



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR

CENTRO REGIONAL DE CIÊNCIAS NUCLEARES DO NORDESTE

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS ENERGÉTICAS E
NUCLEARES

CLÉRISTON MOURA VIEIRA JÚNIOR

**DESSALINIZAÇÃO SOLAR, GEOTÉRMICA E HÍBRIDA: ESTRATÉGIAS
SUSTENTÁVEIS PARA O ABASTECIMENTO DE ÁGUA NO AGRESTE
PERNAMBUCANO**

Recife

2025

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Vieira Júnior, Clérison Moura.

Dessalinização solar, geotérmica e híbrida: estratégias sustentáveis para o abastecimento de água no agreste pernambucano / Clérison Moura Vieira Júnior. - Recife, 2025. 164f.: il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2025.

Orientação: Antônio Celso Dantas Antonino.

Coorientação: José Romualdo de Sousa Lima.

Inclui referências.

1. Recursos hídricos; 2. Energias renováveis; 3. Sistemas híbridos; 4. Desenvolvimento sustentável; 5. Agreste brasileiro. I. Antonino, Antônio Celso Dantas. II. Lima, José Romualdo de Sousa. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

CLÉRISTON MOURA VIEIRA JÚNIOR

**DESSALINIZAÇÃO GEOTÉRMICA, SOLAR E HÍBRIDA: ESTRATÉGIAS
SUSTENTÁVEIS PARA O ABASTECIMENTO DE ÁGUA NO AGRESTE
PERNAMBUCANO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Tecnologias Energéticas e Nucleares. Área de concentração: Aplicações de Radioisótopos na Agricultura e Meio-Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Celso Dantas Antonino

Coorientador: Prof. Dr. José Romualdo de Sousa Lima

Recife

2025

CLÉRISTON MOURA VIEIRA JÚNIOR

**DESSALINIZAÇÃO SOLAR, GEOTÉRMICA E HÍBRIDA: ESTRATÉGIAS
SUSTENTÁVEIS PARA O ABASTECIMENTO DE ÁGUA NO AGRESTE
PERNAMBUCANO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Tecnologias Energéticas e Nucleares. Área de concentração: Aplicações de Radioisótopos na Agricultura e Meio-Ambiente.

Aprovado em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Antônio Celso Dantas Antonino (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

Prof. Dr. Carlos Brayner de Oliveira Lira (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

Prof. Dr. Daniel González Rodríguez (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

Prof. Dr. Milian Pérez (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

Profa. Dra. Lorena Barros Guimarães (Examinador Externo)
Universidade de Pernambuco – UPE

Dedico este trabalho a todos que acreditaram em mim e me apoiaram ao longo da jornada, tornando possível a conquista deste marco tão especial em minha vida.

AGRADECIMENTOS

A conclusão desta tese marca não apenas o término de uma jornada acadêmica, mas também a concretização de um sonho construído com esforço, perseverança e, acima de tudo, com o apoio inestimável de muitas pessoas e instituições. Este trabalho reflete a soma de aprendizados, desafios superados e contribuições que fizeram deste caminho uma experiência enriquecedora e transformadora.

À Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), pela excelência no ensino público e gratuito, que proporciona a tantos a oportunidade de transformar suas vidas por meio do conhecimento. Sou grato por fazer parte dessa instituição que valoriza a ciência e a educação.

Aos meus pais, Clériston Vieira e Rosana Vieira, pelo amor incondicional, pelo suporte em todos os momentos e pelo cuidado que me sustentou ao longo da vida. Vocês são minha base e minha maior inspiração. Aos demais familiares, pelo carinho, compreensão e atenção em todas as etapas deste percurso.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Antônio Celso Dantas Antonino, pela confiança depositada em mim, pela paciência em momentos desafiadores e pelo zelo e dedicação com que guiou minha pesquisa. Sua sabedoria foi crucial para a realização deste trabalho.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. José Romualdo de Sousa Lima, pelo compartilhamento generoso de seu vasto conhecimento.

Ao comitê de acompanhamento, composto por Dr. Alcides Codeceira, Dr. Daniel González, Dra. Lorena Guimarães, Dr. Mário Augusto e Dr. Rodolfo Marcondes, por suas valiosas contribuições, críticas construtivas e direcionamentos que enriqueceram este trabalho.

Aos professores Dr. Luis Árturo, Dr. Deivson Sales e Dr. Sérgio Pees, por sempre estarem dispostos a esclarecer dúvidas e compartilhar seus conhecimentos de forma tão generosa. Suas orientações foram fundamentais para superar muitos desafios.

Aos meus colegas e amigos das diversas etapas dessa caminhada: da UFPE, da UPE, da HOTV, DNOCS e tantos outros que, de alguma forma, contribuíram com palavras de incentivo, parcerias de pesquisa ou momentos de descontração. Em especial, agradeço a Thiago Vieira, Giovana Barbosa, Eduardo Brito, Pedro Henrique, Isabella Garret, cuja amizade e apoio foram essenciais para que eu continuasse firme.

Aos professores do PROTEN – UFPE, que com dedicação e empenho fazem deste curso uma referência de excelência. Vocês são exemplos de que a educação transforma e inspira.

Por fim, a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, seja com palavras de apoio, incentivos ou contribuições técnicas e acadêmicas. Este trabalho é tão meu quanto de todos vocês que me ajudaram ao longo dessa jornada.

Meu mais sincero agradecimento a todos.

“O otimista é um tolo. O pessimista, um chato. Bom mesmo é ser um realista esperançoso.”

Ariano Suassuna

RESUMO

O agreste pernambucano, uma das regiões mais severamente impactadas pela falta de água no Brasil, enfrenta desafios ambientais e climáticos que prejudicam o desenvolvimento socioambiental sustentável. Com pouca precipitação, elevada evaporação e chuvas irregulares, a região sofre com a escassez de recursos hídricos, o que limita o acesso das comunidades à água potável e prejudica a agricultura. As mudanças climáticas agravam essa situação, intensificando a ocorrência de secas. Embora o potencial hídrico subterrâneo da região seja significativo, a alta salinidade da água subterrânea devido à geologia cristalina da área torna a dessalinização uma alternativa crucial para aproveitamento desse recurso. O processo de dessalinização, utilizado em diversas regiões do mundo, é desafiador no agreste devido à elevada demanda energética, tradicionalmente dependente de combustíveis fósseis. Essa dependência também contribui para a emissão de gases de efeito estufa. Nesse cenário, a adoção de energias renováveis, como a solar e a geotérmica, surge como uma solução sustentável para processos de dessalinização. A energia solar, altamente abundante na região devido à intensa radiação solar, pode ser utilizada em tecnologias como a destilação. Além disso, a integração de fontes de energia renováveis em sistemas híbridos que combinem energia solar e geotérmica permite uma maior eficiência no aproveitamento dos recursos disponíveis. A utilização conjunta dessas tecnologias pode fornecer soluções otimizadas para suprir as necessidades de dessalinização, garantindo maior estabilidade operacional e reduzindo os impactos ambientais. Dessa forma, sistemas híbridos representam um avanço significativo na gestão de recursos hídricos para regiões com condições climáticas extremas, como o agreste pernambucano. Este estudo busca explorar a viabilidade desses sistemas no agreste pernambucano, fornecendo dados que possam embasar políticas públicas e estratégias de gestão hídrica sustentável, além de servir como modelo para outras regiões ao redor do mundo.

Palavras-chave: Recursos hídricos; Energias renováveis; Sistemas híbridos; Desenvolvimento sustentável; Agreste brasileiro.

ABSTRACT

The Agreste region of Pernambuco, one of the areas most severely affected by water scarcity in Brazil, faces environmental and climatic challenges that hinder sustainable socio-environmental development. With low precipitation, high evaporation rates, and irregular rainfall, the region struggles with the scarcity of water resources, limiting communities' access to potable water and harming agricultural activities. Climate change exacerbates this situation by intensifying the occurrence of droughts. Although the region has significant groundwater potential, the high salinity of groundwater due to the area's crystalline geology makes desalination a crucial alternative for utilizing this resource. Desalination, used in various regions around the world, presents challenges in the Agreste due to its high energy demand, which traditionally relies on fossil fuels. This dependency also contributes to greenhouse gas emissions. In this context, the adoption of renewable energies, such as solar and geothermal, emerges as a sustainable solution for desalination processes. Solar energy, which is highly abundant in the region due to intense solar radiation, can be harnessed in technologies such as distillation. Furthermore, the integration of renewable energy sources into hybrid systems combining solar and geothermal energy enables greater efficiency in resource utilization. The combined use of these technologies can provide optimized solutions to meet desalination needs, ensuring greater operational stability and reducing environmental impacts. Thus, hybrid systems represent a significant advancement in water resource management for regions with extreme climatic conditions, such as the Agreste of Pernambuco. This study aims to explore the feasibility of these systems in the Agreste region, providing data to support public policies and sustainable water management strategies, as well as serving as a model for other regions around the world.

Keywords: Water resources; Renewable energies; Hybrid systems; Sustainable development; Brazilian Agreste.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Radiação – São João	44
Figura 2 – Luminância – São João	45
Figura 3 – Temperatura – São João	46
Figura 4 – Precipitação – São João.....	46
Figura 5 – Umidade Relativa – São João	47
Figura 6 – Layout – Configuração I	52
Figura 7 – Configuração I – TRNSYS	53
Figura 8 – Layout – Configuração II.....	54
Figura 9 – Configuração II – TRNSYS	54
Figura 10 – Layout – Configuração III.....	55
Figura 11 – Configuração III – TRNSYS.....	55
Figura 12 – Layout – Configuração IV	56
Figura 13 – Configuração IV – TRNSYS	56
Figura 14 – Layout – Configuração V.....	57
Figura 15 – Configuração V - TRNSYS	57
Figura 16 – Layout – Configuração VI	58
Figura 17 – Configuração VI – TRNSYS	58
Figura 18 – Distribuição da temperatura do solo em função da profundidade	65
Figura 19 – SUF em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra.....	68
Figura 20 – FWP em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra.....	69
Figura 21 – GOR em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra	70
Figura 22 – MR em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra	71
Figura 23 – Energia no Coletor em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra.....	72
Figura 24 – Energia no Tanque em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra.....	73
Figura 25 – Energia no Coil em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra	74
Figura 26 – Produção Mensal de Água Dessalinizada por Área (Vazão de 100 kg/h de Água Salobra).....	75
Figura 27 – Produção de Água Dessalinizada por Área e Mês (Vazão de 100 kg/h de Água Salobra).....	76
Figura 28 – Produção de Água Dessalinizada por Área e Mês (Vazão de 150 kg/h de Água Salobra).....	77
Figura 29 – Produção Mensal de Água Dessalinizada por Área (Vazão de 150 kg/h de Água Salobra).....	78
Figura 30 – Produção de Água Dessalinizada por Área e Mês (Vazão de 200 kg/h de Água Salobra).....	79
Figura 31 – Produção Mensal de Água Dessalinizada por Área (Vazão de 200 kg/h de Água Salobra).....	80
Figura 32 – Fração Solar em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra	82
Figura 33 – SUF em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra.....	84
Figura 34 – FWP em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra.....	86
Figura 35 – GOR em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra	88

Figura 36 – MR em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra.....	89
Figura 37 – Energia no Coletor em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra.....	91
Figura 38 – Energia no Tanque em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra.....	92
Figura 39 – Energia no Aquecedor Auxiliar em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra	93
Figura 40 – Energia na Torre em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra	95
Figura 41 – Energia no Coil em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra	96
Figura 42 – Distribuição de Energia em Porcentagem por Área – 100 kg/h.....	97
Figura 43 – Distribuição de Energia em Porcentagem por Área – 150 kg/h.....	98
Figura 44 – Distribuição de Energia em Porcentagem por Área – 200 kg/h.....	99
Figura 45 – SUF em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra.....	100
Figura 46 – FWP em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra.....	101
Figura 47 – GOR em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra	102
Figura 48 – Energia no Coletor em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra.....	103
Figura 49 – Energia no Tanque em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra.....	104
Figura 50 – Energia na Torre em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra	105
Figura 51 – Energia no Coil em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra	106
Figura 52 – Produção Mensal de Água Dessalinizada por Área (Vazão de 100 kg/h de Água Salobra).....	107
Figura 53 – Produção Mensal de Água Dessalinizada por Área (Vazão de 150 kg/h de Água Salobra).....	108
Figura 54 – Produção Mensal de Água Dessalinizada por Área (Vazão de 200 kg/h de Água Salobra).....	109
Figura 55 – F_r em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra.....	110
Figura 56 – SUF em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra.....	111
Figura 57 – FWP em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra.....	112
Figura 58 – GOR em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra	113
Figura 59 – MR em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra.....	113
Figura 60 – Energia no Coletor em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra.....	114
Figura 61 – Energia no Tanque em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra.....	115
Figura 62 – Layout – Configuração VII.....	116
Figura 63 – SUF em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra.....	117
Figura 64 – FWP em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra.....	118
Figura 65 – GOR em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra	118
Figura 66 – MR em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra.....	119
Figura 67 – Energia no Coletor em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra.....	120

Figura 68 – Energia no Tanque em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra	120
Figura 69 – Energia na Torre em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra	121
Figura 70 – Energia no Coil em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra	122
Figura 71 – Produção Mensal de Água Dessalinizada por Área (Vazão de 100 kg/h de Água Salobra).....	123
Figura 72 – Produção Mensal de Água Dessalinizada por Área (Vazão de 150 kg/h de Água Salobra).....	124
Figura 73 – Produção Mensal de Água Dessalinizada por Área (Vazão de 200 kg/h de Água Salobra).....	126
Figura 74 –Layout – Configuração VIII.....	126
Figura 75 – F_r em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra.....	128
Figura 76 – SUF em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra.....	129
Figura 77 – FWP em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra.....	130
Figura 78 – GOR em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra	131
Figura 79 – MR em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra.....	132
Figura 80 – Energia no Coletor em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra.....	132
Figura 81 – Energia no Tanque em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra.....	133
Figura 82 – Energia no Aquecedor Auxiliar em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra	134
Figura 83 – Energia na Torre em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra	135
Figura 84 – Layout – Configuração IX	138
Figura 85 – Configuração IX – TRNSYS	138
Figura 86 – Variação da Temperatura do Solo com a Profundidade	140
Figura 87 –Variação da Temperatura do Solo ao Longo dos Meses por Profundidade.....	141
Figura 88 – Vazão de Água Dessalinizada ao Longo dos Meses para Diferentes Profundidades	143
Figura 89 – Produção Mensal de Água Dessalinizada (kg/mês) por Profundidade....	146

LISTA DE ABREVIATURAS

ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
BEN	Balanço Energético Nacional
ED	Eletrodíálise
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ETC	Coletor de Tubo Evacuado
FWP	<i>Feedwater Pump</i>
FV	Fotovoltaica
GSHP	Bomba de calor geotérmica
GOR	<i>Gain Output Ratio</i>
MED	Destilação de Efeito Múltiplo
MSF	Destilação Multiestágio
MVC	Vaporização por Compressão Mecânica
Mtep	Toneladas equivalentes de petróleo
NF	Nanofiltração
ONDACBC	Observatório Nacional da Dinâmica de Água e Carbono no Bioma Caatinga
OR	Osmose Reversa
TC	Trocador de Calor
TRNSYS	<i>Transient System Simulation</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1. OBJETIVO GERAL	19
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
1.3 ESTRUTURA DA TESE.....	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1. ESCASSEZ HÍDRICA	22
2.2. CONTEXTO REGIONAL: AGRESTE PERNAMBUCANO	22
2.3. MATRIZ ENERGÉTICA.....	23
2.4. DESSALINIZAÇÃO.....	25
2.5. PROPRIEDADES DO SOLO	32
2.5.1. Propriedades Térmicas do Solo	34
2.5.1.1. <i>Capacidade Térmica dos Solos</i>	36
2.5.1.2. <i>Difusividade Térmica dos Solos</i>	37
2.5.1.3. <i>Condutividade Térmica do Solo</i>	38
2.6. TRNSYS NA MODELAGEM DE SISTEMAS DE DESSALINIZAÇÃO SOLAR E GEOTÉRMICA.....	40
3. MATERIAL E METODOS	42
3.1. LOCALIDADE	42
3.2. DADOS CLIMÁTICOS	43
3.2.1. Radiação	43
3.2.2. Luminância	44
3.2.3. Temperatura	45
3.2.4. Precipitação	46
3.2.5. Umidade Relativa	47
3.3. DADOS DO SOLO	48
3.4. IMPACTO DO CLIMA E SOLO NAS TECNOLOGIAS DE DESSALINIZAÇÃO	48
3.5. CONFIGURAÇÕES DOS SISTEMAS DE DESSALINIZAÇÃO SOLAR .	49
3.5.1. Configuração I	51
3.5.2. Configuração II	53
3.5.3. Configuração III	54
3.5.4. Configuração IV	55

3.5.5.	Configuração V	56
3.5.6.	Configuração VI	57
3.6.	SISTEMA HÍBRIDO	66
4.1.	CONFIGURAÇÃO I	67
4.2.	CONFIGURAÇÃO II	80
4.3.	CONFIGURAÇÃO III	99
4.4.	CONFIGURAÇÃO IV	110
4.5.	DESSALINIZAÇÃO COM COLETOR DE TUBO EVACUADO	116
4.5.2.	Configuração VIII	126
4.6.	CONFIGURAÇÃO GEOTÉRMICA	138
4.7.	CONFIGURAÇÃO HÍBRIDA	144
5.	CONCLUSÃO	148
6.	TRABALHOS FUTUROS	150
	REFERÊNCIAS	151

1. INTRODUÇÃO

O Agreste pernambucano, região de transição entre a Zona da Mata e o Sertão, enfrenta desafios hídricos e climáticos que impactam seu desenvolvimento socioeconômico sustentável. Com precipitação média anual variando entre 550 e 700 mm, a distribuição irregular das chuvas, aliada a altas taxas de evaporação que podem atingir até 2.400 mm anuais em locais como Arcoverde, resulta em disponibilidade hídrica limitada, especialmente durante os períodos secos [1, 2].

