

INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIÁS



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

Breno Eduardo Silva Mendes

**PROJETO E IMPLANTAÇÃO DE SISTEMA DE ARREFECIMENTO PARA
MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO
FOTOVOLTAICA COM SUPERVISÃO ONLINE**

Goiânia, 2021.

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

Breno Eduardo Silva Mendes

**PROJETO E IMPLANTAÇÃO DE SISTEMA DE ARREFECIMENTO PARA
MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO
FOTOVOLTAICA COM SUPERVISÃO ONLINE**

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. José Luis Domingos

Coorientador: Prof. Dr. Aylton José Alves

Goiânia, 2021.

M5226p Mendes, Breno Eduardo Silva.

Projeto e implantação de sistema de arrefecimento para melhoria da eficiência energética de um sistema de geração fotovoltaica com supervisão online / Breno Eduardo Silva Mendes. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2021.
101 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. José Luis Domingos
Coorientador: Prof. Dr. Aylton José Alves.

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.
Inclui anexos.

1. Energia solar. 2. Água de reuso. 3. Eficiência energética. I. Domingos, José Luis (orientador). II. Alves, Aylton José (coorientador). III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. IV. Título.



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS GOIÂNIA

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): **BRENO EDUARDO SILVA MENDES**

Matrícula: **20172011140022**

Título do Trabalho: **PROJETO E IMPLANTAÇÃO DE SISTEMA DE ARREFECIMENTO PARA MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA COM SUPERVISÃO ONLINE**

Restrições de Acesso ao Documento

Documento confidencial:

Não

Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no ReDi/IFG: 20/06/2021

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 DE MAIO DE 2021.

(Assinado eletronicamente)

BRENO EDUARDO SILVA MENDES

Documento assinado eletronicamente por:

■ Breno Eduardo Silva Mendes, BRENO EDUARDO SILVA MENDES - ESTUDANTE - IFG - CÂMPUS GOIÂNIA (10870883000225), em 07/07/2021 10:53:39.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 30/06/2021. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 177171

Código de Autenticação: 7ee54a0a3a





INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS GOIÂNIA

PARECER 3/2021 - GYN-CMTPS/GYN-DPPGE/CP-GOIANIA/IFG

**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**

Breno Eduardo Silva Mendes

**PROJETO E IMPLANTAÇÃO DE SISTEMA DE ARREFECIMENTO PARA MELHORIA DA
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA COM SUPERVISÃO
ONLINE**

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: Eficiência Energética e Engenharia Econômica Aplicada

Prof. Dr. JOSÉ LUIS DOMINGOS (presidente e orientador – PPGTPS IFG)

Prof. Dr. AYLTON JOSÉ ALVES (coorientador – PPGTPS IFG)

Prof. Dr. GÉLSON DA CRUZ JÚNIOR (avaliador externo - UFG)

Prof. Dr. DAYWES PINHEIRO NETO (avaliador – PPGTPS IFG)

Prof. Dr. SÉRGIO BOTELHO DE OLIVEIRA (avaliador - PPGTPS IFG)

Aprovado em: 20/05/2021

Documento assinado eletronicamente por:

- Gélson da Cruz Júnior, GÉLSON DA CRUZ JÚNIOR - OUTROS - IFG - CÂMPUS GOIÂNIA (10870883000225), em 06/07/2021 16:15:02.
- Aylton Jose Alves, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 03/07/2021 19:26:35.
- Daywes Pinheiro Neto, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 29/06/2021 20:29:14.
- Sergio Botelho de Oliveira, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 29/06/2021 13:41:52.
- Jose Luis Domingos, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 29/06/2021 12:48:06.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 20/05/2021. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 165283

Código de Autenticação: f0a57cc6d5



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Rua 75, nº 46, Centro, GOIÂNIA / GO, CEP 74055-110
(62) 3227-2811 (ramal: 2811)

Aos meus amores maiores, que partiram durante essa jornada,
minha amada mãe Silvia Maria de Jesus
e minha mãe-vó Maria da Silva Gomes,
que me deram tudo e sempre acreditaram em mim.

AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente, por me dar sabedoria e persistência nesta caminhada e nos desafios da vida.

A minha tia Maria Silva de Jesus que sempre me deu força nos obstáculos da vida, companheira de sempre.

A minha amada namorada Marina Cardozo Mesquita pelo apoio e carinho nos momentos necessários.

Ao orientador, Prof. Dr. José Luis Domingos pela orientação, por todos os ensinamentos e amizade nos momentos difíceis enfrentados durante o percurso.

Ao coorientador, Prof. Dr. Aylton José Alves pela coorientação e conselhos para o aperfeiçoamento da pesquisa.

Aos demais membros da banca examinadora, Prof. Dr. Sérgio Botelho de Oliveira, Prof. Dr. Daywes Pinheiro Neto e Prof. Dr. Gélon da Cruz Júnior, por todas as contribuições a esta pesquisa.

A todos os colegas do NEXT pela ajuda, companheirismo e contribuições no trabalho, em especial Calebe Abrenhosa Matias, Gustavo Duarte Menezes e Eduardo Souza de Oliveira.

A todos os colegas da turma, pelos momentos juntos em trabalhos, visitas técnicas e parcerias durante o programa de mestrado.

Aos funcionários e colaboradores do Instituto Federal de Goiás, campus Goiânia e campus Aparecida de Goiânia, pelo auxílio quando necessário.

Ao Instituto Federal de Goiás (IFG) e à Enel Distribuição Goiás pelo apoio financeiro e incentivo à pesquisa.

EPÍGRAFE

“Há uma força motriz mais poderosa que o vapor, a eletricidade e a energia atômica: a vontade.”

Albert Einstein

Título: Projeto e Implantação de Sistema de Arrefecimento para Melhoria da Eficiência Energética de um Sistema de Geração Fotovoltaica com Supervisão Online

Autor: Breno Eduardo Silva Mendes

Orientador: Prof. Dr. José Luis Domingos

Coorientador: Prof. Dr. Aylton José Alves

RESUMO

Neste trabalho é projetado e implementado estrutura, em planta piloto, para subsidiar análises de viabilidade técnica de melhoria de eficiência energética em usinas solares fotovoltaicas. Um aparato completo de arrefecimento é projetado e instalado em uma usina, em planta piloto sobre o solo, de 5,85kWp. A água de reuso utilizada é proveniente do sistema de tratamento do esgoto do campus Aparecida de Goiânia do Instituto Federal de Goiás (IFG). As estruturas desenvolvidas compreendem: sistema de controle do volume e da distribuição da água na superfície dos painéis; sistema de aquisição de dados, térmicos e elétricos dos painéis; sistema de controle, monitoramento, em tempo real, das grandezas coletadas, com utilização de uma rede industrial, baseada em protocolo Modbus RTU e Modbus TCP/IP. As análises preliminares apontaram para viabilidade técnica do sistema, com ganho médio, líquido, de 7,93% da potência gerada nos painéis solares, bem como balanço energético positivo entre o ganho de energia do sistema com arrefecimento em relação a energia gasta com recalque da água de reuso. Estudos econômicos poderão ser desenvolvidos, a partir dos custos do sistema e da estimativa de melhoria de eficiência energética.

PALAVRAS-CHAVE: ENERGIA SOLAR, ÁGUA DE REUSO, REATOR UASB, EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.

TITLE: COOLING SYSTEM DESIGN AND IMPLEMENTATION TO IMPROVE ENERGY EFFICIENCY OF A PHOTOVOLTAIC GENERATION SYSTEM WITH ONLINE SUPERVISION

AUTHOR: BRENO EDUARDO SILVA MENDES

ADVISER: DR. JOSÉ LUIS DOMINGOS

CO-ADVISER: DR. AYLTON JOSÉ ALVES

ABSTRACT

In this work, a structure is designed and implemented in a pilot plant to support analyzes of technical feasibility to improve energy efficiency in solar photovoltaic plants. A complete cooling apparatus is designed and installed in a plant, in a pilot plant above the ground, of 5.85kWp. The reuse water used comes from the sewage treatment system of the Aparecida de Goiânia campus of the Federal Institute of Goiás (IFG). The structures developed include: a system for controlling the volume and distribution of water on the surface of the panels; data acquisition system, thermal and electrical of the panels; control system, monitoring, in real time, of the collected quantities, using an industrial network, based on Modbus RTU and Modbus TCP / IP protocol. Preliminary analyzes pointed to the technical viability of the system, with an average net gain of 7.93% of the power generated in the solar panels, as well as a positive energy balance between the energy gain of the cooling system in relation to the energy spent on repressing the reuse water. Economic studies may be developed, based on the costs of the system and the estimate of improvement in energy efficiency.

KEYWORDS: SOLAR ENERGY, REUSE WATER, UASB REACTOR, ENERGY EFFICIENCY.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Célula fotovoltaica em corte, destacando o silício tipo <i>n</i> , tipo <i>p</i> , e a junção <i>pn</i>	26
Figura 2 – Corrente elétrica em função da diferença de potencial aplicada em uma célula fotovoltaica sobre as condições padrão.....	27
Figura 3 – Influência da Irradiância solar na curva I-V de uma célula fotovoltaica de silício na temperatura de 25°C.....	29
Figura 4 – Influência da temperatura da célula fotovoltaica na curva I-V para irradiância de 1000W/m ²	30
Figura 5 – Curva Tensão-Potência em diferentes temperaturas (G=1000 W/m ²)	30
Figura 6 – Sombreamento em um sistema fotovoltaico provocado por construção próxima ..	31
Figura 7 – Associação série-paralelo com diodo by-pass	32
Figura 8 – Sistema fotovoltaico com medição bidirecional	33
Figura 9 – Componentes da radiação solar	35
Figura 10 – Reator UASB do CETE Poli/UFRJ.....	39
Figura 11 – Sistema <i>Wetland</i> construído na EECA da UFG.....	40
Figura 12 – Sistema de supervisão e controle	47
Figura 13 – Blocos dos modelos de dados do Modbus	49
Figura 14 – Prefixos das faixas de dados	49
Figura 15 – Esquemas de indexação dos registradores	49
Figura 16 – Fluxograma do processo.....	51
Figura 17 – Fluxograma de acionamento das válvulas	52
Figura 18 – Estrutura de fixação dos painéis no solo com duas <i>strings</i> de 9 painéis cada	56
Figura 19 – Caixa de passagem com cabos elétricos do sistema fotovoltaico instalado	57
Figura 20 – Inversor String SIW300H M050 WEG da usina solo	57
Figura 21 – Vista aérea do Campus Aparecida de Goiânia do IFG.....	58
Figura 22 – Sistema de tratamento de esgoto do Campus Aparecida de Goiânia, composto por reator UASB e <i>Wetland</i>	58
Figura 23 – Vista geral da tubulação hidráulica (branco) e as 3 válvulas para arrefecimento dos painéis fotovoltaicos	59
Figura 24 – Estrutura de fixação dos painéis no solo com tubulação hidráulica (branco) para arrefecimento	60

Figura 25 – Detalhe da válvula sonelóide <i>on-off</i> que controle a vazão de água para arrefecimento dos painéis	60
Figura 26 – Detalhe do perfil quadrado na extremidade superior do painel para o arrefecimento	61
Figura 27 – Detalhe da calha de coleta da água após arrefecimento dos painéis	61
Figura 28 – Detalhe do distribuidor central (esquerda) e da eletroválvula que controla o fluxo de água para três painéis (direita)	62
Figura 29 – Detalhes da tubulação com mangueiras de poliuretano	62
Figura 30 – Perfis de alumínio na borda dos painéis	63
Figura 31 – Vista aérea dos painéis no solo	63
Figura 32 – Calha de coleta da água após arrefecimento dos painéis.....	64
Figura 33.a – Detalhe da tubulação de saída da água para retornar ao sistema de esgoto.....	64
Figura 33.b – Detalhe do sifão (com termopar para medir a temperatura de saída da água) e tubulação de saída da água para retornar ao sistema de esgoto	64
Figura 34 – Diagrama da rede	66
Figura 35 – Fluxograma do sistema de aquisição, controle e supervisão	66
Figura 36.a – Vista mostrando sensor termopar fixado na superfície traseira de um painel, distribuidor e mangueiras	67
Figura 36.b – Sensor termopar fixado na superfície traseira do painel fotovoltaico	67
Figura 37– Vista interna do quadro com oito transmissores de temperatura	68
Figura 38 – Vista interna do quadro com dispositivos (fonte de tensão, CLP e Flexy)	68
Figura 39 – Quadro com dispositivos instalado ao lado do inversor solar	69
Figura 40 – Pinagem RS422/RS485	70
Figura 41– Interface do <i>Flexy</i> no modo <i>Setup</i>	72
Figura 42 – Interface do <i>Flexy</i> no modo <i>View</i>	73
Figura 43 – Gráfico de temperaturas das <i>strings</i> com e sem arrefecimento dos painéis fotovoltaicos.....	74
Figura 44 – Gráfico de temperaturas de entrada (tubulação hidráulica) e saída (sifão) do sistema de arrefecimento dos painéis fotovoltaicos	75
Figura 45 – Gráfico das Potências das <i>strings</i> com e sem arrefecimento dos painéis fotovoltaicos	76
Figura 46 – Gráfico do Ganho percentual de potência com a média do ganho.....	77
Figura 47 – Características hidráulicas da bomba BC-92S 1C	78
Figura 48 – Características elétricas do motor	78

Figura B.1 – Planta dos Blocos C (Salas de Aula 1) e B (Salas de Aula 2) do Campus Aparecida de Goiânia do IFG	90
Figura B.2 – Bloco C (Salas de Aula 1) do Campus Aparecida de Goiânia do IFG com disposição dos painéis	91
Figura B.3 – Bloco B (Salas de Aula 2) do Campus Aparecida de Goiânia do IFG com disposição dos painéis	91
Figura B.4– Detalhes do projeto da estrutura de fixação dos painéis da usina solo	92
Figura B.5 – Detalhes da estrutura dos painéis da usina solo e caixas de passagem.....	92
Figura B.6 – Paginação e divisão das <i>strings</i>	92
Figura D.1 – Programação ladder CLP TPW-04.....	94
Figura D.2 – Programação ladder CLP TPW-04.....	95
Figura D.3 – Programação ladder CLP TPW-04.....	96
Figura D.4 – Programação ladder CLP TPW-04.....	97
Figura D.5 – Interface do <i>software</i> de programação do CLP para obter os dados de configuração da transmissão	98
Figura D.6 – Interface do <i>software</i> de programação do CLP para configurar o nó pertencente à rede de comunicação na transmissão de dados	99
Figura E.1 – Interface do aplicativo <i>Fusion Solar</i> para configurar a comunicação Modbus.	100
Figura E.2 – Interface <i>online</i> do Flexy para configurar os dados de transmissão de comunicação com o CLP (nó 10) e Inversor (nó 17)	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Rendimento médio obtido em células e módulos fotovoltaicos.....	42
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CdTe	Telureto de Cádmio
CIGS	Disseleneto de cobre, índio e gálio
CLP	Controlador Lógico Programável
FV	Fotovoltaico
IFG	Instituto Federal de Goiás
PV	<i>Photovoltaic</i> (Fotovoltaico)
PVT	<i>Photovoltaic/ Thermal</i> (Fotovoltaico/Térmico)
RTU	<i>Remote Terminal Units</i> (Unidade Terminal Remota)
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
STC	<i>Standard Test Conditions</i> (Condições padrão de teste)
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i> (Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente)
UHE	Usina Hidrelétrica

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da célula
FF	Fator de forma
G	Irradiância solar incidente
°C	Graus Celsius
Imp	Corrente no ponto de máxima potência
Isc	Corrente de curto circuito
J/K	Joule por Kelvin
L/h	Litros por hora
K	Constante de Boltzman
kW	Quilowatt
m ³ /h	Metros cúbicos por hora
n	Semicondutor tipo n
p	Semicondutor tipo p
Pmp	Ponto de máxima potência
pn	Junção pn
q	Carga do elétron
V	Volt – unidade de medida de tensão
Vmp	Tensão no ponto de máxima potência
Voc	Tensão de circuito aberto
W	Watt
W/m ²	Watts por metro quadrado
Wp	Watt-pico
Wh	Watt-hora
η	Eficiência/ rendimento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	OBJETIVO GERAL	22
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	23
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
2.1	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	24
2.1.1	Efeito Fotovoltaico	24
2.1.2	Células e Módulos: a Geração Fotovoltaica	26
2.1.2.1	Características Elétricas das Células Fotovoltaicas	27
2.1.2.2	Fatores Ambientais e Externos que Afetam as Características Elétricas	28
2.1.2.3	Módulos e Arranjos Fotovoltaicos	32
2.1.3	Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR)	33
2.1.4	Dados Climáticos da Região de Aparecida de Goiânia	34
2.2	ÁGUA DE REUSO	36
2.2.1	Sistemas de Tratamento de Água/Efluentes	37
2.2.1.1	Tratamento Anaeróbio com Reator UASB	38
2.2.1.2	Tratamento com Sistema <i>Wetland</i>	39
2.3	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	41
2.3.1	Eficiência Energética em Células e Módulos Fotovoltaicos	42
2.3.2	Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento	43
2.3.3	Mecanismo de Transferência de Calor	44
2.4	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS E SUPERVISÃO	45
2.4.1	Sistema de Aquisição de Dados	46
2.4.2	Sistema de Supervisão	46
2.4.3	Rede Modbus	48
3	METODOLOGIA	50
3.1	SISTEMA DE ARREFECIMENTO DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	51
3.2	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS E SUPERVISÃO	52
3.3	ANÁLISES PARA AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE ARREFECIMENTO	53
3.3.1	Projeto e Implementação de Sistema de Arrefecimento de Painéis Fotovoltaicos em Micro Usina no Solo	53
3.3.2	Desenvolvimento do Sistema de Aquisição de Dados e Supervisão	53
3.3.3	Análise Comparativa da Eficiência de Conversão de Energia entre as partes do Sistema com Arrefecimento e à Temperatura Ambiente	54
3.3.4	Análise do Balanço Energético entre o Ganho de Energia gerado pelo Sistema de Arrefecimento da Planta Piloto e a Energia gasta com o recalque da água de reuso, com extrapolação para um Sistema com maior capacidade de geração	54
4	RESULTADOS	55
4.1	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS E DE PROJETO DAS PLANTAS DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA PILOTO E SOBRE OS TELHADOS	55
4.2	IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA DE ARREFECIMENTO DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	59
4.3	IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS E SUPERVISÃO	65
4.4	ANÁLISES E DISCUSSÕES	69
4.4.1	Desenvolvimento do Sistema de Aquisição de Dados e Supervisão	69
4.4.1.1	Controlador Lógico Programável (CLP)	70
4.4.1.2	Inversor Solar	70
4.4.1.3	Flexy	71
4.4.2	Comparação da Eficiência de Conversão de Energia entre as Partes com Arrefecimento e à Temperatura Ambiente	74
4.4.3	Balanço Energético entre o Ganho de Energia gerado pelo Sistema de Arrefecimento da Planta Piloto e a Energia gasta com o recalque da água de reuso, com extrapolação para o Sistema sobre os telhados dos Blocos B e C	77
5	CONCLUSÃO	80
5.1	PRODUÇÃO CIENTÍFICA	81

5.2 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS.....	81
REFERÊNCIAS	83
ANEXO A – DATASHEET DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS.....	88
ANEXO B – DETALHES DO PROJETO FOTOVOLTAICO	90
ANEXO C – DATASHEET DO INVERSOR.....	93
ANEXO D – PROGRAMAÇÃO CLP TPW-04.....	94
ANEXO E – INTERFACE DE COMUNICAÇÃO COM INVERSOR E FLEXY	100

1 INTRODUÇÃO

A demanda energética mundial cresce a cada dia, e surge a necessidade de fontes alternativas e renováveis de energia em contraposição às fontes esgotáveis e combustíveis fósseis. A Terra recebe energia proveniente do sol de forma abundante e inesgotável, suficiente para suprir milhares de vezes o consumo mundial, mas infelizmente ainda uma pequena parcela dessa energia é aproveitada. Nesse contexto, o aproveitamento da energia advinda do sol é uma das alternativas mais promissoras, ou seja, a energia solar fotovoltaica, uma importante fonte de energia renovável e limpa, obtida da irradiação solar e convertida em energia elétrica.

A conversão direta da energia solar em energia elétrica é feita por módulos ou painéis fotovoltaicos, sendo a célula fotovoltaica, um dispositivo feito de material semicondutor, a unidade básica dessa conversão (PINHO; GALDINO, 2014). O material condutor mais usado comercialmente vem sendo o silício, do tipo monocristalino ou policristalino. Os sistemas de geração fotovoltaica dependem diretamente da irradiação solar e são influenciados também pela temperatura de operação dos painéis e outros fatores, como sombreamentos e sujeidade. Esse sistema possui desvantagens como o custo ainda elevado dos equipamentos, embora esteja em queda nos últimos anos, mas também inúmeras vantagens como não produzir lixo tóxico como as usinas nucleares, não poluir o meio ambiente como as termoeletricas a gás ou a carvão e não envolver impacto ambiental ou social como as hidrelétricas. O desempenho dos módulos fotovoltaicos ainda é baixo, entre 16% e 20% atualmente (CASARO; MARTINS, 2010).

No Brasil, apesar do imenso potencial solar, o uso dessa tecnologia ainda é considerado baixo. No entanto, vem avançando nos últimos anos principalmente devido as crises energéticas provenientes da fonte hidroelétrica, principal fonte da matriz energética brasileira; escassez de chuvas em alguns períodos do ano; aumento da tarifa de energia elétrica; e também devido a inclusão das fontes termelétricas para dar suporte à fonte principal. Assim, investimentos estão sendo feitos para que em um futuro breve, as fontes renováveis, principalmente a solar e a eólica, possam ter uma participação mais efetiva na matriz energética brasileira. Em 2018, a capacidade instalada de geração eólica total no país se igualou a capacidade de geração da usina hidroelétrica de Itaipu, a maior do país.

A sujeira ou sujeidade nos módulos é um fator que afeta a geração, e os primeiros estudos acerca dos efeitos da presença da sujeidade em superfícies planas utilizadas para conversão da energia solar datam de várias décadas. Entre as primeiras contribuições nesta área, cita-se o trabalho desenvolvido nos anos 40 em Boston, nos Estados Unidos, por Hottel e Woertz (1942 apud Romanholo, 2019), na qual neste estudo, um arranjo de 3 coletores solares térmicos planos

foi acompanhado durante um período de 3 meses. Observou-se que o desempenho do sistema sofreu uma queda de 4,7% com uma perda da radiação solar incidente de 1% devido à deposição de sujeira sobre a superfície dos coletores instalados em uma inclinação de 30° em relação ao plano horizontal. Estes resultados abriram portas para diversos novos estudos que viriam a ser realizados nos próximos anos. Romanholo (2019) investigou sistema fotovoltaico instalado na Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação da Universidade Federal de Goiás quanto à sujeira, analisando a caracterização físico-química da sujeira na superfície dos módulos e posteriormente os impactos na geração do sistema. Quatro arranjos contendo 20 módulos cada foram limpos mensalmente e comparados com dois conjuntos análogos sem limpeza, durante um período de 5 meses. Os resultados obtidos mostraram que a limpeza da superfície dos módulos aumenta a geração e melhora o rendimento global, onde foi observada uma elevação deste parâmetro de 34% após a limpeza.

A temperatura de operação dos módulos pode atingir, em países com alto índice de radiação solar, como o Brasil, 70°C, o que prejudica a produção de energia fotovoltaica (MATIAS, 2018). Como os módulos estão expostos aos raios do sol o aquecimento é considerável. Nem toda a incidência solar é transformada em energia elétrica, sendo uma parte dissipada na forma de calor, o que faz com que a temperatura do módulo seja maior que a temperatura ambiente (SANTOS et al., 2017).

A eficiência e a potência de saída dos módulos dependem linearmente da temperatura de operação (DUBEY et al, 2013). À medida que a temperatura do módulo aumenta, sua tensão de saída se torna menor e, conseqüentemente, diminui a potência de saída, reduzindo também a eficiência do módulo.

Em função dessa queda na eficiência dos painéis decorrente da temperatura elevada, diversos estudos teóricos e práticos começaram a ser desenvolvidos no sentido de amenizar tal efeito. Estes dispositivos são os chamados sistemas híbridos fotovoltaico/ térmico (PVT na sigla em inglês para *Photovoltaic Thermal*), que se caracterizam pela integração entre um sistema com módulos fotovoltaicos (PV) e um coletor térmico, que utiliza fluido refrigerante como ar ou água aplicado na superfície superior dos módulos para resfria-los, na qual o calor é transferido para o fluido (JI et al., 2007). Esse método funciona como um sistema auto-limpante da superfície, através da remoção de partículas de poeira que diminuem a capacidade de conversão energética. Esses estudos começaram a surgir em meados da década de 70, onde pesquisadores apresentaram estudos e dados com uso de ar ou água como refrigerante em sistemas fotovoltaicos. Na década de 80 foram realizados estudos principalmente em coletores de placas planas. Nos anos 90 alguns modelos matemáticos foram propostos para prever o

desempenho dos sistemas (SANTOS, 2018). As pesquisas continuaram pelos anos seguintes com mais ênfase nos países europeus, EUA e Japão.

Mais recentemente outros estudos têm sido realizados com o objetivo de promover a melhoria da eficiência energética em painéis fotovoltaicos. As técnicas pela diminuição da temperatura têm atuado em diferentes formas de arrefecimento dos painéis, utilizando um fluido refrigerante na parte frontal ou traseira, na sua maioria água.

Na Malásia, Irwan et al (2015) fizeram um teste interno, em ambiente fechado, usando lâmpadas halógenas para simular a luz solar e realizar testes de resfriamento do painel fotovoltaico aplicando água na superfície frontal. A altura das lâmpadas em relação ao painel fotovoltaico sofreu variações para simular a variação da irradiância. Foram realizados testes para quatro valores de radiação solar, sendo 413, 620, 821 e 1016 W/m², e medido o ganho de eficiência energética para cada situação. Os resultados mostraram que para maiores intensidades obtém-se maiores ganhos de potência, sendo o melhor caso para 1016 W/m², com 22,81% de ganho.

No Brasil, existem algumas pesquisas com PVT, como o caso de uma usina solar fotovoltaica instalada na Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira. Silva (2015) desenvolveu projeto de sistema fotovoltaico com arrefecimento de painéis dentro da própria usina de Ilha Solteira, facilitando a captação da água para o arrefecimento. A alimentação do sistema de arrefecimento ocorreu pela linha do enrocamento da UHE por apresentar vantagens como a proximidade entre a linha existente e a usina fotovoltaica, fornecimento contínuo ao longo do ano e por não necessitar de intervenções físicas na barragem da usina. Quatro *strings* no solo foram utilizadas para a pesquisa, sendo duas *strings* de 22 painéis cada com arrefecimento e duas *strings* de 22 painéis cada sem arrefecimento para comparação. O sistema com arrefecimento reduziu a temperatura em até 25°C, produzindo 3 kWh/dia a mais que as *strings* de comparação, proporcionando ganho máximo de rendimento de 5,9% na produção de energia.

Heng et al (2017) realizaram estudo experimental na China, comparando os modos de operação de um sistema PVT com temperatura constante e fluxo de água constante no painel. O fluxo usado foi de 210 L/h e a temperatura de 40°C. A comparação mostrou que a operação com temperatura constante produziu maior eficiência térmica e a operação com fluxo constante produziu maior eficiência elétrica. A análise de eficiência exergética dos sistemas foi conduzida baseada na segunda lei da termodinâmica, mostrando que a operação com temperatura constante possui maior eficiência exergética, e, portanto, foi recomendada a escolha do sistema com temperatura constante, com temperatura definida em 40°C.

