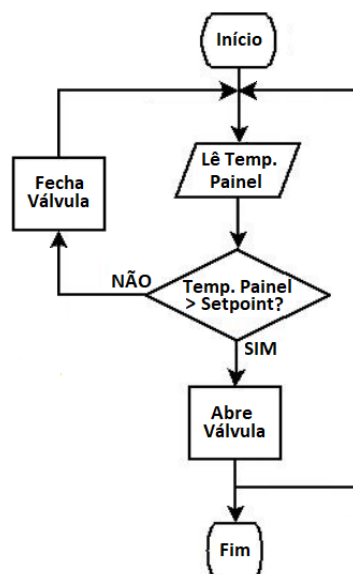


Figura 34 - Fluxograma de acionamento da válvula para o arrefecimento

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos dos experimentos no sistema de bombeamento e no sistema de geração, nas situações com e sem arrefecimento são apresentados nos tópicos seguintes.

5.1 ANÁLISE DO GANHO ENERGÉTICO, DEFINIÇÃO DA VAZÃO DE ÁGUA A SER APLICADA, ANÁLISE DA NECESSIDADE DE APLICAÇÃO DE ÁGUA E OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO

Para a análise do ganho energético, definição da vazão de água a ser aplicada e análise da necessidade de aplicação de água, são utilizados os dados obtidos das medições de tensão, corrente, potência e temperatura dos painéis fotovoltaicos, conforme descrito nos itens 4.2.3 e 4.2.4.

5.1.1 Análise do Ganho Energético

Para a análise do ganho energético obtido com o arrefecimento de um painel fotovoltaico são coletados os dados e gerados gráficos a partir destes, conforme descrição realizada no item 4.2.4. Através das Figuras 35, 36, 37 e 38, pode-se observar o comportamento das potências, das temperaturas, e o ganho de potência do painel com aplicação de arrefecimento em relação ao painel sem arrefecimento. Nas referidas Figuras, suas legendas encontram-se abreviadas, onde “Pot Sem Arref” representa a potência sem arrefecimento, “Pot Com Arref” representa a potência com arrefecimento, “Temp Sem Arref” representa a temperatura do painel sem arrefecimento, “Temp Com Arref” representa a temperatura do painel com arrefecimento, “Temp Água Saída” representa a temperatura da água na saída (após arrefecer o painel), “Ganho de Potência” representa a potência que se ganhou com o arrefecimento, ou seja, representa o resultado da subtração da potência do painel com arrefecimento menos a potência do painel sem arrefecimento. Os gráficos apresentados nas referidas figuras foram gerados no software Matlab 2014 e o Anexo C apresenta código utilizado para a geração dos mesmos.