A escassez de água é agravada pelas mudanças climáticas, que aumentam a frequência e intensidade das secas, elevando a vulnerabilidade das comunidades locais e comprometendo atividades econômicas, como a agricultura. Estudos indicam que, embora haja potencial para a exploração de águas subterrâneas, a predominância de formações geológicas cristalinas na região resulta em águas com elevados teores de sal, tornando-as inadequadas para consumo sem tratamento adequado [3].

Nesse contexto, a dessalinização de águas subterrâneas salobras surge como uma alternativa viável para suprir a demanda por água potável. Tecnologias como a osmose reversa têm sido implementadas em comunidades do semiárido brasileiro, incluindo o Agreste pernambucano, para tratar essas águas e torná-las adequadas ao consumo humano. Programas governamentais, como o Programa Água Doce, têm promovido a instalação e manutenção de sistemas de dessalinização, contribuindo para a segurança hídrica e melhoria da qualidade de vida das populações afetadas pela escassez de água [3].

A adoção de soluções sustentáveis, como a dessalinização, é essencial para enfrentar os desafios hídricos do Agreste pernambucano, garantindo o abastecimento de água e promovendo o desenvolvimento socioeconômico da região.

A dessalinização, processo de remoção de sais e outras impurezas da água, tem sido amplamente utilizada em diversas partes do mundo para fornecer água potável em regiões onde a água doce é escassa. No entanto, esse processo tradicionalmente depende de tecnologias que requerem grandes quantidades de energia, como a osmose reversa, o que pode ser um obstáculo significativo em regiões como o agreste pernambucano, onde o acesso à energia é limitado e os custos são elevados. Além disso, a dependência de fontes de energia convencionais, como combustíveis fósseis, não só aumenta os custos operacionais, mas também contribui para as emissões de gases de efeito estufa, exacerbando os impactos ambientais [4–6].

As mudanças climáticas impõem uma necessidade urgente de integrar fontes de energia renováveis, como a solar e geotérmica, na matriz energética, afastando-se dos combustíveis fósseis poluentes [7, 8]. A energia solar, particularmente, é uma das mais abundantes na região devido à elevada incidência de radiação solar ao longo do ano. A utilização dessa energia em processos de dessalinização oferece diversas vantagens, como a redução da dependência de combustíveis fósseis e a minimização dos impactos ambientais [7, 9, 10]. Tecnologias como a destilação solar e a osmose reversa alimentada por energia fotovoltaica são soluções que podem ser implementadas de maneira sustentável na região [11, 12]. A energia solar, portanto, contribui para a transição para uma matriz energética mais limpa e sustentável, alinhada às metas globais de descarbonização [4, 5, 13].

Entretanto, a dependência exclusiva da energia solar apresenta limitações, especialmente à noite ou em dias nublados, quando a radiação solar é insuficiente para manter a operação contínua dos sistemas de dessalinização. Nesse ponto, a energia geotérmica pode desempenhar um papel crucial. A energia geotérmica aproveita o calor natural armazenado no subsolo e pode ser usada tanto para aquecer a água quanto para gerar eletricidade. Sua estabilidade térmica e disponibilidade contínua tornam-na um complemento para a energia solar [14–16]. No semiárido pernambucano, onde as características geológicas indicam um potencial geotérmico promissor, a combinação dessas duas fontes em um sistema híbrido pode oferecer uma solução mais eficiente e resiliente para a dessalinização [16, 17].

Os sistemas híbridos, que combinam energia solar e geotérmica, maximizam os benefícios de ambas as fontes, proporcionando uma operação estável e contínua. A energia geotérmica pode garantir a operação do sistema de dessalinização durante a noite ou em condições climáticas adversas, enquanto a energia solar pode ser aproveitada durante o dia. Essa complementaridade melhora a eficiência energética e reduz os custos operacionais, tornando a dessalinização mais viável economicamente para as comunidades da região [18–20].

Apesar das vantagens, a implementação em larga escala de tecnologias de dessalinização baseadas em energias renováveis no agreste pernambucano enfrenta desafios, como os altos custos iniciais de instalação, a necessidade de adaptação tecnológica às condições regionais e a aceitação social. A sustentabilidade econômica a longo prazo depende de fatores como eficiência operacional, custos de manutenção e incentivos governamentais [21–23]. Estudos detalhados sobre a viabilidade técnica, econômica, ambiental e social dos

sistemas de dessalinização solar, geotérmica e híbrida são, portanto, essenciais para avaliar o potencial de sua implementação no semiárido pernambucano [24, 25].

Diante dos desafios impostos pelas mudanças climáticas e pela escassez hídrica, esta tese busca investigar e avaliar a viabilidade de sistemas de dessalinização utilizando energia geotérmica, solar e híbrida como soluções sustentáveis para o abastecimento de água no agreste pernambucano. A pesquisa será conduzida por meio de uma abordagem multidisciplinar, integrando conhecimentos de engenharia para fornecer uma análise abrangente dos aspectos técnicos dessas tecnologias. O estudo também visa identificar as principais barreiras à implementação dessas tecnologias e explorar estratégias para superá-las, facilitando a adoção em larga escala de sistemas de dessalinização renováveis na região [26, 27].

Espera-se que os resultados desta pesquisa contribuam para o desenvolvimento de políticas públicas e estratégias de gestão hídrica que incorporem tecnologias sustentáveis de dessalinização. A integração de sistemas baseados em energia geotérmica, solar e híbrida pode representar um avanço significativo para garantir o acesso à água no agreste pernambucano, fortalecendo a resiliência das comunidades frente às adversidades climáticas e assegurando a sustentabilidade dos recursos hídricos da região. Além disso, as informações desta pesquisa podem servir de modelo replicável para outras regiões de escassez hídrica, demonstrando como a inovação tecnológica, aliada a práticas de gestão sustentável, pode enfrentar os desafios da escassez hídrica e das mudanças climáticas [28, 29].

1.1. OBJETIVO GERAL

Investigar e avaliar a viabilidade de sistemas de dessalinização utilizando energia geotérmica, solar e híbrida como soluções sustentáveis para o abastecimento de água no agreste pernambucano.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar o desempenho técnico de sistemas de dessalinização geotérmica, solar e híbrida em termos de eficiência energética;
- Modelar e simular o desempenho dos sistemas de dessalinização geotérmica, solar e híbrida no agreste pernambucano utilizando o software TRNSYS, com o objetivo de otimizar sua eficiência e viabilidade técnica;

- Estudar a adaptabilidade dos sistemas de dessalinização geotérmica, solar e híbrida às variações sazonais de temperatura e radiação solar no agreste pernambucano.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

A estrutura da presente tese foi cuidadosamente planejada para abordar, de forma detalhada e organizada, as estratégias sustentáveis de dessalinização no agreste pernambucano, com foco no uso de tecnologias solar, geotérmica e híbrida. A organização detalhada visa proporcionar uma compreensão clara e abrangente dos objetivos, métodos e contribuições da pesquisa.

O Capítulo 1 introduz o trabalho, apresentando a motivação da pesquisa e definindo os objetivos gerais e específicos. Na seção 1.1, é descrito o objetivo geral da tese, que é desenvolver e avaliar estratégias de dessalinização sustentável para a região do agreste pernambucano. Na seção 1.2, os objetivos específicos detalham as metas práticas da pesquisa, como a análise do desempenho de sistemas de dessalinização solar e geotérmica. A seção 1.3 apresenta a estrutura da tese, fornecendo um panorama dos capítulos que compõem o trabalho.

O Capítulo 2 é dedicado à Revisão Bibliográfica, proporcionando uma base teórica abrangente para o estudo. Na seção 2.1, o tema da Escassez Hídrica é discutido, destacando a problemática da disponibilidade limitada de água. Em 2.2, é explorado o Contexto Regional do Agreste Pernambucano, detalhando características geográficas, climáticas e socioeconômicas da região, enfatizando sua vulnerabilidade hídrica e a necessidade de soluções inovadoras. A seção 2.3 aborda a Matriz Energética, com ênfase no papel das energias renováveis, como solar e geotérmica, no fornecimento sustentável de energia para as tecnologias de dessalinização. A seção 2.4 apresenta os Conceitos e Importância da Dessalinização, destacando sua relevância como solução viável para mitigar os efeitos da crise hídrica em áreas áridas.

A seção 2.5 analisa as Propriedades Térmicas do Solo. Na seção 2.6, o TRNSYS na Modelagem de Sistemas de Dessalinização Solar e Geotérmica é discutido, explicando como o software é utilizado para simular cenários e condições operacionais de diferentes configurações de sistemas.

O Capítulo 3, dedicado a Materiais e Métodos, descreve as simulações realizadas na pesquisa. São detalhadas as configurações dos sistemas de dessalinização, assim como os

dados utilizados, incluindo propriedades térmicas do solo e radiação solar. A abordagem metodológica é explicada de forma a garantir a reprodutibilidade dos resultados.

O Capítulo 4 apresenta os Resultados e Discussão, onde os dados obtidos nas simulações são analisados em profundidade. São realizadas comparações com a literatura existente, destacando as contribuições da pesquisa para o avanço do conhecimento científico e tecnológico.

No Capítulo 5, são apresentadas as Conclusões da tese, sintetizando as principais contribuições da pesquisa e suas implicações práticas e teóricas. São discutidos os avanços alcançados e a relevância dos sistemas propostos para a dessalinização sustentável.

O Capítulo 6 discute os Trabalhos Futuros, sugerindo extensões do estudo e novas abordagens para a melhoria dos sistemas de dessalinização e a exploração de tecnologias complementares. Finalmente, a seção de Referências apresenta todas as fontes bibliográficas consultadas

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. ESCASSEZ HÍDRICA

A escassez hídrica é um dos maiores desafios globais do século XXI, impactando diretamente a qualidade de vida de milhões de pessoas. Esse fenômeno resulta de uma combinação complexa de fatores naturais e antropogênicos, incluindo o crescimento populacional descontrolado, a urbanização acelerada, a intensiva industrialização, a má gestão dos recursos hídricos e os impactos das mudanças climáticas. Regiões semiáridas e áridas são particularmente vulneráveis, pois dependem de ciclos hidrológicos naturalmente limitados e irregulares [30]. No semiárido brasileiro, que abrange 18,2% do território nacional e 53% da área do Nordeste [31, 32], a escassez de água está intimamente ligada às características climáticas, como baixa precipitação e alta evapotranspiração [33].

A escassez hídrica não se limita à falta de água em quantidade suficiente para atender às necessidades humanas, mas também à deterioração da qualidade da água. A salinização de fontes hídricas, especialmente em áreas semiáridas, representa um desafio significativo para o fornecimento de água potável [34, 35]. A degradação dos recursos hídricos afeta a segurança alimentar, a saúde pública e a biodiversidade, exacerbando a vulnerabilidade socioeconômica de milhões de pessoas, como observado no Nordeste brasileiro [34]. O agreste pernambucano está nessa zona de transição entre a Zona da Mata e o Sertão. No entanto, algumas porções do Agreste possuem características semiáridas, especialmente nas áreas mais próximas ao Sertão.

As frequentes secas severas comprometem a produção agrícola e a pecuária, resultando em crises recorrentes de abastecimento [36]. Para enfrentar esse cenário, são necessárias políticas públicas que promovam a gestão sustentável dos recursos hídricos, associadas ao uso de tecnologias inovadoras, como a dessalinização de água utilizando energias renováveis [34, 37]. O aproveitamento das altas taxas de irradiação solar no Nordeste brasileiro oferece uma oportunidade significativa para a dessalinização e o aumento da oferta de água potável [34].

2.2. CONTEXTO REGIONAL: AGRESTE PERNAMBUCANO

O Agreste pernambucano enfrenta desafios climáticos que impactam a disponibilidade hídrica e o desenvolvimento socioeconômico. Com precipitações anuais variando entre 550 e 800 mm, a região sofre com a distribuição irregular das chuvas e altas taxas de evapotranspiração, resultando em baixa retenção de umidade no solo e escassez de água para a agricultura e consumo humano [38]. Os solos, predominantemente rasos e

pedregosos, possuem baixa capacidade de retenção hídrica, aumentando a dependência em tecnologias de irrigação e sistemas de captação de água, como açudes e barragens [39].

Apesar desses desafios, o Agreste pernambucano apresenta elevado potencial para soluções inovadoras que mitiguem a escassez hídrica. A região recebe intensa radiação solar, com valores médios de irradiação horizontal global superiores a $5,5 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$, o que favorece a implementação de sistemas de dessalinização de água utilizando energia solar [38]. Além disso, a exploração de energia geotérmica para sistemas híbridos de dessalinização surge como uma solução promissora, fornecendo água potável para comunidades isoladas e aumentando a resiliência regional frente a secas prolongadas e severas [39].

A implementação de políticas públicas voltadas para a segurança hídrica e o desenvolvimento de infraestruturas adequadas para a captação e armazenamento de água são essenciais para promover a sustentabilidade em regiões do estado de pernambucano. A transposição do Rio São Francisco e os sistemas de monitoramento de recursos hídricos são exemplos de medidas que podem minimizar os impactos da escassez de água, garantindo o desenvolvimento sustentável e a segurança hídrica da região para as gerações futuras [34].

2.3.MATRIZ ENERGÉTICA

A alta dependência mundial dos combustíveis fósseis tem preocupado pesquisadores, governantes e a sociedade como um todo. A economia global, impulsionada pelo avanço da industrialização, tornou-se fortemente dependente da superexploração dos recursos naturais, especialmente das fontes fósseis, que são os maiores responsáveis pelas mudanças climáticas [40–42]. Além de desempenharem um papel crucial no fornecimento de energia, os combustíveis fósseis também são essenciais na produção de produtos químicos versáteis [43]. No entanto, as emissões de carbono provenientes desses combustíveis têm causado graves problemas ambientais e afetado diretamente a vida humana [44]. O uso excessivo e a baixa sustentabilidade dessas fontes são fatores que têm agravado a crise climática e energética global [43].

Desde 1850, o uso de combustíveis fósseis tem crescido exponencialmente, resultando em um aumento inevitável das emissões de dióxido de carbono [45]. A utilização de combustíveis fósseis causa impactos ambientais negativos, como a formação de chuvas ácidas, o efeito estufa e o aquecimento global. Essas consequências reforçam a necessidade urgente de aperfeiçoar as tecnologias de fontes alternativas de energia e desenvolver novas soluções sustentáveis. A preocupação com o esgotamento das reservas fósseis e o aumento

das emissões de gases de efeito estufa desencadearam um grande interesse em fontes de energia renovável [46]. O desenvolvimento de tecnologias de energia limpa, como a biomassa, ganhou relevância tanto para a geração de energia quanto para a produção de derivados petroquímicos [47].

Com a crescente preocupação sobre a segurança energética e os impactos ambientais dos combustíveis fósseis, a demanda global por fontes de energia renovável tem aumentado consideravelmente [48–50]. A assinatura do Acordo de Paris em 2015 foi um marco importante, no qual os países concordaram em limitar o aumento da temperatura global a menos de 2 °C até o final do presente século, em resposta ao aquecimento global [40, 51]. Desde então, o desenvolvimento de combustíveis renováveis e a utilização de sistemas complementares multienergéticos tornaram-se tendências globais [52–54]. O crescimento acelerado da população mundial tem colocado as cidades em uma posição de consumo crescente de energia, aumentando a importância das fontes renováveis como uma das principais soluções para evitar mudanças climáticas [55].

No Brasil, o Balanço Energético Nacional de 2024 [56] mostrou que a oferta interna de energia, em 2013, alcançou 313,9 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep), com uma participação de 49,1% de fontes renováveis, o que coloca o país entre as nações com maior proporção de energia limpa no mundo. Entre 2022 e 2023, a biomassa de cana e a energia solar tiveram aumentos expressivos, de 13,1% e 51,1%, respectivamente. A recuperação econômica do país, com um crescimento do PIB de 2,9%, também contribuiu para o aumento da oferta interna de energia.

A matriz elétrica brasileira, uma das mais limpas do mundo, continua a ser dominada por fontes renováveis, com 89,2% da eletricidade gerada em 2023 proveniente de fontes como hidrelétricas (58,9%), eólicas (13,2%) e solares (7,0%). O crescimento exponencial da energia solar, impulsionado por políticas de incentivo e investimentos, tornou-se uma das principais áreas de expansão do setor energético.

Entretanto, a dependência do Brasil em hidrelétricas torna o sistema vulnerável a períodos de seca prolongada. Em 2023, a geração hidráulica reduziu-se em 0,3%, mas a energia eólica aumentou 17,4%, consolidando-se como uma das principais fontes complementares de energia. Fontes não renováveis ainda compõem 50,9% da oferta interna de energia, com destaque para o petróleo e seus derivados, além do gás natural, que serve como backup em períodos de baixa produção hidrelétrica.

A diversificação da matriz energética brasileira é um desafio contínuo. A fonte solar térmica, utilizada para o aquecimento de água em coletores aberto, fechado e tubo a vácuo, atingiu 12,484 GWh equivalente, refletindo o potencial do Brasil em expandir o uso de fontes renováveis e reduzir a dependência de combustíveis fósseis. No entanto, a vulnerabilidade da matriz devido à forte dependência de hidroeletricidade e a necessidade de aumentar o uso de fontes alternativas, como solar e eólica, são questões que exigem atenção contínua. O futuro da matriz energética brasileira depende de políticas e investimentos que promovam uma maior diversificação e resiliência.