Santos et al (2017) fizeram estudos para implementar o resfriamento em painéis fotovoltaicos para melhorar a eficiência energética de um sistema instalado no Instituto Federal de Goiás, em Goiânia. Nos experimentos foram realizadas medições instantâneas de potência e temperatura em dois painéis fotovoltaicos, um submetido a resfriamento com água (água coletada da chuva) aplicada em sua superfície frontal e outro em condições normais de uso, ou seja, sem o resfriamento. Os resultados mostraram que menores taxas de fluxo no sistema de resfriamento geram um maior custo-efetividade na eficiência dos painéis, obtendo-se um ganho de potência dos painéis de até 11,99%.

Castanheira et al (2018) apresentaram um modelo, técnica e economicamente, viável de um kit de resfriamento a água para sistemas fotovoltaicos existentes em Portugal, levando em conta aspectos de um produto em escala comercial. Para este sistema considerou-se não só as perdas de água e energia no sistema de resfriamento, otimizando para uma situação industrial real, como aspectos econômicos, custos de investimentos, durabilidade e manutenção. O protótipo do sistema de resfriamento de água foi instalado em uma *string* de 5 kW (25 painéis) de uma usina de energia solar fotovoltaica de 20 kW instalada em Lisboa, Portugal, aplicando-se água na superfície frontal dos painéis. Os experimentos analisaram como os painéis, com e sem resfriamento, tiveram sua eficiência afetada. A análise dos dados mostrou que o kit de resfriamento pode aumentar a produção energética anual em 12%.

Já Idoko et al (2018), no Reino Unido, desenvolveram técnica de resfriamento multiconceito para reduzir o superaquecimento de módulos fotovoltaicos, para aumentar a eficiência e potência de saída. O experimento foi criado com dois painéis fotovoltaicos de 250W montados a altura de 37 cm, criando um espaço para resfriamento do ar. A técnica usada consistiu em refrigerar a superfície frontal de um painel com água e dissipar o calor utilizando um dissipador de calor de alumínio na superfície traseira do mesmo painel, estando o outro painel em condições normais sem os aparatos. O dissipador de calor de alumínio consistia em uma placa de alumínio com aletas em alumínio para ajudar a refrigerar. O resultado foi um aumento na eficiência de 3%, tornando o painel mais eficiente e produtivo.

Vaz et al (2019) realizaram estudo do uso de duas fontes de água de reuso para análise da melhoria da eficiência de painéis fotovoltaicos, instalados no Instituto Federal de Goiás. Os estudos foram baseados em análises qualitativas e quantitativas de dois tipos de efluentes: o primeiro proveniente de tratamento anaeróbico de uma indústria alimentícia (laticínio); o segundo, proveniente de tratamento biológico, sistema *Wetland* construído, para tratamento de água cinza, em unidade residencial. As análises quantitativas se basearam principalmente em análises físico-químicas das amostras dos dois efluentes e dos parâmetros elétricos de melhoria

de eficiência dos painéis em comparação com painéis sem arrefecimento. Os conjuntos de parâmetros foram analisados de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 5762, 1997; NBR 13797, 1997; NBR 12621, 1992) e conforme metodologias determinadas pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. As análises qualitativas se basearam na observação da presença ou ausência de corrosão, incrustação ou embaçamento dos painéis arrefecidos. A bancada de estudos foi composta por quatro painéis de 5W divididos em dois com e dois sem arrefecimento. Após os estudos, do ponto de vista das análises físico-químicas, os dois efluentes atenderam às exigências das normas brasileiras para fins de reuso não-potável. Do ponto de vista dos parâmetros elétricos, as eficiências dos painéis foram acrescidas de 5,22% e 6,57% com efluentes industriais e provenientes das *Wetlands* respectivamente. Das análises qualitativas, não foram observados sinais de corrosão, incrustação e embaçamento nos painéis arrefecidos.

Neste contexto, buscando o uso racional dos recursos hídricos e a melhoria da eficiência da conversão fotovoltaica, é hipótese desse trabalho: será viável tecnicamente, utilizar o efluente de um sistema de tratamento de esgoto bruto de uma instituição de ensino para arrefecimento de painéis solares fotovoltaicos. O esgoto bruto, captado na rede de esgoto da instituição de ensino, é primeiramente tratado em um reator anaeróbico e, em seguida, a água na saída deste recebe um tratamento secundário, em um sistema de tratamento biológico por zonas de raízes, também conhecido como sistema *Wetlands*. Uma estrutura é projetada e implementada, em planta piloto, para subsidiar análises de viabilidade técnica de melhoria de eficiência energética em usinas solares fotovoltaicas.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é realizar o projeto e implantação de um sistema de arrefecimento de painéis fotovoltaicos com água de reuso ou água potável, com vistas a manutenção e melhoria de eficiência de conversão de energia elétrica em painéis solares fotovoltaicos em uma planta piloto.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são:

- Projetar e implementar um sistema de arrefecimento de painéis fotovoltaicos a ser instalado em uma micro-usina no solo;

- Desenvolver e instalar sistema de aquisição de dados e supervisão *online* para monitoramento das variáveis do sistema (temperaturas, tensões e correntes);
- Realizar análise comparativa da eficiência de conversão de energia de sistema fotovoltaico de uma planta piloto, com os painéis em temperatura ambiente e com os painéis arrefecidos com aplicação de água de reuso, proveniente de efluente do tratamento de esgoto de uma instituição de ensino, ou água potável;
- Realizar balanço energético entre o ganho de energia gerado a partir do sistema de arrefecimento da planta piloto e a energia gasta com o recalque da água de reuso até o sistema de arrefecimento, com extrapolação para um sistema de maior capacidade de geração.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O Capítulo 2 apresenta uma fundamentação teórica de embasamento científico para o desenvolvimento da pesquisa, abordando temas importantes como a energia solar fotovoltaica e seus conceitos; água de reuso; eficiência energética; e sistemas de aquisição de dados e supervisão.

O Capítulo 3 aborda a metodologia utilizada para implementação de sistema de arrefecimento em planta fotovoltaica em uma instituição de ensino, para a realização de análises e conclusão dos objetivos propostos.

O Capítulo 4 apresenta a implantação de sistema de arrefecimento em uma planta fotovoltaica e os resultados obtidos, apresentando as características técnicas e de projeto da planta fotovoltaica (planta piloto) e planta sobre os telhados da instituição de ensino escolhida; o sistema de arrefecimento dos painéis fotovoltaicos; o sistema de aquisição de dados e supervisão; e os resultados alcançados para as análises propostas do trabalho.

O Capítulo 5 apresenta a conclusão do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica da energia solar fotovoltaica, com importantes conceitos, tais como o efeito fotovoltaico, as características de células e módulos fotovoltaicos, os sistemas conectados à rede elétrica, e os dados climáticos da região de Aparecida de Goiânia. Apresenta também uma fundamentação teórica acerca da água de reuso, o tratamento de efluentes e alguns tipos. A seguir, o capítulo trata dos conceitos importantes de eficiência energética, com ênfase na eficiência em sistemas fotovoltaicos e sistemas de bombeamento; e por fim, aborda sistemas de aquisição de dados e supervisão.

2.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

O Sol é uma fonte de luz e calor considerada inesgotável quando se compara com o tempo de vida terrestre. Vem se tornando a mais promissora alternativa energética para suprir o consumo humano de energia. É o responsável por praticamente todas as formas de energia, pois é dele que surge a evaporação, o ciclo das águas com conseqüente represamento e geração de eletricidade (fonte Hidrelétrica); induz a circulação atmosférica em larga escala gerando os ventos (fonte Eólica); é também através dele que a matéria orgânica, como a cana-de-açúcar, realiza a fotossíntese se desenvolvendo para ser utilizada como combustível nas usinas; a própria energia solar fotovoltaica por meio da irradiação solar convertida em energia elétrica através do efeito fotovoltaico; entre outras (PINHO; GALDINO, 2014).

O denominado efeito fotovoltaico é conhecido desde 1839 quando o físico francês Alexandre Edmond Becquerel (1820-1891) observou uma diferença de potencial entre dois eletrodos semicondutores, mergulhados em um eletrólito, causada pela absorção de luz. Surgiu então o conhecimento base para o funcionamento da célula solar, componente fundamental da Energia Solar.

2.1.1 Efeito Fotovoltaico

O efeito fotovoltaico ocorre em materiais semicondutores que se caracterizam pela presença de bandas de energia onde é permitida a presença de elétrons (banda de valência) e de outra totalmente “vazia” (banda de condução). O semicondutor mais usado é o silício (Si), sendo comercialmente mais utilizados os painéis de silício monocristalino e silício policristalino (SANTOS, 2018).

O silício possui na camada de valência, ou última camada, quatro elétrons que se ligam aos vizinhos formando uma rede cristalina. Ao adicionarem-se átomos pentavalentes (cinco elétrons de ligação), como o fósforo (P), por exemplo, haverá um elétron em excesso que não poderá ser emparelhado e que ficará "sobrando", fracamente ligado a seu átomo de origem. Isto faz com que, com pouca energia fotoelétrica, 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*. Se, por outro lado, introduzem-se átomos trivalentes (três elétrons de ligação), como é o caso do boro (B), haverá uma falta de um elétron para satisfazer as ligações com os átomos de silício da rede. Esta falta de elétron é denominada buraco ou lacuna e ocorre que, com pouca energia térmica, 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 retidas 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* (SANTOS, 2018).

Se uma junção *pn* for exposta a fótons com energia maior que o *gap*, ocorrerá a formação 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 (PINHO; GALDINO, 2014).

A Figura 1 mostra uma célula fotovoltaica em corte onde é possível ver os semicondutores tipo *n*, tipo *p*, e a junção *pn*.

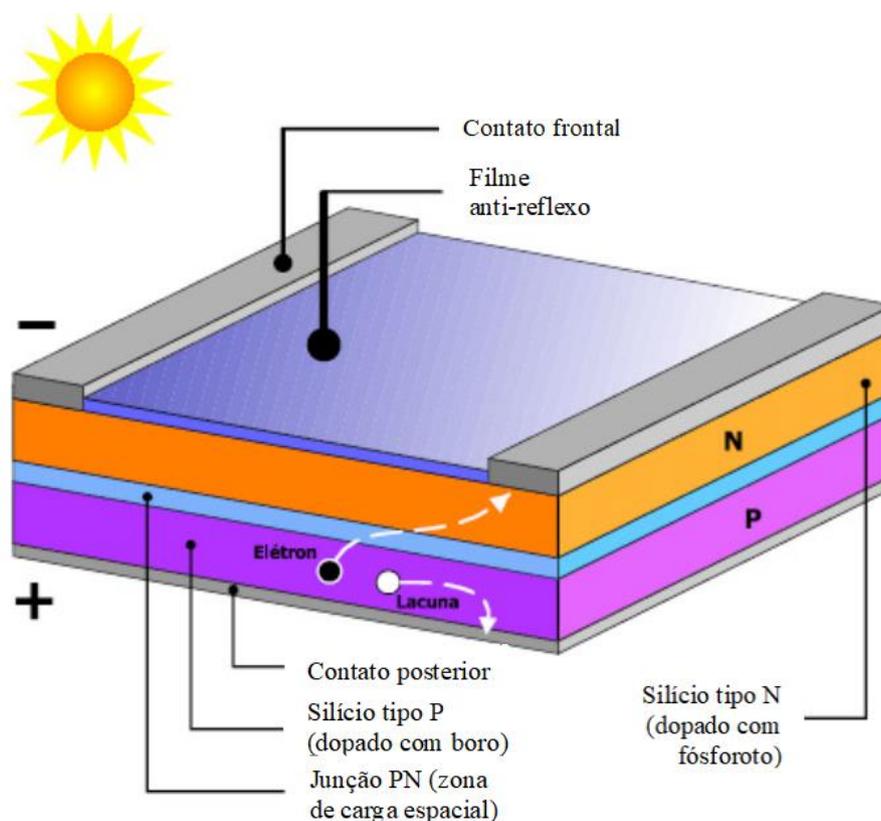


Figura 1: Célula fotovoltaica em corte, destacando o silício tipo *n*, tipo *p*, e a junção *pn*. Fonte: CÂMARA, 2011.

2.1.2 Células e Módulos: a Geração Fotovoltaica

Um gerador fotovoltaico é um dispositivo que converte energia solar em eletricidade através do efeito fotovoltaico, sendo a célula fotovoltaica a unidade básica desse processo.

A célula fotovoltaica apresenta baixos valores de tensão, fazendo-se necessária a associação de células em série e/ou paralelo para se obterem tensões maiores e correntes que sejam utilizáveis na prática em um sistema fotovoltaico. Além disso, a célula é um componente frágil e sensível às intempéries, como umidade e variações de temperatura, então essa associação também funciona como uma forma de proteção à célula fotovoltaica. A essa associação de células dá-se o nome de módulo fotovoltaico, podendo ser fabricados em diversas potências e sendo a unidade principal de um sistema fotovoltaico (SANTOS, 2018).

Várias tecnologias de fabricação vêm sendo desenvolvidas para células e módulos solares nos últimos 60 anos, sendo a fabricação a partir de lâminas de silício cristalino (monocristalino e policristalino) as que dominam o mercado mundial atualmente, devido ao preço e eficiência competitiva. 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 ($\mu\text{c-Si}$), silício crescido em fitas (Si-fitas), células fotovoltaicas multijunção de alta eficiência (baseadas em corantes) e polímeros (PINHO; GALDINO, 2014).

2.1.2.1 Características Elétricas das Células Fotovoltaicas

A Figura 2 apresenta a curva característica I-V de uma célula fotovoltaica de Si, destacando a corrente de curto circuito (I_{sc}), a tensão de circuito aberto (V_{oc}), o ponto de máxima potência (P_{mp}), a corrente e a tensão no ponto de máxima potência (I_{mp} e V_{mp}).

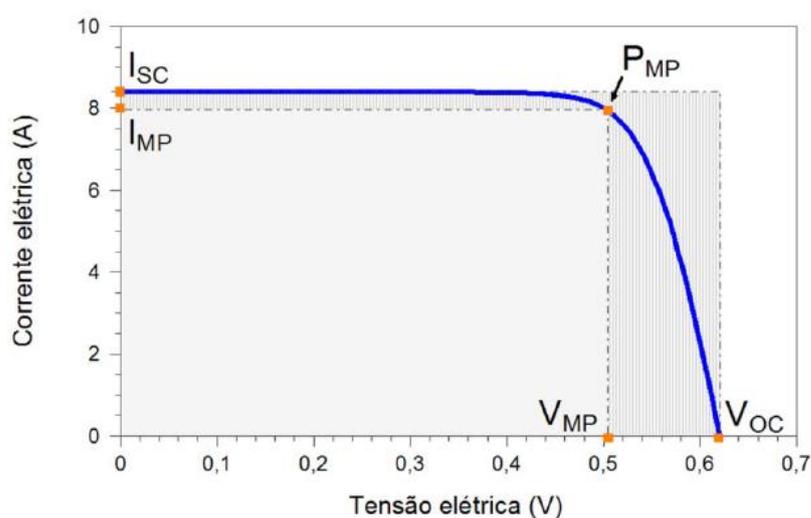


Figura 2: Corrente elétrica em função da diferença de potencial aplicada em uma célula fotovoltaica sobre as condições padrão. Fonte: PINHO; GALDINO, 2014.

Para as 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; GALDINO, 2014).

A partir da curva I-V acima, são determinados os parâmetros elétricos de uma célula ou módulo fotovoltaico, sendo eles a tensão de circuito aberto, a corrente de curto-circuito, o fator de forma e a eficiência.

A tensão de circuito aberto (V_{oc}) é a tensão entre os terminais da célula quando não há corrente elétrica circulando, sendo a máxima tensão da célula. Seu valor varia conforme a tecnologia utilizada, sendo de $0,5\text{-}0,7\text{V}$ no caso do silício cristalino.

A corrente de curto-circuito (I_{sc}) é a corrente medida na célula quando aplicada uma tensão nula, sendo a máxima corrente a se obter. Esta corrente depende da irradiância solar do ambiente.

O fator de forma (FF) representa a razão entre a máxima potência da célula e o produto da corrente de curto-circuito pela tensão de circuito aberto.

A eficiência (η) define o quanto de energia solar se converteu efetivamente em energia elétrica, sendo definida pela equação:

$$\eta = \frac{I_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{A \cdot G} \cdot 100\% = \frac{P_{mp}}{A \cdot G} \cdot 100\%, \quad (2.1)$$

onde A (m²) é a área da célula e G (W/m²) 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 (PINHO; GALDINO, 2014).

2.1.2.2 Fatores Ambientais e Externos que afetam as Características Elétricas

Existem fatores ambientais e externos que afetam as células, módulos e a geração fotovoltaica. Dentre estes fatores, pode-se mencionar a irradiância solar do local, a temperatura da célula, os sombreamentos e a sujidade (SILVA, J., 2019).

- Irradiância Solar

A corrente gerada através da conversão fotovoltaica depende da quantidade de fótons capazes de contribuir para o efeito fotovoltaico. Assim, a corrente elétrica e a tensão geradas através deste processo são sensíveis à variação da irradiância solar (SILVA, J., 2019).

A corrente elétrica aumenta linearmente com o aumento da irradiância solar incidente, ao passo que a tensão de circuito aberto Voc aumenta de forma logarítmica, se mantida a mesma temperatura. A corrente Isc de uma célula está relacionada com a irradiância incidente pela seguinte equação:

$$I_{sc} = I_{sc(STC)} \cdot \frac{G}{1000}, \quad (2.2)$$

onde Isc_(STC) é a corrente de curto-circuito do módulo nas condições padrão (STC), G (W/m²) é a irradiância solar incidente, e 1000 a irradiância padrão (STC) em W/m² (PINHO; GALDINO, 2014).

Segundo PINHO e Galdino (2014), a tensão de circuito aberto Voc, mantendo-se a temperatura em 25°C, varia de acordo com a equação:

$$V_{OC} = \frac{k.T}{q} \ln \left[\left(\frac{I_L}{I_0} \right) + 1 \right], \quad (2.3)$$

onde k é a constante de Boltzman ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K), T a temperatura absoluta (K), q a carga do elétron ($1,6 \times 10^{-19}$ C), I_L a corrente fotogerada (A) e I_0 a corrente de saturação reversa do diodo (PINHO; GALDINO, 2014).

A Figura 3 ilustra as curvas I-V, comumente mencionada na literatura como curvas Tensão-Corrente, de uma célula fotovoltaica de silício cristalino em vários níveis de irradiância solar, mantida em 25°C.

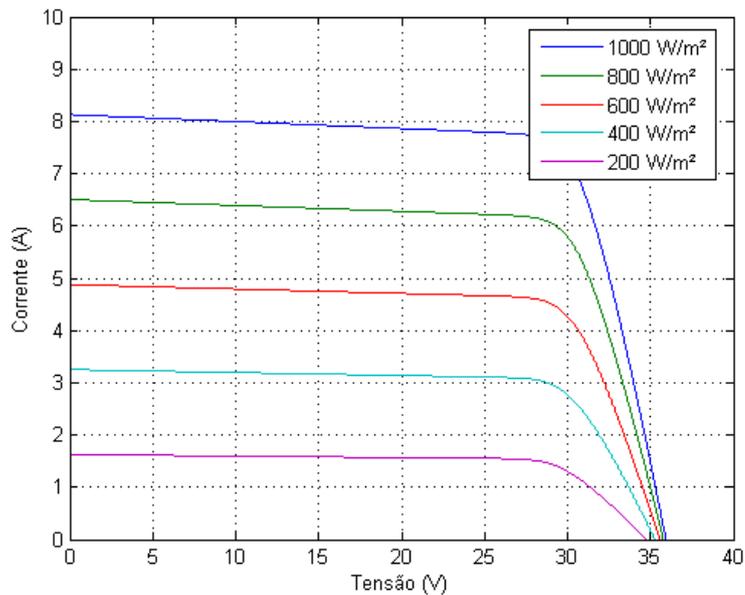


Figura 3: Influência da irradiância solar na curva I-V de uma célula fotovoltaica de silício na temperatura de 25°C. Fonte: NETO, 2017.

- Temperatura da Célula

Variações na temperatura ambiente afetam a temperatura de operação da célula fotovoltaica. O aumento da temperatura ambiente faz com que aumente a temperatura de operação da célula, reduzindo sua tensão de circuito aberto e sua eficiência (SILVA, J., 2019).

O aumento da temperatura produz um aumento maior na corrente de saturação reversa, I_0 , de modo que o resultado final na equação 2.3 seja a redução da tensão de circuito aberto V_{oc} . A queda de tensão de circuito aberto é maior que a elevação da corrente de curto-circuito com a temperatura, considerada desprezível. Portanto, a redução da tensão provocará uma perda de potência dessa célula ou módulo e conseqüente perda de eficiência.

A Figura 4 mostra as curvas I-V para diversas temperaturas da célula fotovoltaica para irradiância de 1000W/m².

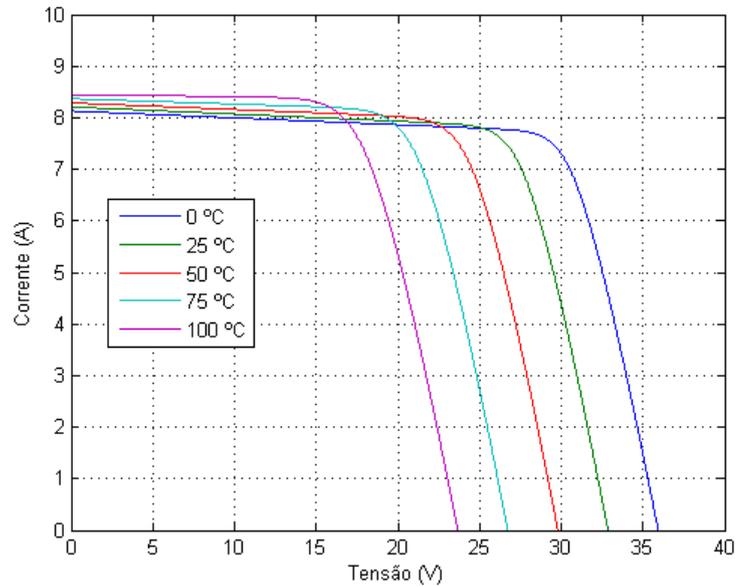


Figura 4: Influência da temperatura da célula fotovoltaica na curva I-V para irradiância de 1000W/m². Fonte: NETO, 2017.

A Figura 5 mostra como variam a tensão (V) e a potência (W) em diferentes temperaturas. À medida que a tensão reduz, a potência também reduz, sendo fatores diretamente proporcionais, indicando que em caso de aumento da tensão dos módulos, estes terão menor potência de saída e geração de energia.

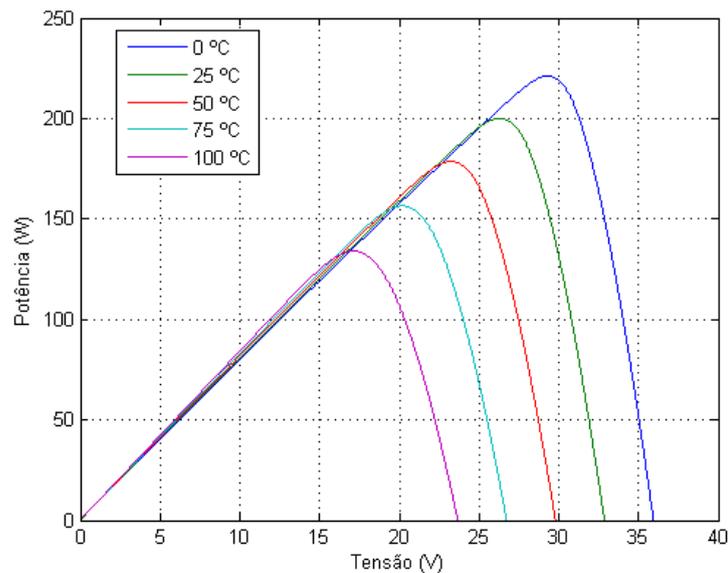


Figura 5: Curva P-V em diferentes temperaturas ($G=1000 \text{ W/m}^2$). Fonte: NETO, 2017.

- Sombreamentos

Um fator importante para diminuição da capacidade de geração é o sombreamento parcial dos módulos fotovoltaicos. Estes sombreamentos podem ser causados por árvores, construções

próximas ao sistema, sujeira como folhas, dejetos de pássaros, ou até mesmo um módulo sombreando outro no caso de um projeto mal dimensionado (SILVA, J., 2019).

A Figura 6 ilustra um sistema fotovoltaico afetado por um sombreamento de uma construção próxima.



Figura 6: Sombreamento em um sistema fotovoltaico provocado por construção próxima. Fonte: Minha Casa solar, 2019.

Os módulos de silício cristalino possuem células associadas em série. Se uma dessas células receber menos irradiação provocada por um sombreamento, sua corrente limitará a corrente de todo o conjunto em série no módulo, limitando também a corrente de todos os módulos conectados em série (PINHO; GALDINO, 2014).

Além da perda de potência no gerador fotovoltaico, o efeito do sombreamento também acarreta riscos ao módulo sombreado, pois este irá sofrer aumento de temperatura devido ao aumento da resistência interna da célula, gerando os chamados "pontos quentes". De forma a evitar os "pontos quentes", são introduzidos os díodos de desvio (*by-pass*) que permitem a passagem da corrente sem danificar a célula através de um caminho alternativo.

- Sujeidade

Sistemas fotovoltaicos são instalados em locais sujeitos ao acúmulo de matéria particulada em sua superfície, devido à poluição ambiente e sujeira presente no ar. Podem ser encontradas substâncias como poeira contendo areia, cinzas, cimento, dejetos de pássaros e materiais originados por combustão (SILVA, J., 2019).

Esta deposição de sujeidade no módulo tem um impacto direto no desempenho do sistema fotovoltaico, reduzindo a absorção da irradiância, funcionando como uma barreira para a passagem dos fótons, e afetando a geração.

A sujidade acumulada nestes sistemas depende do ambiente e das condições climáticas verificadas no local. Segundo Silva J. (2019), fatores como precipitação pluviométrica, umidade relativa do ar, velocidade do vento e a inclinação dos módulos FV contribuem ou prejudicam na limpeza. Portanto a limpeza periódica dos módulos se faz necessária para manutenção da eficiência do sistema de geração fotovoltaica.

2.1.2.3 Módulos e Arranjos Fotovoltaicos

Módulos fotovoltaicos são compostos por células fotovoltaicas conectadas em arranjos para produzir tensão e corrente suficientes para utilização prática da energia, promovendo também a proteção das células (PINHO; GALDINO, 2014).

Os arranjos das células nos módulos podem ser feitos em série ou em paralelo. Conectando-se as células em paralelo, somam-se as correntes e a tensão do módulo permanece a tensão da célula. Por ser uma tensão muito baixa (em torno de 0,6V a 0,7V), a conexão mais utilizada é em série, onde soma-se a tensão e a corrente permanece constante (SANTOS, 2018).

Como citado no item 2.2.2.3 sobre sombreamentos, se uma célula estiver sendo sombreada ou tendo sua potência de saída afetada por outro motivo, para que todo o sistema não seja afetado são utilizados diodos de desvio ou “*by-pass*”, servindo como caminho alternativo. Geralmente, estes são utilizados em agrupamentos de células, tornando o uso mais barato se comparado ao custo de se conectar um diodo por célula (SANTOS, 2018).

A Figura 7 apresenta a ligação de um diodo *by-pass*.

