

UNIVERSIDADE DA REGIÃO DE JOINVILLE – UNIVILLE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS

**DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE UMA BANCADA DE TESTES
PARA ANÁLISE DE COLETORES SOLARES PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA
QUANDO ASSOCIADOS EM SÉRIE OU EM PARALELO**

GUSTAVO LOPES DE MORAES

Joinville – SC

2022

GUSTAVO LOPES DE MORAES

**DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE UMA BANCADA DE TESTES
PARA ANÁLISE DE COLETORES SOLARES PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA
QUANDO ASSOCIADOS EM SÉRIE OU EM PARALELO**

Dissertação de mestrado apresentada como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia de Processos na Universidade da Região de Joinville.

Orientador: Prof. Dr. Claiton Emilio do Amaral
Co orientadora: Prof^a. Dr^a. Noeli Sellin

Joinville – SC

2022

Catálogo na publicação pela Biblioteca Universitária da Univille

M827d	<p>Moraes, Gustavo Lopes de</p> <p>Desenvolvimento e validação de uma bancada de testes para análise de coletores solares para aquecimento de água quando associados em série ou em paralelo / Gustavo Lopes de Moraes; orientador Dr. Claiton Emilio do Amaral; coorientadora Dra. Noeli Sellin. – Joinville: UNIVILLE, 2022.</p> <p>136 p.: il.</p> <p>Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos – Universidade da Região de Joinville)</p> <p>1. Energia solar. 2. Aquecedores solares de água. 3. Coletores solares – Projeto e construção. I. Amaral, Claiton Emilio (orient.). II. Sellin, Noeli (coorient.). III. Título.</p> <p>CDD 621.47</p>
-------	---

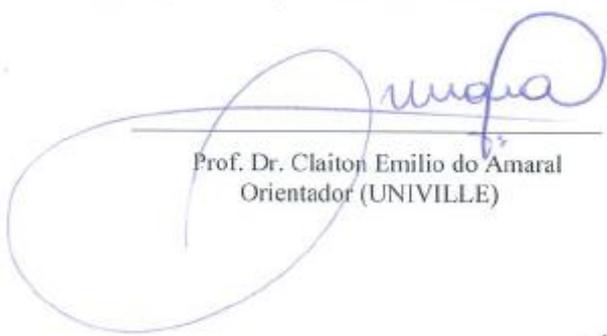
Termo de Aprovação

“Desenvolvimento e Validação de uma Bancada de Testes para Análise de Coletores Solares para Aquecimento de Água quando Associados em Série ou em Paralelo”

por

Gustavo Lopes de Moraes

Dissertação julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos, área de concentração Desenvolvimento e Gestão de Processos e Produtos e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos.



Prof. Dr. Claiton Emilio do Amaral
Orientador (UNIVILLE)



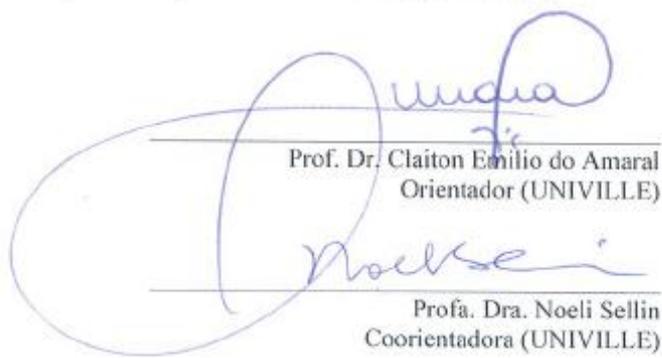
Profa. Dra. Noeli Sellin
Coorientadora (UNIVILLE)



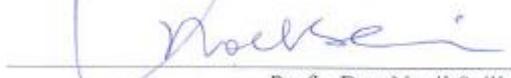
Profa. Dra. Ana Paula Testa Pezzin

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos (UNIVILLE)

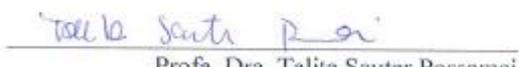
Banca Examinadora:



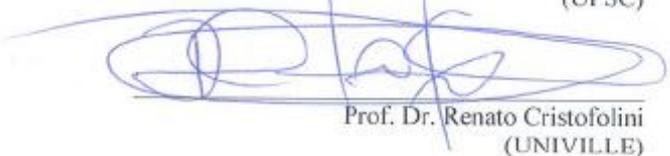
Prof. Dr. Claiton Emilio do Amaral
Orientador (UNIVILLE)



Profa. Dra. Noeli Sellin
Coorientadora (UNIVILLE)



Profa. Dra. Talita Sauter Possamai
(UFSC)



Prof. Dr. Renato Cristofolini
(UNIVILLE)

Joinville, 23 de junho de 2022.

Dedico o desenvolvimento desta pesquisa primeiramente a Deus e ao Mestre Jesus e, em seguida, aos meus pais, Ariovaldo José Lopes de Moraes e Sueli do Carmo Christofolletti Lopes de Moraes (*in memoriam*) e ao meu filho Matheus Domene Lopes de Moraes.

"Tudo aquilo que o homem ignora não existe para ele. Por isso o universo de cada um se resume ao tamanho de seu saber."

(Albert Einstein).

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, “a inteligência suprema e causa Autor de todas as coisas”. A Ele a gratidão por tudo que me proporcionou até hoje, renovando minha força a cada momento de dificuldade e dando disposição e discernimento nessa jornada chamada vida, inclusive nessa etapa, que, com certeza, sem a fé Nele, não teria chegado até aqui.

Agradeço aos meus pais, Ariovaldo José Lopes de Moraes e Sueli do Carmo Christofolletti Lopes de Moraes (*in memoriam*), por terem me tornado, com amor, esforço, educação e respeito, o homem que sou hoje.

A meu filho Matheus Domene Lopes de Moraes, por ter me dado a oportunidade de ser pai.

Ao meu irmão Dr. Marcelo Lopes de Moraes, por ter me dado suporte sempre que eu necessitei, sempre que conseguia “escapar” dos meus sobrinhos, Benício e Vicente.

Ao meu orientador professor Dr. Claiton do Amaral, por ter acreditado no meu potencial e me guiado até o resultado alcançado e a co-orientadora professora Noeli Sellin pela revisão e importantes contribuições.

Aos amigos Francisco Santos, José Simões, Caurê Brito, Cezar Santos, Daniel Souza, Gilberto Reis, Matheus Fichman, Álvaro da Silva, Willian Ghidolin, Gabriel Scheffer, Dimmy Barreto e Guilherme Silva, por terem contribuído para a montagem da bancada de ensaios desenvolvida para a coleta dos dados experimentais dessa pesquisa.

Por último, agradeço à Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE, aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos e os demais funcionários da instituição pela ajuda e companheirismo e, ao governo brasileiro, que por meio da CAPES me concedeu apoio financeiro via bolsa de estudos, incentivando a pesquisa científica no Brasil.

RESUMO

Desenvolvimento e validação de uma bancada de testes para análise de coletores solares para aquecimento de água quando associados em série ou em paralelo.

Esse trabalho tem como tema a eficiência energética que nos dias de hoje compõe o conjunto das principais ações e desafios dos homens na busca pelo atingimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e melhoria da qualidade de vida das pessoas no Brasil e no mundo. Neste contexto, dentre as necessidades do dia a dia das pessoas, está a demanda de água quente que, para sua obtenção, exige um consumo significativo de energia. Das opções existentes no mercado para redução deste consumo de energia que torne o processo de aquecimento da água mais sustentável, têm-se a energia solar como uma excelente alternativa. No entanto, para os sistemas de aquecimento solares disponíveis no mercado, dentre os inúmeros trabalhos de pesquisa realizados, verificou-se que na literatura inexistem estudos abrangentes que demonstrem a influência do arranjo de múltiplos coletores na eficiência do sistema quando estes estão associados em série ou em paralelo. Visando ampliar o conhecimento nessa área, esse trabalho teve por objetivo identificar eventuais variações no desempenho de sistemas solares em termos de volume de água quente produzida, considerando-se coletores solares associados em série ou em paralelo. Para o desenvolvimento desta pesquisa, foi realizado um levantamento bibliográfico para a construção de um referencial teórico e verificação do estado da arte nesta área do conhecimento, bem como um estudo experimental para possibilitar a coleta e análise dos dados. Para a parte experimental da pesquisa foi elaborado o projeto e a montagem de uma bancada de testes que contempla a interligação de coletores solares em série e em paralelo. Para acionamento e controle dos equipamentos, realização dos ensaios e aquisição de dados, desenvolveu-se também um sistema de automação. Após determinar a orientação e a inclinação ótima dos coletores com base nas coordenadas de geoposicionamento do local de instalação da bancada, determinou-se a vazão de água dos circuitos para realização dos estudos com base na norma NBR 15747-2. Após a calibração do sistema e a realização de seis ensaios sob as mesmas condições de irradiação solar, verificou-se que o circuito em série aqueceu à temperatura de ajuste 2.518 litros de água, ao passo que, o circuito em paralelo, aqueceu 2.276 litros. Portanto, a análise dos dados coletados apontou como resultado principal que o arranjo dos coletores em série confere ao sistema em estudo uma performance 10,6% melhor do que o arranjo em paralelo quando avalia-se o volume total de água aquecida produzida. Estes resultados indicam um bom potencial para melhoria da performance desses sistemas com consequente redução do consumo de energia de origem não sustentável.

Palavras-chave: Energia solar; aquecimento de água; coletor solar; sistema ativo; ligação em série; ligação em paralelo.

ABSTRACT

Development and validation of a test bench for analysis of solar collectors for water heating when associated in series or in parallel.

This work has as its theme energy efficiency, which today makes up the set of the main actions and challenges of men in the pursuit of achieving the Sustainable Development Goals (SDGs) and improving the quality of life of people in Brazil and in the world. In this context, among the daily needs of people, there is the demand for hot water, which, in order to obtain it, requires a significant consumption of energy. Of the existing options on the market to reduce this energy consumption that makes the water heating process more sustainable, solar energy is an excellent alternative. However, for solar heating systems available on the market, among the numerous research works carried out, it was found that in the literature there are no comprehensive studies that demonstrate the influence of the arrangement of multiple collectors on the efficiency of the system when they are associated in series or in parallel. In order to expand knowledge in this area, this work aimed to identify possible variations in the performance of solar systems in terms of volume of hot water produced, considering solar collectors associated in series or in parallel. For the development of this research, a bibliographic survey was carried out for the construction of a theoretical framework and verification of the state of the art in this area of knowledge, as well as an experimental study to enable the collection and analysis of data. For the experimental part of the research, the design and assembly of a test bench was elaborated that includes the interconnection of solar collectors in series and in parallel. For the activation and control of the equipment, testing and data acquisition, an automation system was also developed. After determining the orientation and optimal inclination of the collectors based on the geopositioning coordinates of the bench installation site, the flow of water in the circuits was determined to carry out the studies based on the NBR 15747-2 standard. After calibrating the system and carrying out six tests under the same conditions of solar irradiation, it was found that the series circuit heated 2,518 liters of water at the set temperature, while the parallel circuit heated 2,276 liters. Therefore, the analysis of the collected data showed as the main result that the arrangement of collectors in series gives the system under study a performance 10.6% better than the arrangement in parallel when evaluating the total volume of heated water produced. These results indicate a good potential for improving the performance of these systems with a consequent reduction in energy consumption from non-sustainable sources.

Keywords: Solar energy; water heating; solar collector; active system; series connection; parallel connection.

RESUMEN

Desarrollo y validación de un banco de pruebas para el análisis de colectores solares para calentamiento de agua asociados en serie o en paralelo.

Este trabajo tiene como tema la eficiencia energética, que hoy constituye el conjunto de las principales acciones y desafíos de los hombres en la búsqueda de alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y mejorar la calidad de vida de las personas en Brasil y en el mundo. En este contexto, entre las necesidades diarias de las personas, se encuentra la demanda de agua caliente sanitaria, que para su obtención requiere un importante consumo de energía. De las opciones existentes en el mercado para reducir este consumo energético que hace más sostenible el proceso de calentamiento del agua, la energía solar es una excelente alternativa. No obstante, para los sistemas de aquecimiento solares disponibles en el mercado, dentro de los inúmeros trabajos de investigación realizados, verificóse que en la literatura no existen estudios abarcativos que demuestren la influencia del arreglo de múltiples colectores en la eficiencia del sistema cuando estos están asociados en serie o en paralelo. Con el fin de ampliar el conocimiento en esta área, este trabajo tuvo como objetivo identificar posibles variaciones en el rendimiento de los sistemas solares en términos de volumen de agua caliente producida, considerando colectores solares asociados en serie o en paralelo. Para el desarrollo de esta investigación se realizó un levantamiento bibliográfico para la construcción de un marco teórico y verificación del estado del arte en esta área del conocimiento, así como un estudio experimental para posibilitar la recolección y análisis de datos. Para la parte experimental de la investigación se elaboró el diseño y montaje de un banco de pruebas que contempla la interconexión de colectores solares en serie y en paralelo. Para la activación y control de los equipos, pruebas y adquisición de datos, también se desarrolló un sistema de automatización. Después de determinar la orientación e inclinación óptima de los colectores con base en las coordenadas de geoposicionamiento del sitio de instalación del banco, se determinó el caudal de agua en los circuitos para realizar los estudios con base en la norma NBR 15747-2. Tras calibrar el sistema y realizar seis pruebas en las mismas condiciones de irradiación solar, se comprobó que el circuito serie calentaba 2.518 litros de agua a la temperatura establecida, mientras que el circuito paralelo calentaba 2.276 litros. Por lo tanto, el análisis de los datos recolectados arrojó como principal resultado que el arreglo de colectores en serie le da al sistema en estudio un desempeño 10.6% mejor que el arreglo en paralelo al evaluar el volumen total de agua calentada producida. Estos resultados indican un buen potencial para mejorar el rendimiento de estos sistemas con la consiguiente reducción del consumo de energía procedente de fuentes no sostenibles.

Palabras llave: Energía solar; calentamiento de agua; Batería solar; sistema activo; conexión en serie; conexión paralela.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Potencial energético global	21
Figura 2 – Exemplo de selo de eficiência energética para coletores solares	23
Figura 3 – Tipos de coletores solares para aquecimento de água comercializados no Brasil.....	23
Figura 4 – Circulação de água pelos coletores solares de placa plana e de tubo à vácuo	24
Figura 5 – Circulação de água pelos coletores solares para piscina.....	25
Figura 6 – Ranking dos países que mais investiram em eficiência energética em 2018.....	29
Figura 7 – Evolução dos investimentos em PD&D em eficiência energética no Brasil	29
Figura 8 – Matriz energética brasileira em 2020.....	30
Figura 9 – Matriz elétrica brasileira em 2020.....	31
Figura 10 – Participação do consumo de energia elétrica por setor.....	31
Figura 11 – Demanda de eletricidade por edificações.....	32
Figura 12 – Distribuição do consumo de energia elétrica residencial.....	32
Figura 13 – Componentes da irradiância solar	35
Figura 14 – Aplicações da energia solar	36
Figura 15 – Posição da Terra em relação ao movimento de translação.....	37
Figura 16 – Espectro da radiação solar incluindo um detalhamento da faixa visível humana.....	37
Figura 17 – Variação da duração dos dias conforme a latitude.....	38
Figura 18 – Incidência dos raios solares na Terra.....	39
Figura 19 – Composição do SAS	40
Figura 20 – Sistema de aquecimento passivo direto com circulação natural de água	42
Figura 21 – Sistema de aquecimento direto com circulação forçada de água	42
Figura 22 – A eficiência dos tipos de coletores solar.....	44
Figura 23 – Módulos dos conjuntos de coletores solares: (a) externos e (b) internos	46
Figura 24 – Interligação série e paralelo de coletores solares.....	46
Figura 25 – Bancada de ensaios	47

Figura 26 – Energia diária produzida pelo coletor de tubo a vácuo.....	48
Figura 27 – Irradiação sobre um coletor plano com área de 1,6m ² em diferentes ângulos de inclinação para a cidade de Porto Alegre	48
Figura 28 – Coletor solar plano construído em material termoplástico	49
Figura 29 – Potência térmica em relação a vazão mássica	50
Figura 30 – Esquema dos sistemas solares de aquecimento Simples (a) Acoplado (b)	51
Figura 31 – Local de instalação da bancada de ensaios no campus da Univille	54
Figura 32 – Fluxograma do desenvolvimento experimental	54
Figura 33 – Planilha para cálculo dos pontos de apoio para alteração da inclinação da Caixa.....	58
Figura 34 – Caixa A1 para sustentação dos coletores	58
Figura 35 – Peça A1a: Fundo da caixa	59
Figura 36 – Peça A1b1: Contornos laterais direita e esquerda	59
Figura 37 – Peça A1b2: Contorno inferior	60
Figura 38 – Peça A1b3: Contorno superior	60
Figura 39 – Peça A1c: Detalhes do suporte de sustentação/ajuste de inclinação....	60
Figura 40 – Peça A1d: Suporte de sustentação do coletor na caixa	61
Figura 41 – Base de sustentação da caixa do coletor	62
Figura 42 – Peça A2a: Sapatas da base de sustentação da caixa do coletor	62
Figura 43 – Fundação da base de sustentação da caixa do coletor.....	63
Figura 44 – Peça A2b: Base fixa de sustentação da caixa do coletor	63
Figura 45 – Peça A2c: Travessa frontal da base de sustentação da caixa do coletor	64
Figura 46 – Peça A2d: Travessa lateral da base de sustentação da caixa do coletor	64
Figura 47 – Peça A2e: Travessa inclinada da base de sustentação da caixa do coletor.....	64
Figura 48 – Peça A2f1: Base com furos da base de sustentação da caixa do coletor	65
Figura 49 – Peça A2f2: Base ajustável da base de sustentação da caixa do coletor	65
Figura 50 – Estrutura do sistema de automação e aquisição de dados	67
Figura 51 – Projeto da ligação hidráulica do circuito em série.....	69

Figura 52 – Projeto da ligação hidráulica do circuito em paralelo.....	69
Figura 53 – Filtro Y DN15	70
Figura 54 – Termo resistência WJE	70
Figura 55 – Hidrômetro Honeywell S110 EPW 2,5-15-110	71
Figura 56 – Válvula solenoide fluir K-2W160-15.....	71
Figura 57 – Registro de gaveta de ½”	72
Figura 58 – Medidor de vazão Louchen ZM	72
Figura 59 – Pressostato Danfoss KPI 35.....	73
Figura 60 – Módulo de automação e telemetria remota DMI A663CA 168ES.....	74
Figura 61 – IHM para o acionamento manual e automático	75
Figura 62 – Projeto da Caixa de Ligação do circuito em série.....	76
Figura 63 – Projeto da Caixa de Ligação do circuito em paralelo.....	76
Figura 64 – Bomba Texius modelo TBHWD-BR 100 W	77
Figura 65 – Ensaio de calibração dos medidores de vazão	77
Figura 66 – Caixa para sustentação dos coletores finalizada	79
Figura 67 – Conjunto da base montada	79
Figura 68 – Conjunto montado base e caixa de sustentação dos coletores.....	80
Figura 69 – Caixa de comunicação e acionamentos da IHM com os acionamentos	81
Figura 70 – Conectores de comunicação da caixa do DMI	81
Figura 71 – Conectores de comunicação e acionamento das caixas dos circuitos ..	82
Figura 72 – Circuito hidráulico do sistema de coletores associados em série.....	83
Figura 73 – Circuito hidráulico do sistema de coletores associados em paralelo.....	83
Figura 74 – Comportamento da temperatura e vazão no circuito em série	84
Figura 75 – Comportamento da temperatura e vazão no circuito em paralelo	85
Figura 76 – Elevação da mangueira de saída de água aquecida do circuito paralelo	86
Figura 77 – Demonstração dos gráficos de temperaturas	88
Figura 78 – Demonstração dos gráficos de volume de água aquecida	89
Figura 79 – Temperaturas de entrada e saída dos circuitos no ensaio 1	91
Figura 80 – Temperaturas de entrada e saída do circuito série no ensaio 1	92
Figura 81 – Temperaturas de entrada e saída do circuito paralelo no ensaio 1	92
Figura 82 – Temperaturas de saída dos circuitos e quantidade de trocas no ensaio 1	92

Figura 83 – Volume de água aquecida e quantidade de trocas do circuito série no ensaio 1	93
Figura 84 – Volume de água aquecida e quantidade de trocas do circuito paralelo no ensaio 1	93
Figura 85 – Temperaturas de entrada e saída dos circuitos no ensaio 2	94
Figura 86 – Temperaturas de entrada e saída do circuito série no ensaio 2	94
Figura 87 – Temperaturas de entrada e saída do circuito paralelo no ensaio 2	94
Figura 88 – Temperaturas de saída dos circuitos e quantidade de trocas no ensaio 2	95
Figura 89 – Volume de água aquecida e quantidade de trocas do circuito série no ensaio 2	95
Figura 90 – Volume de água aquecida e quantidade de trocas do circuito paralelo no ensaio 2	95
Figura 91 – Temperaturas de entrada e saída dos circuitos no ensaio 3	96
Figura 92 – Temperaturas de entrada e saída do circuito série no ensaio 3	96
Figura 93 – Temperaturas de entrada e saída do circuito paralelo no ensaio 3	97
Figura 94 – Temperaturas de saída dos circuitos e quantidade de trocas no ensaio 3	97
Figura 95 – Volume de água aquecida e quantidade de trocas do circuito série no ensaio 3	97
Figura 96 – Volume de água aquecida e quantidade de trocas do circuito paralelo no ensaio 3	97
Figura 97 – Temperaturas de entrada e saída dos circuitos no ensaio 4	98
Figura 98 – Temperaturas de entrada e saída do circuito série no ensaio 4	99
Figura 99 – Temperaturas de entrada e saída do circuito paralelo no ensaio 4	99
Figura 100 – Temperaturas de saída dos circuitos e quantidade de trocas no ensaio 4	99
Figura 101 – Volume de água aquecida e quantidade de trocas do circuito série no ensaio 4	99
Figura 102 – Volume de água aquecida e quantidade de trocas do circuito paralelo no ensaio 4	100
Figura 103 – Temperaturas de entrada e saída dos circuitos no ensaio 5	101
Figura 104 – Temperaturas de entrada e saída do circuito série no ensaio 5	101
Figura 105 – Temperaturas de entrada e saída do circuito paralelo no ensaio 5 ...	101

Figura 106 – Temperaturas de saída dos circuitos e quantidade de trocas no ensaio 5.....	102
Figura 107 – Volume de água aquecida e quantidade de trocas do circuito série no ensaio 5.....	102
Figura 108 – Volume de água aquecida e quantidade de trocas do circuito paralelo no ensaio 5.....	102
Figura 109 – Temperaturas de entrada e saída dos circuitos no ensaio 6.....	103
Figura 110 – Temperaturas de entrada e saída do circuito série no ensaio 6.....	103
Figura 111 – Temperaturas de entrada e saída do circuito paralelo no ensaio 6...	104
Figura 112 – Temperaturas de saída dos circuitos e quantidade de trocas no ensaio 6.....	104
Figura 113 – Volume de água aquecida e quantidade de trocas do circuito série no ensaio 6.....	104
Figura 114 – Volume de água aquecida e quantidade de trocas do circuito paralelo no ensaio 6.....	104
Figura 115 – Volume de água aquecida e eficiência por ensaio	107
Figura 116 – Média do volume de água aquecida e quantidade de trocas por troca	108
Figura 117 – Tempo médio por troca e tempo total de operação	109
Figura 118 – Vazão média por ensaio.....	110

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Tipos de coletores solares.....	43
Quadro 2 – Classificação de coletores solares.....	44
Quadro 3 – Descrição dos componentes dos circuitos.....	68
Quadro 4 – Dados dos ensaios realizados ordenado por data.....	87
Quadro 5 – Dados dos ensaios realizados ordenado por temperatura de reaquecimento	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados principais do sol	36
Tabela 2 – Eficiência térmica acumulada	51
Tabela 3 – Resultados dos ensaios para o medidor de vazão para o circuito em série	78
Tabela 4 – Resultados dos ensaios para o medidor de vazão para o circuito em paralelo	78
Tabela 5 – Formato da Tabela para inserção dos dados coletados	90
Tabela 6 – Dados detalhados do ensaio 1	93
Tabela 7 – Dados detalhados do ensaio 2	95
Tabela 8 – Dados detalhados do ensaio 3	98
Tabela 9 – Dados detalhados do ensaio 4	100
Tabela 10 – Dados detalhados do ensaio 5	103
Tabela 11 – Dados detalhados do ensaio 6	105
Tabela 12 – Resultados dos ensaios para os gráficos de análise	106

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

GW – Giga Watts

IHM - Interface Homem Máquina

NBR - Norma brasileira

mA - Miliampere

PMEE – Produção Mensal Específica de energia

SAS - Sistema de Aquecimento Solar

T_e - Temperatura de entrada

T_s - Temperatura de saída

T_t - Temperatura de troca de coletores em série

TW - Tera Watts

V_e - Vazão de entrada

V_s - Vazão de saída

V_{ca} - Tensão de corrente alternada

V_{cc} - Tensão de corrente contínua

°C - Graus Celsius

PD&D (*Product Design & Development* – Projeto de Produtos e Desenvolvimento)

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	21
1. OBJETIVOS	27
1.1 Objetivo geral.....	27
1.2 Objetivos específicos	27
2. REVISÃO DA LITERATURA	28
2.1 Eficiência energética.....	28
2.2 Energia solar.....	33
2.2.1 Sistema de aquecimento solar (SAS)	39
2.2.2 Coletores solares.....	42
2.3 Influência de diferentes configurações na interface de ligação dos coletores na performance de sistemas de aquecimento de água solares.....	47
3. MATERIAIS E MÉTODOS	53
3.1 Fase UVA – Planejamento da pesquisa	55
3.1.1 Definição dos ensaios.....	55
3.1.2 Pesquisa e projeto da bancada de ensaios	57
3.1.3 Pesquisa, aquisição e calibração dos componentes e dos instrumentos de controle e aquisição de dados	70
3.1.4 Preparação e montagem da bancada de ensaios	78
3.2 Fase UVB – Execução dos ensaios.....	84
3.2.1 Ajustes operacionais e <i>setup</i>	84
3.2.2 Ensaios iniciais para ajustes funcionais da bancada	86
3.2.3 Execução dos ensaios.....	87
3.3 Fase UVC – Tratamento dos dados e análise dos resultados	87
3.3.1 Organização dos dados coletados.....	87
3.3.2 Tabulação e tratamento dos dados coletados	89
3.3.3 Análise dos resultados e conclusões.....	91
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	106
4.1 Comparação do volume total de água aquecida e eficiência dos circuitos ...	107
4.2 Comparação da média do volume de água aquecida e da quantidade de trocas.....	108
4.3 Comparação do tempo médio por troca e do tempo total de operação	109
4.4 Comparação da vazão.....	110
4.5 Tópicos relevantes.....	111
5. CONCLUSÕES	113
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	116

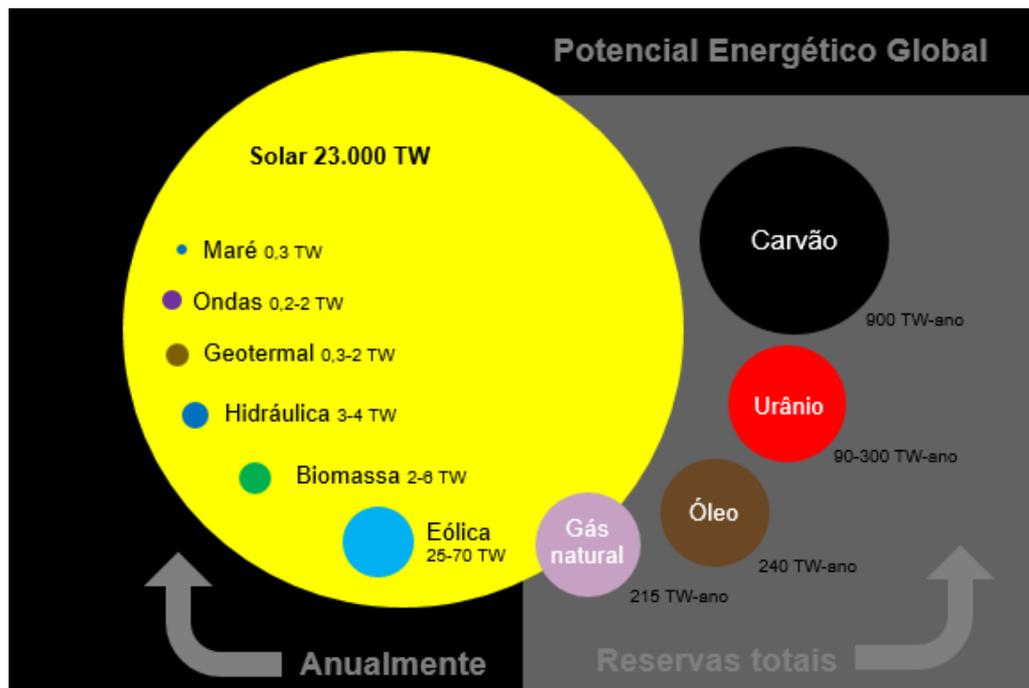
REFERÊNCIAS	118
APÊNDICES	122
ANEXOS	129

INTRODUÇÃO

O aproveitamento da energia solar tem despertado o interesse mundial na busca de alternativas para substituir as fontes de energias convencionais, visto que a radiação solar é renovável e abundante em toda superfície terrestre.

Conforme mostrado na Figura 1, o potencial da energia solar é muito superior aos potenciais das outras fontes normalmente exploradas. Essa energia pode ser convertida em energia elétrica fotovoltaica e termosolar, para ser utilizada na agroindústria, nas residências e em muitas outras aplicações. Devido a isso, a energia solar deveria ser melhor conhecida pela humanidade por toda sua extensão e qualidade, afim de que se possa extrair ao máximo seus benefícios (COLE e PEREIRA, 1998).

Figura 1 – Potencial energético global



Fonte: Traduzido de IEA (2014).

Segundo Pereira *et al.* (2017), apesar da fonte de energia solar ser instável, ou seja, existe uma variação do seu fornecimento devido às condições meteorológicas locais, bem como dos fatores astronômicos do movimento orbital da Terra, o devido conhecimento sobre a mesma, incide como fator determinante para o sucesso no desenvolvimento de novos projetos. Tal avaliação depende excepcionalmente de três

componentes, a distribuição espacial, sua variabilidade temporal e as incertezas associadas às duas componentes.

Dentre as diversas aplicações da energia solar, o aquecimento de água para fins residenciais é um dos mais difundidos.

Segundo Borges (2000), a complexidade de projetar um sistema de aquecimento solar de água dar-se-á devido ao tipo de demanda, às características climáticas do local, ao perfil do investidor e das diversas condições econômicas. Porém, com os altos custos dos insumos energéticos, a preocupação com o meio ambiente e com a melhoria da disseminação das tecnologias existentes em termos de sistemas de aquecimento solar de água, além dos subsídios fiscais, estão ocorrendo mudanças no perfil do consumidor dessa fonte de energia.

Comercialmente, a especificação de um sistema de aquecimento solar residencial é realizada por meio de consulta a tabelas que indicam o número de placas coletoras recomendadas em função do tamanho da família e do número de pontos de consumo de água quente (BORGES, 2000). A potencialidade da energia solar disponível do local, bem como a eficiência dos coletores solares a serem aplicados, são fatores determinantes para definição mais precisa da quantidade de placas necessárias para atender as necessidades da instalação.

Cruz (2016), afirma que se faz necessário um estudo detalhado e refinado de longo prazo sobre a implementação da energia térmica solar para o aquecimento de água nas residências brasileiras, enfatizando a contribuição que isto traria no âmbito do planejamento energético nacional.

Parte dos coletores solares comercializados no Brasil possuem o selo PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica)¹. Estes coletores são testados e certificados com um selo do INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia)² em relação a algumas características dos coletores, inclusive a sua eficiência energética. Atualmente, existem coletores solares para aquecimento de água de piscinas que foram certificados com o Selo A o que demonstra que sua eficiência está no mesmo patamar dos coletores solares de tubo

¹ Programa de governo, coordenado pelo Ministério de Minas e Energia – MME, instituído em 30 de dezembro de 1985, pela Portaria Interministerial nº 1.877, para promover o uso eficiente da energia elétrica e combater o seu desperdício. (<http://www.procelinfo.com.br>). Acesso em 12/01/2021.

² O INMETRO foi criado pela Lei 5.966, de 11 de dezembro de 1973 para substituir o então Instituto Nacional de Pesos e Medidas (INPM) e ampliar significativamente o seu raio de atuação a serviço da sociedade brasileira. (<https://www.gov.br/inmetro/pt-br/aceso-a-informacao/institucional>). Acesso em 12/01/2021.

à vácuo. Na Figura 2 pode ser visualizado um exemplo de selo PROCEL de coletores solares.

Figura 2 – Exemplo de selo de eficiência energética para coletores solares



Fonte: CLIMA (2022).

Comercialmente, no Brasil, o mais comum é a oferta de três tipos de coletores solares mais utilizados para o aquecimento de água para uso residencial. A Figura 3 mostra uma vista plana da superfície coletora desses modelos.

Figura 3 – Tipos de coletores solares para aquecimento de água comercializados no Brasil



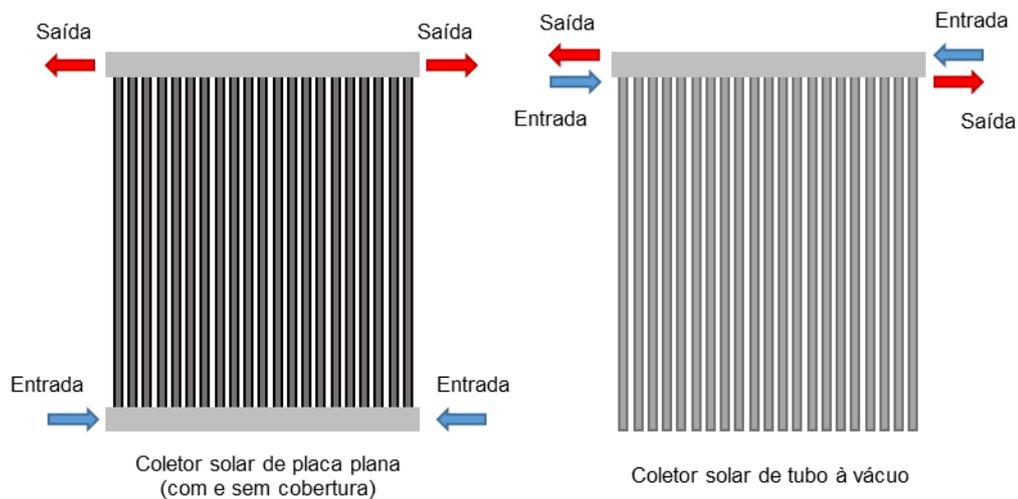
Fonte: Autor (2022).

Os coletores solares utilizados em sistemas para o aquecimento de água são os componentes responsáveis pela absorção da radiação solar, na medida que são

projetados de modo que, uma vez, devidamente instalados, sofram um aquecimento em sua superfície e, assim, transfiram o calor absorvido para a água que circula pelo seu interior. Para que haja a circulação de água pelo interior dos coletores solares, estes possuem uma entrada para água fria e uma saída de água aquecida, porém, a forma como se dá a circulação de água dentro dos coletores solares difere de acordo com o seu tipo.

Os coletores solares de placa plana e de tubo à vácuo possuem conceitos de circulação de água semelhantes. No seu interior a circulação de água é subdividida, fazendo com que haja uma distribuição no fluxo de água através de tubos individualizados, conforme pode ser visto na Figura 4.

Figura 4 – Circulação de água pelos coletores solares de placa plana e de tubo à vácuo

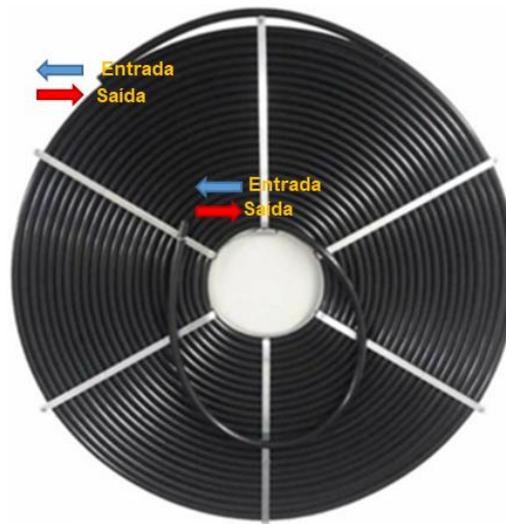


Fonte: Autor (2022).

Os coletores de placa plana possuem duas entradas e duas saídas, afim de que se possa optar pelo lado direito ou lado esquerdo conforme a necessidade do projeto, adotando-se as entradas na parte inferior e as saídas na parte superior do coletor. Os coletores de tubo à vácuo possuem apenas uma entrada e uma saída na parte superior, porém, pode-se optar em utilizar a entrada ou saída para ambos os lados, como nos coletores de placa plana.

A circulação de água nos coletores para aquecimento de água de piscinas ocorre de forma diferente em comparação aos coletores anteriormente citados, eles possuem apenas uma entrada e uma saída (ver Figura 5), podendo ser invertidas de acordo com a necessidade do projeto.

Figura 5 – Circulação de água pelos coletores solares para piscina



Fonte: Autor (2022).

O coletor solar para aquecimento de água de piscinas possui uma característica diferente dos demais, uma vez que a água que entra no coletor percorre todo o circuito hidráulico tubular sem se dividir, proporcionando assim, uma condição favorável para a realização dos estudos previstos nesse projeto de pesquisa, uma vez que se objetiva analisar seu comportamento quando interligados em série ou em paralelo.

Como somente em operação de modo forçado tem-se o efetivo controle da vazão, de acordo com Kalogirou (2016), os resultados obtidos por ensaios para um único coletor não podem ser estendidos diretamente para uma associação de N coletores em série, caso a vazão seja a mesma que a utilizada no ensaio de um único coletor. Logo, se N coletores do mesmo tipo estiverem interligados em série e a vazão for N vezes maior em relação a um único coletor, os dados obtidos de um único coletor poderão ser aplicados para N coletores.

Nesse contexto, surge o problema de pesquisa que é a inexistência de estudos abrangentes que demonstrem se há influência significativa do tipo de arranjo de múltiplos coletores associados em série ou em paralelo, na performance global de um sistema de aquecimento de água, operando com circulação forçada e vazão constante de água.

Portanto, este trabalho de pesquisa, tem por objetivo identificar eventuais variações no desempenho de sistemas de aquecimento de água de múltiplos coletores quando associados em série ou em paralelo.

O estudo teve foco apenas em sistemas de captação de energia solar desenvolvidos para aquecimento de água para piscinas, devido à proposta de se utilizar o conhecimento gerado a partir do mesmo no desenvolvimento de meios alternativos e de baixo custo para aquecimento ou preaquecimento de água para diversas aplicações.

Além dessa Introdução, esta dissertação apresenta no capítulo 1 o objetivo geral da pesquisa, bem como os objetivos específicos a serem alcançados. No capítulo 2 é apresentada uma revisão da literatura dividida em tópicos aderentes ao tema e ao problema de pesquisa. Já no capítulo 3 é apresentado o fluxo metodológico e os respectivos métodos e materiais utilizados em cada etapa do desenvolvimento dos trabalhos. No capítulo 4 são apresentados os resultados alcançados e uma discussão crítica sobre os mesmos. Por fim, o capítulo 5 apresenta as conclusões acerca do alcance dos objetivos, as dificuldades encontradas, bem como as oportunidades que surgiram no decorrer do desenvolvimento deste trabalho que são apresentadas sob a forma de sugestões para trabalhos futuros.

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo geral

Identificar eventuais variações no desempenho de sistemas solares de piscinas para o aquecimento de água em termos de volume de água quente produzida, considerando-se múltiplos coletores quando associados em série ou em paralelo.