2.4. DESSALINIZAÇÃO

2.4.1. Dessalinização Solar

A energia solar é amplamente reconhecida como uma das mais promissoras fontes de energia renovável, sendo limpa, inesgotável e essencial para enfrentar os desafios energéticos e ambientais globais [57–59]. À medida que o mundo se volta para soluções mais sustentáveis, a transição para o uso em larga escala de tecnologias de energia renovável, como a energia solar, oferece um caminho claro para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e, conseqüentemente, mitigar os impactos das mudanças climáticas [37]. Nesse contexto, a dessalinização solar surge como uma solução estratégica para enfrentar os desafios da escassez hídrica, principalmente em regiões que enfrentam severas limitações no abastecimento de água doce.

O Nordeste brasileiro, caracterizado por um clima quente com altos índices de radiação solar e baixos níveis de precipitação, é uma região que sofre com a disponibilidade limitada de água, o que afeta diretamente os processos ecológicos e as atividades econômicas locais [60, 61]. Essas condições climáticas adversas tornam o desenvolvimento de tecnologias de dessalinização movidas a energia solar uma alternativa viável para garantir a segurança hídrica. O aproveitamento da abundante energia solar nessa região tem o potencial de não apenas aliviar a crise de água, mas também contribuir para a sustentabilidade local, minimizando a dependência de fontes de energia fósseis e reduzindo a pegada de carbono [62].

Este capítulo abordará a importância da dessalinização solar como uma solução sustentável para a escassez hídrica, com ênfase nas especificidades climáticas do Nordeste brasileiro e nas tecnologias que permitem otimizar o processo de conversão de água salina em água potável.

A dessalinização solar é uma solução sustentável e eficiente para mitigar a escassez de água, mas enfrentam limitações no acesso a água potável. Entre as tecnologias disponíveis, os sistemas de dessalinização solar de placa plana se destacam por seu design simples, baixa necessidade de manutenção e custo-benefício, tornando-os ideais para áreas remotas e fora da rede. Este capítulo explora os princípios fundamentais, considerações de projeto, métricas de desempenho, bem como os impactos econômicos e ambientais associados a esses sistemas, conforme relatado em diversas pesquisas [63, 64].

O funcionamento dos sistemas de dessalinização solar de placa plana é baseado em diversos processos de transferência de calor, incluindo a absorção de radiação solar pela bacia, transferência de calor por convecção entre a superfície da água e a cobertura de vidro, e o ciclo de evaporação e condensação, onde a água evapora e se condensa na superfície de vidro. As perdas de calor para o ambiente também influenciam a eficiência geral do sistema [65]. A taxa total de transferência de calor por unidade de área nesses sistemas pode ser expressa pela Equação 1:

$$q_{total} = q_{radiation} + q_{convection} + q_{evaporation} - q_{losses} \quad (1)$$

onde $q_{radiation}$ representa a energia solar absorvida pela bacia, $q_{convection}$ é o calor transferido por convecção e $q_{evaporation}$ descreve a energia utilizada na mudança de fase da água para vapor. As perdas de calor q_{losses} ocorrem principalmente devido à radiação e convecção para o ar ao redor, o que pode reduzir significativamente o desempenho do sistema, como observado por [64].

Outro aspecto crítico dos sistemas de dessalinização solar de placa plana é o processo de transferência de massa de vapor d'água da superfície da água para a cobertura de vidro. Este processo pode ser descrito pela Equação 2:

$$\dot{m}_e = h_e \frac{(P_w - P_g)}{h_{fg}} \quad (2)$$

Onde $\dot{m}_e$ é a taxa de transferência de massa de vapor; h_e é o coeficiente de transferência de calor evaporativo; P_w é a pressão parcial do vapor d'água na superfície da água; P_g é a pressão parcial do vapor na cobertura de vidro; h_{fg} é o calor latente de vaporização [65].

A maior diferença de temperatura ou menor condensação no vidro pode aumentar a taxa de evaporação [66]. Vários parâmetros de projeto influenciam diretamente a eficiência e a produtividade dos sistemas de dessalinização solar de placa plana. Esses parâmetros

incluem a profundidade da bacia, o ângulo de inclinação da cobertura de vidro, a espessura do isolamento, a profundidade da água e o espaçamento entre a superfície da água e a cobertura de vidro [67]. Por exemplo, uma bacia rasa aumenta a diferença de temperatura entre a água e a cobertura de vidro, melhorando a evaporação, enquanto o ajuste adequado do ângulo de inclinação da cobertura de vidro garante uma condensação e escoamento eficientes da água destilada [66].

A escolha dos materiais adequados é fundamental para otimizar o desempenho térmico. O revestimento da bacia, frequentemente feito de alumínio ou cobre pintado de preto, maximiza a absorção solar, enquanto a cobertura de vidro, geralmente de vidro temperado com baixo teor de ferro, garante alta transmissividade à radiação solar e durabilidade. Materiais isolantes, como espuma de poliuretano ou lã mineral, ajudam a reduzir as perdas de calor devido à sua baixa condutividade térmica. Além disso, vedantes à base de silicone são preferidos por sua durabilidade a longo prazo e resistência à degradação ambiental [65].

A eficiência térmica de um sistema de dessalinização solar de placa plana pode ser calculada utilizando a Equação 3:

$$\eta = \frac{\dot{m}_d \cdot h_{fg}}{I \cdot A} \quad (3)$$

Em que $\dot{m}_d$ é a taxa de produção de destilado; h_{fg} é o calor latente de vaporização; I é a intensidade da radiação solar incidente; A é a área da bacia [63].

A maior eficiência é alcançada ao maximizar a taxa de produção de destilado e minimizar as perdas de energia [66]. Para aumentar a produtividade dos sistemas de dessalinização solar de placa plana, várias estratégias podem ser implementadas, como o uso de materiais de armazenamento de calor, que armazenam o excesso de energia térmica durante as horas de pico de sol e a liberam durante períodos de baixa radiação solar. Materiais do tipo pavio aumentam a taxa de evaporação ao ampliar a área exposta à luz solar. Sistemas de resfriamento para a cobertura de vidro ajudam a manter a temperatura da superfície mais baixa, aumentando a diferença de temperatura e, conseqüentemente, melhorando as taxas de condensação. Além disso, refletores podem ser adicionados para direcionar mais luz solar para a bacia, aumentando a energia total disponível [66, 67].

A viabilidade econômica dos sistemas de dessalinização solar de placa plana depende dos custos de capital e operacionais, dos requisitos de manutenção, da vida útil do sistema e dos preços locais da água. O cálculo do custo nivelado da água (LCOW, do inglês "*Levelized*

Cost of Water") é uma métrica útil para avaliar a relação custo-benefício a longo prazo desses sistemas. A Equação 4 para o LCOW é:

$$LCOW = \frac{C_{capital} + PV(O\&M)}{AWP \cdot SL} \quad (4)$$

No qual *LCOW* é o custo inicial de capital; *PV(O&M)* representa o valor presente dos custos operacionais e de manutenção; *AWP* é a produção anual de água; *SL* é a vida útil do sistema [63].

Os sistemas de dessalinização solar de placa plana também oferecem benefícios ambientais significativos em comparação com métodos convencionais de dessalinização, principalmente na redução de emissões de carbono, já que utilizam fontes de energia renováveis [64]. Outras considerações ambientais incluem os requisitos de uso do solo, que são relativamente pequenos em comparação com grandes plantas de dessalinização, e o manejo da salmoura, que é essencial para minimizar os impactos ambientais adversos [66]. Além disso, os materiais utilizados na construção desses sistemas devem ser selecionados por seu potencial de reciclabilidade e baixo impacto ambiental ao final da vida útil do sistema [67].

Embora os sistemas de dessalinização solar de placa plana tenham demonstrado bom potencial, várias áreas ainda requerem mais pesquisa e desenvolvimento. Entre elas estão a exploração de novos materiais com maior condutividade térmica e melhores propriedades de absorção solar, o desenvolvimento de sistemas de controle inteligentes para otimização operacional e a integração de sistemas híbridos que combinam a dessalinização solar com outras tecnologias de energia renovável para aumentar a produtividade. A superação dos desafios técnicos e econômicos associados à ampliação de escala dos sistemas de placa plana para maior produção de água e a avaliação de seu desempenho a longo prazo em condições reais também são áreas de pesquisa essenciais [65].

Em resumo, os sistemas de dessalinização solar de placa plana representam uma opção viável e sustentável para lidar com a escassez de água, especialmente em regiões com alta incidência solar. Com um projeto otimizado, seleção de materiais apropriados e integração de tecnologias inovadoras, seu desempenho e viabilidade econômica podem ser significativamente aprimorados.

A crescente demanda global por água doce, juntamente com o esgotamento dos recursos hídricos naturais, impulsionou a necessidade de soluções inovadoras e sustentáveis.

A dessalinização solar destaca-se como uma tecnologia promissora, aproveitando a energia renovável para converter água salina ou salobra em água potável. Entre as diversas tecnologias de dessalinização solar, os sistemas que incorporam coletores de tubos evacuados (ETCs) têm mostrado um notável potencial devido à sua alta eficiência térmica, mínimas perdas de calor e adaptabilidade a diferentes condições climáticas. Este capítulo aborda os princípios, o desempenho e os avanços nos sistemas de dessalinização solar com tubos evacuados.

Os sistemas de dessalinização solar imitam o ciclo natural da água, utilizando energia solar para evaporar a água, seguida pela condensação para coletar água purificada. Os destiladores solares são a forma mais simples desses sistemas, consistindo em uma bacia para conter a água salina, uma cobertura transparente para capturar a radiação solar e um sistema de coleta para água destilada. Apesar de sua simplicidade, os destiladores solares tradicionais frequentemente sofrem com baixa eficiência devido a perdas de calor e taxas limitadas de evaporação.

Os coletores de tubos evacuados (ETCs) aumentam significativamente o desempenho térmico dos sistemas de dessalinização solar. Os ETCs consistem em tubos de vidro de camada dupla com isolamento a vácuo, o que minimiza as perdas de calor e maximiza a absorção de energia solar. A integração dos ETCs com destiladores solares aumenta a temperatura da água na bacia, elevando assim a taxa de evaporação e o rendimento total de água.

Os sistemas de dessalinização solar baseados em ETC normalmente incluem os seguintes componentes: tubos evacuados que captam e transferem energia solar para o fluido de trabalho; bacias que contêm água salina para evaporação; coberturas transparentes que facilitam a condensação da água evaporada; trocadores de calor para otimizar a transferência de calor dos ETCs para a água da bacia; e isolamento para reduzir as perdas térmicas da bacia e de outros componentes do sistema. Muitos sistemas baseados em ETC utilizam o efeito termossifão, onde a água aquecida sobe devido à redução da densidade, criando uma circulação natural entre os tubos evacuados e a bacia. Este mecanismo passivo elimina a necessidade de bombas, simplificando o sistema e reduzindo os custos operacionais.

Os sistemas passivos dependem exclusivamente da radiação solar, sem entradas externas de energia, enquanto os sistemas ativos incorporam componentes auxiliares, como bombas ou ventiladores, para melhorar o desempenho. Estudos mostram que a combinação de destiladores solares com ETCs pode mais que dobrar o rendimento diário de água em comparação com sistemas convencionais. Por exemplo, em configurações experimentais, as

taxas de produção aumentaram em até 263% quando os ETCs foram integrados, alcançando rendimentos de até 3,6 L/m²/dia em condições ótimas [68, 69].

A eficiência térmica dos sistemas baseados em ETC varia de 40% a 80%, dependendo do design e das condições operacionais. A eficiência exergética, que considera a qualidade da energia utilizada, também é significativamente maior em sistemas com ETCs, devido à sua capacidade de manter temperaturas mais altas no fluido de trabalho [69]. Profundidades menores de água na bacia levam a taxas de evaporação mais altas, pois a energia térmica é concentrada em um volume menor de água. No entanto, profundidades excessivamente baixas podem aumentar as perdas de calor.

O ângulo de inclinação ideal dos ETCs garante a máxima absorção de radiação solar. Ângulos entre 30° e 45° são tipicamente usados, dependendo da localização geográfica [70]. Avanços recentes incluem o uso de nanofluidos em ETCs para melhorar a condutividade térmica, levando a taxas mais altas de transferência de calor e desempenho geral aprimorado [69].

Um estudo experimental conduzido no oeste do Texas demonstrou um aumento de 263% no rendimento de água quando um destilador solar foi complementado com ETCs. O sistema alcançou uma eficiência de pico de 19% em condições semiáridas [71]. Em Bangalore, Índia, um destilador solar de única bacia acoplado a ETCs produziu 5,534 kg de destilado por dia com uma profundidade de água de 0,02 m. A eficiência do sistema variou de 33% a 73% durante as horas de luz solar [71].

Apesar das vantagens, desafios permanecem, como incrustações e obstruções de sal, altos custos iniciais e a intermitência da energia solar, que limita a produtividade durante períodos nublados ou noturnos. Sistemas híbridos que combinam energia solar com outras fontes renováveis, como eólica ou geotérmica, podem melhorar a confiabilidade e a produção. Configurações de múltiplos estágios que aumentam o número de processos de evaporação-condensação melhoram o rendimento e a eficiência térmica [69]. O desenvolvimento de revestimentos com maior absorção e durabilidade para ETCs pode reduzir os custos e melhorar a longevidade [69].

Os sistemas de dessalinização solar baseados em ETC representam uma solução sustentável para enfrentar a escassez de água, particularmente em regiões áridas e semiáridas. Ao melhorar o desempenho térmico e o rendimento de água, esses sistemas oferecem uma alternativa viável aos métodos convencionais de dessalinização intensivos em energia.

Pesquisas e inovações contínuas no design, nos materiais e na hibridização são essenciais para superar os desafios existentes e maximizar o potencial dessa tecnologia.

Além disso, sistemas híbridos que combinam coletores de tubos evacuados com tecnologias adicionais, como bombas de calor ou sistemas de armazenamento térmico, podem fornecer um fornecimento mais consistente e confiável de água doce. Estudos sugerem que tais integrações podem aumentar o rendimento em mais de 50% em comparação com sistemas isolados.

2.4.2. Dessalinização Geotérmica

A dessalinização geotérmica em baixa profundidade pode surgir como uma abordagem promissora para o tratamento de água no agreste, especialmente quando combinada com energia solar e geotérmica, criando um processo mais sustentável e acessível para regiões com escassez hídrica. A energia geotérmica, reconhecida por sua estabilidade e baixa pegada de carbono, pode desempenhar um papel central na aceleração da transição energética e na descarbonização da economia global [25, 29]. Com sua capacidade de fornecer energia estável e resiliente às flutuações climáticas, a energia geotérmica superficial, captada em profundidades rasas, é uma fonte renovável altamente eficiente para sistemas de dessalinização, especialmente em regiões áridas e semiáridas, como o Nordeste brasileiro [28, 72, 73].

A dessalinização geotérmica em profundidades rasas aproveita o gradiente térmico existente entre a superfície do solo, onde as temperaturas podem atingir entre 30°C e 40°C devido à exposição solar direta, e uma profundidade de até 1 metro, onde as temperaturas variam entre 22°C e 25°C. Esse diferencial térmico de 8°C a 15°C pode ser eficientemente utilizado em processos de evaporação e condensação, fundamentais para a dessalinização da água salobra. Sistemas que integram energia solar e geotérmica, como os de destilação solar-geotérmica, utilizam uma cobertura transparente em ângulo para maximizar a captação de radiação solar, uma superfície absorvedora escura para aumentar a eficiência térmica e tubulações enterradas para condensação do vapor, aproveitando o gradiente térmico natural. O isolamento térmico é utilizado para minimizar as perdas de calor, maximizando a eficiência do processo.

A energia geotérmica é amplamente valorizada por suas características termodinâmicas estáveis, as quais garantem uma fonte confiável e contínua de calor natural. Essa constância é especialmente relevante para sistemas de dessalinização que requerem uma fonte de calor regular para promover a evaporação e a condensação da água, com baixa

dependência das variações climáticas que impactam outras formas de energia renovável [14, 19]. A utilização da energia geotérmica remonta à antiguidade, como as antigas Termas Romanas, onde os romanos reconheceram as fontes termais por seus benefícios para a saúde [74]. Embora a aplicação comercial da energia geotérmica para utilização direta e geração de energia só tenha surgido em meados do século XX, ela rapidamente se consolidou como uma fonte viável e sustentável [75]. Ao combinar essa fonte de calor com a energia solar, cria-se um sistema de dessalinização híbrido que tem o potencial de fornecer água potável de forma sustentável e com baixo custo operacional, sendo especialmente adequado para comunidades rurais que enfrentam desafios hídricos severos.

Historicamente, a energia geotérmica tem sido utilizada por diversas culturas ao redor do mundo, desde o aquecimento de ambientes até o preparo de alimentos e banhos, demonstrando sua acessibilidade e versatilidade [76, 77]. Em profundidades rasas, o solo mantém uma temperatura praticamente constante ao longo do ano, variando de acordo com fatores como cobertura do céu, propriedades físicas do solo e condições climáticas [78, 79]. Essa característica torna a energia geotérmica uma fonte ideal para processos contínuos, como a dessalinização, onde o controle térmico é essencial para otimizar o desempenho do sistema.

Apesar de suas inúmeras vantagens, como baixo custo operacional, manutenção simples e uso de energia renovável, a dessalinização geotérmica superficial apresenta algumas limitações. A produção de água pode ser limitada em função das condições climáticas, e a eficiência do sistema pode exigir limpezas periódicas para manter seu desempenho ideal. Além disso, a área superficial necessária para a instalação dos sistemas pode ser considerável, dependendo da demanda de água. No entanto, essas limitações são contrabalançadas pelo potencial de utilização em regiões rurais com acesso limitado a fontes de energia convencionais e pela sua capacidade de operar com fontes renováveis, o que promove a sustentabilidade e a segurança hídrica em áreas afetadas pela escassez de água.