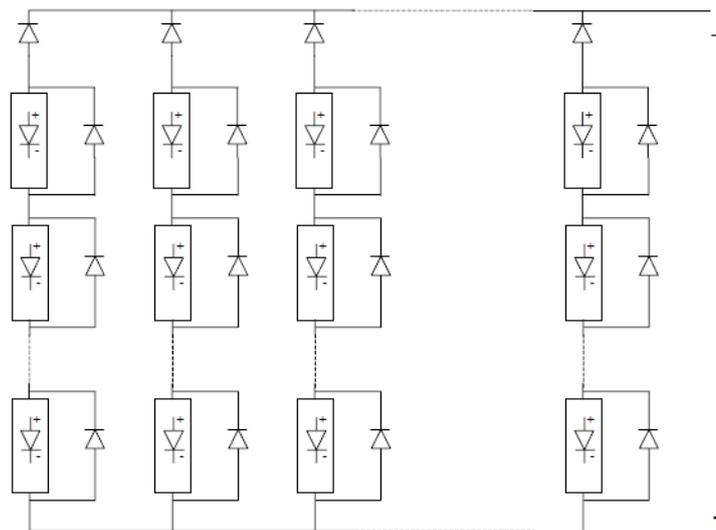


Figura 7: Associação série-paralelo com diodo *by-pass*. Fonte: SANTOS, 2018.

2.1.3 Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR)

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede são sistemas interligados à rede elétrica não necessitando de armazenamento de energia por baterias ou outro acumulador, ou seja, toda a energia elétrica gerada é entregue à rede ou consumida diretamente pela carga. Neste caso, o sistema fotovoltaico representa uma forma complementar de geração ao sistema elétrico ao qual está conectado, ou seja, ora a carga utilizará a geração fotovoltaica ora a rede elétrica (período noturno principalmente). A configuração básica de um SFCR é composta pelo gerador fotovoltaico, inversor, instalação da unidade consumidora e instalações de conexão à rede elétrica da concessionária.

A Figura 8 mostra um sistema fotovoltaico conectado à rede, onde a energia consumida e a energia injetada na rede são medidas separadamente por um medidor bidirecional (ou por dois medidores medindo a energia em cada sentido). O Inversor faz a conversão da geração C.C em C.A. para o uso ou injeção na rede (PINHO; GALDINO, 2014).

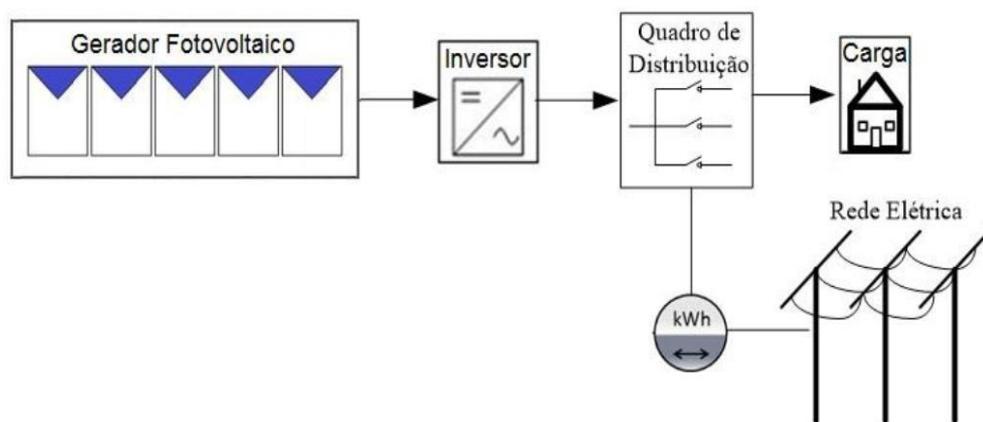


Figura 8: Sistema fotovoltaico com medição bidirecional. Fonte: PINHO; GALDINO, 2014.

Inversores

Um inversor é um dispositivo eletrônico que fornece energia elétrica em corrente alternada (C.A.) a partir de uma fonte de energia elétrica em corrente contínua (C.C.). A energia C.C. pode ser originada, por exemplo, de baterias, células a combustível ou módulos fotovoltaicos. A tensão C.A. de saída deve ter amplitude, frequência e conteúdo harmônico adequados às cargas a serem alimentadas. Adicionalmente, para os sistemas conectados à rede elétrica, a tensão de saída do inversor deve ser sincronizada com a tensão da rede (SANTOS, 2018).

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. 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; GALDINO, 2014).

A escolha do inversor para um sistema fotovoltaico é determinante para o seu desempenho em termos de produtividade e proteção do SFCR. De acordo com Silva (2019), é imprescindível para escolha do inversor levar em conta características como, eficiência de conversão, níveis de tensão e de corrente, flexibilidade de instalação, durabilidade e proteções anti-ilhamento e contra sobrecarga e sobretensão.

O ilhamento é uma condição em que uma porção do sistema da concessionária composto por cargas e geração se mantém energizada e em operação isolada do restante da rede da concessionária. Devido ao controle de corrente empregado nos inversores e a inabilidade dos mesmos de regular a tensão nos terminais C.A., na ocorrência de um ilhamento os níveis de tensão e frequência dificilmente se manterão nas faixas especificadas como ideais pela norma, resultando no cessar da operação do inversor. Esta interrupção da operação do inversor com a interrupção do fornecimento de energia é denominada proteção anti-ilhamento (CARVALHO, 2012).

Outra função muito importante do inversor é realizar o seguimento do ponto de máxima potência de operação.

2.1.4 Dados Climáticos da Região de Aparecida de Goiânia

Aparecida de Goiânia é um município localizado na região metropolitana de Goiânia, possuindo um clima tropical semiúmido, sendo quente a maior parte do ano. A estação com precipitação é abafada e de céu encoberto, e a estação seca é de céu quase sem nuvens. Ao longo do ano, em geral a temperatura varia de 14°C a 32°C. No inverno, apesar de as temperaturas mínimas serem baixas, as temperaturas máximas podem superar os 31°C. Na primavera são registradas as maiores temperaturas anuais, que podem chegar ou ultrapassar os 38°C, as quais ocorrem entre os meses de setembro e outubro. Geograficamente, a cidade está localizada na latitude 16° 49' 19" sul e na longitude 49° 14' 42" oeste (WEATHERSPARK, 2021).

Assim como na região de Goiânia, Aparecida de Goiânia apresenta duas estações bem definidas durante o ano em termos de pluviosidade, sendo uma estação chuvosa e outra seca. A

estação chuvosa dura aproximadamente 6 meses, entre outubro e abril, e a estação seca dura aproximadamente o restante do ano, com períodos sem chuva e outros com pouca chuva.

Radiação Solar na região

A radiação solar possui três componentes sobre uma superfície receptora, sendo a radiação direta do sol, radiação difusa proveniente da atmosfera e albedo (quando a superfície é inclinada). A Figura 9 representa essas três componentes.

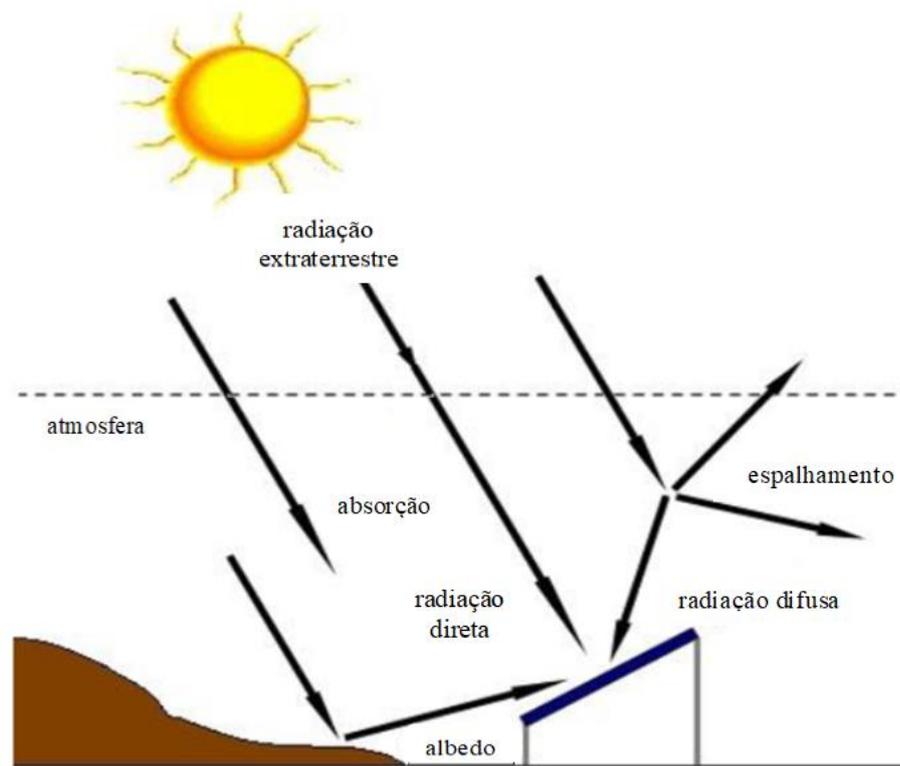


Figura 9: Componentes da radiação solar. Fonte: PINHO; GALDINO, 2014.

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 apresenta nublado (as nuvens brancas irradiam muito mais radiação difusa que o céu azul) e, 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).

2.2 ÁGUA DE REUSO

O crescimento populacional e industrial tem gerado preocupação sobre a qualidade e finitude dos recursos naturais como água e solo. Nesse cenário, o fomento por práticas que favoreçam a racionalização quanto ao uso da água e manejo do solo são medidas essenciais para se alcançar a sustentabilidade. Tem-se incentivado a criação de técnicas para o tratamento e reutilização de efluentes gerados, com o objetivo de proteger a qualidade dos recursos hídricos (GIORDANNI et al, 2018).

Neste contexto, surge o reuso da água que de acordo com a Resolução nº54 de 2005 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) é definido como a utilização de água residuária. Esta por sua vez, é originada de esgoto, água descartada, efluentes líquidos de edificações, indústrias, agroindústrias e agropecuária, tratados ou não. Para efeito desta Resolução, o reuso não potável abrange modalidades para fins urbanos, agrícolas e florestais, ambientais, industriais e reuso na agricultura.

Segundo Metcalf & Eddy (2003 apud MAY, 2009) reusar ou reutilizar água é aproveitar a água residuária recuperada, através da remoção ou não de parte dos resíduos por ela carregada em uso anterior, e usá-la novamente em aplicações menos exigentes que o primeiro uso, encurtando assim o ciclo da natureza em favor do balanço energético.

O reuso da água para fins agrícolas e florestais torna-se uma alternativa potencial de racionalização deste bem natural, visto que o consumo hídrico para o setor agrícola corresponde atualmente cerca de 75% da vazão total consumida. Uma vez que o reuso agrícola e florestal for realizado adequadamente, este proporcionará inúmeras vantagens, podendo mencionar-se a possibilidade de substituição parcial de fertilizantes químicos, aumento considerável da produção, evita a erosão do solo e controla processos de desertificação mediante irrigação e fertilização de cinturões verdes, propicia o uso sustentável dos recursos hídricos minimizando a poluição hídrica nos mananciais, além da economia da quantidade de água direcionada para a irrigação (KUMMER et al, 2012, apud GIORDANNI et al, 2018).

As águas residuárias domésticas são um recurso que também pode ser disponível para uso. Elas se dividem em águas cinzas e águas negras. As primeiras representam as águas residuárias originadas de banheiras, chuveiros, lavatórios, máquinas e tanques de lavar roupa, e pias de cozinha; já as últimas representam os efluentes provenientes dos vasos sanitários, como urina, fezes e papel higiênico (MAY, 2009).

Para estimular o sistema de reuso de águas cinzas faz-se necessário verificar a qualidade, bem como a necessidade de tratar essas águas. As águas cinzas devidamente tratadas podem ser

utilizadas no consumo não-potável em edificações como em bacias sanitárias, em torneiras de jardim, na irrigação de gramados e plantas, na limpeza de pátios e calçadas, na produção de concreto, na compactação de solos, na recarga de aquíferos em usos ornamentais como em chafarizes e em espelhos d'água de modo que sua utilização não ofereça riscos à saúde de seus usuários (MAY, 2009).

2.2.1 Sistemas de Tratamento de Água/ Efluentes

Chama-se de efluentes os produtos, líquidos ou gasosos, resultantes de ações humanas. Em geral, são separados em dois tipos, sendo industriais e domésticos. As chaminés industriais são as maiores emissoras de efluentes gasosos. Já os efluentes líquidos podem possuir diversas origens, pois trata-se de água envolvida em algum agente poluente, como matéria orgânica, compostos químicos e tóxicos (EOS, 2019).

Por poluente entende-se como substância presente em concentrações maiores que as naturais como resultado da atividade humana, e que tem efeito negativo sobre o ambiente. Por contaminante entende-se como substância que resulta em desvio da composição normal do ambiente (UFJF, 2021).

A água contida de resíduos necessita de tratamento, pois foi contaminada por algum processo. O não tratamento da água implica na poluição dos corpos hídricos, tornando aquela água imprópria para posterior consumo.

O tipo de tratamento de efluente é indicado de acordo com a carga poluidora e a presença de contaminantes. Há diversas Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs) pelo Brasil, sendo responsáveis pelo processo de limpeza dos efluentes para que estes retornem ao meio ambiente.

Os processos de tratamento podem ser separados conforme as operações utilizadas na remoção dos poluentes. Alguns especialistas separam pelo tipo de processo, e outros pela tecnologia utilizada. Em geral, tratam-se de tratamentos físico-químicos ou biológicos. O primeiro remove os contaminantes por meio de reações químicas que separam sólido do líquido. O segundo utiliza bactérias e microrganismos que consomem a matéria orgânica potencialmente poluidora (contaminante) através do processo respiratório (EOS, 2019).

Os sistemas de tratamento de efluentes tratados neste trabalho são o sistema de tratamento anaeróbio com reator UASB e o sistema de tratamento com *Wetlands* construído.

2.2.1.1 Tratamento Anaeróbio com Reator UASB

O reator UASB (do inglês *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) é uma tecnologia de tratamento biológico de esgotos baseada na decomposição anaeróbia da matéria orgânica. Consiste em uma coluna de escoamento ascendente, composta de uma zona de digestão, uma zona de sedimentação, e o dispositivo separador de fases gás-sólido-líquido. O esgoto aflui ao reator e após ser distribuído pelo seu fundo (leito de lodo), segue uma trajetória ascendente, desde a sua parte mais baixa, até encontrar a manta de lodo (lodo mais disperso e leve, próximo ao topo do reator), onde ocorre a mistura, a biodegradação e a digestão anaeróbia do conteúdo orgânico, tendo como subproduto a geração de gases metano, carbônico e sulfídrico. Ainda em escoamento ascendente, e através de passagens definidas pela estrutura dos dispositivos de coleta de gases e de sedimentação, o esgoto alcança a zona de sedimentação. A manutenção de um leito de sólidos em suspensão constitui a manta de lodo, e em função do fluxo contínuo e ascendente de esgotos, nesta é que ocorre a decomposição do substrato orgânico pela ação de organismos anaeróbios (CESA, 2021).

O princípio fundamental do processo de tratamento é a formação de uma biomassa com alta atividade microbiológica, permitindo alto rendimento nos processos de estabilização, considerando os limites para as reações anaeróbias, e um tempo de detenção hidráulica relativamente curto, e assim o líquido é dirigido para o tratamento complementar, onde se procede a continuação dos processos a oxidação da matéria orgânica presente nestes líquidos, em muitos casos o processo de lodo ativado com remoção de nutrientes (ÁGUAS CLARAS ENGENHARIA, 2019).

O processo de tratamento de efluentes por reator UASB possui vantagens como: alto grau de estabilização do efluente; baixa produção de lodo; baixo consumo de energia; entre outros; e desvantagens como: baixa remoção de nitrogênio, fósforo e patógenos; baixa remoção de nutrientes; necessidade de um pós-tratamento; aplicação limitada para alguns efluentes; entre outros (ÁGUAS CLARAS ENGENHARIA, 2019).

A Figura 10 exhibe o reator UASB do Centro Experimental de Tratamento de Esgoto (CETE) da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), que consiste em um tanque cilíndrico vertical, em plástico reforçado em fibra de vidro, com 2,5 metros de diâmetro e altura de 5 metros.



Figura 10: Reator UASB do CETE Poli/UFRJ. Fonte: CESA, 2021.

2.2.1.2 Tratamento com Sistema WETLAND

Em regiões de climas tropical e subtropical, a digestão anaeróbia apresenta-se como solução econômica e confiável para o tratamento de esgotos sanitários, mas o processo anaeróbio fornece efluente com constituintes residuais, como gases dissolvidos, matéria orgânica, sólidos suspensos, nutrientes (fósforo e nitrogênio) e organismos patogênicos. Desta forma, efluentes advindos de reator anaeróbio de manta de lodo (reator UASB) necessitam de um pós-tratamento. A disposição de águas residuárias no solo, juntamente com a presença de microrganismos, macrófitas aquáticas e energia solar, resulta na produção de biomassa e energia química, removendo, portanto, carga poluidora e mantendo a conservação dos ecossistemas terrestres e aquáticos (SOUZA, 2000).

Os sistemas *Wetlands*, também conhecidos por sistema de tratamento de água por Zonas de Raízes, são sistemas de tecnologias de tratamento biológico, que utilizam as raízes de algumas plantas macrófitas aquáticas, próprias de regiões pantanosas, onde estas são cultivadas em substratos como solo, areia, brita ou cascalho. Sob condições controladas são desencadeados processos físicos, químicos e bioquímicos para tratamento das águas por estabilização da matéria orgânica carbonácea (MATOS et al., 2010, apud VAZ, 2019).

Esse sistema parte do princípio da utilização de vegetais (plantas) como um dos componentes atuantes diretos no tratamento de efluentes. Dentre as diversas denominações dadas ao sistema, no Brasil, adotou-se o nome técnico *Wetlands* Construído. Os sistemas *Wetlands* Construídos são ecossistemas artificiais que imitam os princípios básicos de

modificação da qualidade da água que ocorrem na natureza, em que mecanismos físico-químicos, reações de degradação biológica aeróbia e anaeróbia, evapotranspiração e infiltração, são responsáveis pela remoção de poluentes. Apresentam como componentes principais as plantas, os substratos, os microrganismos e a coluna d'água. A planta, definida como macrófitas, tem a função principal de absorver os macros e micros nutrientes; de levar oxigênio atmosférico para o meio e; de servir de meio suporte para formação de filmes biológicos. O substrato, definido como um material inerte tem a função principal de meio filtrante; de meio suporte para formação de filmes biológicos e; de meio fixador de raízes. Os microrganismos, com uma grande variedade no sistema, são capazes de usar os constituintes poluidores dos esgotos em benefício de seu crescimento e reprodução, tem a função principal de modificar a qualidade dos esgotos por meio de transformações químicas, físicas e biológicas dos constituintes. A coluna d'água tem a função principal de manter o meio alagado; de fornecer nutrientes indispensáveis para as plantas e; de manter o estande de microrganismos operários. Porém, mesmo diante das funções individuais que os componentes exercem, a eficácia dos processos físicos, químicos e biológicos no tratamento dos esgotos ocorrem quando as plantas, os substratos, os microrganismos, a coluna d'água e a atmosfera interagem.

Em termos de estações de tratamento de esgotos, o sistema *Wetland* é autossustentável, uma vez que não necessita de indução de outros elementos, como produtos químicos, injeção de ar, dentre outros exemplos. O sistema é dependente apenas de fontes renováveis de energia, incluindo a radiação solar, a energia cinética eólica, a energia química livre das precipitações e a energia potencial armazenada na biomassa e no substrato.



Figura 11: Sistema *Wetland* construído na EECA da UFG. Fonte: EECA, 2021.

A Figura 11 mostra um sistema *Wetland* construído na Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA) da Universidade Federal de Goiás (UFG).

2.3 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A energia está presente em nossas vidas de diversas maneiras. Por exemplo, quando usamos motores, quando acendemos o queimador de um fogão, ou mesmo quando nos informamos pela televisão. Por essa diversidade, o campo dos estudos energéticos é vasto, cobrindo desde o uso dos recursos naturais até os aspectos relacionados ao desempenho das modernas tecnologias, permitindo uma abordagem que considere apenas os temas de caráter técnico ou envolva seus componentes sócio-econômicos e ambientais (VIANA, 2012).

Aristóteles definia energia como uma realidade em movimento. Já na acepção moderna, energia tem um conceito juntamente com a Termodinâmica, em uma definição usual, como sendo “a medida da capacidade de realizar trabalho”. Esta definição se aplica a alguns tipos de energia, como a mecânica e a elétrica, mas não a todos, como a energia térmica, pois o calor é apenas parcialmente convertido em trabalho (VIANA, 2012).

Segundo Viana (2012), uma característica essencial das formas de energia é a capacidade de interconversão, ou seja, uma forma de energia pode se converter em outra, são os chamados processos de conversão de energia. Tais processos são regidos pela Lei de Conservação de Energia e Lei de Dissipação de Energia.

A Lei da Conservação de Energia, ou Primeira Lei da Termodinâmica, permite efetuar balanços energéticos, determinar perdas e quantificar fluxos energéticos. 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 equação (2.4), válida para um sistema em regime permanente, isto é, quando não há variação da energia no sistema (VIANA, 2012).

$$\eta_{\text{Energética}} = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{consumida}}} = \frac{E_{\text{consumida}} - \text{Perdas}}{E_{\text{consumida}}} \quad (2.4)$$

A Lei de Dissipação de Energia diz que 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 (VIANA, 2012).

2.3.1 Eficiência Energética em Células e Módulos Fotovoltaicos

As células e módulos fotovoltaicos são, em sua maioria, fabricados a partir de materiais semicondutores, como o silício, o mais comum. Este material é o mais tradicional, pois além de não ser tóxico, é o segundo elemento mais abundante da Terra com mais de 28% da massa da crosta terrestre (SANTOS, 2018).

Em condições laboratoriais ou condições padrões de teste (STC), com o atual estado da arte da tecnologia, é possível produzir células individuais de cristal de silício com eficiência superior a 24%. Ainda assim, devido a contínuas pesquisas no campo das células solares, o valor teórico alcançável da eficiência se direciona aos 30%. Porém, comercialmente, a eficiência é de apenas 13 a 19% podendo chegar em 24% nos próximos anos (ALMEIDA et al, 2016).

O rendimento das células depende de diversos fatores e a operação em módulo possui eficiência global inferior à eficiência das células individuais devido ao fator de empacotamento, à eficiência ótica de cobertura do módulo e, à perda nas interconexões elétricas das células (ALMEIDA et al, 2016).

Alguns rendimentos, de acordo com a tecnologia e/ou materiais das células, podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1: Rendimento médio obtido em células e módulos fotovoltaicos. Fonte: (ALMEIDA et al, 2016).

MATERIAIS E/OU TECNOLOGIAS	CÉLULAS	MÓDULOS
Silício monocristalino – m-Si	14% a 25%	14% a 21%
Silício policristalino – p-Si	20%	13% a 16,5%
Orgânicas	12%	7% a 12%
Filmes finos	9% a 16%	7% a 13%
Silício amorfo – a-Si	9%	6% a 9%
Telureto de Cádmio - CdTe	14,4%	9% a 11%
Seleneto de Cobre, Índio e Gálio - CIGS	22%	10% a 12%
Híbrido - HJT		23%

Segundo Santos (2018) os efeitos da inclinação e orientação dos painéis na eficiência do gerador dependem da razão entre a radiação direta e difusa locais, bem como da fração de albedo (reflexão dos arredores), que é característica do ambiente que circunda a instalação. Como regra, a inclinação ótima com relação à horizontal para incidência solar máxima em regime anual é dada pela latitude local. A orientação ideal é a de uma superfície voltada para o equador (norte geográfico para instalações no hemisfério sul e sul geográfico para instalações no hemisfério norte).

O seguimento de máxima potência também deve ser observado como um quesito de eficiência energética de células e módulos fotovoltaicos, como já apresentado no item 2.3.2.

2.3.2 Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento

O uso irresponsável dos recursos naturais vem trazendo consequências ruins para a espécie humana. Em particular, o abastecimento público de água, que há poucos anos era feito por meio de fontes limpas captadas nas encostas e trazidas às comunidades pela ação da gravidade, atualmente depende praticamente na totalidade de bombeamento. O uso de bombas de água tornou-se indispensável, e também o uso da energia elétrica para o acionamento dos motores que fazem as bombas funcionar. Assim, uma importante contribuição nesse contexto consiste em reduzir ao máximo o uso irracional da energia, reduzindo os custos dos serviços que, em última análise, serão sempre pagos pela sociedade (ELETROBRÁS, 2005).

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 e ventiladores 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 é ele que realiza grande parte da transformação de energia mecânica em energia de pressão (VIANA, 2012).

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 (SANTOS, 2018).

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).

Atualmente, aproximadamente 63% das aplicações dos motores nas indústrias são destinadas à movimentação de fluidos. Nestes casos, o controle de velocidade dos motores, em substituição aos tradicionais métodos de controle de fluxo, permite otimizar e adequar as condições de operação da bomba para cada valor de vazão desejado, reduzindo perdas, ruídos e desgastes mecânicos. Para tanto, pode-se empregar inversores de frequência e controle de tensão para motores com rotor em gaiola, ou a cascata subsíncrona e variação da resistência rotórica no caso de motores de indução com rotor bobinado (VIANA, 2012).

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, 2018).

A eficiência energética deve ser buscada escolhendo uma bomba cujo ponto de funcionamento se dê o mais próximo possível do ponto de melhor rendimento da bomba. Se do ponto de vista hidráulico é vantajoso obter maior vazão em função de uma menor perda de carga, do ponto de vista energético devem-se observar as características do equipamento, que pode não estar mais nas proximidades do ponto de melhor rendimento. Deve-se também observar a manutenção do sistema hidráulico para se evitar perdas por atrito e diminuir a eficiência energética do sistema.

2.3.3 Mecanismo de Transferência de Calor

Mecanismo de transferência de calor é o processo pelo qual o calor flui do corpo de maior temperatura para o corpo de menor temperatura. O corpo mais quente pode ser chamado de fonte e o corpo mais frio de receptor. A transferência de calor pode ocorrer de três modos, podendo haver combinação de dois ou três destes modos. São eles a condução, a convecção e a radiação.

A condução pode ser definida como o processo pelo qual a energia é transferida de uma região de alta temperatura para outra de mais baixa, dentro de um meio (sólido, líquido ou

gasoso) ou entre meios diferentes em contato físico direto. Pode ser visualizado como a transferência de energia de partículas mais energéticas para partículas menos energéticas. É um processo eficiente nos metais, que são bons condutores de calor (BARROSA, 2004).

A transferência de calor por convecção ocorre entre um fluido em movimento e uma superfície, quando os dois estão a diferentes temperaturas. A transferência é tanto pelo movimento molecular aleatório quanto pelo movimento global do fluido. Ela pode ser natural, mista ou forçada.

A radiação pode ser definida pelo processo pelo qual calor é transferido de uma superfície em alta temperatura para outra em temperatura mais baixa, quando tais superfícies estão separadas no espaço, ainda que exista vácuo entre elas. A energia assim transferida é chamada radiação térmica e é feita sob a forma de ondas eletromagnéticas. O aquecimento solar é uma forma de aproveitamento da radiação solar para a produção de calor.

De acordo com Santos (2018), no caso dos painéis fotovoltaicos, parte da energia solar absorvida é convertida em energia térmica, fazendo com que o painel sofra um aquecimento indesejável, uma vez que esse aquecimento provocará uma queda na quantidade de energia gerada pelo painel fotovoltaico e consequente queda na eficiência.