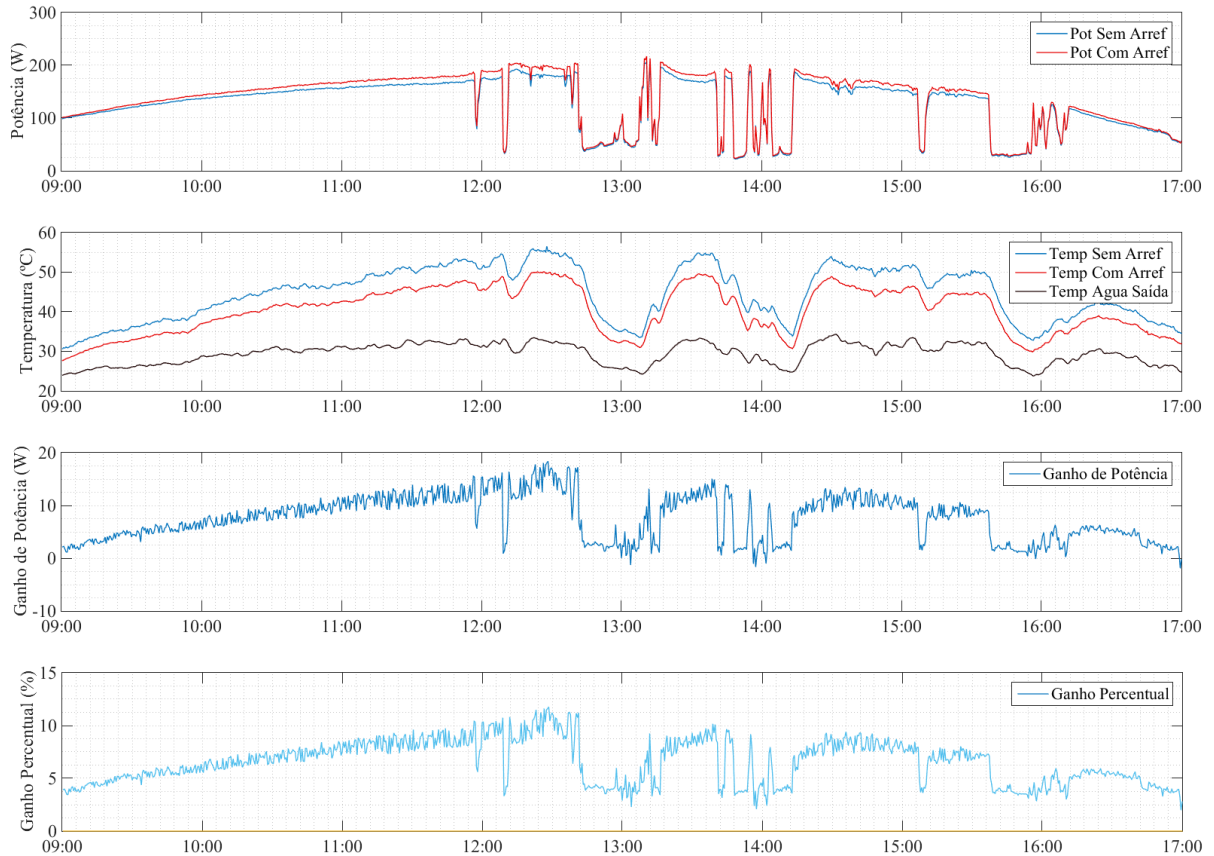


Figura 35 - Gráficos com vazão de 0,14 litro/min, em 17/07/2017

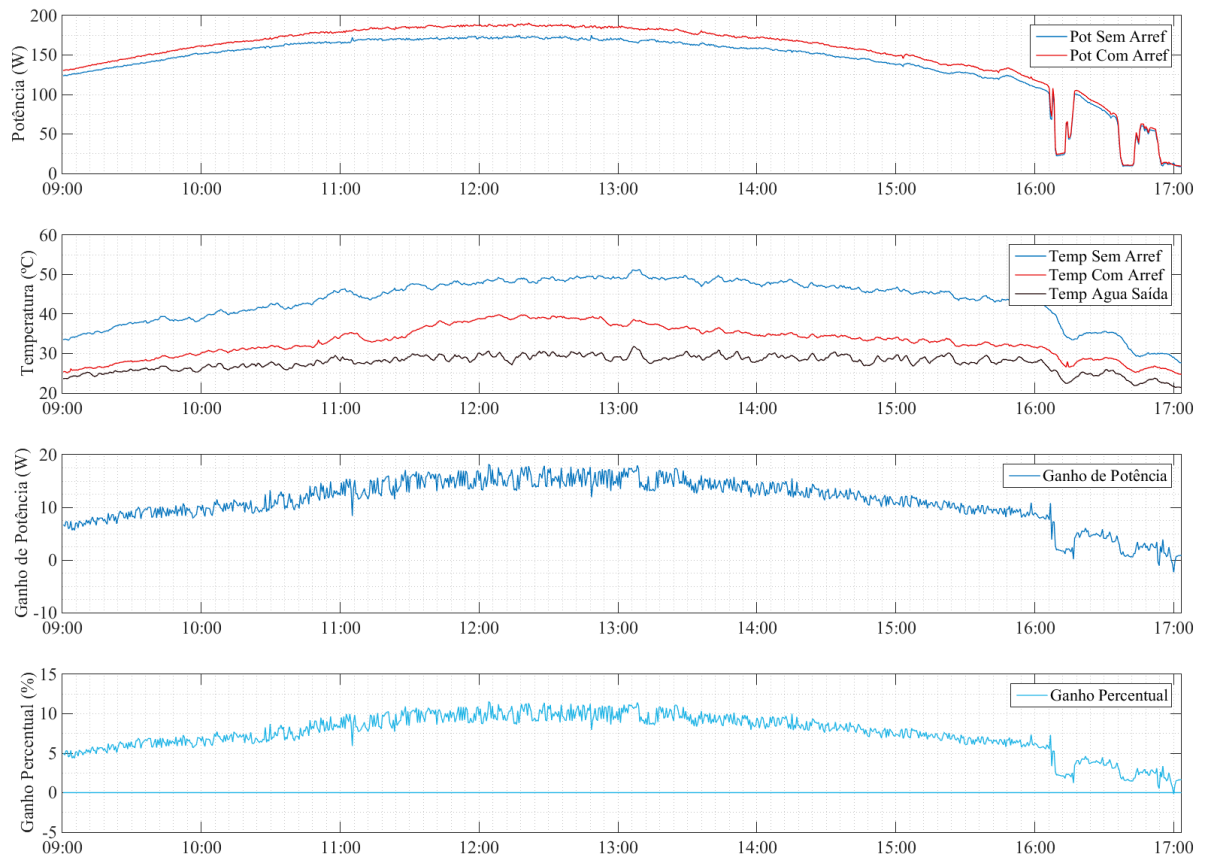


Figura 36 - Gráficos com vazão de 0,38 litro/min, em 18/07/2017

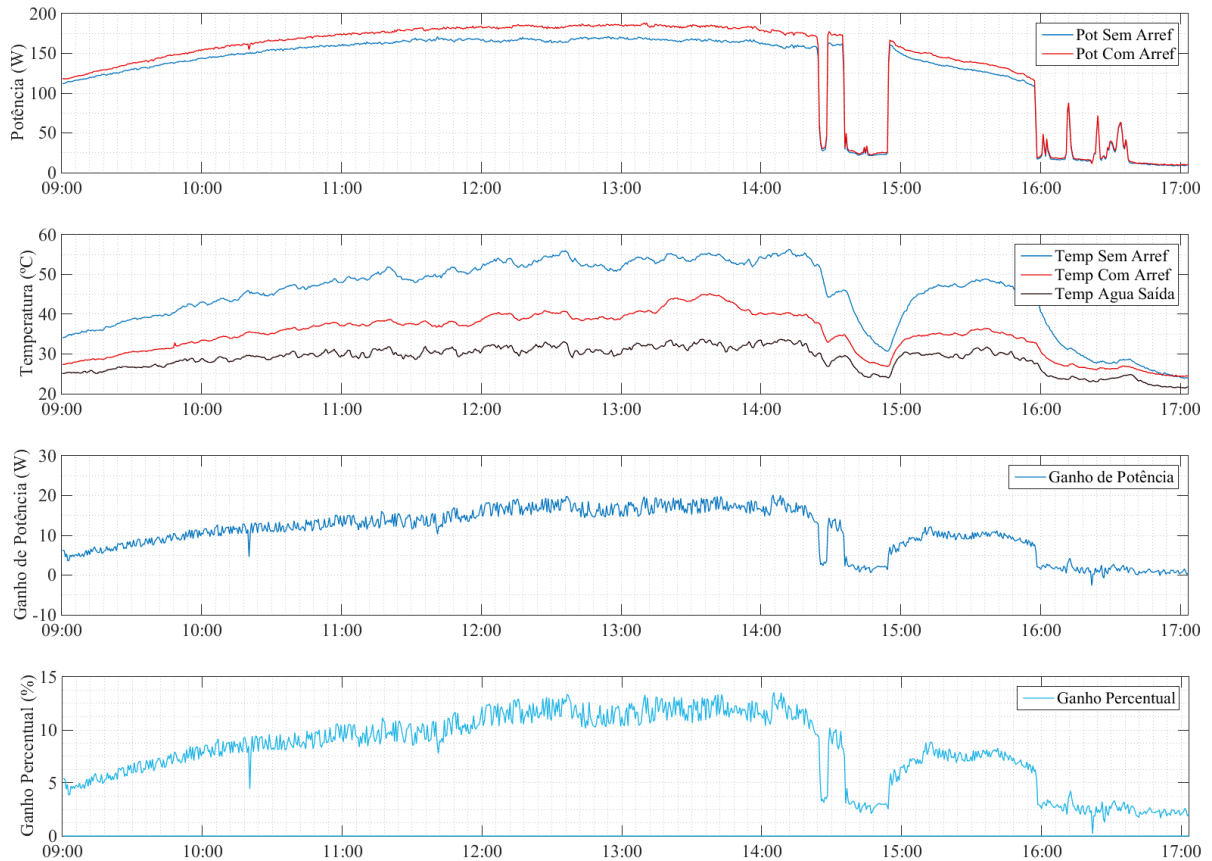


Figura 37 - Gráficos com vazão de 0,61 litro/min, em 20/07/2017

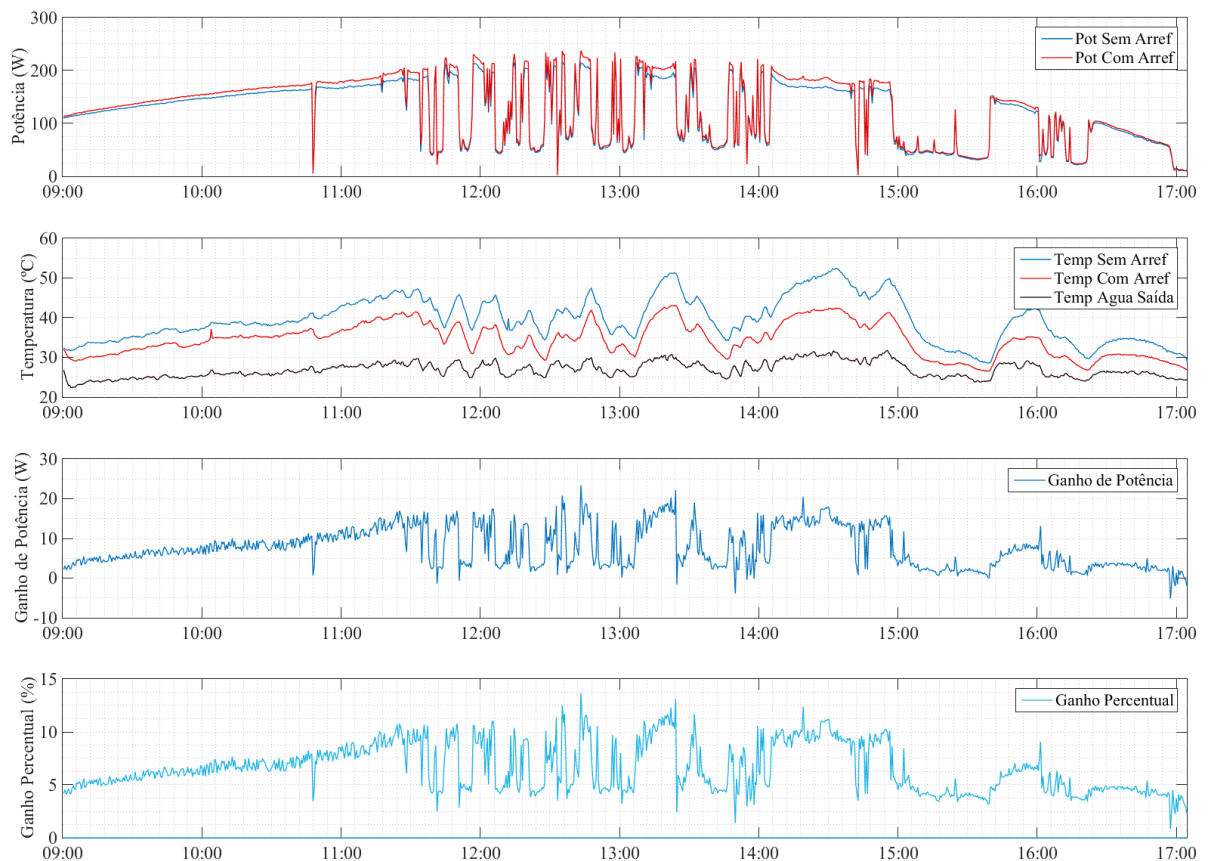


Figura 38 - Gráficos com vazão de 1,10 litro/min, em 21/07/2017

Os gráficos das Figuras 35, 36, 37 e 38 apresentam, eventualmente, algumas depressões, que representam a resposta das temperaturas e das potências aos sombreamentos sobre os painéis provocados por nuvens.

5.1.2 Definição da Vazão de Água a ser aplicada

A Tabela 4 mostra os ganhos obtidos (em kW e em percentual), em relação com as vazões aplicadas, em dias distintos no horário de 12:00 h, horário que normalmente apresenta maiores níveis de radiação.

Tabela 3 - Relação entre o ganho de potência (com o arrefecimento) com a vazão aplicada

| Vazão (litro/min) | Potência com arrefecimento (W) | Potência sem arrefecimento (W) | Ganho de Potência (W) | Percentual (%) |
|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------|----------------|
| 0,14 | 199 | 181 | 18 | 9,94 |
| 0,38 | 187,6 | 171,1 | 16,5 | 9,64 |
| 0,61 | 183,9 | 164,2 | 19,7 | 11,99 |
| 1,10 | 202,4 | 184 | 18,4 | 10,0 |

Ao analisar a Tabela 4 com os ganhos obtidos em relação as suas respectivas vazões, chega-se à conclusão de que, mesmo com a utilização de baixas vazões (da ordem de 0,14 *litro/min* a 0,38 *litro/min*) têm-se resultados semelhantes aos resultados obtidos quando utilizou-se vazões mais elevadas (acima de 1 *litro/min*). Como a análise visa buscar uma otimização do sistema como um todo, a escolha da vazão a ser implementada teria de ser a que melhor promovesse eficiência energética, combinada com o uso adequado dos recursos, ou seja, utilizar o menor volume de água possível e conseqüentemente contribuir também com a diminuição do consumo de energia no sistema de bombeamento. Portanto com base nessa análise, a melhor vazão a ser utilizada seria a vazão de 0,14 *litro/min*.

5.1.3 Análise da Necessidade de Aplicação de Água

Da análise dos dados obtidos gerou-se os gráficos das Figura 39 e 40 (em que a Figura 40 representa um recorte no gráfico extraído da Figura 39 nos horários entre as 07:00 h e as 17:00 h), onde pode ser constatado que as temperaturas nos painéis fotovoltaicos variam entre 11 °C e 56 °C (dados dos dias 17 e 18 de julho de 2017), em seus picos de mínima e máxima temperatura ao longo de um dia (período de 24 horas), sendo as temperaturas mínimas durante a madrugada e as máximas nos horários próximos ao meio dia. Nas referidas Figuras, suas

legendas encontram-se abreviadas, onde “Temp Sem” representa a temperatura do painel sem arrefecimento, “Temp Com” representa a temperatura do painel com arrefecimento, “Temp Água” representa a temperatura da água na saída (após arrefecer o painel).

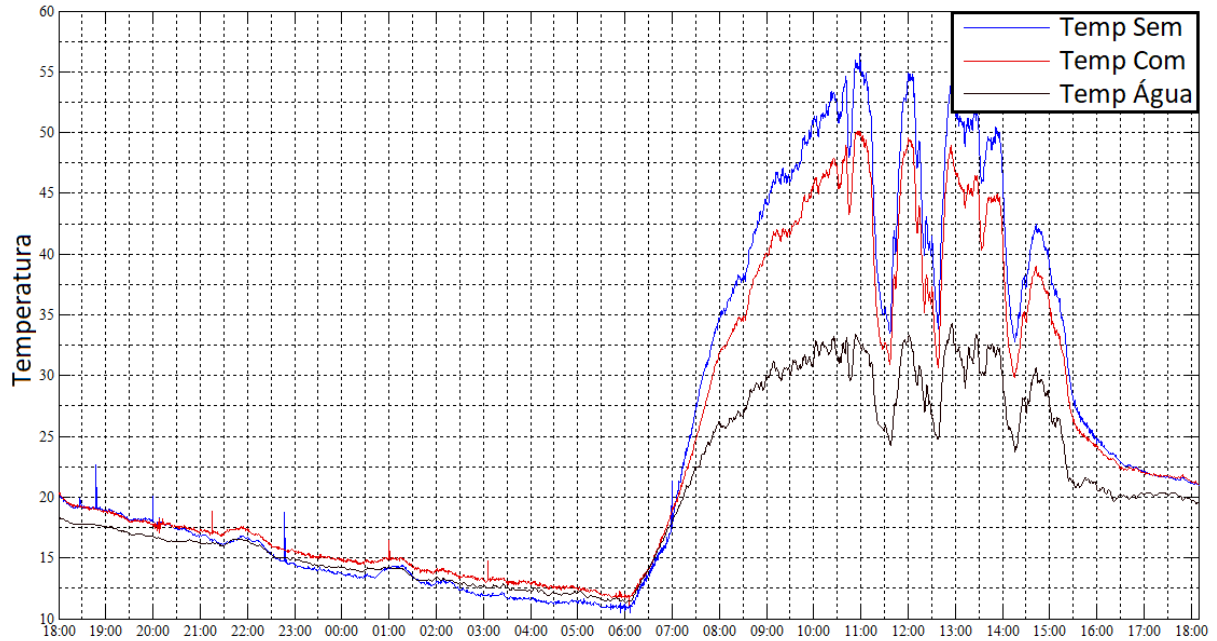


Figura 39 - Temperatura nos painéis ao longo de um dia e uma noite.