Em síntese, a dessalinização geotérmica em profundidades rasas, quando integrada à energia solar, oferece uma solução promissora para o desafio global da escassez de água, especialmente em regiões áridas. Sua estabilidade térmica, baixa pegada de carbono e acessibilidade fazem dela uma tecnologia atrativa tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico, oferecendo uma alternativa sustentável para a produção de água potável em comunidades que mais necessitam dessa solução.

2.5. PROPRIEDADES DO SOLO

O solo, juntamente com a cobertura vegetal e a atmosfera sobreposta, constitui um dos principais componentes do sistema terra-atmosfera [80, 81]. Além de seu papel

fundamental em processos naturais, o solo tem um papel significativo em diversas aplicações de engenharia, como na construção de edifícios, estradas e barragens [82, 83]. Em particular, o estudo das propriedades físicas e térmicas do solo é de extrema relevância para o desenvolvimento de sistemas de dessalinização que utilizam energia geotérmica de profundidades rasas, uma vez que o solo tem a capacidade de armazenar e conduzir calor, sendo uma fonte potencial de energia sustentável [84].

O solo, em combinação com a matéria orgânica presente, atua tanto como fonte quanto como sumidouro de gases de efeito estufa, contribuindo para a regulação do ciclo de carbono [85, 86]. Esse papel é especialmente importante no contexto de sistemas de dessalinização, onde o aproveitamento energético do solo pode ser usado para promover soluções tecnológicas que visem a sustentabilidade. A capacidade do solo de fixar carbono e absorver calor o torna um componente vital nos sistemas energéticos de baixo impacto ambiental [85].

Além disso, solos e plantas são elementos essenciais nos ecossistemas terrestres, fornecendo a base para a agricultura e outros usos da terra [87, 88]. A distribuição espacial dos tipos de solo é crucial para o manejo de recursos, como a água e nutrientes, e para a agricultura de precisão, o que se alinha diretamente às demandas de sistemas que utilizam energia geotérmica superficial em zonas áridas e semiáridas, como no semiárido pernambucano [89–91]. A degradação do solo, resultante de uso inadequado da terra, pode comprometer a eficiência energética desses sistemas, afetando sua capacidade de conduzir calor e água [92, 93].

A degradação do solo, que inclui a perda de matéria orgânica e a compactação, impacta significativamente as propriedades térmicas e físicas do solo, como a difusividade e a condutividade térmica, elementos-chave para o funcionamento eficiente dos sistemas geotérmicos rasos [93–95]. Como o solo pode armazenar até o dobro da quantidade de carbono presente na atmosfera, sua gestão adequada é essencial para a sustentabilidade tanto do sistema climático quanto das tecnologias de dessalinização que dependem de energia geotérmica [85, 96].

A compactação do solo, muitas vezes intensificada por práticas agrícolas inadequadas, como o plantio direto, prejudica as propriedades térmicas e hidráulicas do solo, reduzindo sua capacidade de armazenamento e transporte de calor e água [97–99]. A compactação altera a porosidade e a densidade aparente do solo, fatores cruciais para a condução de calor e, portanto, para a eficiência dos sistemas de dessalinização baseados no uso de energia térmica do solo [97, 100]. Embora essas alterações sejam frequentemente

invisíveis na superfície, suas consequências são profundas para a saúde do solo e para o desempenho dos sistemas de energia [101].

Os processos térmicos no solo também estão fortemente relacionados com a dinâmica de troca de água e energia entre o solo e a atmosfera. Essas interações são críticas em zonas áridas e semiáridas, onde a eficiência na utilização de energia do solo pode ser determinante para a viabilidade de sistemas de dessalinização [102–104]. As propriedades térmicas do solo, como a capacidade térmica, condutividade térmica e difusividade térmica, são essenciais para a modelagem precisa dos fluxos de calor e água no sistema solo-atmosfera [84, 105].

Essas propriedades são fortemente influenciadas pela textura e composição química do solo, afetando diretamente sua capacidade de conduzir e armazenar calor [105]. A condutividade térmica, em particular, é um parâmetro crucial tanto para aplicações ambientais quanto para a transferência de calor em solos utilizados em projetos de engenharia geotérmica, como sistemas de dessalinização que exploram a energia superficial do solo [106–112]. A difusividade térmica, por sua vez, determina a rapidez com que o calor se propaga no solo, sendo um fator determinante para o desempenho desses sistemas em diferentes tipos de solo [113, 114].

Em Pernambuco, um estado com alta densidade populacional e grande consumo de energia, o aproveitamento energético do solo oferece um potencial significativo para o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis. Parâmetros como capacidade térmica volumétrica, condutividade térmica e difusividade térmica permitirá uma melhor compreensão de como o solo pode ser aproveitado como fonte de energia limpa e renovável [114]. Essas propriedades influenciam diretamente na distribuição de calor e na eficiência de transferência de energia nos sistemas de dessalinização, tornando o estudo das características térmicas do solo essencial para o avanço tecnológico nessa área [115–117].

2.5.1. Propriedades Térmicas do Solo

O conhecimento das propriedades térmicas do solo é fundamental para o entendimento do processo de transferência de calor em meios terrestres, o que é crucial para a otimização de diversos projetos de engenharia [118]. Entre as principais propriedades térmicas destacam-se a condutividade térmica (inversamente relacionada à resistividade térmica), a capacidade térmica e a difusividade térmica, que desempenham papéis essenciais em estudos agrícolas e aplicações meteorológicas [119–122].

Essas propriedades são determinantes na troca de energia e massa entre o solo e a atmosfera, influenciando o regime térmico do solo, que é crucial tanto para a formação do

solo quanto para os processos geoquímicos que nele ocorrem [122, 123]. Fatores como precipitação, vegetação e topografia afetam diretamente as propriedades térmicas do solo [124].

No âmbito dos processos pedológicos, essas propriedades influenciam significativamente o armazenamento e a condução de calor no solo, moldando o microclima e impactando o desenvolvimento das plantas [120, 125]. A cobertura do solo e as condições climáticas também afetam diretamente o comportamento térmico da superfície do solo [126].

Diante das crescentes crises energéticas e do agravamento do aquecimento global, há uma busca intensa por fontes alternativas de energia. Considerando que grande parte da energia global é consumida em processos de aquecimento e resfriamento de ambientes, a energia geotérmica surge como uma solução promissora. Sistemas baseados na energia do solo são capazes de criar condições térmicas confortáveis com baixo consumo energético, utilizando diretamente a energia armazenada no solo [127].

As propriedades térmicas do solo são igualmente essenciais para a análise e o desempenho de diversas infraestruturas subterrâneas, como dutos de petróleo, gás natural, cabos de alta tensão e sistemas de trocadores de calor [128, 129]. A capacidade de retenção ou dissipação de calor do solo é um parâmetro crucial no desenvolvimento de trocadores de calor ar-terra [127]. A tecnologia de bomba de calor geotérmica (GSHP), amplamente utilizada em várias partes do mundo, representa um dos sistemas geotérmicos mais eficientes para a redução de emissões de CO₂, com reduções estimadas entre 15% e 77% em comparação com sistemas baseados em combustíveis [130–133],

Além disso, as propriedades térmicas do solo são amplamente aplicadas em projetos geotécnicos de sistemas de proteção catódica, estações de tratamento de água e energia, e em projetos de aquecimento e refrigeração ecológicos [134, 135]. Fatores como saturação, densidade, mineralogia, teor de água e temperatura do solo influenciam diretamente sua capacidade de armazenar ou conduzir calor [134]. Esses fatores são determinantes para a análise de desempenho térmico em projetos subterrâneos, como os sistemas de exploração de energia geotérmica [118, 136–138].

A energia geotérmica, uma das fontes de energia renovável mais eficientes, possui um enorme potencial para contribuir com a transição energética global [139, 140]. O uso de bombas de calor geotérmicas pode desempenhar um papel crucial na mitigação das mudanças climáticas, reduzindo consideravelmente as emissões de gases de efeito estufa em sistemas de aquecimento e refrigeração [141].

2.5.1.1. Capacidade Térmica dos Solos

A capacidade térmica dos solos é fortemente influenciada por sua composição mineralógica, teor de matéria orgânica e, principalmente, o conteúdo de água, que se destaca como o fator mais preponderante nessa propriedade. A partir da capacidade térmica e da massa volúmica do solo, é possível determinar tanto o calor específico quanto a capacidade térmica volumétrica, ambos amplamente utilizados para caracterizar o comportamento térmico do solo, especialmente sob condições de regime variável de condução de calor [142].

A condutividade térmica e a capacidade térmica volumétrica são parâmetros que descrevem, respectivamente, a habilidade de um material em conduzir calor e sua capacidade de armazenar energia térmica. Esses parâmetros são significativamente afetados pela mineralogia do solo, densidade seca, teor de água e pelo arranjo das partículas que o compõem [137, 143, 144]. Entre esses fatores, a água exerce um efeito marcante e crescente sobre a capacidade térmica, aumentando sua eficiência à medida que o teor de umidade do solo se eleva [145]. A relação entre condutividade térmica (k) e difusividade térmica (α) pode ser expressa matematicamente pela Equação 5:

$$C_v = k \cdot \alpha^{-1} \quad (5)$$

onde C_v é a capacidade térmica volumétrica, k é a condutividade térmica e α é a difusividade térmica [142].

A capacidade térmica volumétrica, portanto, é um parâmetro essencial para a caracterização do solo em processos de transferência de calor, pois permite a estimativa de sua capacidade de armazenamento de energia térmica em função de suas propriedades físicas. Isso é particularmente relevante em cenários nos quais as condições ambientais variam, como na agricultura, engenharia civil e sistemas geotérmicos.

As diferentes capacidades térmicas dos solos podem ser observadas na Tabela 1, onde são apresentados valores experimentais que exemplificam a variação dessas propriedades em função das condições físicas e ambientais. Essas informações são cruciais para o desenvolvimento de modelos preditivos e para a implementação de soluções tecnológicas baseadas nas propriedades térmicas do solo.

Tabela 1 – Capacidade térmica dos solos

Solo		Capacidade Térmica C_v ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \text{K}^{-1}$)
Argila siltosa	Seca	1500 – 1600
	Saturada	2000 – 2800
Areia	Seca	1300 – 1600
	Húmida	1600 – 2200
	Saturada	2200 – 2800
Cascalho	Seco	1300 – 1600
	Saturado	2200 – 2600
Tilitos		1500 – 2500
Turfa		500 – 3800

Fonte: McCorry e Jones (2011) [146]

2.5.1.2. Difusividade Térmica dos Solos

A difusividade térmica dos solos é um parâmetro essencial para a previsão do comportamento do fluxo térmico, especialmente em relação à profundidade e à velocidade de propagação das ondas térmicas no solo. Conforme discutido por Tidall et al. (1999), a importância desse parâmetro reside na sua capacidade de explicar a influência limitada das oscilações diárias de temperatura na profundidade do solo, resultado da baixa difusividade térmica característica da maioria dos solos. Isso ocorre porque a difusividade térmica, assim como a condutividade e a capacidade térmica volumétrica, é influenciada por diversas propriedades físicas básicas dos solos, como sua composição mineralógica, densidade e, principalmente, o teor de água.

No entanto, a relação entre o teor de água no solo e sua difusividade térmica não é linear. Abu-Hamdeh (2003), em seus estudos com solos arenosos, observou que, a partir de baixos teores de água, ocorre uma variação significativa na difusividade térmica, atingindo rapidamente um valor de pico à medida que o teor de água aumenta. Isso demonstra que os solos arenosos, com baixa capacidade de retenção de água, respondem de maneira mais acentuada às variações no conteúdo de umidade, o que afeta diretamente a difusividade térmica.

A difusividade térmica descreve, portanto, a profundidade e a velocidade de propagação das ondas térmicas no solo e pode ser matematicamente expressa pela Equação 6:

$$\alpha = k \cdot C_v \quad (6)$$

em que k representa a condutividade térmica e C_v é a capacidade térmica volumétrica do solo [137]. Essa relação ressalta a interdependência entre as propriedades térmicas do solo, onde a difusividade é diretamente proporcional à condutividade térmica e inversamente proporcional à capacidade térmica volumétrica.

Tabela 2 – Difusividade térmica para diferentes solos

Solo		Difusividade térmica α ($m^2 \cdot s^{-1}$)
Argila siltosa	Seca	$2,67.10^{-7} - 6,25.10^{-7}$
	Saturada	$5,50.10^{-7} - 1,11.10^{-7}$
Areia	Seca	$2,31.10^{-7} - 5,63.10^{-7}$
	Húmida	$6,25.10^{-7} - 8,64.10^{-7}$
	Saturada	$9,09.10^{-7} - 1,07.10^{-7}$
Cascalho	Seco	$3,08.10^{-7} - 5,63.10^{-7}$
	Saturado	$7,27.10^{-7} - 9,62.10^{-7}$
Tilitos		$7,33.10^{-7} - 1,16.10^{-7}$
Turfa		$4,00.10^{-7} - 1,84.10^{-7}$

Fonte: McCorry e Jones (2011) [146]

Na Tabela 2, são apresentados os valores de difusividade térmica em diferentes tipos de solos, ilustrando como as variações na composição e no teor de umidade podem impactar significativamente essa propriedade. Esses dados são cruciais para a modelagem de processos térmicos no solo, com aplicações que vão desde o planejamento de cultivos agrícolas até o dimensionamento de sistemas de energia geotérmica.

2.5.1.3. Condutividade Térmica do Solo

A condutividade térmica efetiva do solo é um parâmetro fundamental que descreve a capacidade de condução de calor em função de um gradiente de temperatura, sendo um dos fatores principais para entender a transferência de energia térmica no ambiente [108, 111, 118, 147, 148]. Este parâmetro tem importância central para a caracterização do regime térmico das superfícies do solo e para a estimativa do fluxo de calor, tanto em escala superficial quanto em camadas mais profundas [149, 150]. Além disso, a condutividade térmica aparente do solo desempenha um papel crítico em diversas áreas da ciência do solo, meteorologia agrícola e engenharia térmica, influenciando diretamente o balanço energético da superfície e a dinâmica de transferência de calor nos solos [147, 150–152].

A condutividade térmica do solo é sensível a uma variedade de fatores físicos e ambientais. Entre os fatores internos que afetam essa propriedade estão a composição

mineral, granulometria, densidade seca, teor de água, grau de saturação e porosidade. Já os fatores externos incluem variáveis ambientais [148, 153–156]. A porosidade e o teor de umidade têm uma influência considerável na condutividade térmica do solo, destacando-se como variáveis determinantes para sua análise [157]. Assim como ocorre na capacidade térmica, o conteúdo de água no solo exerce um efeito significativo sobre a condutividade térmica, aumentando sua eficiência [145]. A condutividade térmica pode ser definida como a taxa pela qual o calor é transferido por condução em um material, na presença de um gradiente de temperatura, além de indicar a capacidade de armazenamento desse calor [158].

Diversos estudos têm destacado a relação entre parâmetros físicos do solo, como granulometria, densidade seca e saturação, e sua condutividade térmica. De forma similar, esses parâmetros influenciam também a resistividade elétrica, permitindo estabelecer correlações entre as duas propriedades [159]. Um aumento na condutividade térmica do solo resulta na elevação da temperatura, enquanto que o aumento da capacidade calorífica contribui para a redução das temperaturas no sistema [145]. Este fenômeno ressalta a importância do entendimento integrado das propriedades térmicas do solo na modelagem de processos térmicos.

Na análise e modelagem de transferência de calor no solo, a condutividade térmica se destaca como um dos parâmetros mais importantes, com aplicações que variam desde simulações de processos hídricos e energéticos na superfície terrestre até cálculos de potencial energético geotérmico [123, 160]. A condutividade térmica do solo é também um dos fatores centrais na determinação do regime térmico do solo, influenciando diretamente seu comportamento em diferentes condições ambientais [120].

Estudos experimentais e de modelagem têm avançado no sentido de caracterizar como propriedades do solo, como densidade e saturação, afetam sua condutividade térmica em diferentes cenários [134]. Nesse contexto, o desenvolvimento de novos sistemas de aquecimento e resfriamento, como bombas de calor geotérmicas, tem explorado a energia renovável armazenada no solo, que se apresenta como um meio eficiente e econômico de armazenamento térmico [161]. Uma previsão precisa da condutividade térmica do solo é, portanto, crucial para a implementação eficaz de tecnologias geotérmicas [162].

Além disso, o solo é amplamente considerado um meio de armazenamento de energia estável e econômico, com aplicações em sistemas de climatização e isolamento térmico de edifícios [163]. A representação acurada da condutividade térmica do solo em modelos ambientais e energéticos tem relevância direta em diversas áreas, como agricultura, em modelagem hidrológica e para sistemas geotérmicos [123].

Modelos teóricos como os de Cote et al. [164] e Lu et al. [165] têm buscado descrever de forma mais precisa a relação entre a condutividade térmica e a porosidade do solo, baseando-se em dados experimentais que apresentam variabilidade significativa. Por outro lado, o modelo de Kersten [158] tem sido amplamente utilizado para estudar as diferenças entre a condutividade térmica em solos secos e saturados, particularmente em argilas, siltes e areias, enquanto Johansen [166] propôs uma correlação entre o número de Kersten e o grau de saturação do solo.

Dada a relevância deste parâmetro, a condutividade térmica do solo é considerada a propriedade térmica mais importante para o controle da velocidade de transferência de calor através do solo, com implicações em várias áreas de aplicação, desde a agricultura até o projeto de trocadores de calor em sistemas de bombas de calor geotérmicas [123, 167].