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 consequentemente, uma melhora na eficiência do painel (SANTOS, 2018).

2.4 SISTEMAS DE AQUISIÇÃO DE DADOS E SUPERVISÃO

Sistemas de aquisição de dados e controle de dispositivos vem sendo desenvolvidos para diferentes áreas de atuação. O seu objetivo é apresentar ao observador os valores das variáveis ou parâmetros que estão sendo medidos ou analisados (SMAR, 2020).

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 (SANTOS, 2018).

2.4.1 Sistema de Aquisição de Dados

A aquisição de dados é o processo de medição de um fenômeno elétrico ou físico, como tensão, corrente, temperatura, pressão ou som, com o uso de um computador.

Um sistema de aquisição de dados converte os sinais coletados, primeiramente em sinais elétricos e em seguida em valores numéricos digitais, na qual os dados podem ser armazenados em um computador para análise e tratamento posterior. É geralmente formado por sensores e transdutores (convertem parâmetros físicos em sinais elétricos), circuitos de tratamento dos sinais (processam e condicionam os sinais dos sensores para possibilitar a conversão em valores digitais), conversores analógicos-digitais, interface de comunicação com um computador e um computador com software programável. São dispositivos usados em instrumentação científica (SANTOS, 2018).

Os sensores do tipo Termopar são muito utilizados para se obter a medição de temperatura. São constituídos por duas barras de metais diferentes em contato elétrico, onde haverá uma diferença de potencial em função da temperatura, o chamado efeito termoelétrico ou efeito *Seebeck*. De maneira geral, os termopares atuais podem medir de -250°C a 2500°C , com exatidão de $0,5\sim 2^{\circ}\text{C}$ no máximo e com coeficientes de temperatura de $5\sim 50\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ (MELO, 2019).

De acordo com Melo (2019), quando se procede à escolha do tipo de termopar a se utilizar, deve-se analisar qual o mais adequado para a aplicação desejada, segundo as características de cada tipo, tais como faixa de temperatura suportada e exatidão e confiabilidade das leituras na faixa em questão. Os termopares mais utilizados são do tipo K, E, J, N, B, R, S, T, C e M. O termopar tipo K, por exemplo, é de uso genérico, baixo custo, e cobre temperaturas entre -200°C e 1370°C , com uma sensibilidade de aproximadamente $41\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$. Já o termopar tipo J (ferro constantan), possui uma gama mais limitada, com temperaturas entre -40°C a 750°C , sendo menos utilizado que o tipo K.

2.4.2 Sistema de Supervisão

Um software de supervisão permite monitorar partes ou todo um processo, podendo ser um processo industrial como de manufatura, processo contínuo, elétrico, automação, produtivo, entre outros; ou mesmo sistemas de serviço público como transporte, tratamento de água, esgoto, etc. As informações a serem monitoradas são coletadas através de equipamentos de

aquisição de dados e, em seguida, analisadas e armazenadas, ficando disponível para o usuário do sistema de supervisão.

Os sistemas de supervisão são compostos basicamente por dois componentes, os componentes físicos e os componentes lógicos. 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) e de monitoração central, como mostra a Figura 12 (SANTOS, 2018).

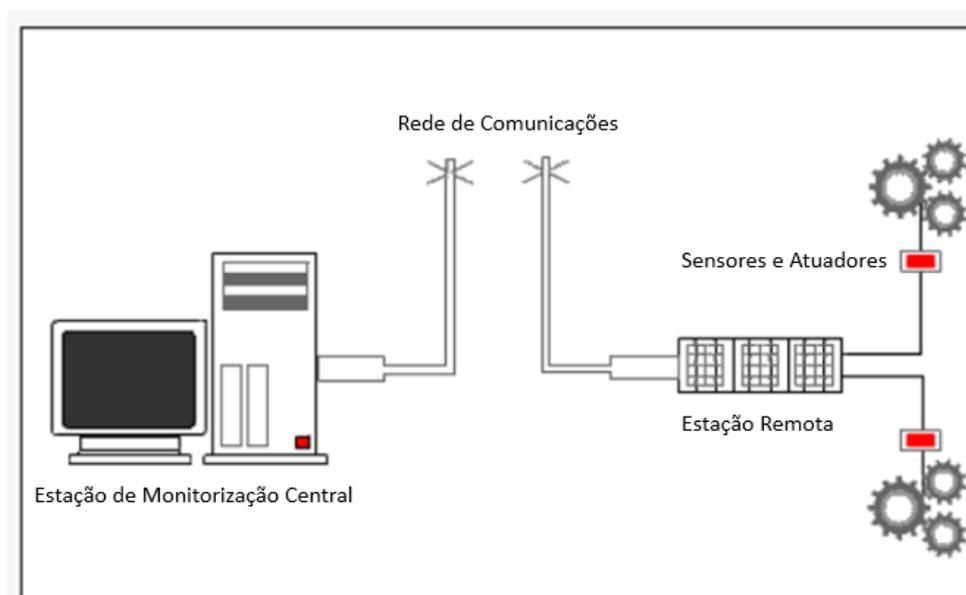


Figura 12: Sistema de supervisão e controle. Fonte: ELIPSE, 2019.

O meio físico normalmente segue padrões elétricos como RS-232, RS-485, RS-422, Ethernet, ou USB. O padrão RS232 é muito suscetível a interferências, por esse motivo o cabo utilizado para comunicação deve ser o mais curto possível, até 10 metros. Já os padrões RS485 e RS422 possuem maior proteção contra interferências eletromagnéticas, podendo chegar a uma distância de até 1200 metros. (NOVUS, 2020).

Os componentes lógicos são representados pelos *softwares* e protocolos de comunicação. Os protocolos de comunicação foram desenvolvidos para permitir a comunicação entre dispositivos na automação. Em redes de comunicação definimos protocolo como regras físicas e lógicas previamente determinadas a fim de estabelecer a comunicação entre dois ou mais equipamentos. Protocolos físicos são as regras físicas a serem seguidas, tais como o tipo de conector (DB9 por exemplo), pinagem, tipo de condutores (RS232, RS485, Ethernet, etc.). Protocolos lógicos são aqueles que estabelecem regras lógicas como quantidade de bits, formato de dados, qual bit será transmitido primeiro, etc. Protocolos lógicos dão nome à rede (protocolo Modbus/ rede Modbus) (NI, 2020).

Os CLPs (ou PLCs – *Programmable Logic Controllers*) e RTUs (*Remote Terminal Units*) são unidades computacionais específicas, para a funcionalidade de ler entradas, realizar cálculos ou controles, e atualizar saídas. 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. Cada fabricante de CLP tem o seu protocolo de comunicação que pode ser proprietário ou aberto, como por exemplo, o Modbus versões RTU e TCP. (SANTOS, 2018).

2.4.3 Rede Modbus

O Modbus é um protocolo de comunicação desenvolvido em 1979, para possibilitar a comunicação entre dispositivos de automação, sendo um dos mais utilizados na indústria, devido à sua simplicidade e facilidade de implementação. Utiliza um relacionamento mestre-escravo, onde um dispositivo inicia uma requisição e aguarda por uma resposta. O dispositivo iniciador (mestre) deve iniciar cada interação. O mestre é uma interface homem-máquina (IHM) ou sistema de controle e aquisição de dados, e o escravo é um sensor, CLP ou controlador programável para automação (NI, 2020). O Modbus utiliza o RS-232 (ponto a ponto) para um único escravo, RS-485 (Multidrop) para vários escravos, e Ethernet como meios físicos. Os protocolos Modbus podem ser RTU, ASCII (RS-232, RS-485) ou TCP Ethernet (cabo UTP, fibra óptica ou wireless).

Modbus RTU

O Modbus RTU (*Remote Terminal Unit*) é um protocolo serial que utiliza configuração mestre-escravo, camada de aplicação RS-232/ RS-485, podendo ter até 247 endereços de escravos. Os dispositivos devem operar com a mesma velocidade de transmissão de dados, apresenta o envio de 8 bits de dados na mensagem, e leitura/ escrita de Registradores. Os dados que podem ser acessados pelo Modbus são armazenados, de forma geral, em um dos quatro bancos de dados ou faixas de endereços: *coils*, entradas discretas, registradores *holding* e registradores de entrada. Como ocorre com muitas partes da especificação, esses nomes podem variar dependendo da indústria ou especificação. Por exemplo, os registradores *holding* podem ser denominados registradores de saída, e os *coils* podem ser referidos como saídas digitais ou discretas. Esses bancos de dados definem o tipo e os direitos de acesso dos dados contidos. Os

escravos têm acesso direto a esses dados, que são hospedados localmente no dispositivo. Os mestres Modbus precisam solicitar acesso aos dados, utilizando diversos códigos de função. O comportamento de cada bloco é descrito na Figura 13 (NI, 2020).

Bloco de memória	Tipo de dados	Acesso ao mestre	Acesso ao escravo
Coils	Booleano	Leitura/escrita	Leitura/escrita
Entradas discretas	Booleano	Somente leitura	Leitura/escrita
Registradores holding	Palavra não sinalizada	Leitura/escrita	Leitura/escrita
Registradores de entrada	Palavra não sinalizada	Somente leitura	Leitura/escrita

Figura 13: Blocos dos modelos de dados do Modbus. Fonte: NI, 2020.

Posteriormente foi introduzido um esquema de numeração que inclui prefixos ao endereço de dados, como mostra a Figura 14.

Bloco de dados	Prefixo
Coils	0
Entradas discretas	1
Registradores de entrada	3
Registradores holding	4

Figura 14: Prefixos das faixas de dados. Fonte: NI, 2020.

Os Registradores podem ter indexação em 1 (considerada padrão) ou indexação em 0, conforme mostra a Figura 15. O número 4 representa os Registradores *Holding* e os demais números especificam um endereço. A diferença entre 4xxx, 4xxxx e 4xxxxx depende do espaço de endereços utilizados pelo dispositivo (NI, 2020).

Endereço	Número do registrador	Número (indexação em 1, padrão)	Número (indexação em 0, alternativa)
0	1	400001	400000
1	2	400002	400001
2	3	400003	400002

Figura 15: Esquemas de indexação dos registradores. Fonte: NI, 2020.

3 METODOLOGIA

Nesse capítulo é descrita a metodologia para a implementação de um sistema de arrefecimento em planta fotovoltaica em uma instituição de ensino, onde, a partir do tratamento do efluente de esgoto de toda instituição é gerada água de reuso para o arrefecimento.

Para a realização da pesquisa, primeiramente utiliza-se uma planta piloto de um sistema fotovoltaico. Esta planta deve possuir um mínimo de duas *strings* para possibilitar a comparação entre elas, ficando uma a temperatura ambiente e a outra para aplicação de uma técnica de arrefecimento, que possibilite a melhoria de rendimento neste sistema, bem como uma minimização dos efeitos da temperatura de operação na conversão de energia. Essa técnica consiste em aplicar um material refrigerante na superfície frontal ou traseira dos painéis. Especificamente, para as análises a serem realizadas, aplica-se água de reuso na superfície frontal dos painéis. Com isso, observam-se as condições de parâmetros como a temperatura dos painéis e da água na entrada e saída do sistema, tensão, corrente e potência gerada pelas *strings*, com e sem o efeito da diminuição da temperatura de operação.

A água de reuso, proveniente de um sistema de abastecimento/armazenamento que escoar por gravidade, é bombeada a partir de um sistema de tratamento de esgoto, e armazenada em reservatório específico para este fim, sendo também utilizada para outros fins gerais, como lavagem de calçadas, rega de jardins, etc. Após o arrefecimento, esta água de reuso volta à rede de esgoto.

Um sistema de aquisição de dados e supervisão, composto por sensores de temperatura, transmissores, medidor de vazão, Controlador Lógico Programável (CLP), inversor solar e *gateway* para interface de protocolos industriais, formando uma rede de dados, possibilita o monitoramento *online* e análise das variáveis do sistema fotovoltaico e do sistema de arrefecimento. A Figura 16 apresenta o fluxograma do processo do sistema de arrefecimento.

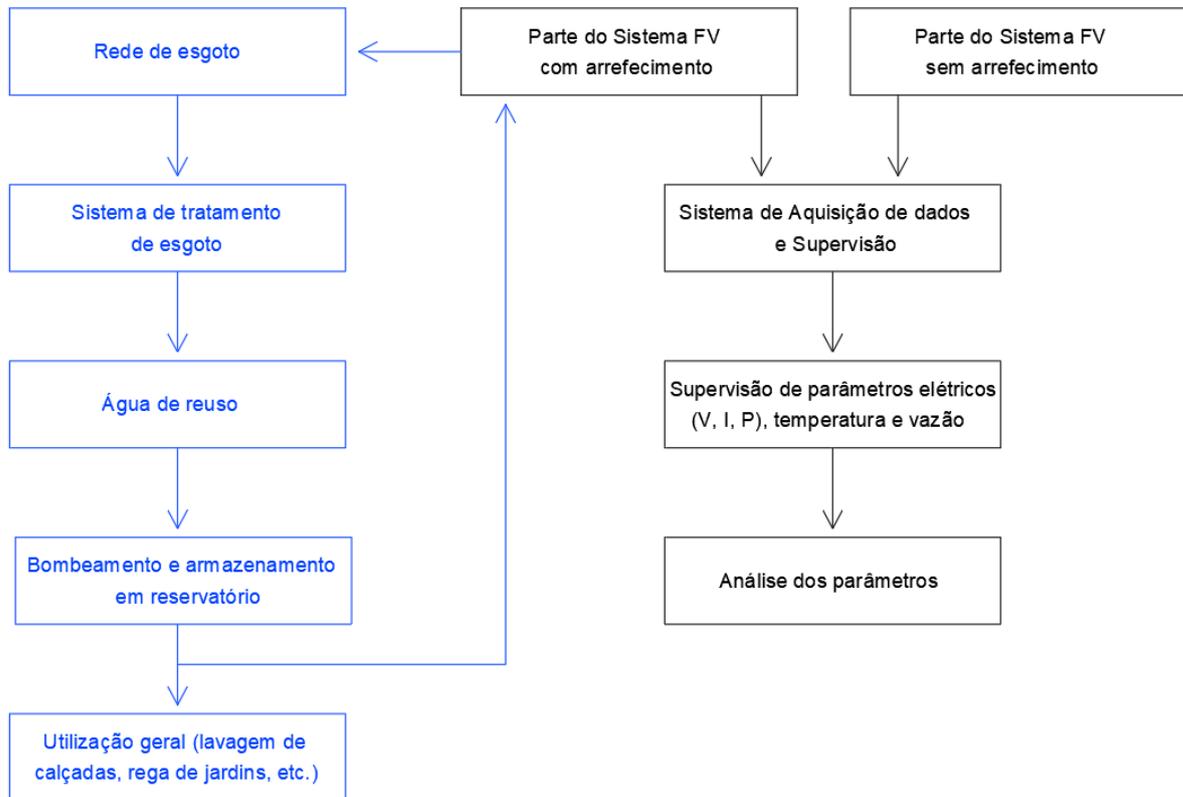


Figura 16: Fluxograma do processo do sistema de arrefecimento.

3.1 SISTEMA DE ARREFECIMENTO DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

O sistema de arrefecimento dos painéis fotovoltaicos é composto por um sistema de abastecimento de água de reuso, que utiliza a água proveniente de um sistema de tratamento do esgoto de uma instituição de ensino, e um sistema de distribuição dessa água coletada para o arrefecimento.

A água de reuso proveniente da saída do sistema de tratamento do esgoto da instituição (Sistema UASB e *Wetland*) é bombeada até uma caixa d'água com grande capacidade de armazenamento. Desta, alimenta o sistema de arrefecimento por gravidade, com a água de reuso chegando via tubulação até válvulas solenoides, acionadas por meio de um Controlador Lógico Programável (CLP), responsável pelo controle de saída de água. Sensores de temperatura são instalados nas superfícies traseiras de uma amostra de painéis com arrefecimento e uma amostra sem arrefecimento para comparação das temperaturas. Ainda são instalados sensores de temperatura nas tubulações de entrada e saída da água do sistema de arrefecimento. As válvulas liberam a passagem/fluxo de água quando a média das temperaturas nos sensores da *string* sem arrefecimento atingir a temperatura de *setpoint* (referência) definida. Existem estudos na

literatura que definem a temperatura de *setpoint* ideal de acordo com a região e época do ano (SANTOS, 2018). A Figura 17 mostra o fluxograma de acionamento das válvulas.

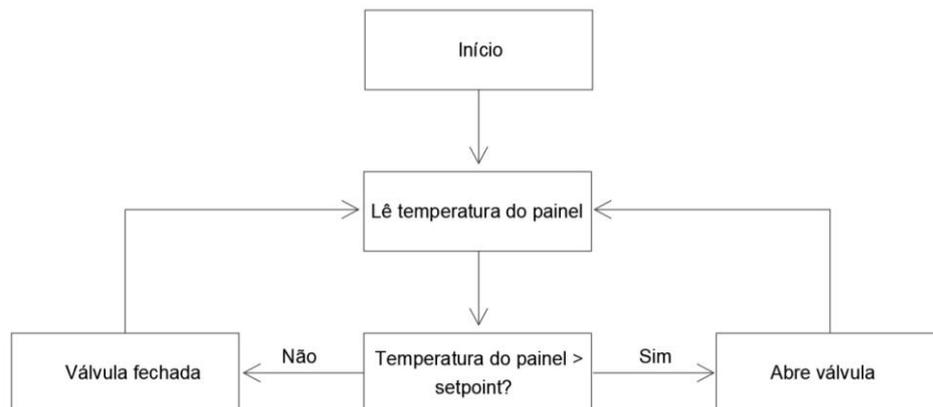


Figura 17: Fluxograma de acionamento das válvulas.

A água de reuso liberada pela válvula solenoide segue através de tubulação até um perfil de alumínio furado, fixado sobre a borda superior dos painéis, onde é aplicada de maneira uniforme sobre a superfície frontal dos painéis fotovoltaicos. Posteriormente a água é coletada em uma calha, instalada na parte inferior dos painéis, de onde a água de reuso volta ao sistema de esgoto via tubulação, fechando o sistema.

3.2 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS E SUPERVISÃO

O sistema de aquisição de dados e supervisão é composto por sensores de temperatura, transmissores, válvulas solenoides, CLP, inversor solar, *gateway* para interface de protocolos industriais, rede de comunicação e armazenamento de dados, integrando um sistema para a supervisão de parâmetros como temperatura, tensão, corrente e potência do sistema fotovoltaico.

Os sensores conectados aos painéis fotovoltaicos convertem a temperatura para sinais analógicos que são transmitidos ao CLP. O processo de controle e aquisição de dados se inicia com o CLP fazendo a leitura dos valores dos sensores de temperatura e controlando a vazão por meio da abertura e do fechamento das válvulas, quando a média das temperaturas dos painéis sem arrefecimento atingir a temperatura de *setpoint* (referência). O inversor do sistema fotovoltaico fornece os valores de tensão, corrente e potência.

Os dados do sistema fotovoltaico e do sistema de arrefecimento são concentrados no *gateway*, que transmite os dados para armazenamento na “nuvem”. Isto possibilita o desenvolvimento de sistema supervisorio “online”.

3.3 ANÁLISES PARA AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE ARREFECIMENTO

A partir da fundamentação teórica e estudos anteriores na literatura, desenvolve-se um sistema de arrefecimento para painéis solares fotovoltaicos e um sistema de aquisição de dados e supervisão, que permitem a realização das análises a seguir.

3.3.1 Projeto e Implementação de Sistema de Arrefecimento de Painéis Fotovoltaicos em Micro Usina no Solo

Definidos os equipamentos constituintes do sistema de arrefecimento, como sensores, válvulas, tubulação para o caminho que a água percorre até chegar à superfície frontal dos painéis fotovoltaicos, a instalação é feita com os equipamentos preferencialmente embutidos na estrutura de sustentação do próprio sistema fotovoltaico, de modo a permitir uma boa integração visual entre sistema fotovoltaico e sistema de arrefecimento. O fluxo de água chega até a superfície frontal dos painéis e é distribuído de maneira uniforme, de forma que todo o aparato instalado se torne um sistema individual para cada painel solar, facilitando a instalação e manutenção futura.

3.3.2 Desenvolvimento do Sistema de Aquisição de Dados e Supervisão

Com a definição e aquisição dos equipamentos constituintes do sistema de aquisição de dados, a estrutura é instalada com os sensores, atuadores e o controlador do processo. Os sensores captam as temperaturas dos painéis e enviam para o controlador (CLP). O controlador recebe os dados, atua abrindo as válvulas solenoides, e envia os dados para o dispositivo utilizado para a supervisão *online* e monitoramento.

A comunicação entre os equipamentos de controle e supervisão é feita via rede de comunicação utilizando um protocolo de comunicação. O CLP, inversor solar e o equipamento de armazenamento e monitoramento de dados são configurados para operar de acordo com o protocolo de comunicação escolhido, com este último atuando como o mestre e o CLP e o inversor como escravos. Todos os equipamentos na rede são configurados com a mesma velocidade de transmissão de dados, mesma paridade e bits de parada. As informações a serem transmitidas pelo CLP estão no mesmo endereço na rede (“nó”), assim como as informações a serem transmitidas pelo inversor estão no mesmo “nó”, diferente do CLP.

As informações/dados de interesse estão no CLP e no inversor. Uma rede de comunicação é implementada para possibilitar que estes dados possam ser lidos, transmitidos e armazenados na nuvem.

3.3.3 Análise Comparativa da Eficiência de Conversão de Energia entre as partes do Sistema com Arrefecimento e à Temperatura Ambiente

Com as medidas de temperatura obtidas pelos sensores de temperatura analisa-se a interferência direta da temperatura na potência gerada pelo sistema. A partir dos dados de tensão, corrente e potência da *string* com arrefecimento e da *string* sem arrefecimento, obtidos pelo inversor, obtém-se o ganho de potência ou ganho percentual de potência devido ao arrefecimento, calculando-se a diferença entre as potências. Para o cálculo do ganho é considerado o período de tempo em que o sistema de arrefecimento permanece ligado, ou seja, quando a temperatura da *string* sem arrefecimento permanece acima da temperatura de *setpoint*. Do mesmo modo, obtém-se o ganho de eficiência energética gerado pela *string* com arrefecimento em relação a *string* sem arrefecimento, na qual calcula-se as energias e a diferença entre elas, obtendo-se o ganho energético.

3.3.4 Análise do Balanço Energético entre o Ganho de Energia gerado pelo Sistema de Arrefecimento da Planta Piloto e a Energia gasta com o recalque da água de reuso, com extrapolação para um Sistema de maior capacidade de Geração

Esta análise visa avaliar o balanço de energia entre o ganho energético gerado pelo sistema de arrefecimento da planta piloto (diferença de energia gerada pela *string* com arrefecimento e a *string* sem arrefecimento), em comparação com a energia gasta para o recalque de água da estação de tratamento até a caixa d'água de armazenamento, extrapolando as análises para considerar a implantação da mesma técnica, em sistemas fotovoltaicos de maiores capacidades de geração. O ganho de energia da *string* com arrefecimento em relação à *string* sem arrefecimento é calculado no item 3.3.2. A energia gasta no recalque é calculada multiplicando-se a potência do conjunto motobomba pelo tempo necessário para o recalque da quantidade de água utilizada para o arrefecimento dos painéis da *string* superior. A partir desta análise para a planta piloto, extrapolam-se os resultados para um sistema maior, calculando qual a quantidade de água de reuso é necessária para arrefecer uma maior quantidade de painéis.

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta as características técnicas e de projeto das plantas fotovoltaicas instaladas no Campus Aparecida de Goiânia do IFG, assim como descreve a implantação de um sistema de arrefecimento, a implantação de um sistema de aquisição de dados e supervisão, bem como os resultados das análises propostas. O trabalho é parte integrante de projeto de pesquisa e desenvolvimento em parceria do IFG com a Enel Distribuição Goiás, com o título “Projeto prioritário de eficiência energética estratégico de P&D: Eficiência Energética e Minigeração em instituições públicas de educação superior”.

4.1 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS E DE PROJETO DAS PLANTAS DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA PILOTO E SOBRE OS TELHADOS

A definição pela instalação de um sistema fotovoltaico conectado à rede levou em consideração a radiação solar na maior parte do dia, ao longo de todo ano e a ausência de sombreamento sobre os painéis, de árvores ou de qualquer estrutura existente. O sistema fotovoltaico está voltado para o norte geográfico e os painéis estão com inclinação vinculada a latitude do local, de forma a se ter uma maior produtividade em estrutura fixa (PINHO; GALDINO, 2014).

No IFG Campus Aparecida de Goiânia foi instalada uma micro usina no solo e uma usina nos telhados dos blocos B e C. O sistema fotovoltaico é composto por um sistema de geração com 340 painéis fotovoltaicos de 325Wp, em um total de 110,5 kWp de potência total instalada, assim distribuídos: 40,95 kWp no Bloco C (Sala de Aula 1); 63,7 kWp no Bloco B (Sala de Aula 2); e 5,85 kWp no solo, sendo definidos como a planta piloto. As especificações técnicas dos painéis constam no *datasheet* que se encontra no anexo A. As Figuras B.1, B.2 e B.3, presentes no anexo B, mostram o detalhamento do sistema fotovoltaico instalado nos telhados dos Blocos B e C, ou seja, quantidade de painéis, potência instalada, quantidade de *strings* com módulos, etc. São usados inversores de 40kW e 60kW respectivamente.

O sistema fotovoltaico da planta piloto é composto por um sistema de geração com 18 painéis fotovoltaicos de 325Wp, em um total de 5,85 kWp de potência. A conexão elétrica da planta do solo com a rede de distribuição da concessionária é realizada na sala dos quadros elétricos do refeitório do campus, onde está instalado um inversor de 5kW. As especificações técnicas do inversor constam no *datasheet* que se encontra no anexo C.

A micro usina está instalada no solo de forma a facilitar a implantação do sistema de arrefecimento e monitoramento da geração fotovoltaica. Desta forma, possibilita a comparação com a geração de sistema que não contempla o arrefecimento dos painéis. O sistema está configurado com 2 *strings* de 9 painéis em cada, sendo que uma é contemplada com o arrefecimento (*string* superior) e a outra não, ficando a temperatura ambiente (*string* inferior).

O anexo B apresenta Figuras B.4, B.5 e B.6, que detalham o projeto da planta fotovoltaica do solo, bem como a estrutura de fixação dos 18 painéis instalados. Pode ser identificado um espaço de 10 cm entre as duas *strings* para instalação de uma calha de 100x100 mm para coletar a água e devolver ao sistema de esgoto, fechando o ciclo; e detalhes das caixas de passagem para os circuitos c.c. e c.a. O circuito c.c. é utilizado para passagem da fiação c.c. dos painéis até o inversor. Já o circuito c.a. é utilizado para passagem da fiação da automação do sistema de arrefecimento.

A Figura 18 exibe uma foto da usina fotovoltaica instalada no solo, onde podem ser vistos parte da estrutura de fixação, parte do cabeamento c.c. e a caixa de passagem. Na Figura 19 é apresentado detalhe da caixa de passagem do circuito c.c. que vai até o inversor apresentado na Figura 20.



Figura 18: Estrutura de fixação dos painéis no solo com duas *strings* de 9 painéis cada.



Figura 19: Caixa de passagem com cabos elétricos do sistema fotovoltaico instalado.



Figura 20: Inversor *String* SIW300H M050 WEG da usina solo.