1.2 Objetivos específicos

- a) Construir um referencial teórico capaz de suprir as necessidades em termos de conhecimentos específicos relacionados ao tema e ao problema de pesquisa, bem como identificar na literatura qualificada estudos preliminarmente realizados que possam agregar conhecimento para o desenvolvimento do trabalho;
- b) Planejar a realização da pesquisa no que se refere ao levantamento dos requisitos metodológicos necessários para cada fase e etapa estabelecidas;
- c) Projetar uma bancada de testes tecnicamente robusta que apresente boa estabilidade estrutural, confiabilidade, repetibilidade e resolução adequadas para a coleta dos dados;
- d) Identificar um local para a montagem da bancada de testes ao ar livre que possibilite o seu posicionamento adequado em relação à trajetória solar e contenha a infraestrutura necessária para instalação e realização dos ensaios;
- e) Avaliar os resultados alcançados e o conhecimento gerado nesta pesquisa na perspectiva da sua aplicação para a definição do arranjo mais adequado de coletores solares para sistemas residenciais que consideram o preaquecimento de água.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Eficiência energética

Segundo o dicionário Michaelis (2022), energia é a capacidade que um corpo, um sistema de corpos ou uma substância tem de realizar trabalho, entendendo-se por trabalho a deslocação do ponto de aplicação de uma força. Eficiência é a capacidade de realizar bem um trabalho ou desempenhar adequadamente uma função.

O conceito de desenvolvimento sustentável é dependente da relação entre a sociedade e o meio ambiente, visando sempre o equilíbrio entre as dimensões social, econômica e ambiental. Um dos fatores principais para o desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento de tecnologias de conversão de energia e o aproveitamento dos recursos energéticos naturais para a sua geração. O aumento da eficiência energética e a sustentabilidade em sua produção, gera um desenvolvimento com redução ou até mesmo a eliminação dos impactos ambientais (PEREIRA *et al.*, 2017).

O princípio de se fazer mais com menos está levando a humanidade a utilizar os recursos naturais de forma mais eficiente. No Brasil, tem-se o Selo Procel³, a partir do qual o consumidor tem a opção de escolher qual a eficiência energética dos equipamentos que pretende adquirir, visando a oportunidade de comprar equipamentos que irão consumir menos energia, adotando a eficiência energética em sua residência. A luz de LED é um exemplo dessa mudança, pois uma lâmpada de LED chega a ter uma economia de 90% no consumo de energia quando comparada com uma lâmpada convencional (ECOIA, 2019).

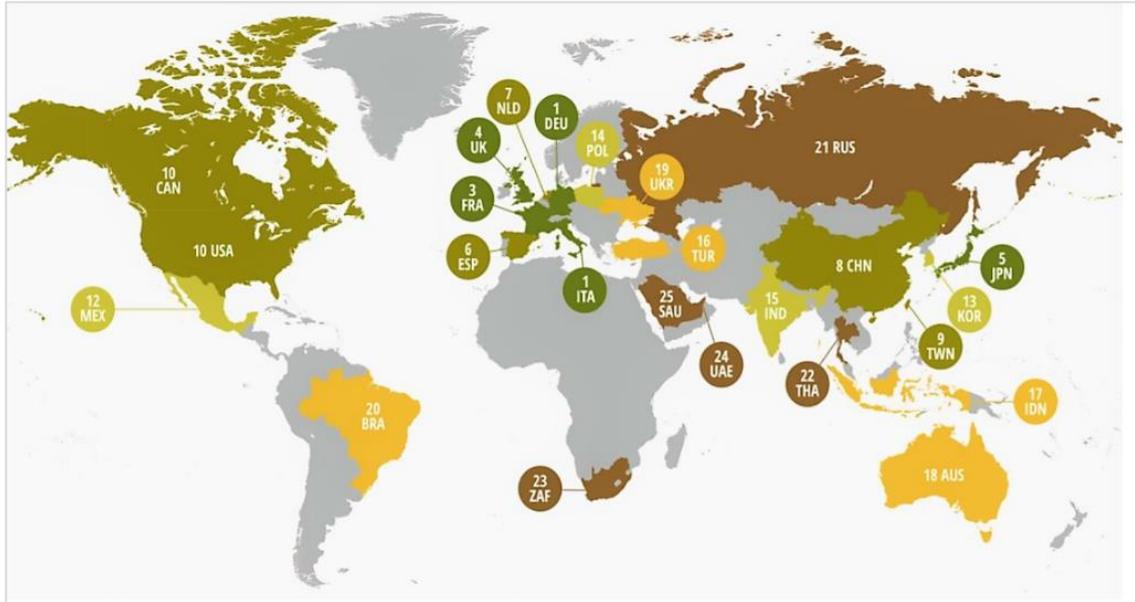
Segundo Ecoa (2018), no Brasil há um mercado de US\$ 260 bilhões disponíveis para diversas formas de ações que visam a utilização da energia de forma muito mais eficiente, pois, tomando os dados de 2016, ano que bateu o recorde na geração de energia, o Brasil desperdiçou no ano o equivalente a meia Usina de Itaipu.

Em 2018, no *ranking* publicado pelo (*The 2018 International Energy Efficiency Scorecard*), dentre os 25 países analisados que mais investiram em eficiência energética, o Brasil ocupou a 20^a posição, ficando atrás dos países da Europa e

³ Programa do Governo Federal executado pela Eletrobrás através de um Decreto Presidencial, onde a parceria junto ao Inmetro, associações de fabricantes, pesquisadores de universidades e laboratórios, visando a busca de equipamentos cada vez mais eficientes, através de ensaios realizados em laboratórios indicados pela Eletrobrás.

América do Norte, e dos países China, Japão, Korea, Taiwan, Índia, Austrália, dentre outros (ECOА, 2018).

Figura 6 – Ranking dos países que mais investiram em eficiência energética em 2018



Fonte: ECOА (2018).

Mesmo o Brasil estando na 20ª posição, segundo EPE (2021), o país vem em um crescente em relação aos investimentos em PD&D (*Product Design & Development* – Projeto de Produtos e Desenvolvimento) em eficiência energética. Em 2013, o país investiu 141 milhões de reais, tendo um recuo em 2015, investindo 122 milhões de reais, mas desde 2015, o país só aumentou os investimentos, chegando em 2018 ao valor de 236 milhões de reais, conforme a Figura 7.

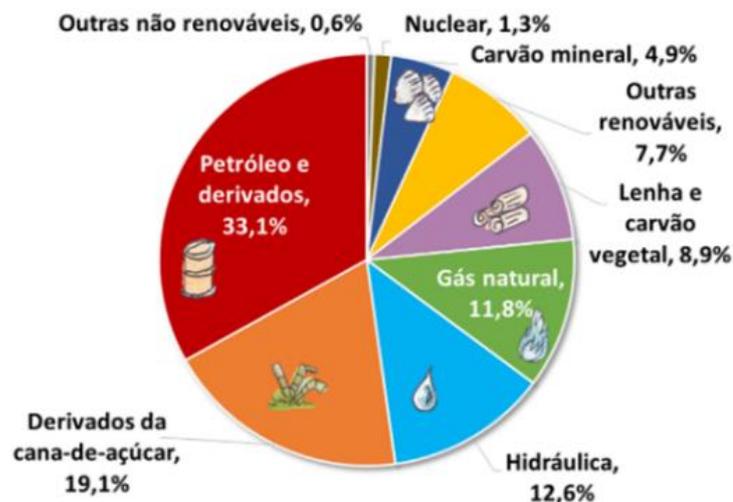
Figura 7 – Evolução dos investimentos em PD&D em eficiência energética no Brasil



Fonte: EPE (2021).

Quando se fala em eficiência energética, refere-se à matriz energética, ou seja, as fontes que são utilizadas para gerar a energia para preparar refeições, movimentar os veículos e inclusive a geração da eletricidade. Logo, pode-se considerar que a matriz elétrica é uma das formas de geração de energia dentro da matriz energética. Na Figura 8, pode-se observar a matriz energética no Brasil no ano de 2020.

Figura 8 – Matriz energética brasileira em 2020



Fonte: EPE (2021).

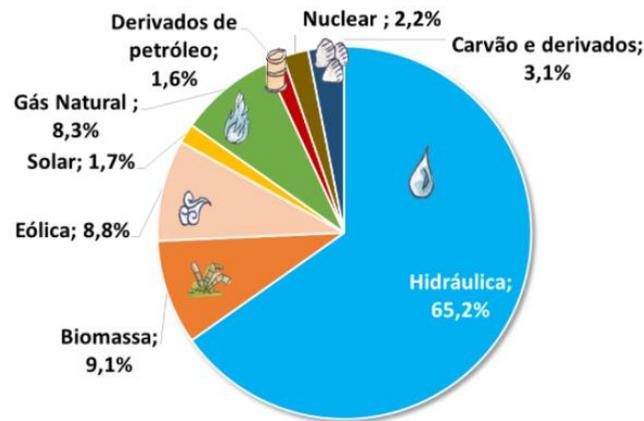
Observa-se na Figura 8 que mais da metade da matriz energética no Brasil ainda provém de fontes não renováveis, petróleo e derivados, gás natural e carvão mineral, totalizando 51,7%. Contudo, duas fontes renováveis têm grande participação na geração da energia, sendo elas a dos derivados da cana-de-açúcar, com 19,1%, e da hidráulica, com 12,6%, que juntas representam quase 1/3 do total da matriz.

A matriz energética brasileira é composta predominantemente por fontes não renováveis quando comparada com a matriz elétrica, pois apenas 15,2% do total de energia elétrica gerada no país é oriunda de fontes não renováveis. As fontes renováveis são responsáveis por 84,8% do total de energia produzida, tendo um grande destaque a Hidráulica com 65,2%, ficando em segundo lugar a biomassa com 9,1% e em terceiro a eólica, com 8,8%, como pode ser observado na Figura 9.

Segundo o Balanço Energético Nacional de 2019, o consumo total da energia elétrica no Brasil em 2018 foi de 535.403 GWh, sendo que o setor industrial foi responsável pelo maior consumo, 37,5% e o setor residencial vem na sequência com

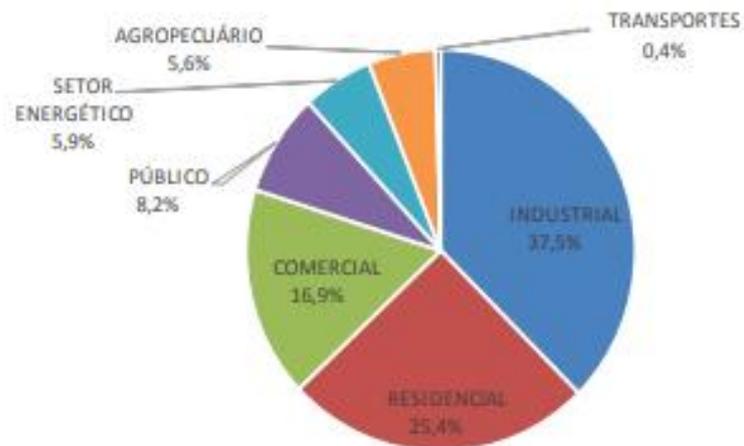
25,4%, representando 136.217 GWh (EPE, 2019), conforme pode ser visualizado na Figura 10.

Figura 9 – Matriz elétrica brasileira em 2020



Fonte: EPE (2021).

Figura 10 – Participação do consumo de energia elétrica por setor



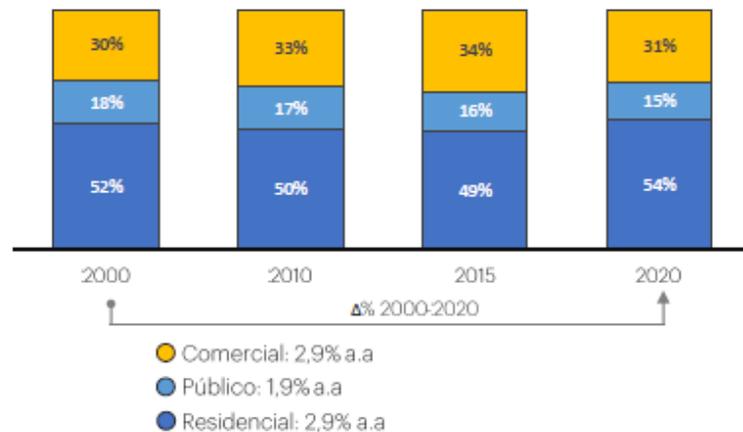
Fonte: EPE (2019).

As edificações são responsáveis pelo consumo de 50,5% do total da energia elétrica produzida no Brasil, sendo 25,4% do setor residencial, 16,9% do setor comercial e 8,2% do setor público.

A demanda da energia elétrica pelas edificações no Brasil entre os anos 2000 a 2020, está representada na Figura 11, a partir da qual observa-se que as residências foram responsáveis pelo consumo de 54% com uma taxa de crescimento anual de 2,9%. Devido às residências serem responsáveis por mais da metade do consumo da energia gerada entre as edificações, é nesse setor que está o maior potencial de

ganhos em eficiência energética. O selo PROCEL foi responsável por evitar o consumo de 29,2 GWh em edificações construídas entre 2015 e 2020 (EPE 2021).

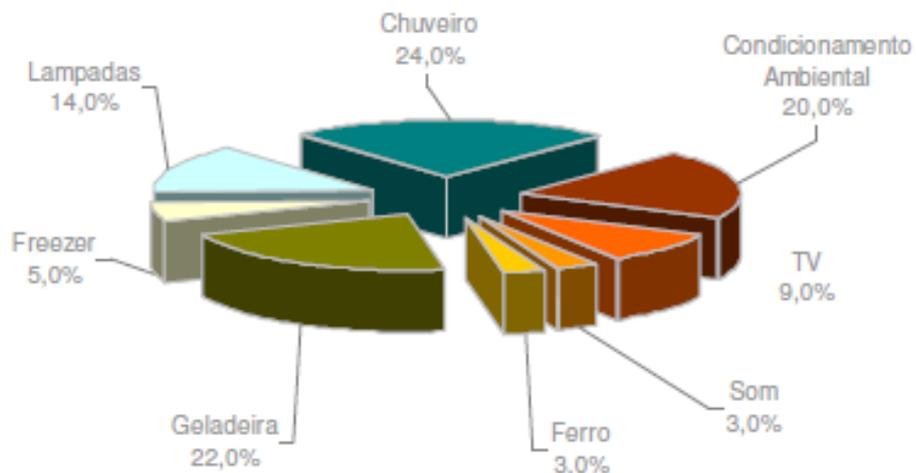
Figura 11 – Demanda de eletricidade por edificações



Fonte: EPE (2021).

Dados do PROCEL (2008), mostram que o chuveiro é um dos grandes vilões no consumo de energia elétrica nos domicílios brasileiros. A Figura 12, está apresentado um gráfico da distribuição média da carga consumida nas residências brasileiras, onde observa-se que o chuveiro é responsável por 24% do total de energia.

Figura 12 – Distribuição do consumo de energia elétrica residencial



Fonte: PROCEL (2008).

Segundo Vasconcellos e Limberger (2012), a busca de novas oportunidades de utilização de variadas fontes de energia para o aquecimento de água, pode gerar

benefícios para os consumidores, para as concessionárias, para o governo e também para o meio ambiente.

Em estudos realizados por Souza (2021), a utilização de um sistema híbrido para o aquecimento de água para o banho, contendo coletores solares e outras duas fontes de energia auxiliares, bomba de calor e o próprio chuveiro elétrico, gerou resultados que evidenciam que um sistema híbrido para o aquecimento de água para o banho pode proporcionar uma economia no consumo de energia de 40% em meses mais frio e de até 68% nos meses mais quentes. Este estudo tomou como referência a informação de que banhos confortáveis aos seres humanos requerem água aquecida por volta de 40° C.

Neste sentido, o pré-aquecimento e o armazenamento de um volume maior de água aquecida via sistema solares e, sempre que necessário, associado ao uso automático e simultâneo de um chuveiro elétrico, reduz o consumo global de energia elétrica anual gasta para o aquecimento de água para o banho. Além disso, o armazenamento de água quente a temperaturas mais próximas da temperatura da água da rede pública ou da caixa d'água residencial, ou seja, muito abaixo da temperatura de acúmulo em que os boilers convencionalmente utilizam, tornam os reservatórios para água quente em sistemas híbridos mais eficientes quanto ao isolamento térmico.

Este resultado indicou uma oportunidade efetiva para o aumento da eficiência energética do sistema mais utilizado para o aquecimento de água em residências, o chuveiro elétrico, ainda mais que este é apontado como o maior vilão do consumo de energia elétrica em residências.

Os resultados obtidos por Souza (2021), portanto, sugerem a aplicação de um conceito híbrido de aquecimento de água residencial, no qual um pré-aquecimento da água a uma determinada temperatura, faz com que o sistema demande um consumo menor de energia elétrica para atingir a temperatura ideal para o banho, resultando em uma significativa redução anual de consumo de energia elétrica.

2.2 Energia solar

No ano de 1780, o cientista Horace-Bénédict, realizou uma demonstração experimental em que evidenciava os efeitos da energia solar sobre o ar em função da altitude. Com um dispositivo composto por 5 caixas de vidro acopladas uma na outra

e tendo termômetros encaixados nas caixas, Horace teve como objetivo demonstrar o efeito da radiação solar sobre o ar contido nas caixas, através das medições realizadas no cume de montanha e também nos vales. Este estudo é dado como a origem dos coletores solares, bem como da tecnologia solar (LAFAY, 2005).

Angström apresentou em 1924 uma relação linear entre a razão solar global média com o seu respectivo valor num dia completamente claro e a razão entre a duração média diária do brilho solar com a sua máxima duração. Prescott em 1940, com o objetivo de resolver as dificuldades de se obter a radiação em dias claros, propôs o uso da radiação solar no topo da atmosfera, gerando um novo modelo, a equação de Angström-Prescott (LIU *et al.*, 2009b).

As componentes direta e difusa são responsáveis pela irradiação solar (W/m^2) que incide em uma superfície, sendo que a direta é a irradiação que atravessou a atmosfera sem ser espalhada ou absorvida e está numa determinada inclinação. A difusa é a parcela que sofreu o espalhamento da radiação solar e independe da direção que incide sobre uma superfície (Bergman *et al.*, 2015).

As componentes direta e difusa são subdivididas em outras, conforme pode ser observado na Figura 13.

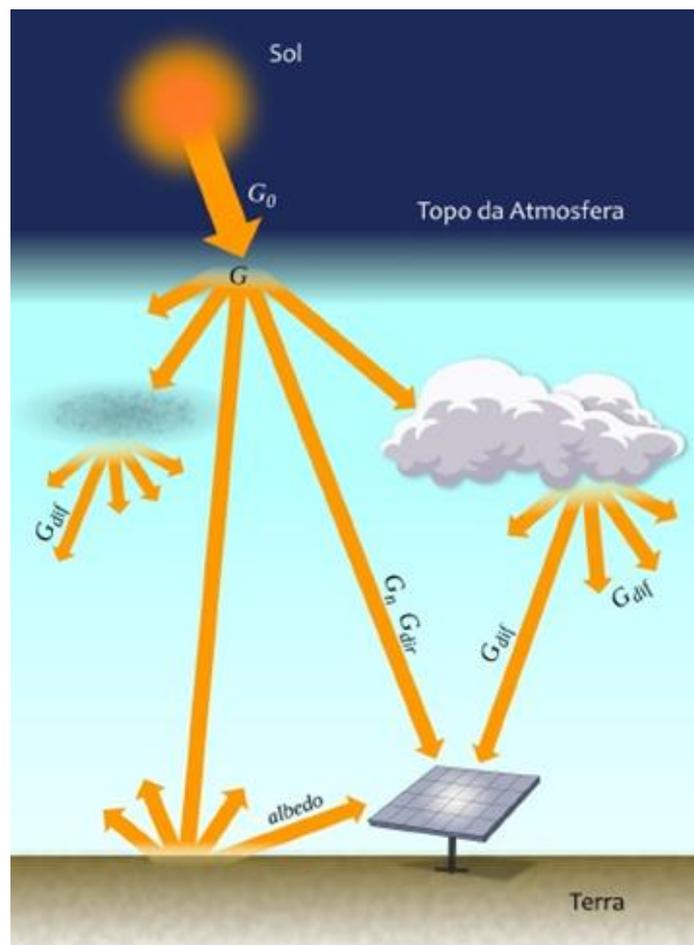
Segundo Pereira *et al.* (2017), essas componentes são as seguintes:

- Irradiância extraterrestre (G_0): é a taxa de energia que incide um plano imaginário na atmosfera;
- Irradiância direta normal (G_n): é a taxa de energia que incide perpendicularmente à superfície terrestre;
- Irradiância difusa horizontal (G_{dif}): é a taxa de energia que incide uma superfície horizontal por unidade de área, após espalhar-se pelas nuvens;
- Irradiância direta horizontal (G_{dir}): é a taxa de energia que incide diretamente numa superfície horizontal;
- Irradiância global horizontal (G): é a taxa de energia total por área que incide numa superfície horizontal;
- Irradiância no plano inclinado (G_i): é a taxa de energia total por área que incide sobre um plano inclinado em relação a latitude do local.

A Figura 13 mostra uma representação gráfica dos diversos tipos de irradiância que chegam até o planeta Terra. Essa energia solar que incide na Terra, pode ser classificada como sendo ativa e passiva, conforme pode-se ver na Figura 13. A energia solar é passiva quando aplicada em projetos arquitetônicos, nesse caso, um

edifício é planejado com uma maior eficiência possível no aspecto energético. Já a energia solar ativa, se caracteriza na conversão dessa fonte de energia em energia elétrica (energia foto voltaica) ou em energia térmica (energia solar térmica). Sendo essa aplicada tanto para o aquecimento de água, bem como para outros fins, como secagem, refrigeração, piscinas, etc. (PEREIRA *et al.*, 2003).

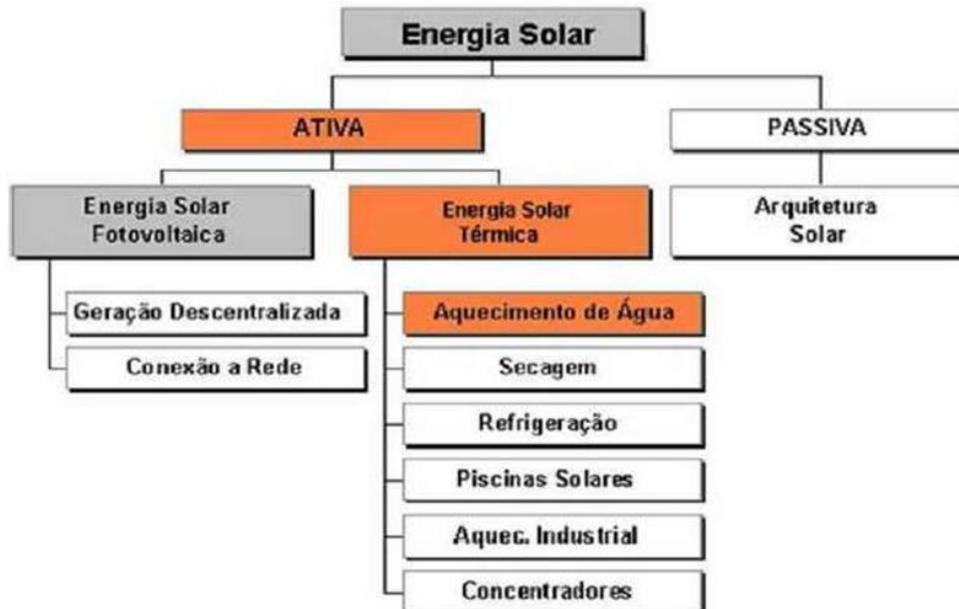
Figura 13 – Componentes da irradiância solar



Fonte: Pereira *et al.* (2017).

A fonte da energia que o sol fornece não é uma fonte renovável, porém, ela é inesgotável quando comparada com o tempo de vida do planeta Terra. Sua energia é gerada através da fusão nuclear dos átomos de Hidrogênio para formar o Hélio, essa taxa de energia que o Sol emite chega a uma potência de $3,86 \times 10^{26} \text{W}$ (PEREIRA *et al.*, 2017).

Na Tabela 1 podem ser observados os principais dados relativos ao sol.

Figura 14 – Aplicações da energia solar

Fonte: Pereira *et al.* (2003).

Tabela 1 – Dados principais do sol

Dado	Valor
Distância média da Terra	$(1,1960 \pm 0,0003) \times 10^8$ km
Raio	$(6,960 \pm 0,001) \times 10^5$ km
Massa	$(1,991 \pm 0,002) \times 10^{33}$ g
Densidade média	$(1,410 \pm 0,002) \times \text{g/cm}^3$
Energia total média produzida	$(3,86 \pm 0,03) \times 10^{33}$ erg/s $\cong 3,86 \times 10^{20}$ MW
Fluxo de energia na superfície	$(6,34 \pm 0,07) \times 10^{10}$ erg/cm ² $\cong 63,4$ MW/m ²
Temperatura superficial	(5.780 ± 50) K

Fonte: COMETTA (1978).

Segundo Cole e Pereira (1998), a estimativa da irradiação solar na superfície, teve como pioneiro o método de Angström e suas variantes, depois vieram os métodos estatísticos baseados em satélite e os baseados em modelos físicos. Os modelos estatísticos fornecem apenas as médias do período analisado, sendo que os modelos físicos fornecem os horários, incorporando qualquer variação climática relevante.

Segundo Nrel (2017), existe uma variação no fornecimento de energia através da radiação solar (irradiância solar), oscilando entre 1.325 W/m² e 1.412 W/m², definindo então a constante solar com o valor médio de 1.366W/m², sendo ele antes da atenuação pela atmosfera. Tal fornecimento dessa fonte de energia está

diretamente relacionado a conceitos astronômicos, sendo um deles a distância entre o Sol e a Terra. Essa distância varia entre $1,47 \times 10^8$ à $1,52 \times 10^8$ quilômetros, isso devido a forma elíptica da trajetória da Terra em torno do Sol, conforme mostrado na Figura 15.

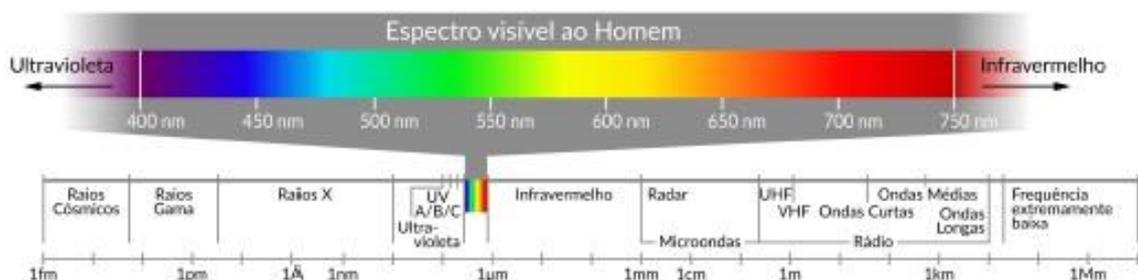
Figura 15 – Posição da Terra em relação ao movimento de translação



Fonte: Adaptado de Pereira *et al.* (2017)

Pereira *et al.* (2017) dizem que por volta de 81% da energia que chega na atmosfera terrestre está dentro da faixa de comprimento de onda que fica entre o visível e vai até o infravermelho, conforme mostrado na Figura 16. Esse intervalo é o responsável pelos processos dinâmicos, químicos e inclusive o processo térmico.

Figura 16 – Espectro da radiação solar incluindo um detalhamento da faixa visível humana



Fonte: Pereira *et al.* (2017).

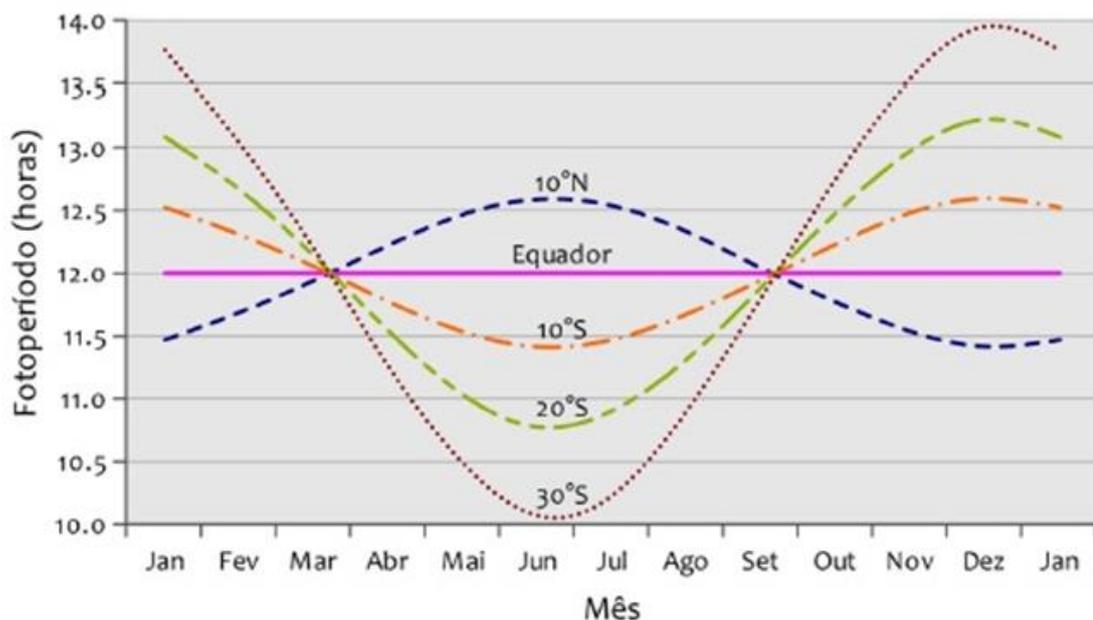
A estrela mais próxima da Terra é o Sol, ele é basicamente composto por matéria gasosa, tendo o hidrogênio como o elemento químico predominante, possui

uma temperatura de 5.777 °K, aproximadamente. O comprimento de onda em sua radiação eletromagnética está entre 0,2 e 25 μm , sendo que a faixa visível está entre 0,38 e 0,78 μm . A variação da intensidade da radiação depende de seu comprimento de onda, e atinge 95% do total da energia solar no intervalo de 0,3 e 2,12 μm (LAFAY, 2005).

Para Pereira *et al.* (2017), a quantidade energia fornecida pelo Sol em qualquer ponto da superfície tem a sua variação temporal devido a dois ciclos: o ciclo diário e o ciclo anual, o ciclo diário está relacionado com o movimento de rotação da Terra, já o ciclo anual é influenciado pela inclinação de 23,45° do eixo axial da Terra em relação ao plano orbital do planeta ao redor do Sol, ou seja, o movimento de translação.

Essa inclinação faz com que num determinado período do ano os dias sejam mais longos em relação à noite, logo, existe a possibilidade de um maior fornecimento da energia solar, e no outro período faz com que os dias sejam mais curtos e as noites mais longas, reduzindo o período de fornecimento dos raios solares. Essa relação de fornecimento está diretamente relacionada com as estações do ano, ocasionadas devido a essa inclinação terrestre. Tal variação é evidenciada conforme apresentado na Figura 17.

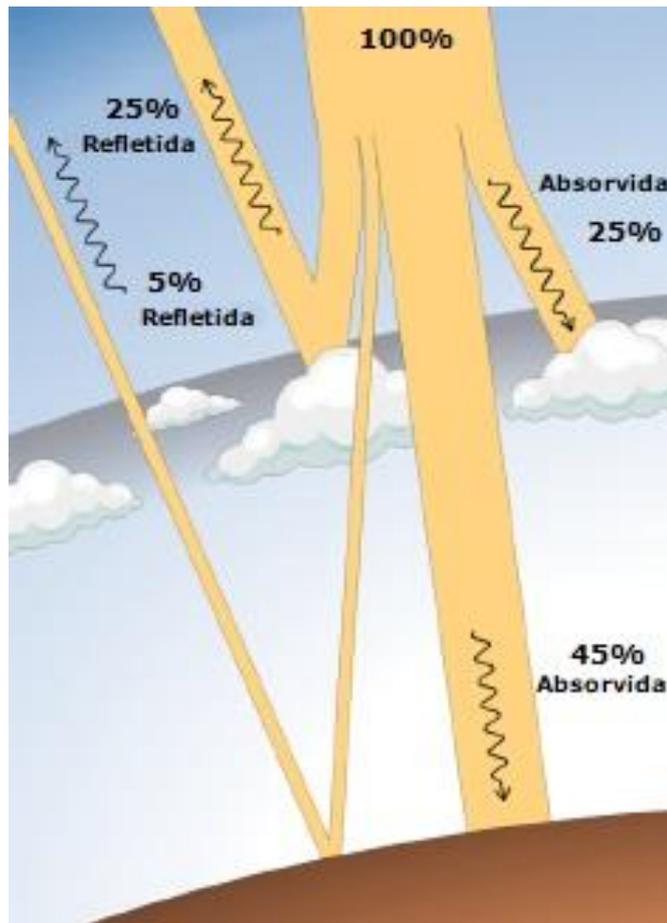
Figura 17 – Variação da duração dos dias conforme a latitude



Fonte: Pereira *et al.* (2017).

Do total de energia solar que chega na Terra, 50% não ultrapassa a atmosfera, sendo que 25% é absorvida e 25% refletida. Os outros 50% que conseguem ultrapassar a atmosfera e chegar na superfície, 5% é refletida e, no final, apenas 45% é absorvida, conforme pode ser verificado na Figura 18 (PEREIRA *et al.*, 2017).

Figura 18 – Incidência dos raios solares na Terra



Fonte: Pereira *et al.* (2017).

Segundo Lafay (2005), antes da irradiação solar incidir sobre a superfície terrestre, ela incide na atmosfera, sendo essa composta por poeira, vapor d'água e aerossóis, fazendo com que parte dessa energia seja absorvida e refletida, ocasionando uma redução da energia que efetivamente atinge a superfície terrestre.

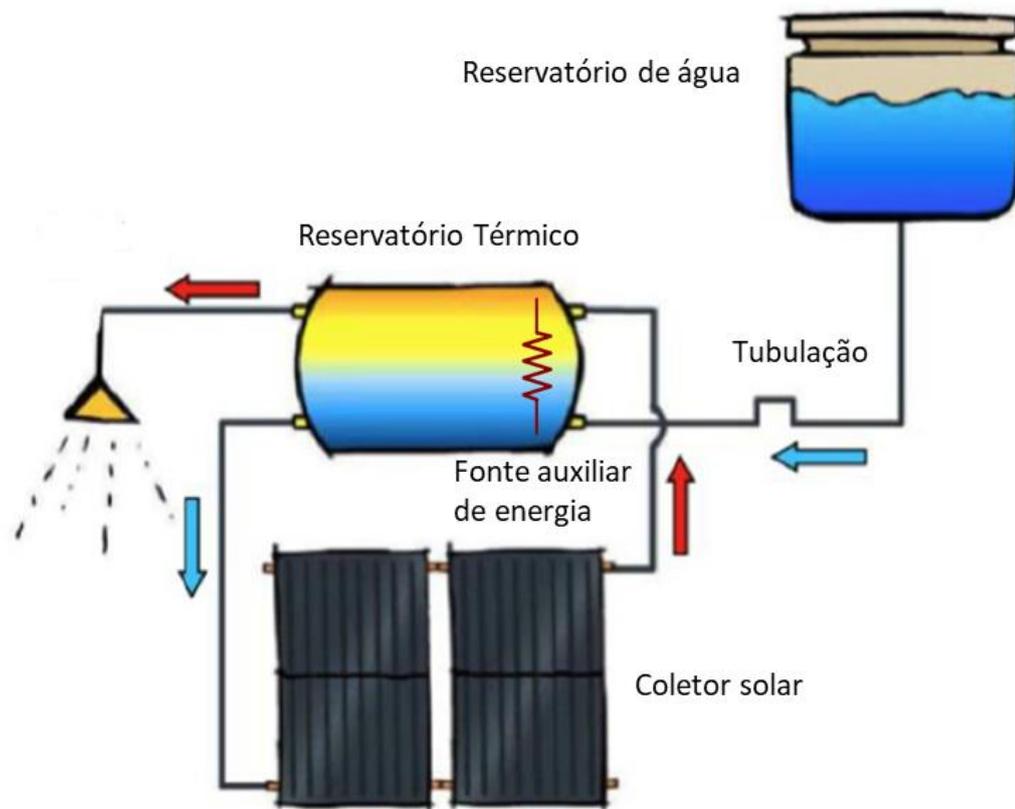
2.2.1 Sistema de Aquecimento Solar (SAS)

Segundo o PNE (Programa Nacional de Etiquetagem), em 2050, haverá uma evolução no número de residências com o SAS, passando de 0,4% em 2005 para

20,2% em 2050, o inverso ocorrerá com o chuveiro, passando de 73,5% em 2005 para 31,9% no mesmo período, ocasionando uma forte mudança no perfil de aquecimento de água para o uso doméstico no Brasil (EPE, 2014).

De acordo com Lafay (2005), a configuração de um sistema de aquecimento solar é composto por: coletor solar, reservatório térmico, fonte auxiliar de energia, reservatório de água e tubulação, como pode ser visto na Figura 19.

Figura 19 – Composição do SAS



Fonte: Adaptado WGSOL (2022).

O coletor solar é um trocador de calor diferente da maioria dos trocadores, visto que ele recebe a energia oriunda de uma fonte muito distante, o Sol, e esse converte essa energia em calor útil através da transferência de energia radiante para um fluido. O reservatório térmico é responsável pelo armazenamento da água aquecida, seu uso num SAS dar-se-á devido a defasagem entre a disponibilidade da energia e o momento do consumo. A fonte auxiliar de energia serve para suprir os períodos de baixa ou até mesmo nenhuma radiação solar (LAFAY, 2005).

O reservatório de água num SAS tem como função manter o nível do reservatório térmico sempre cheio e, a tubulação, realiza a interligação entre os componentes do SAS.

Referente às formas de circulação da água no coletor e das formas de aquecimento, Lafay (2005, p.22 e p.23) coloca que,

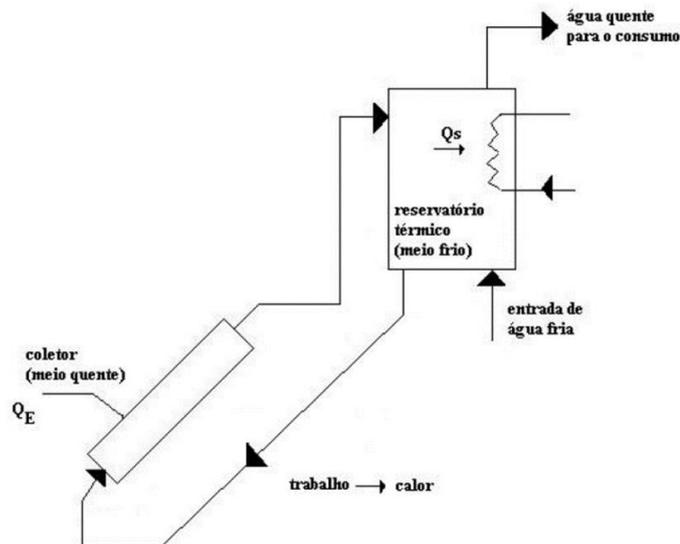
A circulação de água nos circuitos hidráulicos entre os coletores e o reservatório pode ser realizada de forma natural (termossifão) ou por meio de bombeamento (forçada). A água aquecida fica com massa específica mais baixa e ocupa posições mais elevadas no circuito hidráulico, este gradiente de temperaturas e conseqüente gradiente de massas específicas causam uma circulação natural através dos coletores que é chamada de circulação por termossifão. Quando a circulação se dá por termossifão, o sistema é classificado como passivo e quando a circulação se dá por bombeamento, é classificado como ativo. A água para consumo pode ser aquecida diretamente pelo coletor ou pode-se utilizar um fluido refrigerante no circuito dos coletores e um trocador de calor no reservatório para aquecer a água de consumo. Neste caso, diz-se que o aquecimento é de forma indireta. Pode-se, então, obter na combinação destas classificações quatro combinações distintas: 1) sistema passivo direto; 2) sistema passivo indireto; 3) sistema ativo direto; e 4) sistema ativo indireto.