2.6. TRNSYS NA MODELAGEM DE SISTEMAS DE DESSALINIZAÇÃO SOLAR E GEOTÉRMICA

O TRNSYS (*Transient System Simulation Tool*) tem se destacado como uma ferramenta na modelagem e simulação de sistemas de dessalinização que utilizam fontes de energia renovável, especialmente solar e geotérmica. A flexibilidade modular do software permite simular com precisão a dinâmica de sistemas que combinam energia solar e geotérmica para a dessalinização, oferecendo uma plataforma robusta para avaliar tanto o desempenho energético quanto a viabilidade desses sistemas em diferentes condições climáticas.

No caso da dessalinização solar, o TRNSYS é capaz de simular o comportamento de sistemas que utilizam coletores solares térmicos para aquecer a água salgada, promovendo sua evaporação em processos como destilação solar direta ou destilação de múltiplos efeitos (MED). O software permite modelar a interação entre a radiação solar disponível e os componentes do sistema, como coletores, tanques de armazenamento térmico e evaporadores, otimizando a captura de energia solar e sua conversão em calor para a dessalinização. As simulações também podem incluir o uso de dispositivos de armazenamento térmico, como tanques de água quente, para manter a operação contínua durante períodos de baixa insolação, garantindo um fluxo constante de água potável mesmo em condições climáticas variáveis.

Já no caso da dessalinização geotérmica, o TRNSYS possibilita a simulação de sistemas que aproveitam o calor armazenado no solo a baixas profundidades, especialmente em regiões com gradientes térmicos favoráveis. Esse calor pode ser utilizado diretamente

para aquecer a água salgada em sistemas de destilação ou para pré-aquecer a água antes de sua entrada em um sistema de dessalinização híbrido com energia solar. A modelagem detalhada do comportamento térmico do solo no TRNSYS permite ajustar os parâmetros do sistema de acordo com as propriedades térmicas locais, como a condutividade térmica e a capacidade de armazenamento de calor do solo, fatores cruciais para garantir a eficiência do processo.

A combinação de energia solar e geotérmica em sistemas híbridos de dessalinização é outra aplicação importante que pode ser modelada no TRNSYS. Nesse tipo de configuração, a energia solar é utilizada para fornecer o calor necessário para a evaporação da água durante o dia, enquanto o calor geotérmico de baixa entalpia é aproveitado para manter o sistema operando durante a noite ou em períodos de baixa radiação solar. O TRNSYS permite a simulação dessas transições entre fontes de energia, otimizando o uso do calor disponível e avaliando a eficiência global do sistema ao longo do tempo.

Outro aspecto crucial que o TRNSYS aborda na modelagem de sistemas de dessalinização solar e geotérmica é a variabilidade climática. Ao simular condições meteorológicas reais, como flutuações sazonais de radiação solar e temperaturas ambientes, o software oferece uma visão detalhada de como o sistema se comporta em diferentes cenários. Isso é particularmente importante para o planejamento de sistemas de dessalinização em regiões com grande variação de insolação ou em áreas onde o potencial geotérmico é limitado a determinadas épocas do ano. Com esses dados, é possível ajustar o design do sistema para maximizar a produção de água potável e minimizar o consumo de energia.

Portanto, o TRNSYS desempenha um papel fundamental no desenvolvimento e otimização de sistemas de dessalinização solar e geotérmica, fornecendo uma base sólida para o estudo de diferentes configurações e cenários operacionais. A capacidade do software de integrar múltiplas fontes de energia renovável, como solar e geotérmica, torna-o uma ferramenta indispensável para o avanço dessas tecnologias em regiões com escassez hídrica. Ao permitir a simulação de soluções híbridas e a análise do desempenho energético em diferentes condições climáticas, o TRNSYS contribui diretamente para o desenvolvimento de sistemas de dessalinização mais eficientes e sustentáveis.

3. MATERIAL E METODOS

Esta pesquisa se insere nas atividades do Observatório Nacional da Dinâmica de Água e Carbono no Bioma Caatinga (ONDACBC).

3.1. LOCALIDADE

A localização da área de estudo desempenha um papel fundamental na análise da viabilidade e eficiência dos sistemas de dessalinização solar, geotérmica e híbrida no agreste pernambucano. A cidade escolhida para este estudo, São João, apresenta características climáticas e geológicas que influenciam diretamente o desempenho dos sistemas propostos, especialmente no que diz respeito à disponibilidade de radiação solar e às propriedades térmicas do solo.

As medidas foram obtidas no município de São João, que possui cerca de 23 mil habitantes e uma área de 258,3 km², resultando em uma densidade demográfica de aproximadamente 88 habitantes por km². O município faz fronteira com os municípios de Angelim, Calçado e Garanhuns, estando localizado a 15 km a nordeste de Garanhuns. São João está situado a uma altitude de 710 metros, com coordenadas geográficas de 8° 52' 23" S e 36° 21' 47" O [168]. O clima predominante na área de estudo é classificado como tipo As, caracterizado por chuvas sazonais, com estações secas e úmidas bem definidas. A precipitação anual é ligeiramente inferior à de Garanhuns, e o tipo de solo predominante é o Neossolo Regotílico.

- 3.1.2. *Radiação solar em São João*: A cidade de São João apresenta uma média de radiação solar global entre 4,5 a 5,5 kWh/m²/dia, o que é comparável aos níveis de radiação observados em Garanhuns. Essa disponibilidade moderada de radiação solar torna a cidade um local adequado para a implementação de sistemas de dessalinização solar, tanto diretos quanto indiretos.
- 3.1.3. *Propriedades térmicas do solo*: As características do solo em São João são similares às de Garanhuns, com o Neossolo Regotílico predominando [169]. Esse tipo de solo tem uma boa capacidade de armazenamento de calor, o que favorece a utilização de sistemas geotérmicos superficiais. A profundidade de coleta térmica pode ser ajustada para otimizar o desempenho do sistema de dessalinização geotérmica, permitindo uma combinação eficiente de calor armazenado no solo com o sistema solar.

3.2. DADOS CLIMÁTICOS

Foi utilizado o Meteonorm (TMY2) para localização e condições do clima do município de São João.

3.2.1. Radiação

A Figura 1 apresenta a variação mensal das componentes de radiação solar para São João/PE, medida em kWh/m^2 , destacando a radiação global horizontal, a radiação de feixe e a radiação difusa horizontal, fundamentais para entender o potencial solar da região ao longo do ano.

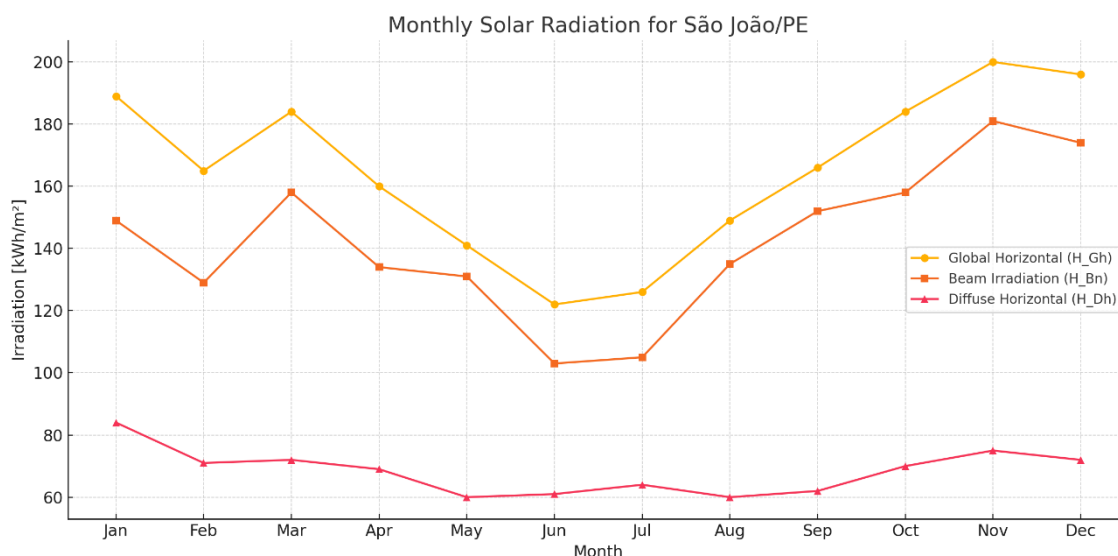
A radiação global horizontal, que soma as radiações direta e difusa recebidas por uma superfície horizontal, apresenta seus maiores valores em novembro ($200 kWh/m^2$), dezembro ($196 kWh/m^2$) e janeiro ($189 kWh/m^2$), indicando maior potencial solar no final e início do ano. Os menores valores ocorrem em junho ($122 kWh/m^2$) e julho ($126 kWh/m^2$), refletindo o inverno com menor disponibilidade de radiação.

A radiação de feixe, correspondente à radiação incidente sobre uma superfície perpendicular ao sol, segue um comportamento similar à radiação global horizontal, com máximos em novembro ($181 kWh/m^2$) e dezembro ($174 kWh/m^2$), e mínimos em junho ($103 kWh/m^2$), e julho ($105 kWh/m^2$). Este comportamento reforça o ciclo sazonal da radiação solar direta.

Já a radiação difusa horizontal, que corresponde à porção espalhada pela atmosfera antes de atingir a superfície, apresenta menor variação ao longo do ano. Os maiores valores ocorrem em janeiro ($84 kWh/m^2$), e novembro ($75 kWh/m^2$), enquanto os menores são registrados em maio e agosto (ambos com $60 kWh/m^2$).

Os dados evidenciam que São João/PE possui maior disponibilidade de radiação solar nos meses de primavera e verão, especialmente novembro e dezembro, enquanto os valores mais baixos concentram-se no inverno, em junho e julho. A radiação difusa mantém-se mais estável, enquanto a global e a direta apresentam maior variabilidade sazonal.

Figura 1 – Radiação – São João



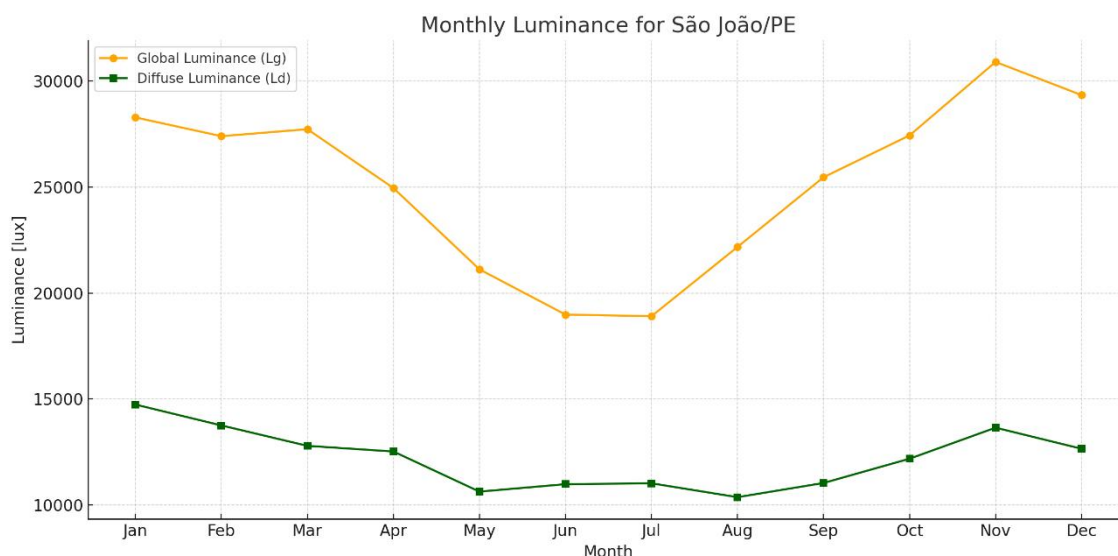
3.2.2. Luminância

A Figura 2 apresenta as variações mensais de luminância global e luminância difusa para São João/PE, medidos em *lux*, fornecendo informações importantes sobre a intensidade de luz natural disponível ao longo do ano. A luminância global, composta pela combinação de luz direta e difusa, apresenta seus valores mais altos em novembro (30.908 *lux*), seguido de dezembro (29.344 *lux*), e janeiro (28.291 *lux*), indicando maior intensidade de luz nesses meses, associada ao aumento da radiação solar direta. Os menores valores são registrados em junho (18.987 *lux*), e julho (18.909 *lux*), refletindo o período de inverno, quando a radiação solar é mais reduzida.

A luminância difusa, que representa a luz espalhada pela atmosfera, é mais estável ao longo do ano, com picos em janeiro (14.741 *lux*) e fevereiro (13.756 *lux*), sugerindo condições de maior dispersão de luz nesse período. Os menores valores são observados em agosto (10.370 *lux*), e maio (10.632 *lux*), indicando menor difusão da luz nesses meses.

Comparativamente, a luminância global apresenta maior variabilidade sazonal, com uma diferença significativa entre os meses de maior e menor intensidade. Já a luminância difusa apresenta menor amplitude de variação, mantendo-se relativamente estável ao longo do ano.

Figura 2 – Luminância – São João



3.2.3. Temperatura

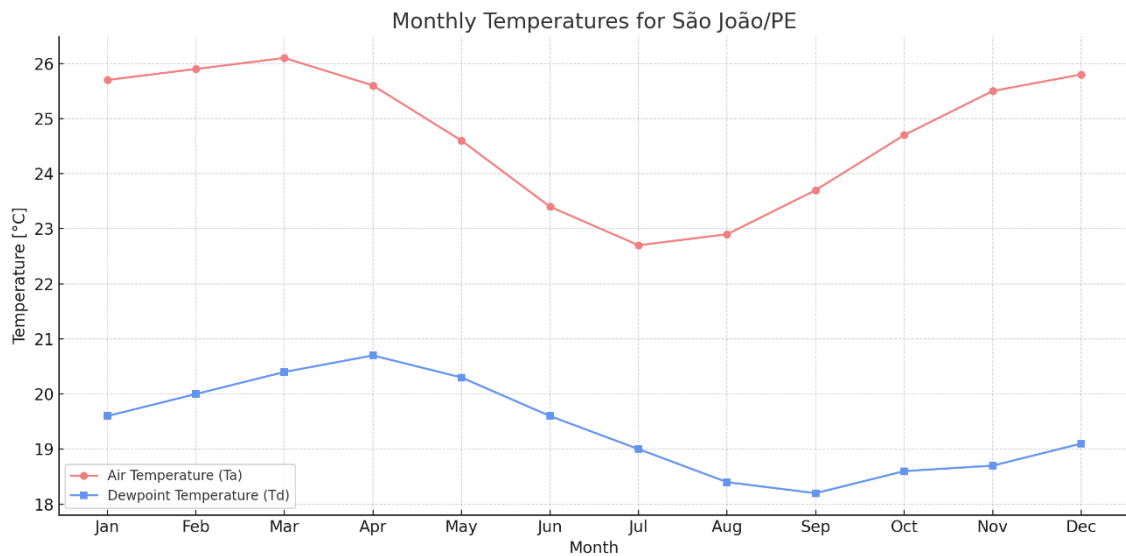
A Figura 3 apresenta as variações mensais da temperatura do ar (T_a) e da temperatura de ponto de orvalho (T_d) para São João/PE, expressas em graus Celsius (°C), fornecendo uma visão geral das condições térmicas da região ao longo do ano.

A temperatura do ar (T_a) segue um comportamento sazonal característico. Os valores mais altos ocorrem nos meses de verão e outono, com março (26,1°C) registrando o pico anual, seguido de fevereiro (25,9°C) e janeiro (25,7°C). Já os valores mais baixos são observados nos meses de inverno, com julho (22,7 °C) e junho (23,4 °C) marcando as menores médias mensais.

A temperatura de ponto de orvalho (T_d), que indica a temperatura em que o ar atinge a saturação (100% de umidade relativa), apresenta uma variação mais estável ao longo do ano. Os maiores valores são registrados em abril (20,7 °C) e março (20,4 °C), refletindo maior umidade nesses meses. Por outro lado, os menores valores ocorrem em setembro (18,2 °C) e agosto (18,4 °C), correspondendo a períodos mais secos.

Comparativamente, a diferença entre T_a e T_d é mais pronunciada nos meses de inverno, como agosto e setembro, indicando maior potencial de evaporação devido ao ar mais seco. Em contrapartida, nos meses de maior umidade, como março e abril, essa diferença diminui, sugerindo uma maior saturação do ar.

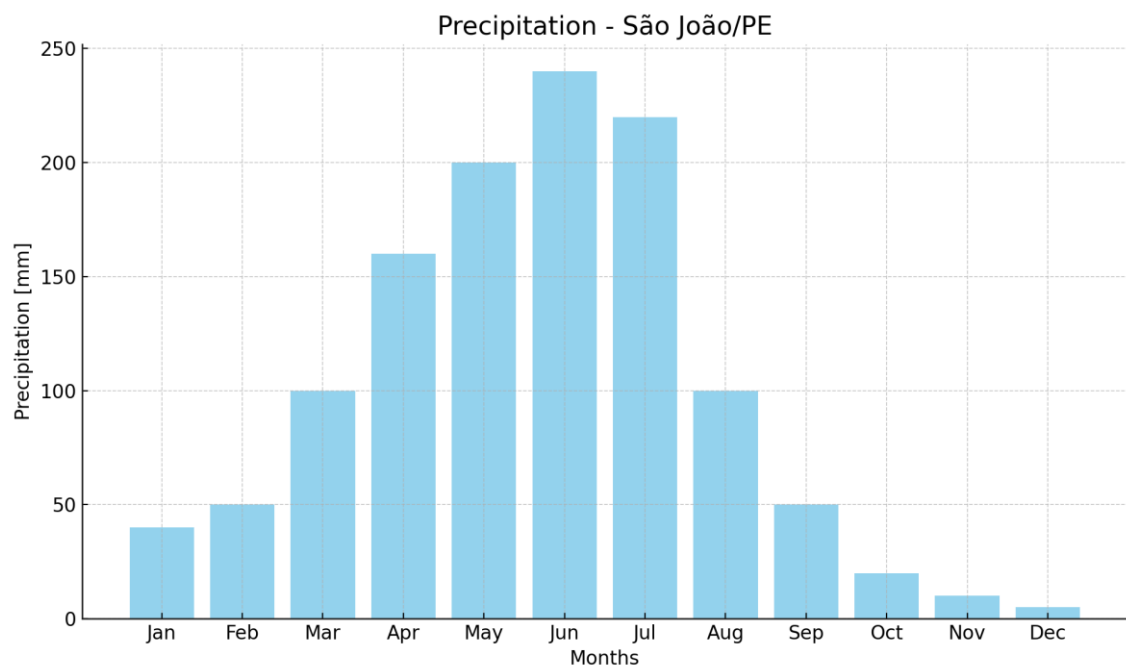
Figura 3 – Temperatura – São João



3.2.4. Precipitação

A Figura 4 apresenta a precipitação mensal (em *mm*) para São João/PE ao longo do ano, evidenciando padrões sazonais característicos da região. A análise revela duas estações bem definidas: uma chuvosa e outra seca. Entre março e julho ocorre a estação chuvosa, com os maiores índices de precipitação, atingindo o pico em junho, com aproximadamente (240 *mm*).