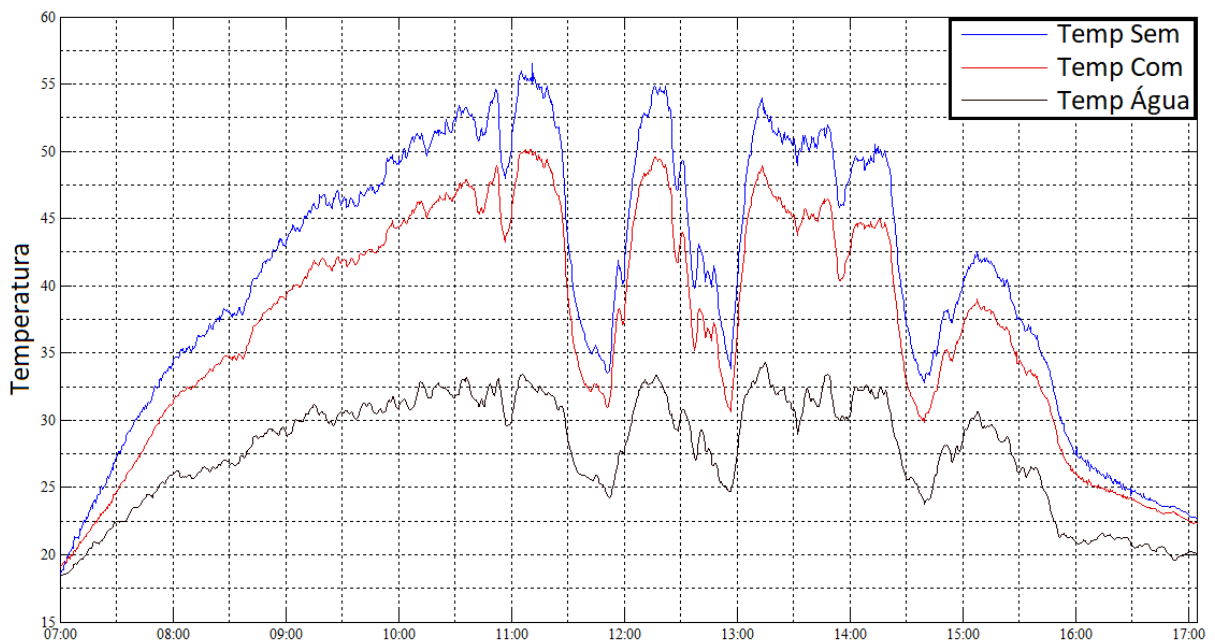


Figura 40 - Temperaturas nos painéis fotovoltaicos no horário entre as 07 e as 17 horas.

5.1.4 Motobomba monofásico

Conforme visto no item 4.2.1, para o ganho de eficiência do sistema de bombeamento, foram feitos testes experimentais em dois conjuntos motobombas, sendo um monofásico e outro trifásico. Inicialmente, na análise com o conjunto motobomba monofásico (de 3/4 CV) considerou-se a altura geométrica de 4,4 metros, fez-se a aquisição de dados da potência e da vazão, obtendo então uma vazão de 46,3 litros/min e uma potência instantânea de 0,44 kW, numa relação de 9,5 Watts/litro.

A aquisição dos dados da potência e da vazão foram obtidos com a bomba funcionando em frequência nominal (rotação nominal), visto que, por se tratar de um motor monofásico, não seria possível alterar sua frequência utilizando um inversor de frequência.

5.1.5 Motobomba trifásico

Ainda conforme visto no item 4.2.1, para o ganho de eficiência do sistema de bombeamento, considerando agora o conjunto motobomba trifásico, foram testadas velocidades variadas. Utilizando-se de um analisador de energia no motor trifásico de 1/3 CV acionado pelo inversor de frequência, fez-se novamente a aquisição de dados, sendo que inicialmente, a bomba foi acionada em sua frequência nominal e obteve-se os valores de vazão de 48,9 litros/min, uma potência instantânea de 0,39 kW, numa relação de 7,97 Watts/litro.

Com o uso do inversor de frequência no acionamento da bomba foi possível fazer variações na frequência e assim encontrar o valor da frequência que atenderia a demanda de água de forma eficiente e econômica. Foram feitas medições de potência e de vazão nas frequências de 60 Hz, 55 Hz, 50 Hz, 45 Hz, 40 Hz, 35 Hz e 30 Hz. A Tabela 4 mostra os valores medidos de potência e de vazão.

Tabela 4 - Medições da bomba trifásica.

| Frequência (Hz) | Velocidade (rpm) | Vazão (litro/min) | Potência (kW) | Watts/litro |
|-----------------|------------------|-------------------|---------------|-------------|
| 30 | 1817 | 12,3 | 0,09 | 7,3 |
| 35 | 2119 | 22,4 | 0,12 | 5,35 |
| 40 | 2422 | 27,4 | 0,16 | 5,84 |
| 45 | 2725 | 33,1 | 0,2 | 5,16 |
| 50 | 3028 | 38,7 | 0,25 | 6,45 |
| 55 | 3330 | 44,2 | 0,32 | 7,23 |
| 60 | 3633 | 48,9 | 0,39 | 7,97 |

A Figura 41 apresenta o gráfico da potência versus vazão em que é demonstrada a comparação entre valores de potência em relação a vazão para as bombas monofásica e trifásica.

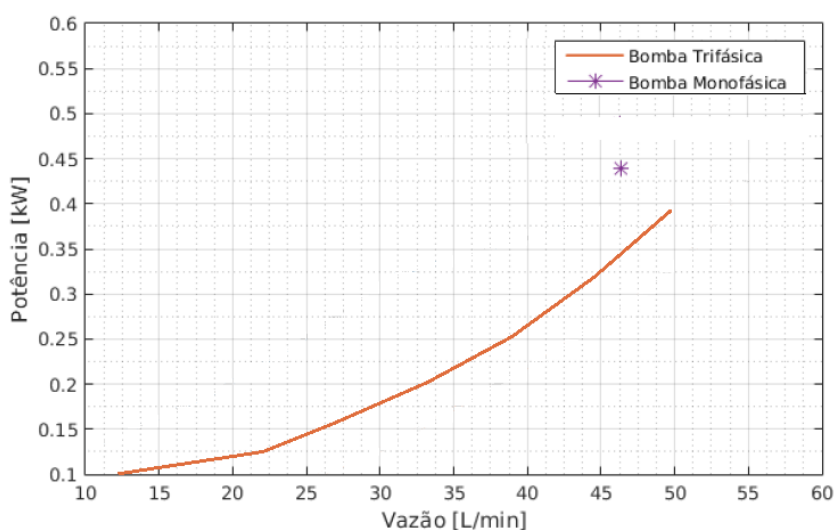


Figura 41 - Potência x Vazão para bombas monofásica e trifásica

5.1.6 Definições e Conclusões do Sistema de Arrefecimento

Com base na análise do gráfico apresentado na Figura 41, juntamente a Tabela 4 observa-se que o valor da frequência mais adequado a ser utilizada na bomba será a de 45 Hz, que consome uma potência de 0,2 kW e fornece uma vazão de 33,1 litros/min, e a menor relação de Watts/litro que é de 5,16 Watts/litro. Logo, a melhor opção foi a escolha do motor trifásico ao invés do monofásico, e para o motor trifásico a frequência de 45 Hz seria a mais adequada, pois, além de possuir a menor relação Watts/litro, também atende satisfatoriamente a demanda do sistema.

Da análise dos gráficos de potência apresentados na Figura 35, que representa os dados relativos a vazão de 0,14 litro/min, junto aos gráficos de temperaturas (Figuras 39 e 40), e considerando a melhor relação de consumo de potência obtida de 5,16 W/litro para o sistema de bombeamento, têm-se que para arrefecer um único painel com 0,14 litro seria necessária uma potência de 0,72 W. Portanto, considerando unicamente o consumo com o sistema de bombeamento, a aplicação de água se justificaria quando o ganho de potência com o arrefecimento for maior do que 0,72 W por painel, sendo necessário um sistema de controle que

relacione o ganho de potência obtido, com a temperatura dos painéis, para evitar o consumo de potência desnecessário com o sistema de bombeamento. E conforme os ganhos obtidos em relação às temperaturas nos painéis (Figuras 35, 36, 37 e 38), observa-se que os ganhos são mais significativos nos momentos em que as temperaturas nos painéis (sem arrefecimento) são superiores a valores entre 35 a 40 °C. Portanto, inicialmente, adotou-se o valor de 40 °C para o valor de *setpoint* (definido no sistema supervisório), ou seja, a válvula de acionamento de água para o arrefecimento seria aberta somente quando a temperatura nos painéis sem arrefecimento fosse igual ou superior a 40 °C.

5.2 ANÁLISE COMPARATIVA DOS DADOS COM A IMPLEMENTAÇÃO DO ARREFECIMENTO NO GRUPO DE SEIS PAINÉIS

As medições realizadas nessa etapa seguiram exatamente os mesmos métodos com que foram feitas anteriormente, ou seja, mesmas variáveis (potências, tensões, correntes, temperaturas), nos mesmos horários, com a diferença de que, nesta etapa, foram realizadas com seis painéis em vez de apenas um.

Como o objetivo principal era de verificar a validade dos dados obtidos inicialmente, a vazão adotada para essas medições foi a que obteve os melhores resultados e que foi definida como sendo a vazão mais adequada, conforme descrito no item 5.1.2, que é a vazão de 0,14 *litro/min*. Assim sendo, foram feitas medições durante 5 (cinco) dias nos horários das 09:00 horas às 17:00 horas. As Figuras 42, 43, 44, 45 e 46 mostram os gráficos gerados, onde são apresentados os gráficos de potências, temperaturas e o ganho de potência. Os gráficos apresentados nas referidas figuras foram gerados no software Matlab 2014 e o Anexo C apresenta código utilizado para a geração dos mesmos.