O sistema passivo direto é o mais simples, logo ele é o mais utilizado no Brasil, porém, o sistema ativo direto é utilizado em situações nas quais não existe a dependência da posição do reservatório em relação ao coletor solar, ou seja, esse sistema poderá ser instalado em qualquer tipo de edificação, visto que a circulação é feita através de uma motobomba. Essa motobomba, por sua vez, é acionada mediante a atuação de um controlador termostático diferencial instalado entre a entrada e saída dos coletores. No entanto, esse sistema se torna mais caro, pois necessita de mais equipamentos, tais como, motobomba e sensores, além de requerer uma maior manutenção.

Já os sistemas indiretos, passivo e ativo, são recomendados para regiões onde existe a possibilidade de congelamento, pois esses sistemas possuem uma proteção ao congelamento (LAFAY, 2005). Na Figura 20 está apresentada a configuração esquemática de um sistema passivo direto de aquecimento solar de água.

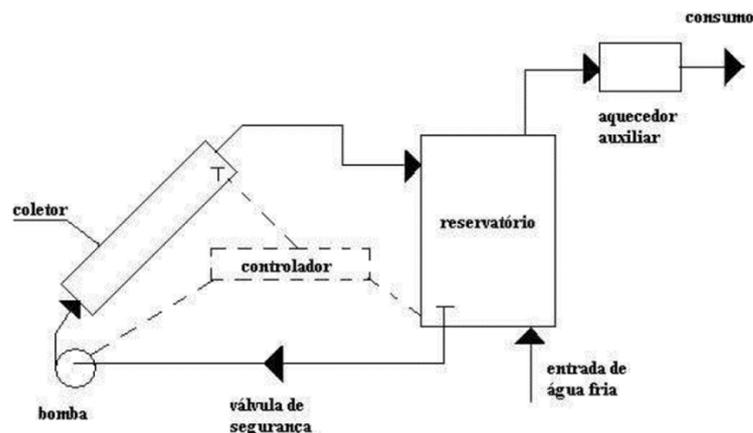
A Figura 21 traz a representação esquemática de um sistema direto e ativo de aquecimento solar cujo a circulação de água se dá através de uma bomba, ou seja, a circulação é forçada. Esse tipo de sistema possui uma vantagem, uma maior flexibilidade de instalação dos coletores solares e dos tanques em qualquer posição, pois a bomba determina um fluxo constante de água entre as placas e o reservatório (COSTA, 2002).

Figura 20 – Sistema de aquecimento passivo direto com circulação natural de água



Fonte: Costa (2002).

Figura 21 – Sistema de aquecimento direto com circulação forçada de água



Fonte: Costa (2002).

2.2.2 Coletores solares

De acordo com Kalogirou (2016), existem basicamente dois tipos de coletores solares: os não concentradores ou estacionários e os concentradores. A diferença entre eles é que os coletores não concentradores possuem a mesma área para interceptar e absorver a radiação solar e os concentradores rastreiam o sol e possuem superfícies côncavas refletivas que interceptam e focalizam a radiação solar direta em uma área menor de recepção. Com isso aumentam o fluxo de radiação, sendo esses coletores indicados para aplicações que exigem uma temperatura mais elevada.

Os coletores de energia solar são diferenciados pela sua movimentação: estacionário, rastreado por um eixo e rastreado por dois eixos, e também pela sua temperatura de operação (KALOGIROU, 2016). Os tipos de coletores solares e algumas de suas características principais podem ser observados no Quadro 1.

Segundo Lafay (2005) existem dois tipos de coletores, sendo eles o coletor de concentração e o coletor plano. Com os coletores de concentração, consegue-se alcançar temperaturas mais elevadas, pois o seu absorvedor possui uma área menor, reduzindo assim as perdas térmicas. Porém, é necessária uma mecanização para fazer com que o coletor acompanhe a trajetória do sol, tornando o custo do sistema mais caro.

Os coletores planos que são os mais utilizados, fornecem água com temperaturas abaixo de 100°C, sendo estes considerados simples pelo ponto de vista de fabricação e por não exigirem elevada manutenção. A absorção da energia solar ocorre pela incidência da mesma na placa absorvedora. Os coletores solares planos são compostos por placa absorvedora, tubulação por onde há a troca de calor, cobertura transparente e isolamento térmico.

Quadro 1 – Tipos de coletores solares

Movimento	Tipo do coletor	Tipo do absorvedor	Razão de concentração	Intervalo de temperatura indicativo (°C)
Estacionário	Coletor de placa plana	Plano	1	30 - 80
Rastreamento de eixo único	Tubo coletor evacuado	Plano	1	50 - 200
	Coletor parabólico componente	Tubular	1 - 5	60 - 240
	Coletor parabólico componente	Tubular	5 - 15	60 - 300
	Refletor Fresnel Linear	Tubular	10 - 40	60 - 250
	Coletor de calha cilíndrica	Tubular	15 - 50	60 - 300
	Coletor parabólico em calha	Tubular	10 - 85	60 - 400
Rastreamento de dois eixos	Refletor em disco parabólico	Pontual	600 - 2000	100 - 1500
	Coletor de campo heliostático	Pontual	300 - 1500	150 - 2000
Nota: A razão de concentração é definida como a área de abertura dividida pela área do receptor/absorvedor do coletor.				

Fonte: Kalogirou (2016).

O INMETRO é o responsável pela certificação das placas solares, bem como dos reservatórios de armazenamento. Essa certificação é concedida pela Etiqueta Nacional de Conservação de Energia – ENCE, e é realizada conforme Portaria nº 301, de 14 de junho de 2012, a qual exige que sejam feitos alguns testes. Essa portaria determina que os testes sigam algumas normas, dentre elas, as normas ISO 9459-2:1995, ABNT NBR 15747-1:2009 e ISO 9806:2017. No Quadro 2 está apresentada a classificação dos coletores solares definida pelo INMETRO de acordo com a produção mensal específica de energia (PMEe).

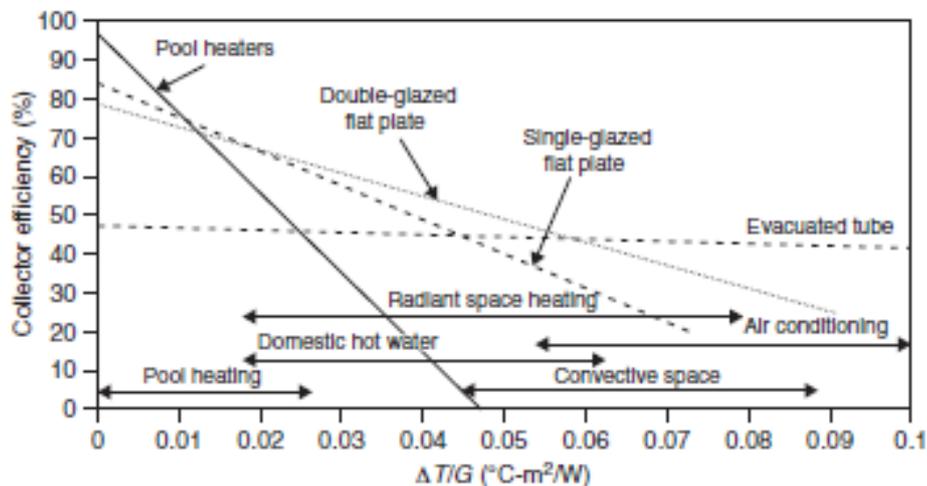
Quadro 2 – Classificação de coletores solares

Classe	Produção Específica Mensal (kWh/mês.m ²)
A	$80,3 < PME_c$
B	$73,3 < PME_c \leq 80,3$
C	$66,3 < PME_c \leq 73,3$
D	$59,3 < PME_c \leq 66,3$
E	$52,3 < PME_c \leq 59,3$

Fonte: INMETRO (2011).

Segundo Kalogirou (2004), a eficiência térmica para os coletores sem cobertura, ou seja, com a superfície absorvedora totalmente exposta aos raios solares, diminui conforme o aumento da diferença de temperatura de operação em relação à temperatura ambiente ($\Delta T/G$), conforme mostra o gráfico da Figura 22.

Figura 22 – A eficiência dos tipos de coletores solar



Fonte: Traduzido Kalogirou (2004).

Observando o gráfico da Figura 22, percebe-se que a queda de eficiência ocorre mais bruscamente nos coletores para piscina, porém, em relação às placas planas, observa-se um aumento da eficiência quando uma placa plana possui dupla cobertura. No entanto, para os coletores fabricados com tubo evacuado observa-se que a perda é muito pequena.

Verifica-se ainda, que os aquecedores de piscina contemplam por inteiro a necessidade do aquecimento de água para piscina e com alta eficiência, entre 50 e 93%. Avaliando a escala de água quente residencial, o coletor solar de piscina opera com a eficiência entre 10 e 60%.

As residências que possuem o aquecimento de água através da energia solar no Brasil, utilizam-se de coletores de tubo evacuado e de placas planas, podendo ser com simples ou dupla cobertura. A forma de operação por termossifão é a que predomina nessas instalações, devido ao fato de facilidade de operação, não exigindo nenhuma automação, pois devido a diferença de densidade entre a água fria e a água quente a água circula de forma espontânea entre os coletores e o reservatório térmico. Essa forma de operação faz com que a água alcance temperaturas bem elevadas, o que, certamente, seria danoso para os coletores de piscina normalmente constituídos de materiais poliméricos.

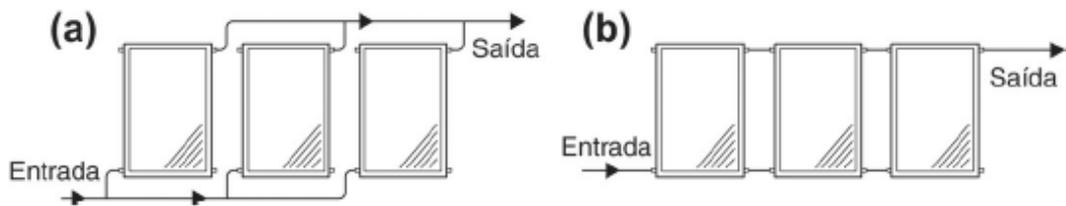
Conforme Ogueke *et al.* (2009), os sistemas ativos, que fazem o uso de bombas, são mais produtivos, entre 35 e 80% em relação aos sistemas passivos, que utilizam o sistema de termossifão. Devido a essa diferença, os sistemas ativos normalmente são os mais aplicados na indústria, onde existe maior demanda de água quente, porém, exigem uma maior manutenção do sistema. Já os sistemas passivos, por apresentarem menor custo, são aplicados em residências, nas quais essa demanda é menor.

Segundo Kalogirou (2016), o agrupamento de dois ou mais coletores constitui um módulo, podendo esse ser montado em fluxo paralelo ou em fluxo paralelo combinado em série, porém, o fluxo paralelo é o mais utilizado por ser balanceado, oferecer uma queda de pressão baixa e por ser facilmente drenado. A Figura 23 demonstra os módulos mais utilizados comercialmente: conjuntos externos e conjuntos internos.

O conjunto de coletores externos são adequados para sistemas pequenos, possuem uma conexão de diâmetro pequena, pois ele é usado para transportar a água por apenas um coletor, sendo os coletores conectados individualmente ao conjunto

de tubos, o qual não faz parte do coletor. O conjunto de coletores internos são indicados para sistemas maiores, pois ele oferece vantagens quando comparado com o conjunto externo. São mais econômicos pois não utilizam tubos extras e ajustes dos mesmos, contudo, precisam ser isolados termicamente e, assim, reduzem as perdas de calor, o que aumenta o desempenho térmico do sistema.

Figura 23 – Módulos dos conjuntos de coletores solares: (a) externos e (b) internos

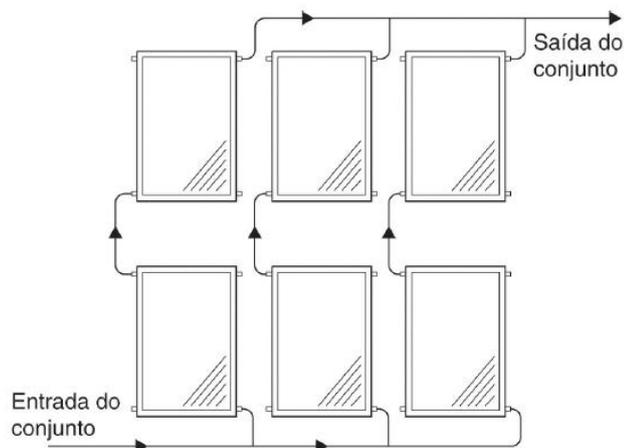


Fonte: Kalogirou (2016).

Observa-se que no conjunto interno o fluxo é paralelo, porém, os coletores estão interligados em série, quando existe a necessidade de se obter arranjos com um maior número de coletores, uma combinação de fluxo em série e paralelo pode ser utilizada, como mostrado na Figura 24 (KALOGIROU, 2016).

De acordo com Kalogirou (2016), a definição do arranjo ser em série ou em paralelo vai depender da temperatura na qual o sistema irá operar, o arranjo em paralelo faz com que a entrada de água de todos os coletores estejam na mesma temperatura, e para o arranjo em série, a temperatura de saída de um coletor será a entrada de um próximo coletor.

Figura 24 – Interligação série e paralelo de coletores solares



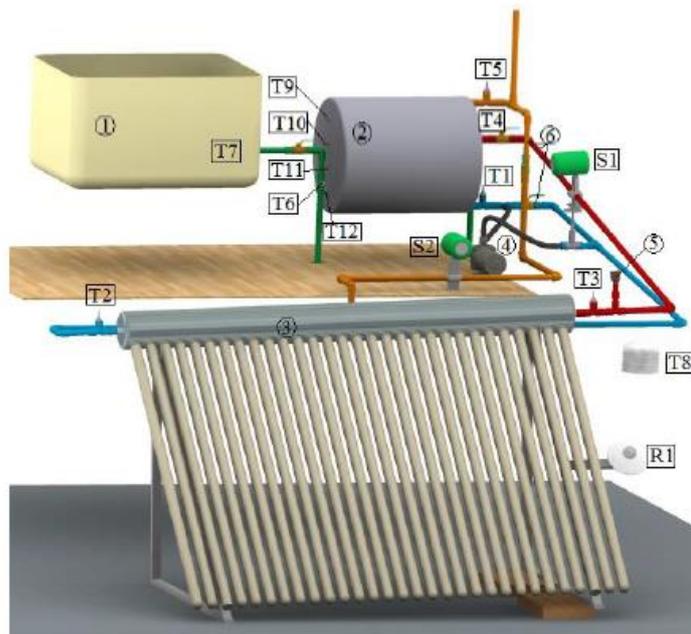
Fonte: Kalogirou (2016).

A interligação em série de dois coletores com uma determinada vazão mássica de água, terá o desempenho menor quando comparada com dois coletores interligados em paralelo, tendo cada coletor a mesma vazão mássica de água dos coletores interligados em série (MORRISON, 2001).

2.3 Influência de diferentes configurações na interface de ligação dos coletores na performance de sistemas de aquecimento de água solares

Toro (2015), realizou uma análise comparativa de operação de um coletor solar de tubo evacuado, operando no modo termossifão e no modo forçada, fazendo uso da bancada, conforme Figura 25.

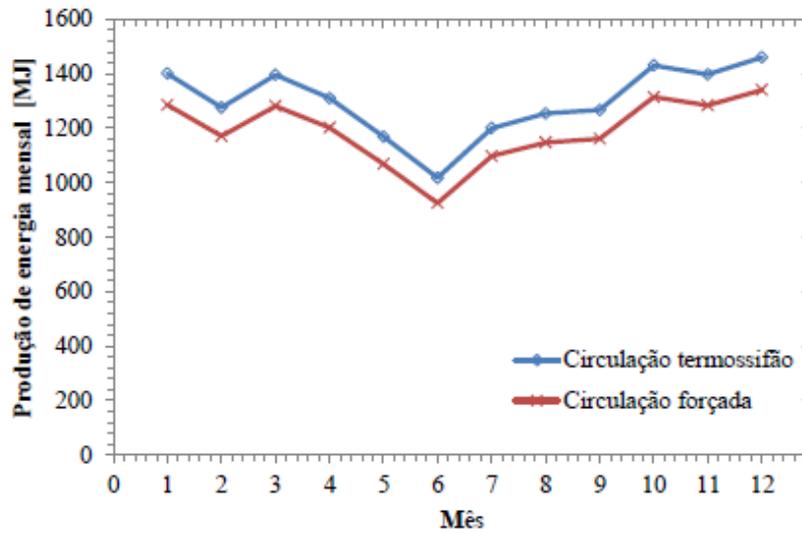
Figura 25 – Bancada de ensaios



Fonte: Toro (2015).

Quando um sistema forçado opera com a vazão conforme a norma brasileira NBR 15747-2, que corresponde a 0,02 kg/s por m² de abertura do coletor, tendo um coletor de tubo evacuado com 1,6 m², Toro (2015), constatou que, neste caso, que a produção de energia anual é menor quando comparado com um sistema que opera no modo termossifão, conforme pode ser observado na Figura 26.

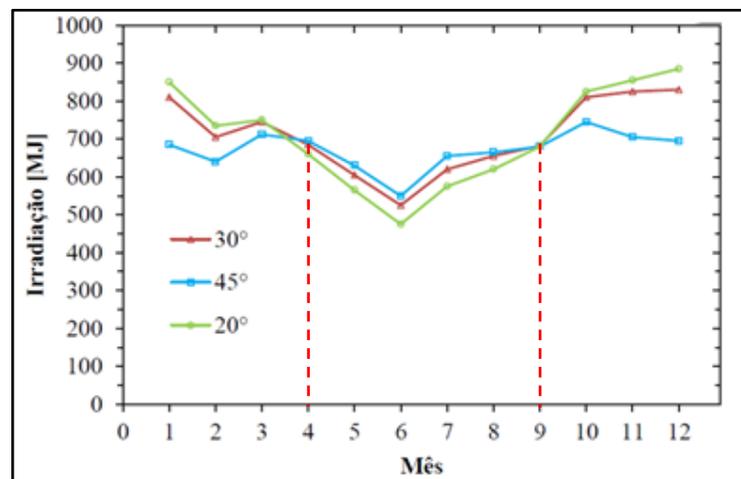
Figura 26 – Energia diária produzida pelo coletor de tubo a vácuo



Fonte: TORO (2015).

É sabido que a radiação solar varia em cada estação do ano devido à inclinação do eixo da Terra. No entanto, além disso, a irradiação incidente sobre um plano localizado na superfície terrestre é absorvida de modo variado dependendo da inclinação na qual esse plano esteja posicionado. Rosa (2012), mediante simulação computadorizada para um coletor com área de absorção de 1,6 m², orientado para o norte na cidade de Porto Alegre/RS, observou a irradiação para 3 inclinações, 20°, 30° e 45°. Os resultados da simulação podem ser observados no gráfico da Figura 27.

Figura 27 – Irradiação sobre um coletor plano com área de 1,6m² em diferentes ângulos de inclinação para a cidade de Porto Alegre



Fonte: Rosa (2012).

Observa-se no gráfico da Figura 27 que entre os meses de abril e setembro, período que corresponde às estações de outono e inverno, quando a necessidade por água quente é maior, verifica-se que, para a cidade de Porto Alegre/RS a inclinação de 45° se mostra mais eficiente.

Jordan *et al.* (2015), realizaram a análise do comportamento de um coletor solar plano construído em material termoplástico (ver Figura 28) mediante variações na vazão da água de circulação no coletor. Os ensaios foram realizados com os valores da vazão em 0,026 kg/s; 0,04 kg/s; 0,054 kg/s e 0,068 kg/s.

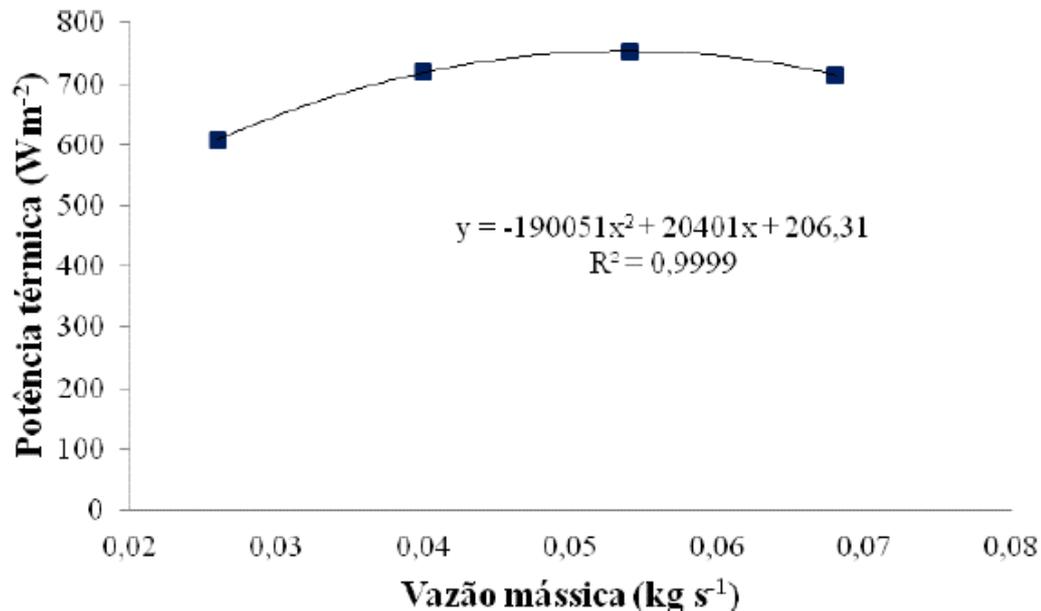
Figura 28 – Coletor solar plano construído em material termoplástico



Fonte: Jordan *et al.* (2015).

De acordo com os estudos de Jordan *et al.* (2015), observa-se no gráfico da Figura 29 que existiu uma condição de vazão ótima para o coletor em estudo. Para vazão de 0,026 kg/s, obteve-se a menor potência térmica, já para as vazões de 0,04 kg/s e 0,068 kg/s, geraram resultados parecidos, no entanto, o ensaio realizado com a vazão de 0,054 kg/s, gerou a maior potência térmica.

Figura 29 – Comportamento da potência térmica em função da vazão de trabalho

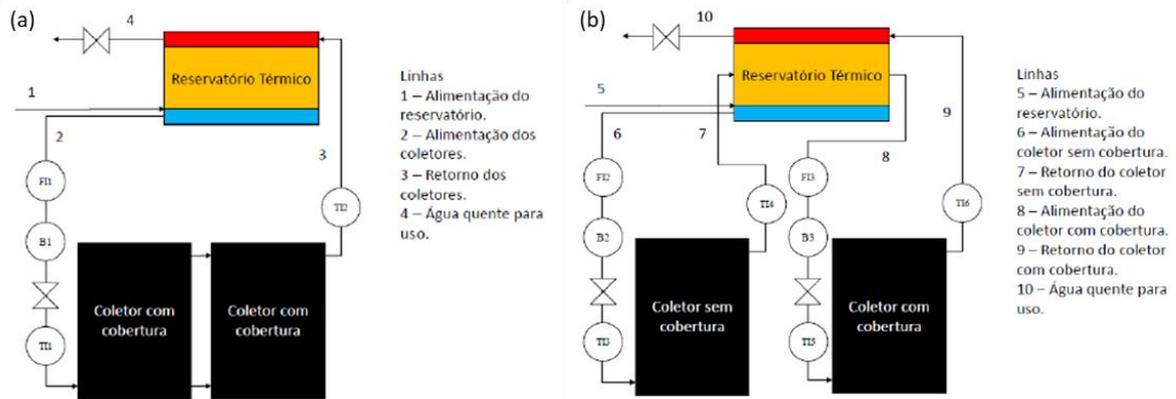


Fonte: Jordan *et al.* (2015).

Pansato (2016), realizou ensaios com a ligação de dois circuitos, interligando dois coletores planos com cobertura, denominado como sistema simples, e um segundo circuito, fazendo uso de dois coletores, um primeiro coletor, sem cobertura, recebe a água da parte inferior do reservatório e sua saída direciona a água para o ponto intermediário do mesmo, sendo esse o ponto de alimentação para o segundo coletor com cobertura, tendo sua saída ligada na parte superior do reservatório. O esquema de ligação pode-se observar na Figura 30.

Os ensaios foram realizados conforme sequência a seguir:

- 1º) Vazão definida, sendo uma única para o sistema simples, 4,8 l/min, e com vazão diferente para os coletores do sistema acoplado, 2,4 l/min para o coletor com cobertura e 3,6 l/min para o coletor sem cobertura;
- 2º) Ajuste no controle da operação do coletor sem cobertura;
- 3º) Redução em 50% na vazão nos coletores com cobertura, ficando o sistema simples com 2,4 l/min e o sistema acoplado com 1,2 l/min;
- 4º) Alterações na temperatura de controle e no tempo de operação;
- 5º) Retorno das vazões dos coletores com cobertura e aumento das temperaturas de controle.

Figura 30 – Esquema dos sistemas solares de aquecimento Simples (a) Acoplado (b)

Fonte: Pansato (2016).

Os resultados obtidos por Pansato (2016) por meio dos ensaios são demonstrados na Tabela 2. Conclui-se que em ambos os testes, o sistema acoplado não superou o sistema simples em nenhuma das condições de operação.

Tabela 2 – Eficiência térmica acumulada

	$\eta_{diária} [\%]$			
	2	3	4	5
Sistema Simples	53,1 ± 0,2	52,4 ± 0,1	53,1 ± 0,1	49,5 ± 0,2
Sistema Acoplado	35,9 ± 0,2	40,0 ± 0,1	44,2 ± 0,1	38,8 ± 0,2
Coletor sem cobertura	1,6 ± 0,2	11,0 ± 0,2	20,1 ± 0,2	16,0 ± 0,2
Coletor com cobertura	70,1 ± 0,2	68,8 ± 0,1	68,3 ± 0,1	61,5 ± 0,2

Fonte: Pansato (2016).

Rosa (2012) demonstrou o comportamento da absorção da energia solar de um plano quando esse se dispõe em ângulos diferentes. Sendo que esse estudo será utilizado como referência para a definição da inclinação da bancada de estudo desse projeto de pesquisa.

Os resultados obtidos por Toro (2015) evidenciam o comportamento diferenciado através das formas de operação de um SAS, tendo nesse estudo a aplicação da vazão conforme a Norma ABNT NBR 15747-2. Porém, os resultados obtidos por Jordan *et al* (2015), demonstraram que a vazão pela qual a água percorre o coletor solar gera performances energéticas diferenciadas, obtendo-se um ponto de vazão ótima para o estudo realizado.

Pansato (2016) apresentou resultados que demonstraram um maior rendimento energético com a associação paralela de dois coletores solares de placa plana com cobertura em relação a interligação de um coletor solar de placa plana com cobertura e um coletor solar sem cobertura, estando esses coletores interligados em níveis diferentes do reservatório térmico.

Ambos os trabalhos agregaram conhecimento para o desenvolvimento desse projeto de pesquisa, porém, estudos que realizaram a comparação da ligação em série e/ou paralela de coletores solares aderentes aos objetivos dessa pesquisa não foram encontrados. Neste sentido, este estudo representará mais uma iniciativa científica para análise da performance de coletores solares a fim de alcançar resultados que tragam uma maior eficiência energética em relação ao processo de aquecimento de água.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Em consonância com a temática desse estudo, que aborda o aquecimento de água por sistemas solares para uso residencial e cujo o problema em questão se refere à inexistência de estudos aprofundados relacionados aos efeitos de diferentes arranjos de disposição de coletores solares, esse capítulo apresenta os materiais e métodos aplicados segundo o fluxo metodológico planejado para o desenvolvimento dessa pesquisa.

Com base nessas necessidades, foi realizado o desenvolvimento de uma bancada de ensaios contemplando 4 (quatro) coletores solares para piscinas, sendo este o número mínimo de peças suficientes para caracterizar os arranjos em série e em paralelo em estudo, visando também, a otimização dimensional da bancada e minimização dos custos do projeto de pesquisa. A marca dos coletores utilizados é Clima Sistemas de Aquecimento Solar. Foram realizados o projeto e a montagem de 2 (dois) circuitos que contemplam 2 (dois) coletores cada, sendo um primeiro com coletores interligados em série e um segundo circuito com coletores interligados em paralelo. No objetivo de eliminar ao máximo os ruídos referentes às condições de ensaio, os dois circuitos foram montados um ao lado outro operando nas mesmas condições (inclinação e posicionamento em relação à trajetória solar, estrutura física, hidráulica e de aquisição de dados).

Em alinhamento com os resultados obtidos por Souza (2021), foi estabelecido como temperatura de aquecimento da água 45 °C.

O local de instalação da bancada de ensaios foi definido após a solicitação formal junto a área de infraestrutura da Universidade da Região de Joinville – Univille, campus Bom Retiro, Joinville/SC, para a qual foi apresentada a proposta de 3 possíveis locais com potencial de instalação, sendo que foi autorizada a instalação no local indicado na Figura 31.

Os procedimentos experimentais empregados no desenvolvimento desse estudo tomaram por base os objetivos da pesquisa, bem como nas recomendações de normas e também padrões comerciais de instalação.

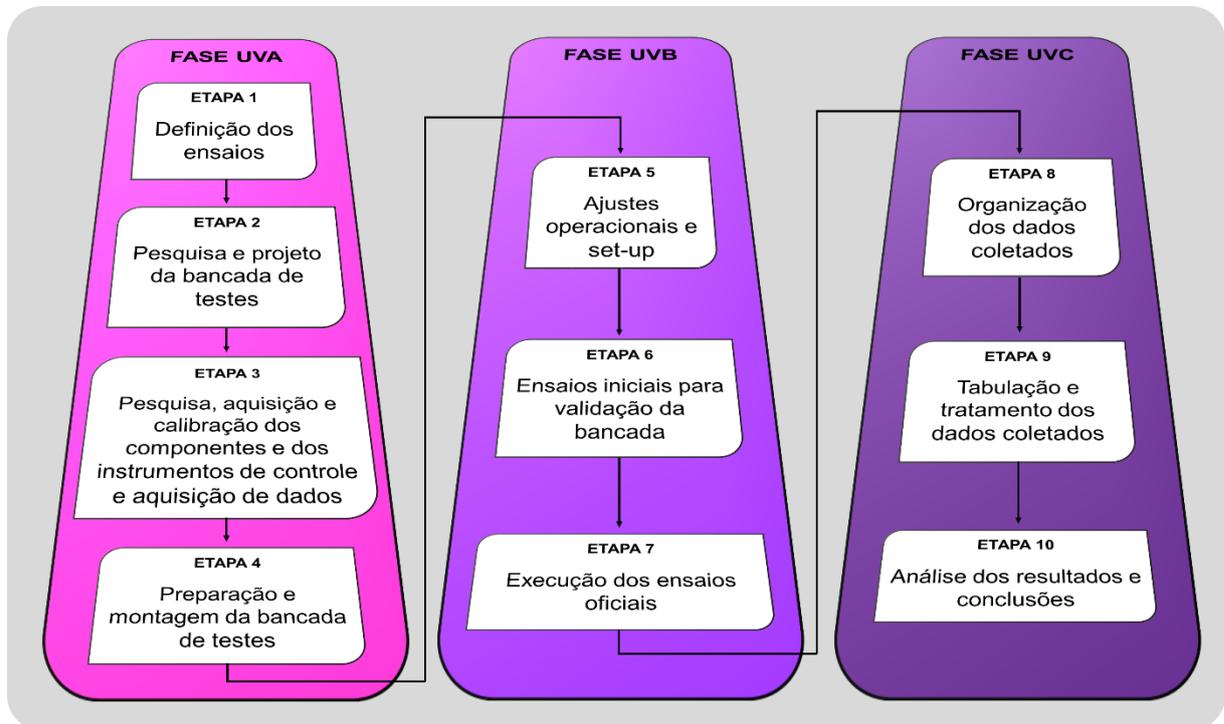
O desenvolvimento da parte experimental desse projeto de pesquisa foi planejado e realizado em 3 fases constituídas de diversas etapas, conforme fluxograma metodológico representado na figura 32.

Figura 31 – Local de instalação da bancada de ensaios no campus da Univille



Fonte: Autor (2022).

Figura 32 – Fluxograma do desenvolvimento experimental



Fonte: Autor (2021).

Apenas para fins ilustrativos, essas fases tiveram suas denominações associadas aos tipos de raios ultravioletas que chegam à superfície do planeta Terra. A fase inicial, denominada como “FASE UVA”, contempla as etapas de planejamento

experimental; a fase intermediária denominada como “FASE UVB”, abrange as etapas de execução dos ensaios e; por último, a “FASE UVC” apresenta a exposição dos resultados alcançados.

3.1 Fase UVA – Planejamento da pesquisa

Esse projeto teve a origem na necessidade da comparação do volume de água aquecida produzida numa determinada temperatura entre dois sistemas de aquecimento solar com coletores operando em série ou em paralelo, afim de dar continuidade aos estudos realizados pelo aluno do Mestrado em Engenharia de Processos da Univille, Daniel de Souza, cujo tema foi: “Gestão da eficiência energética em edificações residenciais por meio da associação de tecnologias e sistema automatizados”.

As etapas dessa fase contemplam ações que foram realizadas desde a definição dos ensaios, o processo de pesquisa, o projeto, aquisição, calibração, preparação e montagem da bancada de ensaios.

3.1.1 Definição dos ensaios

No estudo realizado por Souza (2021), referente à eficiência energética de sistemas híbridos para aquecimento de água foi analisado o potencial de redução no consumo de energia elétrica, quando a água é pré-aquecida para o banho anteriormente a sua passagem pelo chuveiro elétrico. Essa alternativa de solução de pré-aquecimento faz com que a potência elétrica requerida pelo chuveiro seja menor para aquecer a água à temperatura ideal do banho.

Esse pré-aquecimento pode ser dado por meio de algumas fontes de calor, tais como o gás e também a energia solar, essa última definida para o estudo. Com a definição da fonte de energia que seria utilizada para o pré-aquecimento, foram definidas a inclinação dos coletores solares e sua orientação geográfica, a vazão e a temperatura que seria realizada a troca de água nos coletores solares a cada ciclo controlado de aquecimento.

A partir dessas necessidades iniciou-se todo o desenvolvimento desse projeto de pesquisa, que compreendeu a instalação de dois circuitos independentes, de modo

que os ensaios pudessem ser realizados nas mesmas condições ambientais, para se obter resultados confiáveis para avaliação.

Conforme já apresentado nesse trabalho, ficou definido que a temperatura para o aquecimento da água seria de 45 °C. Como os circuitos operariam por ciclos de aquecimento, foi necessária também a definição da temperatura na qual os circuitos realizariam as trocas de água quente por água a ser aquecida. Considerando as perdas termodinâmicas, as “temperaturas de aquecimento” e “temperatura de troca” deveriam ser aproximadas. Nesse sentido, após a realização de alguns ensaios preliminares, com os quais verificou-se o comportamento do sistema, definiu-se que os valores da “temperatura de troca” adequados seriam entre 40 °C e 43 °C.

Os ensaios foram definidos para ocorrer simultaneamente, porém em circuitos independentes, tendo uma mesma fonte de fornecimento de água, porém, cada um com seus componentes em um circuito fechado. Quando a temperatura de saída alcança o valor estabelecido de 45 °C, um sistema automatizado de abertura e fechamento de válvulas, faz com que a água seja trocada de dentro dos coletores. Quando a temperatura da água de saída atinge os valores estabelecidos entre 40 °C e 43 °C, uma nova combinação de abertura e fechamento de válvulas acontece, fazendo com que cesse a troca de água, e inicie-se um novo ciclo de circulação interna pelos coletores até que seja novamente alcançada a temperatura de troca, ou seja, 45 °C, e isso se repete durante um dia todo para análise posterior.

Foi realizado uma busca na literatura científica e também em normas técnicas para definir a vazão a ser estabelecida nos circuitos. Verificou-se que a norma brasileira ABNT NBR 15747-2, determina que a vazão nos circuitos operando com circulação forçada deve ser fixada em 0,02 kg/s por m² de abertura do coletor solar. Como cada circuito é composto por dois coletores de 1.100 mm de diâmetro, o que corresponde uma área total de 1,899 m², logo a vazão volumétrica por circuito foi determinada em 2,3 l/min.

Outro fator definido foi a inclinação que os coletores deveriam ser dispostos. Segundo a mesma norma ABNT NBR 15747-2, caso não seja recomendado pelo fabricante a inclinação de instalação, recomenda-se que ela seja de 30 graus ou menor em relação ao plano horizontal. O fabricante do coletor utilizado na confecção dessa bancada não especifica essa inclinação. Porém, a partir da consulta a outra empresa que instala sistema de aquecimento solar (Ecologic Aquecedor Solar), a mesma aplica uma regra em relação às coordenadas de geo-posicionamento do local

da instalação, acrescentando 10° no valor da latitude. Para a tomada de decisão em relação à inclinação, utilizou-se também o estudo de Rosa (2012). Nesse estudo a bancada desse projeto está instalada na cidade de Joinville/SC, cuja latitude é de $26^\circ 18' 18''$ Sul, então adotou-se um acréscimo de 10° em relação a latitude, ficando a bancada inclinada a 36° em relação ao plano horizontal.

3.1.2 Pesquisa e projeto da bancada de ensaios

Para possibilitar a realização de ensaios e coleta de dados para o desenvolvimento desse estudo, se fez necessário o projeto e a construção de uma bancada de ensaios.

O projeto da bancada de ensaios compreendeu o detalhamento e a especificação de três sistemas principais: Sistema estrutural (A); Sistema de automação e aquisição de dados (B); e Sistema hidráulico (C), conforme descritos a seguir.

I – Sistema estrutural (A)

A estrutura física dessa bancada foi desenvolvida para a montagem de 4 conjuntos independentes para cada coletor, sendo dividida em duas partes, Caixa (A1) e Base (A2). A Base (A2) é a estrutura que irá desempenhar o papel de sustentação da Caixa e, teve como premissa além da sustentação, a inclusão de um sistema com o qual fosse possível realizar variações na inclinação da Caixa (A1) em valores determinados, permitindo, assim, ajustar a inclinação da mesma para 36° (valor definido para a realização dos ensaios dessa pesquisa), mas também nas inclinações de 26° , 31° , 41° e 46° .

Para que fosse possível realizar ajustes na inclinação dos coletores, foi realizado o dimensionamento a partir do cálculo dos pontos de sustentação utilizando-se de uma planilha de Excel aplicando trigonometria, como observado na Figura 33.

