



Universidade de Aveiro
2021

**Fernando Salvador
Augusto Tacho**

**Modelação de um Sistema de Aquecimento de Água
com Suporte Solar**



Universidade de Aveiro
2021

**Fernando Salvador
Augusto Tacho**

Modelação de um Sistema de Aquecimento de Água com Suporte Solar

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Sistemas Energéticos Sustentáveis, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Fernando José Neto da Silva, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Dedico este trabalho e todo o meu percurso à minha família, sem eles nada seria possível.

O júri

Presidente

Professor Doutor Luís António da Cruz Tarelho
Professor Associado, Universidade de Aveiro

Arguente

Professora Doutora Margarita Matias Robaina
Professora Auxiliar, Universidade de Aveiro

Orientador

Professor Doutor Fernando José Neto da Silva
Professor Auxiliar, Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Um especial agradecimento ao meu orientador o Prof. Doutor Fernando Neto pela disponibilidade, apoio prestado e partilha de conhecimentos, tornando possível este trabalho.

Também gostaria de agradecer aos meus amigos, colegas e à minha família pelo apoio prestado durante o percurso académico.

Palavras-chave

Modelação; TRNSYS; Sistema Solar Térmico; Sistema Convencional; Água quente sanitária; Otimização.

Resumo

O aproveitamento da energia solar para produção de água quente sanitária (AQS) reveste-se, por numerosas razões, de importância crescente.

Objetivo deste trabalho consiste em avaliar o contributo da energia solar na produção de água quente sanitária. Para este estudo foram elaborados modelos de sistema convencional de AQS e sistema solar de AQS através do programa de simulação TRNSYS 18. Os desempenhos dos sistemas modelados foram analisados usando como caso de estudo uma casa de uma família típica de 5 pessoas em Maputo, Moçambique. As simulações numéricas dos desempenhos anuais foram realizadas com base nos dados meteorológicos do referido local considerando um ano meteorológico típico.

Os sistemas foram projetados para atender a demanda de 200 litros de AQS diário a temperatura de 60 ° C. O sistema convencional (Aquecedor elétrico com tanque de armazenamento), que serviu como caso base, é constituído por um tanque de armazenamento de 200 litros com uma resistência de 2,5 kW. O sistema solar modelado é o sistema de circulação forçada, constituído por coletores de placa plana com área de 3,5 m² e tanque de armazenamento de 200 litros dotado de um sistema auxiliar elétrico para atender a demanda de AQS na ausência da radiação solar. O modelo do sistema solar foi otimizado tendo os seus resultados comparados com resultados do sistema convencional.

O consumo de energia elétrica e as emissões de gases de efeito estufa (GEE) do sistema convencional, foram comparados com os de sistema solar. O payback que resultaria na implementação do sistema solar foi determinado a partir da análise financeira. Os resultados mostraram que os sistemas solares contribuem significativamente na redução dos consumos de energia elétrica e nas emissões de GEE em relação aos sistemas convencionais. A utilização do sistema solar resultou na redução de 80% de consumos de energia elétrica, e emissões de CO₂ em relação ao sistema convencional. O payback foi estimado em 6,8 anos. O sistema solar otimizado reduziu o consumo de energia elétrica e emissões de CO₂ em 86%.

Keywords

Modeling; TRNSYS; Solar Thermal System; Conventional System; Domestic hot water; Optimization.

Abstract

The use of solar energy for the production of domestic hot water (DHW) is, for many reasons, of increasing importance.

The objective of this work is to evaluate the contribution of solar energy in the production of domestic hot water. For this study, models of conventional DHW system and solar DHW system were developed using the TRNSYS 18 simulation program. The performances of the modelled systems were analysed using a typical family house of 5 people in Maputo, Mozambique as a case study. The numerical simulations of the annual performances were performed based on the meteorological data of that place considering a typical meteorological year.

The systems were designed to meet the demand for 200 litres of daily DHW at a temperature of 60 ° C. The conventional system (Electric heater with storage tank), which served as a base case, consists of a 200 litres storage tank with a resistance of 2.5 kW. The modelled solar system is the forced circulation system, consisting of flat plate collectors with an area of 3.5 m² and a 200 litres storage tank equipped with an electrical auxiliary system to meet the demand in the absence of solar radiation. The solar system model was optimized, and its results were compared with results of the conventional system.

Electricity consumption and greenhouse gas (GHG) emissions from the conventional system were compared with those from the solar system. The payback that would result in the implementation of the solar system was determined from the financial analysis. The results showed that solar systems contribute significantly to reducing electricity consumption and GHG emissions compared to conventional systems. The use of the solar system resulted in a reduction of 80% in electricity consumption, and CO₂ emissions in relation to the conventional system. The payback was estimated at 6,8 years. The optimized solar system reduced electricity consumption and CO₂ emissions by 86%.

Índice

| | |
|--|-------|
| Índice..... | xvi |
| Índice de figuras..... | xviii |
| Índice de tabelas..... | xix |
| lista de símbolos..... | xx |
| lista de grandezas..... | xx |
| lista de abreviaturas..... | xx |
| 1. Introdução..... | 1 |
| 1.1. Importância da Energia Solar..... | 1 |
| 1.2. Regulamentação nacional moçambicana para promoção e utilização de sistemas solares..... | 2 |
| 1.3. Enquadramento e Motivação..... | 3 |
| 1.4. Objetivos..... | 4 |
| 1.5. Estrutura da dissertação..... | 5 |
| 2. Revisão bibliográfica..... | 7 |
| 2.1. Radiação solar..... | 7 |
| 2.2. Fenómenos de transferência de calor..... | 8 |
| 2.2.1. Condução..... | 8 |
| 2.2.2. Convecção..... | 9 |
| 2.2.3. Radiação..... | 9 |
| 2.3. Sistemas solares de aquecimento de água..... | 10 |
| 2.3.1. Sistemas passivos..... | 10 |
| 2.3.2. Sistemas ativos..... | 10 |
| 2.3.3. Coletor solar..... | 11 |
| 2.3.3.1. Coletor de placa plana..... | 15 |
| 2.3.3.2. Coletor de tubos evacuados..... | 16 |
| 2.3.3.3. Coletor do tipo CPC (ou concentrador parabólico composto)..... | 17 |
| 2.3.4. Sistema de armazenamento..... | 19 |
| 2.3.4.1. Tanque de armazenamento..... | 20 |
| 2.3.4.2. Configuração do tanque..... | 20 |
| 2.3.4.3. Estratificação e desempenho térmico do tanque..... | 21 |
| 2.3.5. Elementos de transferência de calor..... | 22 |
| 2.3.6. Sistema de apoio..... | 22 |
| 2.3.7. Elementos de controlo..... | 22 |
| 2.3.8. Princípios de dimensionamento de sistemas solares térmico..... | 23 |
| 2.3.8.1. Consumo diário de AQS..... | 23 |
| 2.3.8.2. Volume do tanque de armazenamento..... | 24 |
| 2.3.8.3. Área do coletor solar..... | 24 |
| 2.3.8.4. Guia de dimensionamento de sistemas solares térmicos..... | 24 |
| 2.4. Sistemas convencionais de aquecimento de água..... | 25 |
| 2.4.1. Aquecedor elétrico de água..... | 25 |
| 2.4.1.1. Componentes básicos dos aquecedores elétricos..... | 26 |
| 2.4.1.2. Estratificação da temperatura..... | 27 |
| 2.4.2. Aquecedores de água a gás com armazenamento..... | 28 |
| 2.5. Modelação dos sistemas de aquecimento de água..... | 29 |
| 2.6. Bases para a validação do modelo..... | 31 |
| 3. Metodologia..... | 33 |
| 4. Caso de estudo..... | 37 |
| 4.1. Localização..... | 37 |
| 4.2. Dados meteorológicos..... | 37 |
| 4.3. Consumo doméstico de água quente..... | 39 |
| 4.4. Perfil de consumo de AQS..... | 39 |
| 4.5. Modelos dos sistemas de aquecimento de água..... | 41 |
| 4.5.1. Aquecedor elétrico de AQS..... | 41 |
| 4.5.2. Aquecedor solar de AQS..... | 42 |
| 4.5.2.1. Coletor solar..... | 43 |

| | | |
|----------|---|----|
| 4.5.2.2. | Bomba..... | 44 |
| 4.5.2.3. | Tanque de armazenamento | 44 |
| 5. | Discussão dos resultados das simulações | 47 |
| 5.1. | Consumos de energia elétrica | 47 |
| 5.2. | Análise financeira | 48 |
| 5.3. | Emissões de CO2 | 49 |
| 6. | Otimização do sistema solar de AQS | 53 |
| 6.1. | Área do coletor solar | 54 |
| 6.2. | Volume do tanque de armazenamento | 55 |
| 6.3. | Potência do elemento aquecedor..... | 56 |
| 6.4. | Comparação entre o aquecedor elétrico e o aquecedor solar otimizado..... | 56 |
| 7. | Conclusão | 59 |
| 7.1. | Limitações do trabalho..... | 60 |
| 7.2. | Sugestões para trabalhos futuros..... | 60 |
| | Referências | 61 |
| | Apêndice A - Consumos de energia dos sistemas de AQS..... | 66 |
| | Apêndice B – Gráficos de temperatura no tanque e radiação solar num período típico de verão e inverno.... | 69 |
| | Anexo – Tarifários de energia elétrica..... | 72 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Fonte de energia usada para aquecimento de água na cidade de Maputo [20]. | 4 |
| Figura 2. Atenuação da radiação solar à medida que atravessa a atmosfera [24]. | 7 |
| Figura 3. Condução, Convecção e Radiação acontecendo simultaneamente [26]. | 8 |
| Figura 4. Sistema ativo com bomba circuladora (à esquerda) e sistema passivo sem bomba circuladora (à direita) [21]. | 11 |
| Figura 5. Esquema básico do coletor térmico de placa plana [27]. | 11 |
| Figura 6. Comparação da eficiência de vários coletores em dois níveis de irradiação, 500 e 1000 W / m ² [31]. | 14 |
| Figura 7. Coletor solar de placa plana [32]. | 15 |
| Figura 8. Diagrama esquemático de um coletor de tubo evacuado [31]. | 16 |
| Figura 9. CPC de concentração externo comum [33]. | 17 |
| Figura 10. CPC de Absorvedor tubular de concentração externa com defletor [34]. | 18 |
| Figura 11. Esquema de um tubo evacuado com CPC interno: Esquerda: vista em corte transversal; direita: diagrama de estrutura [33]. | 18 |
| Figura 12. Diagrama esquemático do CPC combinado de concentração interna e externa (esquerda: modelo 3-D, direita: vista em corte transversal) [33]. | 18 |
| Figura 13. Estratificação de água em um tanque [35]. | 20 |
| Figura 14. Esquemas comuns nos tanque de AQS (a) Permutador de calor imerso (b) Permutador de calor de manto (c) Invólucro externo e permutador de calor de tubo [36]. | 21 |
| Figura 15. Regulação por termostato diferencial atuando na bomba: 1 coletor, 2 acumulador, 3 bomba, 4 controlador diferencial, 5 e 6 sensor de temperatura, 7 válvula [35]. | 23 |
| Figura 16. Aquecedor elétrico de água com tanque de armazenamento [44]. | 26 |
| Figura 17. Principais componentes de um aquecedor elétrico típico [47]. | 27 |
| Figura 18. Estratificação de temperatura dentro de um aquecedor elétrico [47]. | 28 |
| Figura 19. Esquema de aquecedor de água a gás com armazenamento [49]. | 29 |
| Figura 20. Modelo do sistema convencional de AQS no TRNYS. | 33 |
| Figura 21. Modelo do sistema solar de AQS no TRNYS. | 34 |
| Figura 22. Localização cidade de Maputo. | 37 |
| Figura 23. Frequência das horas de banho dos membros da família [20]. | 41 |
| Figura 24. perfil de consumo do caso de estudo | 41 |
| Figura 25. Esquema do sistema básico de água quente sanitária de circulação forçada | 42 |
| Figura 26. Consumos mensais de energia dos aquecedores elétricos e solar de água | 48 |
| Figura 27. Emissões anuais de CO ₂ do aquecedor elétrico e aquecedor solar. | 50 |
| Figura 28. Fração solar como função da área do coletor solar. | 54 |
| Figura 29. Fração solar como função do volume do tanque de armazenamento. | 55 |
| Figura 30. Fração solar como função da potência do elemento aquecedor. | 56 |

Índice de tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1. Aplicações de energia solar e tipo de coletores usados [31]. | 15 |
| Tabela 2. Tipos de coletores para utilização térmica solar [29]. | 19 |
| Tabela 3. Dimensionamento de sistemas solares de água quente sanitária para condições da Europa Central [42]. | 25 |
| Tabela 4. Dimensionamento de sistemas solares de água quente sanitária para as condições da África Austral [42]. | 25 |
| Tabela 5. Temperaturas máximas e mínimas na cidade de Maputo[57]. | 38 |
| Tabela 6. Médias da radiação solar global, radiação direta e radiação difusa na cidade de Maputo [59]. | 38 |
| Tabela 7. Consumo diário de água quente por domicílio e ocupante por país. O consumo diário de energia é calculado para um domicílio médio de 2,5 ocupantes [61]. | 40 |
| Tabela 8. Volume diário de água quente por tecnologia [20]. | 40 |
| Tabela 9. parâmetros de modelação do aquecedor elétrico | 42 |
| Tabela 10. características do coletor solar | 43 |
| Tabela 11. características da bomba de Circulação | 44 |
| Tabela 12. características do tanque de armazenamento | 44 |
| Tabela 13. Consumos médios diários de energia elétrica dos aquecedores elétrico e solar | 48 |
| Tabela 14. Investimento inicial e o período de retorno simples do sistema solar de AQS. | 49 |
| Tabela 15. Quantificação monetária das emissões de CO2 evitadas | 50 |
| Tabela 16. Parâmetros de otimização do sistema de aquecimento solar de AQS | 53 |
| Tabela 17. Frações solares para cada valor dos parâmetros do sistema solar de AQS | 54 |
| Tabela 18. Parâmetros de aquecedor solar otimizado. | 57 |
| Tabela 19. Comparação entre aquecedor elétrico e aquecedor solar otimizado | 57 |
| Tabela 20. Síntese dos sistemas de AQS. | 58 |

lista de símbolos

| | |
|---------------|-------------------------------|
| α | Absorptividade |
| ε | Emissividade |
| σ | Constante de Stefan Boltzmann |
| τ | transmitância |
| η | Eficiência do coletor |

lista de grandezas

| | |
|------------|---|
| Q_T | Energia total incidente [J]; |
| Q_{LOSS} | Energia térmica perdida [J]; |
| Q_U | ganho de energia útil [J]; |
| A | área do coletor [m ²]; |
| U | Coefficiente global de perda de calor [W/ (m ² .K)]; |
| T_C | Temperatura média da placa absorvedora [K]; |
| T_a | Temperatura ambiente [K]; |
| F_R | fator de eficiência do coletor; |
| C_p | Calor específico da água [J/(kg.K)]; |
| \dot{m} | Caudal de água [kg/s]; |
| f | Fração solar; |
| C_{kWh} | Custo por unidade da fonte de energia [USD/kWh] |
| Q_{Aux} | Energia elétrica consumida pelo sistema [J]; |
| I_{co} | Capital de investimento inicial; |
| CF | <i>cash flow</i> , economia de custos operacionais. |

lista de abreviaturas

| | |
|-----|---------------------------------|
| AQS | Água Quente Sanitária |
| CPC | Coletor Parabólico Concentrador |
| ETC | Coletor de Tubo Evacuado |
| GEE | Gases de Efeito Estufa |

1. Introdução

1.1. Importância da Energia Solar

A demanda mundial de energia está aumentando significativamente devido ao crescimento populacional e à evolução industrial. Espera-se que a demanda mundial de energia primária aumente cerca de 1,5–3 vezes até 2050 devido ao aumento da demanda de energia em várias regiões do mundo [1]. O crescimento populacional e a elevação do padrão de vida das pessoas são os principais fatores responsáveis pelo aumento da demanda por energia. A população mundial atingiu 7,7 bilhões de pessoas em meados de 2019, e estima-se que chegará a 8,5 bilhões de pessoas em 2030, 9,7 bilhões em 2050 e 10,9 bilhões em 2100 [2]. A produção mundial de energia em 2018 foi de 14421 Mtep, um aumento equivalente à 3,2 % em relação a 2017. Os combustíveis fósseis foram responsáveis por mais de 81% da produção de 2018 [3].

As necessidades de aquecimento e arrefecimento em algumas partes do mundo, foram algumas das principais razões para o aumento global do consumo de energia em 2018. A demanda por aquecimento é responsável por uma porção significativa da demanda mundial total de energia. O aquecimento foi responsável por 50% do consumo global de energia final em 2018[4]. Cerca de 50% do calor total produzido foi utilizado para processos industriais, outros 46% foram consumidos em edifícios para aquecimento de espaços e águas e, em menor medida, para cozinhar, enquanto o restante foi utilizado na agricultura, essencialmente para aquecimento de estufas [5].

A produção de calor contribui com 40% das emissões globais de dióxido de carbono (CO₂)[5]. As formas predominantes atuais de produção e utilização de energia causam problemas ambientais em escala local, regional e global reduzindo a qualidade de vida e colocando em risco a saúde humana, bem como o bem-estar das gerações presentes e futuras da humanidade. Perante os atuais cenários problemáticos resultantes das formas atuais de produção e utilização de energia, a opção por fontes de energias renováveis como energia solar é fundamental.

A aposta na energia solar pode ser a melhor opção por vários motivos: Em primeiro lugar, a energia solar é a fonte de energia mais abundante de energia renovável e o sol emite-a a uma taxa de $3,8 \times 10^{23}$ kW, dos quais aproximadamente $1,8 \times 10^{14}$ kW é interceptado pela terra [6]. A superfície da Terra recebe muita energia do Sol, suficiente para fornecer 7900 vezes mais energia que a energia usada atualmente pela população mundial. Na média global, cada metro quadrado de terra que recebeu luz solar suficiente pode gerar 1700 kWh de energia a cada ano [7]. A energia solar chega à Terra em várias formas, como calor e luz. Antes da energia solar atingir a superfície da Terra, uma porção maior da sua energia é perdida por espalhamento, reflexão e absorção pelas nuvens. Segundo os estudos realizados, a demanda global de energia pode ser atendida utilizando a energia solar de forma satisfatória, pois é abundante na natureza e constitui uma fonte de energia de livre disponibilidade e sem custo. Em segundo lugar, é uma fonte promissora de energia no mundo porque não é esgotável, dando sólidas e crescentes eficiências de produção do que outras fontes de energia [8]. Terceiro, a utilização e o rastreamento da energia solar evita impactos negativos ao ecossistema mantendo o equilíbrio natural consistente e condições favoráveis aos organismos vivos. Por outro lado, a exploração contínua dos combustíveis fósseis vai resultar em danos ao ecossistema prejudicando o equilíbrio natural [9]. Em quarto, O sistema solar, por ser de fácil

acessibilidade e aplicabilidade, pode ser usado efetivamente para os sistemas de vilas, operações industriais e nas residências. O uso dos sistemas solares de forma adequada seria a melhor opção para evitar problemas associados com a crise de energia [10].

O aproveitamento da energia solar nos países em desenvolvimento, onde há predominância no uso da biomassa e fontes tradicionais de energia, é a melhor resposta à pobreza energética e pode fornecer excelentes oportunidades para a redução das emissões de gases de efeito de estufa (GEE) e da poluição do ar, substituindo a iluminação por querosene e a lenha para cozinhar. A energia solar fotovoltaica (PV) pode ser uma tecnologia apropriada para uma fonte de eletricidade renovável, especialmente em áreas rurais remotas onde extensões de rede são financeiramente ou tecnicamente inviáveis. O PV também pode ser usado para reduzir a demanda por combustíveis fósseis e emissões associadas, incluindo dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x) e dióxido de enxofre (SO₂). O uso de sistemas fotovoltaicos pode reduzir 69-100 milhões de toneladas de CO₂, 126000-184000 t de SO₂ e 68000-99000 t de NO_x até 2030 [11]. A implementação dos sistemas solares térmicos pode contribuir significativamente na redução de emissões associadas ao CO₂. Um sistema de água quente solar com 50 coletores pode reduzir mais de 50 t de dióxido de carbono a cada ano e também um sistema de aquecimento de piscina com 100 coletores pode reduzir acima de 80 t de CO₂ a cada ano ou 5000 t ao longo da vida do sistema [12]. Em média, podem ser economizados cerca de 3,74 TgCO₂ (teragramas de CO₂ equivalente) por ano, a partir de 2010 com a aplicação de aquecedores solares de água, o que representa uma redução notável das emissões lançadas no meio ambiente [13].

1.2. Regulamentação nacional moçambicana para promoção e utilização de sistemas solares

A contribuição do setor energético para o desenvolvimento econômico de um país no contexto da globalização exige a adoção de medidas que levem à estabilidade da procura e oferta dos bens e serviços de energia dirigidos aos diferentes estratos da sociedade. A aprovação da Resolução n.º 62/2009, de 14 de Outubro do conselho de ministros do governo de Moçambique é o ponto de partida da Política de Desenvolvimento de Energias Novas e Renováveis, segundo a qual as energias novas e renováveis assumem uma posição de cada vez maior relevo no mercado mundial das energias primárias, podendo responderem a diversas imposições globais (segurança energética, mudanças climáticas, redução das diferenças de acesso às energias modernas entre o meio rural e urbano) [14]. Deste modo, Moçambique assumiu claramente que o sector das energias renováveis é crucial para o desenvolvimento do país.

O sector energético em Moçambique adotou um conjunto de estratégias e políticas para promover e facilitar o acesso às energias renováveis, alargar a cobertura da rede nacional, melhorar a eficiência tecnológica, aumentar a disponibilidade de eletricidade a preços competitivos, fomentar o envolvimento do sector privado e promover práticas ambientalmente sustentáveis. Em termos práticos, esses objetivos foram traduzidos num conjunto de instrumentos jurídicos e institucionais, incluindo.

- Estratégia Nacional de Desenvolvimento para 2015-2035 (2015);
- Programa Quinquenal do Governo de Moçambique para 2015-2019 (2015);
- Plano Económico e Social para 2015 (2015);

- Plano Económico e Social para 2016 (2015);
- Plano Económico e Social para 2017 (2016) [14].

Moçambique no âmbito dos objetivos de desenvolvimento sustentável e do projeto “SOLTRAIN” (The Southern African Solar Thermal Training and Demonstration Initiative) em linha com a política governamental sobre fontes renováveis de energia, definiu seguintes metas:

- Acesso universal a energia em 2030 através do “Programa Nacional de Energia para Todos”.
- Instalação de 0,1 metros quadrados de área de coletor solar por habitante até 2030.

1.3. Enquadramento e Motivação

À semelhança de outros países em desenvolvimento, Moçambique enfrenta problemas energéticos resultantes do aumento no acesso e consumo de energia elétrica.

O aumento no acesso à energia elétrica leva ao aumento de energia elétrica no setor residencial. O acesso da população à energia elétrica vêm crescendo rapidamente tendo aumentado dos 16% em 2010 para 32% em 2019. O acesso da população à energia elétrica vêm crescendo rapidamente tendo aumentado dos 16% em 2010 para 32% em 2019. Esforços têm sido mobilizados para garantir cerca de 300 mil novas ligações à energia elétrica por ano no âmbito do programa de acesso universal de energia 2030. Se esta meta for materializada prevê-se que até 2030 mais de 90% da população terá acesso à energia [15]. Espera-se um incremento médio de 2,2% / ano do consumo de eletricidade entregue no setor residencial africano de 2012 a 2040, comparativamente ao incremento de 0,6% / ano nos países da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE), no mesmo período [16]. Este aumento significativo no consumo de energia elétrica nos países em desenvolvimento é resultado da urbanização, do crescimento económico, das dificuldades de acesso a novas tecnologias e equipamentos com maior eficiência [17]. Como exemplo, Moçambique teve um crescimento económico médio de cerca de 8% entre 2004 e 2015 [18] e a população urbana cresceu cerca de 50% nos últimos 15 anos [19]. Este aumento no acesso a eletricidade não tem sido proporcionalmente acompanhado com o aumento da capacidade das infraestruturas elétrica resultando numa má qualidade no fornecimento de energia elétrica.