Figura 4 – Precipitação – São João



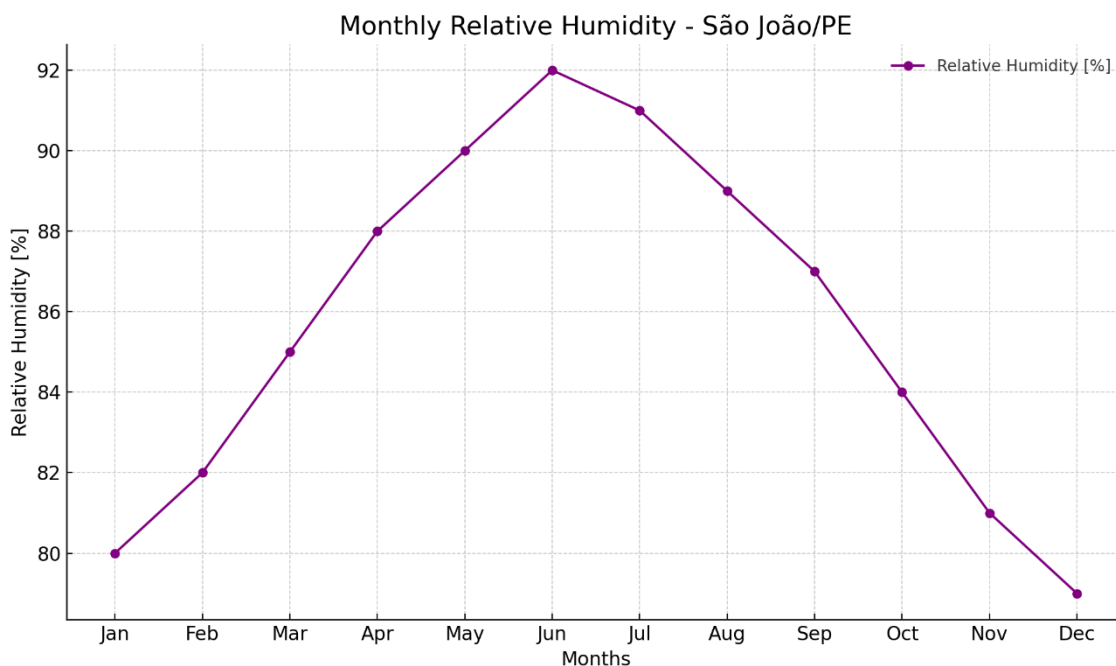
Essa concentração de chuvas é típica do agreste pernambucano, influenciada pelo clima tropical com estação seca. Após julho, a precipitação diminui gradualmente, entrando na estação seca, que domina os meses de agosto a fevereiro, com os valores mais baixos registrados entre outubro e dezembro, com menos de (20 mm) de chuva.

3.2.5. Umidade Relativa

A Figura 5 apresenta a variação mensal da umidade relativa do ar (%) em São João/PE, destacando os valores médios ao longo do ano. Durante a estação chuvosa, que ocorre de março a julho, a umidade relativa apresenta valores mais elevados devido ao aumento das precipitações e à maior saturação do ar com vapor d'água. Em março, a umidade começa a subir, atingindo 85%, e atinge seu pico em junho, com 92%. Esse comportamento é característico de regiões tropicais, onde a umidade acompanha o ciclo das chuvas.

Na estação seca, que ocorre de agosto a fevereiro, a umidade relativa diminui gradualmente, alcançando os valores mais baixos em dezembro, com 79%. Esse padrão reflete a redução da evapotranspiração e da entrada de umidade na atmosfera durante os meses mais secos. No geral, a variação anual da umidade é moderada, oscilando entre 79% (mínimo) e 92% (máximo), característica do agreste pernambucano, que possui umidade relativa consistentemente alta.

Figura 5 – Umidade Relativa – São João



3.3. DADOS DO SOLO

O município de São João apresenta características de solo predominante classificadas como neossolo regolítico, o que é coerente com a geografia e o clima da região. Dados sobre as propriedades térmicas e físicas do solo foram coletados para subsidiar estudos sobre sua aplicabilidade em sistemas energéticos e ambientais. Na Tabela 4, são detalhadas as principais características do solo local.

A capacidade térmica do solo foi estimada em $1,86 \text{ MJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$, indicando sua habilidade de armazenar energia térmica [170]. A condutividade térmica, um parâmetro que mede a eficiência na transferência de calor através do solo, foi avaliada em $1,39 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [171]. A densidade do solo, que reflete a massa por unidade de volume, foi determinada em $1,52 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ [170]. Por fim, o calor específico do solo, associado à quantidade de energia necessária para elevar a temperatura de 1 kg de solo em 1 K, foi medido como $1094,12 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [170]. Esses dados são fundamentais para o entendimento do comportamento térmico do solo em aplicações que envolvem sistemas de energia geotérmica, dessalinização e estudos ambientais.

Tabela 4 – Propriedades do Solo

Solo	Valor	Unidade	Referência
Neossolo Regolítico			
Capacidade	1,86	$\text{MJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$	[170]
Condutividade	1,39	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	[171]
Densidade	1,52	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	[170]
Calor específico	1094,12	$\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$	[170]

3.4. IMPACTO DO CLIMA E SOLO NAS TECNOLOGIAS DE DESSALINIZAÇÃO

O sucesso das tecnologias de dessalinização solar, geotérmica e híbrida depende diretamente das condições climáticas e das propriedades térmicas do solo. O agreste pernambucano oferece uma boa disponibilidade de energia solar, o que é vantajoso para sistemas de dessalinização baseados em energia solar. Além disso, as características térmicas do solo, como sua condutividade e capacidade de armazenamento de calor, são essenciais para a viabilidade dos sistemas geotérmicos.

A combinação desses fatores nas diferentes localidades permite que as simulações no TRNSYS possam ser ajustadas para explorar as melhores configurações de cada sistema.

Cada cidade oferece condições climáticas e de solo distintas, e essa variabilidade será considerada na análise dos resultados, para entender qual tipo de configuração (solar, geotérmica ou híbrida) se adapta melhor às características de cada região. Assim, as soluções propostas podem ser customizadas e otimizadas de acordo com as especificidades locais.

3.5. CONFIGURAÇÕES DOS SISTEMAS DE DESSALINIZAÇÃO SOLAR

A dessalinização solar é uma das abordagens mais promissoras para regiões com alta incidência solar, como em parte do agreste pernambucano. No TRNSYS, essa tecnologia será modelada com o uso de coletores solares de tubo evacuado, que são dispositivos de alta eficiência para a captura de energia solar térmica. Esses coletores utilizam uma tecnologia avançada de isolamento para minimizar as perdas de calor, garantindo que uma grande quantidade de energia solar seja convertida em calor útil para o processo de dessalinização.

A simulação do sistema solar no TRNSYS incluirá parâmetros como: condições climáticas específicas de São João, que têm variações sazonais importantes de radiação solar e temperatura ambiente. O TRNSYS incorporará dados meteorológicos detalhados para simular com precisão como o sistema solar responde a essas mudanças; desempenho térmico dos coletores, calculando a quantidade de energia solar disponível para aquecer o fluido de trabalho, que por sua vez transferirá calor para o sistema de dessalinização.

O principal objetivo dessa simulação é avaliar a eficiência térmica dos coletores solares e a capacidade de fornecer calor suficiente para o processo de dessalinização.

As configurações analisadas para os sistemas de dessalinização solar foram organizadas em oito diferentes arranjos, conforme descrito a seguir. Nestas, os componentes utilizados incluem: PP (placa plana), TC (trocador de calor), STC (sem trocador de calor), CAA (com aquecedor auxiliar), SAA (sem aquecedor auxiliar), SR (sem retorno), CR (com retorno) e TE (tubo evacuado).

1. **Configuração I:** PP + TC + SAA + SR
2. **Configuração II:** PP + TC + CAA + SR
3. **Configuração III:** PP + STC + SAA + CR
4. **Configuração IV:** PP + STC + CAA + CR
5. **Configuração V:** PP + STC + SAA + SR
6. **Configuração VI:** PP + STC + CAA + SR

7. Configuração VII: TE + STC + SAA + CR

8. Configuração VIII: TE + STC + CAA + CR

As configurações foram projetadas com o objetivo de avaliar o desempenho térmico e a eficiência energética de cada arranjo, considerando diferentes condições de operação e componentes. A análise comparativa entre as configurações busca identificar a solução mais eficiente e viável para sistemas de dessalinização solar em regiões de escassez hídrica. Todos os sistemas funcionarão no período das cinco horas até às 17h. Para melhor compreensão das configurações segue a Tabela 5.

As configurações foram projetadas com o objetivo de avaliar o desempenho térmico e a eficiência energética de cada arranjo, considerando diferentes condições de operação e componentes. A análise comparativa entre as configurações busca identificar a solução mais eficiente e viável para sistemas de dessalinização solar em regiões de escassez hídrica. Todos os sistemas funcionarão no período das cinco horas até às 17h.

Tabela 5 – Componentes Utilizados

Sigla	Definição	Função
PP	Placa Plana	Coletor solar plano utilizado para capturar e converter a radiação solar em energia térmica.
TC	Trocador de Calor	Dispositivo projetado para maximizar a transferência de calor entre os fluidos do sistema.
STC	Sem Trocador de Calor	Configuração na qual o sistema não possui trocador de calor no circuito térmico.
CAA	Com Aquecedor Auxiliar	Inclui uma fonte de calor auxiliar para atender demandas térmicas adicionais.
SAA	Sem Aquecedor Auxiliar	Depende exclusivamente da energia solar, sem o suporte de uma fonte auxiliar de aquecimento.
SR	Sem Retorno	Sistema em que o fluido não é recirculado após seu uso inicial.
CR	Com Retorno	Configuração que incorpora recirculação de fluido para melhorar o aproveitamento térmico.
TE	Tubo Evacuado	Coletor solar baseado em tubos evacuados, otimizando a eficiência na absorção de energia solar.

3.5.1. Configuração I

Em um sistema de dessalinização solar indireto, a energia solar é utilizada para gerar calor, que por sua vez é empregado para aquecer a água e facilitar o processo de dessalinização sem contato direto entre o coletor solar e a água salgada. Isso ajuda a minimizar a corrosão e o acúmulo de sais nos componentes solares.

3.5.1.1. Componentes e Layout

- i. Coletor Solar: Responsável por captar a energia solar e converter em calor, que é transferido para o fluido de transferência de calor.
- ii. Bomba Hidráulica (na entrada do tanque de armazenamento): Movimenta o fluido de transferência de calor através do sistema, garantindo que o calor capturado pelo coletor solar seja eficientemente transportado até o aquecedor auxiliar.
- iii. Aquecedor Auxiliar: Utiliza o calor do fluido para aquecer a água salobra em um processo controlado, maximizando a transferência de calor sem ebulição, preparando a água para a dessalinização.
- iv. Tanque de Armazenamento: Armazena a água salobra aquecida temporariamente antes do processo de dessalinização.
- v. Torre de Resfriamento: Utilizada para dissipar o calor residual do fluido de transferência de calor após passar pelo aquecedor auxiliar, mantendo a eficiência térmica do sistema.
- vi. Bomba Hidráulica (na saída do coletor solar): Garante a circulação contínua do fluido de transferência de calor, retornando-o para o coletor solar para reaquecimento.

3.5.1.2. Metodologia de Operação

- i. Captação e Transferência de Calor: O coletor solar capta a radiação solar e aquece o fluido de transferência de calor. Este fluido é então bombeado para o aquecedor auxiliar.
- ii. Aquecimento da Água Salobra: É aquecido através da serpentina e do coletor. No aquecedor auxiliar (presente na Configuração II), o calor é transferido do fluido para a água salobra, aumentando sua temperatura de forma controlada.

iii. Armazenamento e Resfriamento: A água aquecida é armazenada temporariamente no tanque de armazenamento. O fluido de transferência de calor, agora mais frio, é enviado para a torre de resfriamento.

iv. Coil: o vapor na saída do tanque de armazenamento passa para o estado líquido.

Resumindo a primeira configuração, a água salobra é introduzida em um tanque de armazenamento, onde é aquecida por meio de troca térmica com a água circulante em um trocador de calor. O aquecimento é promovido por um coletor solar de placa plana, responsável por fornecer a energia térmica necessária ao processo.

O vapor gerado no tanque é direcionado para uma torre de condensação, onde ocorre a remoção do calor latente de vaporização, permitindo a transformação do vapor em água no estado líquido. Posteriormente, o fluido passa por um sistema de resfriamento adicional, no *coil*, garantindo que a água seja completamente dessalinizada e pronta para o consumo ou outros usos. Na Figura 6 há o esquema de forma mais didático enquanto na Figura 7 tem-se a configuração no TRNSYS.

Figura 6 – Layout – Configuração I

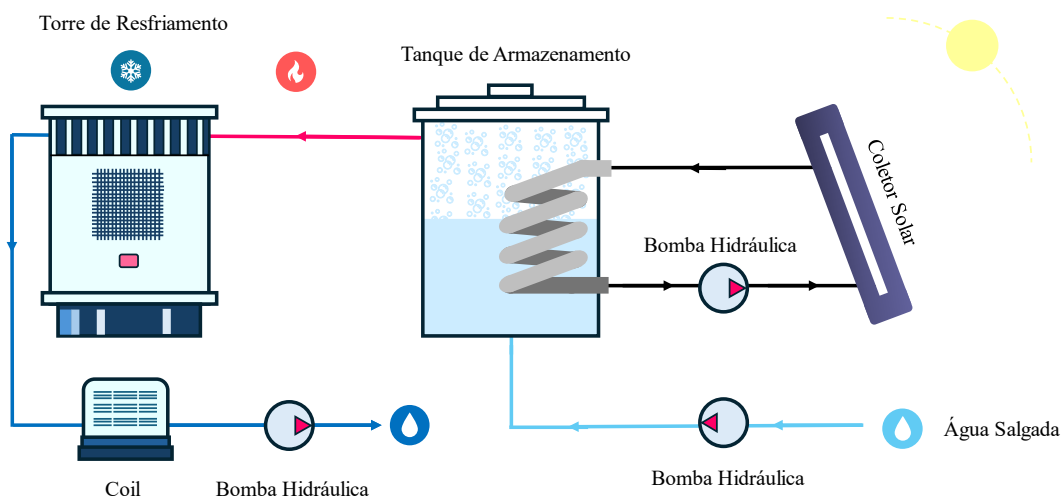
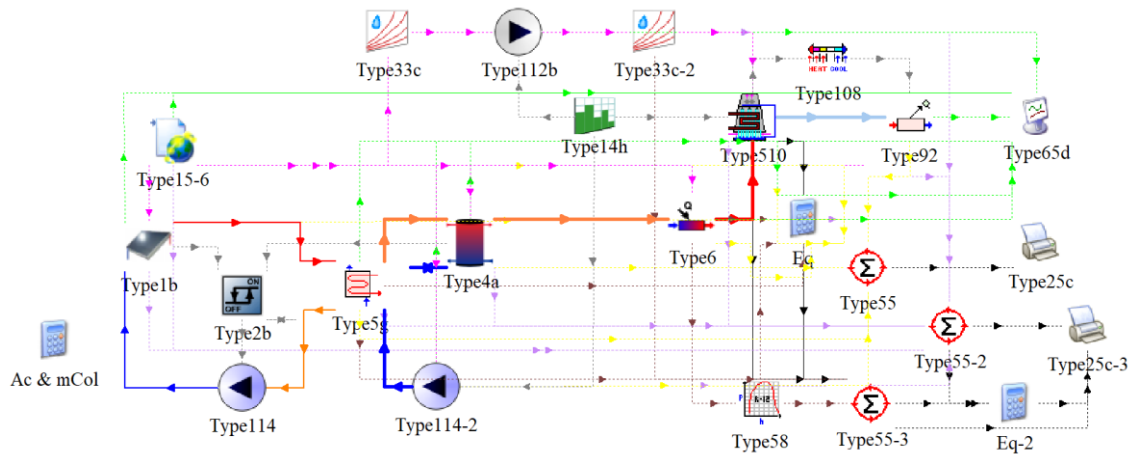


Figura 7 – Configuração I – TRNSYS



3.5.2. Configuração II

Na Configuração II, o sistema de dessalinização incorpora a presença de um aquecedor auxiliar para complementar o aquecimento da água salobra no tanque de armazenamento. Nesse arranjo, além do aquecimento promovido pelo trocador de calor acoplado ao coletor solar de placa plana, o aquecedor auxiliar é ativado em momentos de insuficiência de energia solar, garantindo a continuidade do processo de aquecimento da água.