A Caixa - A1 (Figura 34) desenvolvida para a sustentação dos coletores solares é composta das seguintes peças:

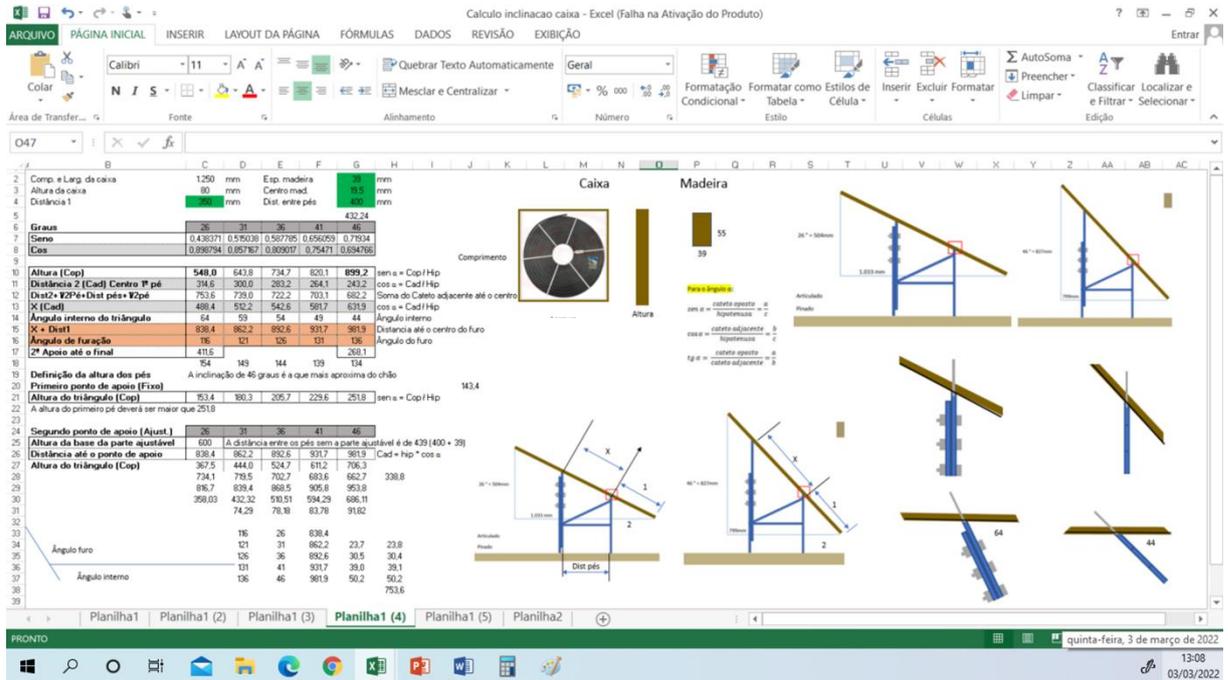
A1a – Fundo da caixa

A1b – Contornos da caixa

A1c – Suporte de sustentação/ajuste de inclinação

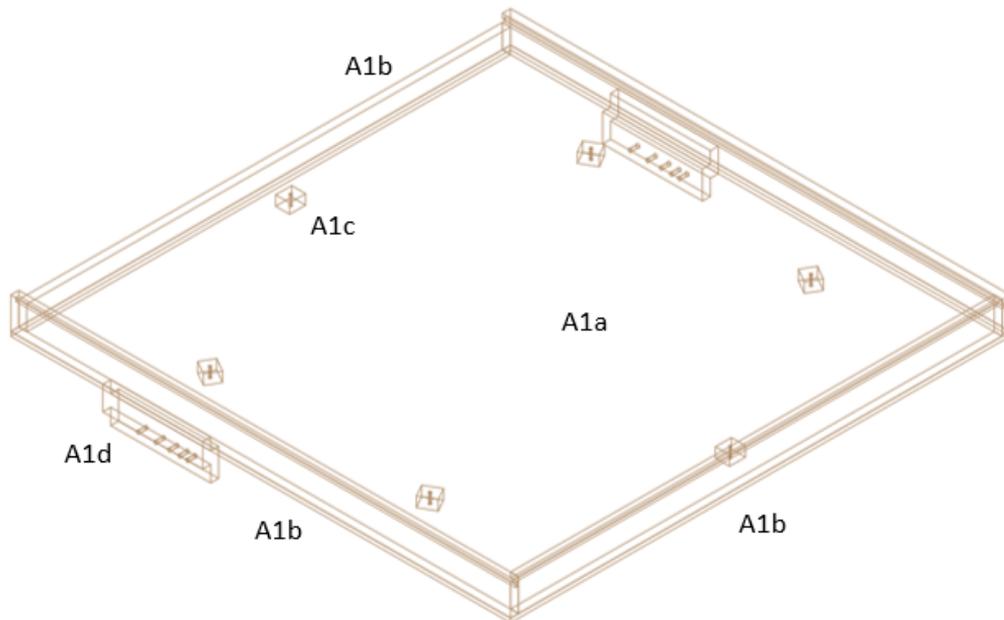
A1d – Suporte de sustentação do coletor na Caixa

Figura 33 – Planilha para cálculo dos pontos de apoio para alteração da inclinação da Caixa



Fonte: Autor (2021).

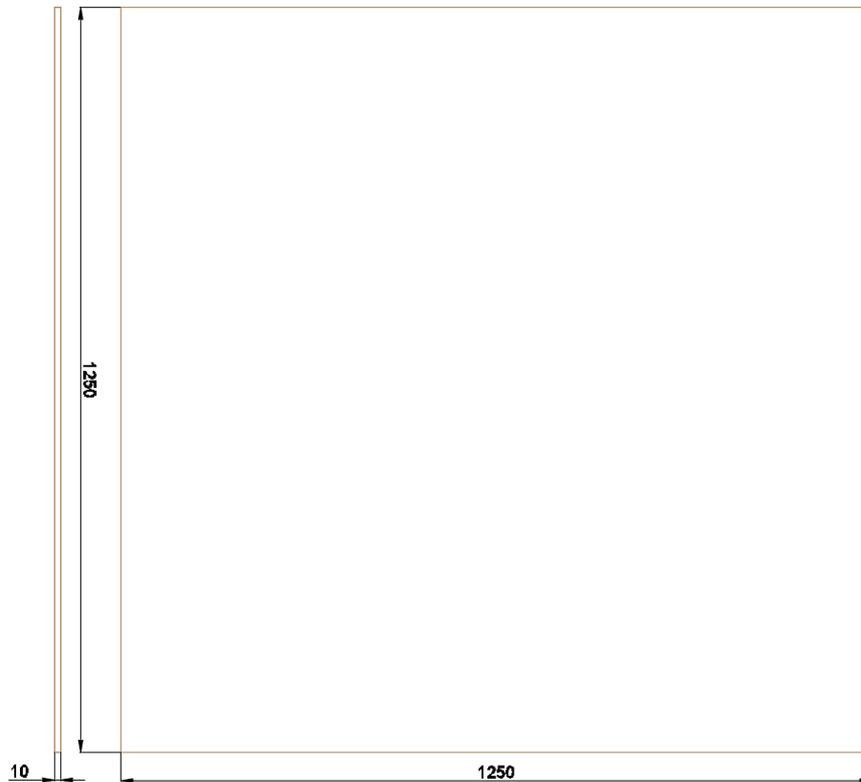
Figura 34 – Caixa A1 para sustentação dos coletores



Fonte: Autor (2021).

A peça Fundo da caixa (A1a) foi confeccionada em compensado naval nas dimensões (em mm) mostradas na Figura 35.

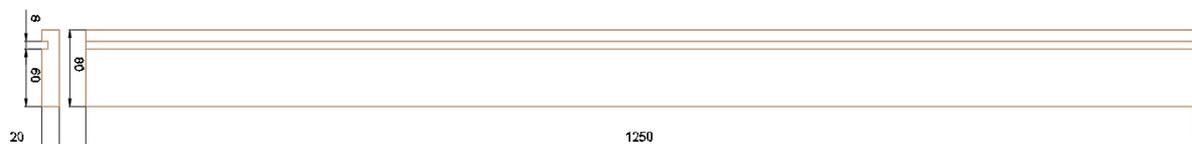
Figura 35 – Peça A1a: Fundo da caixa



Fonte: Autor (2021).

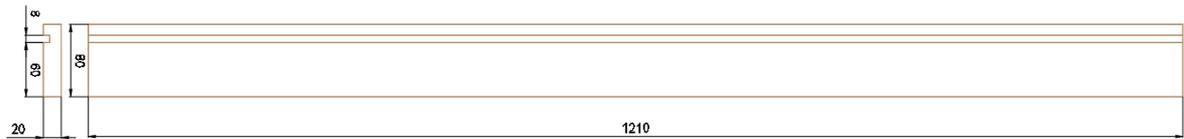
As peças que formam o Contorno da caixa (A1b) foram confeccionadas em madeira Itaúba, sendo as laterais (A1b1) (2 peças, direita e esquerda – Figura 36) nas medidas 20 mm X 80 mm X 1.250 mm, com um rasgo total de 8 mm a 60 mm da base. A peça inferior (A1b2) (Figura 37) nas medidas 20 mm X 80 mm X 1.210 mm, com um rasgo total de 8 mm à 60 mm da base e a peça superior (A1b3) (Figura 38) nas medidas de 20 mm X 60 mm X 1.210 mm, sem o rasgo.

Figura 36 – Peça A1b1: Contornos laterais direita e esquerda



Fonte: Autor (2021).

Figura 37 – Peça A1b2: Contorno inferior



Fonte: Autor (2021).

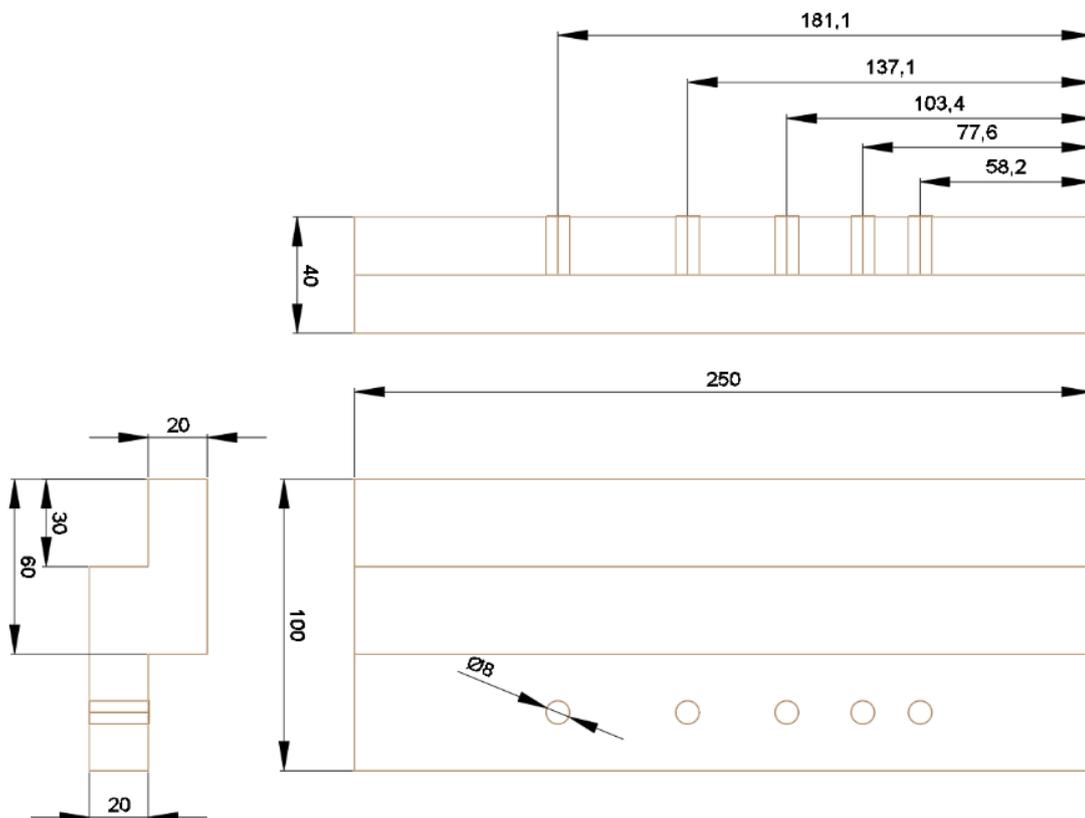
Figura 38 – Peça A1b3: Contorno superior



Fonte: Autor (2021).

Os suportes de sustentação/ajuste de inclinação da caixa (A1c), são 2 peças, direita e esquerda, foram confeccionadas em madeira Itaúba, compradas nas dimensões brutas de 50 mm x 120 mm x 250 mm, sendo usinadas (Figura 39).

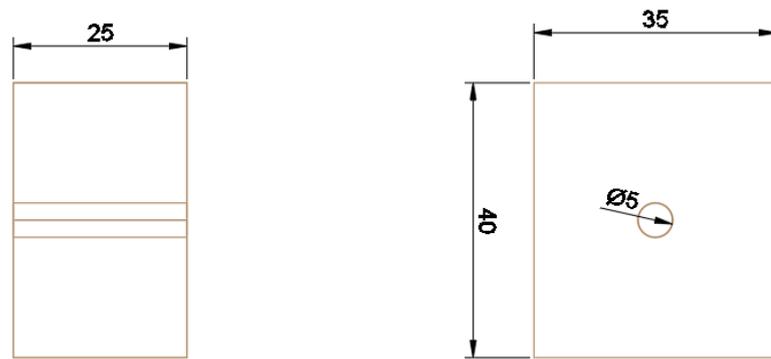
Figura 39 – Peça A1c: Detalhes do suporte de sustentação/ajuste de inclinação



Fonte: Autor (2021).

Os suportes de sustentação do coletor (A1d), são 6 peças que foram feitas de madeira Itaúba nas medidas de 40 mm x 35 mm x 25 mm, com um furo de Ø5 mm em seu centro (Figura 40).

Figura 40 – Peça A1d: Suporte de sustentação do coletor na caixa



Fonte: Autor (2021).

A Base (A2), conforme a Figura 41, desenvolvida para a sustentação das caixas dos coletores solares é composta das seguintes peças:

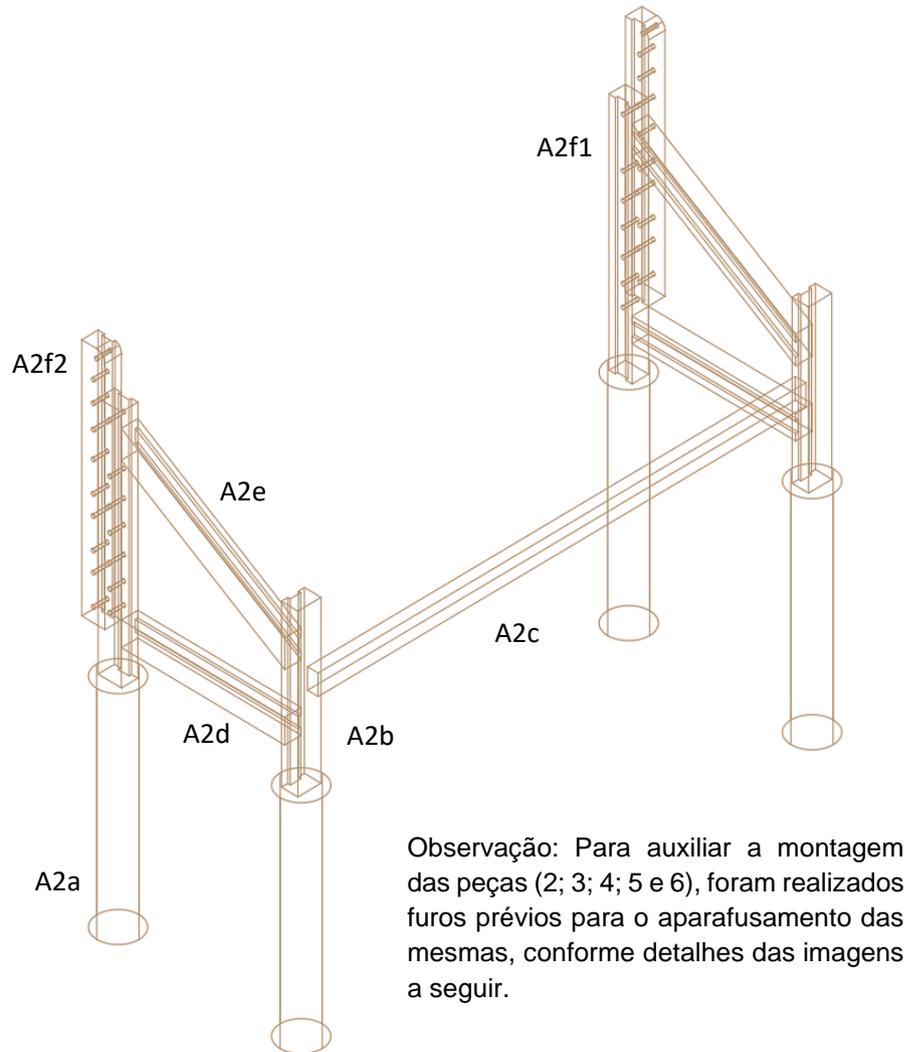
- A2a – Elementos de fundação
- A2b – Base fixa
- A2c – Travessa frontal
- A2d – Travessa lateral
- A2e – Travessa inclinada
- A2f – Estrutura de ajuste da inclinação
- A2f1 – Guia fixa
- A2f2 – Guia variável

Os Elementos fundação da base foram confeccionados em madeira *pinus* auto clavado no diâmetro de 150 mm e comprimento variável estabelecido de acordo com a escavação realizada em cada ponto do solo onde a bancada foi instalada de acordo com a Figura 42.

Os furos foram realizados com trado até o atingimento de uma camada mais firme e consistente do solo e, a partir dessa profundidade, definiu-se o comprimento individual de cada uma das estacas de *pinus*. Para melhor estabilidade e garantia da capacidade de carga as estacas de *pinus* foram inseridas nos furos realizados e

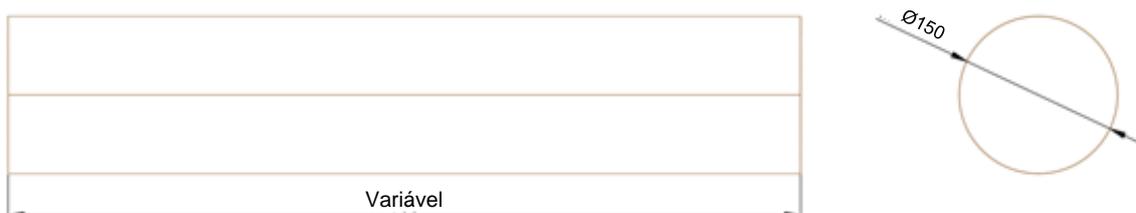
envoltas em uma camada lateral de concreto magro preparado em um traço 1:4:2. A disposição das sapatas pode ser observada na Figura 43.

Figura 41 – Base de sustentação da caixa do coletor



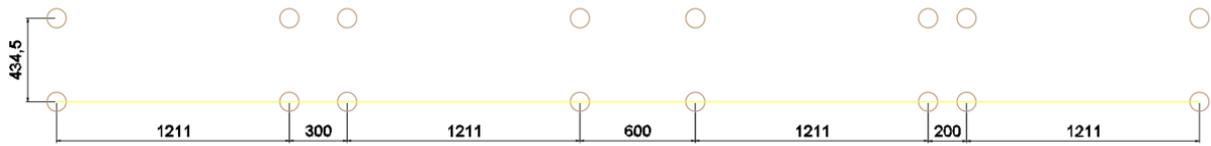
Fonte: Autor (2021).

Figura 42 – Peça A2a: Sapatas da base de sustentação da caixa do coletor



Fonte: Autor (2021).

Figura 43 – Fundação da base de sustentação da caixa do coletor

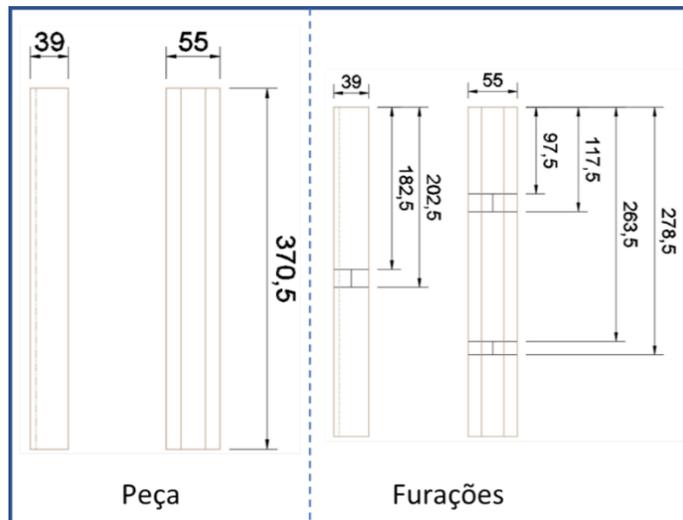


Fonte: Autor (2021).

A base fixa (A2b) da base de sustentação das caixas dos coletores foi confeccionada em madeira Itaúba, nas dimensões de 39 mm X 55 mm X 370,5 mm, conforme pode ser visto na Figura 44. Observa-se no lado esquerdo da Figura 44, os detalhes da base fixa. No lado direito o detalhamento dos furos projetados para facilitar a montagem das peças.

Essa disposição de detalhamento da Figura 44 foi adotada na representação das Figuras 45, 46, 47 e 48 apresentadas na sequência.

Figura 44 – Peça A2b: Base fixa de sustentação da caixa do coletor

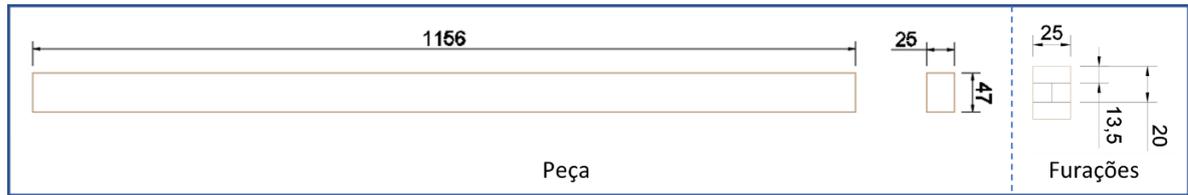


Fonte: Autor (2021).

As travessas frontais (A2c) da base de sustentação das caixas dos coletores foram confeccionadas em madeira Itaúba, nas dimensões de 25 mm x 47 mm x 1.156 mm, conforme pode ser visualizado na Figura 45.

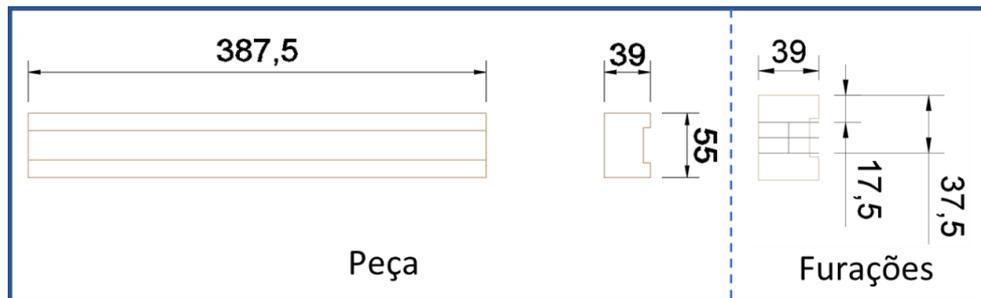
Na Figura 46, pode ser visualizada a travessa lateral (A2d) da base de sustentação da caixa do coletor foi confeccionada em madeira Itaúba, nas dimensões de 39 mm x 55 mm x 387,5 mm.

Figura 45 – Peça A2c: Travessa frontal da base de sustentação da caixa do coletor



Fonte: Autor (2021).

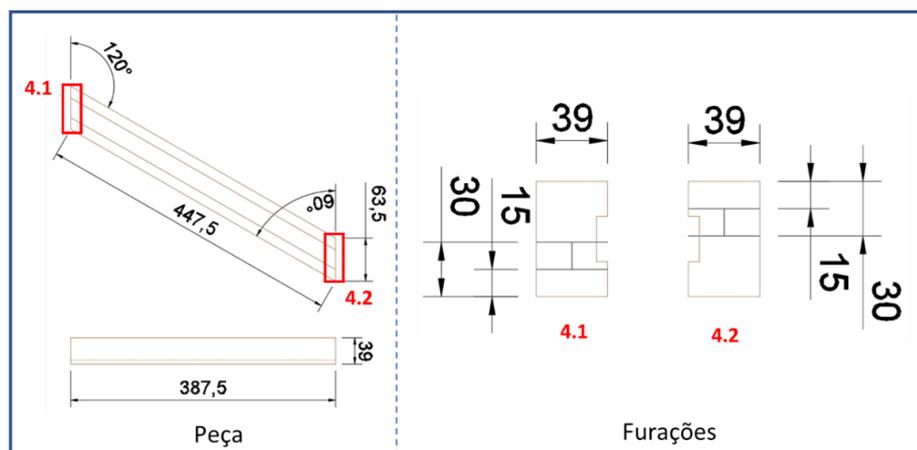
Figura 46 – Peça A2d: Travessa lateral da base de sustentação da caixa do coletor



Fonte: Autor (2021).

As travessas inclinadas (A2e) das bases de sustentação das caixas dos coletores foram fabricadas em madeira Itaúba, nas dimensões de 39 mm X 55 mm X 447,5 mm, e podem ser observadas na Figura 47.

Figura 47 – Peça A2e: Travessa inclinada da base de sustentação da caixa do coletor

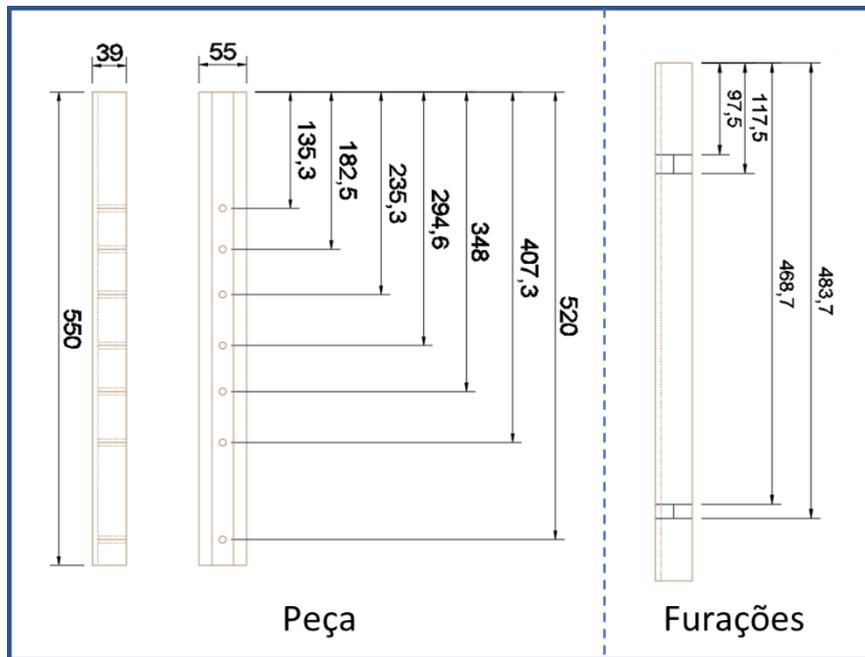


Fonte: Autor (2021).

A Figura 48 está representada a guia fixa (A2f1) da estrutura de ajuste da inclinação (A2f), que foi confeccionada em madeira Itaúba, nas dimensões de 39 mm X 55 mm X 447,5 mm. Na Figura 49, pode ser observada a guia variável (A2f2) da

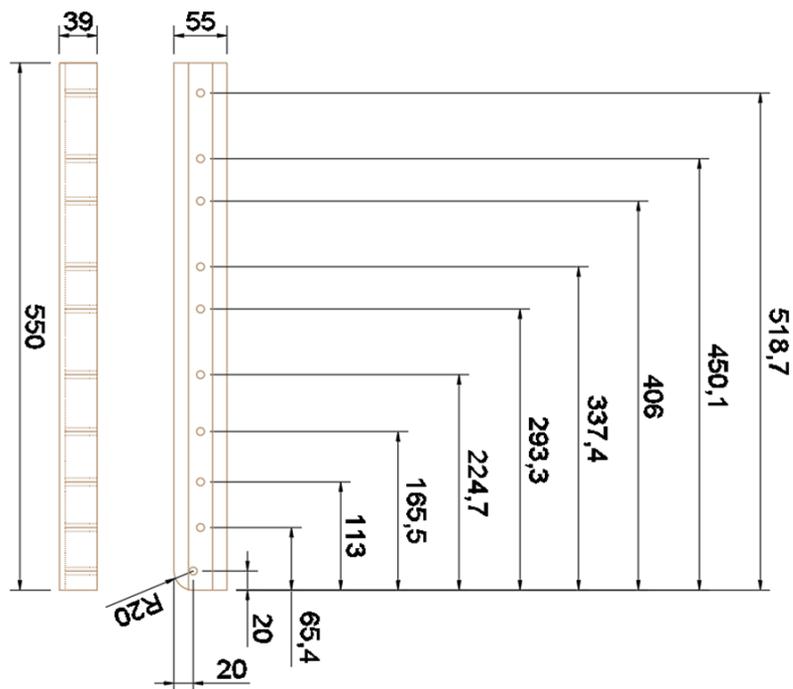
estrutura de ajuste da inclinação (A2f), que foi fabricada em madeira Itaúba, nas dimensões de 39 mm x 55 mm x 447,5 mm.

Figura 48 – Peça A2f1: Base com furos da base de sustentação da caixa do coletor



FONTE: Autor (2021).

Figura 49 – Peça A2f2: Base ajustável da base de sustentação da caixa do coletor



Fonte: Autor (2021).

Cabe salientar que o critério de seleção das bitolas das madeiras utilizadas para a fabricação das peças, bem como os fixadores utilizados na montagem da bancada de ensaios tomou por base as dimensões dos elementos de madeira e fixação normalmente utilizados para confecção das estruturas de apoio, assoalhos e guarda corpos de passarelas e outros elementos arquitetônicos de edificações públicas ou privadas. Portanto, são robustas o suficiente para se manterem estáveis mesmo estando sujeitas às diversas intempéries.

II – Sistema de automação e aquisição de dados (B)

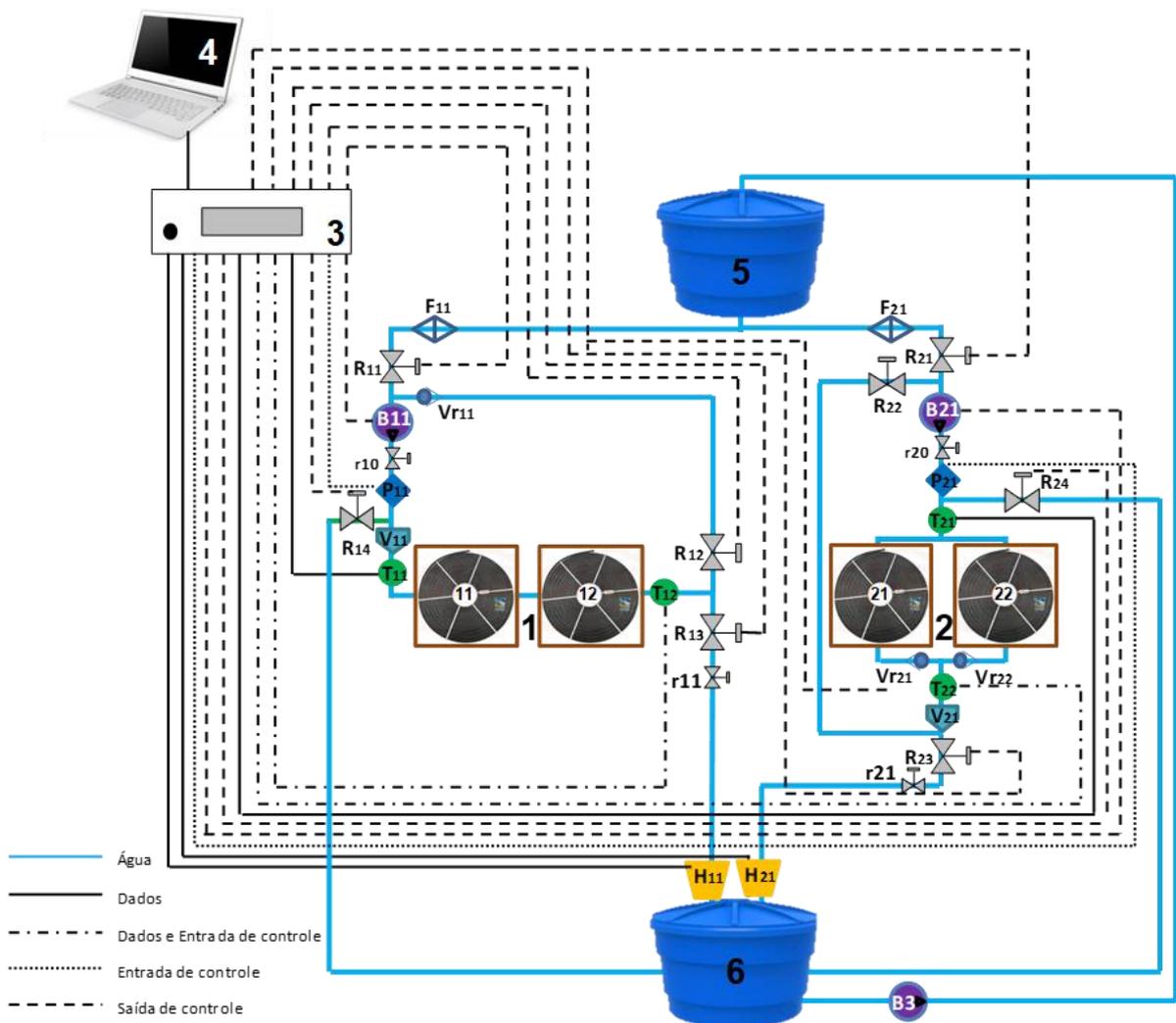
A estrutura do sistema de automação e aquisição de dados foi desenvolvida para que fossem atendidos os requisitos do projeto da bancada de ensaios, bem como viabilizados os meios para que os objetivos da pesquisa fossem alcançados, conforme apresentado na Figura 50.

Como na estrutura física, a estrutura de sinais/dados foi concebida e montada de forma independente para cada circuito. No entanto, existem alguns componentes em comum, tais como as caixas d'água, o computador e o sistema de aquisição de dados e controle *in/out*. Para os componentes em comum da bancada foram utilizados os numerais de 3 a 6. A fim de diferenciar os componentes que compõem os circuitos, visto que eles são muito semelhantes, adotou-se letras e números. A letra é para indicar o tipo de componente e um número com dois dígitos, sendo o primeiro para indicação de qual circuito é pertencente, 1 para circuito em série e 2 para circuito em paralelo, e o segundo para indicar a quantidade desse componente nos circuitos, como pode ser observado no Quadro 3.

A forma de operação dos circuitos ocorre de modo semelhante. Primeiramente, será detalhada a operação do circuito em série. Para o entendimento do circuito em paralelo, utiliza-se os mesmos componentes, alterando apenas o primeiro dígito numeral de cada componente. Após realizado o *setup* inicial de testes, ou seja, o preenchimento por completo do circuito com água e o ajuste da vazão através da regulagem de r10, inicia-se o processo de aquecimento, ficando as válvulas R11 e R13 fechadas, e a válvula R12 aberta. A bomba B11 faz com que água circule dentro do circuito fechado, realizando assim o aquecimento de água. Quando é detectado em T12 o alcance da temperatura de troca, ou seja, 45° C, um comando automatizado faz com que R11 e R13 abram e R12 feche, proporcionando a entrada de água do

reservatório e a saída da água quente. Essa condição ocorre até que a temperatura em T12 alcance os valores para o reaquecimento, 40° C e 43° C, quando a temperatura é alcançada, uma nova combinação das válvulas é acionada automaticamente, quando R11 e R13 são fechadas e R12 aberta, iniciando-se um novo processo de circulação interna, até que a temperatura de troca seja alcançada.

Figura 50 – Estrutura do sistema de automação e aquisição de dados



Fonte: Autor (2021).

Adotou-se também cores para diferenciar os circuitos, sendo o comum de ambos os circuitos com a cor verde, o circuito em série com a cor amarela e o circuito em paralelo com a cor azul.

Quadro 3 – Descrição dos componentes dos circuitos

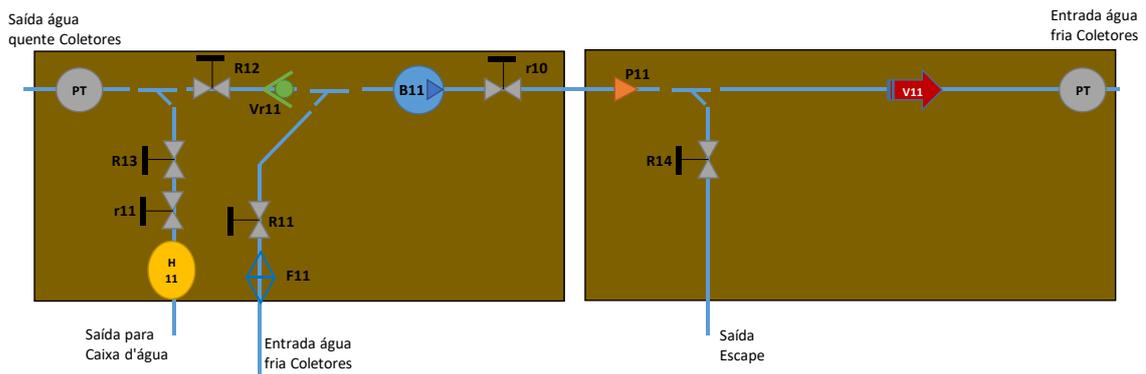
Item	Descrição
1	Coletores solares - Circuito em Série
2	Coletores solares - Circuito em Paralelo
3	Sistema de aquisição de dados e Controle de Automação
4	Computador
5	Armazenamento de água para entrada de água dos circuitos
6	Armazenamento de água para saída de água dos circuitos
11	Coletor solar 1 - Série
12	Coletor solar 2 - Série
21	Coletor solar 1 - Paralelo
22	Coletor solar 2 - Paralelo
B11	Bomba de circulação de água circuito em série
B21	Bomba de circulação de água circuito em paralelo
B3	Bomba de transferência entre reservatórios
F11	Filtro de entrada do circuito em série
F21	Filtro de entrada do circuito em paralelo
H11	Hidrômetro de água aquecida do circuito em série
H21	Hidrômetro de água aquecida do circuito em paralelo
P11	Sensor de pressão do circuito em série
P21	Sensor de pressão do circuito em paralelo
r10	Registro manual gaveta para ajuste da vazão do circuito em série
r11	Registro manual para procedimento inicial do circuito em série
R11	Registro elétrico de entrada de água do circuito em série
R12	Registro elétrico de recirculação de água do circuito em série
R13	Registro elétrico de saída de água do circuito em série
R14	Registro elétrico de segurança do circuito em série
r20	Registro manual gaveta para ajuste da vazão do circuito em paralelo
r21	Registro manual para procedimento inicial do circuito em paralelo
R21	Registro elétrico de entrada de água do circuito em paralelo
R22	Registro elétrico de recirculação de água do circuito em paralelo
R23	Registro elétrico de saída de água do circuito em paralelo
R24	Registro elétrico de segurança do circuito em paralelo
T11	Temperatura de entrada de água do circuito em série
T12	Temperatura de saída de água do circuito em série
T21	Temperatura de entrada de água do circuito em paralelo
T22	Temperatura de saída de água do circuito em paralelo
V11	Vazão de água circulando nos coletores em série
V21	Vazão de água circulando nos coletores em paralelo
Vr11	Válvula de retenção entrada de água coletores em série
Vr21	Válvula de retenção saída coletor 2.1
Vr22	Válvula de retenção saída coletor 2.2

Fonte: Autor (2021).

III – Sistema hidráulico (C)

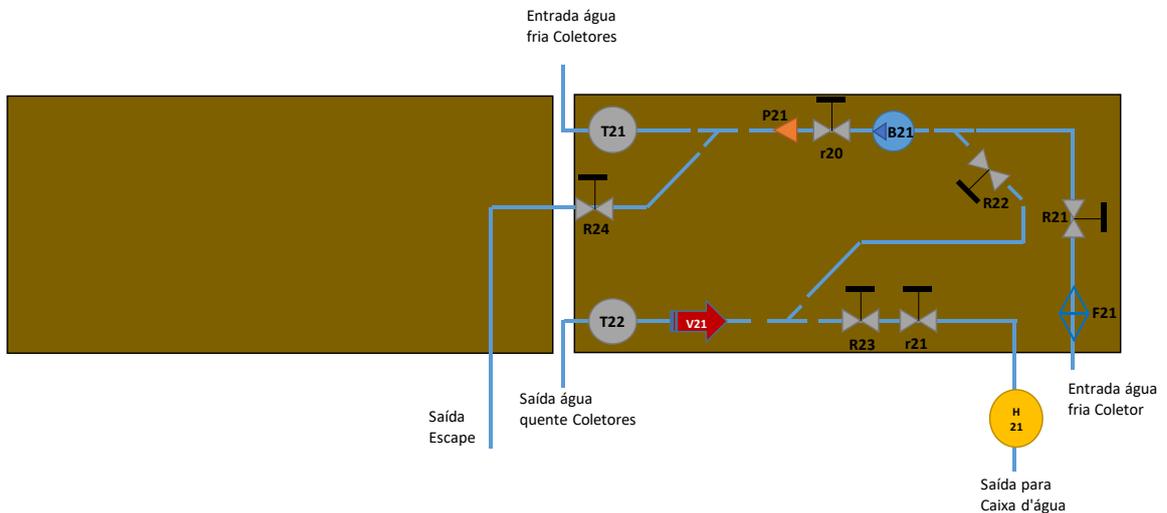
A interligação hidráulica dos circuitos corresponde ao desenvolvimento do sistema de automação e aquisição de dados, sendo definida conforme a Figura 51 para o circuito em série e Figura 52 para o circuito em paralelo.