A Figura 21 exibe uma vista da área do Campus Aparecida de Goiânia do IFG, onde destacam-se: a estação de tratamento de esgoto (ao fundo), a caixa d'água de armazenamento da água de reuso (esquerda), a caixa d'água de armazenamento de água potável já existente no campus (direita), a planta piloto instalada no solo e a sala onde está instalado o inversor solar.

O sistema de arrefecimento dos painéis fotovoltaicos utiliza água proveniente de um sistema de tratamento do esgoto do campus e um sistema de distribuição dessa água coletada.

O sistema de tratamento de esgoto do campus, constituído pelo sistema UASB e sistema *Wetland* é mostrado na Figura 22.



Figura 21: Vista aérea do Campus Aparecida de Goiânia do IFG.



Figura 22: Sistema de tratamento de esgoto do Campus Aparecida de Goiânia, composto por reator UASB e *Wetland*.

A água de reuso proveniente da saída do sistema de tratamento do esgoto do campus é bombeada até uma caixa d'água com capacidade de 10.000 litros, e desta escorre por gravidade via tubulação hidráulica até os painéis fotovoltaicos. Até a conclusão deste trabalho, a água de reuso do sistema de tratamento do esgoto não estava disponibilizada, sendo utilizada para o arrefecimento dos painéis, a água potável da caixa d'água existente no campus (Figura 21).

4.2 IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA DE ARREFECIMENTO DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

A água da caixa d'água existente no campus escorre por gravidade até 3 válvulas solenoides, acionadas por um Controlador Lógico Programável (CLP). Cada válvula é responsável pela liberação do fluxo de água para um conjunto de 3 painéis. Sensores de temperatura do tipo termopar são instalados nas superfícies traseiras de 3 painéis com arrefecimento e 3 sem arrefecimento, para comparação das temperaturas, bem como na entrada e na saída de água do sistema de arrefecimento. As válvulas liberam a saída de água quando a média das 3 temperaturas dos sensores da *string* sem arrefecimento atingirem a temperatura de *setpoint* de 40°C (SANTOS, 2018).

A água liberada pelas válvulas solenoides segue via tubulação até perfis de alumínio furados que estão instalados sobre a borda superior dos painéis, onde é aplicada sobre a superfície frontal dos painéis fotovoltaicos. Posteriormente, a água é coletada por uma calha instalada na parte inferior dos painéis, de onde volta ao sistema de esgoto via tubulação, fechando o sistema de circulação da água.

A Figura 23 e a Figura 24 apresentam detalhes do projeto da tubulação hidráulica e a Figura 25 destaca a válvula solenoide.

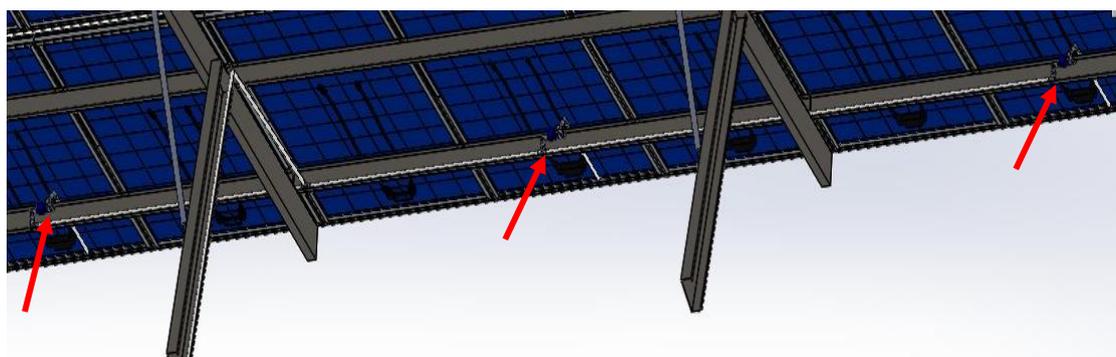


Figura 23: Vista geral da tubulação hidráulica (branco) e as 3 válvulas para arrefecimento dos painéis fotovoltaicos.

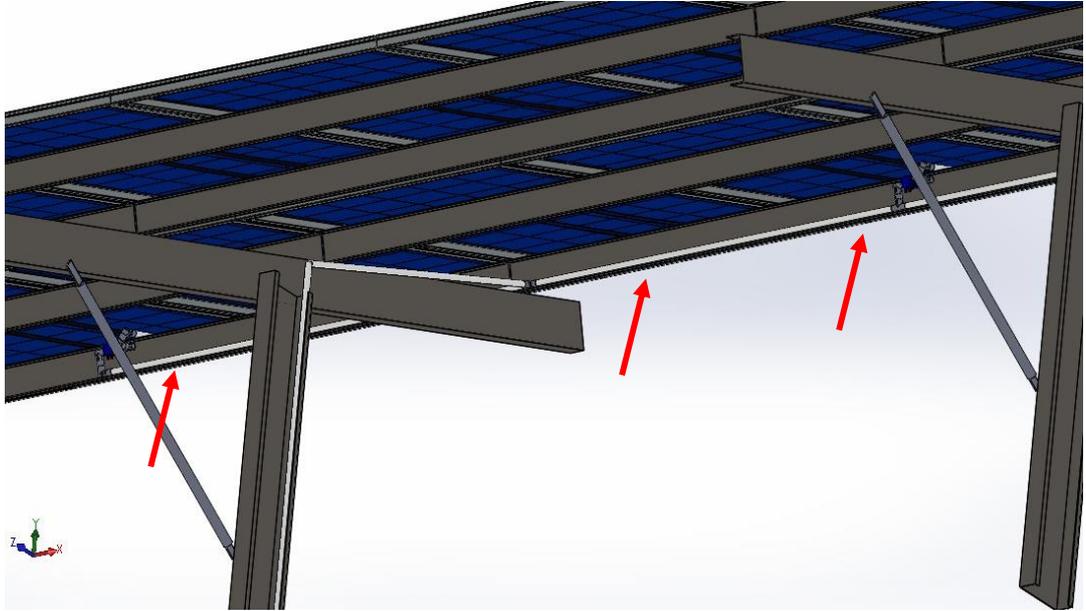


Figura 24: Estrutura de fixação dos painéis no solo com tubulação hidráulica (branco) para arrefecimento.

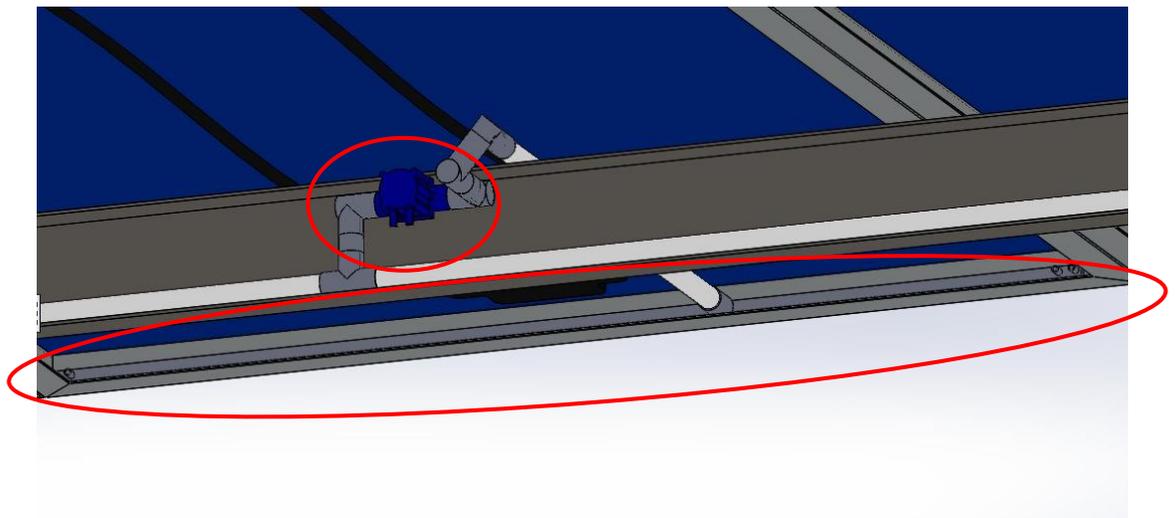


Figura 25: Detalhe da válvula solenóide *on-off* que controla a saída de água para o arrefecimento dos painéis.

A Figura 26 apresenta detalhes do perfil de alumínio projetado, para fixação na parte superior dos painéis e a Figura 27 exhibe detalhes de projeto da calha de coleta da água após arrefecimento dos painéis.

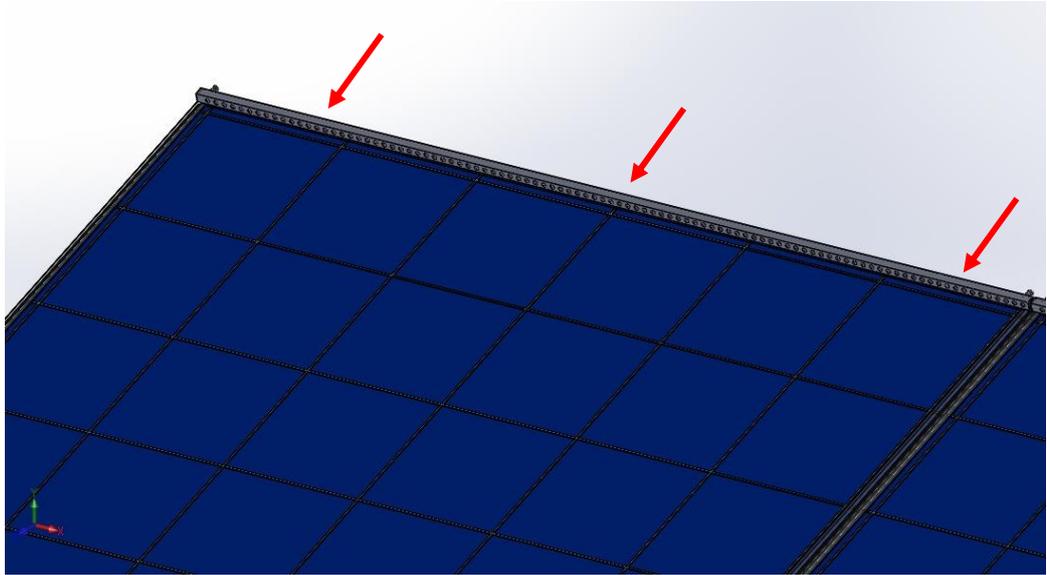


Figura 26: Detalhe do perfil quadrado na extremidade superior do painel para o arrefecimento.

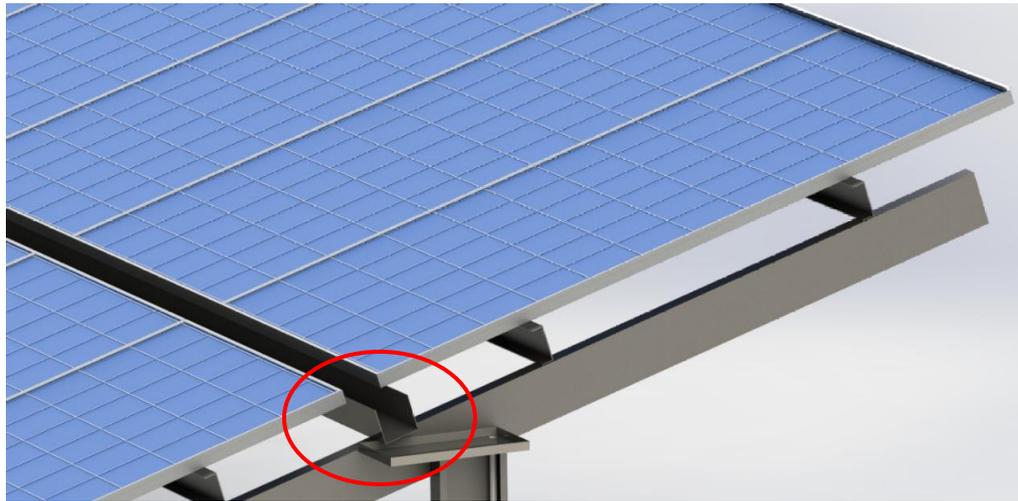


Figura 27: Detalhe da calha de coleta da água após arrefecimento dos painéis.

A partir da implementação do sistema de arrefecimento, optou-se pela construção de um distribuidor central buscando a uniformidade do fluxo de água entre os três painéis de cada conjunto. Na Figura 28 é mostrado, em destaque à direita, a eletroválvula, e em destaque à esquerda, o distribuidor construído e instalado, onde podem ser observadas seis saídas de água. Cada par de saída, superior e inferior, é levado até o perfil individual de cada painel (do conjunto de três painéis), através de mangueiras de poliuretano de 8 mm. Assim cada painel tem seu perfil individualizado, de modo a facilitar tanto a instalação quanto uma eventual manutenção futura.

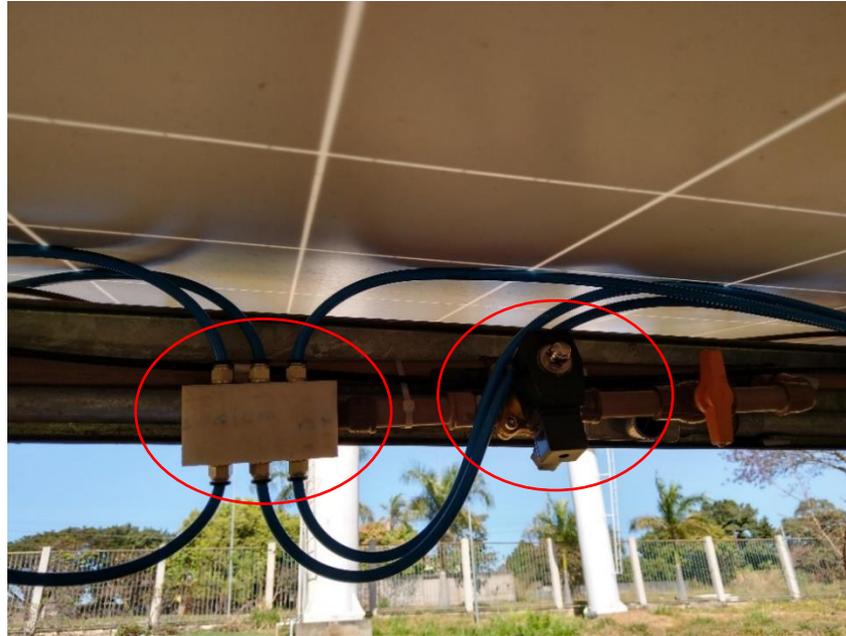


Figura 28: Detalhe do distribuidor central (esquerda) e da eletroválvula que controla o fluxo de água para três painéis (direita).

A Figura 29 exibe detalhes das mangueiras de conexão do distribuidor central aos engates rápidos fixados nos perfis de cada painel. Os perfis de alumínio com furos de 1 mm de diâmetro espaçados a cada 2 cm, foram fixados com peça de fixação do tipo “sargento”, facilitando a retirada para possíveis futuras intervenções.



Figura 29: Detalhes da tubulação com mangueiras de poliuretano.

A Figura 30 apresenta um perfil instalado sobre o painel, evidenciando a boa integração visual entre eles, e a Figura 31 confirma essa integração visual quase imperceptível através de vista aérea.



Figura 30: Perfis de alumínio na borda dos painéis.



Figura 31: Vista aérea dos painéis no solo.

A Figura 32 apresenta detalhe da calha de coleta da água após arrefecimento dos nove painéis fotovoltaicos e as Figuras 33.a e 33.b mostram um sifão e tubulação para retorno da água ao sistema de esgoto. Um termopar à prova d'água é instalado no sifão para medir a temperatura de saída da água.



Figura 32: Calha de coleta da água após arrefecimento dos painéis.



Figura 33.a: Detalhe da tubulação de saída da água para retornar ao sistema de esgoto. Figura 33.b: Detalhe do sifão (com termopar para medir a temperatura de saída da água) e tubulação de saída da água para retornar ao sistema de esgoto.

4.3 IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS E SUPERVISÃO

O sistema de aquisição de dados e supervisão é composto por sensores de temperatura do tipo termopares, transmissores, CLP, válvulas solenoides, *gateway* para interface dos protocolos Modbus RTU e Modbus TCP/IP, e rede de comunicação e armazenamento de dados, integrando um sistema de supervisão de parâmetros como temperatura, tensão, corrente e potência do sistema fotovoltaico.

Seis sensores termopares sem proteção na junta são conectados às superfícies traseiras dos painéis fotovoltaicos e dois termopares com proteção à prova d'água são instalados na entrada de água do sistema (tubulação PVC) e saída (sifão após a calha de escoamento), respectivamente. Esses oito termopares convertem a temperatura para sinais analógicos até um quadro, fixado na própria estrutura dos painéis fotovoltaicos, e são conectados a oito transmissores, que enviam o sinal analógico (padrão 4-20mA) ao CLP.

O processo de controle e aquisição de dados se inicia com o CLP fazendo a leitura dos valores dos termopares e controlando a abertura e fechamento das válvulas, quando a média das 3 temperaturas dos painéis sem arrefecimento atingir a temperatura de *setpoint*. O inversor do sistema fotovoltaico fornece os valores de tensão e corrente de cada *string* para o cálculo e comparação das potências.

A rede de comunicação é composta pelo CLP, um dispositivo de armazenamento de dados *online*, *Flexy*, e o inversor solar, utilizando o protocolo de comunicação industrial Modbus RTU, padrão RS485. O *Ewon Flexy* é um *gateway* e roteador VPN industrial. Permite a coleta de dados, monitoramento e controle de uma grande variedade de equipamentos de automação industrial, independente do protocolo de rede. O roteador VPN interno permite acesso remoto para programação, por meio da internet, a máquinas e sistemas de clientes. O *Flexy* recebe os dados colhidos do sistema fotovoltaico e sistema de arrefecimento na base do sistema de automação (nível de controle), que chega a ele através do inversor solar e o CLP, com a utilização do protocolo Modbus RTU, e converte para o protocolo Modbus TCP/IP (nível de supervisão), utilizando-se de um padrão Ethernet, e envia os dados para um banco de dados nas nuvens, para posterior processamento. Isto possibilita o desenvolvimento de sistema supervisorio *online*.

A Figura 34 mostra o diagrama da rede e a Figura 35 apresenta o fluxograma do sistema com a rede Modbus para aquisição de dados, possibilitando a comunicação entre os dispositivos que integram o sistema implementado.

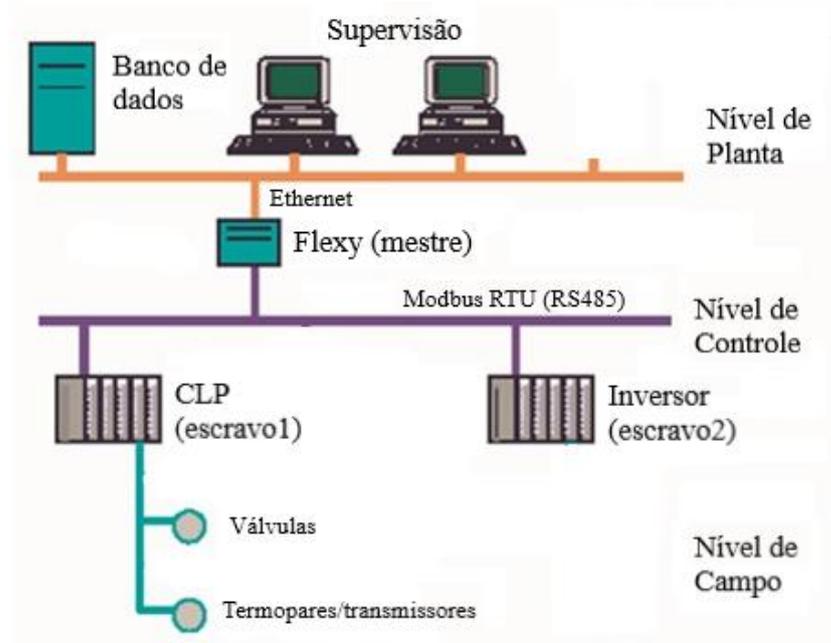


Figura 34: Diagrama da rede.

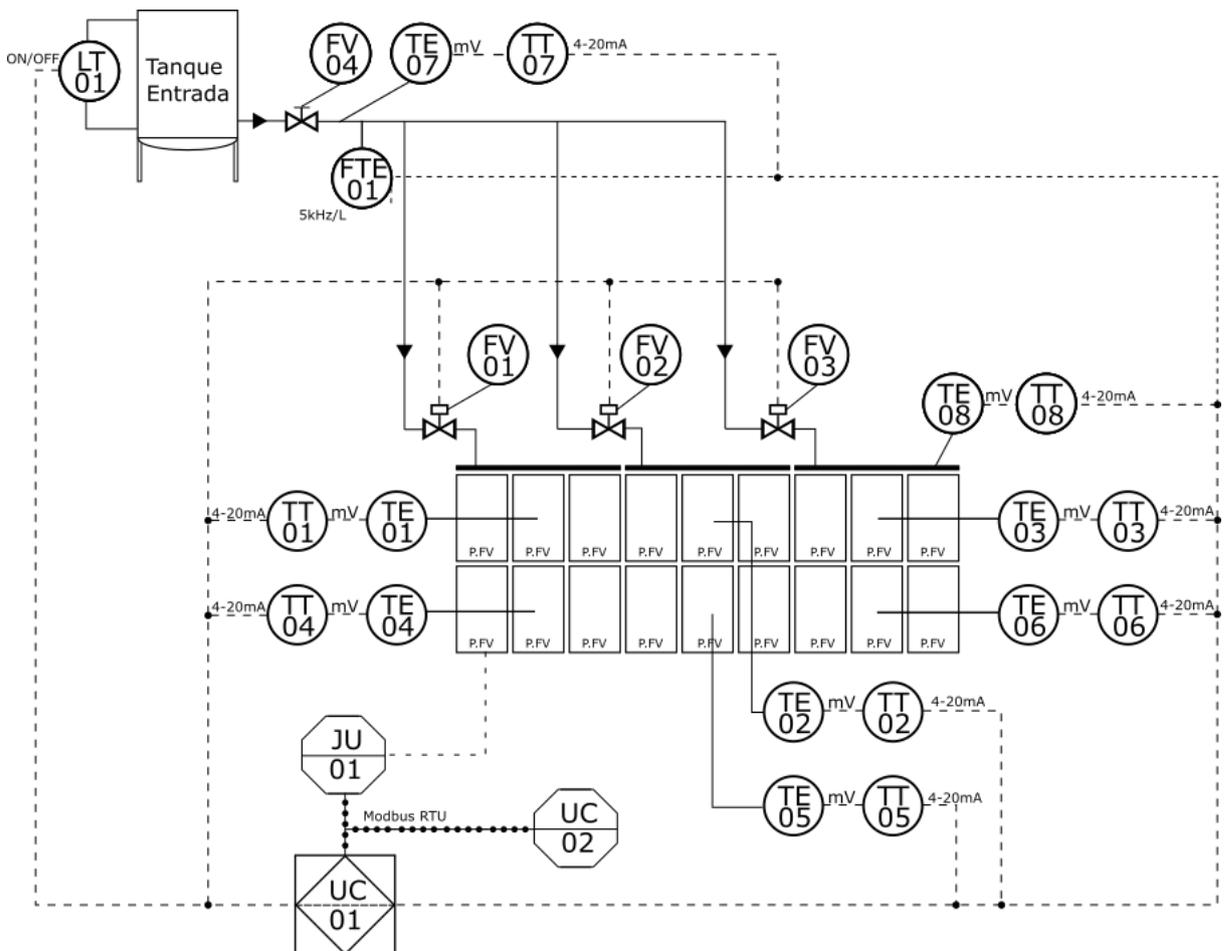


Figura 35: Fluxograma do sistema de aquisição, controle e supervisão.

Onde:

LT-01 representa dois sensores de nível de água com bóia horizontal;

FV-01 a FV-03 representam uma válvula solenoide 24Vcc;

FV-04 representa uma válvula manual;

FTE-01 representa um sensor de vazão;

TE-01 a TE-06 representam um termopar tipo J sem proteção à prova d'água;

TE-07 e TE-08 representam um termopar tipo J com proteção à prova d'água;

TT-01 a TT-08 representam o transmissor de temperatura TxBlock-Usb para os termopares;

JU-01 representa o inversor solar;

UC-01 representa CLP TPW-04, da WEG;

UC-02 representa o equipamento Flexy 205;

As Figuras 36.a e 36.b apresentam o sensor termopar saindo do eletroduto e fixado na superfície traseira de um painel fotovoltaico. A Figura 37 mostra a vista interna do quadro com oito transmissores ligados aos oito termopares, sendo dois à prova d'água (temperaturas de entrada e saída da água), e seis sem proteção na junta (temperaturas dos painéis com e sem arrefecimento).



(a)



(b)

Figura 36.a: Vista mostrando sensor termopar fixado na superfície traseira de um painel, distribuidor e mangueiras. Figura 36.b: Detalhe do sensor termopar fixado na superfície traseira do painel fotovoltaico.



Figura 37: Vista interna do quadro com oito transmissores de temperatura.

A Figura 38 mostra vista interna do quadro com dispositivos instalados, sendo a fonte de tensão, o CLP e o *Flexy* (ambos em destaque). A planta projetada tem por referência dispositivos comerciais e amplamente empregados na indústria, de maneira a garantir a robustez do sistema. O quadro está instalado na parede, ao lado do inversor solar fotovoltaico, como na Figura 39.

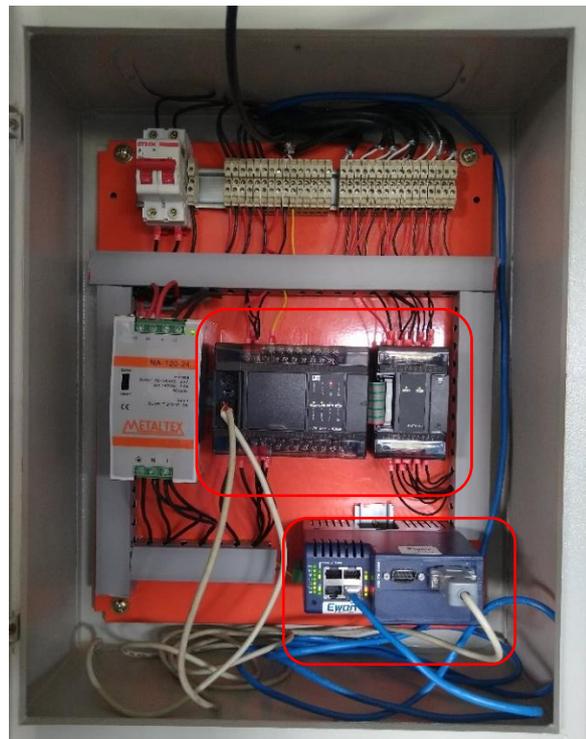


Figura 38: Vista interna do quadro com dispositivos (fonte de tensão, CLP e *Flexy*).



Figura 39: Quadro com dispositivos instalado ao lado do inversor solar.

4.4 ANÁLISES E DISCUSSÕES

Os resultados do desenvolvimento do sistema de aquisição de dados e supervisão, bem como as análises propostas na metodologia são detalhados a seguir.

4.4.1 Desenvolvimento do Sistema de Aquisição de Dados e Supervisão

O processo de aquisição de dados, supervisão e monitoramento é descrito a seguir com a apresentação dos processos realizados nos equipamentos do sistema, CLP, Inversor Solar e *Flexy*.