O aquecimento de água é frequentemente o processo que mais consome energia nas residências familiares contribuindo para maior consumo de energia no setor residencial. As fontes de energia e as tecnologias utilizadas para o aquecimento de água variam de região para região. Na cidade de Maputo, em Moçambique, as fontes predominantes para o aquecimento de água são eletricidade e biomassa com uma participação de 46% e 41% respetivamente (fig. 1). As tecnologias utilizadas no aquecimento dependem das rendas das famílias onde as famílias de baixa renda utilizam a biomassa e as famílias de alta renda utilizam amplamente os aquecedores elétricos [20].

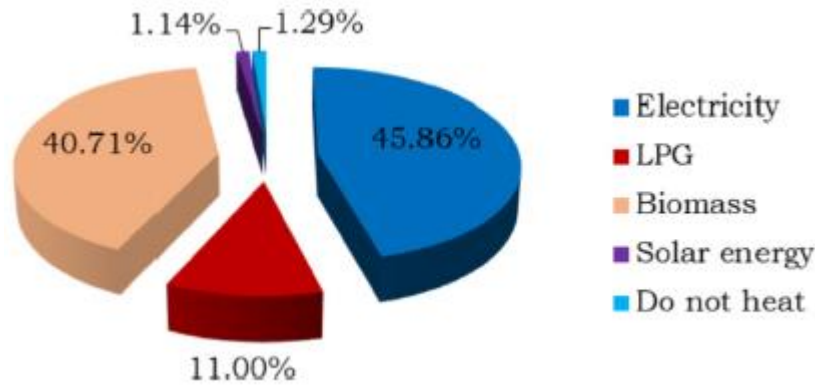


Figura 1. Fonte de energia usada para aquecimento de água na cidade de Maputo [20].

Os sistemas convencionais de aquecimento de água apresentam um consumo considerável de energia sendo responsáveis por cerca de 50% do consumo de energia do setor residencial [21]. Este consumo elevado de energia pode provocar sobrecarga na rede de distribuição de eletricidade, principalmente nos horários de pico porque a demanda pela energia cresceu para além da capacidade da rede de distribuição, resultar em elevados custos de energias devidos as tarifas de energias praticadas e impactos negativos ao meio ambiente devido a emissão de GEE.

Uma das formas de reduzir o consumo de energia no setor residencial e resolver os problemas associados a este consumo é a implementação de um conjunto de medidas de economia de energia. O fornecedor de eletricidade (EDM) têm conduzido programas e práticas de eficiência energética nas residências destacando-se o programa “mais luz menos energia” que promove o uso de lâmpadas de baixo consumo. O governo de Moçambique tem vindo a promover a utilização e desenvolvimento de fontes renováveis de energia através da investigação, educação, formação e divulgação de tecnologias de energias renováveis tendo estabelecido neste âmbito uma meta de instalação de 0,1 m² per capita de sistemas de aquecimento solar de água até ao ano 2030 em linha com o projeto SOLTRAIN “*the Southern African Solar Thermal Training and Demonstration Initiative*”. O roteiro de tecnologia solar térmica elaborado para o alcance da meta prevê uma instalação de 3.4 milhões de m² de coletores solares até 2030 distribuídos em setor residencial (50%), setor do turismo (25%), setor público (15%) e setor industrial e comercial (10%) [22]. A concretização desta meta e outros esforços paralelos para a implementação de sistemas solares térmicos terá um impacto positivo para os usuários finais, na redução da demanda da rede elétrica, aumento na eficiência no uso de energia e redução nas emissões de GEE.

1.4. Objetivos

A mobilização da energia solar para produção de AQS, reveste-se de uma importância crescente, seja do ponto de vista económico ou ambiental. No entanto, a disponibilidade da energia solar raramente está de acordo com as necessidades diárias de AQS.

De modo a promover o melhor aproveitamento deste recurso, o objetivo deste trabalho consiste em desenvolver modelos que permitam simular o contributo da energia solar para produção de AQS usando o software TRNSYS. As simulações do modelo de aquecimento de água com suporte solar serão comparadas com as simulações do modelo do sistema convencional (elétrico) de modo

avaliar as contribuições da energia solar. As contribuições serão analisadas sob ponto de vista energético, ambiental e económico.

1.5. Estrutura da dissertação

Este trabalho, incluindo a introdução onde é abordada a importância da energia solar, a motivação e os objetivos definidos para este estudo, é organizado em seis capítulos. O segundo capítulo é dedicado à revisão bibliográfica, que começa com a abordagem da radiação solar desde a sua emissão a partir do sol até atingir a superfície terrestre, os sistemas solares de AQS, os sistemas convencionais (elétrico) de produção de AQS, descrição das ferramentas de modelação dos sistemas de AQS e uma abordagem mais detalhada do software TRNSYS.

O terceiro capítulo é dedicado ao caso de estudo, iniciando pela descrição da localização e das condições meteorológicas. Em seguida, são apresentados os consumos de AQS e os perfis determinados para o caso de estudo, a caracterização dos modelos dos sistemas de AQS elaborados para o estudo.

O quarto capítulo foi dedicado à discussão dos resultados das simulações dos sistemas solar de AQS e convencional de AQS. Os consumos de energia elétrica e as emissões de CO₂ dos sistemas modelados são apresentados e analisados. A análise financeira do sistema solar é efetuada para determinar o payback do sistema no caso da sua implementação em relação ao sistema convencional.

O quinto capítulo é dedicado à otimização do sistema solar e à comparação deste sistema com o sistema convencional de produção de AQS.

O sexto capítulo apresenta as conclusões importantes sobre a contribuição da energia solar através da comparação do sistema solar de AQS e sistema convencional (elétrico) de AQS.

2. Revisão bibliográfica

2.1. Radiação solar

A estrutura e as características do sol determinam a natureza da energia que irradia para o espaço. O sol é uma esfera de matéria gasosa intensamente quente, com um diâmetro de $1,39 \times 10^9$ m e está, em média, a $1,5 \times 10^{11}$ m da Terra. O sol é composto de muitas camadas de gases, que são progressivamente mais quentes em direção ao seu centro. A camada mais externa, a partir da qual a energia é irradiada para o sistema solar, está aproximadamente a uma temperatura equivalente a 5777 K e as propriedades de radiação emitida assemelham-se às propriedades de radiação emitida por um corpo negro a esta temperatura. A temperatura nas regiões centrais do interior é estimada em 8×10^6 a 40×10^6 K [23].

É geralmente aceite que uma reação termonuclear hidrogênio-hélio é a fonte da energia solar. Mais importante para os usuários terrestres da radiação solar, que a natureza do processo de geração da energia solar, é a quantidade desta energia, sua distribuição espectral e temporal e sua variação com a hora do dia e o ano. A energia produzida no interior da esfera solar em temperaturas de muitos milhões de graus deve ser transferida para a superfície e então irradiada para o espaço através de sucessão de processos radiativos e convectivos que ocorrem com sucessivas emissões, absorção e re-irradiação. A taxa de emissão de energia do sol é $3,8 \times 10^{23}$ kW, que resulta da conversão de $4,3 \times 10^9$ g / s de massa em energia. Desse total, apenas uma pequena fração, aproximadamente $1,7 \times 10^{14}$ kW, é interceptada pela Terra, que está localizada a cerca de 150 milhões de km do sol [24]. De acordo com medições bem estabelecidas, a densidade de potência média da radiação solar fora da atmosfera da Terra é $1366 \text{ W} / \text{m}^2$, amplamente conhecida como a constante solar [25].

À medida que a radiação solar extraterrestre, passa pela atmosfera, uma parte dela é refletida de volta para o espaço, uma parte é absorvida pelo ar e pelo vapor de água e outra é espalhada por moléculas de ar, vapor de água, aerossóis e partículas de poeira. A parte da radiação solar que atinge a superfície da Terra essencialmente sem mudança de direção é chamada de radiação direta ou de feixe. A parte da radiação que chega na superfície da Terra depois de sofrer mudança de direção devido ao fenómeno de espalhamento na atmosfera é chamada de radiação difusa.

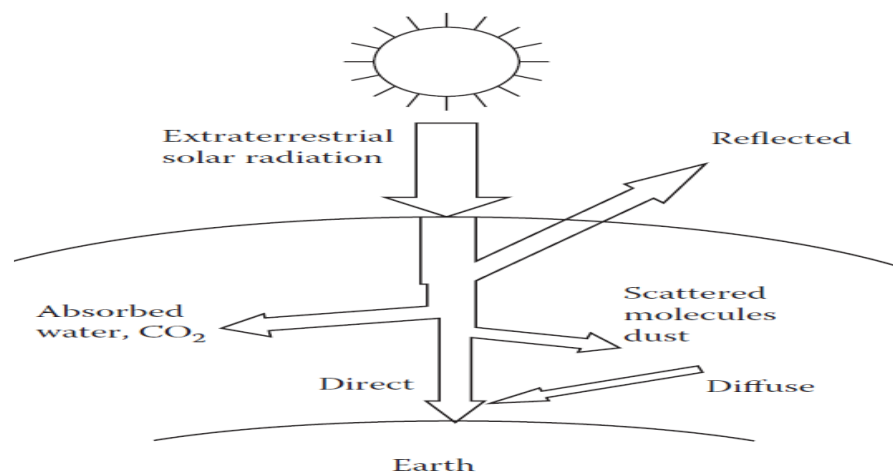


Figura 2. Atenuação da radiação solar à medida que atravessa a atmosfera [24].

A variação na disponibilidade de radiação solar sazonal na superfície da Terra pode ser entendida a partir da geometria do movimento relativo da Terra ao redor do sol. Como a órbita da Terra é elíptica, a distância Terra-Sol varia durante um ano, sendo a variação $\pm 1,7\%$ da média. Portanto, a radiação extraterrestre, I , também varia de acordo com a lei do quadrado.

$$I = I_0(D_0/D)^2 \quad (1)$$

onde D é a distância entre o sol e a terra e D_0 é a distância média anual Terra-Sol.

2.2. Fenômenos de transferência de calor

Calor é forma de energia que pode ser transferida de um sistema para outro como consequência da diferença de temperaturas entre eles. A transferência de energia como calor é sempre do meio de maior temperatura para o de menor temperatura e cessa quando os dois meios atingem a mesma temperatura. O calor pode ser transferido por três mecanismos diferentes: condução, convecção e radiação.

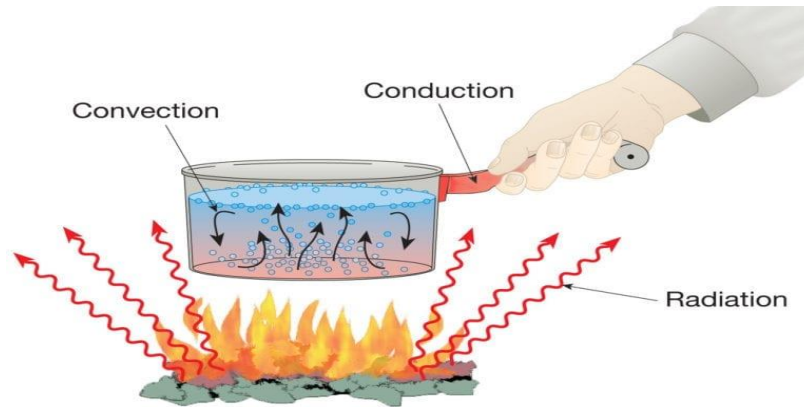


Figura 3. Condução, Convecção e Radiação acontecendo simultaneamente [26].

2.2.1. Condução

Condução é a transferência de energia das partículas mais energéticas de uma substância para as partículas vizinhas menos energéticas como resultado da interação entre elas. A condução pode ocorrer em sólidos, líquidos ou gases. Em líquidos e gases, a condução deve-se às colisões e difusão das moléculas em seus movimentos aleatórios. Nos sólidos é devido à combinação das vibrações das moléculas em uma rede e a energia é transportada por elétrons livres.

A taxa de condução de calor através de uma camada plana é proporcional à diferença de temperatura através da camada e à área de transferência de calor, mas inversamente proporcional à espessura da camada (Lei de Fourier).

$$Q_{cond} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2)$$

onde a constante de proporcionalidade k é a condutividade térmica do material, que é a medida da capacidade do material de conduzir calor.

2.2.2. Convecção

Convecção é o mecanismo de transferência de energia entre uma superfície sólida e uma líquida ou um gás adjacente, que está em movimento e que envolve os efeitos combinados de condução e de movimento de um fluido. Quanto mais rápido for o movimento do fluido, maior será a transferência de calor por convecção. Na ausência de qualquer movimento de uma massa de fluido, a transferência de calor entre uma superfície sólida e o fluido adjacente é por pura condução.

A convecção é chamada de convecção forçada se o fluido é forçado a fluir sobre a superfície por meios externos, tais como um ventilador, bomba ou o vento. Convecção natural (ou livre) ocorre quando o movimento do fluido é causado por forças de impulsos que são induzidas por diferença de densidade, devido a variação da temperatura no fluido.

A taxa de transferência de calor por convecção é proporcional à diferença de temperatura, e é expressa pela lei de Newton do resfriamento,

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (3)$$

onde h é o coeficiente de transferência de calor por convecção em $W/m^2 \cdot ^\circ C$, A_s é a área da superfície através da qual ocorre a transferência de calor por convecção, T_s é a temperatura da superfície, T_∞ é a temperatura do fluido suficientemente longe da superfície.

2.2.3. Radiação

Radiação é a energia emitida pela matéria sob a forma de ondas eletromagnética (ou fótons) como resultado das mudanças de configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas. A transferência de calor por radiação não exige a presença de um meio interveniente como ocorre com a condução e convecção sendo o mecanismo mais rápido de transferência de calor (na velocidade de luz), ocorrendo sem a atenuação no vácuo. Esta é a forma como a energia do sol atinge a Terra.

Nos estudos de transferência de calor o interesse reside na radiação térmica, que é a radiação emitida pelos corpos devido à sua temperatura, diferindo das outras formas de radiação eletromagnética como os raios X, raios gama, microondas, ondas de rádio e televisão, que não estão relacionadas com a temperatura. Todos os corpos a uma temperatura superior ao zero absoluto emitem uma radiação térmica.

A radiação é considerada um fenômeno volumétrico, todos os sólidos, líquidos e gases emitem, absorvem ou transmitem radiação em diferentes graus. Entretanto no geral, a radiação é considerada um fenômeno superficial para os sólidos que são opacos à radiação térmica, tais como metais, madeira e rochas visto que a radiação emitida pelas regiões do interior destes materiais não podem chegar à superfície e radiação incidente sobre tais corpos é normalmente absorvida dentro de alguns microns a partir da superfície.

A taxa máxima da radiação que pode ser emitida a partir de uma superfície a temperatura termodinâmica T_s (em K) é dada pela lei de Stefan-Boltzmann da radiação térmica como,

$$\dot{Q}_{emiss,m\acute{a}x} = \sigma A_s T_s^4 \quad (4)$$

onde $\sigma = 5,670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$, é a constante de Stefan-Boltzmann. A radiação emitida a essa taxa máxima é de uma superfície idealizada chamada de corpo negro cuja radiação emitida é chamada de radiação de corpo negro. A radiação emitida por todas superfícies reais é menor do que aquela emitida por um corpo negro à mesma temperatura, sendo expressa por,

$$\dot{Q}_{emiss,m\acute{a}x} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (5)$$

onde ε é a emissividade da superfície cujo valor está na faixa $0 \leq \varepsilon \leq 1$, sendo igual a 1 para o corpo negro. Para além da emissividade, outra propriedade importante de uma superfície é a sua absorptividade α , que é a fração da energia da radiação incidente sobre uma superfície que absorve. Do mesmo modo que a emissividade, os valores de absorptividade situam-se no intervalo de $0 \leq \alpha \leq 1$, onde o corpo como um absorvedor perfeito possui $\alpha=1$.

2.3. Sistemas solares de aquecimento de água

Os sistemas solares térmicos convertem a energia do sol em calor através de coletores solares térmicos colocados no exterior das habitações, geralmente na cobertura, por onde circula um fluido de transferência térmica. Uma rede de tubagem permite o escoamento entre os coletores, onde é aquecido, e o depósito de acumulação, onde é armazenada a energia térmica. O armazenamento no depósito permite a utilização da água quente nos períodos em que as necessidades de AQS não coincidem com a disponibilidade do recurso solar, por exemplo, à noite. Os sistemas solares de aquecimento de água podem ser divididos em duas categorias: sistemas passivos e sistemas ativos.

2.3.1. Sistemas passivos

Esse tipo de sistema solar utiliza o princípio de circulação natural para circular a água ou o fluido de transferência de calor, nos componentes do sistema, onde devido as correntes naturais de convecção dos fluidos, a água aquecida tende a subir ao tornar-se menos densa.

2.3.2. Sistemas ativos

Esse tipo de sistema solar usa bombas para a circulação do fluido. Dois sistemas diferentes podem ser encontrados nesta categoria, o primeiro é a circulação direta, onde a água é o fluido que circula do tanque de armazenamento e através do coletor solar e volta ao armazenamento ou uso, enquanto a circulação indireta usa um fluido de transferência de calor que circula em um circuito fechado entre um permutador de calor e o coletor solar, e a energia é transferida à água através do permutador de calor.

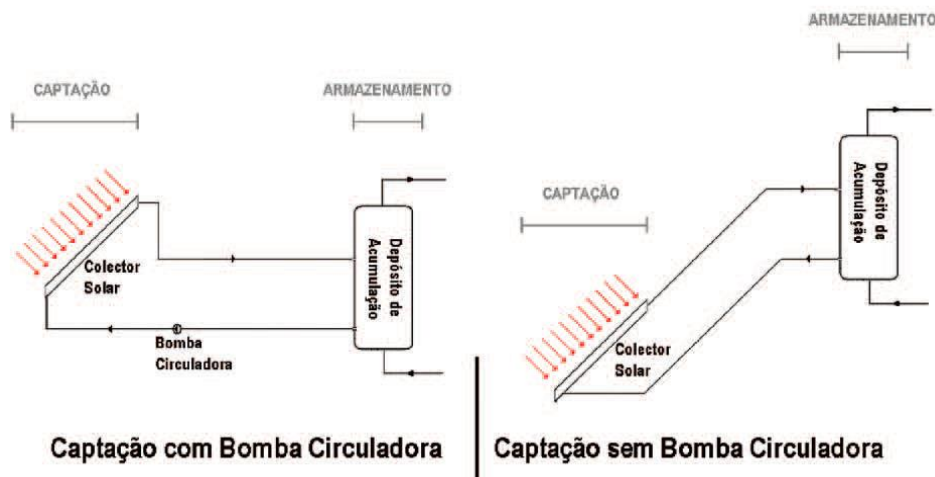


Figura 4. Sistema ativo com bomba circuladora (à esquerda) e sistema passivo sem bomba circuladora (à direita) [21].

Independentemente da categoria ou de tipo de sistema, dimensão, os componentes básicos de um sistema solar para aquecimento de água consistem em coletor solar, tanque armazenamento, um circuito hidráulico (tubagens, bombas, válvulas, etc.), componentes de regulação e controlo (elementos mecânicos e eletromecânicos que asseguram o correto funcionamento do sistema), e um sistema de apoio.

2.3.3. Coletor solar

O coletor é geralmente constituído por uma placa de metal também chamada de placa absorvedora ou absorsor, com um tubo de metal conectado, cobertura transparente e uma camada de isolamento sob a placa. O coletor deve ser montado (em um telhado ou em outro suporte adequado) de maneira a absorver uma quantidade significativa de radiação solar. O coletor absorve a radiação solar e transfere o calor resultante para a água que circula através da tubulação, e essa água quente é fornecida ao tanque de armazenamento.

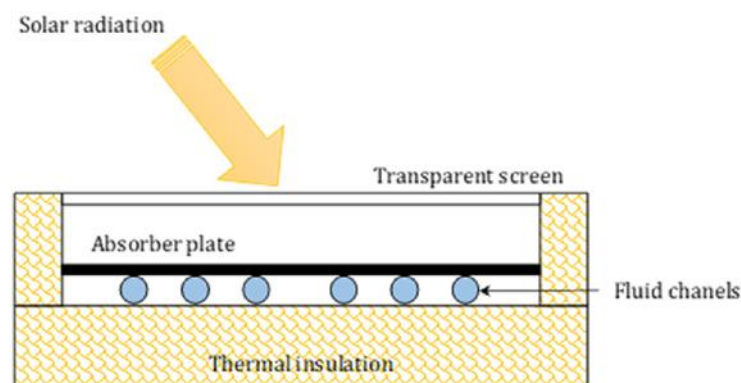


Figura 5. Esquema básico do coletor térmico de placa plana [27].

A superfície selecionada deve absorver ao máximo a radiação incidente e neste processo deve-se limitar as perdas por condução, convecção ou radiação. Coletores com placa absorvedora com elevada absorvidade e coberturas com elevada transmissividade apresentam rendimentos óticos maiores. A eficiência ótica (adimensional) é definida como a fração da energia da radiação solar

incidente na cobertura de vidro que é transferida para um fluido de transferência de calor como energia térmica, portanto, o desempenho ótico mede a proporção da radiação incidente coletada pelo absorvedor e convertida em energia térmica. O rendimento do coletor é afetado pelas características que afetam as perdas globais tais como a espessura do absorvedor, dimensões do coletor, características óticas da cobertura e do absorvedor (refletância, absorvidade, emissividade, transmissividade). Os materiais mais utilizados em coletores são o cobre e alumínio, pois apresentam condutividade elevada [28].

Maximizar a exposição do sol no coletor obtêm-se adequando a inclinação e orientação e evitando zonas de sombreamento que podem limitar a exposição da radiação solar. As inclinações dos coletores são definidas considerando a latitude do local, a orientação e a finalidade do uso, ou seja, se é para uso ao longo do ano todo, uso no verão ou inverno.

Balanco de energia e eficiência

Para estudar o funcionamento de um coletor, é importante considerar um coletor estacionário que recebe a radiação solar de maneira uniforme e constante e um fluido de transferência de calor que flui através do coletor entrando a uma dada temperatura e deixando o coletor a uma temperatura superior, devido à energia absorvida ao circular pelos tubos do absorvedor. O balanço de energia no coletor é [29]:

$$Q_T = Q_u + Q_L \quad (6)$$

onde

Q_T - é a energia total incidente.

Q_u - é o ganho de energia útil, que é transferida para o fluido de transferência de calor.

Q_L - é a energia térmica perdida.

Energia total incidente (Q_T) é a radiação que atinge a superfície do coletor, e se o coletor solar tiver uma cobertura transparente, deve-se levar em consideração a transmitância (τ) da cobertura, porque somente uma parte da radiação passa por ela, e também o coeficiente de absorção da placa (α).

$$Q_T = I \cdot A \cdot \alpha \cdot \tau \quad (7)$$

onde

I - é a radiação total incidente por área [W/m^2]

A - é a área do coletor [m^2]

τ - é a transmitância da cobertura transparente

α - é a absorvidade da placa absorvedora

O cálculo das perdas térmicas para o exterior é mais complexo porque envolve simultaneamente as perdas por condução, convecção e radiação. Para simplificar esse fato, utiliza-se o coeficiente global de transferência de calor, U , que é medido experimentalmente, e o seu valor é fornecido pelo fabricante. As perdas térmicas também são proporcionais à diferença entre a

temperatura média da placa absorvedora e a temperatura ambiente, como expresso na seguinte equação:

$$Q_L = A \cdot U \cdot (T_c - T_a) \quad (8)$$

onde

A- é a área do coletor [m²];

U – é o coeficiente global de perda de calor [W/m² · K];

T_c – é a temperatura média da placa absorvedora [K];

T_a – é a temperatura ambiente [K].