Figura 51 – Projeto da ligação hidráulica do circuito em série



Fonte: Autor (2022).

Figura 52 – Projeto da ligação hidráulica do circuito em paralelo



Fonte: Autor (2022).

As bitolas dos componentes para a interligação hidráulica, filtro, bomba, tubulação, medidor de vazão, hidrômetro, pressostato e válvulas, foram definidas com base no diâmetro da tubulação do coletor solar, Ø20 mm no intuito de reproduzir o

que efetivamente acontece na prática nas instalações de sistemas de aquecimento de água solares.

3.1.3 Pesquisa, aquisição e calibração dos componentes e dos instrumentos de controle e aquisição de dados

Na entrada de cada circuito foi instalado um filtro Y DN15 com tela em inox e corpo em bronze de 1/2", conforme Figura 53.

Figura 53 – Filtro Y DN15



Fonte: HIDRAUNET (2022).

O componente adquirido para a medição das temperaturas dos circuitos foram termo resistências da marca WJE, conforme Figura 54, com faixa de medição de 0 a 100°C, sendo compatível com as necessidades do projeto, contendo ainda saída 4 a 20 mA. As termo resistências resultaram igualmente com $\pm 0,2$ °C de incerteza de medição em suas calibrações, conforme anexo A.

Figura 54 – Termo resistência WJE



Fonte: Autor (2022).

Como o Sistema de Aquisição de Dados possui dois tipos de entradas analógicas, sendo de 3 entradas de 0 a 5Vcc e 6 entradas de 4 a 20mA, foi escolhida a saída de 4 a 20 mA desse componente devido ao fato do sinal de corrente possuir maior imunidade contra a interferências eletromagnéticas, resultando em poucas alterações na corrente, gerando uma maior precisão de leitura.

Para a realização da leitura do volume de água aquecida foram adquiridos dois hidrômetros da marca Honeywell, do modelo S110 EPW 2,5-15-110, conforme Figura 55, com saída pulsada de 5Vcc. A leitura do volume de água aquecida foi medida em litros, e buscou utilizar o máximo de entradas possíveis disponíveis no equipamento.

Figura 55 – Hidrômetro Honeywell S110 EPW 2,5-15-110



Fonte: HIDRAUCONEX (2022).

As válvulas que proporcionaram a abertura e o fechamento de forma automática dos circuitos, para que pudesse ser possível realizar a troca de água e também a recirculação dentro dos coletores, foram as Válvulas Solenoide da marca Fluir, modelo K-2W160-15 (0-10Bar e 24 V_{cc}), conforme Figura 56.

Figura 56 – Válvula solenoide fluir K-2W160-15



Fonte: PONTO FRIO (2022).

A vazão de água pelos circuitos foi ajustada manualmente por meio do registro de gaveta de 1/2", conforme Figura 57 e, verificada pelo medidor de vazão da marca Louchen ZM, Figura 58, e do modelo Medidor de consumo, que foram calibrados em bancada conforme descrito no tópico a seguir. Tal calibração resultou que o medidor do circuito em série ficou com $\pm 0,02$ l/min na incerteza de medição e do circuito em paralelo ficou com $\pm 0,03$ l/min.

Figura 57 – Registro de gaveta de 1/2"



Fonte: MAGAZINE LUIZA (2022).

Figura 58 – Medidor de vazão Louchen ZM



Fonte: MERCADO LIVRE (2022).

No objetivo de garantir a integridade dos coletores solares, que segundo o fabricante suportam uma pressão máxima de 50 mca, introduziu-se um pressostato da marca Danfoss, do modelo KPI 35 – 0,2 a 8,0 Bar G1/4, que visa aliviar o eventual excesso da pressão, decorrente por obstrução do circuito ou falha de qualquer outro componente, conforme a Figura 59.

Figura 59 – Pressostato Danfoss KPI 35



Fonte: TOTALCOOL (2022).

Os acionamentos dos equipamentos anteriormente citados, demandou a busca no mercado de um equipamento que pudesse atender às necessidades. Para ter o conhecimento do que se fazia necessário para operacionalizar o sistema, foi realizado um projeto prévio para a interligação dos componentes. Com esse projeto em particular, chegou-se à conclusão que seriam necessárias as seguintes especificações:

- 8 saídas a relé, sendo 6 para as válvulas e 2 para as bombas;
- 4 entradas de 4 a 20mA, para a entrada de leitura das temperaturas;
- 2 entradas digitais, sendo para os pressostatos; e
- 2 entradas pulsadas, para a entrada de leitura dos hidrômetros.

O acionamento dos circuitos, a leitura da temperatura de saída que determina a abertura e fechamento das válvulas, bem como seus acionamentos, conforme mencionados anteriormente, são realizados a partir de um sistema de automação da Empresa ISSO Digital, sendo o modelo DMI A663CA 168ES, conforme Figura 60.

Esse equipamento é composto por:

- 6 entradas de 4 a 20 mA;
- 6 saídas de 0 a 10 Vcc;

- 15 entradas digitais de 12 Vcc;
- 8 saídas a relé com tensão definida;
- 3 entradas de 0 a 5 Vcc;
- 4 entradas Wiegand 26 bits.

Figura 60 – Módulo de automação e telemetria remota DMI A663CA 168ES



Fonte: Autor (2022).

O módulo de automação e telemetria remota possui uma IHM (Interface Homem Máquina) que proporciona o acionamento manual das saídas que realizam a abertura e fechamento das válvulas e também o ligamento e desligamento das bombas dos circuitos para a realização de *set-up* e ajustes de partida, conforme pode ser verificado na Figura 61.

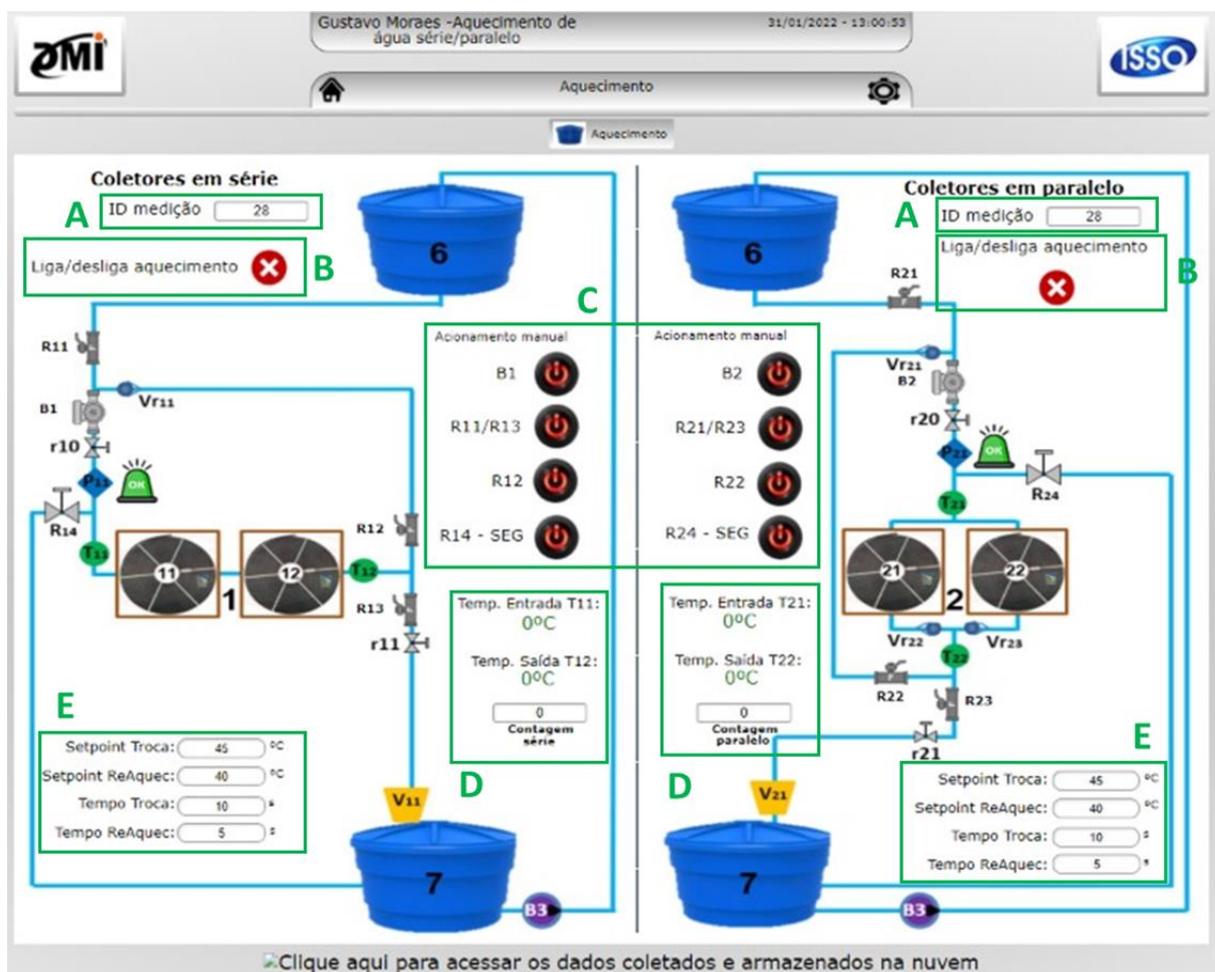
O *lay-out* da IHM foi desenvolvido pela empresa que fornece o DMI, porém, o princípio de funcionamento e a lógica da programação foi realizada em parceria entre este pesquisador e a empresa fornecedora do equipamento.

Na Figura 61 podem ser observados alguns pontos importantes para a realização dos ensaios, esses representados pelas letras de A à E, tendo um papel importante para à operação e preparação dos ensaios.

- A representa o campo que enumera os ensaios realizados, facilitando na hora da busca do histórico dos ensaios;

- B representa o botão que inicia e termina os ensaios de modo automático;
- C são os botões manuais que fazem a abertura e fechamento das válvulas e também que liga e desliga as bombas;
- D são os painéis de visualização das temperaturas em tempo real; e
- E são os campos que determinam as temperaturas de troca e de reaquecimento, bem como o tempo na qual o valor de leitura é maior/menor do valor estabelecido.

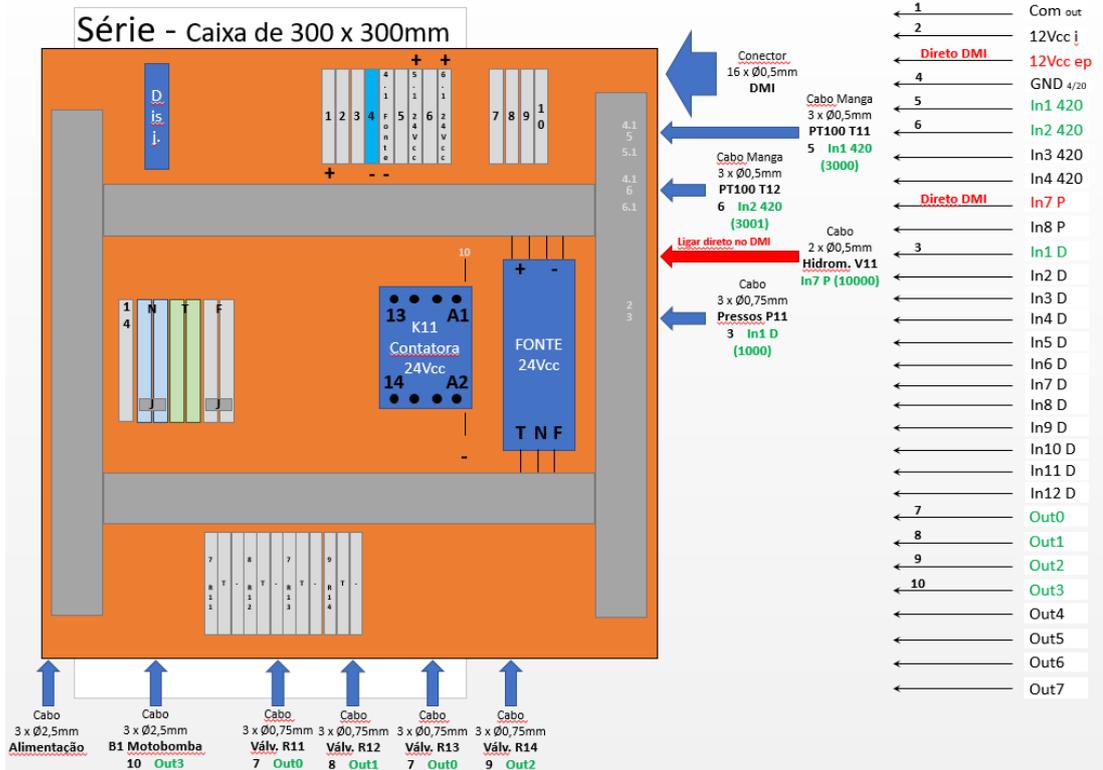
Figura 61 – IHM para o acionamento manual e automático



Fonte: Autor (2022).

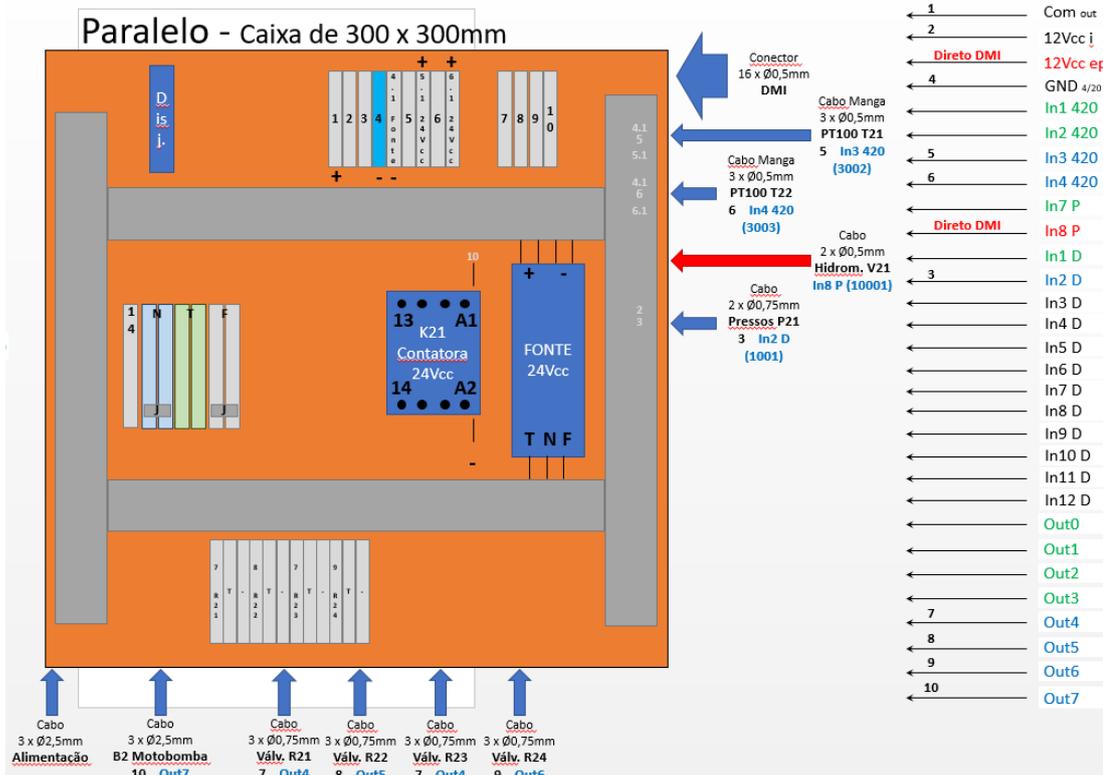
Para a realização dos acionamentos realizados pelo DMI foi necessário o projeto de duas caixas para realizar a comunicação entre o DMI e os componentes a serem acionados. A Figura 62 apresenta o projeto da caixa de comunicação do circuito em série e a Figura 63 o projeto da caixa de comunicação do circuito em paralelo.

Figura 62 – Projeto da Caixa de Ligação do circuito em série



Fonte: Autor (2022).

Figura 63 – Projeto da Caixa de Ligação do circuito em paralelo



Fonte: Autor (2022).

A bomba utilizada para realizar a circulação de água pelos coletores, a troca de água entre as caixas d'água e também para realizar a calibração dos medidores de vazão foi a bomba de engrenagem da marca Texius, sendo do modelo TBHWD-BR 100 W, conforme Figura 64.

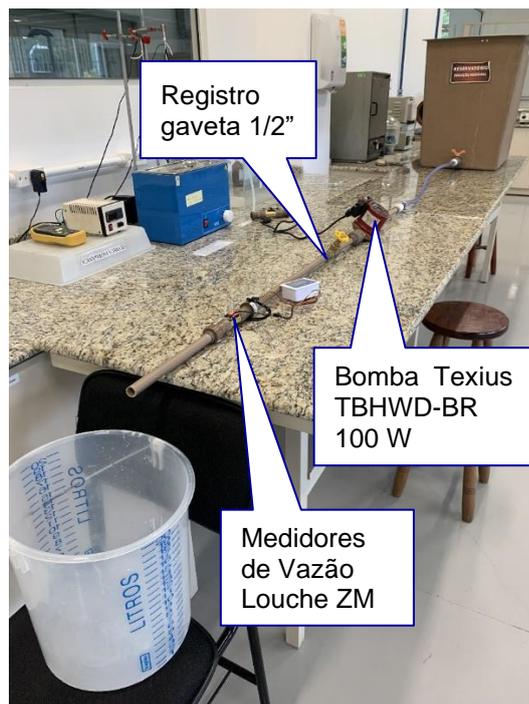
Figura 64 – Bomba Texius modelo TBHWD-BR 100 W



Fonte: TEXIUS (2022).

Os medidores de vazão da marca Louche ZM foram calibrados em bancada no laboratório de Engenharia Química e Ambiental localizado no andar térreo do bloco I da Universidade da Região de Joinville – Univille. Foi utilizada uma bomba da mesma marca e modelo utilizada nos circuitos, como pode ser observado na Figura 61.

Figura 65 – Ensaio de calibração dos medidores de vazão



Fonte: Autor (2021).

Foram realizadas medições para cada um dos dois instrumentos a fim de identificar qual seria o ajuste correspondente para uma vazão de 2,3 l/min, conforme estabelecido pela norma. Esses valores das medições podem ser confirmados na Tabela 3 para o circuito em série e na Tabela 4 para o circuito em paralelo.

Tabela 3 – Resultados dos ensaios para o medidor de vazão para o circuito em série

Vazão1 (Série)	Valor lido	Valor medido 1	Valor medido 2	Valor medido 3	Valor medido 4	Valor medido 5
1	2	2,46				
2	3	3,46				
3	2,5	2,98				
4	2,3	2,75				
5	2,1	2,61				
6	1,8	2,28	2,32	2,32	2,34	2,31
7	1,9	2,39				
8	1,7	2,22				

Fonte: Autor (2021).

Tabela 4 – Resultados dos ensaios para o medidor de vazão para o circuito em paralelo

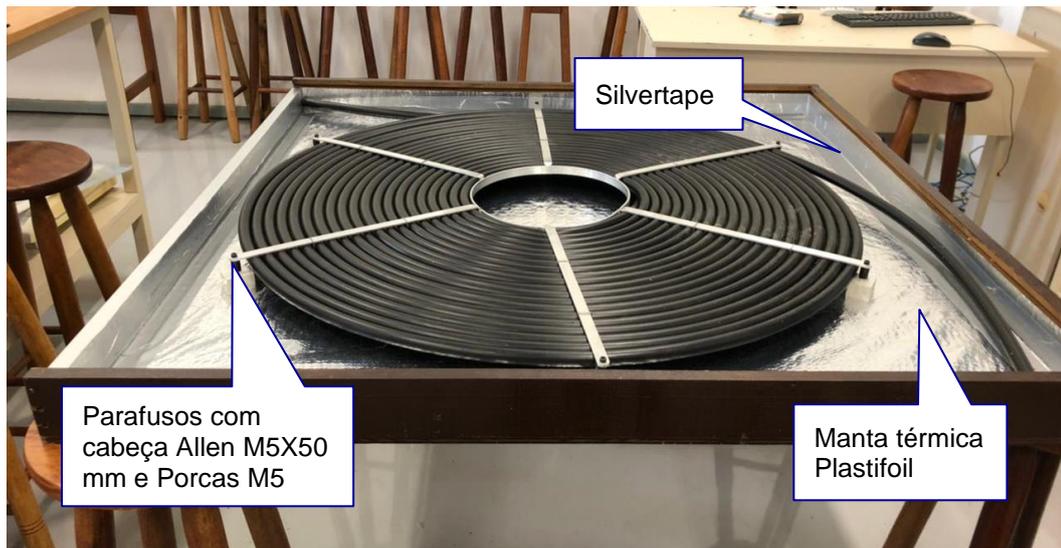
Vazão2 (Paralelo)	Valor lido	Valor medido 1	Valor medido 2	Valor medido 3	Valor medido 4	Valor medido 5
1	2					
2	3					
3	2,5					
4	2,3	2,51				
5	2,1	2,35	2,35	2,32	2,27	2,31
6	1,8	2,11				
7	1,9	2,13				
8	1,7					

Fonte: Autor (2021).

3.1.4 Preparação e montagem da bancada de ensaios

No fundo da caixa dos coletores foi adicionada uma manta térmica da marca Plastifoil com 1,2 m de largura, sendo colada com a fita Silvertape por toda a sua extremidade. Os coletores foram fixados na caixa utilizando a peça Suporte de sustentação do coletor na caixa e uso de 6 parafusos tipo Allen com cabeça M5X50 mm e porcas M5, conforme a Figura 66.

Figura 66 – Caixa para sustentação dos coletores finalizada



Fonte: Autor (2021).

Na Figura 67 pode ser observado o conjunto da base montada. A base foi nivelada com uso de nivelador a Laser Bosch GLL 2-12. Para proteção da madeira utilizada, bem como dos elementos de fixação observa-se que foram aplicadas duas demãos de esmalte sintético acetinado da marca Suvinil para madeiras e metais na cor cinza.

Figura 67 – Conjunto da base montada



Fonte: Autor (2021).

O conjunto montado da base juntamente com a caixa de sustentação dos coletores pode ser observado na Figura 68.

Figura 68 – Conjunto montado base e caixa de sustentação dos coletores



Fonte: Autor (2021).

Para cada circuito foi desenvolvida uma caixa de comunicação para receber/enviar os sinais e dados da IHM para os acionamentos de cada circuito, conforme demonstrado na Figura 69.

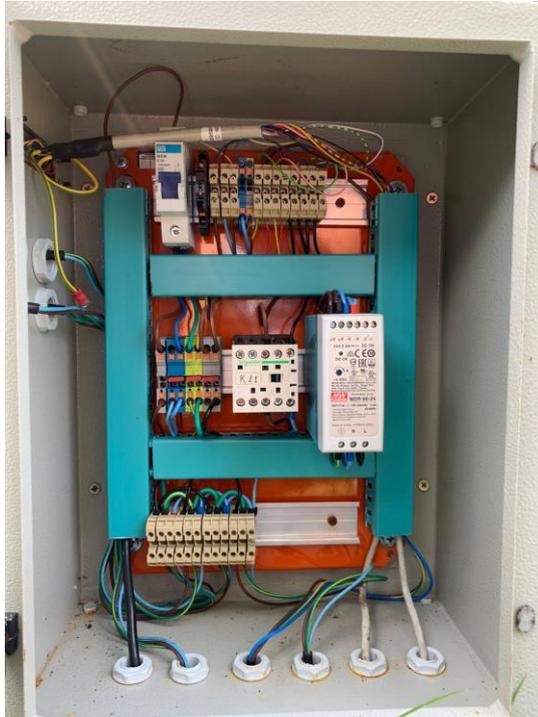
Os componentes utilizados para a montagem dos painéis foram basicamente conectores, mas para o fornecimento de V_{cc} foi utilizada uma fonte do modelo MDR-60-24 da marca MW. Devido o acionamento da bomba requiere uma tensão de 220 V_{ca} , foi necessária a instalação de um contator modelo LP1K09 O1BD3 da marca Schneider Eletric.

A conexão dos painéis de controle de cada circuito com o painel do DMI foi realizada por meio de dois conectores, conforme pode ser observado na Figura 70.

Na caixa do DMI foram instalados dois conectores da Harting, composto cada um por dois itens: Carcaça LAT PG16 HAN 16A e o Inserto Macho HAN 16A, sendo um para o circuito em série e outro para o circuito em paralelo. Possuindo, também, dois conectores na lateral da caixa para a entrada dos hidrômetros. Os cabos saem

direto do hidrômetro e se conectam direto na caixa do DMI por meio dos conectores da marca Melro, do modelo PA/P2 e JAB/P2.

Figura 69 – Caixa de comunicação e acionamentos da IHM com os acionamentos



Fonte: Autor (2022).

Figura 70 – Conectores de comunicação da caixa do DMI



Fonte: Autor (2022).

Na caixa de controle de cada circuito, a comunicação foi realizada utilizando-se os conectores da marca Harting, sendo: Base painel HAN 16A e Inserto Fêmea HAN 16A, conforme demonstrado na Figura 71.

Figura 71 – Conectores de comunicação e acionamento das caixas dos circuitos



Fonte: Autor (2022).

Como pode ser observado na Figura 71, para garantir robustez às conexões elétricas e de dados, foram utilizados prensa cabos em todas as saídas de cabos das caixas do DMI, bem como na caixa de controle dos circuitos.

Para garantir o posicionamento e a integridade dos circuitos os instrumentos de controle, aquisição de dados, as bombas e a tubulação propriamente dita de diâmetro 20 mm do circuito hidráulico foram fixados sobre uma prancha de madeira de Itaúba com 25 mm de espessura, conforme mostrado na Figura 72 para o circuito em série e na Figura 73 para o circuito em paralelo.

Figura 72 – Circuito hidráulico do sistema de coletores associados em série



Fonte: Autor (2022).

Figura 73 – Circuito hidráulico do sistema de coletores associados em paralelo



Fonte: Autor (2022).

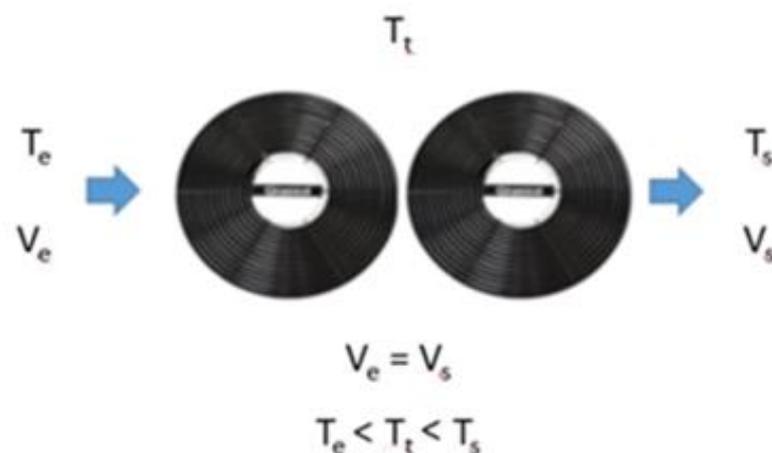
3.2 Fase UVB – Execução dos ensaios

Nessa fase, inicialmente, foi realizada toda a preparação para a execução dos ensaios, iniciando-se com os ajustes operacionais e *setup*, que compreenderam a realização de ensaios preliminares para ajustes finos dos componentes e avaliação do comportamento global da bancada. Com a completa estabilização do sistema realizou-se a série de ensaios que foram considerados para análise da performance de coletores solares para aquecimento de água quando associados em série ou em paralelo

3.2.1 Ajustes operacionais e *setup*

As Figuras 74 e 75 apresentam, respectivamente, uma análise teórica do comportamento da vazão e das temperaturas em cada um dos conjuntos, associados em série e em paralelo.

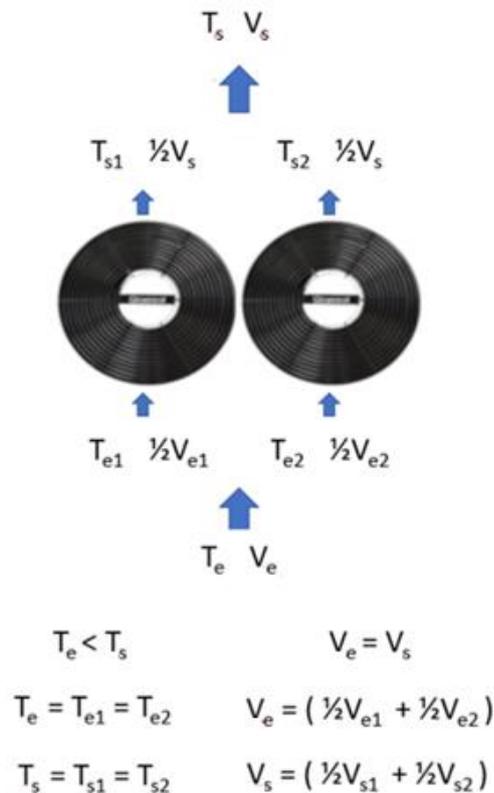
Figura 74 – Comportamento da temperatura e vazão no circuito em série



Fonte: Autor (2022).

Observa-se que no circuito em paralelo, a vazão é a mesma que passa por ambos os coletores solares, ou seja, $V_e = V_s$. Porém, a temperatura de saída de cada coletor é aumentada quando a água sai de um coletor e adentra noutro, sendo ainda mais elevada quando sai do segundo coletor, $T_e < T_t < T_s$.

Figura 75 – Comportamento da temperatura e vazão no circuito em paralelo



Fonte: Autor (2022).

O comportamento da vazão e da temperatura no circuito em paralelo difere-se totalmente do circuito em série, pois a temperatura de entrada da água em cada coletor é a mesma, $T_e = T_{e1} = T_{e2}$. Porém, esta temperatura é menor em relação à temperatura que sai dos coletores, $T_e < T_s$. A temperatura de saída também é igual para ambos os coletores, $T_s = T_{s1} = T_{s2}$. A vazão de entrada e de saída são iguais, porém, se dividem na entrada $V_e = (\frac{1}{2}V_{e1} + \frac{1}{2}V_{e2})$ e se somam na saída $V_s = (\frac{1}{2}V_{s1} + \frac{1}{2}V_{s2})$. Ou seja, a vazão de entrada é a soma das vazões de cada um dos coletores, ocorrendo o mesmo para a saída desses coletores.

O balanceamento da vazão através do circuito em paralelo pôde ser confirmado a partir de ensaios preparatórios, nos quais verificou-se que o tempo de troca no circuito em série foi o mesmo no circuito em paralelo, ou seja, a vazão de ambos os circuitos deve ser a mesma 2,3 l/min. No circuito em série, a vazão da água que flui nos coletores é integral e no circuito em paralelo é dividida, com isso, a distância percorrida pela água nesse circuito é a metade do circuito em série. Logo, o tempo de troca de ambos os circuitos tem que ter os valores de volume e tempo semelhantes.

A segurança funcional dos circuitos é garantida por meio de um pressostato Danfoss KPI 35 instalado na saída da bomba, logo após o registro de esfera. O pressostato foi calibrado para ser acionado caso o circuito alcance 50% da pressão máxima suportada pelos coletores que é de 50 mca. Logo, o pressostato foi ajustado para aliviar a pressão a partir de 25 mca.

3.2.2 Ensaios iniciais para ajustes funcionais da bancada

Após a realização de todos os ajustes necessários e a estabilização por meio dos *setups*, os ensaios foram iniciados no dia 30/11/2021 e concluídos no dia 16/01/2022. Esses ensaios iniciais serviram para prover a este pesquisador uma maior familiaridade com a operação da bancada, além de definir as condições necessárias para que se pudesse realizar ensaios com duração de um dia completo

Durante a execução dos ensaios preparatórios ocorreu a perda de duas bombas do circuito em paralelo. Ao realizar uma análise do problema ocorrido, concluiu-se que, devido à baixa vazão na saída dos coletores, o fluxo da água não era o suficiente para expulsar o ar de dentro do circuito. Parte do ar confinado no circuito era direcionado para a bomba, ocasionando o seu superaquecimento. Para eliminar totalmente o ar retido no sistema e, portanto, resolver esse problema, utilizou-se do princípio de vasos comunicantes, elevando-se a mangueira de saída da água para o mesmo nível das saídas dos coletores. Garantiu-se, assim, que a tubulação que interliga os coletores ficasse completa de água durante a circulação e durante as trocas de água pré-aquecida, como pode ser visualizado na Figura 76.

Figura 76 – Elevação da mangueira de saída de água aquecida do circuito paralelo



Fonte: Autor (2022).

3.2.3 Execução dos ensaios

Foram realizados 6 ensaios no período entre os dias 17/01/2022 à 24/01/2022, iniciando-se no período da manhã entre 9h10min e 9h30min, e finalizando-se no período da tarde entre 17h22min e 17h38min. Os ensaios foram realizados com uma diferença na temperatura de reaquecimento, sendo três deles realizados com o valor de 40° C e os outros três com o valor de 43° C, conforme demonstrado no Quadro 4.

Quadro 4 – Dados dos ensaios realizados ordenado por data

Ensaio	Temperatura para reaquecimento [°C]	Temperatura para troca [°C]	Data [d/mm/a]	Início [h:min]	Término [h:min]
1	40	45	17/01/2022	9:10	17:22
2	43	45	20/01/2022	9:20	17:30
3	43	45	21/01/2022	9:30	17:38
4	40	45	22/01/2022	9:25	17:35
5	43	45	23/01/2022	9:30	17:33
6	40	45	24/01/2022	9:23	17:33

Fonte: Autor (2022).

3.3 Fase UVC – Tratamento dos dados e análise dos resultados

Essa última fase contempla as etapas do que foi planejado e executado durante todo o período dedicado ao desenvolvimento desse estudo, iniciando com a organização dos dados coletados, para posteriormente realizar a tabulação e tratamento dos mesmos e por último a análise dos resultados e conclusões.

3.3.1 Organização dos dados coletados

A seguir, são apresentados o conjunto de dados que foram coletados pelo Sistema de Aquisição de Dados na realização dos ensaios. Os dados agrupados para posterior análise foram:

- Temperatura de entrada de água do circuito em série;
- Temperatura de saída de água do circuito em série;
- Temperatura de entrada de água do circuito em paralelo;
- Temperatura de saída de água do circuito paralelo;

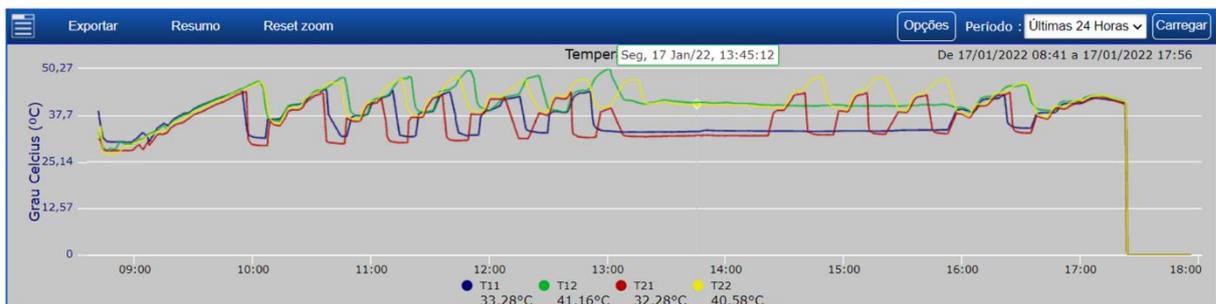
- Volume de água aquecida do circuito em série e;
- Volume de água aquecida do circuito em paralelo.

Nos gráficos de temperaturas e volumes foram utilizadas siglas para identificar sua localização, e circuito ao qual pertence:

- T_{11} (Temperatura de entrada de água do circuito em série);
- T_{12} (Temperatura de saída de água do circuito em série);
- T_{21} (Temperatura de entrada de água do circuito em paralelo);
- T_{22} (Temperatura de saída de água do circuito em paralelo);
- V_{11} (Volume de água aquecida do circuito em série); e
- V_{21} (Volume de água aquecida do circuito em paralelo).

Na Figura 77 estão apresentados os resultados das temperaturas obtidas nos circuitos, sendo possível selecionar quais as temperaturas deverão ser representadas no gráfico.

Figura 77 – Demonstração dos gráficos de temperaturas



Fonte: Autor (2022).

No gráfico da Figura 77 observa-se que no eixo das abscissas está representado o horário (em horas) da coleta dos dados e, no eixo das ordenadas, a temperatura correspondente (em graus Celsius). As curvas de temperaturas estão representadas por cores, ficando sua identificação da seguinte forma:

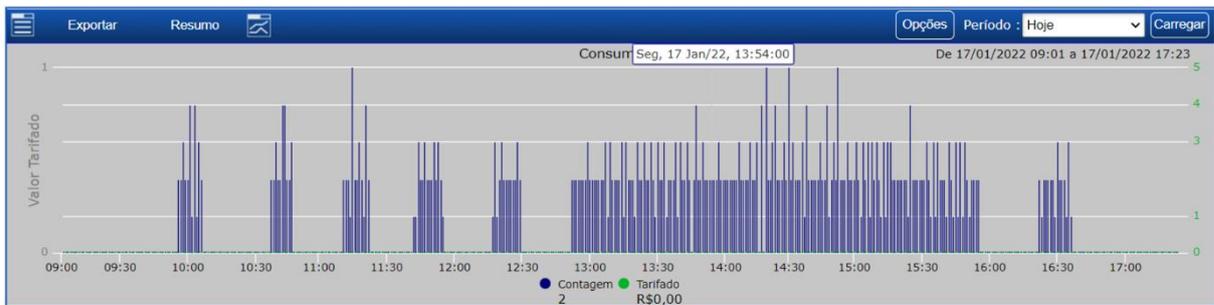
- T_{11} em azul;
- T_{12} em verde;
- T_{21} em vermelho; e
- T_{22} em amarelo.

Com a programação desenvolvida é possível determinar quais as temperaturas se desejam apresentar no gráfico. Essa seleção possibilita a visualização do comportamento individual das temperaturas dos circuitos, bem como a opção de

selecionar as temperaturas de um único circuito. Além disso, permite apresentar as temperaturas de entrada e ou de saída de ambos os circuitos.

No gráfico da Figura 78, estão apresentados os resultados de volume de água aquecida dos circuitos.

Figura 78 – Demonstração dos gráficos de volume de água aquecida



Fonte: Autor (2022).

Neste gráfico, no eixo das abscissas representou-se o tempo (em horas) e no eixo das ordenadas o volume de água aquecida correspondente (em litros).

3.3.2 Tabulação e tratamento dos dados coletados

No final de cada ensaio, os dados coletados foram exportados para uma planilha padronizada (ver Tabela 5), na qual podem ser observados o conjunto completo dos parâmetros de cada troca de água aquecida realizada. A Tabela 5 contém informações como: horário de início do ensaio, temperatura máxima alcançada e o horário que ela ocorreu, horário de término do ensaio, temperatura mínima alcançada pela água e a horário que ela ocorreu, bem como o volume total de litros de água aquecida, o tempo total e a vazão de operação, sendo todos esses dados individuais por circuito. Ao final de cada ensaio é possível realizar um comparativo de tempo entre os circuitos em série e paralelo indicando quem começou a troca primeiro e quanto tempo de defasagem houve entre eles. Tendo ainda no final a somatória e a média de litros de água aquecida, o tempo total de operação, a média do tempo das trocas e a média da vazão, sendo também esses dados fornecidos por circuito.