A comunicação entre os equipamentos utiliza a rede Modbus RTU, portanto, todos são configurados para esta rede, sendo configurada a mesma velocidade de transmissão de dados (19200 bps), mesma paridade (sem paridade no caso) e bits de parada (1 bit de parada). O *Flexy* funciona como mestre e o CLP e Inversor como escravos. As TAGs ou informações a serem transmitidas estão no mesmo “nó” do equipamento a que pertencem, ou seja, as informações transmitidas pelo CLP ao *Flexy* estão no mesmo nó ou endereço (usado o nó 10), e as informações transmitidas pelo Inversor ao *Flexy* estão no mesmo nó entre si, mas diferente do nó do CLP (usado o nó 17).

A pinagem deve atender as especificações físicas da rede Modbus, sendo usados os pinos 1, 5, 6 e 9 do conector DB9 para a entrada do *Flexy*, como mostrado na Figura 40.

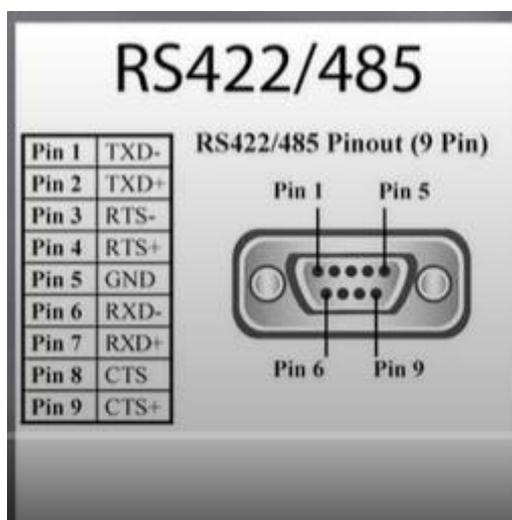


Figura 40: Pinagem RS422/ RS485 (BRAIN BOXES, 2015).

No caso do inversor, que possui conector específico, foram usados os pinos 1, 2 e 8 (HUAWEI, 2019).

4.4.1.1 Controlador Lógico Programável (CLP)

O CLP utilizado é modelo TPW-04 WEG, sendo a programação feita na linguagem *Ladder* através do software TPW-PCLink. O programa identifica o módulo analógico utilizado com 8 entradas, registra os dados de 8 variáveis de temperatura, calcula a média das 3 temperaturas da *string* com arrefecimento e das 3 temperaturas da *string* sem arrefecimento. Em seguida, compara a média das temperaturas sem arrefecimento com o valor de *setpoint* (40°C), acionando as saídas (válvulas solenóides) quando a média é maior ou igual a 40 ou não acionando quando a média é menor que 40. A partir do acionamento da primeira saída (válvula), esta fica ligada por 0,3 segundos, desliga por 2 segundos e aciona a segunda saída. A partir de então o mesmo ocorre com a segunda e a terceira saída, e o processo se repete para a primeira novamente e assim sucessivamente. O programa também faz a leitura do medidor de vazão instalado na entrada do sistema.

A programação do CLP está mostrada nas Figuras D.1, D.2, D.3 e D.4 do anexo D. As Figuras D.5 e D.6 mostram as configurações do CLP para transmissão na rede Modbus.

4.4.1.2 Inversor Solar

O inversor solar fotovoltaico utilizado é um modelo SIW300H M050 WEG, que comunica com o *Flexy* para transmissão dos dados de tensão e corrente das duas *strings* da planta solo. Para a comunicação é utilizado o aplicativo *Fusion Solar* para configurações da

comunicação Modbus com o *Flexy*. A interface do aplicativo *Fusion Solar* é mostrada na Figura E.1 do anexo E.

4.4.1.3 Flexy

O *Flexy* coleta os dados transmitidos pelo CLP, que são as temperaturas e a vazão, e pelo Inversor, as tensões e correntes, e armazena em seu *datalogger*. Para o armazenamento correto dos dados, as TAGs ou variáveis criadas no *Flexy* precisam estar com o endereçamento correto. Cada endereço de um registrador do CLP com os valores de temperatura é convertido de hexadecimal para decimal e acrescentado o prefixo “+4” para a nomenclatura adequada no *Flexy*, de acordo com a rede Modbus. O mesmo ocorre com os dados de tensão e corrente transmitidos pelo Inversor, do qual já possuem o endereço em decimal.

A Figura 41 mostra a tela de interface *online* do *Flexy* no modo *Setup*, apresentando as variáveis do sistema de supervisão, que são as 3 temperaturas com e 3 temperaturas sem arrefecimento, as médias entre elas, a temperatura da água na entrada do sistema, a temperatura da água na saída do sistema, as tensões e correntes das 2 *strings* e o medidor de vazão, com respectivos endereços decimais, tipo de variável, tipo de rede (Modbus) e TAGs correspondentes no CLP. A Figura 42 apresenta a tela de interface *online* do *Flexy* no modo *View*, mostrando apenas as variáveis, os valores e respectivas TAGs correspondentes no CLP.

The screenshot shows the Flexy 205 web interface in Setup mode. The top navigation bar includes 'Flexy 205', 'Tags', 'Values', and 'Wizards'. The user is logged in as 'Admin'. The main content area is titled 'Values' and displays a table of sensor tags. The table has the following columns: Name, Type, IO Server, Topic, IO Address, Value, and Tag description. The data rows are as follows:

Name	Type	IO Server	Topic	IO Address	Value	Tag description
TempComArref1	Floating po...	MODBUS	A	+417721	30.6	D512
TempComArref2	Floating po...	MODBUS	A	+417722	31.9	D513
TempComArref3	Floating po...	MODBUS	A	+417723	32.9	D514
TempSemArref1	Floating po...	MODBUS	A	+417724	40	D515
TempSemArref2	Floating po...	MODBUS	A	+417725	40.2	D516
TempSemArref3	Floating po...	MODBUS	A	+417726	40.5	D517
TempComArref4	Floating po...	MODBUS	A	+417738	31.8	D529
TempSemArref4	Floating po...	MODBUS	A	+417739	40.2	D530
TempEntrada	Floating po...	MODBUS	A	+417727	24.1	D518
TempSaída	Floating po...	MODBUS	A	+417728	30.6	D519
MedVazão	Floating po...	MODBUS	A	+417734	1.28	D525
Tensão1	Floating po...	MODBUS	B	+432017,17	326.7	V1
Corrente1	Floating po...	MODBUS	B	+432018,17	4.22	I1
Tensão2	Floating po...	MODBUS	B	+432019,17	309	V2
Corrente2	Floating po...	MODBUS	B	+432020,17	4.16	I2

Below the table, there are sections for 'TAG GROUPS' with checkboxes for Group A, Group B, Group C, and Group D. The bottom status bar shows 'eWON Name: eWON', 'Firmware: 13.350 (#792)', 'S/N: 1931-0010-24', 'Current time: 17/03/2021 16:52:42', and 'Status'.

Figura 41: Interface do Flexy no modo Setup.

The screenshot displays the Flexy 208 interface in 'View' mode. At the top, a dark blue header contains the 'Flexy 208' logo, navigation icons for 'Tags', 'Values', and 'Wizards', and a user status indicator 'Logged in as Admin'. Below the header, a navigation menu on the left lists various system functions: Values, Alarms, IO Servers, Diagnostic, Logs, Status, Files Transfer, Setup, Wizards, BASIC IDE, Users, System, Main, Communication, Storage, and Reboot. The main content area is titled 'Values' and features a 'VIEW' button. Below this, there are sections for 'VIEW MODE SETTINGS' (Autosave tag value, Auto edit the next tag), 'PAGES' (All, Default, System), and 'TAG GROUPS' (Group A, Group B, Group C, Group D). A table displays sensor data with columns for Name, Value, and Tag description. The table includes 15 rows of data for various temperature and pressure sensors. At the bottom, a status bar shows 'eWON Name: eWON', 'Firmware: 13.350 (#792)', 'S/N: 1931-0010-24', 'Current time: 17/03/2021 16:51:32', and 'Status'.

Name	Value	Tag description
TempComArref-1	31.3	D512
TempComArref-2	32.2	D513
TempComArref-3	33	D514
TempSemArref-1	40.4	D515
TempSemArref-2	40.3	D516
TempSemArref-3	40.4	D517
TempComArref-M	32.1	D529
TempSemArref-M	40.3	D530
TempEntrada	24.1	D518
TempSaida	31.3	D519
MedVazão	4.28	D525
Tensão1	322.7	V1
Corrente1	3.46	I1
Tensão2	307.2	V2
Corrente2	3.36	I2

Figura 42: Interface do Flexy no modo View.

4.4.2 Comparação da Eficiência de Conversão de Energia entre as Partes com Arrefecimento e à Temperatura Ambiente

Os dados armazenados pelo *Flexy* são obtidos para supervisão e monitoramento através do seu histórico, sendo possível a visualização através de uma tabela ou gráfico. Com os dados no formato de tabela é obtido um arquivo no formato '.txt' para exportação e criação de gráficos através de outros softwares. O período de análise dos dados é de um mês, entre os dias 4 de janeiro e 4 de fevereiro de 2021.

A Figura 43 apresenta o gráfico das temperaturas médias das duas *strings* do sistema, com arrefecimento e sem arrefecimento, no intervalo entre as 8 horas e as 18 horas do dia 31 de janeiro de 2021. Observa-se que as duas temperaturas médias seguem praticamente iguais até que a temperatura média da *string* sem arrefecimento atinja a temperatura de 40°C, o que ocorre após as 10 horas da manhã neste dia. A partir de então o sistema de arrefecimento entra em operação, reduzindo a temperatura média da *string* com arrefecimento, gerando uma diferença de temperatura, que chega a até 20°C em determinados instantes, onde a temperatura da *string* sem arrefecimento se aproxima dos 60°C, até que a temperatura média da *string* sem arrefecimento retorne abaixo de 40°C, ficando as duas temperaturas médias com valores próximos novamente.

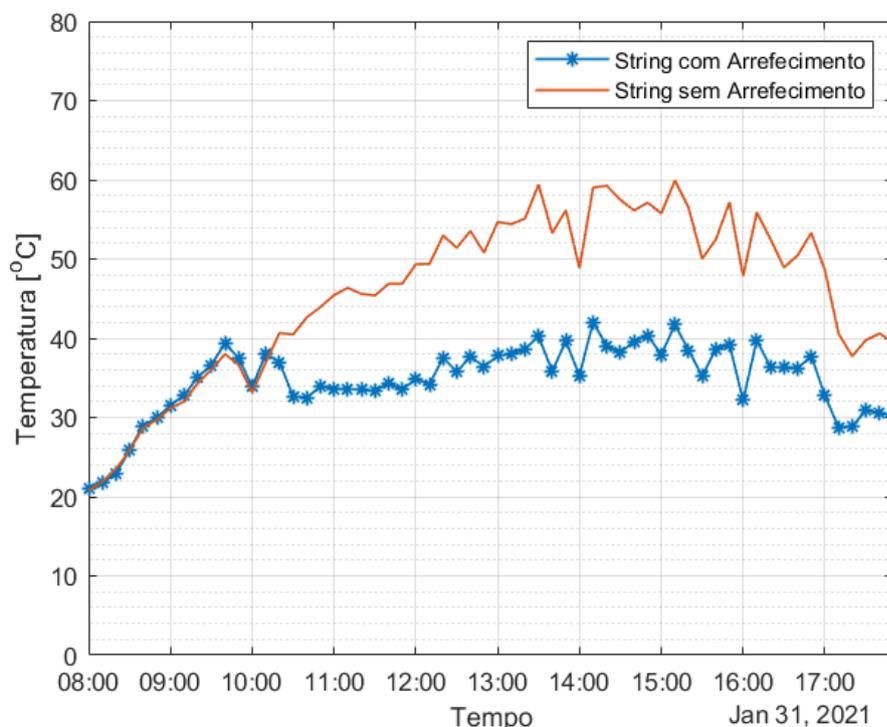


Figura 43: Gráfico de temperaturas das *strings* com e sem arrefecimento dos painéis fotovoltaicos.

A mesma avaliação é feita para as temperaturas de entrada e saída de água do sistema. Antes do sistema de arrefecimento entrar em operação a temperatura da água na tubulação hidráulica de entrada é maior que a temperatura da água na saída do sistema, no sifão após a calha. Ao entrar em operação, o sistema de arrefecimento promove a troca de calor entre a água e a superfície frontal dos painéis da *string* com arrefecimento, aumentando a temperatura de saída da água (reduzindo a temperatura dos painéis), ficando assim, maior que a temperatura de entrada do sistema. Esse processo continua até que o sistema de arrefecimento é desligado quando a temperatura média da *string* sem arrefecimento retorna a um valor inferior a 40°C, reduzindo a temperatura de saída da água, retornando as duas temperaturas a valores similares ao início do processo de arrefecimento. A Figura 44 mostra as temperaturas de entrada e saída do sistema para o dia 31 de janeiro de 2021, no intervalo entre as 8 horas e as 18 horas.

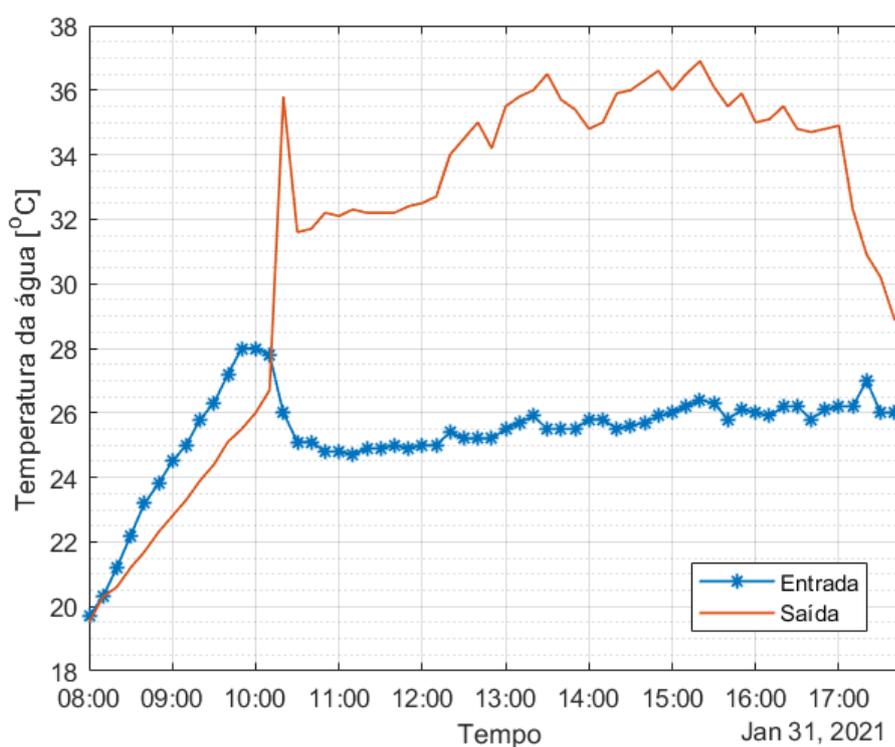


Figura 44: Gráfico das temperaturas de entrada (tubulação hidráulica) e saída (sifão) do sistema de arrefecimento dos painéis fotovoltaicos.

A Figura 45 apresenta o gráfico das potências das *strings* com arrefecimento e sem arrefecimento dos painéis fotovoltaicos no intervalo entre as 8 horas e as 18 horas do dia 31 de janeiro de 2021. A potência de cada *string* é obtida a partir dos valores da tensão e da corrente de cada *string*. Observa-se que a potência da *string* com arrefecimento é maior que a potência da *string* sem arrefecimento no intervalo de tempo onde a temperatura fica acima dos 40°C de

acordo com o gráfico da Figura 43, entre as 10 horas e as 18 horas, ou seja, há um ganho de potência nesse período.

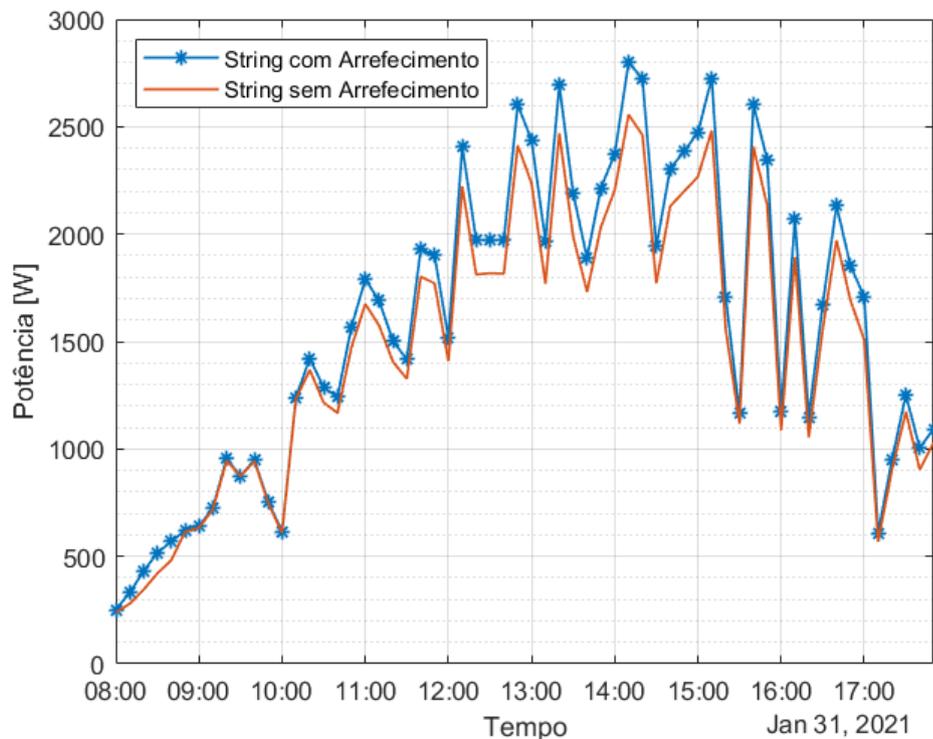


Figura 45: Gráfico das Potências das *strings* com e sem arrefecimento dos painéis fotovoltaicos.

O ganho percentual de potência da *string* com arrefecimento em relação à *string* sem arrefecimento é obtido calculando-se a diferença entre as potências dividido pela potência sem arrefecimento, multiplicando o resultado por 100, considerando somente o período em que a média das temperaturas da *string* sem arrefecimento está acima dos 40°C (sistema com arrefecimento em operação). Para o dia 31 de janeiro de 2021, entre as 8 horas e as 18 horas, o ganho médio percentual de potência foi de 7,93%, sendo o gráfico mostrado na Figura 46. A energia gerada pela *string* com arrefecimento durante o período em que a média das temperaturas da *string* sem arrefecimento está acima de 40°C é de 13.751,02Wh. A energia gerada pela *string* sem arrefecimento durante o mesmo período é de 12.669,08Wh e o ganho ou diferença de energia entre as duas *strings* é 1.081,94Wh.

Considerando o período total de um mês de análise dos dados, a média dos ganhos médios percentuais de potência foi de 4,12%, inferior ao dia analisado, o melhor caso.

Em períodos do ano com temperaturas ambientes maiores, principalmente entre os meses de julho e novembro, a temperatura média da *string* sem arrefecimento aumenta, podendo atingir valores acima de 70°C, elevando a diferença de temperatura entre as *strings* e, conseqüentemente, o ganho de potência e energia do sistema.

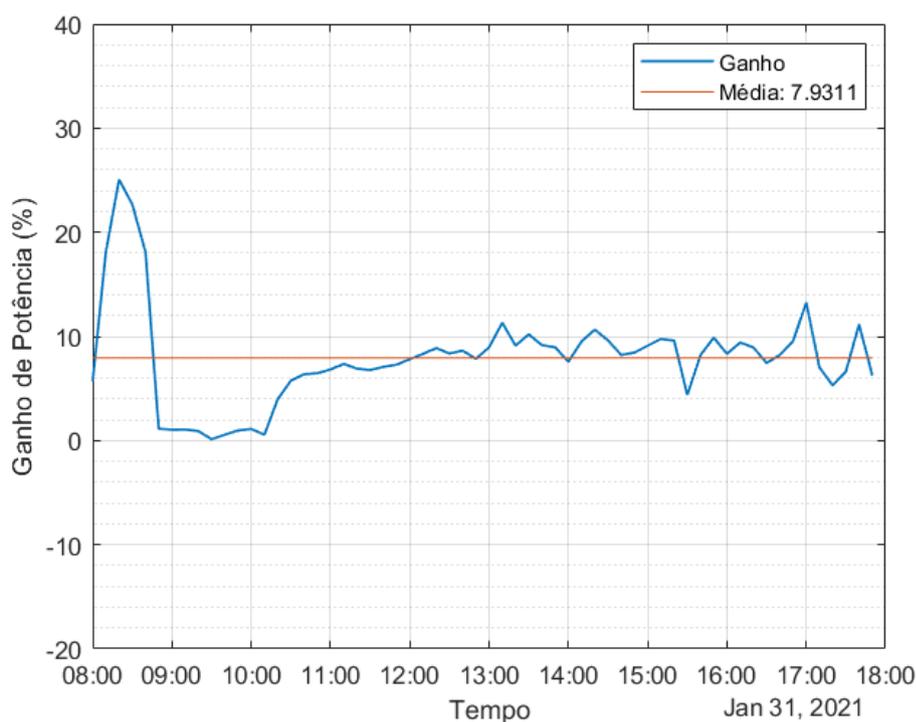


Figura 46: Gráfico do Ganho percentual de potência com a média do ganho.

4.4.3 Balanço Energético entre o Ganho de Energia gerado pelo Sistema de Arrefecimento da Planta Piloto e a Energia gasta com o recalque da água de reuso, com extrapolação para o Sistema sobre os telhados dos Blocos B e C

A partir do ganho de energia gerado pelo sistema de arrefecimento em comparação ao sistema sem arrefecimento é feito balanço energético com a energia gasta para recalque da água de reuso desde a saída do tratamento até o reservatório de armazenamento próximo à planta piloto no solo.

O conjunto motobomba, responsável pelo bombeamento da água de reuso da saída do tratamento (após tratamento primário com reator UASB e tratamento secundário com *Wetlands* construído), está a uma distância de 260 metros da caixa d'água de armazenamento próxima à planta piloto.

A caixa d'água utilizada tem altura de 12 metros. A altura geométrica de desnível da motobomba e a planta piloto no solo é 6 metros. Considerando uma perda de carga igual a altura geométrica, de 6 metros, a altura manométrica é obtida somando-se a altura da caixa d'água com a altura geométrica de desnível e a perda de carga distribuída, obtendo-se o valor de 24 metros. A partir da altura manométrica obtém-se a vazão da água no processo, apresentada na Figura 47, através da tabela do fabricante da motobomba, cujo valor é 9,4 m³/h.

- Cálculo da energia gasta para o recalque:

1. A potência elétrica do motor é de 1100W (uma hora de funcionamento da bomba);
2. Considerando o dia 31 de janeiro de 2021 para análise do balanço energético, o sistema de arrefecimento ficou ligado por 7 horas consecutivas (entre as 10 horas e as 17 horas aproximadamente), estando com uma vazão de 1,5 litros por minuto ou 90 litros por hora (medição feita com recipiente graduado), para o conjunto de 9 painéis. Para o arrefecimento de 7 horas consecutivas são necessários 630 litros de água.
3. A bomba possui vazão de 9,4 metros cúbicos por hora ou 9.400 litros por hora;
4. Calcula-se o consumo energético para o recalque de 630 litros de água.

Em uma hora a bomba consome = 1100Wh para 9400 litros, portanto, o consumo para cada litro é $1100\text{Wh}/9400 \text{ litros} = 0,1770\text{Wh/litro}$;

Para 630 litros, tem-se: $630\text{litros} * 0,1770\text{Wh/litro} = 73,72\text{Wh}$

- Balanço energético dos sistemas fotovoltaico/ recalque de água em 7 horas de funcionamento:

Ganho de energia = 1.081,94Wh;

Consumo no bombeamento = 73,72Wh;

Dessa forma o ganho líquido de energia será = $1.081,94 - 73,72 = 1.008,22\text{Wh}$ (1,008kWh)

Portanto, comparando-se o ganho de energia do dia 31 de janeiro de 2021 com a energia gasta para o recalque, percebe-se uma viabilidade técnica no processo, com excedente energético.

- Extrapolação para o sistema sobre os telhados dos blocos B e C:

O sistema fotovoltaico instalado sobre os telhados dos blocos B e C contém juntos 340 painéis fotovoltaicos. Considerando-se a mesma vazão do conjunto de 9 painéis instalados na planta piloto (1,5 litros por minuto), supondo o funcionamento contínuo de um sistema de arrefecimento durante as mesmas 7 horas, e que os 9 painéis gastam 630 litros de água, proporcionalmente, seriam necessários 23.800 litros de água, para arrefecer todo o sistema instalado sobre os blocos B e C do campus Aparecida de Goiânia. Analogamente, para a extrapolação em termos de energia, os 340 painéis fotovoltaicos juntos obteriam um ganho de aproximadamente 38kWh por dia e 1,14MWh por mês, considerando esse dia como uma média.

5 CONCLUSÃO

Nesse trabalho foi realizado o projeto e implementação de um sistema de arrefecimento com água potável, para a manutenção e melhoria de eficiência elétrica em painéis solares fotovoltaicos em uma planta piloto, constituída por duas *strings*, que permitiu a comparação da eficiência de geração entre ambas, não sendo possível até a conclusão do trabalho, a utilização de água de reuso para o arrefecimento.

O sistema de arrefecimento foi projetado e implementado em uma micro usina no solo com dispositivos robustos empregados em sistemas industriais, de forma a garantir a longevidade operacional do sistema e facilitar as comparações e análises entre duas *strings*, com e sem o arrefecimento dos painéis. Ainda, destaca-se que o sistema instalado possibilitou uma boa integração visual com a micro-usina fotovoltaica.

Um sistema de aquisição de dados e supervisão *online* foi desenvolvido, instalado e configurado de forma a permitir o monitoramento em tempo real das variáveis desejadas, como temperatura, tensão e corrente. O sistema contou com o desenvolvimento de uma rede de comunicação industrial Modbus TCP/IP, padrão Ethernet, Modbus RTU, padrão RS485.

A partir da análise comparativa entre as partes do sistema com arrefecimento e sem arrefecimento pelo período de um mês, conclui-se que há um ganho de potência de até 7,93% com o arrefecimento dos painéis, em especial em dias mais quentes, onde há maior variação de temperatura entre as partes do sistema analisadas. Esse ganho deve aumentar em épocas mais quentes do ano, como no período entre os meses de julho e novembro quando os painéis atingem temperaturas ainda mais elevadas. Esta expectativa deverá ser avaliada a partir da criação de banco de dados com o histórico de operação de toda a planta ao longo de períodos sazonais completos.

A partir do balanço energético entre o ganho de energia gerado pelo sistema de arrefecimento e a energia gasta para o recalque da água, conclui-se que o ganho de energia do sistema de arrefecimento supera o gasto de energia para o bombeamento da água até os painéis, tornando o sistema de arrefecimento viável energeticamente. A partir desse resultado, foi possível extrapolar a quantidade de água necessária para o arrefecimento do sistema fotovoltaico instalado nos telhados da instituição de ensino, bem como do ganho energético também considerando o sistema completo.

5.1 PRODUÇÃO CIENTÍFICA

- B. E. S. Mendes, J. L. Domingos, A. J. Alves. **Estudos da melhoria da eficiência energética de um sistema de geração fotovoltaica por meio de arrefecimento de painéis solares com água de reuso.** In: XVIII Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica (CEEL), Universidade Federal de Uberlândia, dezembro de 2020.
- Mendes, B. E. S.; Domingos, J. L.; Alves, A. J.; Viajante, G. P. **Melhoria da eficiência energética de um sistema de geração fotovoltaica por meio de arrefecimento de painéis solares com supervisão online.** In: Engenharia 4.0: a era da produção inteligente/Organizadores: Pinheiro, E. M.; Filho, P. M. A.; Coelho, G. T. F. Editora Pascal, vol. 06, p. 126-146, abril de 2021.