Portanto, considerando o balanço, o ganho da energia útil é dada pela equação seguinte:

$$Q_u = A \cdot [I \cdot (\tau \cdot \alpha)_{eff} - U \cdot (T_c - T_a)] \quad (9)$$

Sendo que a temperatura média da placa absorvedora não pode ser calculada de forma simples, deve ser medida diretamente por uma série de sensores colocados nela. Por outro lado, a temperatura média do fluido pode ser conhecida com precisão suficiente; uma forma muito simples é encontrar a temperatura média do fluido na entrada e saída do coletor.

Se a placa e os tubos absorvedores pelos quais flui o fluido de transferência de calor tivessem um fator de condutividade térmica infinito, então as temperaturas do fluido e da placa seriam iguais, mas este facto realmente não acontece porque nem todo o calor absorvido na superfície da placa absorvedora é transferido para o fluido. Portanto, é necessário levar em consideração um fator de correção, denominado fator de eficiência ou coeficiente de transferência de calor (F_R), que é sempre menor que 1. Este fator é praticamente independente da intensidade da radiação incidente, mas é função do caudal do fluido e das características do coletor (material, espessura, distância entre tubos ...). Usando o fator de eficiência, a energia útil pode ser dada pela seguinte equação:

$$Q_u = F_R \cdot A \cdot [I \cdot (\tau \cdot \alpha)_{eff} - U \cdot (T_c - T_a)] \quad (10)$$

Usando os resultados anteriores e a expressão 10 conhecida como equação de Hottel-Willer-Bliss, pode obter-se a expressão da eficiência do coletor [30]:

$$\eta = Q_u / A \cdot I \quad (11a)$$

$$\eta = [F_R \cdot (\tau \cdot \alpha) - F_R U_L \cdot (T_c - T_a) / I] \quad (11b)$$

Na prática, $(\tau \cdot \alpha)$ e U_L podem ser considerados constantes e a eficiência pode ser expressa como uma linha reta de acordo com $(T_c - T_a) / I$. Normalmente, a curva da eficiência é dada pelo fabricante de acordo com a equação:

$$\eta = b - m \cdot [(T_c - T_a) / I] \quad (12)$$

onde b e m são dois parâmetros que indicam a eficiência quando (T_c) é igual a (T_a) , e a inclinação da curva de eficiência.

A figura 6 mostra uma comparação de eficiência de vários tipos de coletores em níveis de irradiação de 500 e 1000 W / m². Sendo apresentado na figura os cinco tipos de coletores mais representativos:

- Coletor de placa plana (FPC);
- Coletor de placa plana avançada (AFP). Neste coletor os *risers* são soldados por ultrassom na placa absorvedora, que também é galvanizado com revestimento seletivo de cromo;
- Coletor parabólico composto (CPC) estacionário orientado com seu eixo longo na direção leste-oeste;
- Coletor de tubo evacuado (ETC);
- Coletor de vale parabólico (PTC) com rastreamento leste - oeste.

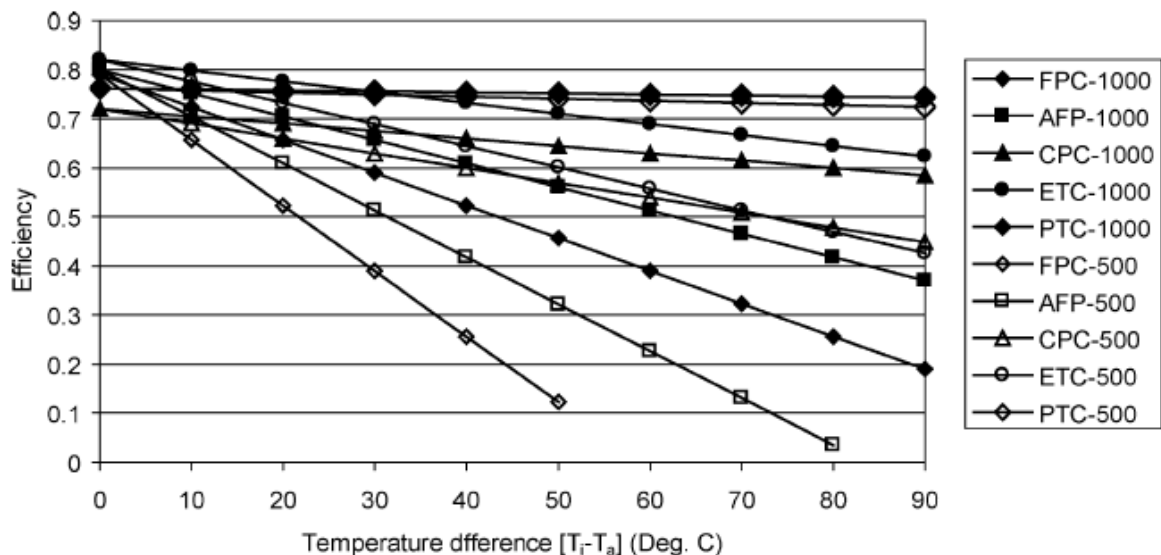


Figura 6. Comparação da eficiência de vários coletores em dois níveis de irradiação, 500 e 1000 W / m² [31].

Como é ilustrado na figura acima, melhor eficiência é obtida quando maior for o nível da irradiação e mesmo os coletores de alto desempenho como CPC, ETC e PTC conseguem uma alta eficiência para valores altos de temperatura de entrada no coletor. A radiação considerada na figura é radiação global incidente para todos os tipos de coletores, exceto o coletor PTC, onde considera-se a radiação direta de mesmo valor considerado para outros coletores [31].

Aplicações

Os coletores solares têm sido usados em uma variedade de aplicações, principalmente em aplicações residenciais e industriais, como aquecimento de água doméstica, aquecimento de piscinas, aquecimento de ambientes, processos de água para aquecimento industrial. Na tabela 1 são mostrados os sistemas solares térmicos e os tipos de coletores solares usados para diferentes aplicações.

Tabela 1. Aplicações de energia solar e tipo de coletores usados [31].

| Aplicação | sistema | coletor |
|--|---------|---------------|
| Aquecimento solar de água | | |
| Sistemas de termossifão | passivo | FPC |
| Circulação direta | ativo | FPC, CPC, ETC |
| Sistemas de aquecimento indireto de água | ativo | FPC, CPC, ETC |
| Calor de processo industrial | | |
| Sistemas industriais de ar e água | ativo | FPC, CPC ETC |
| Sistemas de geração de vapor | ativo | PTC, LFR |
| Sistemas de energia solar térmica | | |
| Sistemas coletores de calha parabólica | ativo | PTC |
| Sistemas de torre parabólica | ativo | HFC |
| Sistemas de parabólica | ativo | PDR |

2.3.3.1. Coletor de placa plana

Um coletor de placa plana simples é constituído por uma superfície absorvedora, cujo objetivo é absorver o máximo possível da radiação solar incidente e reemitir o mínimo possível, uma cobertura transparente como o vidro que transmite radiação solar de menor comprimento de onda e bloqueia a radiação de maior comprimento de onda, um meio de transferência de calor como ar ou água, e um isolamento na base da superfície do absorvente.

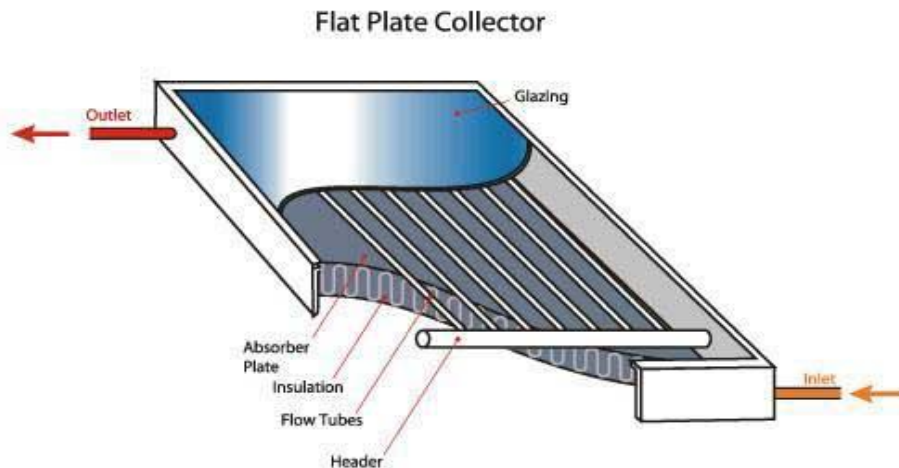


Figura 7. Coletor solar de placa plana [32].

Para reduzir as perdas por radiação recorre-se à utilização de revestimentos seletivos na placa absorvedora. Para além de perdas por radiação também ocorrem perdas por convecção e estas são reduzidas utilizando uma cobertura transparente (normalmente uma película fina transparente colocada entre a cobertura de vidro e a placa absorvedora).

Coletores planos destinam-se a aplicações de baixa e média temperatura, sendo mais utilizados em sistemas domésticos. Estes coletores aproveitam tanto a radiação direta como a radiação difusa, não necessitam de seguimento solar e requerem pouca manutenção.

2.3.3.2. Coletor de tubos evacuados

Estes coletores permitem a eliminação das perdas por condução e convecção, elevando o rendimento do sistema de captação, através da remoção do ar em torno da superfície absorvedora, de onde resulta o nome coletores com vácuo. Esses coletores solares consistem basicamente em um tubo de calor dentro de um tubo selado a vácuo, como é ilustrado na figura 8. Em certos casos o vácuo pode ser substituído por gases nobres.

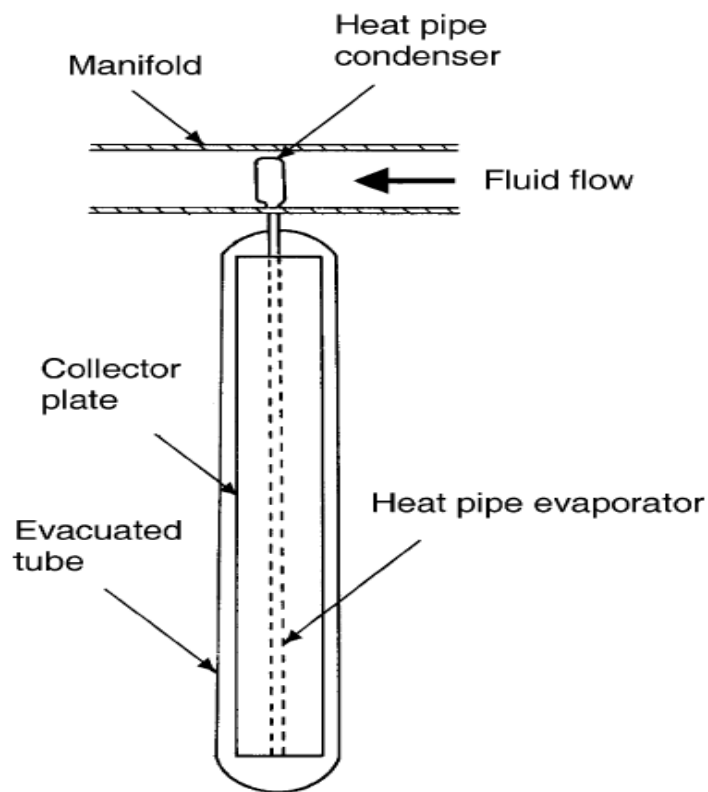


Figura 8. Diagrama esquemático de um coletor de tubo evacuado [31].

O envelope de vácuo reduz as perdas por convecção e condução, permitindo que estes coletores operem a temperaturas mais altas do que coletores de placas planas. Como os coletores de placas planas, eles coletam radiação direta e difusa. No entanto, sua eficiência é maior em ângulos de baixa incidência.

Os coletores de tubo de vácuo usam materiais de mudança de fase líquido-vapor para transferir calor com alta eficiência. Esses coletores apresentam um tubo de calor (um condutor térmico altamente eficiente) colocado dentro de um tubo selado a vácuo. O tubo, feito de cobre, é então preso a uma aleta de cobre preto (placa absorvedora). Projetando-se da parte superior de cada tubo, há uma ponta de metal presa ao tubo selado (condensador). O tubo de calor contém uma pequena

quantidade de fluido (por exemplo metanol) que passa por um ciclo de evaporação-condensação. Neste ciclo, o calor evapora o líquido, e o vapor desloca-se para a região do dissipador de calor onde se condensa e liberta seu calor latente. O fluido condensado retorna ao coletor solar e o processo é repetido.

2.3.3.3. Coletor do tipo CPC (ou concentrador parabólico composto)

A tecnologia CPC é normalmente oferecida com um absorvedor tubular ou absorvedor plano. O CPC de absorvedor tubular é mais adequado para meios fluidos e para aquecimento de um fluido, também possui um rendimento maior na coleta de calor [33].

Basicamente, os coletores CPC são constituídos por um refletor e tubo coletor de calor. Quando a radiação solar incide no refletor do espelho de prata, ela é refletida e direcionada para os tubos coletores de calor. A radiação refletida passa pelas camadas de vácuo e entra no revestimento anti-refletor dos tubos que aquecem o fluido de transferência de calor que se encontra no interior. As camadas de vácuo evitam as perdas de calor. O fluido de alta temperatura flui para o permutador de calor a partir dos tubos e transfere o calor para a água.

Os coletores CPC possuem uma faixa de aplicação bastante ampla para utilização térmica solar: os CPCs estacionários são aplicáveis para a faixa de temperatura média ($60\text{ }^{\circ}\text{C} - 150\text{ }^{\circ}\text{C}$) e os CPCs de rastreamento para a faixa de temperatura média e alta ($100\text{ }^{\circ}\text{C} - 250\text{ }^{\circ}\text{C}$).

O CPC de absorvedor tubular é geralmente composto por um refletor CPC e um absorvedor tubular evacuado, que é colocado dentro de um tubo de vidro. De acordo com a posição do refletor e do tubo de vidro, o CPC pode ser dividido em CPC de concentração externo (fig. 9) e CPC de concentração interno (fig. 11). Os CPC de concentração externo são os coletores mais comuns, e de construção simples.



Figura 9. CPC de concentração externo comum [33].

O desempenho térmico e óptico dos CPC de concentração externo foi melhorado com a configuração de um defletor dentro do CPC que reduziu a perda de calor por convecção. O esquema do CPC configurado com um defletor é mostrado na fig. 10.

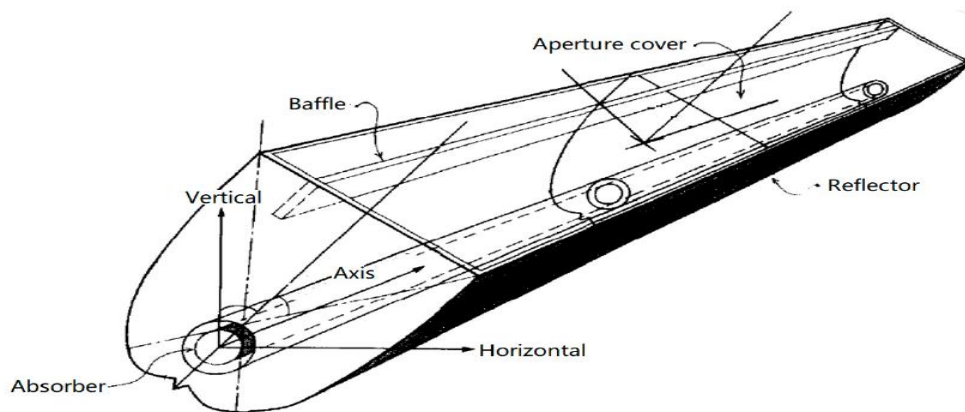


Figura 10. CPC de Absorvedor tubular de concentração externa com defletor [34].

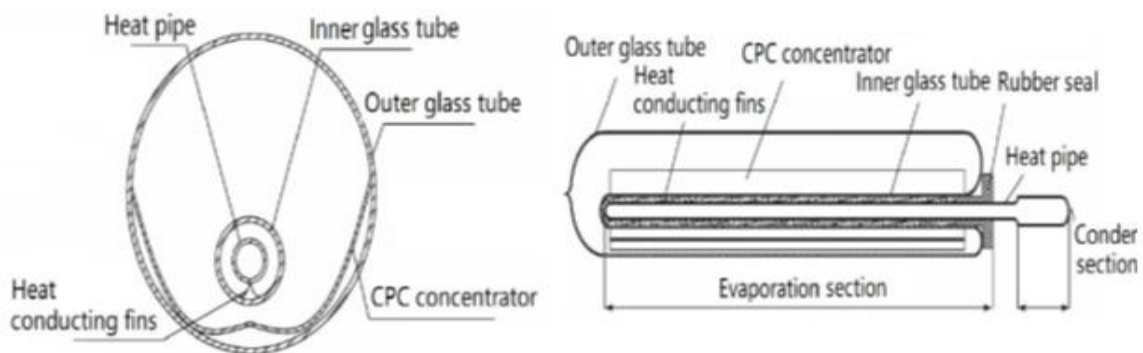


Figura 11. Esquema de um tubo evacuado com CPC interno: Esquerda: vista em corte transversal; direita: diagrama de estrutura [33].

Para aumentar a taxa de concentração, reduzir as perdas de calor e aumentar a temperatura do fluido de trabalho, foi concebido um CPC com uma combinação de absorvedor tubular de concentração externa e interna. Neste CPC o tamanho de abertura não foi limitado pelo tubo de vidro em comparação com o CPC de concentração interna.

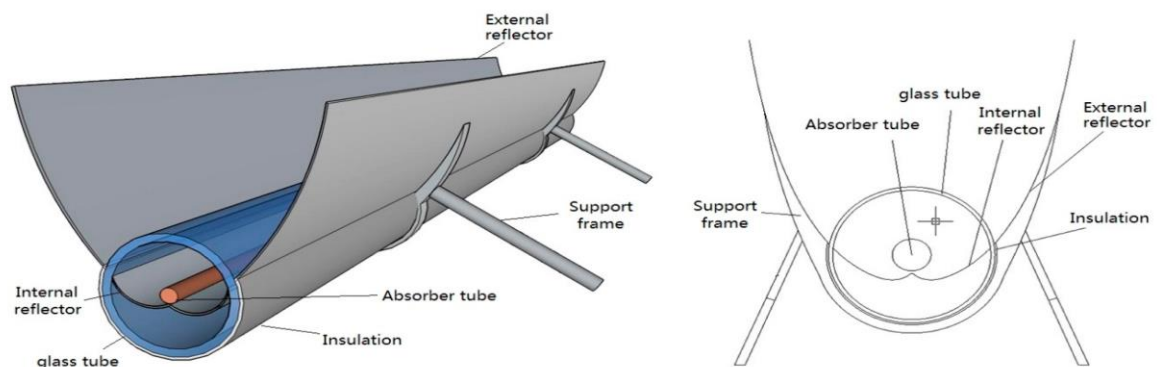


Figura 12. Diagrama esquemático do CPC combinado de concentração interna e externa (esquerda: modelo 3-D, direita: vista em corte transversal) [33].

Tabela 2. Tipos de coletores para utilização térmica solar [29].

| Tipo de coletor | Tipo de absorsor | Taxa de concentração | Faixa de temperatura (°C) |
|--------------------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| Coletor de placa plana | plano | 1 | 30-80 |
| coletor de tubo evacuado | plano | 1 | 50-200 |
| Coletor CPC estacionário | tubular | 1-5 | 60-240 |
| Coletor CPC rastreador | tubular | 1-15 | 60-300 |

Nota: A taxa de concentração é definida como a área de abertura dividida pela área do receção/absorção do coletor.

2.3.4. Sistema de armazenamento

Devido ao facto de a energia fornecida pelo sol não poder ser controlada e raramente coincidir com a ocorrência das necessidades de energia térmica torna-se necessário armazenar o calor solar gerado para ser utilizado quando necessário. Idealmente deveria ser possível armazenar a energia térmica gerada durante o verão de modo a ser utilizada no inverno (armazenamento sazonal). Deste modo, os sistemas solares devem ter um sistema de armazenamento para suportar a demanda de água quando a radiação solar não for suficiente. A forma mais simples e comum de armazenar água quente são os tanques de armazenamento, que geralmente são de aço, aço inoxidável, alumínio ou fibra de vidro reforçada.

O armazenamento de energia térmica sensível funciona com o princípio básico de aumentar a temperatura do meio de armazenamento, como água, óleo, areia ou leitos rochosos. Assim, a quantidade de energia armazenada, expressa pela equação 13, é diretamente proporcional à diferença de temperatura, à massa do meio e à capacidade térmica do mesmo.

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (13)$$

A água tem capacidade calorífica comparativamente alta (4,2 kJ / kg K). Além da alta capacidade de calor específico, a água é facilmente disponível, não é tóxica, tornando-a adequada para muitos fins. Para os fins de armazenamento, o dispositivo de armazenamento de energia térmica deve satisfazer os seguintes pré-requisitos técnicos:

- Estratificação térmica: o tanque de água deve ser capaz de sustentar água quente e fria separadamente sem qualquer barreira física, ou seja, a distribuição contínua ou escalonada da temperatura da água deve ser praticada;
- O *design* do tanque deve minimizar as perdas de calor;
- Mistura de volume de água quente e fria induzida devido ao ciclos operacionais diferentes como a carga e descarga devem ser minimizadas;

2.3.4.1. Tanque de armazenamento

O tanque é um componente principal no sistema, pois não é apenas responsável pela capacidade de armazenamento, mas também pela eficiência térmica de todo o sistema. O desempenho térmico do tanque de armazenamento é afetado por diversos parâmetros como temperaturas de operação, condições de fluxo, velocidade de entrada de água, troca de calor entre o tanque de armazenamento e o ambiente. Os parâmetros relativos à geometria do tanque de armazenamento - propriedades termofísicas do material do tanque e isolamento, difusor e forma e tipo do estratificador também afetam o desempenho do tanque.

A forma do tanque de armazenamento, geralmente, é cilíndrica, e sua altura deveria ser maior que o diâmetro, de forma a melhorar o fenômeno de estratificação (quanto maior a temperatura da água, menor a densidade). Desse modo, a água é extraída no topo do tanque, enquanto o líquido do coletor é fornecido ao fundo do armazenamento (fig. 13). Desta forma, o coletor opera na temperatura mais baixa possível e o rendimento aumenta.

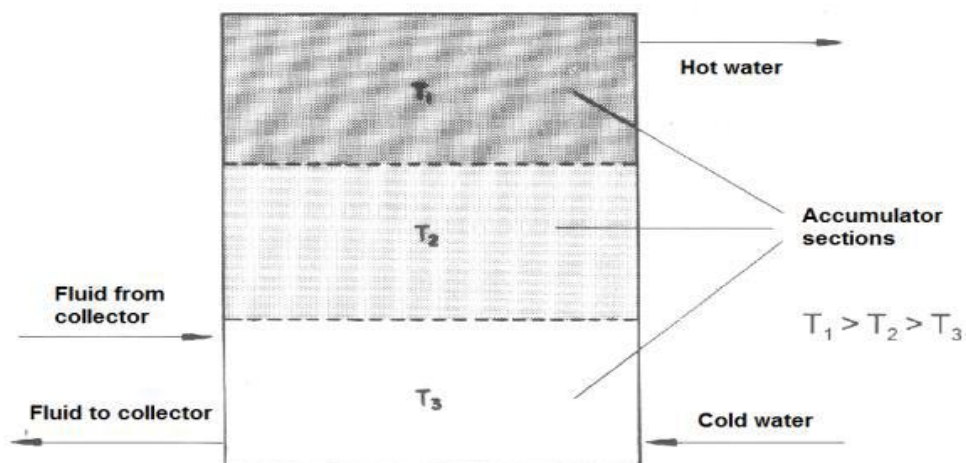


Figura 13. Estratificação de água em um tanque [35].