Os dados de início e término das trocas são confirmados no gráfico de temperaturas e também no gráfico de vazões para ambos os circuitos.

Tabela 5 – Formato da Tabela para inserção dos dados coletados

17/01/2022																				
ENSAIO	Temperatura Reaquece	Temperatura Troca	Hora Início	Hora Término	Circuitos	Posição chave bomba	Início	Término	Diferença	Lts	%	Qtde troca	Média lts por troca	Temperatura início queda	Hora início queda					
	°C	°C	:	:	Série Paralelo															
Qtde de Trocas	Início	Temper. máxima	Hora	Término	Temper. mínima	Hora	Litros	Tempo total	Vazão	Início	Temper. máxima	Hora	Término	Temper. mínima	Hora	Litros	Tempo total	Vazão	Defasagem Início S - p	
1																				
2																				
3																				
4																				
5																				
6																				
7																				
8																				
9																				
10																				
11																				
12																				
TOTAL							0	00:00								0	00:00			
MÉDIA							0,00	00:00								0,00	00:00			0,00

Fonte: Autor (2022).

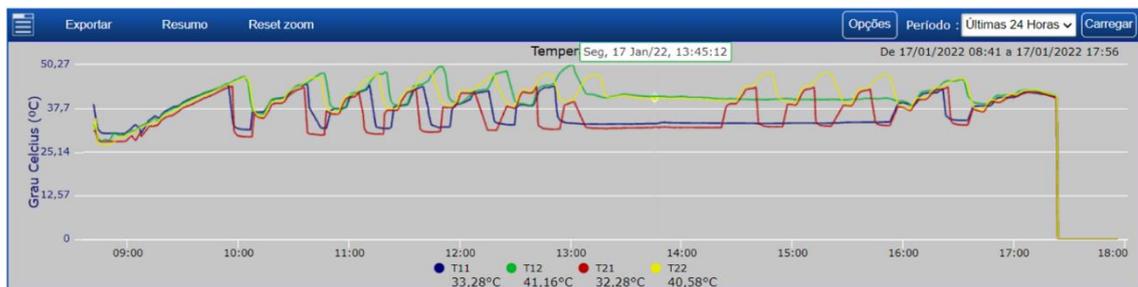
3.3.3 Análise dos resultados e conclusões

Neste item, serão apresentados os resultados e as conclusões acerca dos ensaios realizados. É importante observar que as informações dos gráficos do ensaio 1, as temperaturas e vazões, bem como as informações da Tabela dos dados detalhados, possuem comentários e a justificativa para sua utilização. Como esses mesmos comentários e justificativa de utilização se aplicam aos demais 5 ensaios realizados, a partir do ensaio 2, serão apresentados somente os gráficos e as suas respectivas tabelas.

Ensaio 1

Na Figura 79 são demonstrados os comportamentos das temperaturas de ambos os circuitos no ensaio 1.

Figura 79 – Temperaturas de entrada e saída dos circuitos no ensaio 1

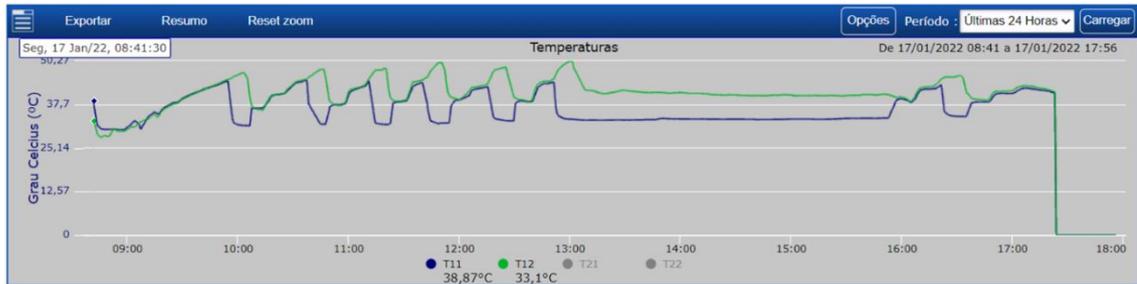


Fonte: Autor (2022).

Observa-se uma semelhança e um padrão entre elas, mas a fim de possibilitar uma melhor análise do comportamento, foi realizada a separação por circuito, sendo que a Figura 80 representa as temperaturas do circuito em série e a Figura 81 representa as temperaturas do circuito em paralelo.

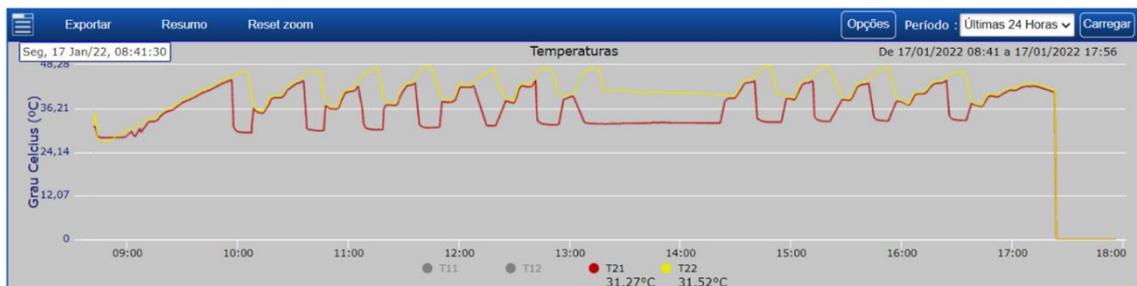
Com a separação por circuito, fica mais claro o comportamento das temperaturas na entrada e na saída dos circuitos, facilitando a interpretação gráfica. Alinhado com objetivo desse trabalho de pesquisa que visa avaliar o volume de água aquecida, tem-se dois gráficos mais importantes, o gráfico que agrupa as temperaturas de saídas dos circuitos e o gráfico que apresenta o volume de água quente produzida.

Figura 80 – Temperaturas de entrada e saída do circuito série no ensaio 1



Fonte: Autor (2022).

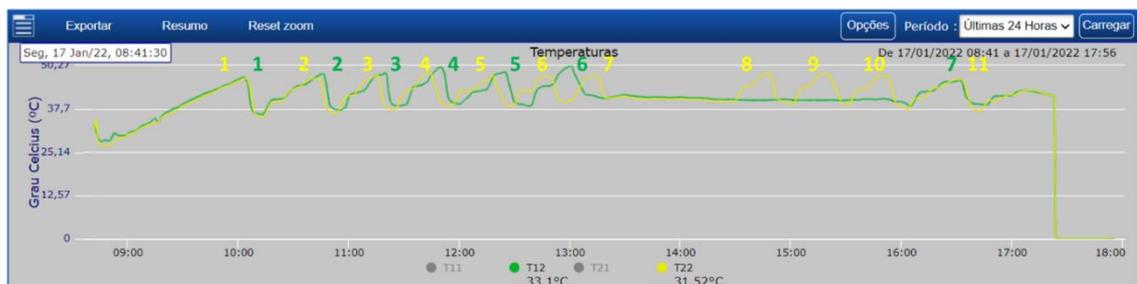
Figura 81 – Temperaturas de entrada e saída do circuito paralelo no ensaio 1



Fonte: Autor (2022).

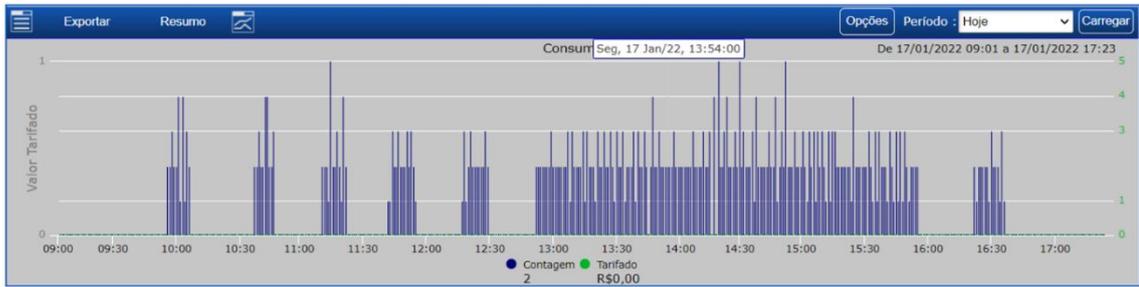
As temperaturas de saídas dos circuitos encontram-se representadas pela Figura 82, que mostra também a quantidade de trocas de água realizadas pelos circuitos nesse ensaio. As Figuras 83 e 84, apresentam os horários em que foram realizadas as trocas de água pelos circuitos, sendo estes do circuito em série e paralelo, respectivamente.

Figura 82 – Temperaturas de saída dos circuitos e quantidade de trocas no ensaio 1



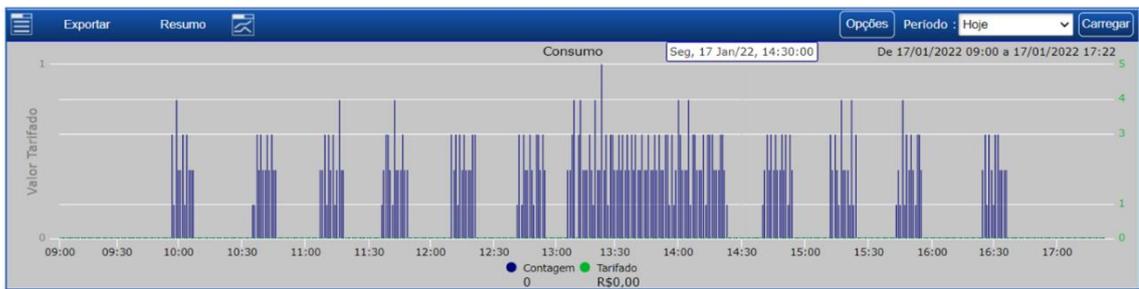
Fonte: Autor (2022).

Figura 83 – Volume de água aquecida e quantidade de trocas do circuito série no ensaio 1



Fonte: Autor (2022).

Figura 84 – Volume de água aquecida e quantidade de trocas do circuito paralelo no ensaio 1



Fonte: Autor (2022).

Tabela 6 – Dados detalhados do ensaio 1

17/01/2022																			
ENSAIO	Temperatura Reaquece	Temperatura Troca	Hora Início	Hora Término	Circuitos	Posição chave bomba	Início	Término	Diferença	Lts	%	Qtd de troca	Média lts por troca	Temperatura Início queda	Hora Início queda	Defasagem Início S - P			
1	40°C	45°C	09:10	17:22	Série	1	3,41558	3,97662	0,56104	561,04	19,9%	7	80,15	43,09	17:07				
					Paralelo	1	3,01254	3,48042	0,46788	467,88	-16,6%	11	42,53	43,1	17:11				
Qtd de Trocas	Início	Temper. máxima	Hora	Término	Temper. mínima	Hora	Litros	Tempo total	Vazão	Início	Temper. máxima	Hora	Término	Temper. mínima	Hora	Litros	Tempo total	Vazão	Defasagem Início S - P
1	09:56	46,83	10:03	10:07	36,13	10:13	26	00:11	2,36	09:57	46,53	10:03	10:07	35,33	10:14	25	00:10	2,50	-00:01
2	10:38	47,82	10:46	10:48	37,36	10:56	26	00:10	2,60	10:35	46,49	10:38	10:46	36,55	10:54	26	00:11	2,36	00:03
3	11:11	48,13	11:19	11:23	38,58	11:26	28	00:12	2,33	11:07	47,76	11:15	11:18	37,49	11:25	27	00:11	2,45	00:04
4	11:42	49,70	11:51	11:55	39,03	12:00	29	00:13	2,23	11:37	48,28	11:44	11:49	38,44	11:56	29	00:12	2,42	00:05
5	12:17	48,44	12:25	12:30	38,47	12:37	27	00:13	2,08	12:10	47,44	12:18	12:21	38,32	12:29	29	00:11	2,64	00:07
6	12:52	50,27	13:01	15:55	38,34	16:05	397	03:03	2,17	12:41	47,49	12:49	12:54	39,59	12:56	31	00:13	2,38	00:11
7	16:22	46,16	16:32	16:36	38,89	16:44	28	00:14	2,00	13:06	47,33	13:12	14:23	39,58	14:29	183	01:17	2,38	03:16
8										14:40	48,14	14:49	14:54	39,00	15:01	34	00:14	2,43	
9										15:12	48,03	15:19	15:24	38,85	15:31	30	00:12	2,50	
10										15:43	47,41	15:52	15:55	37,29	16:03	28	00:12	2,33	
11										16:25	46,47	16:33	16:36	37,02	16:43	26	00:11	2,36	
12																			
TOTAL							561	04:16								468	03:14		
MÉDIA							80,14	00:36	2,25							42,55	00:17	2,43	

Fonte: Autor (2022).

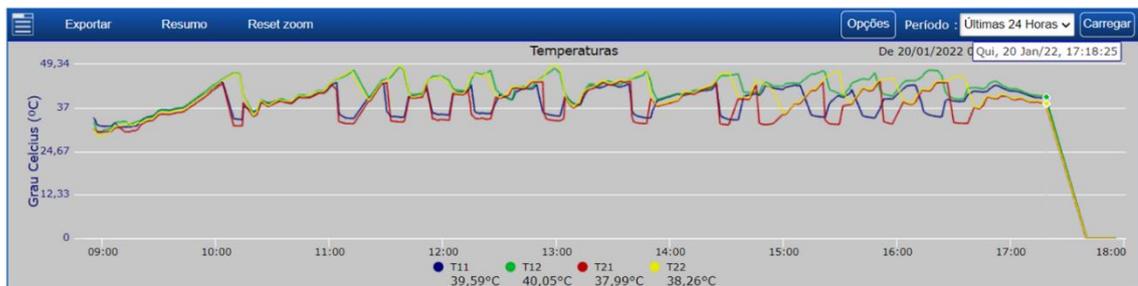
No ensaio 1 (Tabela 6), para o qual o valor de reaquecimento foi definido como 40 °C, o circuito em série aqueceu 561 L de água com a realização de 7 trocas. Já o circuito em paralelo, mesmo tendo mais trocas realizadas, 11 no total, teve um volume de água aquecida menor, de 468L. Essas 11 trocas do circuito em paralelo tiveram em média 12 min de operação, tendo uma única, a sétima troca, com uma duração de 1h17min, e com um volume de 183L de água aquecida a 45 °C. No entanto, as 7

trocas realizadas pelo circuito em série, teve uma troca que teve a duração de 3h03 min, sendo responsável pelo aquecimento de 397 L de água somente nessa troca. série, teve uma troca que teve a duração de 3:03 minutos, sendo responsável pelo aquecimento de 397 L somente nessa troca.

Ensaio 2

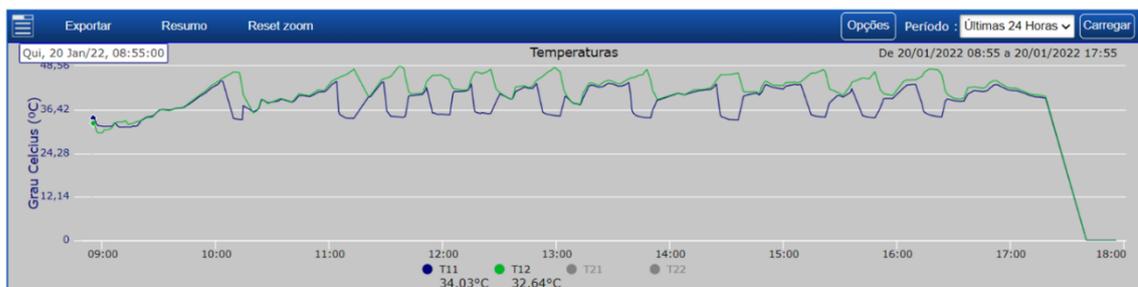
As Figuras de 85 a 90 e a Tabela 7, apresentam os dados e informações obtidas a partir do ensaio 2.

Figura 85 – Temperaturas de entrada e saída dos circuitos no ensaio 2



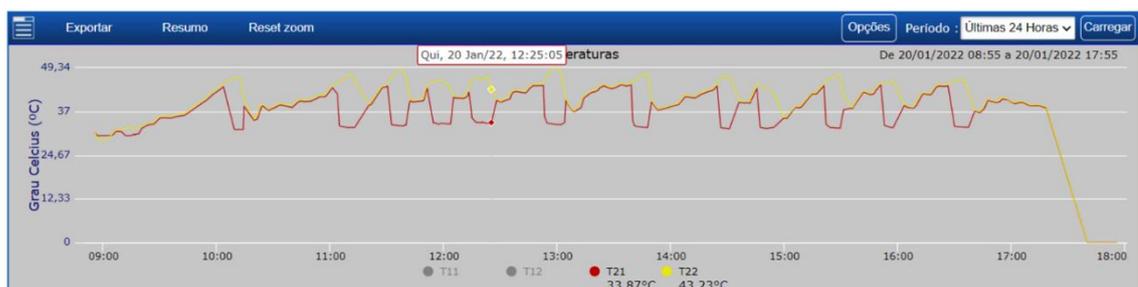
Fonte: Autor (2022).

Figura 86 – Temperaturas de entrada e saída do circuito série no ensaio 2



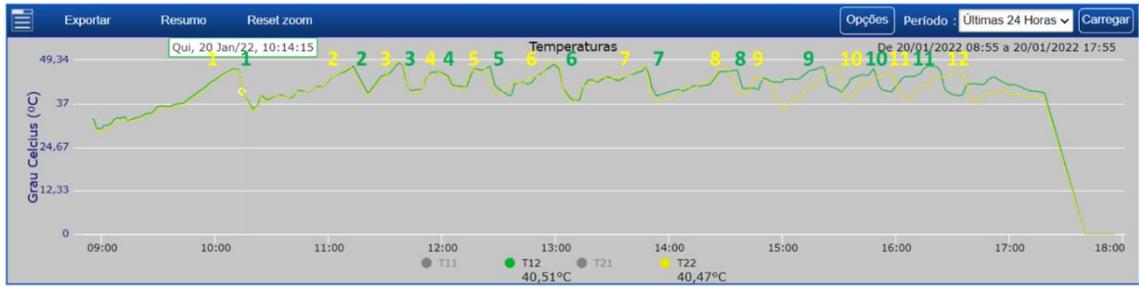
Fonte: Autor (2022).

Figura 87 – Temperaturas de entrada e saída do circuito paralelo no ensaio 2



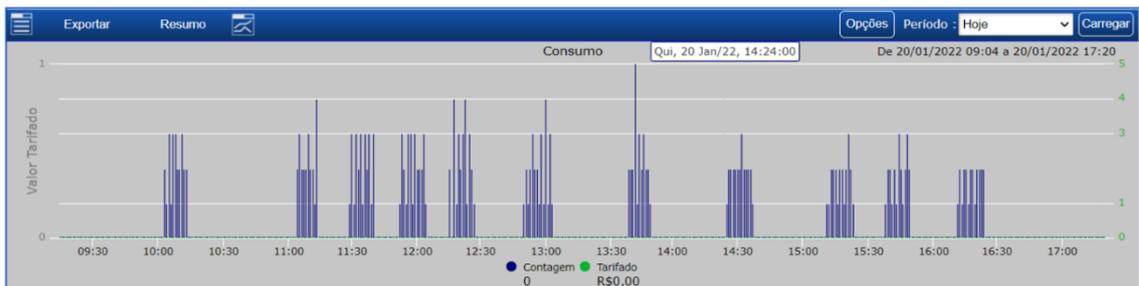
Fonte: Autor (2022).

Figura 88 – Temperaturas de saída dos circuitos e quantidade de trocas no ensaio 2



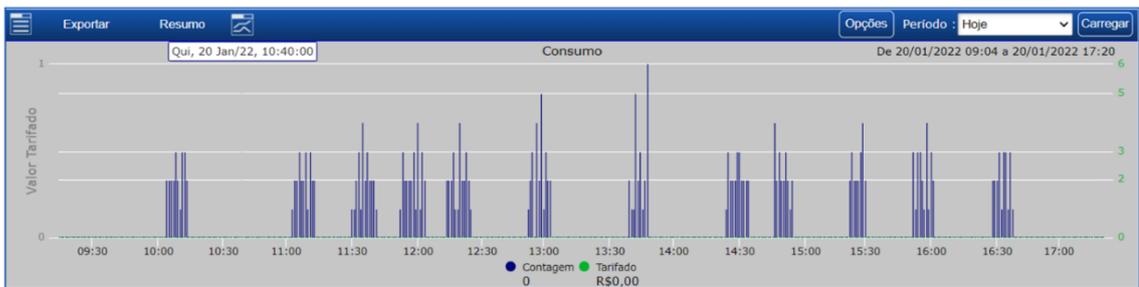
Fonte: Autor (2022).

Figura 89 – Volume de água aquecida e quantidade de trocas do circuito série no ensaio 2



Fonte: Autor (2022).

Figura 90 – Volume de água aquecida e quantidade de trocas do circuito paralelo no ensaio 2



Fonte: Autor (2022).

Tabela 7 – Dados detalhados do ensaio 2

ENSAIO		20/01/2022																	
2	Temperatura Resaque	Temperatura Troca	Hora Início	Hora Término	Circuitos	Posição chave bomba	Início	Término	Diferença	Lts	%	Qtde troca	Média lts por troca	Temperatura início queda	Hora início queda				
	43°C	45°C	09:20	17:30	Série	1	4,30757	4,57847	0,2709	270,9	-3,3%	11	24,63	44,47	16:51				
					Paralelo	1	3,78556	4,06578	0,28022	280,22	3,4%	12	23,35	41,08	16:55				
Qtde de Trocas	Série														Defasagem Início S - P				
	Início	Temper. máxima	Hora	Término	Temper. mínima	Hora	Litros	Tempo total	Vazão	Início	Temper. máxima	Hora	Término	Temper. mínima		Hora	Litros	Tempo total	Vazão
1	10:03	46,85	10:09	10:13	35,47	10:19	24	00:10	2,40	10:04	46,63	10:10	10:13	34,84	10:19	22	00:09	2,44	-00:01
2	11:04	47,38	11:12	11:14	40,08	11:19	23	00:10	2,30	11:03	47,47	11:11	11:13	39,14	11:19	23	00:10	2,30	00:01
3	11:29	48,77	11:37	11:40	40,38	11:46	26	00:11	2,36	11:30	48,94	11:36	11:42	39,56	11:45	24	00:12	2,00	-00:01
4	11:52	47,61	12:01	12:04	41,82	12:11	27	00:12	2,25	11:52	47,82	12:01	12:03	41,05	12:10	26	00:11	2,36	00:00
5	12:15	47,38	12:24	12:28	39,43	12:36	26	00:13	2,00	12:14	46,97	12:22	12:25	39,04	12:33	25	00:11	2,27	00:01
6	12:50	48,82	13:00	13:03	37,53	13:11	27	00:13	2,08	12:52	49,41	12:59	13:03	36,72	13:11	25	00:11	2,27	-00:02
7	13:39	47,28	13:47	13:50	37,46	14:00	25	00:11	2,27	13:39	47,87	13:47	13:48	36,68	13:56	23	00:09	2,56	00:00
8	14:25	47,94	14:35	14:37	40,88	14:47	25	00:12	2,08	14:24	47,95	14:32	14:34	39,74	14:41	24	00:10	2,40	00:01
9	15:11	47,57	15:21	15:22	40,27	15:31	22	00:11	2,00	14:46	45,02	14:45	14:54	35,33	15:00	21	00:08	2,63	00:25
10	15:38	46,90	15:48	15:49	40,21	15:58	22	00:11	2,00	15:21	47,61	15:29	15:30	38,10	15:37	23	00:09	2,56	00:17
11	16:12	47,67	16:17	16:24	39,34	16:34	22	00:12	1,83	15:52	46,62	15:59	16:01	38,23	16:08	23	00:09	2,56	00:20
12										16:28	45,93	16:33	16:37	36,86	16:44	21	00:09	2,33	
TOTAL							269	02:06								280	01:58		
MÉDIA							24,45	00:11	2,14							23,33	00:09	2,39	

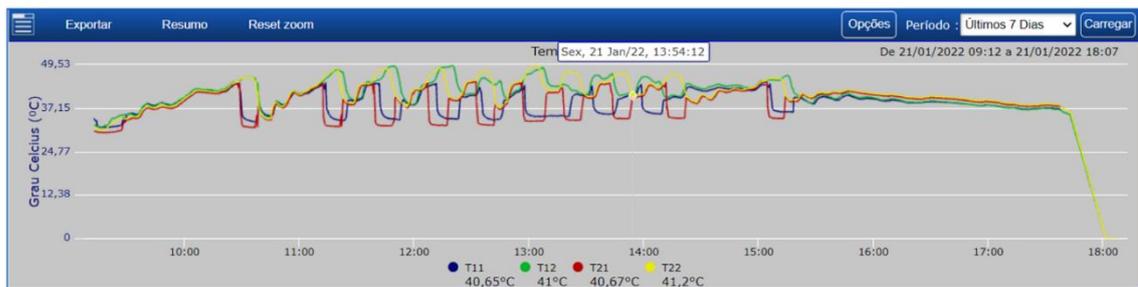
Fonte: Autor (2022).

No ensaio 2 (Tabela 7), para o qual o valor de reaquecimento foi definido como 43 °C, o circuito em série aqueceu 271L de água com a realização de 11 trocas. Já o circuito em paralelo teve 12 trocas e aqueceu um total de 280L de água. Observa-se que nessa temperatura não ocorreu uma troca de longa duração em nenhum dos dois circuitos. Um fato que chamou a atenção é que no circuito em série não ocorreu uma troca a mais, pois no final do dia, a água alcançou o valor de 44,47 °C, ou seja, faltou apenas 0,53 °C para que a mesma alcançasse o valor de troca.

Ensaio 3

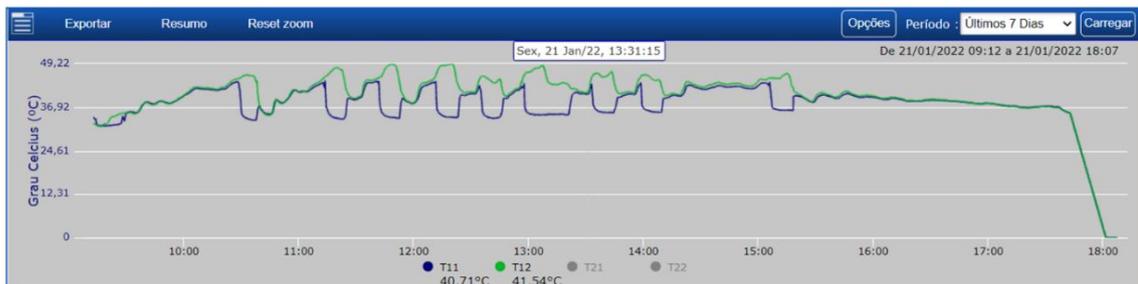
As Figuras de 91 a 96 e a Tabela 8, apresentam os dados e informações obtidas a partir do ensaio 3.

Figura 91 – Temperaturas de entrada e saída dos circuitos no ensaio 3



Fonte: Autor (2022).

Figura 92 – Temperaturas de entrada e saída do circuito série no ensaio 3



Fonte: Autor (2022).

Figura 93 – Temperaturas de entrada e saída do circuito paralelo no ensaio 3



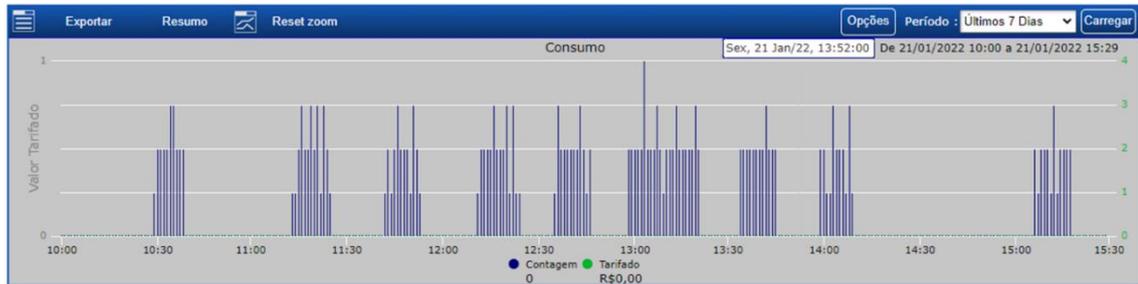
Fonte: Autor (2022).

Figura 94 – Temperaturas de saída dos circuitos e quantidade de trocas no ensaio 3



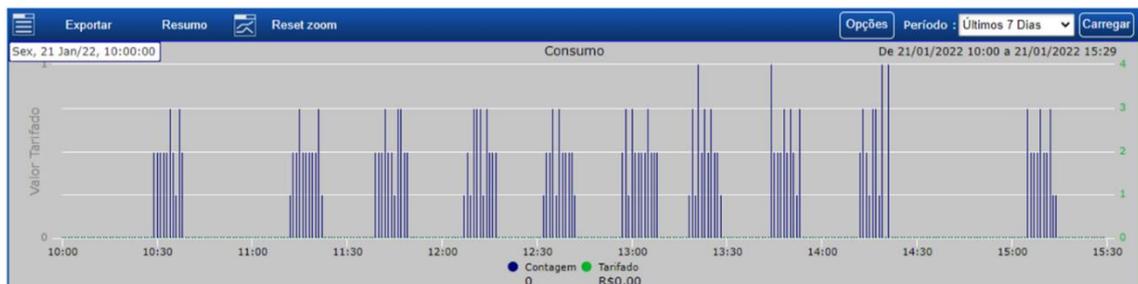
Fonte: Autor (2022).

Figura 95 – Volume de água aquecida e quantidade de trocas do circuito série no ensaio 3



Fonte: Autor (2022).

Figura 96 – Volume de água aquecida e quantidade de trocas do circuito paralelo no ensaio 3



Fonte: Autor (2022).

Tabela 8 – Dados detalhados do ensaio 3

ENSAIO																			
21/01/2022																			
3	Temperatura Reaquece	Temperatura Troca	Hora Início	Hora Término	Circuitos	Posição chave bomba	Início	Término	Diferença	Lts	%	Qtde troca	Média lts por troca	Temperatura início queda	Hora início queda				
	43°C	45°C	09:30	17:38	Série	1	4,61626	4,85421	0,23795	237,95	3,6%	9	26,44	41,41	15:46				
					Paralelo	1	4,11037	4,34011	0,22974	229,74	-3,5%	10	22,97	42,24	15:46				
Qtd de Trocas	Série								Paralelo								Defasagem Início S-P		
	Início	Temper. máxima	Hora	Término	Temper. mínima	Hora	Litros	Tempo total	Vazão	Início	Temper. máxima	Hora	Término	Temper. mínima	Hora	Litros		Tempo total	Vazão
1	10:29	46,04	10:33	10:38	34,59	10:45	21	00:09	2,33	10:29	45,97	10:33	10:38	34,02	10:44	21	00:09	2,33	00:00
2	11:13	48,11	11:20	11:25	39,39	11:29	26	00:12	2,17	11:12	48,48	11:19	11:22	38,44	11:28	22	00:10	2,20	00:01
3	11:42	49,09	11:49	11:53	38,00	11:59	22	00:11	2,00	11:39	48,29	11:47	11:49	37,31	11:56	24	00:10	2,40	00:03
4	12:11	49,22	12:21	12:24	40,89	12:27	27	00:13	2,08	12:07	48,46	12:14	12:17	39,60	12:22	23	00:10	2,30	00:04
5	12:35	45,74	12:36	12:46	40,03	12:49	24	00:11	2,18	12:32	47,87	12:37	12:42	37,22	12:45	21	00:10	2,10	00:03
6	12:58	48,75	13:07	13:21	40,89	13:30	50	00:23	2,17	12:57	49,53	13:04	13:08	41,95	13:14	26	00:11	2,36	00:01
7	13:34	46,92	13:44	13:45	40,67	13:46	25	00:11	2,27	13:18	47,78	13:20	13:28	40,42	13:32	24	00:10	2,40	00:16
8	13:59	46,08	14:01	14:09	40,18	14:11	20	00:10	2,00	13:44	47,21	13:50	13:53	40,62	13:56	24	00:09	2,67	00:15
9	15:06	46,42	15:15	15:17	38,42	15:29	22	00:11	2,00	14:12	46,81	14:15	14:21	38,68	14:28	23	00:09	2,56	00:54
10										15:05	45,68	15:07	15:14	39,27	15:17	21	00:09	2,33	
11																			
12																			
TOTAL							237	01:51								229	01:37		
MÉDIA							26,33	00:12	2,13							22,90	00:09	2,37	

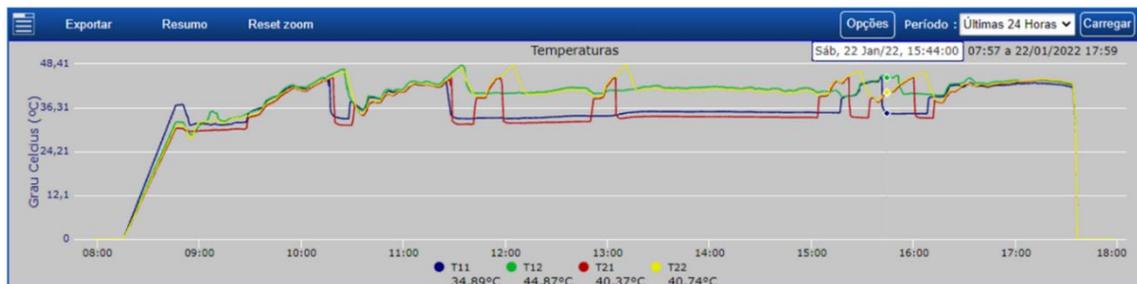
Fonte: Autor (2022).

No ensaio 3 (Tabela 8), para o qual o valor de reaquecimento foi definido como 43 °C, o circuito em série aqueceu 238L de água com a realização de 9 trocas. Já o circuito em paralelo teve 10 trocas e aqueceu um total de 230L de água. Observa-se que no circuito em paralelo, as trocas ocorreram de forma padrão, com tempo de duração entre 9 e 11min de duração. Entretanto, no circuito em série, as trocas ocorreram entre 9 e 13min, sendo que a sexta troca teve a duração de 23min, mas observou-se que a vazão do circuito se manteve constante, sugestionando que a possível causa do prolongamento da troca tenha sido a alta radiação do dia.

Ensaio 4

As Figuras de 97 a 102 e a Tabela 9, apresentam os dados e informações obtidas por meio do ensaio 4.

Figura 97 – Temperaturas de entrada e saída dos circuitos no ensaio 4



Fonte: Autor (2022).

Figura 98 – Temperaturas de entrada e saída do circuito série no ensaio 4



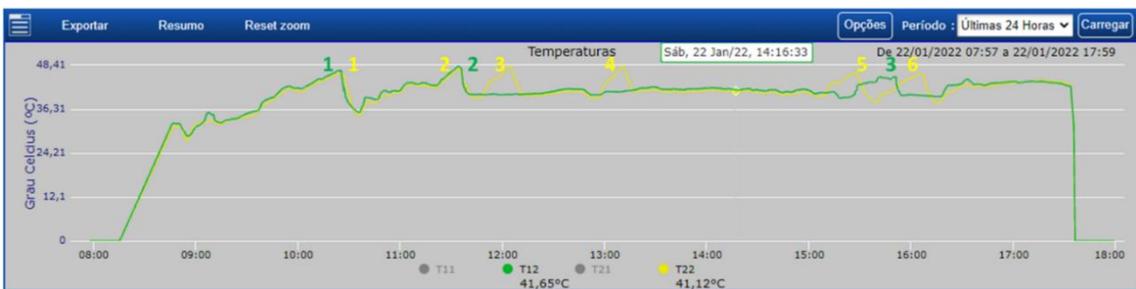
Fonte: Autor (2022).

Figura 99 – Temperaturas de entrada e saída do circuito paralelo no ensaio 4



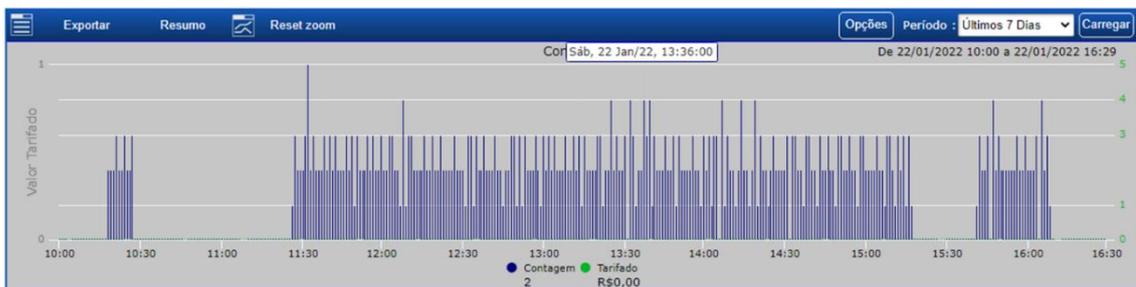
Fonte: Autor (2022).

Figura 100 – Temperaturas de saída dos circuitos e quantidade de trocas no ensaio 4



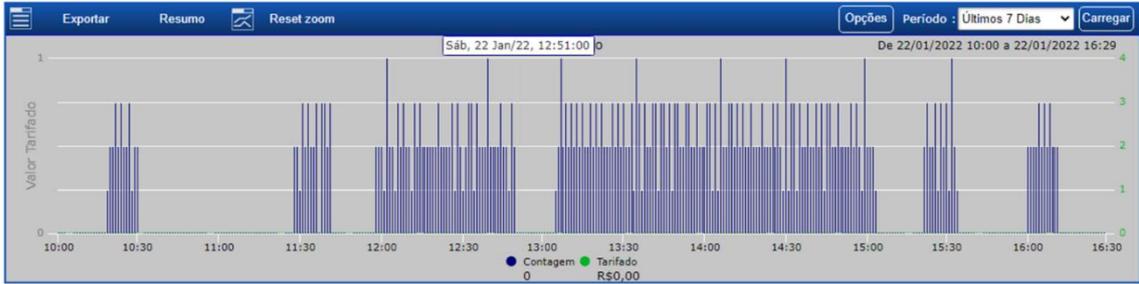
Fonte: Autor (2022).

Figura 101 – Volume de água aquecida e quantidade de trocas do circuito série no ensaio 4



Fonte: Autor (2022).

Figura 102 – Volume de água aquecida e quantidade de trocas do circuito paralelo no ensaio 4



Fonte: Autor (2022).

Tabela 9 – Dados detalhados do ensaio 4

22/01/2022																			
ENSAIO	Temperatura Reaquece	Temperatura Troca	Hora Início	Hora Término	Circuitos	Posição chave bomba	Início	Término	Diferença	Lts	%	Qtde troca	Média lts por troca	Temperatura início queda	Hora início queda				
4	40°C	45°C	09:25	17:35	Série	1	4,95856	5,56224	0,60368	603,68	19,8%	3	201,23	44,58	16:33				
					Paralelo	1	4,47297	4,97674	0,50377	503,77	-16,6%	6	83,96	44,21	17:16				
Qtde de Trocas	Início	Temper. máxima	Hora	Término	Temper. mínima	Hora	Litros	Tempo total	Vazão	Início	Temper. máxima	Hora	Término	Temper. mínima	Hora	Litros	Tempo total	Vazão	Defasagem Início S - P
1	10:16	46,98	10:24	10:27	35,40	10:36	26	00:11	2,36	10:19	46,31	10:25	10:30	34,46	10:35	25	00:11	2,27	-00:03
2	11:26	48,12	11:34	15:17	39,30	15:19	516	03:51	2,23	11:28	47,36	11:35	11:41	39,34	11:47	31	00:13	2,38	-00:02
3	15:41	45,23	15:50	16:08	39,73	16:15	61	00:27	2,26	11:58	48,05	12:05	12:50	39,23	12:55	113	00:52	2,17	03:43
4										13:05	48,38	13:11	15:03	39,85	15:07	278	01:58	2,36	
5										15:22	46,58	15:28	15:34	38,11	15:39	29	00:12	2,42	
6										16:00	46,04	16:07	16:11	37,88	16:17	27	00:11	2,45	
7																			
8																			
9																			
10																			
11																			
12																			
TOTAL							603	04:29								503	03:37		
MÉDIA							201,00	01:29	2,29							83,83	00:36	2,34	

Fonte: Autor (2022).