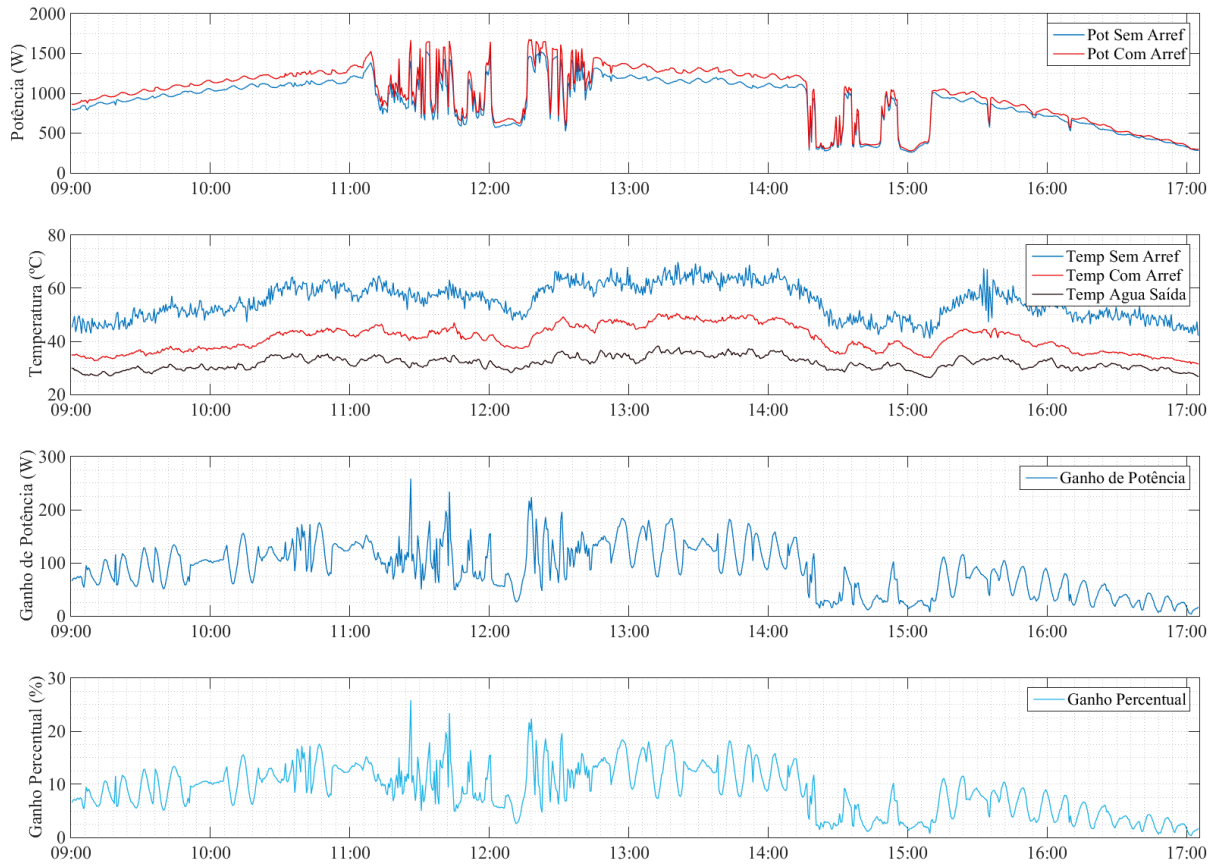


Figura 42 - Gráficos de Potências, Temperaturas e Ganho, em 09/10/2017.

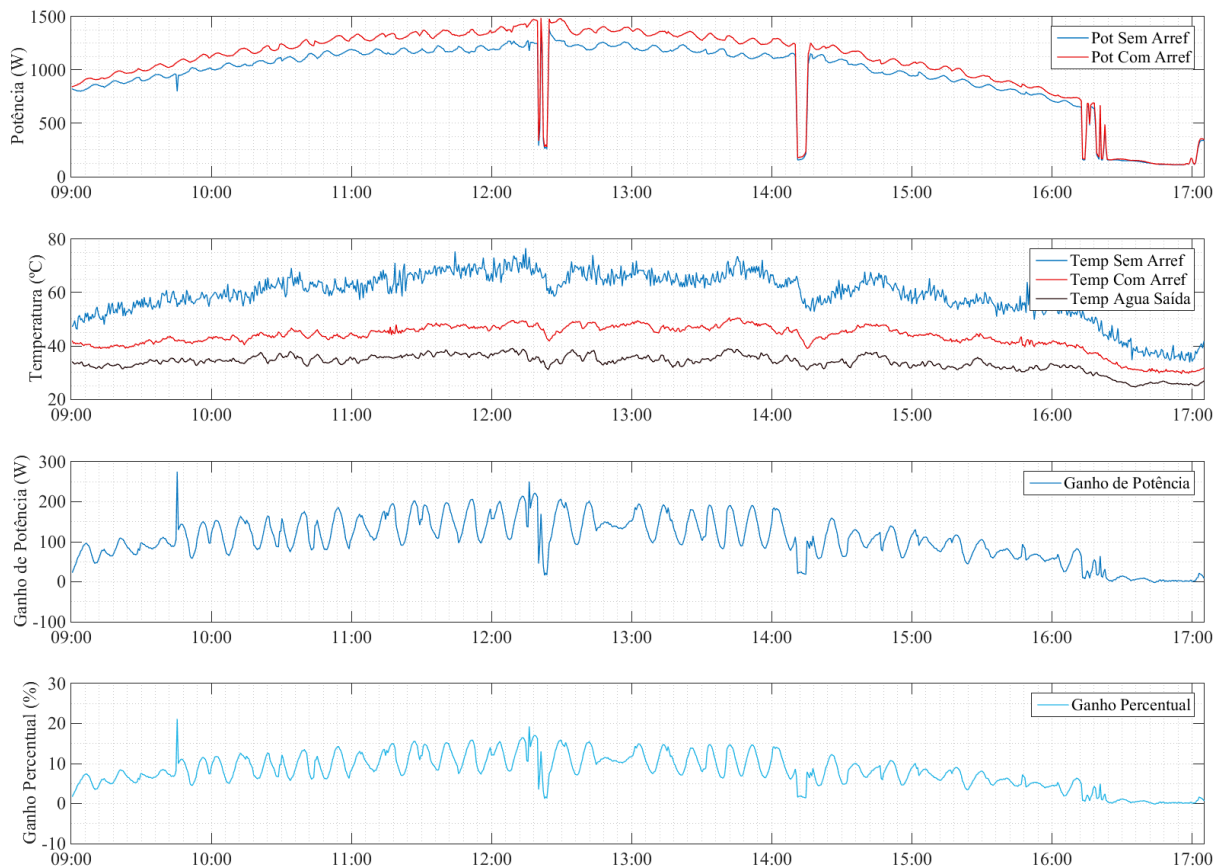


Figura 43 - Gráficos de Potências, Temperaturas e Ganho, em 14/10/2017.

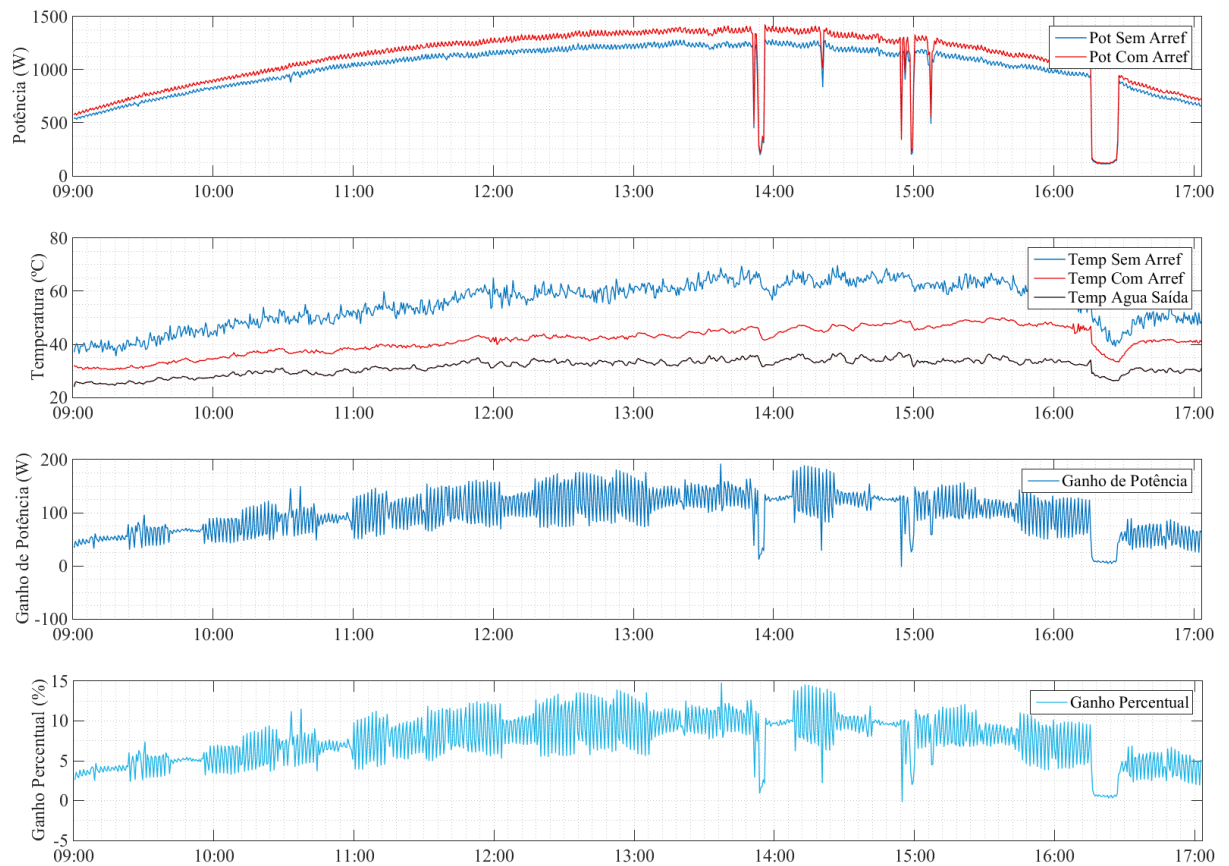


Figura 44 - Gráficos de Potências, Temperaturas e Ganho, em 16/10/2017.