Uma válvula misturadora termostática é normalmente colocada na saída do tanque de armazenamento para regular a temperatura à qual a água é extraída para utilização.

2.3.4.2. Configuração do tanque

Os tanques de armazenamento de água quente estratificados podem ser aquecidos diretamente ou indiretamente pela adição de um permutador de calor entre a fonte de energia e o tanque (fig. 14). Tanques de água diretamente aquecidos são altamente eficazes na troca térmica, no entanto, são ineficazes na manutenção da estratificação devido à alta mistura e turbulência. O aquecimento indireto, por outro lado, reduz a eficácia do transporte térmico do circuito de adição de energia para o tanque estratificado devido à adição de permutador de calor que nem sempre é 100% eficaz.

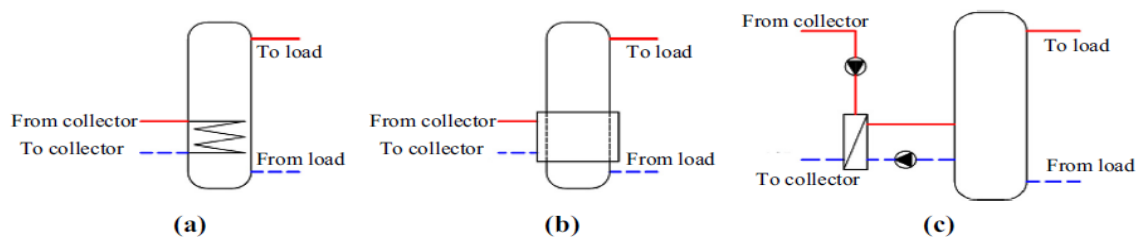


Figura 14. Esquemas comuns nos tanque de AQS (a) Permutador de calor imerso (b) Permutador de calor de manto (c) Invólucro externo e permutador de calor de tubo [36].

2.3.4.3. Estratificação e desempenho térmico do tanque

A manutenção da estratificação reside na minimização do efeito da mistura durante o ciclo operacional do tanque, de modo, que a água a temperaturas altas possa ser extraída na parte superior do tanque para o consumo, mantendo assim alta eficiência térmica no lado da extração, enquanto a água a temperaturas baixas na parte inferior do tanque possa ser retirada para o coletor, mantendo assim alta eficiência no lado da coleta de energia. No entanto, se a água quente e a água fria se misturarem, a temperatura disponível e, portanto, a qualidade da energia fornecida na carga será reduzida.

A melhoria da estratificação do tanque pode ser obtida através dos parâmetros geométricos e operacionais. Os parâmetros geométricos incluem o tamanho do tanque, a espessura da parede, razão altura e diâmetro, a porta de entrada (posição, forma, tipo de difusor, estratificadores) e, o isolamento (tipo de isolamento da parede, isolamento da parede externa). Estudos experimentais concluíram que a posição de entrada tem uma influência muito maior na queda da estratificação durante o modo de carga do que a posição de saída. Durante a carga, a mistura é afetada pela velocidade e temperatura do fluxo de entrada. Se a temperatura do fluxo de entrada for comparativamente mais baixa do que a envolvente, ele irá arrastar para baixo, desestabilizando a estratificação. Se o fluxo de entrada tiver uma velocidade alta, irá gerar uma turbulência que provocará uma mistura intensa nas camadas superiores. Para reduzir a velocidade do fluxo de entrada estruturas de entrada de tipo fenda são melhores em relação a estruturas de entrada direta [37]. A estratificação é ainda mais bem estabelecida quando o calor é adicionado em determinado nível, dependendo da temperatura da água em torno do volume, pelo uso de dispositivo especial de estratificação de entrada durante o modo de carga.

O tamanho ou proporção do tanque de armazenamento tem um papel importante nas perdas de calor em espera. As perdas de calor ambiente dependem principalmente da área de superfície e, portanto, da proporção do tanque. Um estudo sobre os efeitos da geometria e das condições operacionais na estratificação térmica dentro de um tanque de armazenamento concluiu que um aumento na razão de altura e diâmetro do tanque de 2,5 para 5 não apenas aumentou o grau de estratificação em até 30,69%, mas também diminuiu a mistura inicial na entrada [38].

2.3.5. Elementos de transferência de calor

Os elementos de transferência de calor são aqueles elementos do sistema responsáveis pela transferência de energia captada nos coletores solares para o tanque de armazenamento de água quente. Entre os elementos utilizados para a transferência de calor são os permutadores de calor, tubulações, válvulas.

Os permutadores de calor são usados em sistemas indireto de transferência térmica. Nestes sistemas, o fluido primário não entra em contato com a água quente e não ocorre os problemas de congelamento do fluido de transferência de calor como nos sistemas de transferência direta.

As tubagens formam o circuito de fluxo da água entre os coletores solares e o tanque, tendo tubagens de água fria de entrada, tubagens de saída de água quente. Este último grupo possui um isolamento térmico para evitar as perdas energéticas.

Um conjunto de válvulas de diferentes tipos são intercaladas nas tubagens para controlar o fluxo do líquido. As válvulas de corte impedem a circulação do fluido, as válvulas de segurança permitem a extração de fluido no caso de pressão do líquido em circulação ser superior a um valor predeterminado e as válvulas de retenção, que são do tipo antirretorno, evitam que o fluido circule no sentido contrário.

2.3.6. Sistema de apoio

Nem em todos os casos a temperatura da água de armazenamento é a desejada para a aplicação, por isso às vezes é necessário um sistema de apoio que forneça a energia necessária para cumprir as condições exigidas. Caso não exista um sistema de apoio, o sistema de aquecimento deve ser projetado de forma a aquecer toda a água necessária para o consumo até a temperatura desejada. A temperatura de saída não deve ser superior à temperatura de consumo. Assim, embora a temperatura no tanque deva estar acima de 65° para evitar qualquer tipo de bactéria (principalmente legionela), é necessário um controle de temperatura na saída do sistema para limitar a temperatura citada.

2.3.7. Elementos de controlo

Nos sistemas de aquecimento solar, é usado um controlador que consiste num dispositivo eletrónico que controla a bomba de circulação para coletar, ao máximo possível, o calor nos coletores solares e proteger o sistema de superaquecimento. Os controladores mais usados baseiam-se na teoria diferencial que compara a temperatura do coletor com a temperatura do tanque (fig. 15). O controlador ativa a bomba de circulação quando houver calor disponível nos coletores solares, movendo desse modo o fluido de transferência de calor dos coletores para o tanque. O calor está disponível sempre que a temperatura do coletor solar é maior do que a temperatura da água no tanque. A proteção contra superaquecimento é obtida desligando a bomba quando o depósito atinge sua temperatura máxima.

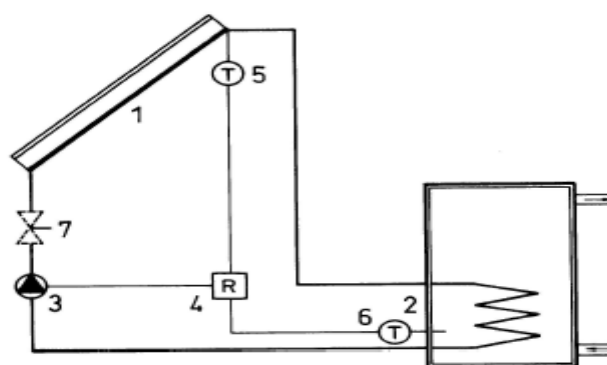


Figura 15. Regulação por termostato diferencial atuando na bomba: 1 coletor, 2 acumulador, 3 bomba, 4 controlador diferencial, 5 e 6 sensor de temperatura, 7 válvula [35].

2.3.8. Princípios de dimensionamento de sistemas solares térmico

Sistemas solares térmicos podem compensar significativamente as cargas de energia no consumo de AQS quando dimensionado de forma adequada. O tamanho de um sistema depende de uma série de variáveis, incluindo a eficiência do próprio coletor, a demanda de água quente e a radiação solar em um determinado local [39].

O uso de método de dimensionamento simples no projeto de sistemas de aquecimento solar de água doméstica pode funcionar. Contudo pode ser necessário ajustar as regras para atender necessidades específicas. Haverá situações em que as regras simples não se apliquem, sendo necessário uma série de cálculos [40].

Deve-se primeiro notar que na maioria dos casos não se pode dimensionar um sistema para aquecer 100 por cento da água que é usada. É recomendado dimensionar um sistema para cobrir 100 por cento da carga em um dia claro e ensolarado. Se o sistema fosse dimensionado para aquecer tudo em um dia nublado, então, para um dia ensolarado, o sistema produziria muito e superaquecia [40].

2.3.8.1. Consumo diário de AQS

O consumo de água quente depende do estilo de vida das pessoas, estação do ano, hora do dia e parâmetros geográficos. A obtenção de informações sobre o consumo de água quente dos edifícios permite dimensionar com maior precisão os sistemas de aquecimento solar de água. No entanto, obter dados de consumo de água quente sanitária (AQS) é uma tarefa difícil, devido à dificuldade em estimar parâmetros altamente variáveis, como o comportamento do ocupante, resultando na falta de informações precisas e disponíveis e, em última análise, resultando em sistemas que estão sub ou superdimensionados [41].

Para começar a dimensionar um sistema, espera-se começar com a carga. Para determinar a quantidade de água que é preciso para aquecer, é necessário saber a quantidade que cada indivíduo usa. Por exemplo, pode-se tomar a média de consumo de AQS de cada pessoa em uma casa

multiplicar com o número de membros da família para obter o consumo total. No entanto, uma série de fatores pode alterar esta estimativa.

O simples uso da média é a maneira rápida e fácil de dimensionar, mas se for um caso em que a carga é muito diferente da maioria dos casos seria necessário instalar um medidor de água na linha de água quente na residência, executar o teste por um mês e, em seguida, dividir o consumo total pelo número de dias do teste para obter uma média precisa da água quente diária do consumo [40].

2.3.8.2. Volume do tanque de armazenamento

Quando a demanda diária de água quente for determinada, o volume do tanque de armazenamento pode ser especificado. Deve ser cerca de 0,8 a 1,2 vezes a demanda diária para regiões com alta radiação solar e 2 a 2,5 vezes a demanda diária para regiões com menor radiação solar (centro e norte da Europa) para que os picos de consumo possam ser bem atendidos e os dias nublados possam ser compensados [42].

2.3.8.3. Área do coletor solar

Saber quantos litros de AQS é preciso no tanque de armazenamento permitirá dimensionar um conjunto de coletores que irá aquecer essa quantidade de água. O que é preciso é determinar a relação entre o número de metros quadrados do coletor e o número de litros de armazenamento solar. A área de coletor necessária depende de vários fatores, como:

- Tipo de coletor;
- Tamanho do tanque de armazenamento;
- Localização, inclinação e orientação dos coletores;
- Condições climáticas locais.

2.3.8.4. Guia de dimensionamento de sistemas solares térmicos

As tabelas 3 e 4 são guias de dimensionamento entendido para as condições de Europa Central (tabela 3) e da América Central (tabela 4). No entanto, para obtenção de informações exatas, um cálculo com base nas características locais do sistema em questão é recomendado, recorrendo-se a programas de simulação. Estas ferramentas fornecem informações exatas da fração solar e da eficiência do sistema em questão e também informações sobre a energia adicional necessária durante a estação chuvosa [42].

Tabela 3. Dimensionamento de sistemas solares de água quente sanitária para condições da Europa Central [42].

| Demanda diária de AQS [litros] | Capacidade de Armazenamento [litros] | Área de Coletor* SC [m ²] |
|--------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| 100 | 200 | 4 |
| 200 | 400 | 6 |
| 300 | 500-750 | 8-12 |
| 500 | 750-1000 | 12-16 |

Tabela 4. Dimensionamento de sistemas solares de água quente sanitária para as condições da África Austral [42].

| Demanda diária de AQS [litros] | Capacidade de Armazenamento [litros] | Área de Coletor * SV [m ²] | Área de Coletor * SC [m ²] |
|--------------------------------|--------------------------------------|--|--|
| 50 | 50-75 | 1.0-1.5 | 0.9-1.3 |
| 100 | 100-150 | 2.0-3.0 | 1.5-2.5 |
| 200 | 200-300 | 3.5-4.5 | 3.0-4.0 |
| 300 | 300-450 | 4.5-6.0 | 4.0-5.0 |
| 500 | 500-750 | 7.5-10 | 6.0-8.5 |

Nota: SV (coating of solar varnish) e SC (selective coating) são formas de revestimentos das superfícies absorvedoras dos coletores solares que influenciam a eficiência dos coletores.

2.4. Sistemas convencionais de aquecimento de água

Os sistemas convencionais de aquecimento de água compreendem aquecedores de água alimentados por eletricidade ou gás. De modo geral, os aquecedores de água a gás são mais caros do que os modelos elétricos, mas custam menos para operar porque o gás é mais barato que a eletricidade. No entanto, os aquecedores elétricos de água são mais eficientes do que os modelos a gás e têm classificações de fator de energia mais altas. Um aquecedor tipo tanque, como o próprio nome indica, tem um grande tanque de armazenamento isolado que retém a água quente até que seja necessária. O seu funcionamento consiste no aquecimento de água fria, que entra no fundo do tanque, através de uma chama de gás abaixo do tanque ou por elementos elétricos suspensos dentro do tanque. Um termostato ajustável regula e mantém a temperatura da água. Uma válvula de alívio de pressão evita um crescimento excessivo de pressão dentro do tanque. Quando a água quente é extraída para o consumo, o nível de água no tanque cai e é automaticamente recarregado com água fria e todo o processo começa novamente [43].

Neste trabalho, será priorizado o aquecedor elétrico que é usado na comparação com o aquecedor solar de AQS de modo a analisar as contribuições de energia solar.

2.4.1. Aquecedor elétrico de água

O aquecedor elétrico de água com tanque de armazenamento tem duas funções: aquecer a água com energia elétrica e armazenar a água quente para uso na altura necessária. A energia elétrica é fornecida a elementos elétricos resistivos dentro do tanque de armazenamento. A corrente flui

através dos elementos para criar calor e esta energia térmica é trocada para a água circundante. O processo aumenta gradualmente a temperatura de toda a massa de água dentro do tanque de armazenamento. Um termostato mantém a temperatura definida pelo usuário. O elemento elétrico é ligado quando a temperatura da água cai abaixo de um determinado valor, aumentando a disponibilidade de água quente [44]. Outros tipos de tanques de armazenamento elétrico têm dois elementos elétricos, cada um controlado por um termostato independente. Um elemento localizado na parte inferior do tanque de armazenamento auxilia na reposição de energia perdida, devido ao gradiente de temperatura entre o ar ambiente e a água [45]. O elemento superior fornece energia térmica para a água quando a demanda é alta, garantindo que o tanque de armazenamento de elemento duplo seja mais eficiente do que o sistema convencional de elemento único [46].

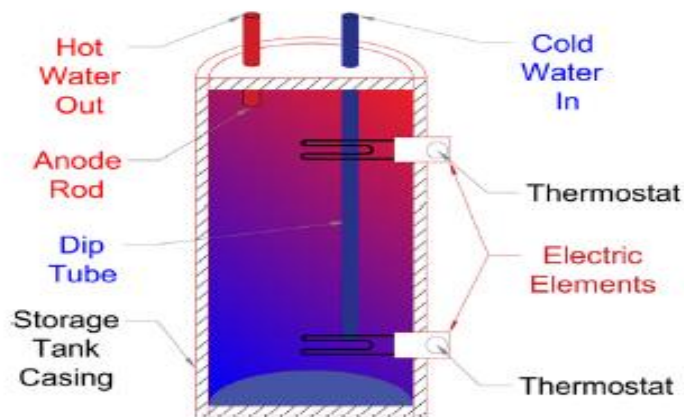


Figura 16. Aquecedor elétrico de água com tanque de armazenamento [44].

Os aquecedores elétricos estão disponíveis comercialmente em uma variedade de designs e tamanhos, permitindo que os consumidores escolham aquele que melhor atende às suas necessidades. O número de elementos de aquecimento pode variar de um a três (sendo dois elementos os mais comuns). A potência do elemento de aquecimento pode ser de 0,8 kW a 4,5 kW (com 3,0 e 4,5 kW o mais comum). Como alternativa, também existem aquecedores elétricos de água sem tanque, o problema destes aquecedores é a sua potência de valores elevados [47].

2.4.1.1. Componentes básicos dos aquecedores elétricos

Os principais componentes comuns a quase todos os tipos de aquecedores elétricos são: tanque, termostatos e elementos de aquecimento, válvulas, entradas e saídas de água (fig. 17).

O principal componente de um aquecedor elétrico típico é o tanque cilíndrico. O interior do tanque é geralmente metálico e contém um revestimento protetor de água que mantém a água quente em aproximadamente 344,7 kPa a 689,5 kPa (50 psi a 100 psi). O exterior do tanque é normalmente coberto com um material isolador (fibra de vidro ou espuma de poliuretano). Em alguns casos, pode haver outra estrutura isolador cobrindo o tanque para mitigar ainda mais a perda de calor. A seleção do tamanho e do padrão do tanque de água depende do uso doméstico de água quente, conforme determinado pelo número de usuários, seu comportamento e o clima [47].

O termostato é um dispositivo que mede a temperatura e liga ou desliga o elemento de aquecimento para manter a temperatura em um ponto de ajuste desejado. Os termostatos podem ter

uma deadband de até 10 ° C (± 5 ° C histerese) acima e abaixo do ponto de ajuste para evitar frequentes comutações [48]. Um aquecedor elétrico típico tem dois elementos de aquecimento, um próximo ao terço superior do tanque próximo da saída de água quente e um próximo ao fundo perto da entrada de água fria. Cada elemento de aquecimento normalmente têm um termostato e os dois elementos de aquecimento não operam simultaneamente com prioridade dada ao elemento superior. [47].

Um aquecedor de água típico tem uma entrada que fornece água fria para o fundo do tanque e uma saída perto do topo. Há uma válvula de segurança de alívio de pressão que é ativada se a pressão interna exceder os limites de segurança. Perto do fundo fica uma válvula que é usada para esvaziar o tanque para substituir os elementos de aquecimento, remover sedimentos acumulados, mover o tanque para outro local, etc.

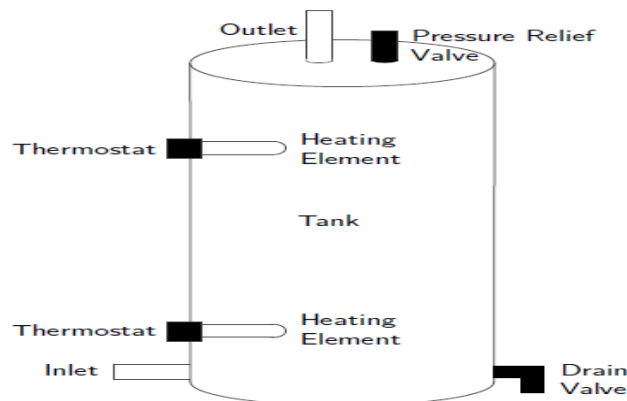


Figura 17. Principais componentes de um aquecedor elétrico típico [47].

2.4.1.2. Estratificação da temperatura

Para atingir a eficiência máxima, é necessário manter uma boa estratificação da temperatura da água dentro do tanque.

O conceito de estratificação descrito a seguir analisa o funcionamento de dois elementos aquecedores sob seguintes condições: i) O tanque cheio de água a temperatura ambiente; ii) Um termostato ajustado para 60 ° C; iii) Sem extração de água.

O elemento de aquecimento superior será o primeiro a ligar, aumentando a temperatura na parte superior até que o ponto de ajuste desejado seja alcançado, após o qual o elemento desliga. Em seguida, o elemento de aquecimento inferior é ativado e continua a aquecer a água até que o termostato inferior detecte que o ponto de ajuste foi atingido. Durante o processo de aquecimento, independentemente do elemento que esteja ligado, a água quente irá subir gradualmente até o topo do tanque devido à sua densidade mais baixa. Portanto, a água quente retirada do topo está sempre à temperatura mais alta no tanque.

A estratificação da temperatura é afetada pela extração de água quente e pela temperatura de entrada da água fria. Supondo que a temperatura no tanque esteja no ponto de ajuste desejado e que haja extração de água, a água quente retirada (na parte superior) é substituída pela água fria que entra (na parte inferior). A água fria que entra mistura-se com a água dentro do tanque e a

temperatura da água começa a cair gradualmente. Essa queda de temperatura não é uniforme ao longo da altura do tanque e será primeiramente detetada pelo termostato inferior que será ativado para manter a temperatura dentro do tanque. Se a quantidade de água retirada for tão grande que o elemento inferior é incapaz de manter o calor suficiente, a redução na temperatura é detetada pelo termostato superior e ativa o elemento de aquecimento superior (e desliga o elemento inferior) para melhor manter a temperatura na saída.

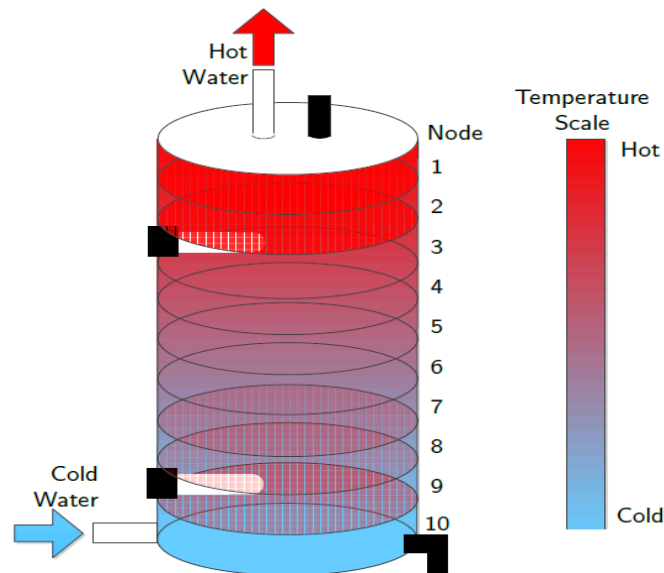


Figura 18. Estratificação de temperatura dentro de um aquecedor elétrico [47].

Como a temperatura na parte superior do tanque é sempre mais alta do que na parte inferior, o elemento de aquecimento superior raramente liga e o elemento de aquecimento inferior faz a maior parte do aquecimento.

A estratificação no tanque pode também ser mantido por um defletor instalado na entrada da água fria que pode evitar a turbulência causada pela entrada da água e baixe a temperatura dentro do tanque.

2.4.2. Aquecedores de água a gás com armazenamento

Estes aquecedores possuem um queimador de gás localizado debaixo do tanque de armazenamento, com volumes típicos entre 100 a 180 litros. Os pontos de ajuste típicos do aquecedor de água variam de 48,9 °C a 60 °C, embora as temperaturas de saída possam variar consideravelmente devido à ampla faixa de histerese no controle termostático. O calor do queimador é transferido para a água através do fundo do tanque e das paredes da conduta central que se estendem para cima através do tanque.