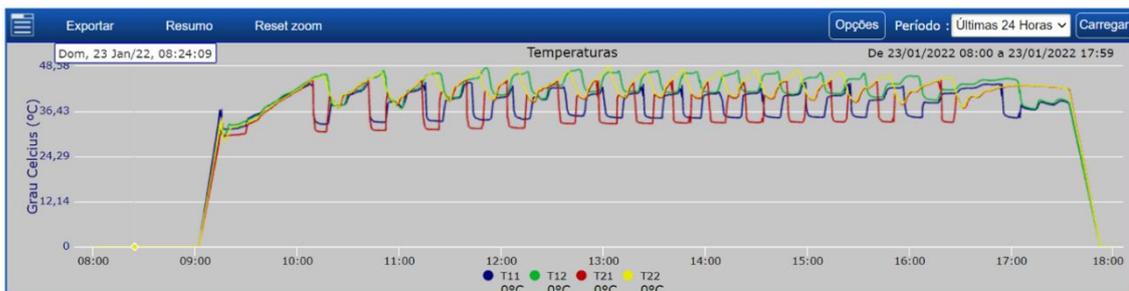
No ensaio 4 (Tabela 9), para o qual o valor de reaquecimento foi definido como 40 °C, o circuito em série aqueceu 604L de água com a realização de apenas 3 trocas. Já o circuito em paralelo, mesmo tendo o dobro de trocas realizadas, 6 no total, aqueceu um total de 504L. A primeira troca do circuito em série seguiu o comportamento similar quando o circuito é definido em 43 °C para o valor de troca de água. Contudo, as duas próximas tiveram uma longa duração, ficando com 3h51min a segunda e a terceira com 27min. Observando-se a resposta do circuito em paralelo, verificou-se que a primeira, segunda, quinta e sexta trocas tiveram o mesmo comportamento quando este circuito teve o valor de reaquecimento definido para 43 °C. Porém, a terceira e a quarta troca apresentaram um maior volume de água aquecida, sendo responsáveis por aquecer 113 L e 278 L respectivamente.

A partir desse ensaio foi observado também que ambos os circuitos deixaram de fazer uma troca por estarem bem próximos do valor definido, nos quais, ao final do dia, alcançaram temperaturas de 44,58 °C no circuito em série e, 44,21 °C no circuito em paralelo, no final do dia.

Ensaio 5

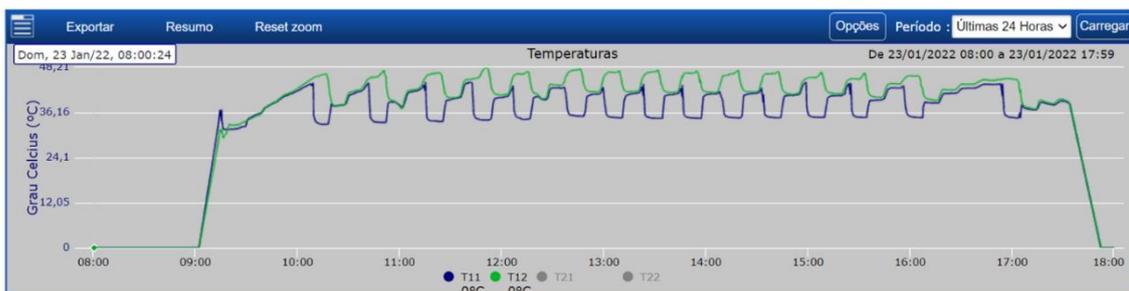
As Figuras de 103 a 108 e a Tabela 10, apresentam os dados e informações obtidas por meio do ensaio 5.

Figura 103 – Temperaturas de entrada e saída dos circuitos no ensaio 5



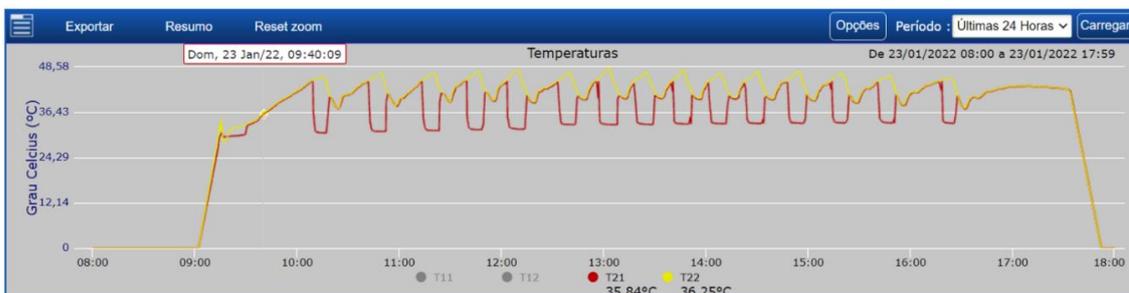
Fonte: Autor (2022).

Figura 104 – Temperaturas de entrada e saída do circuito série no ensaio 5



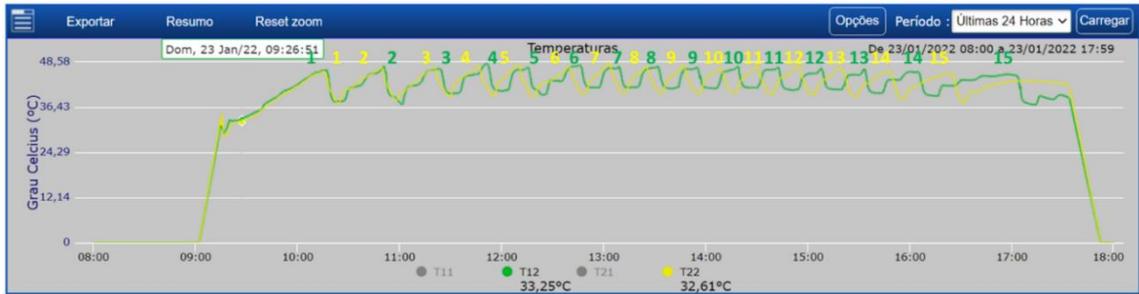
Fonte: Autor (2022).

Figura 105 – Temperaturas de entrada e saída do circuito paralelo no ensaio 5



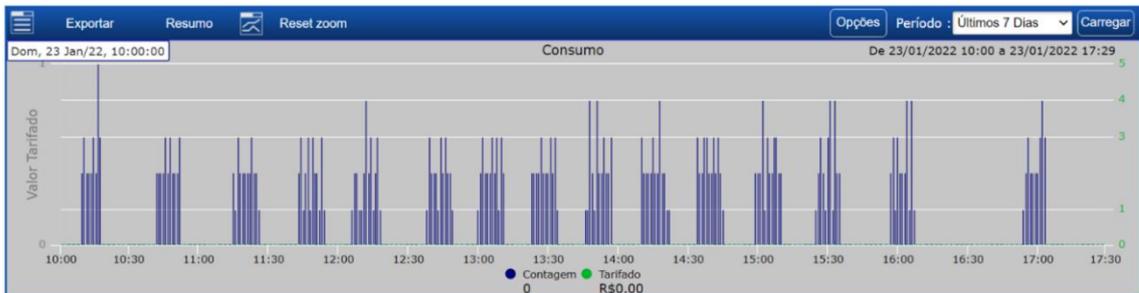
Fonte: Autor (2022).

Figura 106 – Temperaturas de saída dos circuitos e quantidade de trocas no ensaio 5



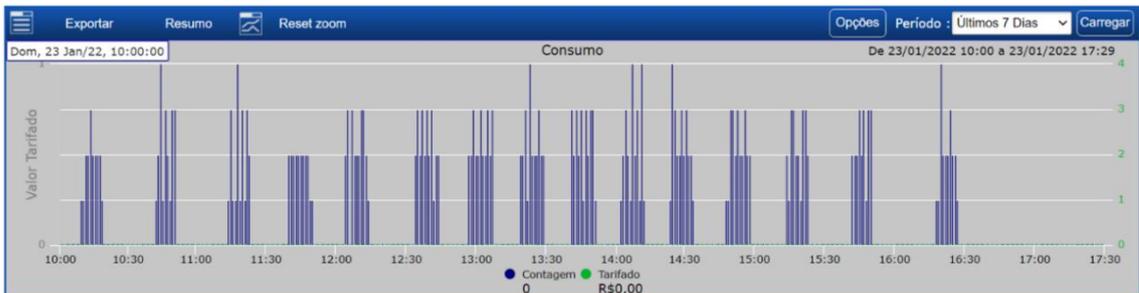
Fonte: Autor (2022).

Figura 107 – Volume de água aquecida e quantidade de trocas do circuito série no ensaio 5



Fonte: Autor (2022).

Figura 108 – Volume de água aquecida e quantidade de trocas do circuito paralelo no ensaio 5



Fonte: Autor (2022).

No ensaio 5 (Tabela 10), para o qual o valor de reaquecimento foi definido como 43 °C, ambos os circuitos tiveram nesse ensaio o mesmo número de trocas, 15 no total cada, sendo que o circuito em série aqueceu 382 L de água e o circuito em paralelo aqueceu 339 L. O fato que pode ser observado nesse ensaio é que mesmo com vazões praticamente iguais, 2,39 l/min no circuito em série, e 2,37 l/min no circuito em paralelo, o tempo médio de troca e a média do volume por troca, no circuito em série ficou maior, fazendo com que o volume total de água aquecida fosse maior.

Tabela 10 – Dados detalhados do ensaio 5

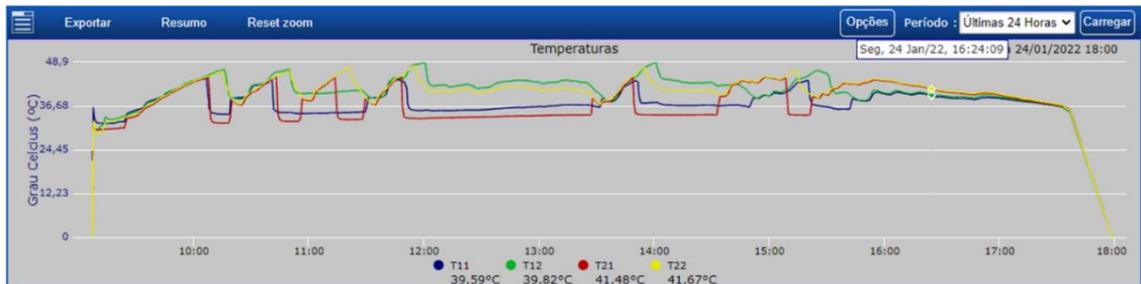
23/01/2022																			
ENSAIO	Temperatura Resquece	Temperatura Troca	Hora Inicio	Hora Término	Circuitos	Posição chave bomba	Início	Término	Diferença	Lts	%	Qtd de troca	Média lts por troca	Temperatura início queda	Hora início queda				
5	43°C	45°C	09:30	17:33	Série	1	5,62601	6,00847	0,38246	382,46	12,7%	15	25,50	39,74	17:28				
					Paralelo	1	5,03546	5,37473	0,33927	339,27	-11,3%	15	22,62	43,55	17:10				
Qtd de Trocas	Série										Paralelo						Defasagem Início S - P		
	Início	Temper. máxima	Hora	Término	Temper. mínima	Hora	Litros	Tempo total	Vazão	Início	Temper. máxima	Hora	Término	Temper. mínima	Hora	Litros		Tempo total	Vazão
1	10:09	46,55	10:18	10:18	37,94	10:23	24	00:09	2,67	10:09	46,04	10:15	10:18	37,50	10:24	18	00:09	2,00	00:00
2	10:42	47,40	10:51	10:52	37,24	11:02	25	00:10	2,50	10:42	46,95	10:49	10:51	38,10	10:58	20	00:09	2,22	00:00
3	11:15	47,04	11:24	11:26	40,13	11:32	24	00:11	2,18	11:14	46,98	11:20	11:23	39,22	11:30	20	00:09	2,22	00:01
4	11:43	48,20	11:51	11:54	40,78	12:01	24	00:11	2,18	11:40	47,55	11:47	11:50	39,60	11:55	20	00:10	2,00	00:03
5	12:06	47,13	12:15	12:18	39,77	12:24	25	00:12	2,08	12:04	47,99	12:09	12:14	39,19	12:19	23	00:10	2,30	00:02
6	12:38	47,72	12:46	12:49	41,64	12:56	24	00:11	2,18	12:34	47,31	12:40	12:44	40,02	12:49	25	00:10	2,50	00:04
7	13:00	47,40	13:09	13:11	41,73	13:13	26	00:11	2,36	12:57	48,45	13:03	13:07	40,23	13:13	26	00:10	2,60	00:03
8	13:23	47,64	13:32	13:34	41,44	13:39	26	00:11	2,36	13:19	47,38	13:25	13:29	40,37	13:35	25	00:10	2,50	00:04
9	13:46	47,22	13:55	13:57	41,49	14:05	27	00:11	2,45	13:41	47,91	13:47	13:51	40,22	13:56	26	00:10	2,60	00:05
10	14:10	47,39	14:19	14:22	41,69	14:25	28	00:12	2,33	14:02	47,05	14:08	14:12	40,38	14:18	24	00:10	2,40	00:08
11	14:34	47,15	14:43	14:45	41,01	14:51	28	00:11	2,55	14:24	47,58	14:30	14:34	40,05	14:39	25	00:10	2,50	00:10
12	14:59	46,95	15:08	15:10	41,15	15:19	28	00:11	2,55	14:48	47,50	14:55	14:58	36,68	15:04	24	00:10	2,40	00:11
13	15:25	46,75	15:34	15:35	40,21	15:42	25	00:10	2,50	15:14	46,92	15:20	15:23	39,10	15:29	22	00:09	2,44	00:11
14	15:57	46,01	16:05	16:07	39,45	16:16	25	00:10	2,50	15:42	46,20	15:49	15:50	38,43	15:57	21	00:08	2,63	00:15
15	16:54	45,25	16:57	17:04	37,13	17:14	24	00:10	2,40	16:18	45,65	16:24	16:27	37,48	16:33	20	00:09	2,22	00:36
TOTAL							383	02:41								339	02:23		
MÉDIA							25,53	00:10	2,39							22,60	00:09	2,37	

Fonte: Autor (2022).

Ensaio 6

As Figuras de 109 a 114 e a Tabela 11, apresentam os dados e informações obtidas por meio do ensaio 6.

Figura 109 – Temperaturas de entrada e saída dos circuitos no ensaio 6



Fonte: Autor (2022).

Figura 110 – Temperaturas de entrada e saída do circuito série no ensaio 6



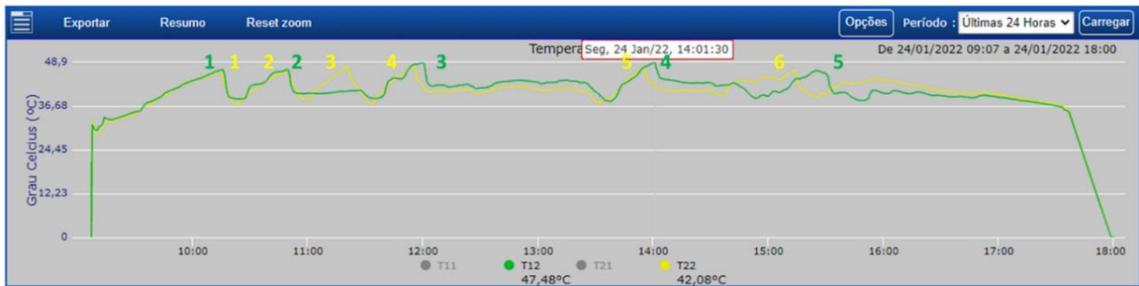
Fonte: Autor (2022).

Figura 111 – Temperaturas de entrada e saída do circuito paralelo no ensaio 6



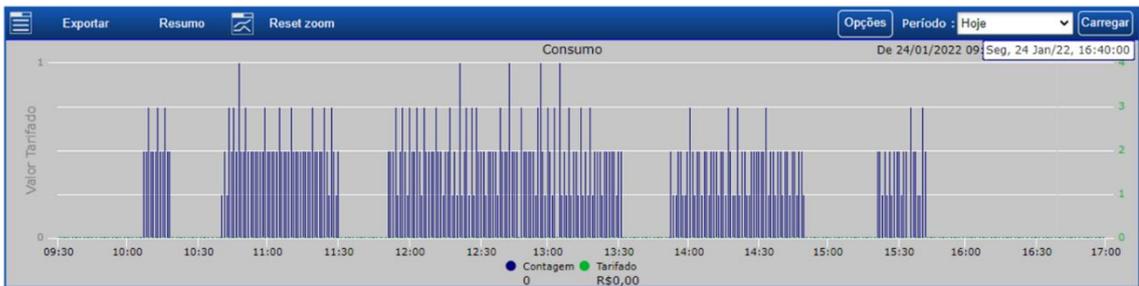
Fonte: Autor (2022).

Figura 112 – Temperaturas de saída dos circuitos e quantidade de trocas no ensaio 6



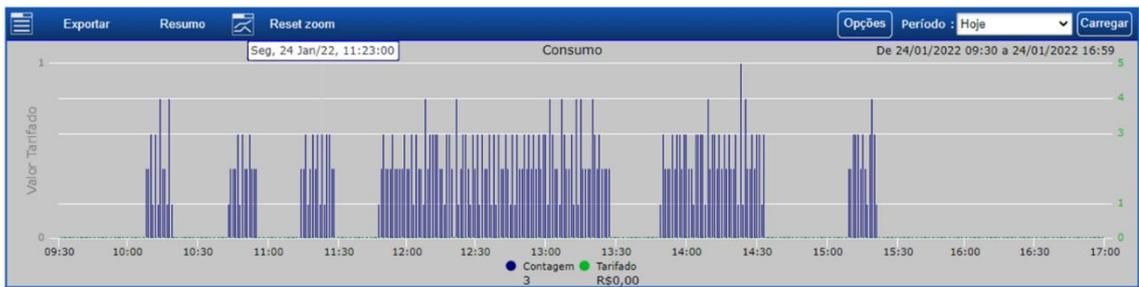
Fonte: Autor (2022).

Figura 113 – Volume de água aquecida e quantidade de trocas do circuito série no ensaio 6



Fonte: Autor (2022).

Figura 114 – Volume de água aquecida e quantidade de trocas do circuito paralelo no ensaio 6



Fonte: Autor (2022).

No ensaio 6, para o qual o valor de reaquecimento foi definido em 40 °C, o circuito em série aqueceu 465 L de água com a realização de 5 trocas. Já o circuito paralelo tendo uma troca a mais, 6 trocas no total, foi responsável por aquecer um total de 457 L de água. As trocas do circuito em série aqueceram 27, 107, 197, 98 e 36 L, e o circuito paralelo realizou trocas que aqueceram 26, 27 33, 228, 111 e 32 L. Nesse ensaio se repetiu novamente o fato de não ocorrer uma troca no final do dia devido a temperatura estar bem próxima do valor definido para realizar a troca. Esse fato ocorreu no circuito em paralelo, chegando no final do dia a temperatura de 44,1 °C.

Tabela 11 – Dados detalhados do ensaio 6

ENSAIO															24/01/2022														
6	Temperatura Reaquece	Temperatura Troca	Hora Início	Hora Término	Circuitos	Posição chave bomba	Início	Término	Diferença	Lts	%	Qtde troca	Média lts por troca	Temperatura início queda	Hora início queda														
	40°C	45°C	09:23	17:33	Série	1	6,06916	6,53378	0,46462	464,62	1,8%	5	92,92	41,09	15:56														
					Paralelo	1	5,42994	5,88649	0,45655	456,55	-1,7%	6	76,09	44,19	15:54														
Qtde de Trocas	Série												Paralelo												Defasagem				
	Início	Temper. máxima	Hora	Término	Temper. mínima	Hora	Litros	Tempo total	Vazão	Início	Temper. máxima	Hora	Término	Temper. mínima	Hora	Litros	Tempo total	Vazão	Início S - P										
1	10:07	46,94	10:16	10:18	38,65	10:24	27	00:11	2,45	10:08	46,35	10:15	10:19	37,17	10:25	26	00:11	2,36	-00:01										
2	10:40	46,86	10:50	11:30	38,80	11:36	107	00:50	2,14	10:43	46,37	10:50	10:55	38,38	11:01	27	00:12	2,25	-00:03										
3	11:51	48,85	12:00	13:31	38,00	13:38	197	01:40	1,97	11:14	47,53	11:21	11:28	37,22	11:34	33	00:14	2,36	00:37										
4	13:52	48,90	14:01	14:50	38,82	14:54	98	00:58	1,69	11:48	47,99	11:55	13:27	37,10	13:32	228	01:39	2,30	02:04										
5	15:21	46,60	15:25	15:41	38,21	15:50	36	00:20	1,80	13:49	47,55	13:55	14:33	39,74	14:35	111	00:44	2,52	01:32										
6										15:09	46,96	15:14	15:21	38,91	15:26	32	00:12	2,67											
7																													
8																													
9																													
10																													
11																													
12																													
TOTAL							465	03:59								457	03:12												
MÉDIA							99,00	00:47	2,01							76,17	00:32	2,41											

Fonte: Autor (2022).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Uma forma mais adequada para expor os resultados parciais apresentados no Capítulo anterior, é o agrupamento de acordo com a temperatura de aquecimento, como pode ser verificado no Quadro 5.

Quadro 5 – Dados dos ensaios realizados ordenado por temperatura de aquecimento

Ensaio	Temperatura para aquecimento [°C]	Temperatura para troca [°C]	Data [d/mm/a]	Início [h:min]	Término [h:min]
1	40	45	17/01/2022	9:10	17:22
4	40	45	22/01/2022	9:25	17:35
6	40	45	24/01/2022	9:23	17:33
2	43	45	20/01/2022	9:20	17:30
3	43	45	21/01/2022	9:30	17:38
5	43	45	23/01/2022	9:30	17:33

Fonte: Autor (2022).

Os resultados obtidos nos ensaios são inicialmente apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Resultados dos ensaios para os gráficos de análise

Ensaio	Volume total Série	Volume total Paralelo	% Série / Paralelo	Qtde trocas Série	Qtde trocas Paralelo	Média lts por troca Série	Média lts por troca Paralelo	Tempo efetivo de troca Série	Tempo efetivo de troca Paralelo	Tempo médio de troca Série	Tempo médio de troca Paralelo	Média da vazão Série	Média da vazão Paralelo
1	561	468	119,9%	7	11	80,14	42,55	04:16	03:14	00:36	00:17	2,25	2,43
4	603	503	119,9%	3	6	201	83,83	04:29	03:37	01:29	00:36	2,29	2,34
6	465	457	101,8%	5	6	93	76,17	03:59	03:12	00:47	00:32	2,01	2,41
2	269	280	96,1%	11	12	24,45	23,33	02:06	01:58	00:11	00:09	2,14	2,39
3	237	229	103,5%	9	10	26,3	22,9	01:51	01:37	00:12	00:09	2,13	2,37
5	383	339	113,0%	15	15	25,53	22,6	02:41	02:23	00:10	00:09	2,39	2,37

Fonte: Autor (2022).

Os dados da Tabela 12 são demonstrados por meio de 4 gráficos, que compõem o conjunto de dados para análise comparativa entre o comportamento dos circuitos série e paralelo compostos por dois coletores cada. Esses gráficos são:

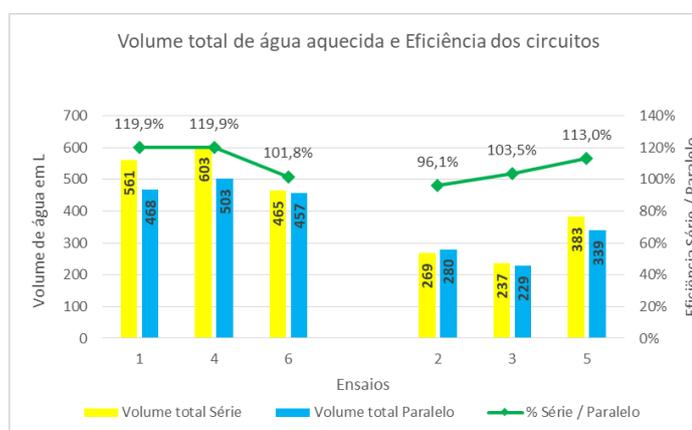
- Comparação do volume total de água aquecida e eficiência dos circuitos;
- Comparação da média do volume de água aquecida por troca e da quantidade de trocas;
- Comparação do tempo médio por troca e do tempo total de operação; e
- Comparação da vazão.

Nos gráficos a seguir, optou-se em fixar a ordem dos resultados conforme apresentado na Tabela 6, ficando à esquerda os resultados obtidos com os 3 ensaios nos quais o valor definido para o reaquecimento foi de 40 °C, e ficando à direita os resultados dos 3 ensaios com o valor definido em 43 °C para o reaquecimento.

4.1 Comparação do volume total de água aquecida e eficiência dos circuitos

A Figura 115 demonstra o volume total de água aquecida por ensaio e, também, um comparativo percentual entre os circuitos, onde o volume total de água aquecida por ensaio do circuito em série foi dividido pelo volume total de água aquecida por ensaio do circuito em paralelo. Quando esse quociente é menor que 100%, demonstra-se que o circuito em paralelo aqueceu um volume maior de água e, ao contrário, evidencia-se em quantos por cento o circuito paralelo foi mais eficiente que o circuito em série.

Figura 115 – Volume de água aquecida e eficiência por ensaio



Fonte: Autor (2022).

Quando observa-se o volume total de água aquecida, nos ensaios com a temperatura de reaquecimento definida em 40 °C aqueceu-se um volume maior de água quando comparado com os ensaios realizados com a temperatura de reaquecimento definida em 43 °C, em que o maior volume de água aquecida foi realizado no ensaio 4, com um volume de 603 e 503 L nos circuitos em série e paralelo respectivamente, e o menor volume de água aquecida foi realizado no ensaio 3, com um volume de 237 L no circuito em série e de 229 L no circuito em paralelo.

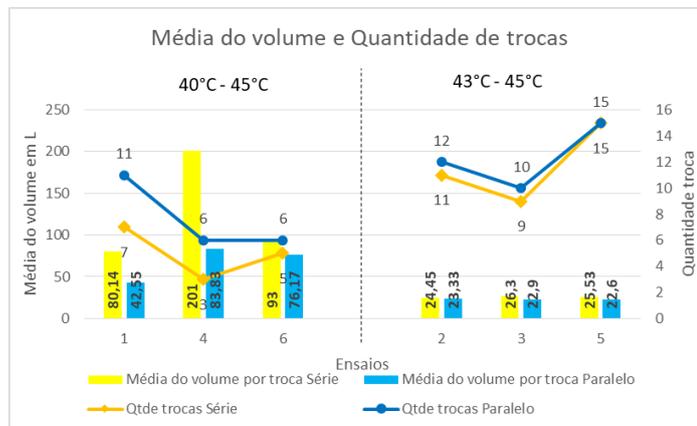
Avaliando-se a eficiência entre os circuitos, em apenas um único ensaio o circuito paralelo aqueceu um volume maior de água em relação ao circuito em série. Neste caso, o circuito em série aqueceu 96,1% do volume de água no circuito em paralelo, e nos demais ensaios o circuito em série aqueceu um maior volume que o circuito em paralelo. Em outros dois ensaios observou-se que houve uma pequena variação, de 1,8% e de 3,5%, em outro a variação foi de 13% e em outros dois houve maior diferença no volume, de 19,9%.

Para uma melhor avaliação do comportamento dos circuitos em relação ao volume de água aquecida e a diferença entre eles, foi necessária a realização de uma avaliação detalhada por troca, avaliando-se o volume de água aquecida por troca em relação ao total de trocas realizadas.

4.2 Comparação da média do volume de água aquecida e da quantidade de trocas

A Figura 116 demonstra a média do volume de água aquecida por troca realizada, e qual o total de trocas que foram realizadas por ensaio. Esses dados foram demonstrados nas Tabelas (6, 7, 8, 9, 10 e 11), os quais foram agrupados e apresentados na Figura 116. O volume foi obtido pela leitura dos hidrômetros, a quantidade e o volume por troca foi comparado com os valores de leitura retirados do sistema de aquisição de dados.

Figura 116 – Média do volume de água aquecida e quantidade de trocas por troca



Fonte: Autor (2022).

Observa-se que os circuitos se comportaram de forma totalmente diferente se comparados com os valores de temperatura definidas no reaquecimento. Analisando-

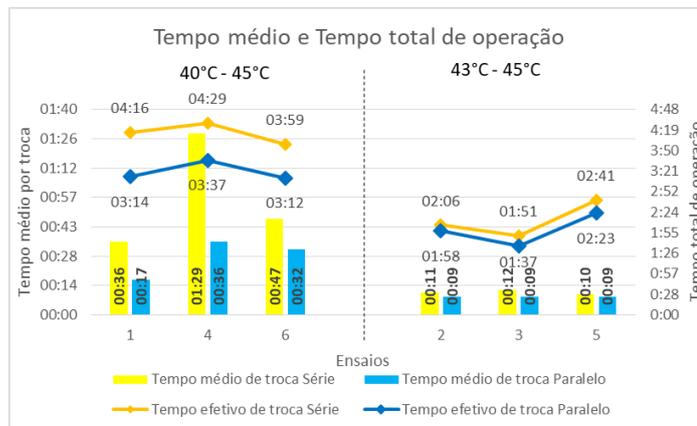
se o comportamento dos ensaios, nos quais o valor de reaquecimento foi de 40 °C, a quantidade de trocas e o volume de água aquecida se apresentaram de forma totalmente aleatórias, tendo o circuito em série um total de 7, 3 e 5 trocas, e um volume de 80, 201 e 93 L de água aquecida por troca. Já o circuito em paralelo apresentou um total de 11, 6 e 6 trocas realizadas e um volume de água aquecida por troca de 43, 84 e 76 L.

Verifica-se um padrão na média do volume de água aquecida por ensaio e na quantidade de trocas realizadas dos circuitos nos ensaios no valor de 43 °C, tendo a mesma quantidade de trocas em 1 ensaio e em outros 2 ensaios, o circuito em série teve 1 troca a menos em relação ao circuito em paralelo. Em relação ao volume de água aquecida por troca, observa-se uma pequena variação, onde o circuito em série foi entre 24,45 e 26,3 L por troca e o circuito em paralelo foi entre 22,6 e 23,3 L por troca.

4.3 Comparação do tempo médio por troca e do tempo total de operação

Como observado na Figura 116, os dados de volume de água aquecida por troca e a quantidade de trocas realizadas nos ensaios, estão diretamente relacionados à Figura 117, na qual é evidenciado o tempo médio em que se realizou as trocas e qual foi o tempo total em que os circuitos ficaram realizando a troca de água.

Figura 117 – Tempo médio por troca e tempo total de operação



Fonte: Autor (2022).

O comportamento da Figura 117 segue o mesmo padrão da Figura 116, no qual nos ensaios com o valor de troca definido em 40 °C não se tem um padrão definido,

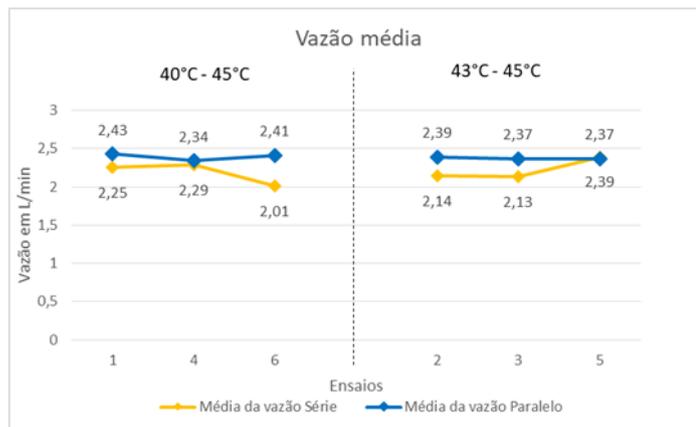
variando o tempo médio por troca entre 0h36min e 1h29min nos ensaios do circuito em série, e entre 0h17min e 0h36min no circuito em paralelo. Comparando o tempo total de operação, verifica-se que o circuito em série apresentou como menor tempo de operação 3h59min e como maior tempo de operação 4h29min.

Observando os ensaios com o valor de troca definido em 43 °C, existe uma semelhança nos resultados, ou seja, uma pequena variação entre eles, ficando o circuito em série com a variação entre 0h10min e 0h12min no tempo de troca, e no circuito em paralelo esse tempo foi igual nos 3 ensaios, sendo de 0h09min. O tempo total de operação dos circuitos foi entre 1h51min e 2h41min no circuito em série e entre 1h37min e 2h23min no circuito em paralelo.

4.4 Comparação da vazão

Observa-se na Figuras a variação da vazão dos circuitos, essa vazão foi controlada pelo controlador de vazão do circuito, porém, o cálculo foi realizado a partir da divisão do volume de água aquecida nas trocas pelo tempo na qual essas trocas ocorreram.

Figura 118 – Vazão média por ensaio



Fonte: Autor (2022).

Verifica-se que a vazão dos circuitos ficou próxima ao valor especificado nesse projeto, que é de 2,3 l/min. Nestes ensaios, o circuito em paralelo apresentou uma pequena variação nas vazões, entre 2,34 e 2,43 l/min. Analisando o comportamento da vazão no circuito em série, essa variação foi maior, tendo como uma maior vazão o valor de 2,39 l/min, outros dois com vazões de 2,25 e 2,29 l/min, outros dois de 2,13

e 2,14 l/min e, por último, um ensaio apresentou um valor menor, sendo que a média ficou em de 2,01 l/min.

4.5 Tópicos relevantes

Neste tópico apresentam-se algumas informações complementares importantes que são decorrentes da observação e da análise do comportamento da bancada de testes durante a execução dos ensaios. Essas informações, poderão contribuir para estudos posteriores ou, até mesmo, na aplicação prática do sistema desenvolvido.

Observou-se durante os ensaios que os circuitos deixaram de realizar a troca de água no final do dia por não terem alcançado o valor definido de temperatura, porém, as temperaturas da água estavam muito próximas deste valor, como por exemplo, no ensaio 4 faltou 0,5 °C para a troca. Neste caso, pode-se pensar em aplicar uma rotina de automação de modo que no caso de a temperatura estar a um valor muito próximo do valor definido, e dependendo da hora do dia e da queda de água, que essa água aquecida não fosse desperdiçada e que se efetue a troca, aumentando o volume de água aquecida.

De um modo geral, o circuito em série apresentou uma melhor performance nesse estudo, mas cabe colocar que, se por algum motivo, apenas um dos coletores fique obstruído parcial ou totalmente, haverá uma redução na vazão ou até mesmo a interrupção do fluxo. Esta redução ou até mesmo interrupção no fluxo poderá verificada com a medição frequente da vazão de saída. Outro efeito importante no caso de obstrução de um circuito em série é que haverá um aumento na pressão da entrada de água do circuito. Portanto, torna-se imprescindível que sistemas nos quais os coletores estejam associados em série seja instalado um pressostato para o monitoramento dessa pressão e, no caso de eventual aumento de pressão automaticamente haja um alívio no sistema para garantir a segurança do circuito.

Avaliando a situação de um circuito em que os coletores estão interligados em paralelo, mesmo ele tendo uma performance um pouco menor, sendo no máximo 20% menor, caso haja alguma obstrução no fluxo de um dos coletores solares, haverá um pequeno aumento na vazão nos demais coletores. Contudo, é importante ressaltar que a água fluindo mais lentamente em um dos coletores ou até mesmo ficando estacionária, dependendo da intensidade da radiação no dia, a água poderá sofrer um

superaquecimento e danificar significativamente o coletor e, por sua vez, todo o sistema.

Portanto, a implementação prática da solução estudada nesta pesquisa para o pré-aquecimento de água para uma edificação residencial, demandará o gerenciamento contínuo dos parâmetros críticos de operação de forma a garantir o bom funcionamento e a segurança do sistema e das pessoas. Contudo, com as tecnologias atualmente disponíveis de aquisição e transmissão de dados em tempo real e de forma remota, os eventuais problemas citados anteriormente poderão ser totalmente controlados e contingenciados.

5. CONCLUSÃO

Ao término desse trabalho de pesquisa verifica-se que foi possível de forma satisfatória endereçar o problema de pesquisa e alcançar o objetivo geral e os objetivos específicos estabelecidos. O planejamento da pesquisa, dentre várias definições, sinalizou a imprescindível necessidade do projeto e execução de uma bancada de testes.

A construção da bancada de testes de acordo com a estratégia planejada para avaliar e mensurar a eventual diferença de performance de aquecimento de água com interligação de 4 coletores solares para água de piscinas, sendo 2 interligados em série e outros 2 interligados em paralelo, permitiu a comparação dos resultados para que os comportamentos dos circuitos fossem avaliados após o término dos ensaios.

O desenvolvimento prévio do projeto da bancada de testes em AutoCAD fez com que houvesse a precisão e assertividade na montagem da bancada, fazendo com que mesma alcançasse os padrões necessários para a realização das coletas, como pode ser verificado a partir dos dados obtidos com os ensaios realizados o bom comportamento operacional da bancada. Porém, esse projeto não evitou que surgissem problemas para a sua operação de forma aceitável, tendo que ser realizados alguns ajustes técnicos (*setups*), totalizando 21, iniciando no dia 22/11/2021 e concluindo no dia 24/01/2022.

Após vencer o desafio de construir uma bancada de testes tecnicamente robusta que apresentou boa estabilidade estrutural, confiabilidade, repetibilidade e resolução adequada para a coleta dos dados, sua utilização, permitiu a realização dos ensaios afim de que fosse avaliada eventuais diferenças de performance na interligação série ou paralela de dois coletores solares para piscina.

Os resultados demonstraram que a interligação em série foi mais eficiente em relação ao volume total de água quente produzida no período de realização dos ensaios. Todos os ensaios foram realizados utilizando-se as recomendações da norma ABNT NBR 15747-2, bem como os dados climáticos da cidade de Joinville, no estado de Santa Catarina.

Um dos problemas ocorridos foi devido ao comportamento da vazão no circuito em paralelo, em que o maior desafio foi eliminar a presença de ar no circuito, fazendo com que houvesse a perda de 2 bombas por insuficiência de fluxo. Outro problema

que dificultou a realização dos ensaios foi que na cidade de Joinville há um alto índice pluviométrico. Contudo, no total foram realizados 28 ensaios.

Conclui-se que o circuito em série foi o mais eficiente, em 5 dos 6 ensaios realizados. O maior rendimento, de 19,9%, ocorreu em dois ensaios com o valor de reaquecimento em 40 °C, e o menor rendimento foi de 1,8%, também no ensaio com o valor de reaquecimento em 40 °C. Porém, houve um único teste, no qual o rendimento do circuito série foi maior do que o paralelo, sendo de 4,1%, esse fato ocorreu no ensaio com valor de reaquecimento definido em 43 °C.

Os resultados dos ensaios definidos com a temperatura de reaquecimento em 43 °C demonstraram um padrão, tendo uma pequena variação no volume de água por troca e também na quantidade de trocas. Desta forma, o tempo em que cada troca de água foi realizada também teve uma pequena variação, mantendo assim o tempo de operação com valores bem aproximados. Os valores de vazão nesses ensaios foram aproximados, tendo a igualdade em apenas um dos ensaios, nos demais a vazão no circuito em paralelo foi maior.

Com tudo isso, o volume total de água quente exibiu uma diferença crescente entre os ensaios, sendo o fator que mais apresentou a variação foi a vazão, fazendo que houvesse uma igualdade na quantidade de trocas entre os circuitos, um aumento no tempo de operação sem o aumento do tempo de cada troca e um aumento significativo na eficiência, aquecendo 13% a mais do volume de água.