5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões de trabalhos futuros, destacam-se:

- Análise comparativa da eficiência de conversão de energia do sistema fotovoltaico da planta piloto com os painéis em temperatura ambiente e com os painéis arrefecidos com aplicação de água de reuso proveniente do efluente do tratamento de esgoto do campus Aparecida de Goiânia do IFG;
- Análise de possíveis impactos danosos à conservação do painel fotovoltaico com aplicação de água de reuso proveniente de efluente de esgoto tratado, tais como incrustação (aumento do ciclo de concentração de sais) ou corrosão;
- Avaliação de eventuais ganhos com o melhor estado de limpeza da face superior do painel, em especial em período de tempo seco, onde há maior deposição de poeiras;
- Análise dos dados do sistema de arrefecimento para o período de um ano (ciclos sazonais);
- Estudo da temperatura média de operação dos painéis fotovoltaicos acima do limiar de 40°C ao longo do ano;
- Avaliação da utilização de filtro simples após o arrefecimento dos painéis, de modo que a água de reuso volte para a própria caixa d'água, não necessitando de um novo tratamento;
- Análise da possível elevação da temperatura da água de reuso dentro da caixa d'água (água de recirculação), de forma que não comprometa a refrigeração dos painéis;
- Aplicação de um trocador de calor para redução da temperatura de saída da água após

- o arrefecimento, e posterior retorno ao reservatório;
- Análise de viabilidade econômica para implantação e manutenção do sistema de arrefecimento;
 - Implantação de sistema de otimização da aplicação de água considerando aspectos técnicos e econômicos.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. Cadernos temáticos ANEEL - Micro e Minigeração Distribuída, Sistema de Compensação de Energia Elétrica. 2ª Edição. Brasília, maio de 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012.

ÁGUAS CLARAS ENGENHARIA. Reator UASB: Saiba o que é e como funciona. Disponível em: < <https://aguasclarasengenharia.com.br/como-funciona-reator-uasb/>> . Acesso em 25 de julho de 2019.

ALMEIDA, E.; ROSA, A. C.; DIAS, F. C. L. S.; BRAZ, K. T. M.; LANA, L. T. C.; SANTO, O. C. E.; SACRAMENTO, T. C. B. Energia Solar Fotovoltaica: Revisão Bibliográfica. Universidade FUMEC, março de 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA – ABSOLAR. Energia Solar Fotovoltaica no Brasil – Infográfico Absolar, n.7, maio, 2019. Disponível em: < <http://www.absolar.org.br/infografico-absolar-.html>> . Acesso em 05 de junho de 2019.

BARROSA, M. R. Princípios Fundamentais da Transferência de Calor. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, agosto, 2004.

BRAIN BOXES. RS-485 Masterclass – What is it and why use it? Disponível em: < <http://www.brainboxes.com/article/items/rs-485-masterclass-what-is-it-and-why-use-it>>. Acesso em 03 de março de 2021.

BRASIL. Resolução nº 54 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos, de 28 de novembro de 2005 - Estabelece critérios gerais para reuso de água potável. Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reuso de água não potável de água, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília – DF, novembro de 2005.

CÂMARA, C. F. Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. Monografia de Pós-Graduação da Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG, 2011.

CARVALHO, K. J. S. Sistemas fotovoltaicos distribuídos e integrados à rede elétrica: Condições de operação e seus impactos. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 2012.

CASARO, M. M; MARTINS, D. C. Processamento eletrônico da Energia Solar Fotovoltaica em Sistemas conectados à Rede Elétrica. Revista Controle & Automação, vol. 21, n.2, p. 159-

172, março e abril, 2010.

CASTANHEIRA, A. F. A; FERNANDES, J. F. P; COSTA BRANCO, P. J. Demonstration Project of a cooling system for existing PV power plants in Portugal. Applied Energy, vol. 211, p. 1297-1307, 2018.

CESA – CENTRO EXPERIMENTAL DE SANEAMENTO AMBIENTAL. Reator UASB. Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Disponível em: <<http://www.saneamento.poli.ufrj.br/index.php/br/infraestrutura/reator-usab>>. Acesso em 23 de janeiro de 2021.

CICLO VIVO. Cobertura de supermercado em Goiânia ganha maior usina solar urbana do Brasil, julho de 2017. Disponível em: <<https://ciclovivo.com.br/inovacao/negocios/cobertura-de-supermercado-em-goiania-ganha-maior-usina-solar-urbana-do-brasil/>>. Acesso em 11 de junho de 2019.

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, p. 311-321, 2013.

ELETROBRÁS. CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS, FUPAI/EFFICIENTIA. Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.

ELIPSE. O que são sistemas supervisórios? Disponível em: <<https://kb.elipse.com.br/o-que-sao-sistemas-supervisorios/>>. Acesso em 26 de junho de 2019.

EOS. Como funciona o tratamento de efluentes no Brasil. Disponível em: <<https://www.eosconsultores.com.br/tratamento-de-efluentes/>>. Acesso em 26 de julho de 2019.

EECA. Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás. Disponível em: <<https://www.eec.ufg.br/n/84646-prof-ricardo-prado-abreu-reis-e-um-dos-autores-do-livro-wetland-construido-no-tratamento-de-esgotos-sanitarios>>. Acesso em 25 de janeiro de 2021.

GCL System Integration Technology Co Ltd. GCL-P6/72 310-325Watt High efficiency multicrystalline module. GCL-P6/72 vol. 1, 2016.

GIORDANNI, P. R.; MELO, A. G.; ALVES, A. A. A.; SANTOS, B. L. B.; TONES, A. R. M. Reúso Agrícola e Florestal de efluentes tratados: Uma revisão. Universidade Federal da Fronteira Sul, outubro de 2018.

HENG, Z.; MINGJIE, L.; HAIPING, C.; CHENTAO, Y. Experimental study of constant

temperature operation and constant flow operation in concentrating PV/T system. *Energy Procedia*, vol. 105, p. 869-874, 2017.

HUAWEI TECHNOLOGIES CO., LTD. SUN2000L (2KTL-5KTL) User manual. Junho de 2019.

IDOKO, L.; ANAYA-LARA, O.; MCDONALD, A. Enhancing PV modules efficiency and power output using multi-concept cooling technique. *Energy Reports*, vol. 4, p. 357-369, 2018.

IRWAN, Y. M.; LEOW, W. Z.; IRWANTO, M.; FAREQ, M.; AMELIA, A. R.; GOMESH, N.; SAFWATI, I. Indoor test performance of PV panel through water cooling method. 2015 International Conference on Alternative Energy in Developing Countries and Emerging Economies, *Energy Procedia*, vol.79, p.604-611, 2015.

JI, J.; LU, J.; CHOW, T.; HE, W.; PEI, G. A sensitivity study of a hybrid photovoltaic/ thermal water-heating system with natural circulation. *Applied Energy*, Elsevier Ltd, v.84, p. 222-237, 2007.

MARS, NADIA; GROUZ, FATEN; ESSOUNBOULI, NAJIB; SBITA, LASSAAD. Synergetic MPPT Controller for photovoltaic system. *Journal of Electrical & Electronic Systems*, vol. 6, issue 2, 2017.

MATIAS, C. A.; SANTOS, L. M.; ALVES, A. J.; CALIXTO, W. P. Increasing photovoltaic panel power through water cooling technique. *Transactions on Environment and Electrical Engineering*, v.2, p. 60-66, 2016.

MATIAS, C. A. Desenvolvimento de bancada laboratorial para testes de eficiência energética em painéis fotovoltaicos. Dissertação de Mestrado Profissional, PPG em Tecnologia de Processos Sustentáveis do IFG, Goiânia, 2018.

MAY, S.; Caracterização, tratamento e reúso de águas cinzas e aproveitamento de águas pluviais em edificações. Tese de doutorado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2009.

MELO, L. F. Sensores de Temperatura: Termopares. Universidade Estadual de Londrina (UEL). Disponível em: <<http://www.uel.br/pessoal/leonimer/termopares.pdf>>. Acesso em 19 de junho de 2019.

MICHAEL, J. J.; SELVARASAN, I.; GOIC, R. Fabrication, experimental study and testing of a novel photovoltaic module for photovoltaic thermal applications. *Renewable Energy*, vol. 90, p. 95-104, 2016.

MINHA CASA SOLAR. Disponível em: <<http://blog.minhacasasolar.com.br/quanta-energia->

[gera-um-painel/sombreamento-placa-solar/](#)>. Acesso em 22 de maio de 2019.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro, dezembro de 2017. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/1138781/0/Boletim+de+Monitoramento+do+Sistema+El%C3%A9trico+-+Dezembro+-+2017.pdf/89e16453-fc2e-46fd-b5fd-aa6951daf934>>. Acesso em 05 de junho de 2019.

NETO, D. P. Processo de otimização aplicada à análise de risco de investimento em geração de energia elétrica com fontes renováveis. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação da UFG, Goiânia, 2017.

NI Engineer Ambitiously. O Protocolo Modbus em detalhes, setembro de 2019. Disponível em: <<https://www.ni.com/pt-br/innovations/white-papers/14/the-modbus-protocol-in-depth.html#section-2027456811>>. Acesso em 02 de novembro de 2020.

NOVUS Produtos Eletrônicos LTDA. Conceitos básicos de RS485 e RS422. Disponível em: <<https://www.novus.com.br/downloads/Arquivos/conceitos%20b%C3%A1sicos%20de%20rs485%20e%20rs422.pdf>>. Acesso em 21 de dezembro de 2020.

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

ROMANHOLO, P. V. V. Análise dos efeitos da sujidade no Sistema Fotovoltaico de 34kWp da EMC/UFG. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da UFG, Goiânia, 2019.

SANTOS, L. M. et al. Technical analysis of the application of water in the improvement of the electrical efficiency in photovoltaic panels. In: IEEE Chilecon, 2017. Disponível em: <<http://chilecon2017.ubiobio.cl/wp-content/uploads/2017/09/IEEE-Chilecon2017-Program-25-sept.pdf>> .

SANTOS, L. M. Estudos de melhoria da eficiência energética em painéis fotovoltaicos pela aplicação de água. Dissertação de Mestrado Profissional, PPG em Tecnologia de Processos Sustentáveis do IFG, Goiânia, 2018.

SCHNEIDER Motobombas. Catálogo de Motobombas Centrífugas Monoestágio série BC-92 S1. Revisão 6, julho de 2017.

SILVA, JÉSSICA ALICE ALVES DA. Tratamento de dados meteorológicos e análise de desempenho do sistema fotovoltaico da EMC/UFG. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da UFG, Goiânia, 2019.

SILVA, VINÍCIUS OLIVEIRA DA. Estudo e modelagem da arquitetura modular de uma usina solar fotovoltaica arrefecida com protótipo de verificação. Dissertação de Mestrado, Politécnica da USP, São Paulo, 2015.

SMAR Technology Company. Sistemas de Supervisão e Aquisição de dados. Disponível em: <<https://www.smar.com/brasil/artigo-tecnico/sistemas-de-supervisao-e-aquisicao-de-dados>>. Acesso em 21 de dezembro de 2020.

SOUZA, J. T. et al. Pós-tratamento de efluente de reator UASB utilizando sistemas “Wetlands” construídos. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.4, n.1, p.87-91, 2000.

TEIXEIRA, T. B. Influência da temperatura em aglomerados auto-reconfiguráveis de células solares fotovoltaicas. Monografia, PPG em Física da UFMG, Belo Horizonte, março de 2008.

UFJF. Influência humana sobre o meio ambiente. Disponível em: <https://www.ufjf.br/nupis/files/2011/02/aula-2-qu%C3%ADmica-do-meio-ambiente.pdf>. Acesso em 09 de abril de 2021.

VAZ, A. C. M. et al. Avaliação de água de reuso para utilização em melhoria de eficiência energética de painéis fotovoltaicos. Congresso Sustentabilidade na Gestão Ambiental, p. 117-124, Lisboa, Portugal, 2019.

VIANA, A. N. C.; BORTONI, E. C.; NOGUEIRA, F. J. H.; HADDAD, J.; NOGUEIRA, L. A. H.; VENTURINI, O. J.; YAMACHITA, R. A. Elektro - Eletricidade e Serviços S. A. Eficiência Energética: Fundamentos e Aplicações. 1ª edição, Campinas-SP, 2012.

WEATHER SPARK. Condições meteorológicas médias de Aparecida de Goiânia. Disponível em: <<https://pt.weatherspark.com/y/29982/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Aparecida-de-Goi%C3%A2nia-Brasil-durante-o-ano>> . Acesso em 07 de abril de 2021.

ANEXO A – DATASHEET DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS



GCL-P6/72

HIGH EFFICIENCY
MULTICRYSTALLINE MODULE

GCL-P6/72 310–325 Watt

325^W

MAXIMUM POWER OUTPUT

16.7%

MAXIMUM MODULE EFFICIENCY

0~+5^W

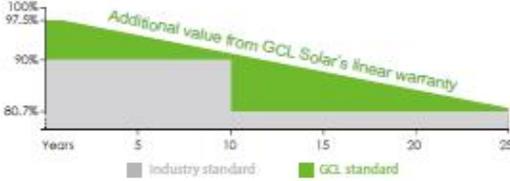
POWER OUTPUT GUARANTEE

Trust GCL to Deliver Reliable Performance Over Time

- World-class manufacturer of crystalline silicon photovoltaic modules
- Fully automatic facility and world-class technology
- Rigorous quality control to meet the highest standard: ISO9001:2008, ISO 14001: 2004 and OHSAS: 18001 2007
- Tested for harsh environments (salt mist, ammonia corrosion and sand blowing test: IEC 61701, IEC 62716, DIN EN 60068-2-68)
- Long term reliability tests
- 2*100% EL inspection ensuring defect-free modules

LINEAR PERFORMANCE WARRANTY

10 YEARS PRODUCT WARRANTY 25 LINEAR POWER WARRANTY



Additional insurance backed by Swiss RE





- Ideal choice for large scale ground installation
- High conversion efficiency due to top quality wafer and advanced cell technology
- PID and snail trails free
- Optimized system performance by module level current sorting
- Excellent performance under low irradiance
- Additional yield and easy maintenance with high transparent self-cleaning glass

GCL-P6/72
HIGH EFFICIENCY MULTICRYSTALLINE MODULE

ELECTRICAL SPECIFICATION (STC)					
Peak Power Watts	Pm(W)	310	315	320	325
Power Output Tolerance	Pm(W)	0~+5			
Maximum Power Voltage	Vm(V)	37	37.2	37.4	37.6
Maximum Power Current	Im(A)	8.38	8.47	8.56	8.64
Open Circuit Voltage	Voc(V)	45.4	45.6	45.8	46.0
Short Circuit Current	Isc(A)	8.99	9.08	9.17	9.24
Module Efficiency	(%)	16.0	16.2	16.5	16.7

Value at Standard Test Conditions STC (Air Mass AM1.5, Irradiance 1000W/m², Cell Temperature 20° C).

ELECTRICAL DATA (NOCT)					
Maximum Power	Pm(W)	223.8	227.1	231.2	234.6
Power Output Tolerance	Pm(W)	0~+5			
Maximum Power Voltage	Vm(V)	33.5	33.8	34.1	34.3
Maximum Power Current	Im(A)	6.68	6.72	6.78	6.84
Open Circuit Voltage	Voc(V)	42	42.2	42.4	42.6
Short Circuit Current	Isc(A)	7.19	7.30	7.38	7.46

NOCT: Irradiance at 800W/m², Ambient Temperature 20° C, Wind Speed 1m/s.

MECHANICAL DATA	
Solar Cells	Poly 156x156mm (6 inches)
Cell Orientation	72 Cells (6x12)
Module Dimensions	1956x992x40mm (77 x 39.05 x 1.57 inches)
Weight	22.5kg/26kg
Glass	High transparency solar glass 3.2mm (0.13 inches) or 4mm (0.15 inches)
Backsheet	White
Frame	Silver, anodized aluminum alloy
J-Box	IP67 Rated
Cables	4.0mm ² (0.006 inches ²), 1200mm (47.2 inches)
Connector	Original MC4 or Compatible

TEMPERATURE RATINGS	
Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)	45±2°C
Temperature Coefficient of P _{max}	-0.43%/°C
Temperature Coefficient of V _{oc}	-0.35%/°C
Temperature Coefficient of I _{sc}	0.04%/°C

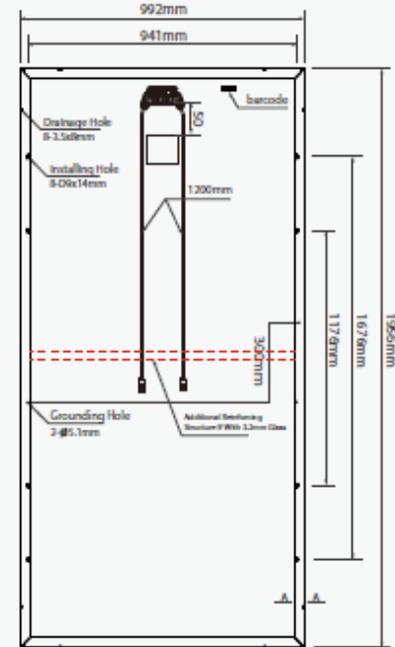
MAXIMUM RATINGS	
Operational Temperature	-40~+85°C
Maximum System Voltage	1000V DC(IEC)
Max Series Fuse Rating	15A

WARRANTY	
10 years Product Workmanship Warranty	
25 years Linear Power Warranty	

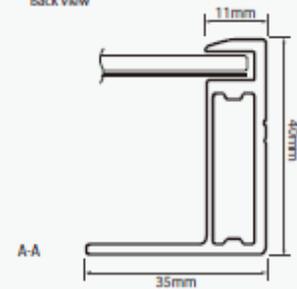
(Please refer to GCL standard warranty for details)

PACKAGING CONFIGURATION	
Modules per box: 26 pieces	
Modules per 40' container: 624pieces	

MODULE DIMENSION

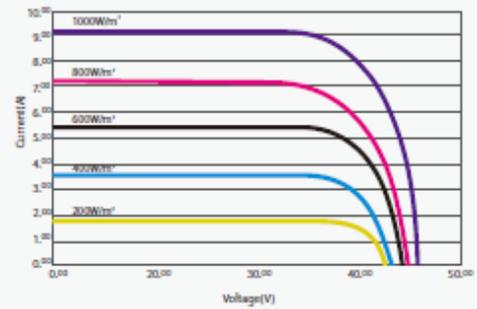


Back View



A-A

I-V CURVES OF MODULE (315W)



Excellent performance under weak light conditions: at an irradiance intensity of 200W/m² With AM 1.5, 25°C, 96.9% or higher of the STC efficiency (1000W/m²) is achieved



Bringing Green Power to Life
<http://en.gclsi.com>

GCL-EN-P6/72-2016-V1.0

CAUTION: READ INSTALLATION MANUAL BEFORE USING THE PRODUCT
©2016 GCL System Integration Technology Co., Ltd. All rights reserved. Specifications included in this datasheet are subject to change without notice.

ANEXO B – DETALHES DO PROJETO FOTOVOLTAICO

As Figuras B.1, B.2 e B.3 apresentam as plantas dos blocos B e C do Campus Aparecida de Goiânia do IFG com e sem a disposição dos painéis fotovoltaicos. As Figuras B.4, B.5 e B.6 apresentam os detalhes do projeto da planta fotovoltaica instalada no solo (planta piloto). O projeto do sistema fotovoltaico tanto do solo como sobre os telhados foi desenvolvido pela 3E Engenharia.

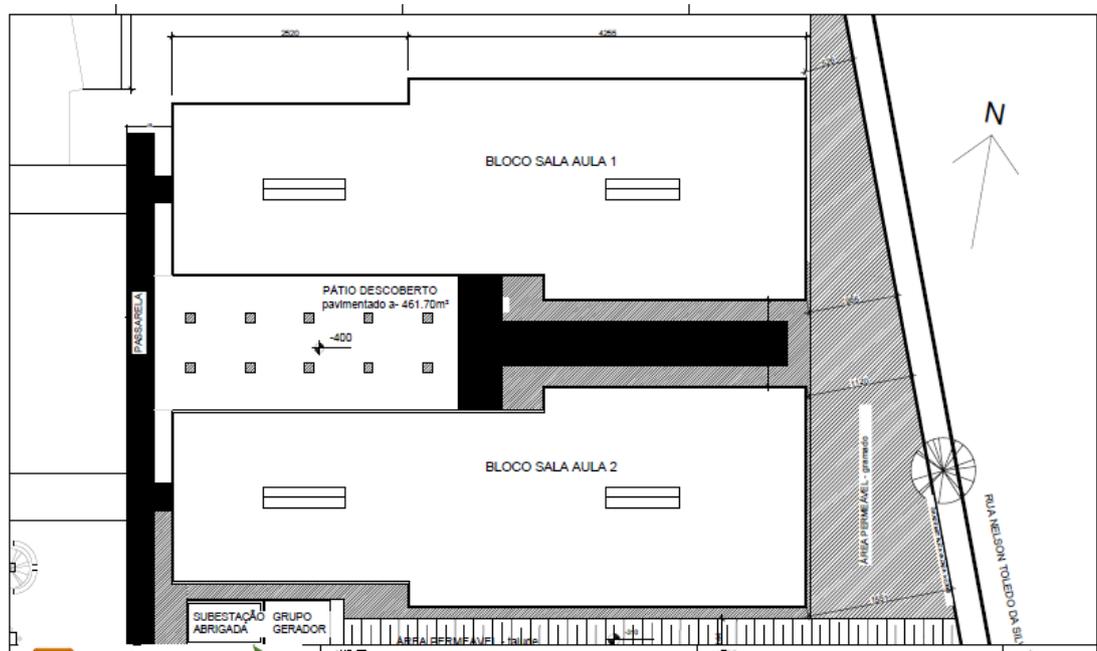


Figura B.1 - Planta dos Blocos C (Salas de Aula 1) e B (Salas de Aula 2) do Campus Aparecida de Goiânia do IFG.

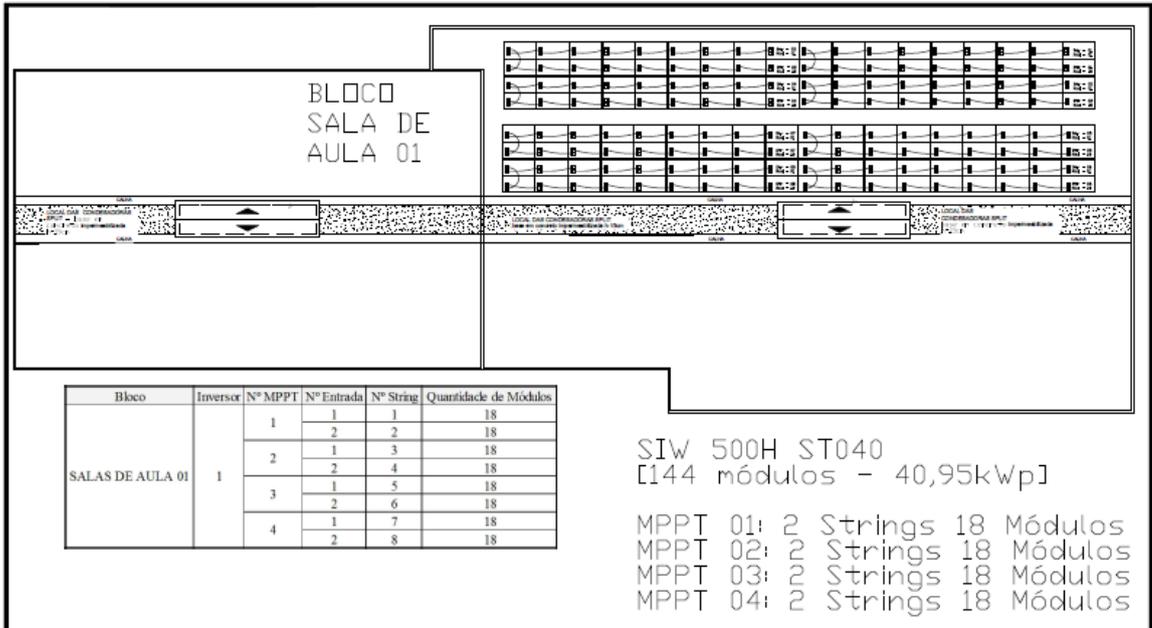


Figura B.2 - Bloco C (Salas de Aula 1) do Campus Aparecida de Goiânia do IFG com disposição dos painéis.

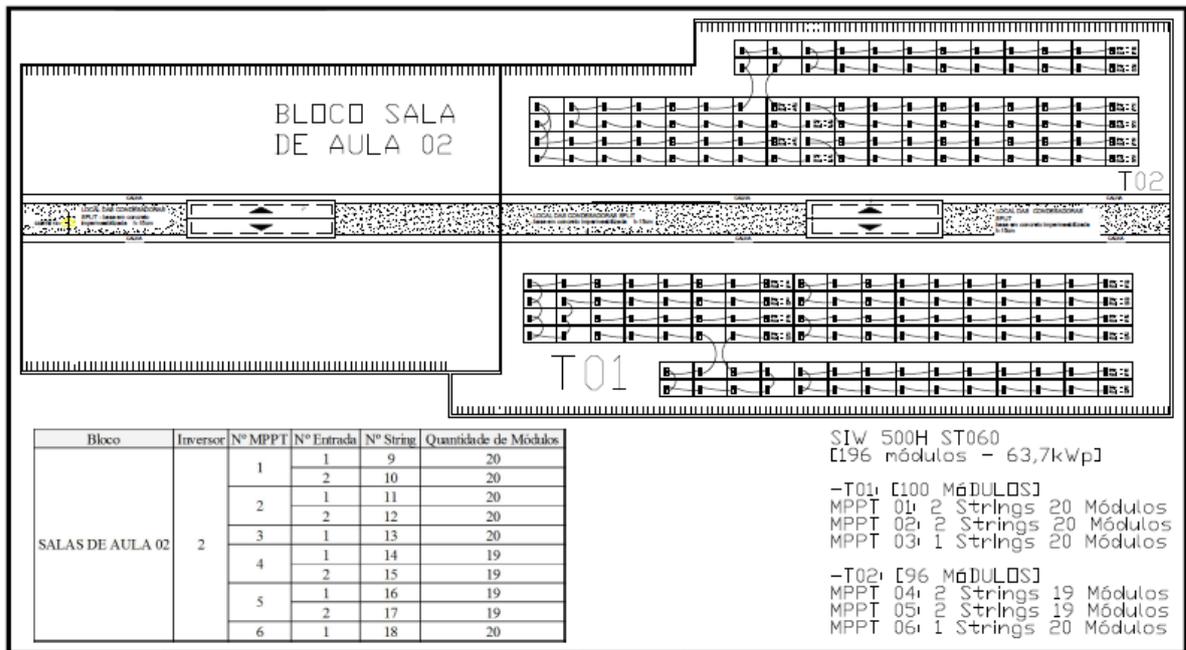


Figura B.3 - Bloco B (Salas de Aula 2) do Campus Aparecida de Goiânia do IFG com disposição dos painéis.

Deixar 10 cm entre uma placa e outra para a instalação de uma calha.