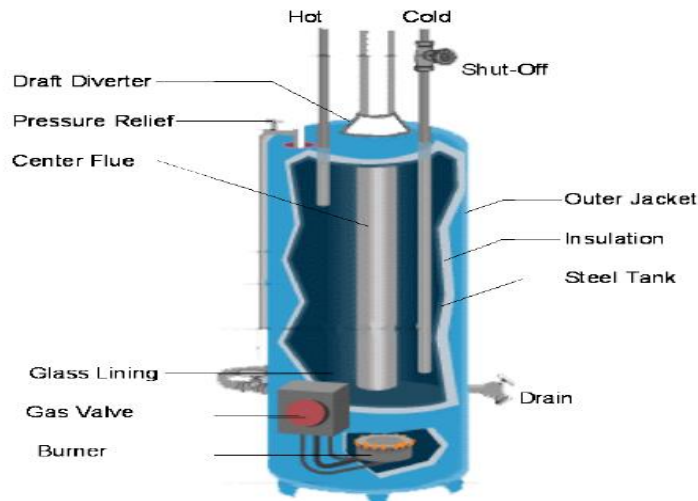


Figura 19. Esquema de aquecedor de água a gás com armazenamento [49].

2.5. Modelação dos sistemas de aquecimento de água

Os sistemas de energia solar como os sistemas de aquecimento de água são de natureza transiente e o seu onde desempenho depende de parâmetros dinâmicos. O aquecimento nos sistemas de AQS ocorre durante as horas de sol se tivermos coletores solares, o que não é o caso de equipamentos convencionais, deste modo, qualquer trabalho de experimentação deve ser realizado ao longo do dia, bem como em várias condições climáticas. As pesquisas nos sistemas de AQS envolve variações iterativas nos parâmetros de entrada e conseqüentemente seus efeitos na saída, no entanto nem sempre é possível fazer experimentação para cada um dos aspetos tornando a simulação nestas situações a melhor alternativa [50].

Ferramentas de modelação de sistemas de aquecimento de água

As ferramentas usadas para simulação de sistemas de AQS incluem o Polysun, o energyPRO, o SolTerm, o T*SOL e o TRNSYS.

TRNSYS é um software que possui um ambiente de simulação completo e extensível para a simulação de sistemas transientes, incluindo edifícios com várias zonas. A ferramenta permite aos utilizadores criar o seu próprio sistema, o qual consiste na ligação entre os componentes (cada componente é designado por *Type*, com a respetiva descrição matemática) e a interligação dos seus dados (*Connections*), possuindo cada componente um conjunto pré-definido de dados de entrada, saída e parâmetros.

O Polysun é um software de simulação de sistemas de energias renováveis. Ele permite ao usuário configurar e otimizar os sistemas solares e de bomba de calor. Validado com experimentações de campo e outros softwares, o Polysun encontra-se no mercado desde 1992. Foi desenvolvido pelo Institut für Solartechnik SPF da Universidade Técnica de Rapperswil (Suíça).

O energyPRO, desenvolvido pela empresa EMD International A/S na Dinamarca, é um pacote de software de modelação completo para análise técnico-econômica combinada e otimização de

projetos de cogeração, bem como outros tipos de projetos complexos de energia com um fornecimento combinado de eletricidade e energia térmica (vapor, água quente ou resfriamento) de diferentes unidades de produção de energia.

O SolTerm é um programa de análise de desempenho de sistemas solares, em que através de simulação numérica de balanços energéticos ao longo de um ano de referência e especialmente concebido para as condições climáticas e técnicas de Portugal. Associado ao SolTerm está um banco de dados, incluindo coletores solares térmicos e kits solares térmicos certificados, assim como um conjunto diversificado de componentes (depósitos/permutadores, coletores fotovoltaicos, baterias, ...). O SolTerm é desenvolvido e distribuído pelo Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG) pelo método de licença de utilização.

T * SOL é um programa desenvolvido para projetar e simular sistemas solares térmicos de produção de AQS, aquecimento de ambientes, aquecimento de piscinas, e sistemas em grande escala. Possui interface e ambiente de simulação simples e amigáveis. Os cálculos são baseados no balanço de fluxos de energia e fornece previsão de rendimento com a ajuda da entrada de dados meteorológicos de hora em hora. T * SOL calcula a energia produzida pelo sistema solar para a produção de água quente e aquecimento, bem como as frações solares correspondentes. Os resultados são salvos e podem ser apresentados como documentação detalhada ou como uma apresentação organizada de forma clara. Além disso, os gráficos podem mostrar o curso da energia e outros valores, durante um determinado período. Eles podem ser salvos como uma tabela em formato de texto e copiados da área de transferência para outros programas.

Para o presente trabalho foi escolhido o programa TRNSYS pois possui uma estrutura modular com muitos elementos que normalmente podem ser encontrados em sistemas solares térmicos. A grande vantagem deste programa é o fato de permitir análises detalhadas de todos os componentes que compõem o sistema. Além disso, é um programa de simulação amplamente aceito pela comunidade científica devido a sua precisão em prever o desempenho de sistemas que utilizam a energia solar depois de várias pesquisas realizadas terem validado o software [50][51][52].

2.6. Bases para a validação do modelo

Artur, C., et al. pesquisou [20] os impactos da transição tecnológica para sistemas solares térmicos com backup elétrico no tanque de armazenamento na cidade de Maputo. Considerando a demanda para uma família de 4 pessoas, a introdução de sistemas solares para aquecimento de AQS resultaria num impacto positivo na rede elétrica, reduzindo em até 65,7% a demanda de eletricidade para aquecimento da água e 78,7% das emissões de CO₂, enquanto a economia dos custos de energia é de até 244 USD / família / ano.

Cassard, H., et al. analisaram [53] regionalmente o desempenho técnico e económico de tecnologias solar de aquecimento de água em telhados dos EUA. O estudo concentrou-se na aplicação de sistemas solares de AQS para consumidores que usavam eletricidade para o aquecimento de água, que era estimado em 120 bilhões de kWh por ano. O sistema de análise considerado consistiu em um coletor solar de 3,72 m², tanque de armazenamento de 227 litros. A temperatura de consumo é de 48,9 ° C. Concluíram através das suas investigações que para um consumidor residencial típico de AQS, a utilização de um sistema solar com as características mencionadas acima reduz a demanda de energia para AQS em 50-80%.

Kalogirou, S. estudou [54] o desempenho térmico, análise económica e ambiental do ciclo de vida de aquecedores solares de água de termossifão em Nicósia, Chipre usando o programa de simulação TRNSYS. O sistema investigado é constituído por coletor solar de placa plana de 2.7 m² de área. O sistema foi desenhado para satisfazer 120 litros de AQS a temperatura de 50 ° C para 4 pessoas. Obteve uma fração solar anual de 79% e o valor anual da energia útil fornecida pela energia solar é igual a 6480 MJ (1800 kWh). A redução das emissões de GEE com a utilização do sistema solar de termossifão com *back up* elétrico foram estimadas em 70,3 % em relação a um sistema convencional.

Kakaza, M. e Folly, KA [55] investigaram o efeito do uso de aquecedores solares de água para reduzir o consumo de energia elétrica nas residências sul-africanas. O estudo foi realizado para uma família composta por 4 pessoas que usa um aquecedor elétrico de água. A eficácia dos aquecedores solares de água foi estudada em conjunto com as bombas de calor, comparando essas duas tecnologias com base no consumo de energia, custo e período de retorno. O sistema solar considerado nas simulações é constituído por coletores solar de 3 m² e um tanque de 200 litros.

A partir dos resultados da simulação, a bomba de calor mostrou um consumo de energia de 2,6 kWh / dia enquanto os aquecedores solares de água mostraram um consumo de energia de 6,7 kWh / dia.

3. Metodologia

Para a elaboração dos modelos simulados neste trabalho foi utilizado o software de simulação TRNYS. Este software lida com os sistemas transientes que é caso dos sistemas modelados neste trabalho.

A modelação de componentes individuais de um sistema de energia como uma caixa preta individual é a filosofia básica do TRNYS. O software foi originalmente desenvolvido para sistema solar térmico, e foi estendido para uma variedade de sistemas transientes. Atualmente após várias melhorias significativas, tornou-se numa ferramenta computacional que permite a simulação e criação de sistemas transientes com uma estrutura modular flexível. A ferramenta permite aos utilizadores criar o seu próprio sistema, o qual consiste na ligação entre os componentes

O primeiro passo para o desenvolvimento dos modelos analisados neste estudo (sistema convencional de AQS e sistema solar de AQS) é a escolha dos vários componentes que compõem estes sistemas. Os componentes TRNYS, designados de *types*, representam cada componente físico do sistema real e são selecionados da biblioteca de componentes no *simulation studio*. Cada componente TRNYS possui sua respetiva descrição matemática e um conjunto de pré-definido de dados de entrada, saída e parâmetros. Os componentes selecionados no *simulation studio* são então interligados através dos seus dados (*connections*) de uma maneira que representa como o sistema funciona. Os parâmetros que descrevem cada componente (*type*) do sistema são então modificados de acordo com as características do sistema. As figuras 20 e 21 mostram os modelos dos sistemas elaborados para o estudo.

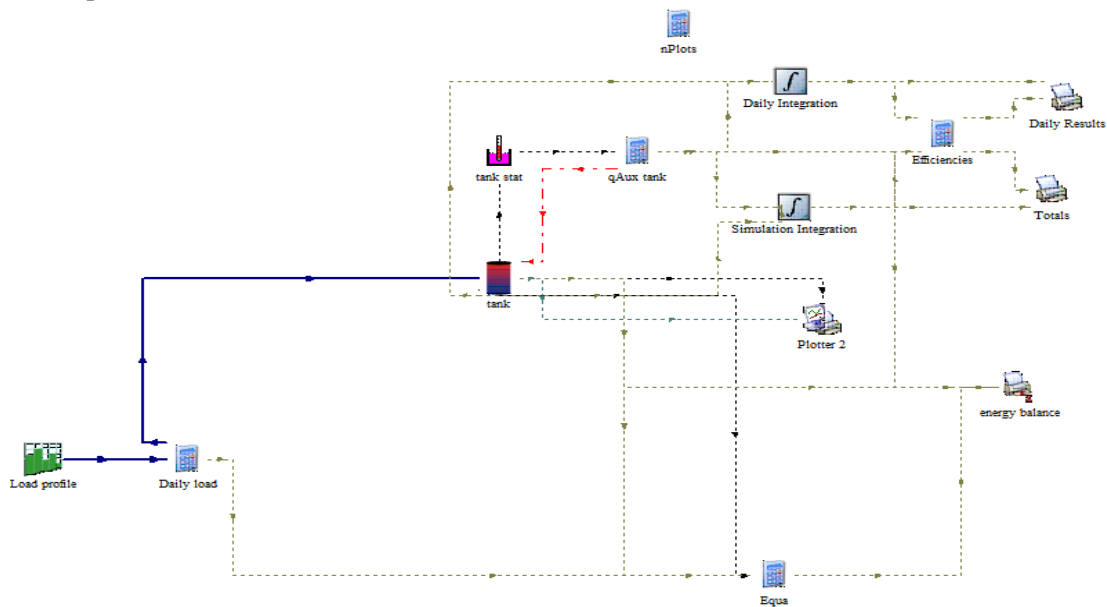


Figura 20. Modelo do sistema convencional de AQS no TRNYS.

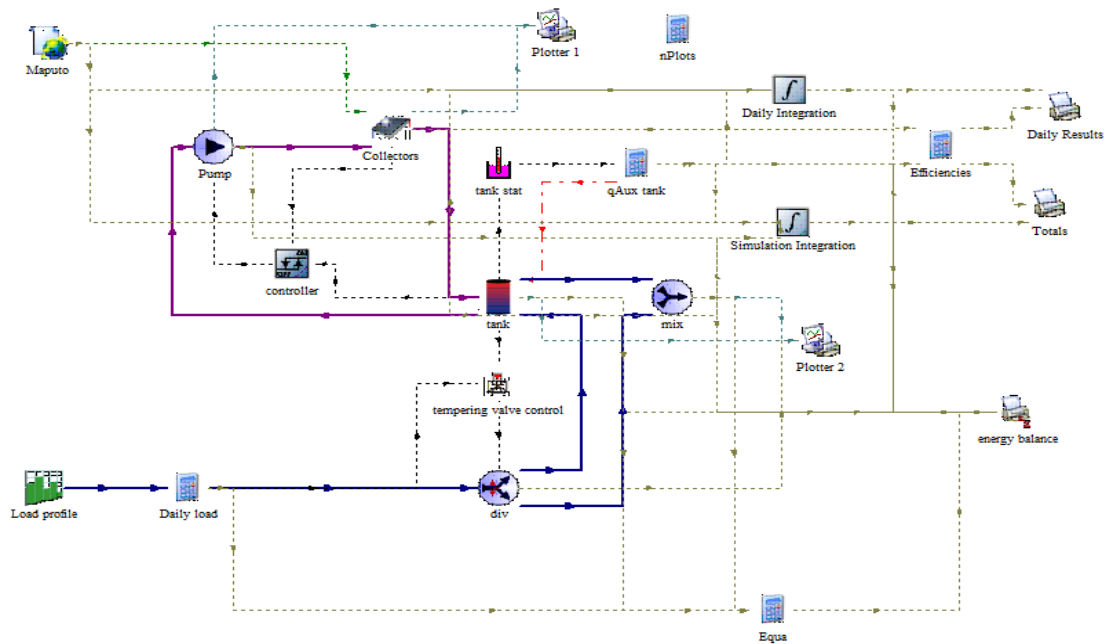


Figura 21. Modelo do sistema solar de AQS no TRNSYS.

Componentes de TRNSYS nos sistemas de AQS

A biblioteca do TRNSYS é constituída por componentes (também designados de type) de diferentes categorias que incluem componentes que representam cada componente físico do sistema real. Esses componentes são conectados de modo a representar o sistema. Abaixo são descritos alguns componentes usados para elaboração e simulação de modelos de AQS:

Arquivo meteorológico

Consiste em um módulo de leitura e processamento de dados meteorológicos para um ano meteorológico típico (TMY). Os dados meteorológicos da maioria das cidades em todo o mundo estão incluídos na biblioteca meteorológica como um arquivo TMY. Os parâmetros deste componente incluem radiação de superfície inclinada, refletância do solo, número de superfícies, modo de rastreamento e inclinação da superfície etc. e os outputs incluem diferentes tipos de radiação, temperatura, umidade, velocidade do vento. O arquivo TMY fornece dados input para modelação matemática e simulação do coletor.

Coletor solar

Todos os tipos de módulos coletores solares disponíveis comercialmente estão disponíveis como componentes: placa plana, concentrado, tubo evacuado, parabólico, fresnel etc. As principais especificações do coletor que controlam / influenciam o desempenho substancialmente podem ser definidas. O componente do coletor busca input de arquivos de clima, bem como fluxos de entrada, e fornece output para unidades de armazenamento e controle. Os parâmetros de especificação crítica de coletores são área de superfície, inclinação, transmitância e refletância da superfície superior, várias eficiências, propriedade termodinâmica do fluido circulante e materiais usados, etc.

O modelo da descrição do coletor solar no estado estacionário tem sido amplamente usado nos testes (ISSO 9806-1 e ASHRAE) e para simulação. A equação básica para o modelo estacionário da potência útil ganha, para um ângulo de incidência quase normal, é expressa pela equação abaixo [56].

$$P_{out} = F'(\tau\alpha)_{en}G - c_1(t_m - t_a) - c_2(t_m - t_a)^2 \quad (14)$$

onde

$F'(\tau\alpha)_{en}$ - eficiência de perda zero para radiação global ou total na incidência normal;

G - radiação solar global ou total no plano coletor [W/m^2]. Nenhuma correção é feita para o ângulo de incidência ou fração difusa da radiação solar;

c_1 e c_2 - parâmetros que descrevem as perdas de calor dependentes da temperatura;

t_m - temperatura média aritmética entre a temperatura de entrada e saída do coletor [$^{\circ}C$];

t_a - temperatura do ar ambiente próximo ao coletor [$^{\circ}C$].

Armazenamento

Na biblioteca do TRNSYS são encontrados diferentes tipos de componentes que representam tanques de armazenamento que incluem tanques de volume constante e variável, tanques aquecido a gás, tanques com aquecimento elétrico.

Os principais parâmetros destes componentes são posições de entrada e saída do fluido, volume e altura do tanque, propriedade do fluido e coeficiente de perda do tanque. Os inputs são temperatura e caudal da água de alimentação e de saída do coletor.

Hidráulica

Componentes hidráulicos, que controlam o movimento do fluido, compreendem a bomba, componente misturador e desviador de fluxo. Os componentes de bomba de velocidade única e variável encontram-se disponível na biblioteca. Os parâmetros de controle são a taxa de fluxo máxima, o calor específico do fluido, a potência máxima e os coeficientes de conversão. Os inputs são temperatura do fluido e caudal mássico na entrada e sinal de controle. Os outputs são a temperatura do fluido e caudal mássico na saída e consumo de energia.

O desviador de fluxo faz com que um único fluxo de líquido de entrada seja dividido de acordo com a configuração de válvula especificada pelo usuário em dois fluxos de saída de líquido. Os inputs são a temperatura e o caudal do fluxo de entrada.

Uma misturadora é usada para a mistura de água quente e fria de acordo com a exigência dos usuários. Possui duas portas de entrada, uma de água quente de tanque de armazenamento e a água fria de alimentação da fonte e uma saída para utilização de modo que fluxos simples ou misturados possam ser usados de cada vez. Os inputs são temperatura e taxa de fluxo nas duas portas de entrada. O output é a temperatura e a vazão na saída.

Controlador

O controlador diferencial gera uma função de controle que pode ter um valor de 1 ou 0. O valor do sinal de controle é escolhido em função da diferença entre as temperaturas elevada e baixa.

Output

Os resultados de qualquer simulação podem ser analisados usando componentes de saída, como *online plotter*, impressora, histograma, planilha etc. O *online plotter* permite alterações de design, ajuste e personalização simultâneo.

4. Caso de estudo

O caso de estudo em análise representa uma família típica moçambicana constituída por 5 membros com necessidade de consumo de água quente sanitária para fins domésticos.

O estudo consiste numa análise comparativa entre dois sistemas de aquecimento de água, um sistema convencional e um sistema solar térmico, de modo a avaliar o contributo da energia solar na produção de AQS.

4.1. Localização

O caso de estudo analisado está localizado na cidade de Maputo em Moçambique. Maputo é a cidade capital do país e está localizada na margem ocidental da Baía de Maputo, no extremo sul do país, perto da fronteira com a África do Sul e da fronteira com a Suazilândia (latitude 25.94°S, longitude 32.56°E, altitude 15 m).



Figura 22. Localização cidade de Maputo.

4.2. Dados meteorológicos

A cidade de Maputo possui basicamente duas estações, verão e inverno. O verão tem início no mês de Outubro e termina em Março e estação de inverno tem início no mês de Abril e termina em Setembro. O verão é geralmente quente e chuvoso enquanto o inverno é geralmente fresco e com pouca chuva. A precipitação média anual de 685mm concentra-se nos meses de dezembro e março [17]. As temperaturas máximas e mínimas mensais são mostradas na tabela 5.

Tabela 5. Temperaturas máximas e mínimas na cidade de Maputo[57]

| Mês | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Tmáx | 29.9 | 29.6 | 29.3 | 28 | 27.8 | 24.6 | 24.4 | 25.3 | 26.1 | 26.5 | 27.4 | 29.1 |
| Tmin | 22.3 | 22.3 | 21.5 | 19.4 | 16.8 | 14.4 | 14.2 | 15.4 | 17.2 | 18.3 | 19.7 | 21.4 |

A irradiação global no país varia entre 1700 e 2200 kWh/m².ano. Este recurso é bastante abundante e consistente em grande parte do país [58].

Na cidade de Maputo a radiação solar global é 5,3 kWh/m².dia [59]. Na tabela 6 constata-se que a radiação incidente global tende a diminuir nos meses de inverno que compreende o período de Abril até Outubro, e é neste período que se verifica a menor radiação solar incidente no valor de 3,8 kWh/m².dia no mês de Junho. A radiação incidente global máxima verifica-se no mês de Janeiro no valor de 6,9 kWh/m².dia. Os valores da radiação difusa são maiores nos meses chuvosos que compreende o período de Outubro até Março.

No verão, os dias são mais longos com mais horas de irradiação solar. Portanto, a diferença entre um dia típico de inverno e um dia típico de verão está na quantidade de horas de irradiação solar, sendo cerca de 10 h no inverno e 14 h no verão.

Em termos das horas de insolação, o estudo realizado por Cuamba, B. et al [59] mostrou que o número de horas de insolação na cidade de Maputo, na maioria dos dias é superior a 6. Esta informação é importante no dimensionamento e implantação dos sistemas de energia solar.

Tabela 6. Médias da radiação solar global, radiação direta e radiação difusa na cidade de Maputo [59].

| Mês | Global [kWh/m ² .dia] | Directa [kWh/m ² .dia] | Difusa [kWh/m ² .dia] |
|-----------|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| Janeiro | 6,9 | 4,4 | 2,5 |
| Fevereiro | 6,6 | 4,4 | 2,2 |
| Março | 5,8 | 3,8 | 2,0 |
| Abril | 4,9 | 3,2 | 1,7 |
| Mai | 4,1 | 2,9 | 1,2 |
| Junho | 3,8 | 2,8 | 1,0 |
| Julho | 3,8 | 2,7 | 1,1 |
| Agosto | 4,5 | 3,1 | 1,4 |
| Setembro | 5,0 | 3,1 | 1,9 |
| Outubro | 5,7 | 3,5 | 2,2 |
| Novembro | 6,0 | 3,5 | 2,5 |
| Dezembro | 6,8 | 4,3 | 2,5 |

4.3. Consumo doméstico de água quente

No projeto dos sistemas de aquecimento de água, é necessário estimar as cargas médias de aquecimento de longo prazo (anuais e / ou mensais). A carga de aquecimento da água ou a quantidade de energia necessária para aquecer a água fria de rede até a temperatura desejada depende de vários fatores sendo um destes os consumos de AQS por cada utilizador familiar.

O consumo de água quente depende do estilo de vida das pessoas, estação do ano, hora do dia e parâmetros geográficos. Para este estudo foi considerado o consumo de 40 litros de AQS por pessoa a uma temperatura de 60 ° C. Considerando uma família típica de 5 pessoas do caso de estudo, o consumo total diário de AQS é de 200 litros a 60 ° C. Este parâmetro é importante na escolha da capacidade do tanque de armazenamento de modo a satisfazer as necessidades de consumo.

4.4. Perfil de consumo de AQS

O consumo de água quente sanitária (AQS) varia ao longo do tempo e é fortemente influenciado pela localização geográfica, hábitos das pessoas, hora do dia, estação do ano e principalmente pelo estilo de vida específico dos consumidores.

O perfil de consumo diário de água quente foi submetido a muitos estudos no passado. Fuentes e Salom investigaram [60] os trabalhos recentes de perfis de consumos de AQS em diferentes tipos de edifícios e sintetizaram as informações disponíveis para estimar o consumo de energia resultante no uso de AQS. No estudo identificaram os parâmetros influentes no consumo de AQS que incluem condições climáticas, época do ano, tipo de edifício. Através da revisão constataram também que os fatores socioeconômicos são altamente influentes no consumo médio diário de AQS.

Padrões típicos de consumo de água quente doméstica em edifícios residenciais para diferentes países europeus, EUA e Canadá foram obtidos através da investigação conduzida pela Agência Internacional de Energia em 2008 no âmbito do anexo 42. Os resultados do estudo contidos no relatório são baseados em medições do conjunto de consumo de AQS da Alemanha, Suíça, Finlândia, Portugal, Reino Unido e Bélgica (tabela 7) [61].