A inclusão do aquecedor auxiliar é fundamental para superar a intermitência inerente à energia solar, especialmente em dias nublados, chuvosos ou durante períodos noturnos. Ele assegura que o sistema opere de maneira confiável ao longo de todo o ciclo anual, independente das condições climáticas. Além disso, a utilização do aquecedor evita flutuações significativas na temperatura da água, assegurando uma produção consistente de vapor para a dessalinização.

Figura 8 – Layout – Configuração II

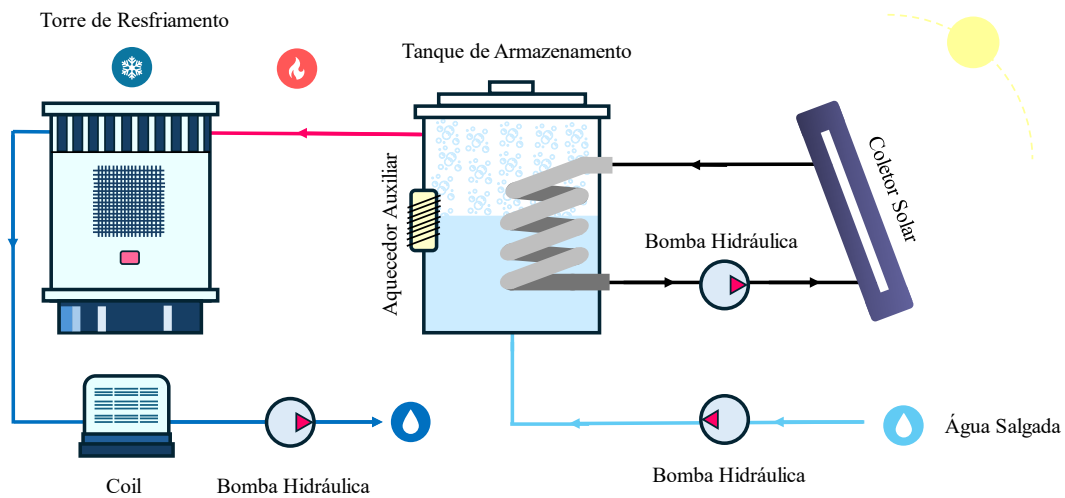
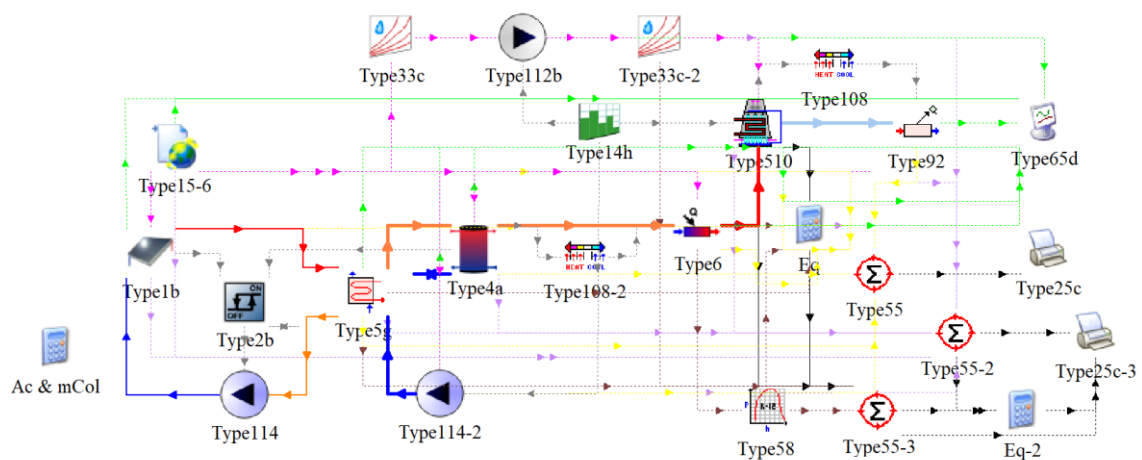


Figura 9 – Configuração II – TRNSYS



3.5.3. Configuração III

Na Configuração III, é introduzida uma zona de retorno ao sistema. Nessa configuração, a água em estado líquido, proveniente da torre de resfriamento, é recirculada para o tanque de armazenamento. Esse retorno permite a reutilização da água no processo, otimizando o aproveitamento do recurso e minimizando desperdícios. Além disso é retirado a serpentina de tal forma que agora se trata de um fluxo direto entre o tanque e o coletor.

Figura 10 – Layout – Configuração III

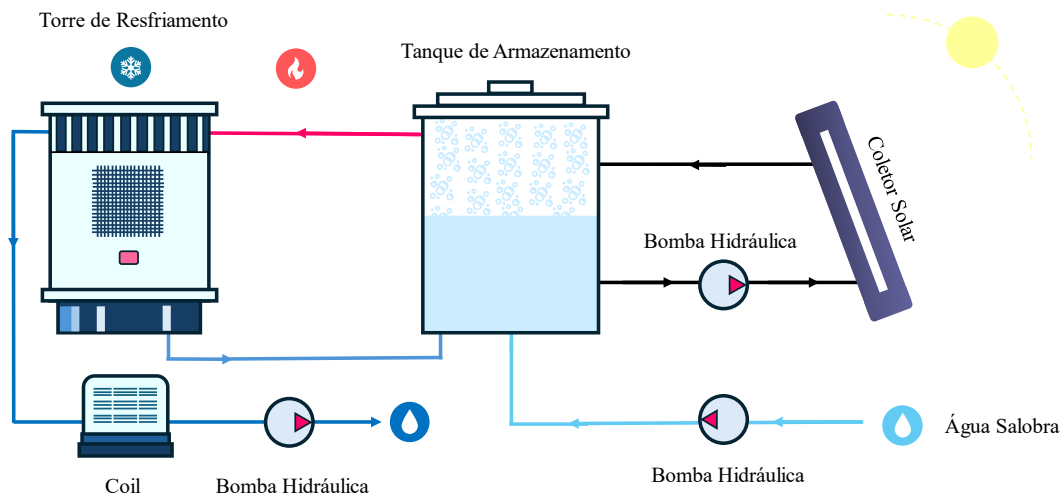
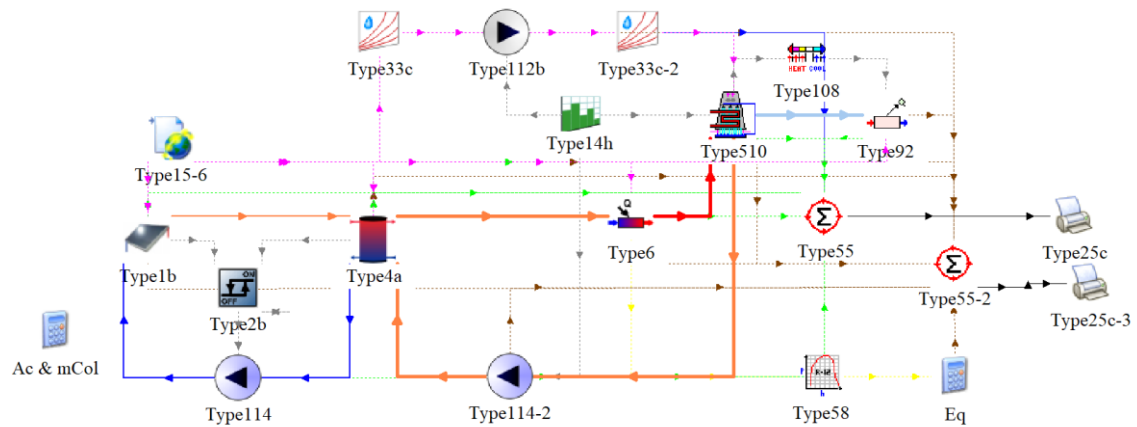


Figura 11– Configuração III – TRNSYS



3.5.4. Configuração IV

A Configuração IV baseia-se na Configuração III, com a adição de um aquecedor auxiliar ao sistema. Essa modificação permite complementar o aquecimento da água, garantindo a continuidade e a eficiência do processo

Figura 12 – Layout – Configuração IV

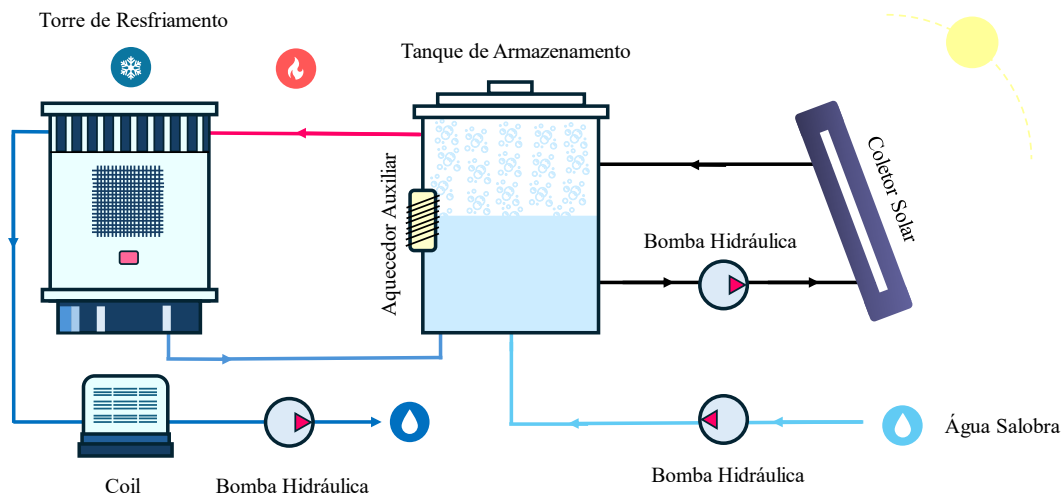
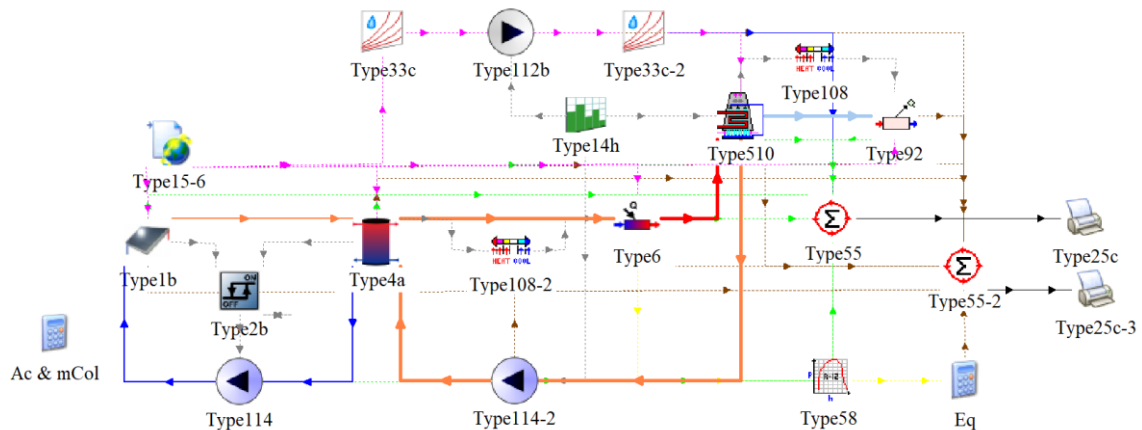


Figura 13 – Configuração IV – TRNSYS



3.5.5. Configuração V

A Configuração V é derivada da Configuração I, porém sem a inclusão da serpentina, resultando em um sistema de fluxo direto, semelhante ao adotado na Configuração III. Essa modificação simplifica o arranjo do sistema, eliminando a necessidade de um trocador de calor interno, enquanto mantém a eficiência operacional por meio do aquecimento direto da água salobra no tanque.

Figura 14 – Layout – Configuração V

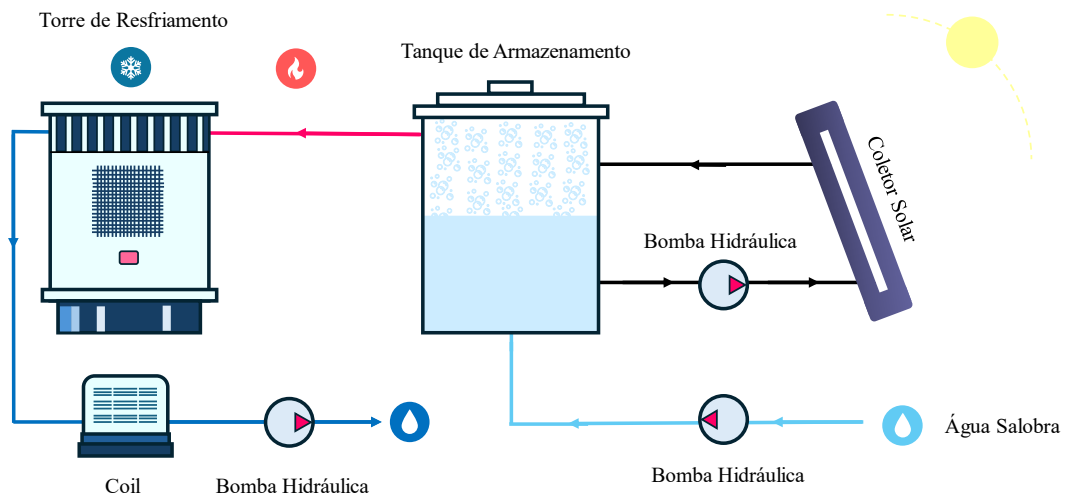
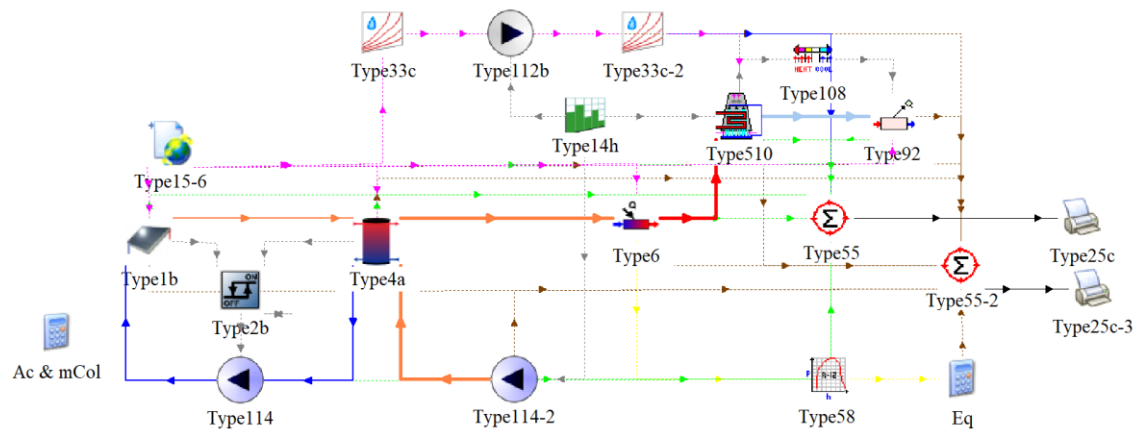


Figura 15 – Configuração V - TRNSYS



3.5.6. Configuração VI

A Configuração VI é uma extensão da Configuração V, com a adição de um aquecedor auxiliar para complementar o aquecimento do sistema.

Figura 16 – Layout – Configuração VI

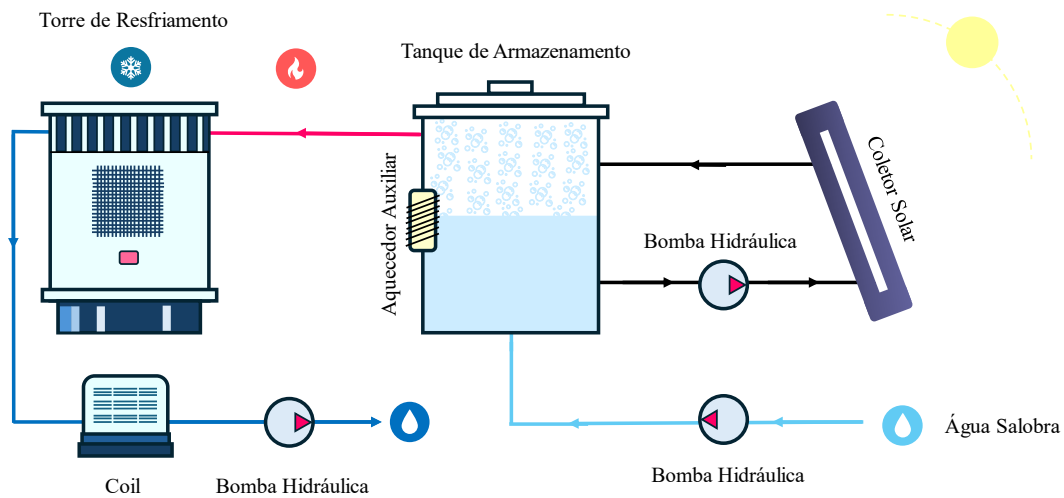
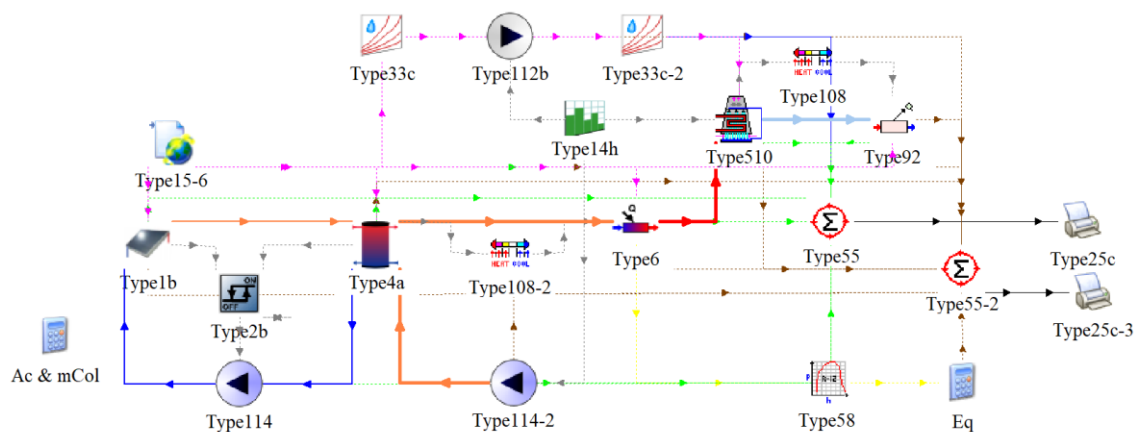


Figura 17 – Configuração VI – TRNSYS



As especificações dos principais componentes dos sistemas estão apresentadas nos quadros a seguir.