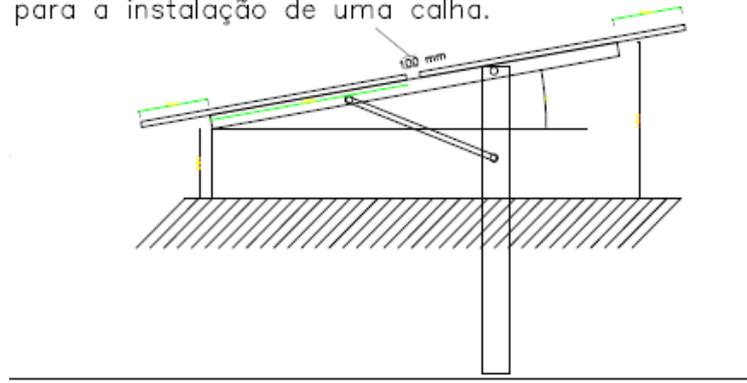


Figura B.4 - Detalhes do projeto da estrutura de fixação dos painéis da usina solo.

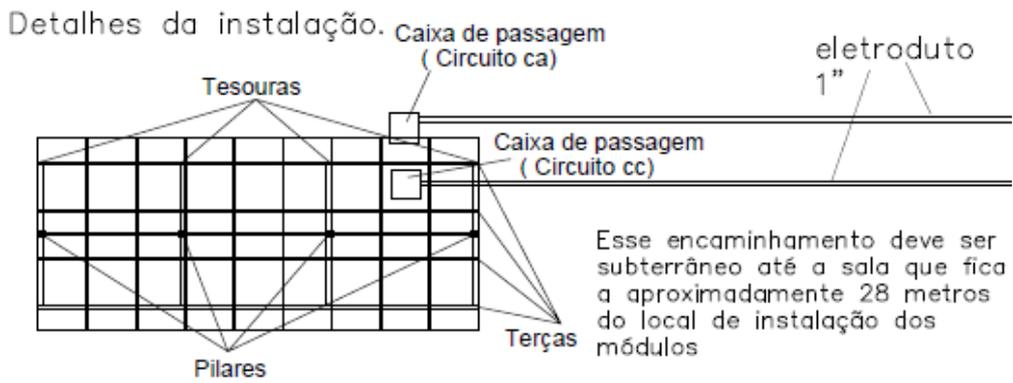


Figura B.5 - Detalhes da estrutura dos painéis da usina solo e caixas de passagem.

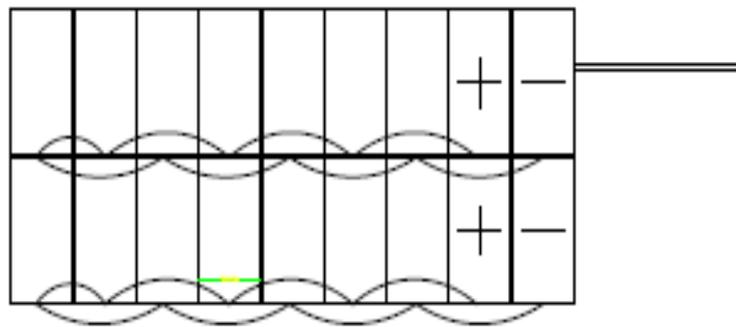


Figura B.6 - Paginação e divisão das strings.

ANEXO C – DATASHEET DO INVERSOR

Especificações técnicas	SIW300H - M050	
Eficiência		
Eficiência máxima	98,6%	
Eficiência europeia	98%	
Entrada		
Tensão de entrada máxima	600 V	
Faixa de tensão de operação ¹⁾	90 V ~ 600 V	
Tensão de partida	120 V	
Faixa de tensão MPPT em máxima potência	260 V ~ 480 V	
Tensão de entrada nominal	380 V	
Corrente de entrada máxima por MPPT	11 A	
Corrente de curto-circuito máxima	15 A	
Número de MPPTs	2	
Número máximo de entradas por MPPT	1	
Saída		
Conexão à rede	Monofásica	
Potência nominal de saída	5.000 W ²⁾	
Potência aparente máxima	5.500 VA ⁴⁾	
Tensão de saída nominal	220 V / 230 V / 240V	
Frequência de rede CA nominal	50 Hz / 60 Hz	
Corrente de saída máxima	25A ⁵⁾	
Fator de potência ajustável	0,8 adiantado ... 0,8 atrasado	
Distorção harmônica total máxima	≤3%	
Proteção		
Proteção anti-ilhamento	Sim	
Proteção contra polaridade CC invertida	Sim	
Monitoramento da isolamento	Sim	
Proteção contra raios CC	Sim	
Proteção contra raios CA	Sim	
Monitoramento de correntes residuais	Sim	
Proteção contra sobrecorrente CA	Sim	
Proteção contra curto-circuito CA	Sim	
Proteção contra sobretensão CA	Sim	
Proteção contra sobretemperatura	Sim	
Dados gerais		
Faixa de temperatura de operação	-30 a +60 °C (redução acima de 45 °C à Potência nominal de saída)	
Umidade relativa de operação	0% RH ~ 100% RH	
Altitude de operação	0 - 4.000 m (redução acima de 4.000 m)	
Resfriamento	Convecção natural	
Display	Indicadores LED	
Comunicação	RS485, WLAN	
Peso (incluindo suporte de montagem)	10,6 kg	
Dimensão (incluindo suporte de montagem)	375 × 375 × 161,5 mm	
Grau de proteção		
Modo de operação	com bateria	On-Grid ⁶⁾
	sem bateria	Grid-zero ⁷⁾
Compatibilidade da bateria		
Bateria	LG Chem RESU 7H_R/ 10H_R	
Faixa de tensão	350 ~ 450V cc	
Corrente máxima	10 A	
Comunicação	RS485	
Conformidade com normas		
Segurança	EN/IEC 62109-1, EN/IEC 62109-2	
Normas de conexão à rede	G83/2, G59/3, EN 50438, CEI 0-21, VDE-AR-N-4105, UTE C 15-712-1, AS 4777	

ANEXO D – PROGRAMAÇÃO CLP TPW-04

A programação do CLP TPW-04 utiliza a linguagem *Ladder*, no software TPW-PClink, versão 1.11, mostrada nas Figuras D.1, D.2, D.3 e D.4.

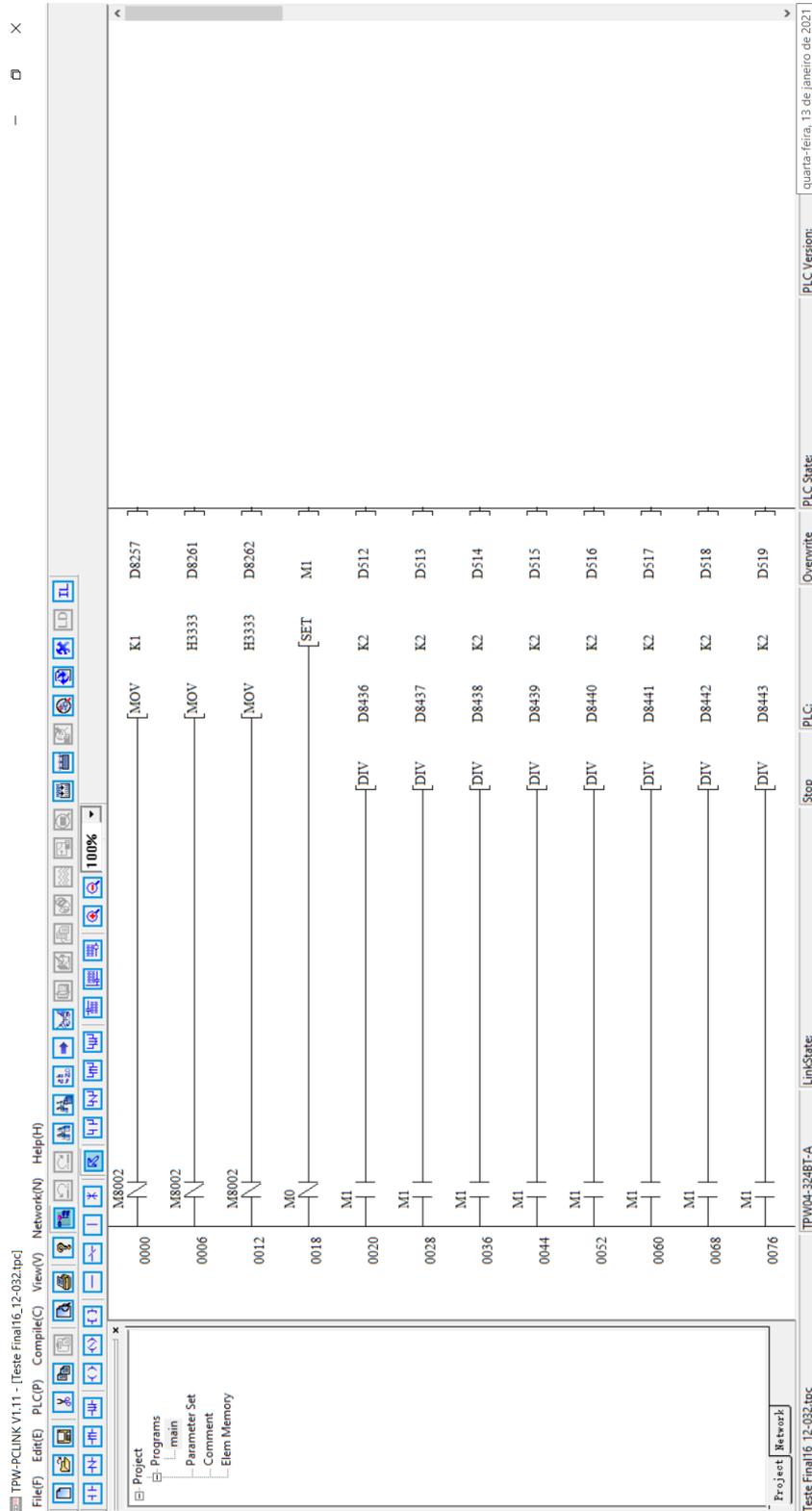


Figura D.1 – Programação ladder CLP TPW-04.

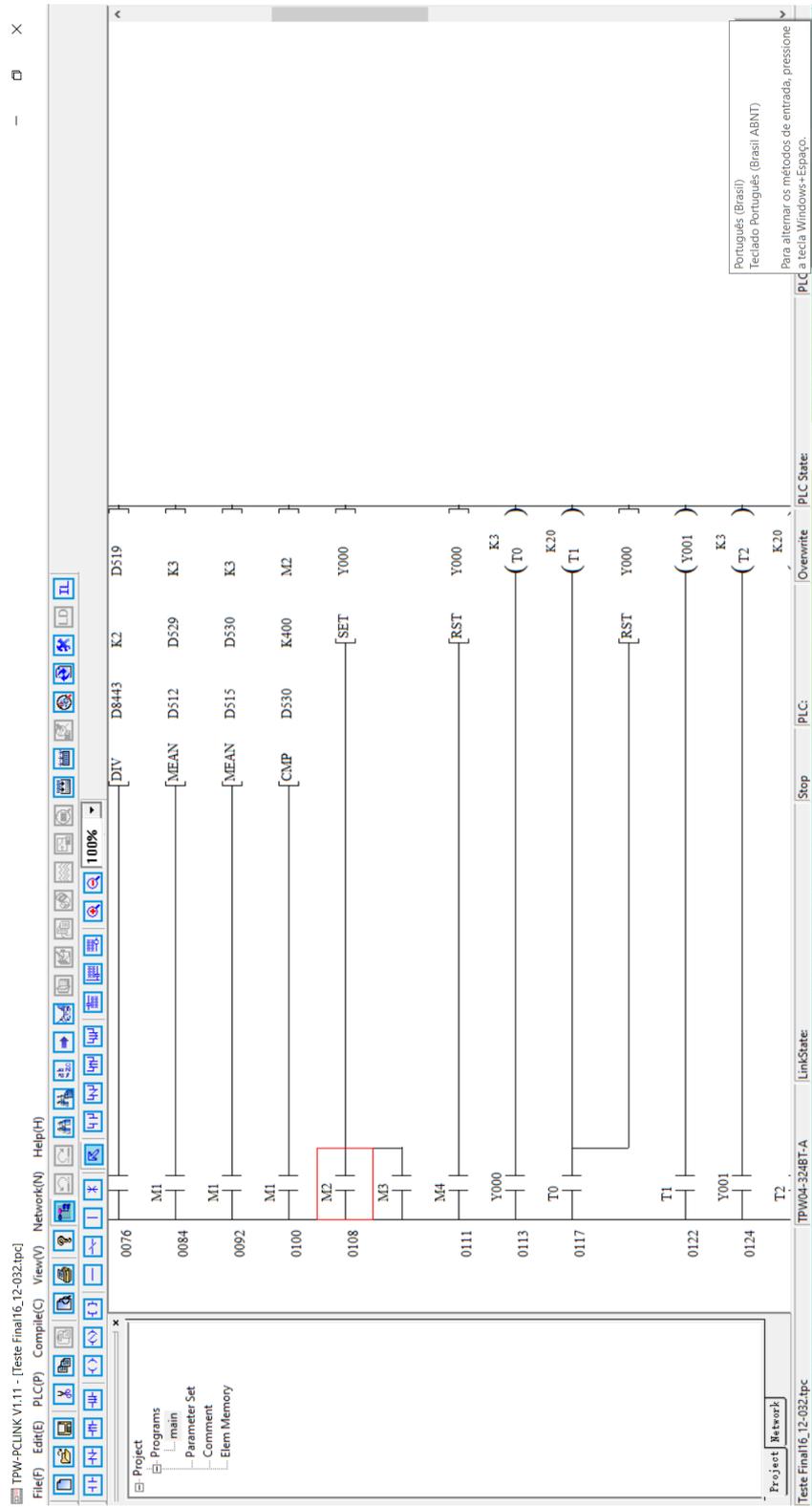


Figura D.2 – Programação ladder CLP TPW-04.



Figura D.3 – Programação ladder CLP TPW-04.

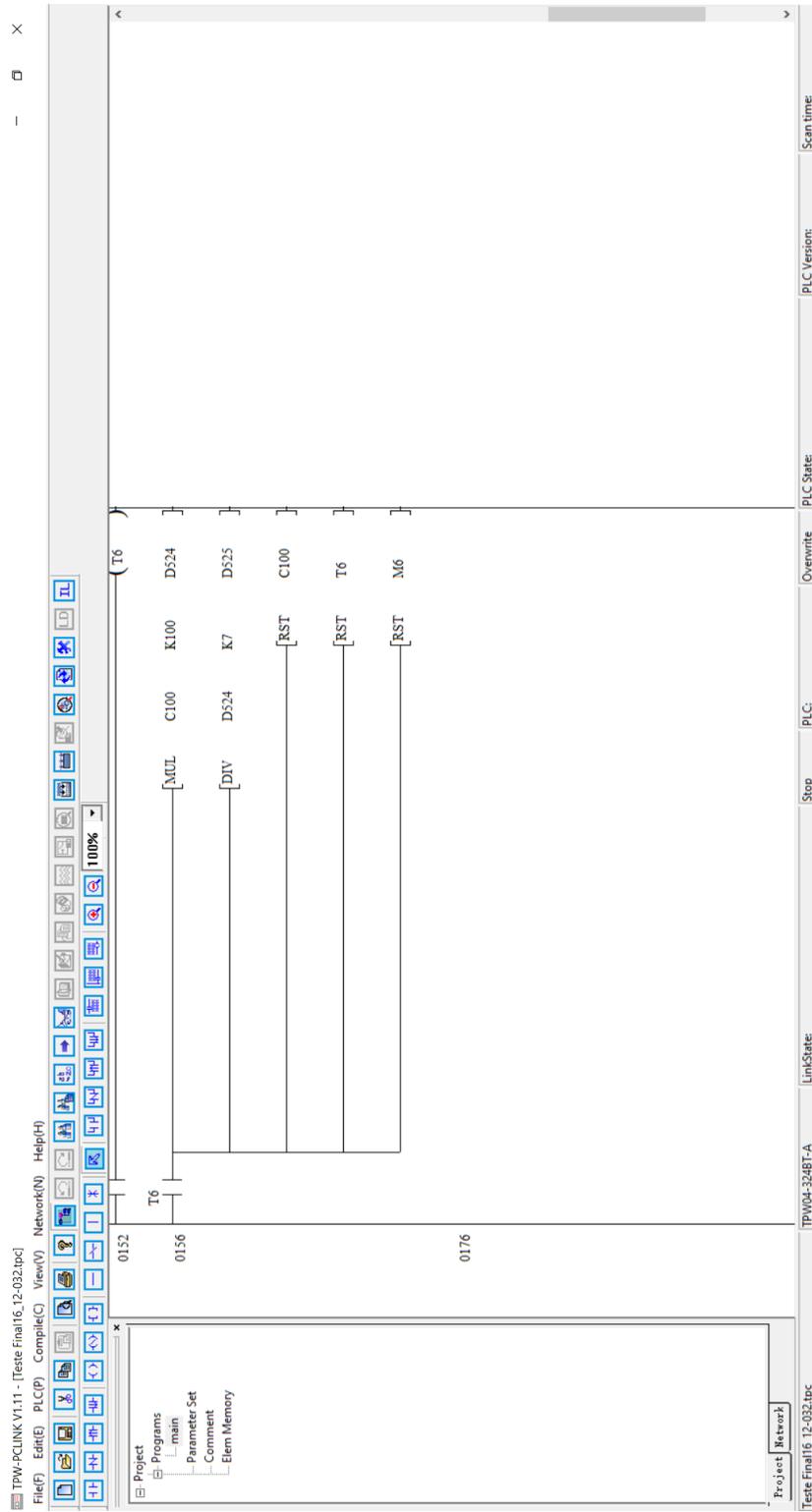


Figura D.4 – Programação ladder CLP TPW-04.

Ao conectar o CLP com o software TPW-PCLink, através da aba “PLC”, comando “Connect”, o software exibe a tela de configuração da comunicação Modbus do CLP na rede, onde pode ser configurada a velocidade de transmissão de dados, a paridade e os bits de parada, como na Figura D.5.

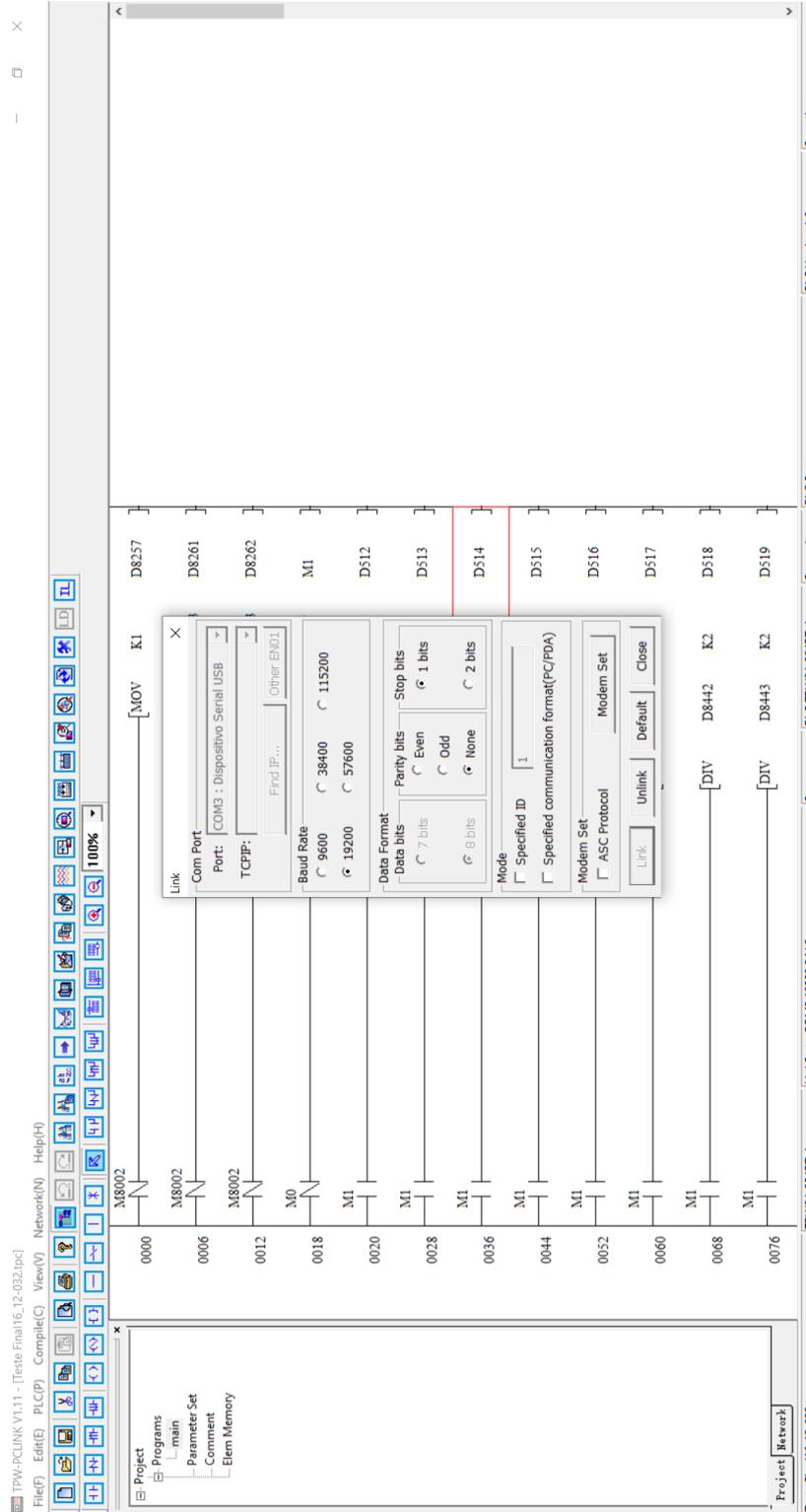


Figura D.5: Interface do software de programação do CLP para obter os dados de configuração da transmissão.

A configuração do endereço do CLP (nó) na rede é feita através da aba “PLC”, comando “ID Set”, como na Figura D.6.

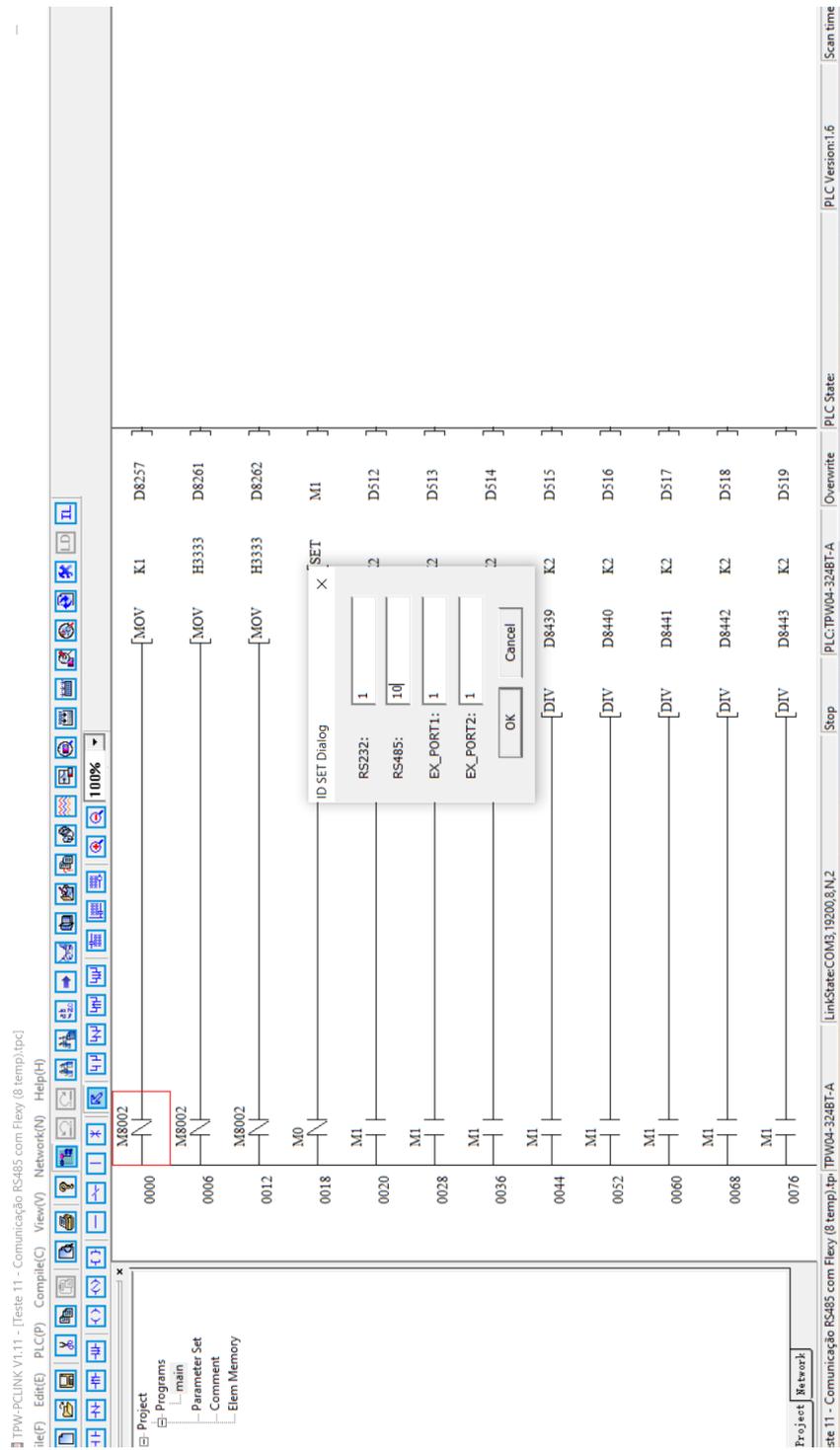


Figura D.6: Interface do software de programação do CLP para configurar o nó pertencente à rede de comunicação na transmissão de dados.

ANEXO E – INTERFACE DE COMUNICAÇÃO COM INVERSOR E FLEXY

A Figura E.1 apresenta a interface do aplicativo *Fusion Solar* usado para configuração dos parâmetros da rede Modbus para comunicação com o *Flexy*, sendo a taxa de transmissão de dados ou modulação de 19200 bps e o endereço do Inversor na rede (nó 17).



Figura E.1: Interface do aplicativo *Fusion Solar* para configurar a comunicação Modbus.

A Figura E.2 apresenta a interface *online* do *Flexy* com os mesmos dados de configuração da transmissão apresentados no CLP e Inversor.

Flexy 205

Home | Summary | Tags | Values | Alarms | IO Servers | Diagnostic | Logs | Status | Files Transfer | Setup

IO Servers

General

- Global Settings
- IO Servers List
- MEM
- EWON

MODBUS

- OPCUA
- DF1
- ABLOGIX
- S73&400
- S7200
- MELSEC
- MITSUBIX
- FINS
- HITACHI

Logged in as adm

Wizards

Init

Clear

MODBUS IO Server

COM Setup

COM Port: IO Port1 (COM:1)

Baud Rate: 19200

Parity: None

Stop Bits: 1

HW Mode: Half Duplex

8 data bits, RTU mode

Topic A

Slave Address (unit id): 10

Poll Rate: 500 MS

IP Address (Blank for RTU):

Enabled

Topic B

Slave Address (unit id): 17

IP Address (Blank for RTU):

Enabled

Update

eWON Name: eWON

Firmware: 13.350 (#792)

S/N: 1931-0010-24

Current time: 13/01/2021 20:58:55

Status

Figura E.2: Interface *online* do Flexy para configurar os dados de transmissão de comunicação com o CLP (nó 10) e Inversor (nó 17).