Tabela 7. Consumo diário de água quente por domicílio e ocupante por país. O consumo diário de energia é calculado para um domicílio médio de 2,5 ocupantes [61].

| País | Consumo diário de AQS por família (l/dia) | Consumo diário de AQS por ocupante (l/ocupante. dia) | Uso diário de energia para AQS por domicílio (kWh/dia) |
|-------------|---|--|--|
| Canada | 236-303 | 94 | 12.3 |
| EUA | 202-250 | 40 | 5.22 |
| Suíça | 138 | 55 a 50 ° C | 7.18 |
| Filândia | 135 | 43 | 5.61 |
| Reino Unido | 102-117 | 20-39 | 3.85 |
| Alemanha | 160 | 64 | 8.36 |
| Espanha | 75 | 30 (a 60 ° C) | 3.92 |
| Portugal | 100 (45 ° C) (em apartamentos) | 40 | 5.23 |

Meyer e Tshimankinda investigaram [62] o consumo de AQS em casas tradicionais sul-africanas. O estudo constatou que o consumo médio em litros de água quente por pessoa por dia para casas tradicionais de baixa, média e alta densidade é 6,3, 5,6 e 5,0, respetivamente. Para além disso os autores observaram que as pessoas nas comunidades desenvolvidas usam 9 a 10 vezes mais água quente do que as pessoas nas comunidades em desenvolvimento. O estudo também revelou que o consumo de água quente aumenta em 70% do verão ao inverno e a existência de dois picos de consumo: um pico da manhã e um pico da noite de aproximadamente o mesmo tamanho. O pico da manhã é às 07:00 e o pico da noite às 20:00. Verificou-se que não há grandes diferenças no consumo de água quente entre sábados e domingos.

Uma pesquisa conduzida na cidade de Maputo em Moçambique revelou que em cerca de 86% dos domicílios, a AQS é usada apenas para banho (e não para cozinhar e outros fins domésticos) [20]. A mesma pesquisa, obteve a dependência do consumo diário de água quente e a tecnologia utilizada para produção de AQS (tabela 8) e também a frequência dos horários de banho dos membros da família (fig. 23)

Tabela 8. Volume diário de água quente por tecnologia [20].

| Tecnologia | Volume diário de AQS (Litros/família) | Temperatura [° C] |
|---|---------------------------------------|-------------------|
| Aquecedores elétricos de AQS com e sem tanque | 236 | 37 |
| Chaleiras elétricas, biomassa e fogão a GLP (Gás) | 28 | 100 |
| Sistema solar térmico | 120 | 50 |

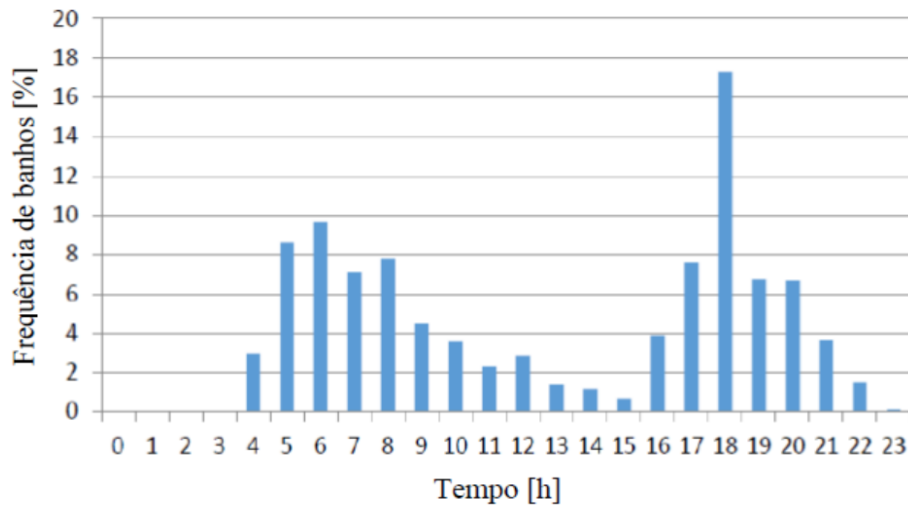


Figura 23. Frequência das horas de banho dos membros da família [20].

A partir da análise dos estudos feitos sobre diferentes tipos de perfis e fatores que afetam os consumos de AQS foi concebido um perfil de consumo de AQS que é característico ao local de estudo. Considerando o consumo de um volume diário constante de 200 litros foi concebido o perfil da fig. 24.

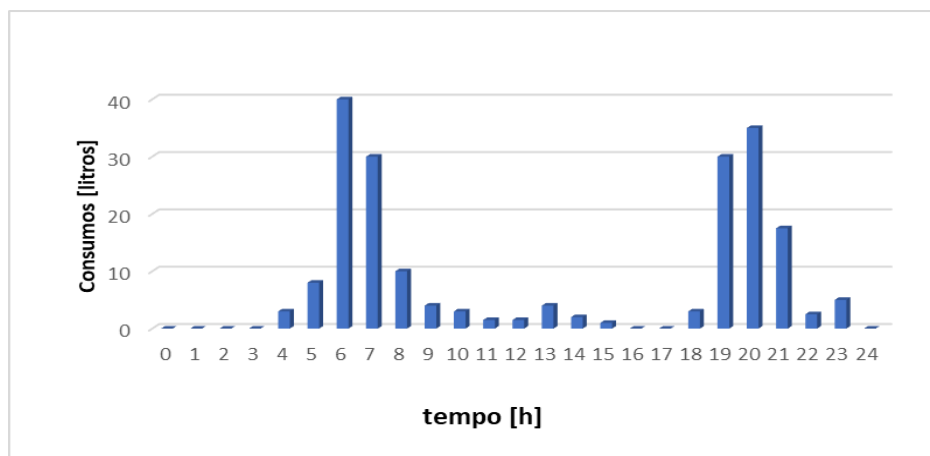


Figura 24. perfil de consumo do caso de estudo

4.5. Modelos dos sistemas de aquecimento de água

4.5.1. Aquecedor elétrico de AQS

O sistema convencional de AQS simulado é constituído por um tanque de armazenamento vertical de 200 litros, dimensionado para satisfazer as necessidades de AQS para uma família de 5 pessoas, dotado de um elemento aquecedor elétrico cuja potência é 2.5 kW. O funcionamento do elemento aquecedor é controlado por um termostato que fixa a temperatura máxima da água na zona do termostato em 60 ° C. Este sistema é usado para uma análise comparativa com o sistema solar de aquecimento de água de modo a avaliar o contributo da energia solar na produção de AQS.

Tabela 9. parâmetros de modelação do aquecedor elétrico

| Parâmetros do Sistema | Valores |
|-----------------------------|-------------------------|
| Consumo de AQS | |
| Consumo diário | 200 l/d |
| Temperatura de consume | 60 C |
| Tanque | |
| Volume | 200 l |
| Altura | 1.58 m |
| Perdas térmicas | 0.27 W/m ² K |
| Potência elemento aquecedor | 2.5 kW |
| Fluido térmico | |
| Calor específico | 4.19 kJ/kg K |
| Densidade | 1000 kg/m ³ |
| Condutividade térmica | 0.61 W/m K |

4.5.2. Aquecedor solar de AQS

O modelo do sistema solar de produção de AQS simulado é do sistema de AQS de circulação forçada com aquecimento direto. O sistema de circulação forçada recorre ao uso da bomba para a circulação da água do coletor até ao tanque de armazenamento que é ativado por um controlador cuja função é controlar a circulação da água em função de diferença de temperatura entre a água no tanque e a temperatura no coletor. A representação esquemática desse sistema encontra-se na fig. 25. O sistema é constituído por um coletor solar de placas planas de 3,5 m² de área, um tanque de armazenamento vertical de 200 litros dotado de um elemento aquecedor de 2,5 kW de potência que atende a demanda de AQS nos períodos de ausência da radiação solar. A temperatura da água da rede é 23 ° C e a temperatura máxima de termostato é de 60 ° C. A modelação de componentes individuais é discutida nas seções a seguir.

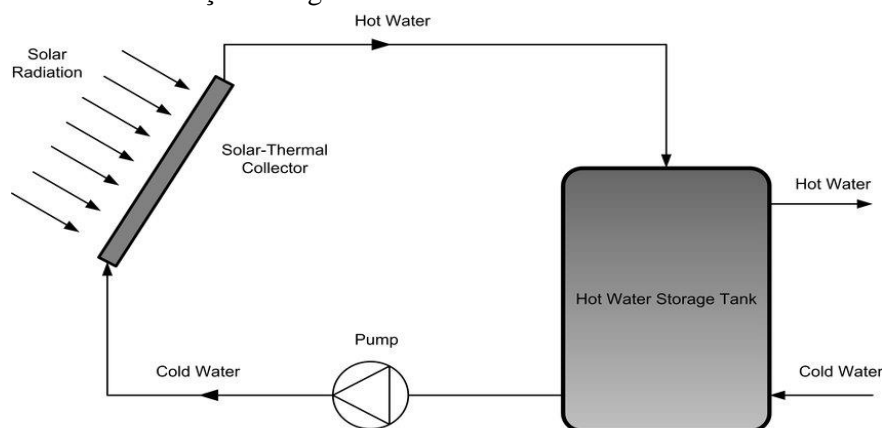


Figura 25. Esquema do sistema básico de água quente sanitária de circulação forçada

4.5.2.1. Coletor solar

Os componentes do modelo do sistema solar de produção de AQS são selecionados na biblioteca do TRNSYS. O modelo do coletor solar selecionado na biblioteca TRNSYS é o componente *type 1b* que representa um coletor solar de placa plana. Este componente modela o desempenho térmico de um coletor solar de placa plana. A Equação 15 fornece a eficiência térmica do coletor solar.

$$n_{col} = \dot{m} C_p (T_{o_{col}} - T_{i_{col}}) / A_{col} I_t \quad (15)$$

onde

n_{col} – eficiência do coletor

\dot{m} – taxa do fluxo [kg/s]

c_p – calor específico do fluido [kJ/kg °C]

$T_{o_{col}}$ – temperatura de saída do fluido do coletor [°C]

$T_{i_{col}}$ – temperatura de entrada do fluido para o coletor [°C]

A_{col} – área do coletor [m²]

I_t – radiação global incidente no coletor solar [W/m²]

O modelo dos componentes TRNSYS é descrito por variáveis, parâmetros (*parameters*), entradas (*inputs*) e saídas (*outputs*). A tabela 10 apresenta os valores de algumas variáveis definidas para o modelo do coletor solar selecionado. Os valores da função do parâmetro estão especificamente relacionados com o fabricante e devem ser inseridos de acordo com as especificações do mesmo. Alguns inputs e todos outputs têm um valor “conectado”, o que significa que inputs e outputs têm valores vinculados a outros componentes.

Tabela 10. características do coletor solar

| | | |
|-----------|-----------------------------|-------------------------|
| Parâmetro | Área do coletor | 3,5 m ² |
| Parâmetro | Calor específico do fluido | 4,19 kJ/kg.K |
| Parâmetro | Taxa de fluxo testada | 40 kg/hr m ² |
| Parâmetro | IAM de 1ª ordem | 0,2 |
| Parâmetro | IAM de 2ª ordem | 0 |
| Parâmetro | <i>Intercept efficiency</i> | 0,8 |
| Input | Temperatura de entrada | Conectado |
| Input | Temperatura ambiente | Conectado |
| Input | Inclinação do coletor | 24° |
| Output | Temperatura de saída | Conectado |

4.5.2.2. Bomba

Sendo que o modelo simulado é um sistema solar de AQS de circulação forçada, uma bomba foi utilizada para circular o fluido. Foi selecionado, na biblioteca do TRNSYS, o type 114 que modela uma bomba de velocidade constante, capaz de manter uma taxa de fluxo de massa de saída constante. A tabela 11 mostra as características do modelo da bomba.

Tabela 11. características da bomba de Circulação

| | | |
|-----------|-----------------------------------|---------------|
| Parâmetro | Taxa de fluxo nominal | 0,04 kg/s |
| Parâmetro | Calor específico de fluido | 4,19 kJ/kg. K |
| Parâmetro | Potência nominal | 66,7 W |
| Parâmetro | Fração de perda de calor do motor | 0.0 |
| Input | Eficiência total da bomba | 0,6 |
| Input | Eficiência do motor | 0,9 |

4.5.2.3. Tanque de armazenamento

A biblioteca do TRNSYS possui modelos de tanques de armazenamento com diferentes características como o número de entradas, saídas, permutadores de calor imersos e aquecedores auxiliares, e o método que considera a perda de calor para o ambiente.

O modelo do tanque selecionado é um tanque de armazenamento de volume constante com uma configuração vertical, *type* 158. O fluido no tanque de armazenamento interage com o meio ambiente (por meio de perdas térmicas na parte superior, inferior e bordas) e com duas correntes de fluxo que passam para dentro e para fora do tanque de armazenamento. A tabela 12 apresenta as características do tanque usado no modelo de AQS

Tabela 12. características do tanque de armazenamento

| | | |
|-----------|---|-------------------------|
| Parâmetro | Volume do Tanque | 200 l |
| Parâmetro | Altura do Tanque | 1,57 m |
| Parâmetro | Calor específico do fluido | 4,19 kJ/kg. K |
| Parâmetro | Densidade do fluido | 1000 kg/m ³ |
| Parâmetro | Temperatura Máxima (T _{set}) | 60 ° C |
| Parâmetro | Coefficiente de perda superior | 0,27 W/m ² K |
| Parâmetro | Coefficiente de perda de borda | 0,27 W/m ² K |
| Parâmetro | Coefficiente de perda inferior | 0,27 W/m ² K |
| Parâmetro | Número de camadas de estratificação | 6 |
| Input | Temperatura de entrada para a porta 2 | Conectado |
| Input | Taxa de fluxo de entrada para a porta 2 | Conectado |
| Output | Temperatura na saída 1 | Conectado |

Para modelar a estratificação observada em tanques de armazenamento, o tanque é dividido em camadas de temperatura isotérmica. O número de camadas de estratificação definido no modelo do tanque de armazenamento foi 6. Cada camada de volume constante é isotérmica e interage termicamente com as camadas acima e abaixo por meio de mecanismos de condução do fluido entre camadas e por meio do movimento do fluido. O modelo é constituído por um elemento de aquecimento auxiliar para fornecer calor auxiliar na ausência da radiação solar. A potência do elemento aquecedor é de 2,5 kW.

5. Discussão dos resultados das simulações

Nesta secção, os resultados das simulações feitas ao sistema solar de AQS e sistema convencional de AQS relativos aos consumos de energia elétrica são apresentados.

De modo a analisar os contributos da energia solar na produção de AQS fez-se a comparação de um sistema convencional (aquecedor elétrico com tanque de armazenamento) e um sistema solar térmico (sistema de circulação forçada com aquecimento direto) de produção de AQS cujos modelos foram elaborados e simulados através do TRNSYS 18 para o cálculo dos consumos de energia sob as condições meteorológicas da cidade de Maputo.

As simulações foram realizadas considerando uma família típica de 5 pessoas, com um consumo diário de 200 litros de AQS cujo perfil de consumo é apresentado na figura 24. A temperatura da água de rede de abastecimento é de 23 ° C. A temperatura de armazenamento no tanque é de 60 ° C.

Os modelos foram simulados para todo o ano usando os dados meteorológicos de um ano típico da cidade de Maputo. Os resultados da simulação são enviados para o componente ‘Results’ (TRNSYS Type 25c), que os transfere para um ficheiro de resultados. Os principais resultados analisados foram os valores dos consumos mensais de energia (em kJ) necessários para aquecer a água. A energia necessária para aquecer a água é convertida de kJ para kWh. Os custos de energia foram determinados usando as tarifas de energia elétrica vigentes apresentadas no anexo [63]. As emissões de GEE de cada aquecedor, são calculadas considerando fator de emissão dos GEE para as tecnologias.

5.1. Consumos de energia elétrica

A tabela 13 apresenta os consumos de energia elétrica do aquecedor elétrico de AQS e aquecedor solar de AQS. É evidente a partir da tabela que o aquecedor solar consome aproximadamente cinco vezes menos energia anualmente que o aquecedor elétrico porque uma parte da demanda de AQS é atendida pela componente solar. Pode observar-se através dos resultados mostrados na tabela que não se verificam grandes diferenças de consumos entre as estações de verão e de inverno apesar da intensidade da radiação solar ser maior nos meses de verão em relação aos meses de inverno. Isto deve-se ao facto da ocorrência de chuvas nos meses de verão tendo assim dias com céu nublado [17]. Estes dias de céu nublado exigem um aquecimento auxiliar. O valor dos consumos anuais de energia do aquecedor elétrico e solar são 5443 kWh e 1107 kWh respetivamente. O gráfico de consumos mensais (fig. 26) mostra um consumo ligeiramente superior de energia elétrica do sistema solar nos meses de inverno devido ao facto da radiação solar nesses meses ser inferior em relação aos meses de verão como ilustrado na tabela 6.

Tabela 13. Consumos médios diários de energia elétrica dos aquecedores elétrico e solar

| | Média diária de inverno [kWh] | Média diária de verão[kWh] | média diária anual [kWh] | Consumo total anual [kWh] |
|---------------------------|-------------------------------|----------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Aquecedor elétrico de AQS | 14,8 | 14,9 | 14,9 | 5443 |
| Aquecedor solar de AQS | 3,2 | 2,8 | 3,0 | 1107 |

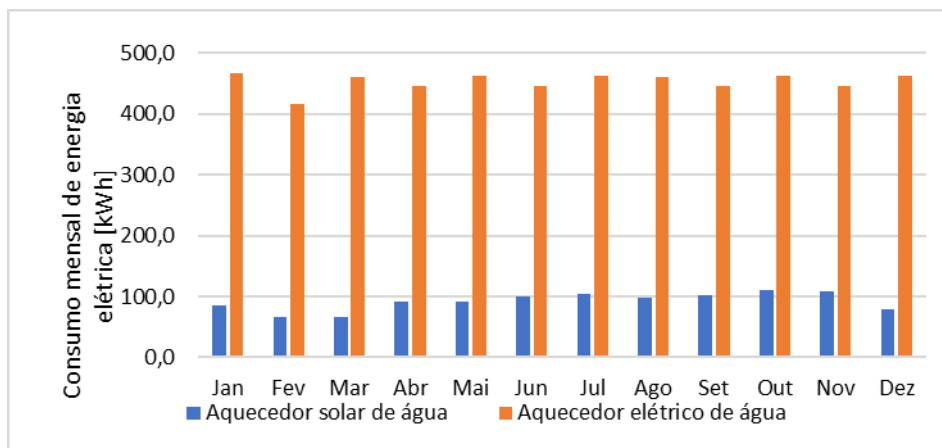


Figura 26. Consumos mensais de energia dos aquecedores elétricos e solar de água

O aquecedor solar consome em média 3,0 kWh/dia, em comparação com o aquecedor elétrico que consome 14,9 kWh/dia, economizando desta forma 11,9 kWh/dia equivalente a uma economia energética de 80%. O aquecedor solar de AQS economiza anualmente cerca de 4336 kWh.

Artur, et. al , Cassard, H., et al, Kakaza, M. e Folly, KA, reportaram resultados similares nos seus estudos como descrito na secção 2.6 onde a redução das demandas de energia elétrica varia no intervalo de (50-80%).

5.2. Análise financeira

Para uma decisão ideal para a aquisição e instalação de sistemas solares térmicos, o equilíbrio entre os benefícios de custo e economia de energia devem ser considerados. A avaliação financeira é feita considerando o custo de energia e o período de retorno simples (payback). O custo de energia é calculado usando a seguinte equação:

$$C_{AQS} = C_{kWh} \cdot Q_{aux} \quad (16)$$

onde

C_{kWh} - é o custo por unidade da fonte de energia;

Q_{aux} - é a energia consumida pelo sistema.

O cálculo do período de retorno simples foi feito usando a seguinte equação:

$$payback = \frac{IC_0}{CF} \quad (17)$$

onde

IC_0 - é o capital de investimento inicial;

CF - *cash flow*, economia de custos operacionais.

O valor de payback da equação 17 assume que o cash flow (CF) permanece inalterado ao longo do ciclo de vida do projeto do sistema solar instalado, por este motivo, o valor do período de retorno simples calculado pela fórmula só pode ser considerado como uma estimativa.

O payback do sistema solar de AQS é calculado tendo como comparação o sistema convencional de AQS. Os resultados dos cálculos são apresentados na tabela 14.

Tabela 14. Investimento inicial e o período de retorno simples do sistema solar de AQS.

| | Investimento inicial [USD] | Economia de energia [kWh/ano] | Economia dos custos [USD/ano] | Payback [anos] |
|------------------------|-------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------|
| Aquecedor solar de AQS | 3378.38 | 4336 | 494.3 | 6.8 |

Câmbio: 1 USD = 74 MZN

1 kWh = 8.44 MZN (0.114 USD)

Os custos do investimento do sistema solar para um projeto a ser instalado na cidade de Maputo, foram estimados em 250 000 MZN (sem inclusão do custo de manutenção) equivalente a 3378.38 USD. Com a economia anual de eletricidade de 4336 kWh que resultou na economia anual do custo de energia elétrica de 494.3 USD, obteve-se o payback de 6.8 anos.

Como descrito na secção 2.6, Kakaza, M. e Folly, KA reportou um período de retorno de 7 anos para aquecedores solares de água, um valor similar obtido neste presente trabalho.

5.3. Emissões de CO₂

A figura 27 apresenta as emissões anuais de CO₂, para os dois aquecedores. Os valores das emissões E_{CO_2} , foram calculados usando a equação 18, onde Ef_{kWhCO_2} é o fator de emissão. O valor do fator de emissão definido para as tecnologias elétricas é 0.07 [64].

$$E_{CO_2} = Ef_{kWhCO_2} \cdot Q_{aux} \quad (18)$$

Conforme a figura 27 o aquecedor solar reduz significativamente as emissões de CO₂ em relação ao aquecedor elétrico, evitando anualmente cerca de 303,5 kg CO₂ de emissões. Desta forma a utilização de aquecedor solar no lugar do aquecedor elétrico resultaria num impacto positivo ao meio ambiente. Pode concluir-se que a economia de energia não só oferece benefícios de redução da fatura energética, mas também reduz as emissões de GEE.

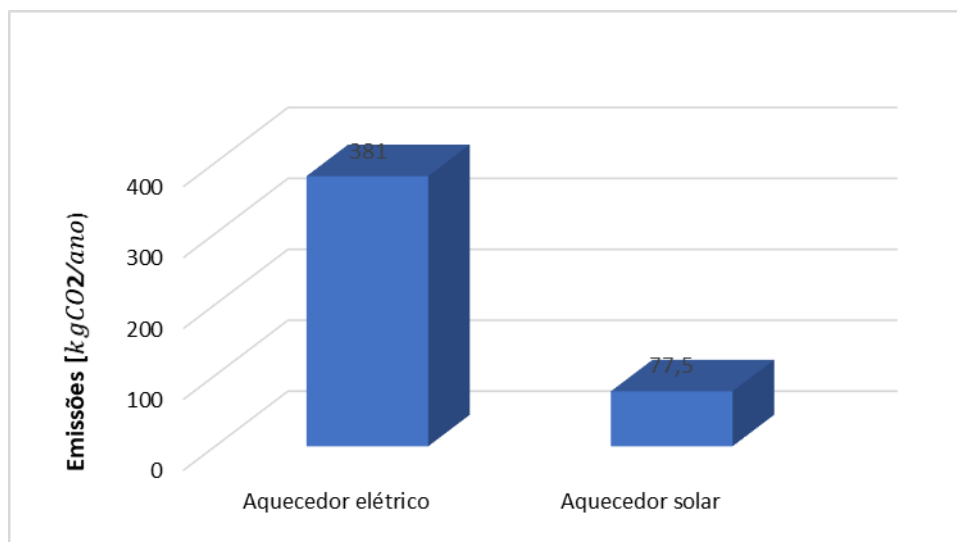


Figura 27. Emissões anuais de CO₂ do aquecedor elétrico e aquecedor solar.