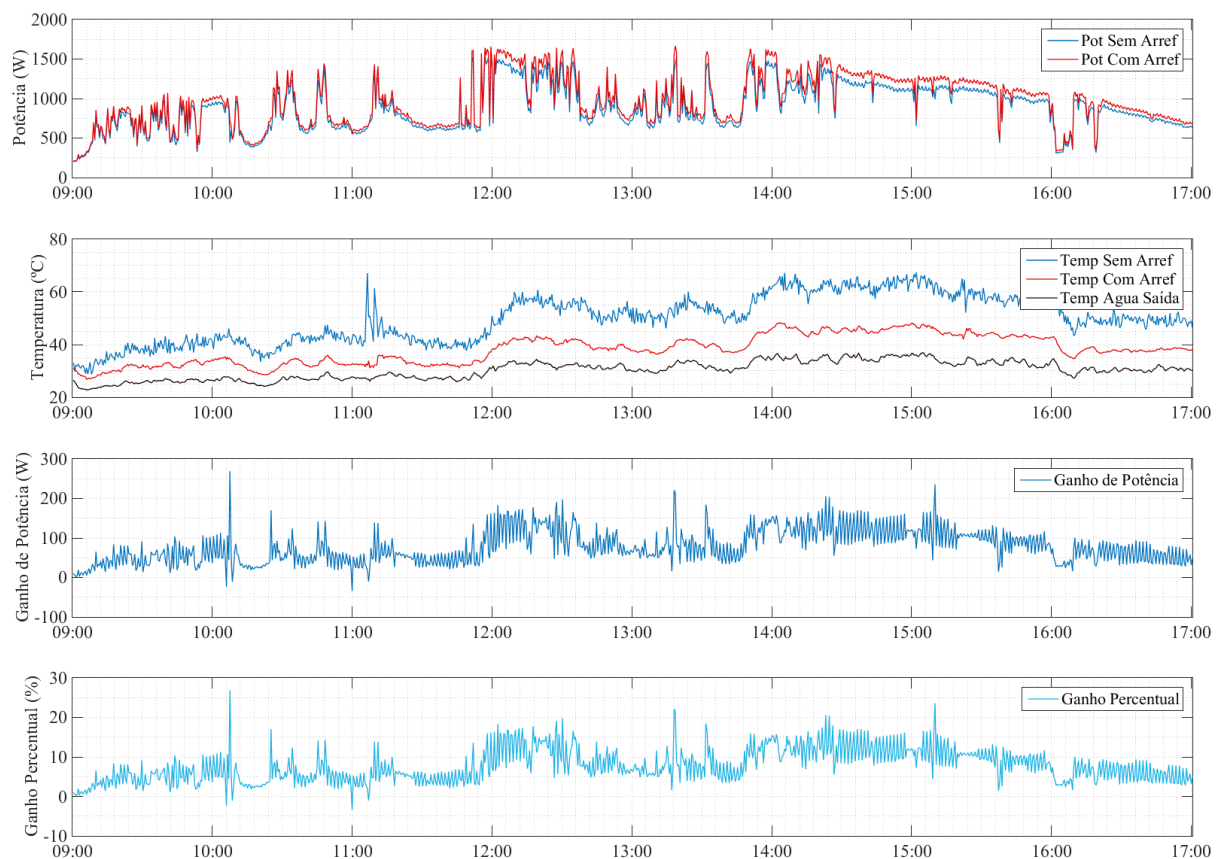


Figura 45 - Gráficos de Potências, Temperaturas e Ganho, em 17/10/2017.

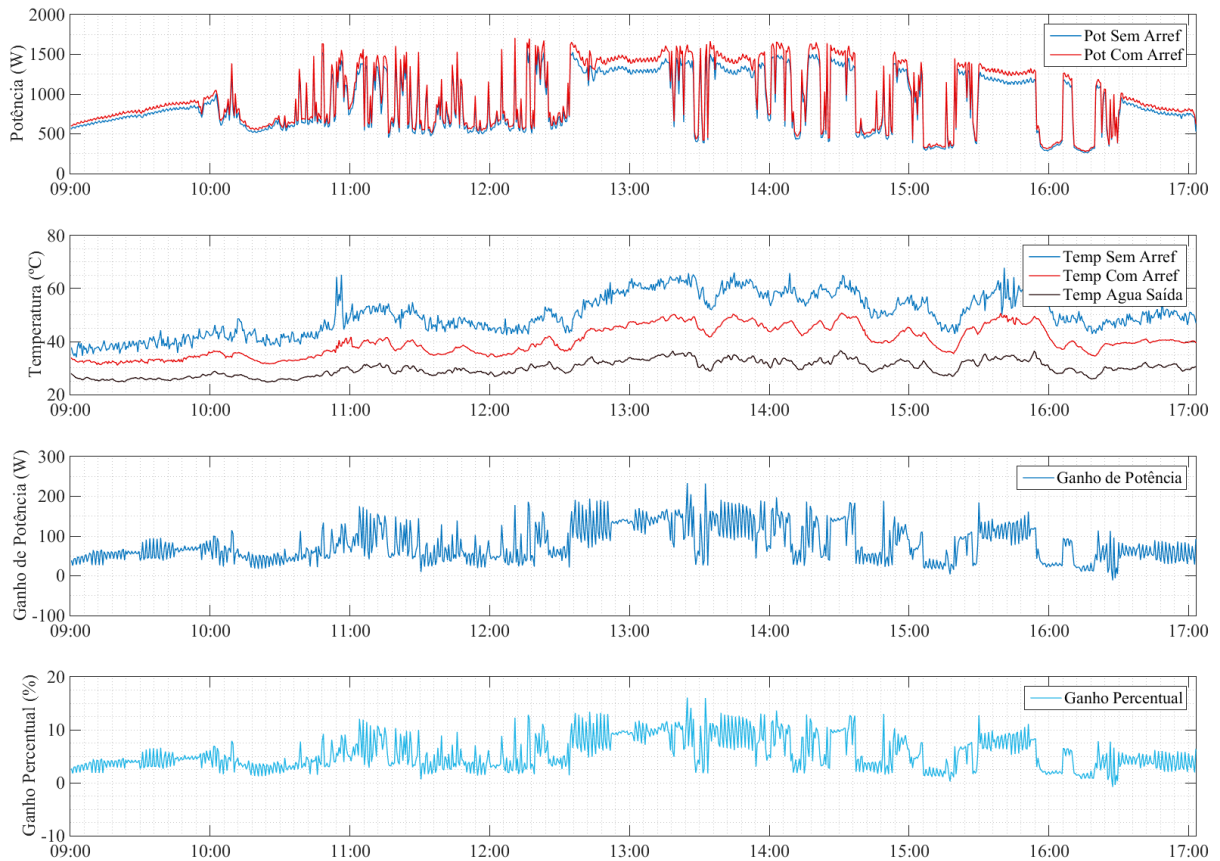


Figura 46 - Gráficos de Potências, Temperaturas e Ganho, em 18/10/2017.

Os gráficos que foram apresentados a seguir, nas Figuras 45 e 46, foram gerados em dias que apresentaram muitas nuvens durante a maior parte do dia, portanto podem ser observadas várias depressões e muitas variações ao longo do dia, que representam a resposta das temperaturas e das potências aos sombreamentos sobre os painéis provocados pelas nuvens.

A Tabela 5 mostra os ganhos obtidos (em kW e em percentual), em relação com a vazão aplicada de 0,14 litro/min, em dias distintos (com exceção do 4º dia apresentado na Figura 45, que foi um dia atípico, com muitas nuvens, apresentando resultados insatisfatórios à análise), no horário de 13:00 horas, horário comum com ausência de nuvens nos dias analisados, e que também apresenta bons níveis de radiação solar nesta época do ano.

Tabela 5 - Ganho de potência (com o arrefecimento) com a vazão de 0,14 litro/min

| Dia | Potência com arrefecimento (W) | Potência sem arrefecimento (W) | Ganho de Potência (W) | Ganho Percentual (%) |
|------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 09/10/2017 | 1.340 | 1.220 | 120 | 9,83 |
| 14/10/2017 | 1.375 | 1.225 | 150 | 12,24 |
| 16/10/2017 | 1.350 | 1.225 | 125 | 10,20 |
| 18/10/2017 | 1.425 | 1.300 | 125 | 9,61 |

Nos gráficos apresentados nas Figuras 42, 43, 44, 45 e 46, e também na Tabela 5, pode-se verificar que o comportamento das variáveis observadas, são semelhantes aos resultados verificados na Tabela 4, obtidos com os experimentos realizados com a utilização de apenas 2 (dois) painéis.

5.3 VIABILIDADE TÉCNICA DE IMPLEMENTAÇÃO DA PLANTA

Para a análise da viabilidade técnica de implementação em uma planta de maior porte, foram realizadas medições e o tratamento dos dados obtidos, possibilitando assim a realização de análises, na seguinte sequência:

- Análise dos dados de consumo de energia utilizada no sistema de bombeamento para promover o arrefecimento dos painéis;
- Análise dos dados em apenas dois painéis (sendo um painel com arrefecimento e outro sem arrefecimento);
- Análise dos dados em grupo de doze painéis (sendo um grupo de seis painéis com arrefecimento e outro grupo de seis painéis sem arrefecimento);
- Análise comparativa dos dados de geração de energia nos diferentes cenários (com dois painéis e com grupos de painéis);
- Balanço energético entre o ganho de energia com o arrefecimento e a energia consumida no sistema de bombeamento.

Com relação ao sistema de bombeamento, conforme pode ser observado na Figura 23, foi composto por três caixas d'água, duas de 5000 litros instaladas abaixo do experimento, e uma de 500 litros, instalada acima. A água armazenada nas caixas de 5000 litros era recalçada para a caixa de 500 litros quando essa atingisse 250 litros. O recalque foi feito por uma bomba trifásica de 1/3 CV (250 W) acionada por um inversor de frequência ajustado em 45 Hz.

Conforme visto no item 5.1.2, ficou definida a vazão de 0,14 litro/min como sendo a mais adequada, sendo necessário verificar a viabilidade de implementação do sistema de arrefecimento, já que o ganho de potência com o resfriamento do painel deve ser superior à potência utilizada para o bombeamento de água.

Como já definido, o arrefecimento de um painel demanda 0,14 litro/min. Diante disso, para arrefecer os 18 painéis (quantidade de painéis da planta em que foram realizadas as medições) a vazão total seria de 2,52 litros/min. Considerando as oito horas de geração de ener-

gia, período de maior insolação, seriam gastos 1209,6 litros de água por dia para arrefecimento dos 18 painéis.

Diante do valor da vazão e do tempo de arrefecimento, têm-se que durante as 8 horas a bomba teria que recalcar água 5 vezes para a caixa d'água de 500 litros, e com base nos dados da Tabela 3, chega-se ao gasto 7,57 minutos para encher os 250 litros necessários, totalizando 37,85 minutos (0,63 horas) nas 5 vezes em que a bomba será ligada. Sendo assim, considerando a potência da bomba de 250 W a energia gasta nessa operação seria de 157,7 Wh.

Durante as oito horas de geração, quando comparado ao painel sem arrefecimento, o painel fotovoltaico arrefecido com vazão de 0,14 litro/min teve ganho energético de 61,54Wh. Ao multiplicar essa energia gerada pela quantidade de painéis da planta fotovoltaica, têm-se um ganho de 1107,7 Wh em um período de 8 horas. Sendo assim, a bomba utilizada para recalque da água, consumiria para arrefecimento de 18 painéis 157,7 Wh, o equivalente a 14,2% do ganho obtido. Diante disso, têm-se que a planta fotovoltaica com painéis refrigerados geraria 950 Wh a mais que a planta com painéis sem refrigeração, já considerando a energia total gasta para bombeamento.