Apesar dos dois primeiros resultados dos ensaios realizados com o valor de reaquecimento definido em 40 °C terem dados aproximados e com a maior diferença, de 19,9%, observa-se uma diferença na quantidade de trocas, no volume de água por troca e por consequência essa diferença é comprovada no tempo de operação e na duração de cada troca. Nesses ensaios a vazão também se manteve estável. No entanto, no terceiro ensaio, houve uma aproximação na quantidade de trocas realizadas, porém, o tempo de operação foi menor e o tempo de cada troca foi intermediário. A vazão nesse teste teve uma queda durante a operação no circuito em série, fazendo com que o rendimento do circuito diminuísse e ficasse apenas 1,8% maior em relação ao circuito paralelo. Essa maior diferença do volume de água aquecida nesses ensaios ocorreu, devido à radiação ser alta e também ao valor definido para o reaquecimento, pois no circuito em série, como a água percorre todo o circuito, ou seja, os dois coletores, quando a água saía do segundo coletor, ela já

saía com a temperatura acima do valor definido para o reaquecimento, fazendo com que houvesse trocas mais longas.

Conclui-se dos ensaios realizados que o comportamento dos circuitos em série e paralelo dos coletores de piscina dependem da radiação, como já conhecido, porém existe uma dependência direta da vazão com a qual a água percorre pelos coletores e o valor de temperatura que se procura alcançar. Tais comportamentos deverão confirmar se esses resultados serão comprovados.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Seguem a seguir algumas sugestões para dar continuidade a esse trabalho de pesquisa:

- Realizar os mesmos ensaios no período do inverno quando ocorre além da redução na intensidade da irradiação solar uma mudança significativa na trajetória dos raios solares;
- Avaliar os efeitos da redução da vazão no circuito em série para 1,15 l/min;
- Avaliar os efeitos do aumento da vazão no circuito em paralelo para 4,6 l/min;
- Estudar o comportamento de aquecimento nos circuitos de acordo com a intensidade da radiação solar incidente sobre os coletores mediante a instalação um piranômetro e um pireliômetro⁴;
- Mensurar a contribuição no rendimento térmico da inclusão de chapas de vidro⁵ transparentes sobre os coletores solares para piscinas na produção de água quente, uma vez que além de provocar o efeito estufa as chapas de vidro amenizam a influência dos ventos sobre as superfícies tubulares coletoras;
- Considerar estudos de avaliação dos efeitos do afastamento ou aproximação dos coletores no fundo da caixa de contenção;
- Verificar a eventual contribuição da pintura do fundo da caixa em preto e/ou introduzir materiais com maior potencial de absorção de calor que possam ser transmitidos a água em circulação e realizar os ensaios com as variações citadas anteriormente;

⁴ O piranômetro é um instrumento utilizado para medir a radiação global (direta e difusa) dentro do seu campo de visão hemisférica. O pireliômetro é um instrumento usado para a medição da radiação solar direta. O piranômetro também pode medir a radiação solar difusa, caso o sensor esteja à sombra da radiação direta. Os pireliômetros são usados para medir a radiação solar direta, componente da radiação solar necessária principalmente para prever o desempenho de coletores concentradores solares (KALOGIROU, 2016).

⁵ O vidro tem sido amplamente usado para cobrir coletores solares porque ele pode transmitir por volta de 90% da radiação solar de comprimento de onda curto incidente, enquanto praticamente não transmite radiação de comprimento de onda longo para fora pela superfície absorvedora (KALOGIROU, 2016).

- Verificar o eventual ganho de performance nos coletores considerando a introdução de um espaçamento entre as espiras da mangueira dos coletores para aquecimento de água para piscinas;
- Verificar o impacto nos resultados considerando-se variantes de inclinação dos coletores, como forma de avaliar a viabilidade de criar dispositivos para alterar a inclinação dos coletores entre estações do ano no objetivo de otimizar o aproveitamento da radiação solar anual.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15747-1 – Sistemas Solares Térmicos e Seus Componentes – Coletores Solares Parte 1: Requisitos Gerais**. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15747-2 – Sistemas Solares Térmicos e Seus Componentes – Coletores Solares Parte 2: Métodos de Ensaio**. Rio de Janeiro, 2009.

BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S.; INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. LTC, 2015.

BORGES, T. P. F. **Síntese otimizada de sistemas de aquecimento solar de água**. 2000. 128f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

BRASIL. EPE (Empresa de Pesquisa Energética). **Balanço Energético Nacional, 2019: Ano base 2018 / Empresa de Pesquisa Energética**. Rio de Janeiro: EPE, 2018. Ministério de Minas e Energia.

BRASIL. EPE (Empresa de Pesquisa Energética). **Demanda de energia 2050. Série estudos da demanda de energia**. Nota Técnica DEA 13/14. Rio de Janeiro: EPE, 2014.

BRASIL. EPE (Empresa de Pesquisa Energética). **Atlas da eficiência energética. Brasil/2021. Relatório de indicadores**.

BRASIL. EPE (Empresa de Pesquisa Energética). **Balanço Energético Nacional, 2021: Ano base 2020 / Empresa de Pesquisa Energética**. Rio de Janeiro: EPE, 2020. Ministério de Minas e Energia.

CLIMA PLASTICOS. Aquecimento Solar para Piscinas. Disponível em <<https://climaplasticos.com.br/>>. Acesso em 25 mar. 2022.

COLLE, S.; PEREIRA, E. B. **Atlas de Irradiação solar do Brasil (1a versão para irradiação global derivada de satélite e validada na superfície)**. INMET – Instituto Nacional de Meteorologia e LABSOLAR – Laboratório de Energia Solar – EMC/UFSC. 1998.

COMETTA, E. **Energia solar. Utilização e empregos práticos**. São Paulo: Hemus, 1978.

COSTA, E. R. **Limitações no uso de coletores solares sem cobertura para sistema domésticos de aquecimento de água**. Dissertação de mestrado. PROMEC/UFRS. Porto Alegre. 2002.

CRUZ, T. B. **Análise do potencial de inserção de energia solar térmica para aquecimento de água em residências unifamiliares no Brasil**. 2016. 173f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

ECO.A. Eficiência energética – A ‘fonte’ de energia mais limpa que existe. Ano: 2019. Disponível em <https://ecoa.org.br/a-fonte-de-energia-mais-limpa-que-existe/?gclid=CjwKCAjwo8-SBhAIEiwAopc9W0QvJCr3ReofvpCT_EKk8fQU1JU2kQpWbyMXyjPRv8Fy5xx0Z9pSihocqg4QAvD_BwE>. Acesso em 10 fev. 2022.

ECO.A. Eficiência energética pode gerar negócios de US\$ 260 bilhões. Ano: 2018. Disponível em <<https://ecoa.org.br/eficiencia-energetica-pode-gerar-negocios-de-us-260-bilhoes/>>. Acesso em 10 fev. 2022.

ECO.A. Eficiência energética – Brasil na rabeira global. Ano: 2018. Disponível em <<https://ecoa.org.br/eficiencia-energetica-brasil-na-rabeira-global/>>. Acesso em 10 fev. 2022.

ELETROBRAS; PROCEL. **Avaliação dos Resultados do PROCEL 2007**. Rio de Janeiro, 2008. 191 p.

HIDRAUCONEX. Disponível em <<https://www.hidraconex.com/hidrometro-unijato-12-3m-h-agua-quente-equipado-conexoes>>. Acesso em 19 mar. 2022.

HIDRAUNET. Disponível em <https://www.hidraunet.com.br/filtro-y.html?gclid=CjwKCAjw9e6SBhB2EiwA5myr9p3OevE0DQcZG9A8SQ_csRsfNs43HfW_w6Fs1wUPjtzbxP_T-bhSOBoCyScQAvD_BwE>. Acesso em 19 mar. 2022.

IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY). *Key World Energy Statistics 2014*. IEA. Paris - França, 2014a. Solar Energy Perspectives. International Energy Agency (2011a). (http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/solar_energy_perspectives2011.pdf)

INMETRO. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. Regulamento Técnico da Qualidade para Sistemas e Equipamentos de Aquecimento Solar de Água. Rio de Janeiro.

ISO. *International Organization for Standardization. ISO 9459-2:1995 – Solar heating – Domestic water heating systems – Part 2: Outdoor test methods for system performance characterization and yearly performance prediction of solar-only systems*. Switzerland, 1995.

ISO. *International Organization for Standardization. ISO 9806 – A Resource for Manufacturers, Testing Laboratories, Certification Bodies and Regulatory Agencies*. Germany, 2017.

JORDAN, R. A.; SEYE, O.; MOTOMIYA, A. V. A. **Influência da vazão de água sobre rendimento de um coletor solar plano contruído em termoplástico**. Revista Engenharia Agrícola. ISSN: 1809-4430, 2015.

KALOGIROU, S. A. Solar thermal collectors and applications. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 30, n. 3, p. 231–295, 2004.

KALOGIROU, S. A. **Engenharia de Energia Solar: Processos e Sistemas**. 2 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

LAFAY, J. S. **Análise energética de sistema de aquecimento de água com energia solar e gás**. 2005. 153f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul.

LIU, X.; Mei, X.; LI, Y.; Zhang, Y.; WANG, Q.; JENSEN, J. R.; PORTER, J. R. **Calibration of the Angström-PreScott coefficients (a, b) under different time scales and their impacts in estimating global solar radiation in the Yellow River basin**. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.149, p.696-710, 2009b.

MAGAZINE LUIZA. Disponível em <https://www.magazineluiza.com.br/registro-de-gaveta-1-1-2-deca/p/kb94d56g1b/cj/regc/>. Acesso em 19 mar. 2022.

MERCADO LIVRE. Disponível em https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1497392535-medidor-sensor-fluxo-de-agua-vazo-de-temperatura-digital-JM?matt_tool=54307261&matt_word=&matt_source=google&matt_campaign_id=14302215582&matt_ad_group_id=134553712308&matt_match_type=&matt_network=g&matt_device=c&matt_creative=539425529689&matt_keyword=&matt_ad_position=&matt_ad_type=pla&matt_merchant_id=466386955&matt_product_id=MLB1497392535&matt_product_partition_id=1404049437563&matt_target_id=aud-1454065849627:pla-1404049437563&qclid=CjwKCAjw9e6SBhB2EiwA5myr9iRcKZ8htr2JUVWdwZGLWmXZRha4HJv_2MSK1eVereW36Nuv0YuGeRoCxSAQAvD_BwE. Acesso em 19 mar. 2022.

MICHAELIS. A mais completa linha de dicionários do Brasil. Disponível em <https://michaelis.uol.com.br/>. Acesso em 15 fev. 2022.

MORRISON, G. L. **Solar Collectors**. In: J. Gordon, Ed., *Solar Energy—The State of the Art-ISES Position Papers*, James and James Science Publishers, London, 2001, pp. 145-221.
https://books.google.com.br/books?id=eHbDM3yZPngC&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

NREL. **Glossary of solar radiation resource terms: National Renewable Energy Laboratory**. 2017. Disponível em http://reddc.nrel.gov/solar/glossary/gloss_s.html. Acesso em abril 2022.

OGUEKE, N. V.; ANYANWU, E. E.; EKECHUKWU, O. V. **A review of solar water heating systems**. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, v. 1, n. 4, 2009.

PANSATO, C. **Análise experimental do desempenho térmico de um sistema acoplado de coletores solares planos**. 2016. 60f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual Paulista, Bauru.

PEREIRA, E. M. D.; DUARTE, L. O. M.; PEREIRA, L. T.; FARIA, C. F. da C. **Energia Solar Térmica**. In: TOLMASQUIM, M. T. (org), 2003, Fontes Renováveis de Energia no Brasil. Ed. Interciência, Rio de Janeiro, 2003.

PEREIRA, E. B.; *et al.* **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2.ed. São José dos Campos: INPE. 2017.

PONTO FRIO. Disponível em <<https://www.pontofrio.com.br/valvula-solenoide-fluir-3-4-nf-220v-2-vias-10-bar-para-entrada-aqua-para-lavadora/p/1504822819>>. Acesso em 19 mar. 2022.

ROSA, F. N. **Aplicabilidade de coletores solares com tubo evacuado no Brasil**. 2012. 51f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SOUZA, D. **Gestão da eficiência energética em edificações residenciais por meio da associação de tecnologia e sistema automatizados**. 2021. 198f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade da Região de Joinville, Joinville.

TEXIUS. Disponível em <<https://texius.com.br/produto?c=154>>. Acesso em 19 mar. 2022.

TORO, J. D. N. **Análise comparativa de um sistema passivo com um sistema ativo de aquecimento de água por meio de um coletor solar de tubos de vidro à vácuo**. 2015. 80f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

TOTALCOOL. Disponível em <<https://totalcool.net.br/produto/pressostato-danfoss-kpi35-060121966/>>. Acesso em 19 mar. 2022.

VASCONCELLOS, L.E.M.; LIMBERGER, M.A.C. (Org.). **Energia solar para aquecimento de água no Brasil: contribuições da Eletrobras Procel e parceiros**. Rio de Janeiro: Eletrobras, 2012.

WGSOL. **Instalação de aquecedor solar – passo a passo básico**. Disponível em <<https://wgsol.com.br/instalacao-de-aquecedor-solar-passo-passo-basico/>>. Acesso em 10 fev. 2022.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Documento auxiliar para ajuste da inclinação.



Projeto – Performance de coletores solares para aquecimento de água (Interligação série/paralelo)



1 – Inclinação em 26 graus

Para essa inclinação os furos utilizados são:

Peça 5: Furos 1 e 7

Peça 6: Furos 1 e 8

2 – Inclinação em 31 graus

Para essa inclinação os furos utilizados são:

Peça 5: Furos 1, 2 ; 4 e 6

Peça 6: Furos 2, 4 ; 6 e 8

3 – Inclinação em 36 graus

Para essa inclinação os furos utilizados são:

Peça 5: Furos 1, 3 e 5

Peça 6: Furos 3, 6 e 8

4 – Inclinação em 41 graus

Para essa inclinação os furos utilizados são:

Peça 5: Furos 1, 2 e 4

Peça 6: Furos 4, 6 e 8

5 – Inclinação em 46 graus

Para essa inclinação os furos utilizados são:

Peça 5: Furos 1, 2 e 4

Peça 6: Furos 5, 7 e 9

A distância da face frontal da base 1 até a parte traseira da caixa do coletor é de 852mm, 769mm e 663mm, em 26°, 36° e 46° respectivamente.

APÊNDICE B – Documento auxiliar para procedimento inicial de ensaio.



Projeto – Performance de coletores solares para aquecimento de água (Interligação série/paralelo)



Objetivo: Demonstrar o fluxo de preparação/inicialização da coleta de dados da bancada de testes.

Descritivo: A bancada foi montada com a maioria de seus componentes fixados, no entanto, existe um componente que foi projetado para não ficar no local (o DMI, componente responsável pela automação e pela coleta de dados). Segue abaixo uma imagem dos componentes a serem interligados, bem como o procedimento para ligação.

PREPARAÇÃO



1 – Painel de energia (220V).

1.1 – Disjuntor de alimentação (220V).

1.2 – Plug fêmea de alimentação (220V).

(*) Válvulas de respiro, utilizadas na Inicialização dos testes.



2 – Tomada/cabo de alimentação (220V).

2.1 – Cabo de extensão com plug macho de alimentação (220V).

2.2 – Tomada multipolar de alimentação das caixas de controle (220V).

2.3 – Bomba de troca de água entre as caixas d'água.



Projeto – Performance de coletores solares para aquecimento de água (Interligação série/paralelo)



3 – Caixa de controle do circuito em paralelo.

3.1 – Conector de comunicação do circuito.

3.2 – Cabo de alimentação (220V).

3.3 – Cabo de comunicação hidrômetro.

4 – Caixa de controle do circuito em série.

4.1 – Conector de comunicação do circuito.

4.2 – Cabo de alimentação (220V).

4.3 – Cabo de comunicação hidrômetro.

5 – Ponto de sustentação da caixa do DMI.



6 – Caixa do DMI.

6.1 – Cabo de alimentação (220V).

6.2 – Cabo de comunicação circuito em paralelo.

6.3 – Conector de comunicação do hidrômetro circuito em paralelo.

6.4 – Cabo de comunicação circuito em série.

6.5 – Conector de comunicação do hidrômetro circuito em série.



Projeto – Performance de coletores solares para aquecimento de água (Interligação série/paralelo)



Para a ligação desses componentes para preparação dos testes, deve-se seguir os seguintes passos:

- 1º) Fixar a "Caixa do DMI" (6) no "Ponto de sustentação da caixa do DMI" (5);
- 2º) Interligação da "Caixa de controle do circuito em paralelo" (3) na "Caixa do DMI" (6);
 - 2.1º) Conectar o "cabo de comunicação circuito em paralelo" (6.2) no "conector de comunicação do circuito" (3.1);
 - 2.2º) Conectar o "cabo de comunicação hidrômetro" (3.3) no "conector de comunicação do hidrômetro circuito em paralelo" (6.3);
- 3º) Interligação da "Caixa de controle do circuito em série" (4) na "Caixa do DMI" (6);
 - 3.1º) Conectar o "cabo de comunicação circuito em série" (6.4) no "conector de comunicação do circuito" (4.1);
 - 3.2º) Conectar o "cabo de comunicação hidrômetro" (4.3) no "conector de comunicação circuito em série" (6.5);
- 4º) Interligação do "Painel de energia (220V)" (1) na "Tomada de alimentação (220V)" (2);
 - 4.1º) Conectar os "cabos de alimentação (220V)" (3.2; 4.2 e 6.1) na "tomada multipolar de alimentação das caixas de controle (220V)" (2.2);
 - 4.2º) Levar o "cabo de extensão com **plug** macho de alimentação (220V)" (2.1) com cuidado até a "**Plug** fêmea de alimentação (220V)" (1.2);
- 5º) Ligar o "Disjuntor de alimentação (220V)" (1.1).



Projeto – Performance de coletores solares para aquecimento de água (Interligação série/paralelo)



INICIALIZAÇÃO



7 e 8 – Ligação hidráulica dos circuitos (paralelo e série).

7.1 e 8.1 – Registro valvulado de entrada de água (R11 e R21).

7.2 e 8.2 – Registro valvulado de recirculação de água (R12 e R22).

7.3 e 8.3 – Registro valvulado de saída de água (R13 e R23).

7.4 e 8.4 – Registro manual para procedimento inicial.

7.5 e 8.5 – Bomba de circulação (B2 e B1).

7.6 e 8.6 – Registro manual tipo gaveta para ajuste de vazão (r20 e r10).

9 – Tela da automação para os acionamentos manuais e Liga/Desliga sistema automático



9.1 – Parametrização do teste (número sequencial crescente para cada teste).

9.2 – Liga e Desliga teste automático.

9.3 – Botões de acionamento manual dos componentes dos circuitos.

9.4 – Parâmetros de operação (temperatura para troca, temperatura para reaquecimento, tempo para troca e tempo para reaquecimento).

9.5 – Painel de leitura em tempo real das temperaturas e vazão.



Projeto – Performance de coletores solares para aquecimento de água (Interligação série/paralelo)



A inicialização da bancada para início dos testes deve seguir os seguintes passos:

1º) Conectar o cabo de rede do DMI no notebook e digitar o link de acesso (<http://192.168.0.200>) (9.1);

2º) Parametrizar/verificar os valores para o teste (9.4);

Setpoint Troca: 45°C

Setpoint ReAquec: 40°C ou 43°C

Tempo Troca: 10s

Tempo ReAquec: 2s

Obs: valores para ambos os circuitos.

3º) Verificar os níveis de água dentro das caixas d'água, se necessário ligar a "Bomba de troca de água entre as caixas d'água" (2.3) para o enchimento da caixa d'água que alimenta os circuitos;

Obs: atentar-se aos registros de saída da caixa d'água, os quais deverão estar abertos.

4º) Abrir as válvulas de respiro (*) e fechar os "registros manuais para procedimento inicial" (7.4 e 8.4);

5º) Acionar os comandos (9.3) – R11/R13 e B1 e R21/R23 e B2, seguindo essa sequência para circular a água pelos circuitos para retirar possíveis existência de ar. Aumentar no máximo a vazão abrindo os registros (7.6 e 8.6);

Obs: inicia a entrada de água nos coletores. Quando começar a sair água pelas válvulas de respiro, abrir os "registros manuais para procedimento inicial" (7.4 e 8.4). Deixar os circuitos trocando água por uns 10 minutos, após esse tempo ajustar a vazão dos circuitos e deixar mais 2 minutos para estabilização da vazão. Realizar o 6º passo durante os primeiros 10 minutos;

6º) Fechar as válvulas de respiro (*) e abrir os "registros manuais para procedimento inicial" (7.4 e 8.4);

7º) Acionar os comandos (9.3) – B1 e R11/R13 e B2 e R21/R23, seguindo essa sequência, afim de desligar por completo o circuito;

8º) Incrementar 1 no "ID de Medição" (9.1);

9º) Clicar "Liga e Desliga aquecimento" (9.2) e assim inicia o processo de testes automaticamente;



Projeto – Performance de coletores solares para aquecimento de água (Interligação série/paralelo)



10º) Anotar o horário e as leituras dos hidrômetros.

Obs: os valores poderão ser monitorados no "Painel de leitura em tempo real das temperaturas e vazão" (9.5).

Para finalizar os testes, clicar "Liga e Desliga aquecimento" (9.2), anotar a hora e os valores dos hidrômetros.

Orientador: Prof. Dr. Claiton E. do Amaral

Orientado: Gustavo Moraes

ANEXOS

ANEXO A – Certificado de calibração dos medidores de temperatura PT-100.



pág. 1/1

Certificado de calibração nº 15-0015/21

Contratante

Jorge do Nascimento Fernandes

Rua Hortêncio Piaya Martinez, 326 Prestes de Barros Sorocaba-SP CEP: 18021-250

Dados do equipamento

Descrição	Fabricante	Número de série	Faixa de medição	Unidade
Termoresistência	WJE	Não consta	0 à 100	°C
Identificação	Modelo	Local de uso	Valor de uma divisão	Tipo
PT-001	4 a 20mA	Não consta	0,1	Digital

Padrões utilizados

Código	Validade	Descrição	Número do certificado	Emitente
LAB-030/001	abr/21	Calibrador Multifunção	2878/18	Ecil - RBC CAL 0026
LAB-030/013	dez/22	Termoresistência	LV00467-47555-20-R0	Visomes - RBC CAL 0127
LAB-030/015	jun/21	Termo-higrômetro	LV00467-14697-18-R1	Visomes - RBC CAL 0127

Data da calibração:	13/04/2021	Local da calibração:	Labormetro
Frequência (meses):	12	Temperatura ambiente (°C):	20±1
Validade da calibração:	04/2022	Umidade relativa (%):	50±10

Procedimento de calibração: PRLAB-030/002: Calibração realizada através da imersão da termoresistência em meio térmico com valor conhecido através de um padrão. Valor do padrão é a média de 3 leituras por ponto calibrado.

Apresentação dos resultados

Unidade de medição: °C

Valor indicado pelo padrão	Valores indicados pelo equipamento			Erro	Incerteza de medição	v_{eff}	k
0,0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	∞	2,0
50,1	50,3	50,3	50,3	0,2	0,2	∞	2,0
100,1	100,3	100,3	100,3	0,2	0,2	∞	2,0

Flávio Gouveia Corcini
Gerente Técnico

Observações: Não houve.

Data de emissão: 13/04/2021

Notas: Este certificado é intransferível e refere-se unicamente ao equipamento mencionado acima. A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com v_{eff} graus de liberdade efetivos correspondente a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

FIM DO CERTIFICADO

Contratante

Jorge do Nascimento Fernandes

Rua Hortêncio Piaya Martinez, 326 Prestes de Barros Sorocaba-SP CEP: 18021-250

Dados do equipamento

Descrição	Fabricante	Número de série	Faixa de medição	Unidade
Termoresistência	WJE	Não consta	0 à 100	°C
Identificação	Modelo	Local de uso	Valor de uma divisão	Tipo
PT-002	4 ± 20mA	Não consta	0,1	Digital

Padrões utilizados

Código	Validade	Descrição	Número do certificado	Emitente
LAB-030/001	abr/21	Calibrador Multifunção	2878/18	Ecil - RBC CAL 0026
LAB-030/013	dez/22	Termoresistência	LV00467-47555-20-R0	Visomes - RBC CAL 0127
LAB-030/015	jun/21	Termo-higrômetro	LV00467-14697-18-R1	Visomes - RBC CAL 0127


Data da calibração:	13/04/2021	Local da calibração:	Labormetro
Frequência (meses):	12	Temperatura ambiente (°C):	20±1
Validade da calibração:	04/2022	Umidade relativa (%):	50±10

Procedimento de calibração: PRLAB-030/002: Calibração realizada através da imersão da termoresistência em meio térmico com valor conhecido através de um padrão. Valor do padrão é a média de 3 leituras por ponto calibrado.

Apresentação dos resultados

Unidade de medição: °C

Valor indicado pelo padrão	Valores indicados pelo equipamento			Erro	Incerteza de medição	v_{eff}	k
0,0	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	∞	2,0
50,1	50,2	50,2	50,2	0,1	0,2	∞	2,0
100,1	100,2	100,2	100,2	0,1	0,2	∞	2,0



Flávio Gouveia Corcini
Gerente Técnico

Observações: Não houve.

Data de emissão: 13/04/2021

Notas: Este certificado é intransferível e refere-se unicamente ao equipamento mencionado acima. A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com v_{eff} graus de liberdade efetivos correspondente a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

FIM DO CERTIFICADO

Contratante

Jorge do Nascimento Fernandes

Rua Hortêncio Piaya Martinez, 326 Prestes de Barros Sorocaba-SP CEP: 18021-250

Dados do equipamento

Descrição	Fabricante	Número de série	Faixa de medição	Unidade
Termoresistência	WJE	Não consta	0 à 100	°C
Identificação	Modelo	Local de uso	Valor de uma divisão	Tipo
PT-003	4 a 20mA	Não consta	0,1	Digital

Padrões utilizados

Código	Validade	Descrição	Número do certificado	Emitente
LAB-030/001	abr/21	Calibrador Multifunção	2878/18	Ecil - RBC CAL 0026
LAB-030/013	dez/22	Termoresistência	LV00467-47555-20-R0	Visomes - RBC CAL 0127
LAB-030/015	jun/21	Termo-higrômetro	LV00467-14697-18-R1	Visomes - RBC CAL 0127


Data da calibração:	13/04/2021	Local da calibração:	Labormetro
Frequência (meses):	12	Temperatura ambiente (°C):	20±1
Validade da calibração:	04/2022	Umidade relativa (%):	50±10

Procedimento de calibração: PRLAB-030/002: Calibração realizada através da imersão da termoresistência em meio térmico com valor conhecido através de um padrão. Valor do padrão é a média de 3 leituras por ponto calibrado.

Apresentação dos resultados

Unidade de medição: °C

Valor indicado pelo padrão	Valores indicados pelo equipamento			Erro	Incerteza de medição	v_{eff}	k
0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	∞	2,0
50,1	50,0	50,0	49,9	-0,1	0,2	∞	2,0
100,1	99,9	99,9	99,8	-0,2	0,2	∞	2,0



Flávio Gouveia Corcini
Gerente Técnico

Observações: Não houve.

Data de emissão: 13/04/2021

Notas: Este certificado é intransferível e refere-se unicamente ao equipamento mencionado acima. A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com v_{eff} graus de liberdade efetivos correspondente a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

FIM DO CERTIFICADO

Contratante

Jorge do Nascimento Fernandes

Rua Hortêncio Piaya Martinez, 326 Prestes de Barros Sorocaba-SP CEP: 18021-250

Dados do equipamento

Descrição	Fabricante	Número de série	Faixa de medição	Unidade
Termoresistência	WJE	Não consta	0 à 100	°C
Identificação	Modelo	Local de uso	Valor de uma divisão	Tipo
PT-004	4 a 20mA	Não consta	0,1	Digital

Padrões utilizados

Código	Validade	Descrição	Número do certificado	Emitente
LAB-030/001	abr/21	Calibrador Multifunção	2878/18	Ecil - RBC CAL 0026
LAB-030/013	dez/22	Termoresistência	LV00467-47555-20-R0	Visomes - RBC CAL 0127
LAB-030/015	jun/21	Termo-higrômetro	LV00467-14697-18-R1	Visomes - RBC CAL 0127


Data da calibração:	13/04/2021	Local da calibração:	Labormetro
Frequência (meses):	12	Temperatura ambiente (°C):	20±1
Validade da calibração:	04/2022	Umidade relativa (%):	50±10

Procedimento de calibração: PRLAB-030/002: Calibração realizada através da imersão da termoresistência em meio térmico com valor conhecido através de um padrão. Valor do padrão é a média de 3 leituras por ponto calibrado.

Apresentação dos resultados

Unidade de medição: °C

Valor indicado pelo padrão	Valores indicados pelo equipamento				Erro	Incerteza de medição	v_{eff}	k
0,0	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	∞	2,0	
50,1	50,3	50,2	50,3	0,2	0,2	∞	2,0	
100,1	100,3	100,2	100,3	0,2	0,2	∞	2,0	



 Flávio Gouveia Corcini
 Gerente Técnico

Observações: Não houve.

Data de emissão: 13/04/2021

Notas: Este certificado é intransferível e refere-se unicamente ao equipamento mencionado acima. A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com v_{eff} graus de liberdade efetivos correspondente a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

FIM DO CERTIFICADO

ANEXO B – Certificado de calibração dos hidrômetros.



RUA SENGUPE, 113 - BOUEGA DO IGUAÇU - CEP 83040-120 - SÃO JOSÉ DOS PINHAIS - PARANÁ
 FONE: +55 41 3382 7666 - IE: 90.429.129-37 - CNPJ: 09.294.095/0001-78
 www.kellab.com.br / kel.ajp@kellab.com.br

SERVIÇOS DE CALIBRAÇÃO E ENSAIOS, REALIZADOS COM PADRÕES DE REFERÊNCIA CALIBRADOS EM LABORATÓRIOS
 ACREDITADOS SEGUNDO A NORMA ISO/IEC 17025, COM RASTREABILIDADE AO SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES (SI)
 LABORATÓRIOS DE CALIBRAÇÃO: ACÚSTICA E VIBRAÇÕES, DIMENSIONAL, ELÉTRICIDADE, FÍSICO-QUÍMICA,
 FORÇA, TORQUE E DUREZA, MASSA, ÓPTICA, TEMPERATURA E UMIDADE, TEMPO E FREQUÊNCIA,
 VAZÃO E VELOCIDADE DE FLUIDOS, VISCOSIDADE, VOLUME E MASSA ESPECÍFICA
 LABORATÓRIOS DE ENSAIO: ACÚSTICOS, MECÂNICOS, ÓPTICOS E TÉRMICOS

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº S390067/2021

Emissão:

04/05/2021

1. Dados do Instrumento e Solicitante:

Denominação: HIDRÔMETRO
 Contratante: GUSTAVO LOPES DE MORAES
 Endereço: Rua Iguape, 109 - SC
 Solicitante: GUSTAVO LOPES DE MORAES
 Endereço: Rua Iguape, 109 - SC
 Código do Indicador: V11
 Tipo de equipamento: HIDRÔMETRO
 Fabricante do Indicador: PICOFLUX
 Ficha de acompanhamento: 002508/2021
 Modelo do Indicador: S110
 Data de recebimento: 29/03/2021
 Número de série do Indicador: NÃO ENCONTRADO
 Data da calibração: 29/04/2021
 Faixa de medição: (0 a 2,5) m³/h
 Faixa calibrada: (0 a 2,5) m³/h
 Valor de uma divisão: 0,0001 m³/h
 Princípio de medição: TURBINA

2. Procedimento:

A calibração foi realizada conforme procedimento P&Q-VAZ.04, revisão 003, por meio de comparação com medidor de vazão ultrassônico. Padrões Utilizados: Medidor de vazão de líquidos certificado 9496-1 RBC/ACCI, válido até 10/2022; Medidor de vazão de líquidos certificado 9496-2 RBC/ACCI, válido até 10/2022.

3. Tabela de Resultados:

Valor nominal (m³/h)	Média obtida no item calibrado (m³/h)	Média obtida no padrão utilizado (m³/h)	Erro de medição (%)	Incerteza de medição (%)	k	veff
0,7	0,7	0,7	0,2	0,4	3,31	4
1,9	1,9	1,9	0,1	0,3	2,52	6
2,5	2,5	2,5	0,1	0,2	2,09	29

MAYKON BOGANIKA
 SIGNATÁRIO AUTORIZADO

Este certificado é válido exclusivamente para o objeto calibrado descrito nas condições específicas, não sendo extensivo a quaisquer lotes, mesmo que similares. Não é permitida a reprodução deste certificado, somente original. Certificado conferido e assinado eletronicamente.

Pág. 1/1



RUA SERGIPE, 113 - BONECA DO IGUAÇU - CEP 83040-120 - SÃO JOSÉ DOS PINHOS - PARANÁ
 FONE: +55 41 3382 7665 - IE: 90.429.129-37 - CNPJ: 09.294.095/0001-78
www.kellab.com.br / kellsp@kellab.com.br

SERVIÇOS DE CALIBRAÇÃO E ENSAIOS, REALIZADOS COM PADRÕES DE REFERÊNCIA CALIBRADOS EM LABORATÓRIOS
 ACREDITADOS SEGUNDO A NORMA ISO/IEC 17025, COM RASTREABILIDADE AO SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES (SI)
 LABORATÓRIOS DE CALIBRAÇÃO: ACÚSTICA E VIBRAÇÕES, DIMENSIONAL, ELÉTRICIDADE, FÍSICO-QUÍMICA,
 FORÇA, TORQUE E DUREZA, MASSA, ÓPTICA, TEMPERATURA E UMIDADE, TEMPO E FREQUÊNCIA,
 VAZÃO E VELOCIDADE DE FLUIDOS, VISCOSIDADE, VOLUME E MASSA ESPECÍFICA
 LABORATÓRIOS DE ENSAIO: ACÚSTICOS, MECÂNICOS, ÓPTICOS E TÉRMICOS

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº S390067/2021

Emissão:

04/05/2021

4. Condições Ambientais e Local:

Local da calibração:	K&L Laboratório		
Temperatura do ar:	(20,2 ± 0,3) °C	Diâmetro da tubulação:	1/2"
Temperatura do líquido:	(20,2 ± 0,2) °C	Fluido utilizado:	ÁGUA
Umidade relativa do ar:	(56,5 ± 3) % ur		
Pressão Atmosférica:	(1014,5 ± 2) hPa		
Massa específica do fluido:	(0,9986 ± 0,05) g/mL		

5. Notas:

5.1 - A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k , o qual para uma distribuição t com graus de liberdade efetivos ν_{eff} corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

5.2 - Erro de medição: diferença entre a média obtida no item calibrado e a média obtida no padrão.

5.3 - A faixa e os pontos calibrados foram definidos de acordo com a faixa de trabalho do instrumento.



RUA SENGIFE, 113 - BONECA DO IGUAÇU - CEP 83040-120 - SÃO JOSÉ DOS PINHAIS - PARANÁ
 FONE: +55 41 3382 7666 - IE: 90.429.129-37 - CNPJ: 09.294.095/0001-78
 www.kellab.com.br / ka.l@kellab.com.br

SERVIÇOS DE CALIBRAÇÃO E ENSAIOS, REALIZADOS COM PADRÕES DE REFERÊNCIA CALIBRADOS EM LABORATÓRIOS
 ACREDITADOS SEGUNDO A NORMA ISO/IEC 17025, COM RASTREABILIDADE AO SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES (SI)
 LABORATÓRIOS DE CALIBRAÇÃO: ACÚSTICA E VIBRAÇÕES, DIMENSIONAL, ELETRICIDADE, FÍSICO-QUÍMICA,
 FORÇA, TORQUE E DUREZA, MASSA, ÓPTICA, TEMPERATURA E UMIDADE, TEMPO E FREQUÊNCIA,
 VAZÃO E VELOCIDADE DE FLUIDOS, VISCOSIDADE, VOLUME E MASSA ESPECÍFICA
 LABORATÓRIOS DE ENSAIO: ACÚSTICOS, MECÂNICOS, ÓPTICOS E TÉRMICOS

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº S390067/2021

Emissão:

04/05/2021

1. Dados do Instrumento e Solicitante:

Denominação:	MEDIDOR DE VAZÃO		
Contratante:	GUSTAVO LOPES DE MORAES		
Endereço:	Rua Iguaçú, 109 - SC		
Solicitante:	GUSTAVO LOPES DE MORAES		
Endereço:	Rua Iguaçú, 109 - SC		
Código do Indicador:	V21	Tipo de equipamento:	HIDRÔMETRO
Fabricante do Indicador:	PICOFLUX	Ficha de acompanhamento:	
Modelo do Indicador:	S110	Data de recebimento:	
Número de série do Indicador:	NÃO ENCONTRADO	Data da calibração:	
Faixa de medição:	(0 a 2,5) m³/h		
Faixa calibrada:	(0 a 2,5) m³/h		
Valor de uma divisão:	0,0001 m³/h		
Princípio de medição:	TURBINA		

2. Procedimento:

A calibração foi realizada conforme procedimento PSQ-VAZ.04, revisão 003, por meio de comparação com medidor de vazão ultrassônico. Padrões Utilizados: Medidor de vazão de líquidos certificado 9496-1 RBC/ACCI, válido até 10/2022; Medidor de vazão de líquidos certificado 9496-2 RBC/ACCI, válido até 10/2022

3. Tabela de Resultados:

Valor nominal (m³/h)	Média obtida no item calibrado (m³/h)	Média obtida no padrão utilizado (m³/h)	Erro de medição (%)	Incerteza de medição (%)	k	veff
0,7	0,7	0,7	0,4	0,2	2,01	216
1,9	1,9	1,9	0,2	0,2	2,08	32
2,5	2,5	2,5	0,2	0,2	2,02	116

MAYKON BOGANIKA
 SIGNATÁRIO AUTORIZADO

Este certificado é válido exclusivamente para o objeto calibrado descrito nas condições específicas, não sendo extensivo a quaisquer lotes, mesmo que similares. Não é permitida a reprodução deste certificado, somente original. Certificado conferido e assinado eletronicamente.

Pág. 1/1



RUA SERGIPE, 113 - BONECA DO IGUAÇU - CEP 83040-120 - SÃO JOSÉ DOS PINHAIS - PARANÁ
 FONE: +55 41 3382 7666 - IE: 90.429.129-37 - CNPJ: 09.294.095/0001-78
 www.kellab.com.br / kel.sj@kellab.com.br

SERVIÇOS DE CALIBRAÇÃO E ENSAIOS, REALIZADOS COM PADRÕES DE REFERÊNCIA CALIBRADOS EM LABORATÓRIOS
 ACREDITADOS SEGUNDO A NORMA ISO/IEC 17025, COM RASTREABILIDADE AO SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES (SI)
 LABORATÓRIOS DE CALIBRAÇÃO: ACÚSTICA E VIBRAÇÕES, DIMENSIONAL, ELÉTRICIDADE, FÍSICO-QUÍMICA,
 FORÇA, TORQUE E DUREZA, MASSA, ÓPTICA, TEMPERATURA E UMIDADE, TEMPO E FREQUÊNCIA,
 VAZÃO E VELOCIDADE DE FLUIDOS, VISCOSIDADE, VOLUME E MASSA ESPECÍFICA
 LABORATÓRIOS DE ENSAIO: ACÚSTICOS, MECÂNICOS, ÓPTICOS E TÉRMICOS

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº S390067/2021

Emissão:

04/05/2021

4. Condições Ambientais e Local:

Local da calibração:	K&L		
Temperatura do ar:	(20,2 ± 0,3) °C	Diâmetro da tubulação:	1/2"
Temperatura do líquido:	(20,2 ± 0,4) °C	Fluido utilizado:	ÁGUA
Umidade relativa do ar:	(56 ± 2) % ur		
Pressão Atmosférica:	(1013 ± 5) hPa		
Massa específica do fluido:	(0,9985 ± 0,05) g/mL		

5. Notas:

6.1 - A Incerteza expandida de medição relatada é declarada como a Incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k , o qual para uma distribuição t com graus de liberdade efetivos $veff$ corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A Incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

6.2 - Erro de medição: diferença entre a média obtida no item calibrado e a média obtida no padrão.

6.3 - A faixa e os pontos calibrados foram definidos de acordo com a faixa de trabalho do instrumento.