Artur, C., et e Kalogirou, S. reportaram reduções similares nos seus estudos como descrito na secção 2.6.

Quantificação monetária das emissões de CO₂ evitadas

Apesar da disposição de Moçambique em participar nos mecanismos de mercado internacional a serem estabelecidos que permitam a redução das emissões de CO₂ e o acesso às tecnologias limpas ainda não há referências à taxa de CO₂ estabelecidas. Desta forma para quantificação monetária de CO₂ emitido foi usado um valor baseado nas taxas de CO₂ utilizadas por Portugal e Africa de Sul tendo sido usado o valor de 7 USD/tCO₂e [65].

Tabela 15. Quantificação monetária das emissões de CO₂ evitadas

| Sistema convencional de AQS | | | Sistema solar de AQS | | |
|-----------------------------|---------------|--------------------------|----------------------|---------------|--------------------------|
| Emissões em kg | Emissões em t | Custos de emissões (USD) | Emissões em kg | Emissões em t | Custos de emissões (USD) |
| 381 | 0,381 | 2,70 | 77,5 | 0,0775 | 0,54 |

A substituição do sistema convencional de AQS por sistema solar AQS evita a emissão de 303,5 kgCO₂ por ano equivalente a 2,12 USD evitados.

Os valores de custos de emissões são relativamente menores, no entanto é importante destacar a percentagem de redução de custos de emissões ao substituir o sistema convencional de AQS para sistema solar de AQS que é cerca de 80%, um taxa de redução relativamente maior.

6. Otimização do sistema solar de AQS

A otimização dos parâmetros de sistema de aquecimento de água é muito importante para atingir um desempenho adequado. Os parâmetros do modelo do sistema solar elaborado para o estudo foram otimizados. Uma série de simulações foram feitas para otimizar os parâmetros área do coletor solar, capacidade do tanque de armazenamento e potência do elemento aquecedor, onde foram determinados valores ótimos para cada parâmetro através da análise de sensibilidade. O valor ótimo de um parâmetro é definido como o valor que maximiza a fração solar anual de um sistema. As simulações foram realizadas usando o programa de simulação TRNSYS 18.

Para esta análise foi usada a fração solar como parâmetro de otimização. A fração solar é um melhor indicador do desempenho do sistema em comparação com outros parâmetros como eficiência do coletor, pois manifesta o desempenho geral de todo o sistema e não de um componente.

A fração solar mensal ou anual, que é a definida como a percentagem da carga térmica satisfeita pela energia solar, é calculada usando a equação 19, onde o Q_{LOAD} é a energia total fornecida pelo sistema para suportar os requisitos de aquecimento de água e $Q_{auxiliary}$ é a energia auxiliar total fornecida ao sistema para suportar a parte da carga total que não é fornecida pela energia solar.

$$f = \frac{Q_{load} - Q_{auxiliary}}{Q_{load}} \quad (19)$$

A tabela 16 apresenta os parâmetros e os valores considerados para otimização do sistema solar de aquecimento.

Tabela 16. Parâmetros de otimização do sistema de aquecimento solar de AQS

| | |
|-----------------------------------|--|
| Área de coletor | 3,0 m ² ; 3,5 m ² ; 4,0 m ² ; 4,5 m ² ; 5,0 m ² ; 6 m ² ; 8 m ² |
| Volume do tanque de armazenamento | 150 l, 200 l, 250 l, 300 l, 350 l, 400 l, 500 l |
| Potência de elemento aquecedor | 2,0 kW; 2,5 kW; 3,0 kW; 3,5 kW; 4kW; 5kW; 6 kW |

A tabela 17 apresenta as frações solares para cada valor dos parâmetros considerados para otimização e com base na análise de sensibilidade foram determinados os valores ótimos para cada parâmetro.

Tabela 17. Frações solares para cada valor dos parâmetros do sistema solar de AQS

| Área do coletor | | Volume do tanque | | Potência aquecedor | |
|---------------------------|------------------|------------------|------------------|--------------------|------------------|
| Valores (m ²) | fração solar (%) | Valores (litros) | fração solar (%) | Valores (kW) | fração solar (%) |
| 3,0 | 60 | 150 | 65 | 2,0 | 77 |
| 3,5 | 67 | 200 | 72 | 2,5 | 76 |
| 4,0 | 72 | 250 | 76 | 3,0 | 75 |
| 4,5 | 76 | 300 | 78 | 3,5 | 75 |
| 5,0 | 79 | 350 | 79 | 4,0 | 74 |
| 6,0 | 82 | 400 | 79 | 5,0 | 73 |
| 8,0 | 85 | 500 | 80 | 6,0 | 72 |

Segundo os valores da tabela percebe-se que a variação da fração solar é mais sensível a variação da área do coletor solar e menos sensível a variação da potência do elemento aquecedor dos parâmetros analisados. O comportamento da variação da fração solar em função da variação de cada parâmetro analisado é discutido nas próximas seções.

6.1. Área do coletor solar

O modelo do sistema solar foi analisado para seguintes valores da área do coletor solar: 3,0 m²; 3,5 m²; 4,0 m²; 4,5 m²; 5,0 m²; 6,0 m²; 8,0 m². A partir dos valores da área do coletor solar foram determinados os valores da fração solar (tabela 17) e o valor ótimo da área do coletor. O gráfico da figura 28 mostra a tendência da variação da fração solar em função da área do coletor solar.

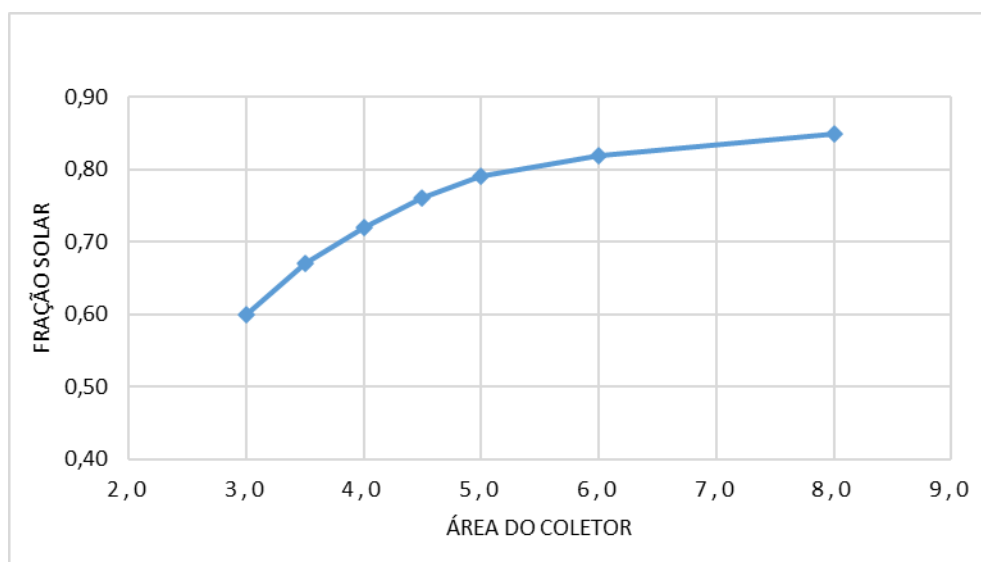


Figura 28. Fração solar como função da área do coletor solar.

A fração inicial do modelo é 67% correspondente ao valor da área de coletor solar de 3,5 m², que é o valor mínimo de área recomendada no dimensionamento de sistemas solares de água quente sanitária para as condições da África Austral [42]. Como ilustra a figura 28, o aumento da área do coletor solar aumenta a fração solar do sistema. A fração solar regista uma variação significativa no intervalo da variação da área de 3 m² à 5 m². O coletor solar de 3 m² têm uma cobertura solar de 60% e o coletor solar de área 5 m² têm uma cobertura solar de 79%. Neste intervalo da variação da área do coletor a fração solar varia em 32%. Ainda com o aumento da área a variação da fração vai diminuindo. Por exemplo, variando a área do coletor de 5 m² até 8 m² a fração solar varia apenas em 8%. Para 5 m² a cobertura solar é 79% e para 8 m² a cobertura solar passa para 85%.

Para estudar a variação da cobertura solar com a variação do volume do tanque de armazenamento foi selecionado o coletor solar de área 4 m². As análises da variação da fração solar com volume do tanque são apresentadas na próxima secção.

6.2. Volume do tanque de armazenamento

As frações solares para diferentes valores do volume do tanque de armazenamento são apresentadas na tabela 17. O volume do tanque foi variado de 150 litros até 500 litros. Neste intervalo foi analisado o comportamento da variação da fração solar mostrado no gráfico da figura 29.

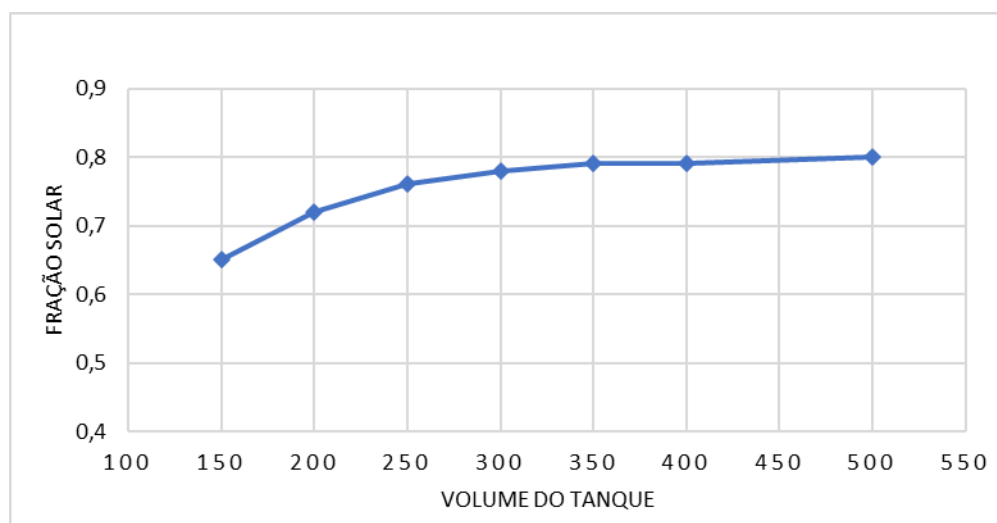


Figura 29. Fração solar como função do volume do tanque de armazenamento.

A área do coletor solar considerado para análise da variação da fração solar em função do volume do tanque de armazenamento é 4 m². A variação da fração solar em função do volume do tanque têm um comportamento similar em relação a variação em função da área do coletor. No intervalo de 150 litros até 300 litros a fração solar tem uma variação significativa e de 300 a 500 litros a fração solar têm relativamente variações menores. Variando o volume do tanque de 150 litros para 300 litros a fração solar registou um aumento de 20% e de 300 litros para 500 litros a variação da fração foi de somente 2.6%.

6.3. Potência do elemento aquecedor

Os valores das frações solares para diferentes potências são apresentados na tabela 17. A potência do elemento aquecedor é variado de 2 kW até 6 kW. Comparativamente aos parâmetros área do coletor e volume do tanque de armazenamento, a variação da fração é menos sensível à variação da potência do elemento aquecedor. Diferente dos aumentos das frações solares que se verificavam com o aumento da área do coletor solar ou do volume do tanque de armazenamento, a fração solar diminui com o aumento do valor da potencia do elemento aquecedor como mostra a fig. 30.

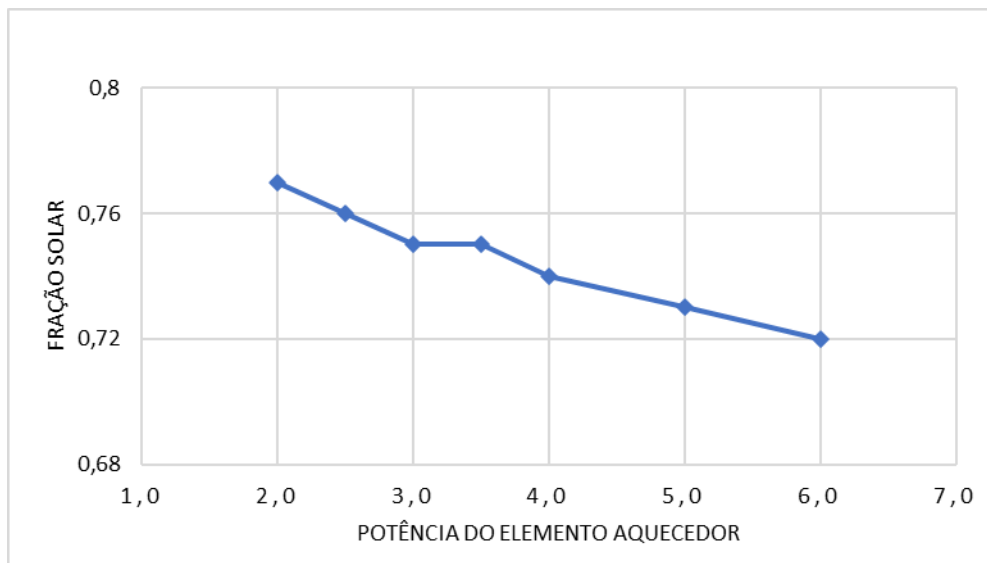


Figura 30. Fração solar como função da potência do elemento aquecedor.

Como pode ver-se no gráfico, para alguns valores da potência, como no intervalo de 3,0 kW à 3,5 kW, a fração solar mantém-se quase inalterada. De 2 kW até 6 kW a fração solar diminui apenas em 6%.

O valor ótimo da potência de elemento aquecedor considerado foi de 2.0 kW, e o valor da fração solar para o valor da potência é de 77%.

6.4. Comparação entre o aquecedor elétrico e o aquecedor solar otimizado

A partir do processo de otimização do sistema solar foram determinados valores ótimos dos parâmetros área do coletor solar, volume do tanque de armazenamento e potência do elemento aquecedor. As características do modelo do sistema solar com os valores ótimos são apresentadas na tabela 18. Os resultados das simulações obtidas do sistema solar otimizado são comparados com o aquecedor elétrico.

Tabela 18. Parâmetros de aquecedor solar otimizado

| Parâmetros do Sistema | Valores |
|-----------------------------|------------------------|
| Coletor solar | |
| Tipo | placa plana |
| Área | 4.0 m ² |
| Consumo de AQS | |
| Consumo diário | 200 l/d |
| Temperatura de consumo | 60 C |
| Tanque | |
| Volume | 250 l |
| Altura | 1.57 |
| Perdas térmicas | 0.7 W/m ² K |
| Potência elemento aquecedor | 2.0 kW |
| Fluido térmico | |
| Calor específico | 4.19 kJ/kg K |
| Densidade | 1000 kg/m ³ |
| Condutividade térmica | 2.22J/hr m K |

Os valores dos consumos de energia, custos de energia e emissões de CO₂ do aquecedor solar e elétrico são apresentados na tabela 19.

Tabela 19. Comparação entre aquecedor elétrico e aquecedor solar otimizado

| | Consumos de energia [kWh/ano] | Custos de energia [USD/ano] | Emissões de CO ₂ [kgCO ₂ eq/ano] |
|--------------------|----------------------------------|--------------------------------|---|
| Aquecedor elétrico | 5443 | 620,50 | 381,01 |
| Aquecedor solar | 785 | 89,49 | 54,95 |

O sistema otimizado reduziria o consumo anual para 785 kWh. Uma redução de 322 kWh/ano em relação ao sistema solar não otimizado que consumia 1107 kWh/ano de energia elétrica. Em relação ao consumo de energia do aquecedor elétrico esta redução representa um aumento de economia diária de 11,9 kWh para 12,9 kWh. Desta forma o aquecedor solar reduz os consumos de energia anualmente em 86% em relação ao aquecedor elétrico. O aquecedor solar não otimizado reduziu os consumos de energia em 80% em relação aos consumos de aquecedor elétrico tendo uma cobertura solar de 72% e com a otimização do sistema solar a cobertura solar do sistema passou para 77% e a redução do consumo de energia em relação ao aquecedor elétrico passou para 86%.

Os custos de energia reduziram de 126,50 USD/ano para 89,49 USD/ano com a otimização do sistema solar, uma redução equivalente à 30% em relação aos custos de energia de sistema não otimizado. Esta redução com a otimização do sistema solar significou uma redução de 86% em relação ao sistema convencional.

A otimização do sistema solar também reduziu as emissões de GEE. O sistema otimizado reduz as emissões em 86% equivalentes a uma de redução de 326,06 kgCO₂eq/ano.

Quadro resumo dos sistemas de AQS

A tabela 20 apresenta uma síntese dos custos e poupanças dos sistemas analisados. Os valores são referentes aos consumos energéticos anuais, os custos energéticos anuais e os custos de capital para os sistemas convencional, solar e solar otimizado. Os valores apresentados na tabela 20 são relativos ao local de estudo e através deles foi obtido o payback do sistema solar não otimizado apresentado na secção 5.2.

Tabela 20. Síntese dos sistemas de AQS.

| | Sistema convencional de AQS | Sistema solar de AQS | Sistema solar de AQS otimizado |
|----------------------------|-----------------------------|----------------------|--------------------------------|
| Custos de capital [USD] | 585,54 | 3378,38 | 3783,78 |
| Consumos energéticos [kWh] | 5443 | 1107 | 785 |
| Custos energéticos [USD] | 620,5 | 126,2 | 89,5 |

7. Conclusão

O aproveitamento da energia solar na produção de AQS apresenta benefícios a diferentes níveis que incluem a economia energética, a redução dos impactos ambientais, e custos de operação. O presente trabalho tinha como objetivo avaliar os contributos de utilização de energia solar na produção de AQS através da simulação e comparação dos resultados de modelos de sistema convencional e sistema solar. O sistema solar foi otimizado usando a fração solar como parâmetro de otimização de modo a avaliar o impacto da melhoria do desempenho do sistema solar nos consumos de energia elétrica, custos de energia e emissões de GEE em relação ao sistema convencional. Os resultados permitiram concluir:

- O sistema convencional de AQS consome significativamente energia elétrica em relação ao sistema solar de AQS, consumindo cerca de cinco vezes mais energia elétrica em comparação com o sistema solar.
- O sistema solar proporcionou uma redução de cerca de 80% de consumo de energia elétrica em relação ao sistema convencional.
- A economia da energia elétrica com a introdução do sistema solar, oferece não só benefícios na redução dos custos de energia, também reduz as emissões de GEE. As reduções de custos e de emissões foram de 80%.
- O período de retorno simples (*payback*) com o investimento e implementação do sistema solar seria de 6,8 anos
- O desempenho do sistema solar, definido com a fração solar do sistema, está diretamente relacionado com consumos de energia elétrica e consequentemente a economia de consumo em relação ao sistema convencional. Portanto, quanto maior o valor da fração solar, maior será a percentagem de consumo evitado de energia elétrica.
- Os parâmetros área do coletor solar, volume do tanque de armazenamento e potência do elemento aquecedor foram otimizados, tendo os resultados mostrado que a área do coletor é o parâmetro mais sensível na variação da fração solar do sistema.
- Os resultados mostraram que, para os valores relativamente menores de área de coletor a fração solar varia significativamente. Por exemplo, a variação da área de 3 m² para 5 m², a fração solar aumenta em 32% neste intervalo. No intervalo de 5 m² a 8 m² a fração solar aumenta apenas em 8%.
- A variação da fração solar em função do volume do tanque têm um comportamento similar em relação a variação em função da área do coletor. Variando o volume do tanque de 150 litros para 300 litros a fração solar registou um aumento em 20% e de 300 litros para 500 litros a variação da fração foi de somente 2.6%.
- Diferente dos aumentos da frações solares que se verificam com o aumento da área do coletor solar ou do volume do tanque de armazenamento, a fração solar diminui com o aumento do valor da potencia do elemento aquecedor.
- O sistema otimizado, com desempenho melhorado, proporcionou uma redução ainda maior nos consumos de energia elétrica, custos de energia e emissões de GEE, equivalentes em 86% em relação ao aquecedor elétrico.

7.1. Limitações do trabalho

Na análise financeira, os custos de investimentos foram obtidos através do gerador de preços. Esta plataforma apresenta poucas opções de sistemas no local de estudo, portanto os preços podem não ser muito precisos, sendo desse modo preços estimados.

7.2. Sugestões para trabalhos futuros

Antes de abordar sugestões específicas, o facto de ter encontrado poucos estudos no local em que se baseou o presente trabalho, é importante enfatizar a necessidade de muitos estudos dessa natureza. Isto ajudaria na penetração dos sistemas solares térmicos no mercado local.

O perfil de consumo foi baseado em poucos estudos locais e alguns estudos de outros países da região. Uma vez que os perfis de consumos influenciam significativamente os consumos de energia, seria importante conduzir muitos estudos sobre os perfis de consumo de modo a determinar-se perfis de consumo típicos do local para resultados mais precisos.

Os poucos estudos que foram encontrados sobre os consumos de AQS estão voltados para o consumo doméstico, portanto seria importante estudos dos sistemas de AQS nos edifícios de serviços e comerciais. Nos edifícios comerciais seria importante fazer estudos de melhoria de desempenho dos sistemas de AQS e a transição para sistemas solares de modo maximizar os custos benefícios destes sistemas.

Referências

- [1] İ. Dinçer and C. Zamfirescu, “Energy and Environment Perspectives,” in *Sustainable Energy Systems and Applications*, Boston, MA: Springer US, 2011, pp. 51–91.
- [2] United Nations: Department of Economics and Social Affairs, “World Population Prospects 2019: Highlights.” [Online]. Available: <https://www.un.org/development/desa/publications/world-population-prospects-2019-highlights.html>. [Accessed: 19-Sep-2020].
- [3] International Energy Agency (IEA)., “World Energy Balances: Overview,” 05-Nov-2020. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview#world>. [Accessed: 05-Nov-2020].
- [4] International Energy Agency (IEA)., “Data & Publications.” [Online]. Available: <https://webstore.iea.org/global-energy-co2-status-report-2018>. [Accessed: 07-Oct-2020].
- [5] International Energy Agency (IEA)., “Heat - Renewables 2019.” [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/renewables-2019/heat>. [Accessed: 07-Oct-2020].
- [6] N. L. Panwar, S. C. Kaushik, and S. Kothari, “Role of renewable energy sources in environmental protection: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 3, pp. 1513–1524, 2011.
- [7] S. Teske, S. Sawyer, and O. Schafer, “Energy [r]evolution: a sustainable world energy outlook 2015,” 2015.
- [8] V. Devabhaktuni, M. Alam, S. Shekara Sreenadh Reddy Depuru, R. C. Green, D. Nims, and C. Near, “Solar energy: Trends and enabling technologies,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 19, pp. 555–564, 2013.
- [9] B. Schlamadinger *et al.*, “Towards a standard methodology for greenhouse gas balances of bioenergy systems in comparison with fossil energy systems,” vol. 13, no. 6, pp. 359–375, 1997.
- [10] N. Kannan and D. Vakeesan, “Solar energy for future world: - A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 62, pp. 1092–1105, 2016.
- [11] A. Shahsavari and M. Akbari, “Potential of solar energy in developing countries for reducing energy-related emissions,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 90, no. June 2017, pp. 275–291, 2018.
- [12] SUNWATER, “Solar thermal environmental benefits,” 10-Nov-2020. [Online]. Available: sunwatersolar.com/solar-thermal/environmental-benifits. [Accessed: 10-Nov-2020].
- [13] J. A. Rosas-Flores, D. Rosas-Flores, and J. L. Fernández Zayas, “Potential energy saving in urban and rural households of Mexico by use of solar water heaters, using geographical information system,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 53, pp. 243–252, 2016.
- [14] Associação Lusófona de Energias Renováveis, “Energias renováveis em Moçambique,” 2017.