Para o cálculo do rendimento η utilizou-se a Equação (5.1), considerando a comparação entre os mesmos painéis analisados, sendo que, ao longo das 8 horas, o painel com arrefecimento gerou 1074,07 Wh, e o painel sem arrefecimento gerou 1012,53 Wh, na vazão de 0,14 litro/min.

$$\eta = \frac{E_{geradapelo\ painel\ com\ arref} - E_{geradapelo\ paine\ sem\ arref}}{E_{geradapelo\ paine\ sem\ arref}} \cdot 100\% \quad (5.1)$$

Após o cálculo chega-se ao rendimento no valor de $\eta = 6,08\%$ (sem considerar o consumo de energia com o sistema de bombeamento). Ao considerar o consumo de energia com o sistema de bombeamento, que é de 8,33 Wh para um painel durante as 8 horas, o rendimento tem seu valor reduzido para $\eta = 5,26\%$.

6 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo principal desenvolver estudos e técnicas para promover a melhoria da eficiência de geração energética em painéis fotovoltaicos por meio da diminuição da temperatura de operação dos mesmos. Para isso montou-se todo um sistema de suprimento de água (água de reúso), proveniente da captação da água da chuva. Paralelamente a isso, buscou-se a otimização dos subsistemas que integrariam o projeto como um todo, onde foram desenvolvidos estudos técnicos para a melhoria da eficiência do sistema de bombeamento da água a ser aplicada nos painéis e também promoveu-se a implementação de um sistema de aquisição de dados, automação, supervisão e controle com a utilização de um software supervisorio (Elipse E3).

A partir dos resultados aqui apresentados, conclui-se que as técnicas de arrefecimento em painéis fotovoltaicos, diante de toda a faixa de valores testados, contribuem com o ganho de potência pelos painéis em até 12%, o que, em larga escala, representa grande quantidade na geração de energia elétrica. A viabilidade econômica da implementação do sistema de arrefecimento não foi estudada dentro do prazo de vida útil dos equipamentos eletroeletrônicos de geração fotovoltaicos utilizados e poderá ser realizada com os fundamentos desenvolvidos nesse estudo.

As técnicas de arrefecimento são, cada vez mais, utilizadas na busca por medidas que aumentem a potência de saída dos painéis, principalmente em locais com altos índices de radiação solar, onde parte da energia que chega ao painel é convertida em energia térmica, aumentando a temperatura de junção das células solares.

A utilização da água de chuva para arrefecimento, além de contribuir no aproveitamento energético pelos painéis, acrescenta uso ao que seria descartado, sendo então inexistentes os gastos com a água neste sistema. A água de chuva utilizada, pode ainda ser recirculada pelos painéis, de modo que o sistema funcione de forma sustentável, imprimindo ainda mais valor aos recursos renováveis utilizados.

O sistema de suprimento de água, conseqüentemente, pode ser implementado em instalações, onde há potencial de reutilização de água, para aumentar a quantidade de energia produzida e/ou reduzir o período de retorno do investimento. Os resultados mostram que o sistema de distribuição de água, sobre os painéis fotovoltaicos pode ser melhorado para otimizar a eficiência do fluxo de água utilizado.

6.1 PUBLICAÇÕES OBTIDAS

- C. A. Matias, L. M. Santos, A. J. Alves, W. P. Calixto. **Electrical performance evaluation of PV panel through water cooling technique.** (EEEIC) IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering, 2016.
- C. A. Matias, L. M. Santos, A. J. Alves, W. P. Calixto. **Increasing photo-voltaic panel power through water cooling technique.** Transactions On Environment And Electrical Engineering, v. 2, n. 1, pp. 1-6, 2017.
- L. M. Santos, A. J. Alves, C. A. Matias, W. P. Calixto. **Studies for the efficiency of a water pumping system for cooling and improving the electrical efficiency of photo-voltaic panels.** In: 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Kouty nad Dasnou, 2017.
- L. M. Santos, A. J. Alves, D. M. Salles, C. A. Matias, J. L. Domingos, E. G. Domingues, W. P. Calixto. **Technical analysis of the application of water in the improvement of the electrical efficiency in photo-voltaic panels.** In: Montevideo. IEEE URUCON, 2017. p. 1.
- *Artigo aceito:* L. M. Santos, A. J. Alves, D. M. Salles, C. A. Matias, J. L. Domingos, E. G. Domingues, S. B. Oliveira. **Water application system on the surface of photovoltaic panels to improve energy efficiency.** In: Palermo. EEEIC 2018.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como continuidade do trabalho, sugere-se os seguintes temas:

- Análise da viabilidade econômica de implantação de arrefecimento em plantas de geração em estabelecimentos comerciais e industriais com água de reúso.
- Realizar estudos, simulações e acompanhamento da temperatura da água utilizada no arrefecimento dos painéis e sua influência no ganho energético.
- Implementação de controle automático de fluxo de água, controlado de acordo com a temperatura, para o arrefecimento dos painéis fotovoltaicos.
- Análise comparativa entre diferentes formas de arrefecimento, como por exemplo, com o arrefecimento na parte traseira do painel fotovoltaico.
- Estudos comparativos e análise de viabilidade técnica e econômica de um sistema de arrefecimento em relação a um sistema equipado com “seguidor solar”.

REFERÊNCIAS

AL-BAALI A.A. **Improving the power of a solar panel by cooling and light concentrating.** Sol Wind Technol, 3:241–5, 1986.

ALVES, A. J.; OLIVEIRA, A. M.; OLIVEIRA, L. F. C. **Emprego do inversor de frequência para verificação das relações de rateaux e redução da potência consumida em um sistema de bombeamento.** In: XXX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 2001, Foz do Iguaçu - Brazil, 2001.

ALVES, A. J.; OLIVEIRA, A. M.; OLIVEIRA, L. F. C. **Verificação das relações de Rateaux pelo emprego de um inversor de frequência.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 6, pp. 523-525, 2002.

ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil.** Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2008.

_____. **Resolução Normativa Nº 482 de abril de 2012.** Brasília: ANEEL, 2012.

_____. **Módulos do PRODIST, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional.** Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição. 2012.

BANZI, M. / tradução Rafael ZANOLLI. **Primeiros passos com Arduino.** São Paulo: Editora Novatec Ltda, 2011.

BARBI, IVO. **Eletrônica de Potência.** 5ª ed. Florianópolis: Editora do Autor, 2006.

BERGENE T.; LOVVIK O.M. **Model calculations on a flat-plate solar heat collector with integrated solar cells.** Sol Energy, 55:453–62, 1995.

BRAUNSTEIN A.; KORNFIELD A. **On the development of the solar photovoltaic and thermal (PVT) collector.** IEEE Trans Energy Convers, EC-1(4):31–3, 1986.

BUTZ, D. S. **Science of Earth Systems.** Editora Cengage Learning, 2002.

CARRIJO, D. R.; FERREIRA R. S.; GUIMARÃES Jr., S. C.; CAMACHO, J. R. **Uma Proposta de Técnica de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência de um Painel Fotovoltaico.** XVIII Congresso Brasileiro de Automática, Bonito-MS. 2010.

CELG D. **Norma Técnica da CELG de Nº71. Requisitos para Conexão de Microgeradores e Minigeradores ao Sistema de Distribuição da CELG D.** Goiânia: CELG D, 2014.

COSTA E SILVA, C. A. S. **Conversor CC/CC para aplicação em instalação fotovoltaica.** Dissertação Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 2012.

CRESESB CEPEL. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **Energia Solar Princípios e Aplicações.** Disponível em: <www.cresesb.cepel.br>. Acesso em 16 abril. 2017.

DANEELS, Axel; SALTER, Wayne. **What is SCADA?** Disponível em: <<http://ref.web.cern.ch/ref/CERN/CNL/2000/003/scada/>>. Acesso em 03 junho 2017.

DUBEY, S.; SARVAIYA, J. N.; SESHADRI, B. **Temperature dependent photovoltaic (pv) efficiency and its effect on pv production in the world - a review**. Energy Procedia, vol. 33, pp. 311–321, 2013.

EMILIO, M. D. P. **Data Acquisition Systems: From Fundamentals to Applied Design**. 1st Edition, U.S.A, Springer; 2013.

FARANDA, R.; LEVA, S.; MAUGERI, V. **MPPT techniques for PV Systems: Energetic and cost comparison**. Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE, pp.1-6, July 2008.

FERNANDES, A. M. C. P. **Clima da Região de Goiânia**. Universidade Católica de Goiás – Departamento de Artes e Arquitetura. 2002. Disponível em <<http://www2.ucg.br/arq/aula/ctau/ClimaGoiania.PDF>>. Acesso em 23 abril. 2017.

FLORSCHUETZ L.W. **On heat rejection from terrestrial solar cell arrays with sunlight concentration**. In: Proceedings of the 11th IEEE PVSC conference. New York, USA, p. 318–26, 1975.

GAZOLI, J. R. **Microinversor monofásico para sistema solar fotovoltaico conectado à rede elétrica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Sistemas e Controle de Energia, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

HECKTHEUER, L. A.; **Análise de Associações de Módulos Fotovoltaicos**; Tese de Doutorado; Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Porto Alegre, 2001.

HENDRIE, S.D. **Evaluation of combined photovoltaic/thermal collectors**. In: Proceedings of the ISES international congress, Atlanta, USA, vol. 3, p. 1865–9, 1979.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Temperaturas Diárias (Máxima, Média e Mínima)**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/sim/geragraficos.php>>. Acesso em 23 abril. 2017.

ITO S.; MIURA N. **Photovoltaic and thermal hybrid systems**. In: Proceedings of Asia-Pacific conference of international sol energy society. Gwangju, Korea, p. 73–8, 2004.

KELLY, N. A.; GIBSON, T. L. **Improved photovoltaic energy output for cloudy conditions with a solar tracking system**. Solar Energy, Vol. 83, Pages 2092-2102, 2009.

MARQUES, R. L.M. R. P. **Avaliação da Viabilidade de Coletores Híbridos Fotovoltaicos e Térmicos para Aplicação ao Aquecimento de Águas e Micro Geração de Eletricidade**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, Porto, 2008

MATIAS, C. A.; SANTOS, L. M.; ALVES, A. J.; CALIXTO, W. P. **Electrical performance evaluation of PV panel through water cooling technique**. (EEEIC) IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering, 2016.

MONACHESI, M. G. **Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento**. Rio de Janeiro: CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS – Eletrobrás, 2005.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica – Fluidos, Oscilações e Ondas de Calor.** Vol. 2 – 5ª ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 2014.

O'LEARY M.J.; CLEMENTS L.D. **Thermal–electric performance analysis for actively cooled, concentrating photovoltaic systems.** *Sol Energy*, 25:401–6, 1980.

PEREIRA, Enio Bueno; Martins, Fernando Ramos; ABREU, Samuel Luna; RÜTHER, Ricardo; **Atlas brasileiro de energia solar.** São José dos Campos: INPE, 2006.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos.** Rio de Janeiro: CEPEL – CRESESB, 2014.

POPOVICI, C. G.; HUDISTEANU, S. V.; MATEESCU, T. D.; CHERECHES, N. C. **Efficiency improvement of photovoltaic panels by using air cooled heat sinks.** *Sustainable Solutions for Energy and Environment*, EENVIRO - Bucharest, 2015.

PRAKASH J. **Transient analysis of a photovoltaicthermal solar collector for cogeneration of electricity & hot air/water.** *Energy Convers Manage*, 35(11):967–72, 1994.

RALMEMAN, R. J. **Desenvolvimento de um Sistema para Monitoramento Remoto em Centrais de Microgeração Fotovoltaica.** Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências Agrômicas Universidade Estadual Paulista. Botucatu, 2014.

REIS, L. B. **Geração de Energia Elétrica.** 2ª ed. Barueri: Editora Manole, 2011.

RÜTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil.** Florianópolis: 1ª ed. Florianópolis: Editora UFSC/LABSOLAR, 2004.

SALVADOR, M. **Como o Elipse E3 funciona.** Disponível em: < <http://kb.elipse.com.br/pt-br/questions/2/Como+o+Elipse+E3+funciona.>>. Acesso em 09 junho. 2017.

SANTOS, L. M.; ALVES, A. J.; MATIAS, C. A.; CALIXTO, W. P. **Studies for the efficiency of a water pumping system for cooling and improving the electrical efficiency of photovoltaic panels.** In: 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Kouty nad Dasnou, 2017.

SHARMA, M.; BANSAL, K.; BUDDHI, D. **Real time data acquisition system for performance analysis of modified pv module and derivation of cooling coefficients of electrical parameters.** *Procedia Computer Science*, vol. 48, pp. 582–588, 2015.

SILVA, L. S.; CHOQUE, N. M. S. **Desenvolvimento de Sistemas de Aquisição de Dados Usando a Placa Arduino Uno e o Software NI-Labview.** *Revista Desafios* – v. 03, n. Especial, 2016 (Suplemento).

SPADUTO, R. R.; FREITAS, L. C. G. **Estudo de Técnicas de MPPT em Sistemas Fotovoltaicos.** XI CEEL - Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica. UFU - Universidade Federal de Uberlândia - MG. 2013.

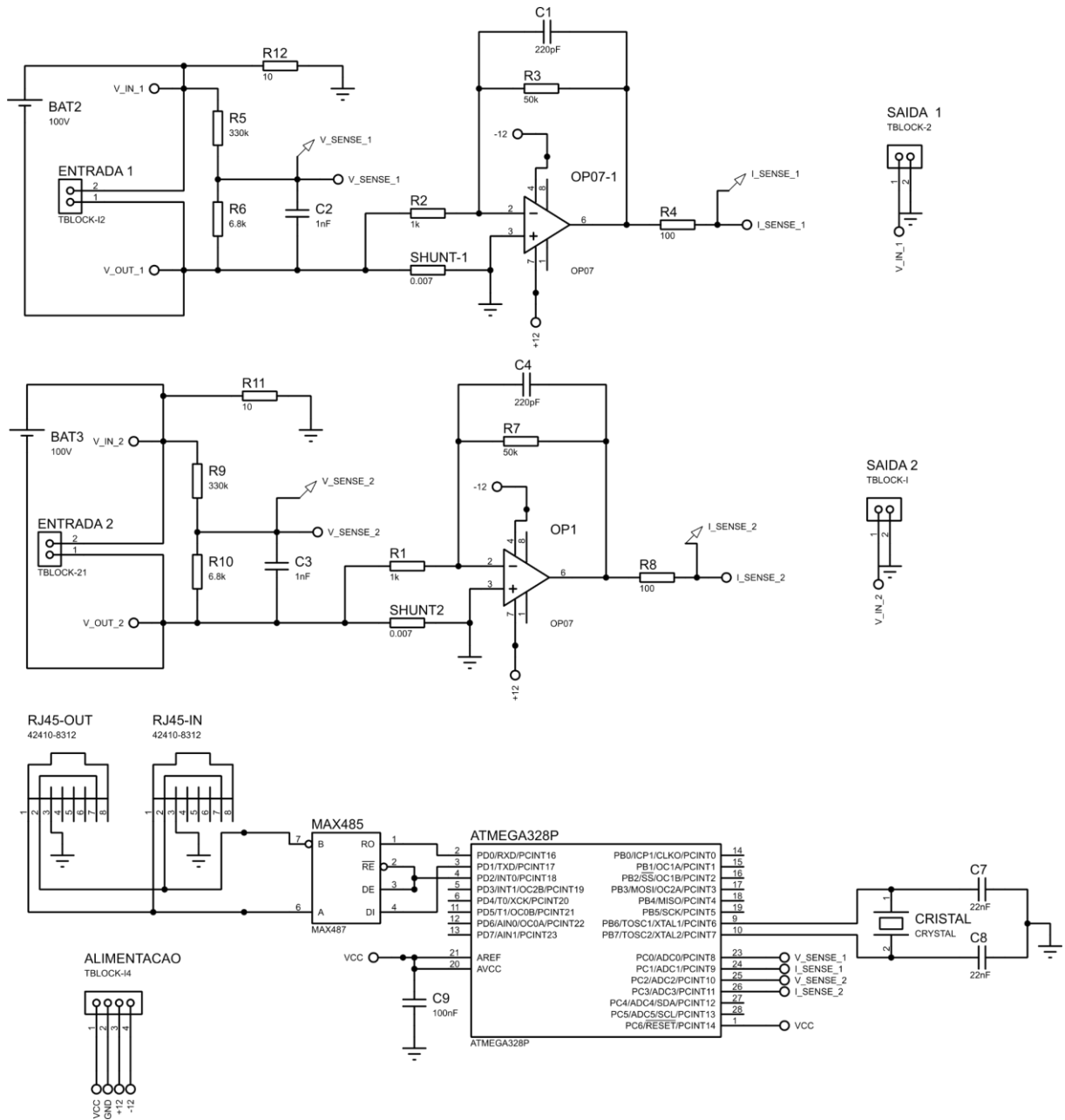
VIANA, A. N. C.; BORTONI, E. C.; NOGUEIRA, F. J. H.; HADDAD, J.; NOGUEIRA, L. A. H.; VENTURINI, O. J.; YAMACHITA, R. A. **Eficiência Energética: Fundamentos e Aplicações**. 1ª ed. Campinas, SP: Universidade Federal de Itajubá, 2012.

VILLALVA, Marcelo Gradella. **Energia Solar Fotovoltaica – Conceitos e Aplicações – Sistemas Isolados e Conectados à Rede**. 2ª ed. São Paulo: Editora Érica, 2015.

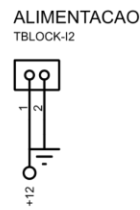
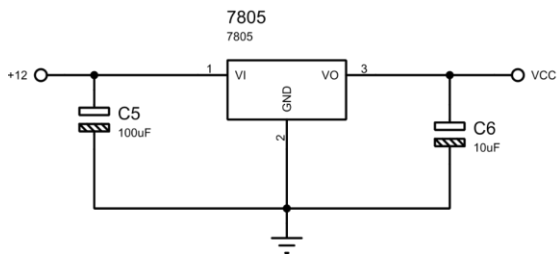
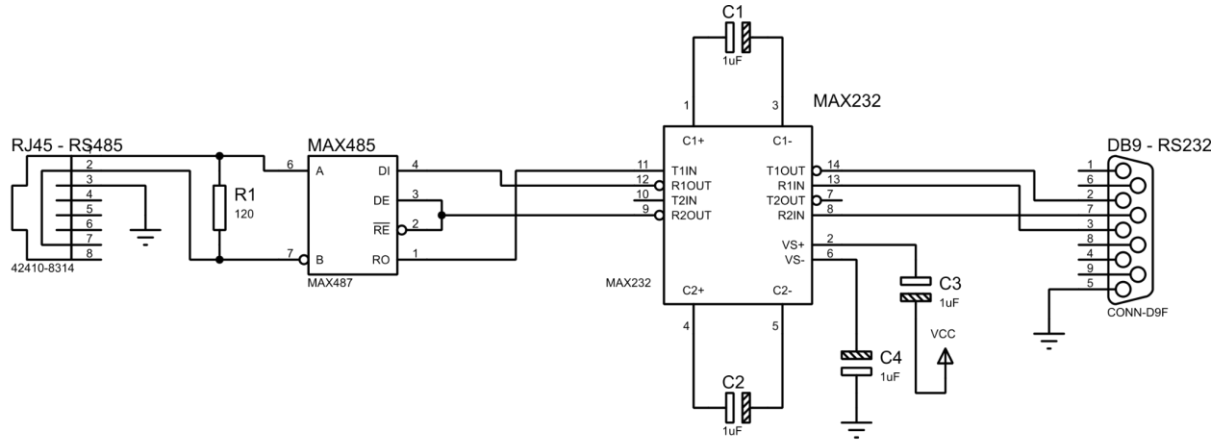
WOLF M. **Performance analysis of combined heating and photovoltaic power systems for residences**. Energy Convers, 16:79–90, 1976.

ZILLES, Roberto; MACÊDO, Wilson Negrão; GALHARDO, M.A.B; FERREIRA, Sérgio Henrique. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica**. 1ª Edição, São Paulo, SP, Editora Oficina de Textos, 2015.