- [15] Electricidade de Moçambique, “Annual Report,” 2019 [Online]. Available: <https://www.edm.co.mz/en/document/reports-reports-and-accounts/relat%C3%B3rio-e-contas-de-2019-0>
- [16] U. S. Energy Information Administration, “International Energy Outlook,” 2016 [Online]. Available: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1296780>
- [17] C. Artur, D. Neves, B. C. Cuamba, and A. J. Leão, “Comparison of two dynamic approaches to modelling solar thermal systems for domestic hot water,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 30, no. September 2017, pp. 292–303, 2018.
- [18] Grupo do Banco Africano de Desenvolvimento, “Resumo dos Resultados,” 2018 [Online]. Available: https://www.afdb.org/fileadmin/uploads/afdb/Documents/Project-and-Operations/CRB_Mozambique-Pr.pdf
- [19] G. Mahumane and P. Mulder, “Mozambique Energy Outlook, 2015-2030. Data, Scenarios and Policy Implications.” 2015 [Online]. Available: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2644144
- [20] C. Artur, D. Neves, B. C. Cuamba, and A. J. Leão, “Domestic hot water technology transition for solar thermal systems : An assessment for the urban areas of Maputo city , Mozambique,” vol. 260, 2020.
- [21] Direção-Geral de Energia e Geologia, “Utilização de Colectores Solares para Aquecimento de Água no Sector Doméstico.” 2003.
- [22] F. Arthur, F. Cumbe, G. Nhumaio, and A. Saide, “Solar Thermal Technology Roadmap for Mozambique.” pp. 1–27, 2015.
- [23] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*. 2013.
- [24] Y. Goswami, *Principles of Solar Engineering*, Third edit. Taylor & Francis Group, 2015.
- [25] J. Chen, *Physics of Solar Energy*. John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [26] SIMSCALE, “What Is Heat Transfer?,” 07-Nov-2020. [Online]. Available: <https://www.simscale.com/docs/simwiki/heat-transfer-thermal-analysis/what-is-heat-transfer/>. [Accessed: 07-Nov-2020].
- [27] L. Evangelisti, R. D. L. Vollaro, and F. Asdrubali, “Latest advances on solar thermal collectors : A comprehensive review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 114, no. August, p. 109318, 2019.
- [28] P. M. da S. Lourenço, “Modelação de Coletores Solares Térmicos,” Master’s thesis, Universidade de Lisboa, Repositório da Universidade de Lisboa, 2012.
- [29] S. A. Kalogirou, *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. 2014.
- [30] J. Kim, H. Y. Kwak, and D. W. Lee, “An analytical study on the thermal characteristics of flat-plate and evacuated solar collectors,” *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 21, no. 12, pp. 2159–2167, 2007.
- [31] S. A. Kalogirou, *Solar thermal collectors and applications*, vol. 30, no. 3. 2004.

- [32] PAKSOLAR RENEWABLE ENERGY, “Solar Heat Collector: Flate plate solar collectors,” 09-Oct-2020. [Online]. Available: <http://www.paksolarservices.com/solar-heat-collector.html>. [Accessed: 09-Oct-2020].
- [33] C. Jiang *et al.*, “A review of the compound parabolic concentrator (CPC) with a tubular absorber,” *Energies*, vol. 13, no. 3, 2020.
- [34] P. C. Eames and B. Norton, “Thermal and optical consequences of the introduction of baffles into compound parabolic concentrating solar energy collector cavities,” *Sol. Energy*, vol. 55, no. 2, pp. 139–150, 1995.
- [35] A. G. Hortelano, “Water Heating System: Application in an apartment building,” Master’s thesis, Tampere University of Technology, Tampere University of Technology, 2011.
- [36] Y. P. Chandra and T. Matuska, “Stratification analysis of domestic hot water storage tanks: A comprehensive review,” *Energy Build.*, vol. 187, pp. 110–131, 2019.
- [37] S. H. Li, Y. X. Zhang, Y. Li, and X. S. Zhang, “Experimental study of inlet structure on the discharging performance of a solar water storage tank,” *Energy Build.*, vol. 70, pp. 490–496, 2014.
- [38] S. Ievers and W. Lin, “Numerical simulation of three-dimensional flow dynamics in a hot water storage tank,” *Appl. Energy*, vol. 86, no. 12, pp. 2604–2614, 2009.
- [39] R. O’Hegarty, O. Kinnane, and S. McCormack, “A simplified procedure for sizing solar thermal systems; Based on national assessment methods in the UK and Ireland,” *Energy Procedia*, vol. 62, pp. 647–655, 2014.
- [40] B. Ramlow and B. Nusz, *Solar Water Heating*, vol. 53, no. 9. 2010.
- [41] A. Hobbi and K. Siddiqui, “Optimal design of a forced circulation solar water heating system for a residential unit in cold climate using TRNSYS,” *Sol. Energy*, vol. 83, no. 5, pp. 700–714, 2009.
- [42] AEE – Institute for Sustainable Technologies, “DIMENSIONING AND DESIGN OF SOLAR THERMAL SYSTEMS.” [Online]. Available: [http://academic.sun.ac.za/crses/Dimensioning of ST Systems.pdf](http://academic.sun.ac.za/crses/Dimensioning%20of%20ST%20Systems.pdf). [Accessed: 02-Nov-2020].
- [43] POPULAR MECHANICS, “How a Water Heater Works,” 2020. [Online]. Available: <https://www.popularmechanics.com/home/a28690395/water-heaters/>. [Accessed: 29-Sep-2020].
- [44] P. A. Hohne, K. Kusakana, and B. P. Numbi, “A review of water heating technologies: An application to the South African context,” *Energy Reports*, vol. 5, pp. 1–19, 2019.
- [45] J. D. Lutz, G. Klein, D. Springer, and B. D. Howard, “Residential Hot Water Distribution Systems : Roundtable Session,” *Energy*, pp. 131–144, 2002.
- [46] D. S. Sowmy and R. T. A. Prado, “Assessment of energy efficiency in electric storage water heaters,” *Energy Build.*, vol. 40, no. 12, pp. 2128–2132, 2008.

- [47] S. Wong, W. Muneer, S. Nazir, and A. Prieur, “Designing , Operating , and Simulating Electric Water Heater Populations for the Smart Grid,” 2013.
- [48] Y. Allard *et al.*, “Intermodel comparison and experimental validation of electrical water heater models in TRNSYS,” *Proc. buildong Simul.*, no. November 2011, 2011.
- [49] Davis Energy Group and Gas Technology Institute, “Water Heating Design Guide,” 2012.
- [50] R. L. Shrivastava, V. Kumar, and S. P. Untawale, “Modeling and simulation of solar water heater: A TRNSYS perspective,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 67, pp. 126–143, 2017.
- [51] S. A. Kalogirou and C. Papamarcou, “Modelling of a thermosyphon solar water heating system and simple model validation,” *Renew. Energy*, vol. 21, no. 3–4, pp. 471–493, 2000.
- [52] M. J. R. Abdunnabia, K. M. A. Alakder, N. A. Alkishriwi, and S. M. Abughres, “Experimental validation of forced circulation of solar water heating systems in TRNSYS,” *Energy Procedia*, vol. 57, pp. 2477–2486, 2014.
- [53] H. Cassard, P. Denholm, and S. Ong, “Technical and economic performance of residential solar water heating in the United States,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 8, pp. 3789–3800, 2011.
- [54] S. Kalogirou, “Thermal performance, economic and environmental life cycle analysis of thermosiphon solar water heaters,” *Sol. Energy*, vol. 83, no. 1, pp. 39–48, 2009.
- [55] M. Kakaza and K. Folly, “Effect of solar water heating system in reducing household energy consumption,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 30, pp. 468–472, 2015.
- [56] B. Perers and C. Bales, “A Solar collector model for TRNSYS simulation and system testing,” *IEA SHC Task*, no. December, p. 12, 2002.
- [57] NASA, “NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources: The power project,” 2020. [Online]. Available: <https://power.larc.nasa.gov/>. [Accessed: 05-Oct-2020].
- [58] F. Arthur, F. Cumbe, G. Nhumaio, and A. Saide, “Solar Thermal Technology Roadmap for Mozambique,” 2015. [Online]. Available: https://www.aler-renovaveis.org/contents/files/solar-thermal-roadmap_mozambique.pdf. [Accessed: 18-Sep-2020].
- [59] B. C. Cuamba, M. L. Chenene, G. Mahumane, D. Z. Quissico, J. Lovseth, and P. O’Keefe, “A solar energy resources assessment in Mozambique,” *J. Energy South. Africa*, vol. 17, no. 4, pp. 76–85, 2006.
- [60] E. Fuentes, L. Arce, and J. Salom, “A review of domestic hot water consumption profiles for application in systems and buildings energy performance analysis,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, no. April 2017, pp. 1530–1547, 2018.
- [61] E. Fuentes, L. Arce, and J. Salom, “A review of domestic hot water consumption profiles for application in systems and buildings energy performance analysis,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, no. February 2017, pp. 1530–1547, 2018.
- [62] J. P. Meyer and M. Tshimankinda, “Domestic Hot Water Consumption by Developing Communities in South African Traditional Houses,” vol. 21, no. 12, pp. 1101–1106, 1996.

- [63] Electricidade de Moçambique, “Tarifário de Energia Eléctrica.” [Online]. Available: <https://portal.edm.co.mz/pt/website/page/tarifário-de-energia-eléctrica>. [Accessed: 01-Dec-2020].
- [64] International Energy Agency (IEA)., “Data and statistics.” [Online]. Available: www.iea.org/statistics/?country¼MOZ&isISO¼true.. [Accessed: 02-Dec-2020].
- [65] “Putting a Price on Carbon with a Tax.” [Online]. Available: https://www.worldbank.org/content/dam/Worldbank/document/Climate/background-note_carbon-tax.pdf

Apêndice A - Consumos de energia dos sistemas de AQS

A.1 – Consumos de aquecedor elétrico de AQS

qload – Carga de consumo [kJ]

qAux – Consumo de energia elétrica [kJ]

qTankLoss – Perdas no tanque [kJ]

| Month | qLoad | qAux | qTankLoss |
|-----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| January | +0.1802140340769359E+007 | +0.1680750000000000E+007 | +0.6507510558610867E+005 |
| February | +0.1629286901999650E+007 | +0.1501875000000000E+007 | +0.5897626809328874E+005 |
| March | +0.1803881850203621E+007 | +0.1661625000000000E+007 | +0.6528831105506451E+005 |
| April | +0.1745668546823282E+007 | +0.1608750000000000E+007 | +0.6318457949698422E+005 |
| May | +0.1803836888266575E+007 | +0.1662750000000000E+007 | +0.6528915934259938E+005 |
| June | +0.1745668546823282E+007 | +0.1608750000000000E+007 | +0.6318457949698420E+005 |
| July | +0.1803853756681979E+007 | +0.1662750000000000E+007 | +0.6529472604298719E+005 |
| August | +0.1803881850203621E+007 | +0.1661625000000000E+007 | +0.6528831105506451E+005 |
| September | +0.1745668546823282E+007 | +0.1608750000000000E+007 | +0.6318457949698422E+005 |
| October | +0.1803836888266575E+007 | +0.1662750000000000E+007 | +0.6528915934259938E+005 |
| November | +0.1745668546823282E+007 | +0.1608750000000000E+007 | +0.6318457949698420E+005 |
| December | +0.1803853756681979E+007 | +0.1662750000000000E+007 | +0.6529472604298719E+005 |

A.2 – Consumos de aquecedor solar de AQS

qload – Carga de consumo [kJ]

qUseful – Ganho de energia útil no coletor [kJ]

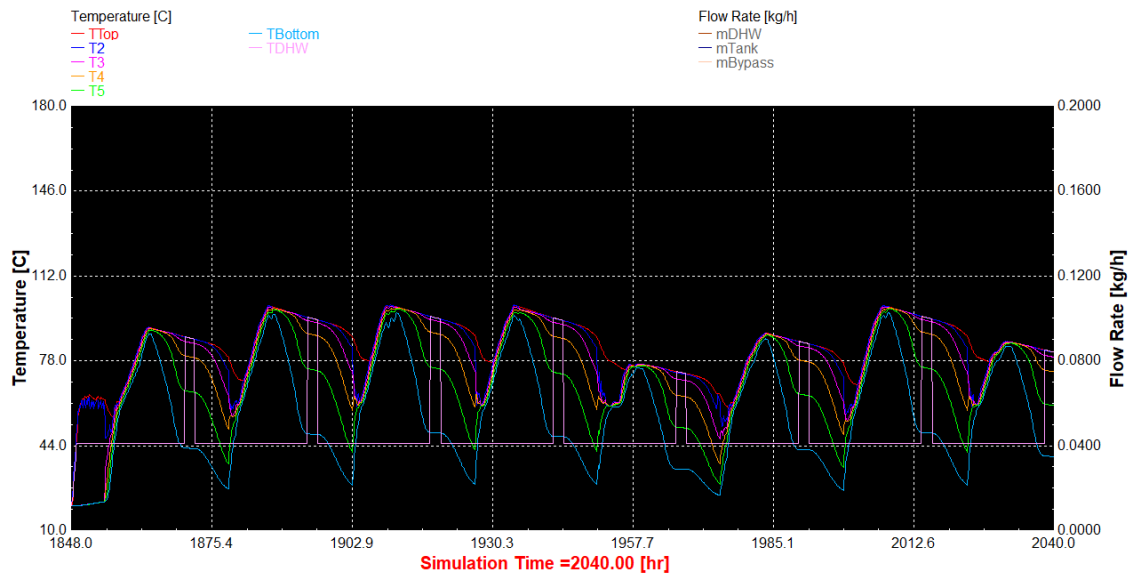
qAux – Consumo de energia elétrica [kJ]

qTankLoss – Perdas no tanque [kJ]

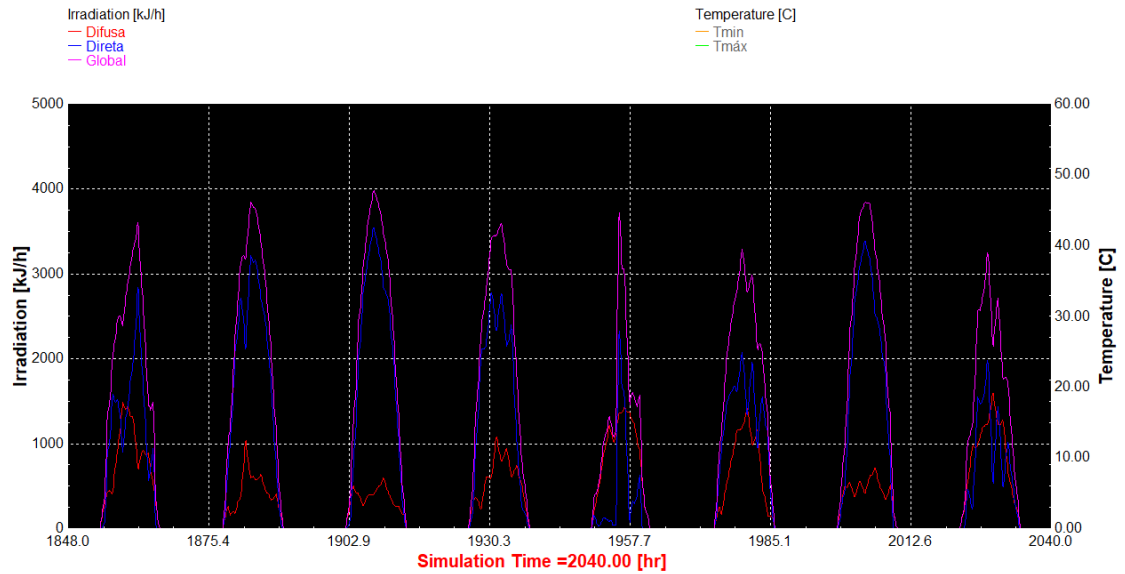
| Month | qLoad | qUseful | qAux | qTankLoss |
|-----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| January | +0.1028630293841056E+007 | +0.9609435071825846E+006 | +0.3071250000000000E+006 | +0.2168413112913070E+006 |
| February | +0.9291766920995759E+006 | +0.8906370291073795E+006 | +0.2385000000000000E+006 | +0.2020565393666197E+006 |
| March | +0.1028741671204256E+007 | +0.9643674074988290E+006 | +0.2407500000000000E+006 | +0.2206750199665354E+006 |
| April | +0.9955730472978504E+006 | +0.8709851280813587E+006 | +0.3318750000000000E+006 | +0.1991149168389388E+006 |
| May | +0.1028761447753865E+007 | +0.8664046643282502E+006 | +0.3296250000000000E+006 | +0.1963987067887491E+006 |
| June | +0.9955699182409722E+006 | +0.8084173754878326E+006 | +0.3622500000000000E+006 | +0.1841033732823271E+006 |
| July | +0.1028751690068653E+007 | +0.8360054714014684E+006 | +0.3768750000000000E+006 | +0.1933797534114755E+006 |
| August | +0.1028757176904731E+007 | +0.8686119355640145E+006 | +0.3487500000000000E+006 | +0.1982695234619761E+006 |
| September | +0.9955636695268065E+006 | +0.7954705875237409E+006 | +0.3678750000000000E+006 | +0.1924409054784559E+006 |
| October | +0.1028742134078527E+007 | +0.8053570871967922E+006 | +0.4016250000000000E+006 | +0.1966907023229910E+006 |
| November | +0.9955544807304033E+006 | +0.7724940009479444E+006 | +0.3937500000000000E+006 | +0.1891886812223858E+006 |
| December | +0.1028734393336064E+007 | +0.9285686434123821E+006 | +0.2868750000000000E+006 | +0.2129691467337821E+006 |

Apêndice B – Gráficos de temperatura no tanque e radiação solar num período típico de verão e inverno.

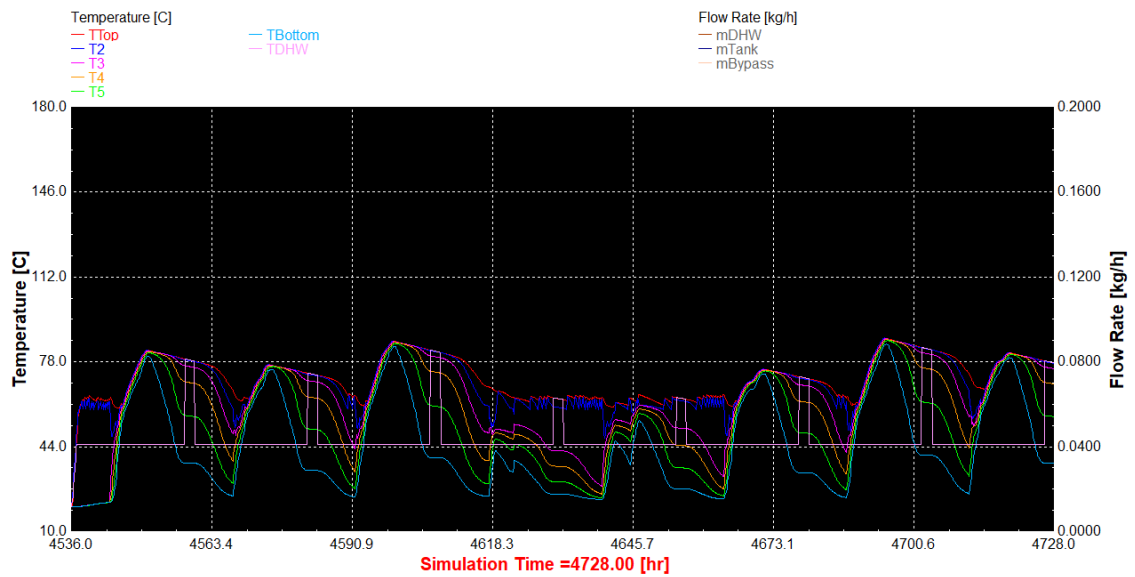
B.1 – Temperaturas no tanque de armazenamento do sistema solar de AQS (16 a 26 de Março)



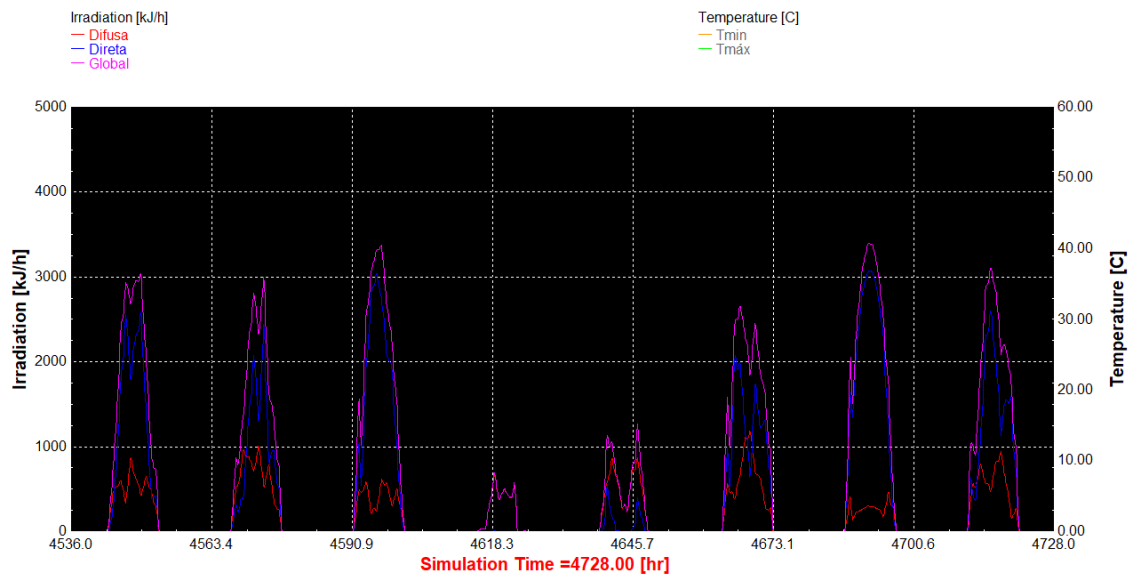
B.2. Radiação solar difusa, direta e global (16 a 26 de Março)



B.3 – Temperaturas no tanque de armazenamento do sistema solar de AQS (09 a 16 de Julho)



B.4. Radiação solar difusa, direta e global (09 a 16 de Julho)



Anexo – Tarifários de energia elétrica

Tarifário de Energia Elétrica

CATEGORIAS TARIFÁRIAS: Social, Doméstica, Agrícola e Geral (Baixa Tensão)

| Consumos Registrados (kWh) | PREÇO DE VENDA POR CATEGORIA TARIFÁRIA | | | | Taxa fixa (Mt) |
|----------------------------|--|---------------------------|-------------------------|----------------------|----------------|
| | Tarifa Social (MT/kWh) | Tarifa Doméstica (MT/kWh) | Tarifa Agrícola (Mt/kW) | Tarifa Geral (Mt/kW) | |
| De 0 a 125 | 1.07 | | | | |
| De 0 a 300 | | 6.63 | 4.08 | 10.30 | 257.97 |
| De 301 a 500 | | 9.39 | 5.81 | 14.71 | 257.97 |
| Superior a 500 | | 9.85 | 6.39 | 16.10 | 257.97 |
| Pré-pagamento | 1.07 | 8.44 | 5.65 | 14.75 | |

Nota: Para os clientes que se enquadrarem nos parâmetros definidos para a tarifa social (potência de 1.1 KVA e consumo não superior a 125kWh/mês), cujas instalações usam o contador do tipo Pré-pagamento (CREDELEC), será fixado um limite de corrente de 5 Amperes