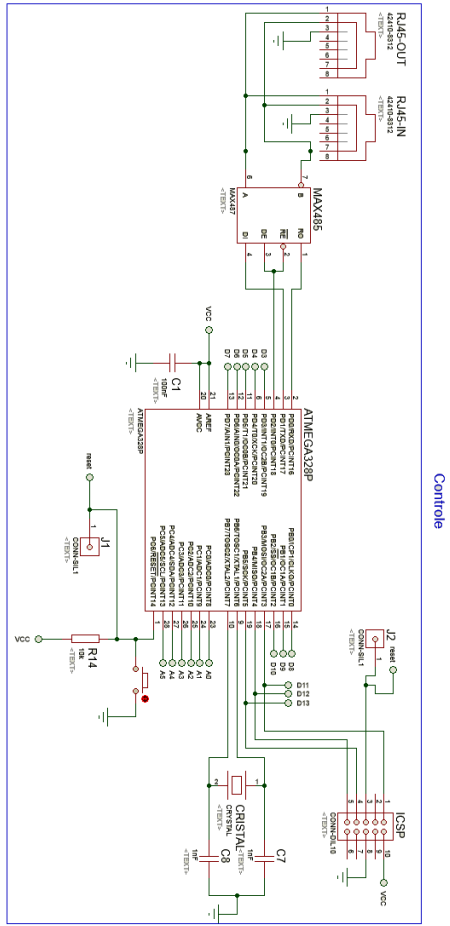
APÊNDICE A – ESQUEMÁTICO DA PLACA DE POTÊNCIA



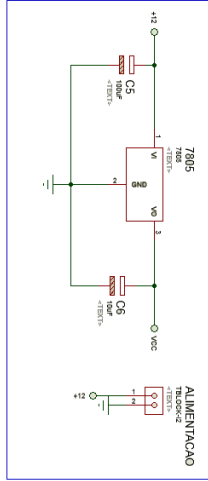
APÊNDICE B – ESQUEMÁTICO DA PLACA DE CONVERSÃO RS-232 PARA RS-485



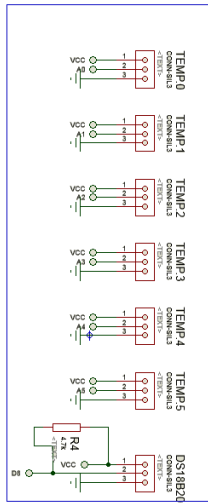
APÊNDICE C – ESQUEMÁTICO DA PLACA DE TEMPERATURAS



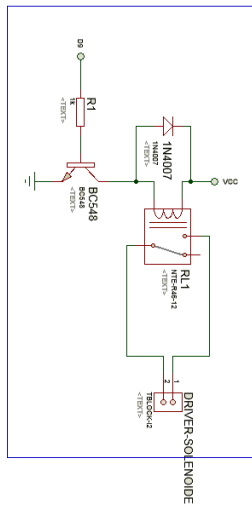
Controle



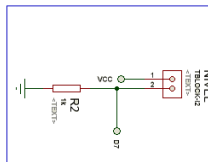
Fonte



Sensores de Temperatura



Driver rele



Sensor de Nível

ANEXO A – CÓDIGO PLACA DE TEMPERATURA COM ATMEGA 328

```
//Realiza coleta das temperaturas e envia para a porta serial rs-232 (p/ elipse e3)

#include <SimpleModbusSlave.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#define ONE_WIRE_BUS 8 // Data wire is plugged into pin 8 on the Arduino
const int tempA = A0; // Temperatura com resfriamento
const int tempB = A1; // Temperatura sem resfriamento
const int BUFFER_SIZE = 100; //Quantidade de vezes que vai ler para criar a m?dia
const float CELSIUS_BASE = 0.48875; //Base de convers?o para Graus Celsius ((5/1023) * 100)
float buffer = 0; // Buffer de leitura dos sensores

OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);
DeviceAddress sensor1;

enum{
  TEMP_COMRESF,
  TEMP_SEMRESF,
  TEMP_AGUA,
  VALV_RESF,
  HOLDING_REGS_SIZE
};
unsigned int holdingRegs[HOLDING_REGS_SIZE];
float readTemperature(int pin){
  float buffer = 0;
  for (int i = 0; i < BUFFER_SIZE; i++){
    buffer += analogRead(pin);
  }
  return ((buffer/BUFFER_SIZE) * CELSIUS_BASE);
}
void setup(){
  modbus_configure(&Serial, 9600, SERIAL_8N1, 6, 2, HOLDING_REGS_SIZE, holdingRegs);
  modbus_update_comms(9600, SERIAL_8N1, 6);
  pinMode(12, OUTPUT);
  sensors.begin(); // Start up the library
}
void loop(){
  sensors.requestTemperatures(); // Send the command to get temperatures
  float temp_agua = sensors.getTempC(sensor1);
  modbus_update();
  holdingRegs[TEMP_COMRESF] = readTemperature(tempA);
  holdingRegs[TEMP_SEMRESF] = readTemperature(tempB);
  holdingRegs[TEMP_AGUA] = temp_agua;
  digitalWrite(12,holdingRegs[VALV_RESF]);
}
}
```

ANEXO B – CÓDIGO PLACA DE TENSÃO E CORRENTE COM ATMEGA 328

```
//Realiza leituras de tensão e corrente e envia para a elipse via modbus
```

```
#include <SimpleModbusSlave.h>
const double CURRENT_GAIN_1 = 0.523;
const double VOLTAGE_GAIN_1 = 50.01;
const double CURRENT_GAIN_2 = 0.51279;
const double VOLTAGE_GAIN_2 = 49.90;
enum {
  VOLT1_VAL,
  AMP1_VAL,
  VOLT2_VAL,
  AMP2_VAL,
  POT1_VAL,
  POT2_VAL,
  HOLDING_REGS_SIZE
};
unsigned int holdingRegs[HOLDING_REGS_SIZE];
void setup(){
  modbus_configure(&Serial, 9600, SERIAL_8N1, 4, 2, HOLDING_REGS_SIZE, holdingRegs);
  modbus_update_comms(9600, SERIAL_8N1, 4);
}

void loop() {
  float VOLTAGE_1 = analogRead(A0);
  float voltage_1 = VOLTAGE_1 * (5.0 / 1023.0);
  float Tensao_1 = voltage_1 * VOLTAGE_GAIN_1 * 100;

  float AMPERAGE_1 = analogRead(A1);
  float amperage_1 = AMPERAGE_1 * (5.0 / 1023.0);
  float Current_1 = amperage_1 / CURRENT_GAIN_1 * 100;

  float VOLTAGE_2 = analogRead(A2);
  float voltage_2 = VOLTAGE_2 * (5.0 / 1023.0);
  float Tensao_2 = voltage_2 * VOLTAGE_GAIN_2 * 100;

  float AMPERAGE_2 = analogRead(A3);
  float amperage_2 = AMPERAGE_2 * (5.0 / 1023.0);
  float Current_2 = amperage_2 / CURRENT_GAIN_2 * 100;

  float Potencia_1 = Tensao_1 * Current_1 / 10000;
  float Potencia_2 = Tensao_2 * Current_2 / 10000;

  modbus_update();
  holdingRegs[VOLT1_VAL] = Tensao_1;
  holdingRegs[AMP1_VAL] = Current_1;
  holdingRegs[VOLT2_VAL] = Tensao_2;
  holdingRegs[AMP2_VAL] = Current_2;
  holdingRegs[POT1_VAL] = Potencia_1;
  holdingRegs[POT2_VAL] = Potencia_2;
}
```

ANEXO C – CÓDIGO MATLAB PARA GERAÇÃO DOS GRÁFICOS

```

%% Obs: Para rodar o código é necessário importar os dados (arquivo .txt)

clc; warning off;

%Filtro
fc = 1;
fs = 100;
[b,a] = butter(6,fc/(fs/2));

% tensaoS = filter(b,a,ts);
% tensaoC = filter(b,a,tc);
% correnteS = filter(b,a,cs);
% correnteC = filter(b,a,cc);
% 'XTickLabel',{'08:00','09:00','10:00','11:00','12:00'},...
tensaoS = vs;
tensaoC = vc;
correnteS = cs;
correnteC = cc;
temperaturaS = ts;
temperaturaC = tc;
tempsaidaA = ta;

potenciaSem = tensaoS.*correnteS;
potenciaCom = tensaoC.*correnteC;

%%
% Potencia
figure1 = figure('InvertHardcopy','off','Color',[1 1 1]);
% Create axes
% xlim(
axes1 = axes('Parent',figure1,'YMinorGrid','on','XMinorGrid','on',...
'XTickLabel',{'09:00','10:00','11:00','12:00','13:00','14:00','15:00','16
:00','17:00'},...
'XTick',[0 114 228 342 456 570 684 798 912],...
'FontSize',18,...
'FontName','times new roman');
box(axes1,'on');
hold(axes1,'on');
subplot(3,1,1,axes1)
plot(potenciaSem, 'LineWidth',1);
hold on;
subplot(3,1,1,axes1)
plot(potenciaCom, 'LineWidth',1, 'color',[.9 0 0]);
xlim([0 length(potenciaCom)]);
legend('Pot Sem Arref','Pot Com Arref','FontSize',18,'FontName','times new
roman');
%xlabel('Tempo (h:m)');
ylabel('Potência (W)','FontSize',18,'FontName','times new roman');
legend(axes1,'show');

% Temperaturas
axes1 = axes('Parent',figure1,'YMinorGrid','on','XMinorGrid','on',...
'XTickLabel',{'09:00','10:00','11:00','12:00','13:00','14:00','15:00','16
:00','17:00'},...
'XTick',[0 114 228 342 456 570 684 798 912],...
'FontSize',18,...
'FontName','times new roman');
box(axes1,'on');

```

```

hold(axes1, 'on');
subplot(3,1,2,axes1), plot(temperaturaS, 'LineWidth',1);
hold on;
subplot(3,1,2,axes1), plot(temperaturaC, 'LineWidth',1, 'color',[.9 0 0]);
hold on;
subplot(3,1,2,axes1), plot(tempsaidaA, 'LineWidth',1, 'color',[.1 0 0]);
xlim([0 length(temperaturaC)]);
legend('Temp Sem Arref', 'Temp Com Arref', 'Temp Agua Saída');
ylabel('Temperatura (°C)', 'FontSize',18, 'FontName', 'times new roman');
xlabel('Tempo (h:m)', 'FontSize',12, 'FontName', 'times new roman');
legend(axes1, 'show');

% Ganho de Potência
axes1 = axes('Parent',figure1, 'YMinorGrid','on', 'XMinorGrid','on',...
'XTickLabel',{'09:00', '10:00', '11:00', '12:00', '13:00', '14:00', '15:00', '16:00', '17:00'},...
'XTick',[0 114 228 342 456 570 684 798 912],...
'FontSize',18,...
'FontName', 'times new roman');
box(axes1, 'on');
hold(axes1, 'on');
ganhopotencia = potenciaCom-potenciaSem;
subplot(3,1,3,axes1)
plot(ganhopotencia, 'LineWidth',1);
xlim([0 length(ganhopotencia)]);
legend('Ganho de Potência');
ylabel('Ganho de Potência (W)', 'FontSize',18, 'FontName', 'times new roman');
xlabel('Tempo (h:m)', 'FontSize',12, 'FontName', 'times new roman');
legend(axes1, 'show');

```

Resumo do Currículo Lattes

Endereço para acessar: <http://lattes.cnpq.br/4604929764763106>

Mestre em Tecnologia de Processos Sustentáveis pelo IFG. Possui especialização em Redes de Computadores e Segurança de Sistemas pela UFG - (2011) Possui graduação em Engenharia Elétrica pelo IUESO - (2008), graduação em Tecnologia Eletromecânica pelo IFG - (2005), curso-técnico-profissionalizante em Eletrotécnica pela ETEG - Escola Técnica Federal de Goiás (1996) e curso-técnico-profissionalizante em Mecânica Geral pelo SENAI - Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (1989). Atualmente é Tecnólogo do IFG - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, lotado na Área 2 do Campus Goiânia (Ligado à Coordenação do Curso de Licenciatura em Física). Possui experiência na área de Engenharia Elétrica, na área de Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica, na área de Manutenção e Automação Industrial e na área de Mecânica Geral/Industrial.