Tabela 6 – Parâmetros dos componentes no TRSNYS

Type 1b – Coletor de Placa Plana		
Name	Value	Unit
Number in series	1	—
Collector area	AC	m^2
Fluid specific heat	4.190	$kJ/kg \cdot K$
Efficiency mode	1.0	—

Tested flow rate	40.0	$kg/hr \cdot m^2$
Intercept efficiency	0.7	—
Efficiency slope	13.0	$kg/h \cdot m^2 \cdot K$
Efficiency curvature	0.05	$kg/h \cdot m^2 \cdot K^2$
Optical mode 2	2	—
1st – order IAM	0.2	—
2nd – order IAM	0.0	—
Type 2b		
No. of oscillations	5.0	—
High limit cut-out	100.0	°C
Type 114 – Bomba Hidráulica		
Fluid specific heat	4.19	$kJ/kg \cdot K$
Rated power	2684.0	kJ/h
Motor heat loss fraction	0.0	—
Type 114 – 2 Bomba Hidráulica		
Fluid specific heat	3.93	$kJ/kg \cdot K$
Rated power	2684.0	kJ/h
Motor heat loss fraction	0.0	—
Type 5g – Trocador de Calor		
Shell and tube mode	7.0	—
Specific heat of source side fluid	3.93	$kJ/kg \cdot K$
Specific heat of load side fluid	4.19	$kJ/kg \cdot K$
Number of shell passes	1.0	—
Type 4a – Tanque de Armazemanto		
Fixed inlet positions	1.0	—
Tank volume	0.3	m^3
Fluid specific heat	3.93	$kJ/kg \cdot K$
Fluid density	1027.0	kg/m^3
Tank loss coefficient	3.0	$kJ/h \cdot m^2 \cdot K$
Height of node-1	0.05	m
Height of node-2	0.05	m
Height of node-3	0.05	m
Height of node-4	0.05	m

Height of node-5	0.05	<i>m</i>
Auxiliary heater mode	1.0	—
Node containing heating element 1	1.0	—
Node containing thermostat 1	1.0	—
Set point temperature for element 1	55.0	°C
Deadband for heating element 1	5.0	Δ°C
Node containing heating element 2	1.0	—
Node containing thermostat 2	1.0	—
Set point temperature for element 2	55.0	°C
Deadband for heating element 2	5.0	Δ°C
Maximum heating rate of element 2	16200.0	<i>kJ/hr</i>
Not used (Flue UA)	0.0	<i>W/K</i>
Not used (Tflue)	20.0	°C
Boiling point	100.0	°C
Type 108 – 2		
No of oscillations permitted	5.0	—
1st stage heating in 2nd stage?	1.0	—
2nd stage heating in 3rd stage?	1.0	—
1st stage heating in 3rd stage?	1.0	—
1st stage cooling in 2nd stage?	1.0	—
Temperature dead band	2.0	Δ°C
Type 6 – Aquecedor Auxiliar		
Maximum heating rate	300.0	<i>kW</i>
Specific heat of fluid	3.93	<i>kJ/kg · K</i>
Overall loss coefficient for heater during operation	0.0	<i>kJ/hr · K</i>
Efficiency of auxiliary heater	1.0	—
Type 510 – Torre de Resfriamento		
Humidity mode	2.0	—
Design inlet fluid temperature	90.0	°C
Design outlet fluid temperature	70.0	°C
Fluid specific heat	1.95	<i>kJ/kg · K</i>
Design ambient air temperature	30.0	°C

Design wet bulb temperature	20.0	°C
Design air flow rate	40	kg/h
Air pressure at design conditions	1.0	atm
Rated fan power	1.4914	kW
Number of power coefficients	3.0	—
Power coefficient-1	0.0	—
Power coefficient-2	0.0	—
Power coefficient-3	0.0	—
Type 108 – Coil		
No of oscillations permitted	5.0	—
1st stage heating in 2nd stage?	1.0	—
2nd stage heating in 3rd stage?	1.0	—
1st stage heating in 3rd stage?	1.0	—
1st stage cooling in 2nd stage?	1.0	—
Temperature dead band	2.0	Δ°C
Type 92 – Coil		
Maximum cooling rate	3.0	kW
Specific heat of fluid	4.19	kJ/kg · K
Overall loss coefficient	0.0	kJ/hr · K
Cooling device efficiency	1.0	—

Neste estudo, serão analisados a Fração Solar (F_r) o *Fresh Water Production* (FWP), o *Gain Output Ratio* (GOR) e o *Mass Ratio* (MR) como métricas fundamentais para avaliar o desempenho das diferentes configurações de dessalinização. O FWP será utilizado para mensurar a quantidade de água doce produzida, enquanto o GOR permitirá compreender a eficiência energética do sistema. Já o MR será avaliado para otimizar a relação entre as vazões de massa envolvidas no processo, garantindo uma operação térmica eficiente. Essas análises fornecerão uma base sólida para comparar as configurações e identificar as mais eficazes na produção sustentável de água dessalinizada.

A Fração Solar (F_r) é uma métrica amplamente utilizada para avaliar a contribuição da energia solar no atendimento às demandas energéticas de um sistema. Este indicador é calculado como a razão entre a energia útil fornecida pelo sistema solar e a energia total demandada, representando, portanto, a eficiência do aproveitamento da energia solar no

suprimento das necessidades energéticas do processo. Em sistemas de dessalinização solar, a fração solar é fundamental para determinar o impacto da radiação solar no desempenho do sistema, auxiliando na otimização de parâmetros como a área do coletor, o fluxo de água de alimentação e a configuração térmica. Além disso, a análise da fração solar permite compreender a viabilidade econômica e ambiental do sistema, evidenciando a redução na dependência de fontes de energia convencionais e as potencialidades do uso de recursos renováveis. A Fração Solar é dada pela Equação 7:

$$F_r = \frac{Q_{coletor}}{Q_{coletor} + Q_{AquecAux}} \quad (7)$$

A produção de água doce (*Fresh Water Production* – FWP) é uma métrica central na avaliação do desempenho de sistemas de dessalinização. Representa a quantidade de água dessalinizada gerada em um intervalo de tempo e é utilizada para quantificar a eficácia do sistema em transformar água salobra ou salgada em água potável. A FWP é amplamente influenciada por fatores como a temperatura da água de entrada, a intensidade da radiação solar, a área do coletor solar e as características do sistema, como o tipo de ciclo térmico ou híbrido utilizado.

Estudos indicam que o aumento da temperatura de entrada e a otimização do fluxo de massa de ar e água podem elevar significativamente a FWP [172, 173]. Configurações que integram coletores solares parabólicos compostos ou sistemas multiestágio, como o MED (*Multi-Effect Distillation*), têm demonstrado ser particularmente eficazes na maximização da produção de água doce, utilizando o calor residual para melhorar a eficiência térmica [174]. Além disso, sistemas que incorporam armazenamento térmico conseguem manter a estabilidade da produção mesmo em condições de baixa insolação, garantindo maior confiabilidade no fornecimento de água doce [175]. FWP é dada pela Equação 8:

$$FWP = \frac{\dot{V}_{\text{Água Dessalinizada}}}{\dot{V}_{\text{Água Salobra}}} \quad (8)$$

O *Gain Output Ratio* (GOR) é uma métrica de eficiência energética amplamente utilizada em sistemas de dessalinização térmica. Ele expressa a quantidade de água doce produzida em relação à energia térmica fornecida ao sistema, sendo um indicador essencial para avaliar a performance de diferentes tecnologias e configurações. O GOR é particularmente relevante em sistemas que combinam energia solar com outras fontes, como energia geotérmica ou armazenamento térmico, permitindo uma avaliação integrada da eficiência energética.

A maximização do GOR está diretamente ligada à recuperação e reutilização do calor residual no sistema [172, 174]. Em configurações multiestágio, o reaproveitamento do calor em estágios subsequentes pode resultar em valores elevados de GOR, demonstrando a eficiência do uso energético [173]. Além disso, estudos revelam que o ajuste da vazão de ar e água, bem como a temperatura de entrada, impactam significativamente o GOR. Por exemplo, sistemas baseados em ciclos de umidificação e desumidificação (HDH) podem atingir valores elevados de GOR quando configurados adequadamente [172]. A Equação 9 faz referência ao GOR:

$$GOR = \frac{FWP \cdot h_{fg}}{Q_{coletor} + Q_{AquecAux}} \quad (9)$$

O *Mass Ratio* (MR), ou relação de massa, refere-se à proporção entre as vazões de massa dos diferentes componentes envolvidos no processo de dessalinização, como a relação entre a vazão de água salgada e a de ar em sistemas baseados em umidificação e desumidificação (HDH). Essa métrica é fundamental para otimizar o desempenho do sistema, pois regula a interação entre os fluxos de calor e massa durante o processo de evaporação e condensação.

Estudos demonstram que o ajuste do MR pode impactar significativamente a eficiência do sistema e a produção de água doce [172, 173]. Um MR inadequado pode resultar em subutilização do calor disponível ou em taxas de evaporação insuficientes, comprometendo a eficiência térmica e o GOR. Por outro lado, proporções otimizadas garantem uma troca térmica eficiente e uma maximização da produção de água dessalinizada [175]. Em sistemas de dessalinização híbridos, que combinam fontes solares e geotérmicas, o MR desempenha um papel crítico na distribuição de energia térmica entre os componentes [174]. MR é expressa através da Equação 10:

$$MR = \frac{\dot{V}_{\text{ÁguaSalobra}}}{\dot{V}_{\text{ÁguaDessalinizada}}} \quad (10)$$

Devido à intermitência característica da geração de energia solar térmica e à necessidade de avaliar o desempenho do sistema ao longo de um ciclo anual, foi definido o Fator de Utilização Solar (*Solar Utilization Factor* – SUF). Este parâmetro quantifica a eficiência na conversão da energia solar disponível em capacidades térmicas úteis para aquecimento e resfriamento, com aplicação direta na geração de vapor. O SUF é matematicamente expresso pela relação entre a energia térmica útil fornecida pelos sistemas auxiliares de aquecimento ou resfriamento e a energia solar útil captada pelo sistema solar térmico ao longo de um ano, conforme descrito na Equação 11:

$$SUF = \frac{\int_0^{8760} \dot{Q}_{AquecAux} dt + \int_0^{8760} \dot{Q}_{torre} dt + \int_0^{8760} \dot{Q}_{coil} dt}{A_c \cdot \int_0^{8760} H_t dt} \quad (11)$$

Onde H_t é a irradiação solar total incidente sobre o plano do coletor (kWh/m²), representando a energia acumulada da radiação solar durante o período de análise. Este parâmetro considera variações temporais, tanto diurnas quanto sazonais, que impactam diretamente o desempenho do sistema [176].

Além dessas variáveis será analisada a energia térmica envolvida nos principais componentes dos sistemas

3.4. GEOTÉRMICO

A dessalinização geotérmica utiliza o calor armazenado no solo para aquecer o fluido de trabalho. Esse tipo de sistema é particularmente vantajoso em regiões onde a temperatura do solo se mantém relativamente constante, mesmo durante a noite ou em dias nublados. No TRNSYS, o sistema geotérmico será modelado considerando o uso de tubos evacuados, nos quais o fluido de trabalho circula em baixas profundidades

A simulação da dessalinização geotérmica incluirá: propriedades térmicas do solo, como condutividade térmica, difusividade térmica e capacidade térmica, obtidas de medições específicas da região de estudo. Esses parâmetros são fundamentais para determinar a quantidade de calor que pode ser extraída do solo; variáveis de profundidade, onde o TRNSYS permitirá simular a extração de calor de diferentes profundidades, para avaliar qual configuração maximiza a transferência de calor. Temperaturas sazonais do solo, utilizando dados meteorológicos para modelar como a temperatura do solo varia ao longo do tempo e como isso impacta a eficiência do sistema geotérmico.

O principal foco dessa simulação é determinar a quantidade de calor disponível no solo e como ele pode ser utilizado de forma eficiente no processo de dessalinização.

Será utilizada como base a melhor configuração de dessalinização solar previamente analisada para viabilizar a implementação da dessalinização geotérmica. O sistema será avaliado em diferentes profundidades, empregando no TRNSYS o coletor definido pelo Type 559, sendo o material principal utilizado o policloreto de vinila (PVC), em contraste com a configuração solar, que utilizou cobre como material base. Para a definição dos parâmetros térmicos do solo, será empregado o Type 77, que utiliza como referência a Equação 12 para modelar as propriedades térmicas e o comportamento energético do solo.

$$T = T_{mean} - T_{amp} \exp\left(-depth \left(\frac{\pi}{365\alpha}\right)^{0.5}\right) \cos\left(\frac{2\pi}{365}\left(t_{now} - t_{shift} - \frac{depth}{2}\left(\frac{365}{\pi\alpha}\right)^{0.5}\right)\right)$$

Em que α é a difusividade térmica do solo dada pela Equação 13:

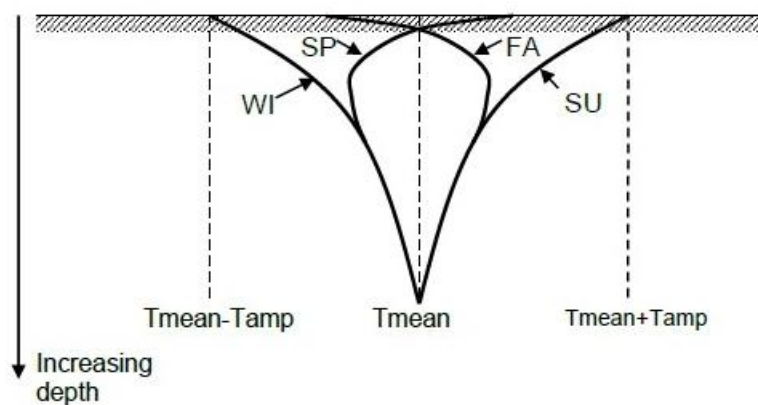
$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (13)$$

no qual k é a condutividade térmica do solo, ρ a densidade e c_p o calor específico do solo

Tabela 7 – Descrição das variáveis

Símbolo	Unidade	Descrição
T	°C	Temperatura
T_{mean}	°C	Temperatura média da superfície (temperatura média do ar)
T_{amp}	°C	Amplitude da temperatura da superfície (temperatura máxima do ar menos temperatura média do ar)
$Depth$	m	Profundidade abaixo da superfície
α	m^2/day	Difusividade térmica do solo
t_{now}	day	Dia atual do ano
t_{shift}	day	Dia do ano correspondente à temperatura mínima da superfície
$t_{initial}$	°C	Temperatura inicial

Figura 18 – Distribuição da temperatura do solo em função da profundidade



3.6. SISTEMA HÍBRIDO

A dessalinização híbrida é uma abordagem inovadora que combina as vantagens dos sistemas solar e geotérmico, criando uma solução integrada capaz de maximizar a produção de água potável a partir de fontes de calor renováveis. Essa integração permite explorar o potencial complementar dessas duas tecnologias, utilizando a energia solar para aproveitar os períodos de maior radiação e o calor geotérmico para fornecer um suporte contínuo, mesmo em condições climáticas adversas. No TRNSYS, essa configuração híbrida será modelada com precisão, permitindo sincronizar o uso de energia solar e geotérmica de forma eficiente e adaptativa, garantindo que a demanda por calor seja atendida de maneira consistente e sustentável ao longo do tempo.

A simulação do sistema híbrido no TRNSYS será detalhada e abrangerá a integração dos recursos térmicos provenientes do sol e do subsolo. O software permitirá modelar as interações e complementaridades entre os dois sistemas, analisando como o calor geotérmico pode atuar como uma fonte de base e como a energia solar pode contribuir significativamente durante os períodos de alta disponibilidade de radiação. Essa interação dinâmica será essencial para compreender o funcionamento do sistema em diferentes condições operacionais e climáticas.

O principal objetivo dessa simulação é avaliar detalhadamente o desempenho de um sistema híbrido que combine as melhores características dos métodos solar e geotérmico. A expectativa é que essa solução integrada ofereça uma alternativa robusta e resiliente para o abastecimento de água no agreste pernambucano, uma região conhecida por sua escassez hídrica e desafios climáticos. Além disso, busca-se explorar a capacidade do sistema híbrido de maximizar a eficiência energética, reduzindo ao mesmo tempo os custos operacionais e as emissões de gases de efeito estufa, tornando-o uma solução ambientalmente sustentável e economicamente viável. O sistema híbrido tem o potencial de se estabelecer como uma alternativa pioneira e eficiente para enfrentar os desafios hídricos da região, destacando-se como uma contribuição significativa para a gestão de recursos hídricos no contexto do agreste pernambucano.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. CONFIGURAÇÃO I

A Figura 19 ilustra o comportamento do Fator de Utilização Solar (SUF) em função da área do coletor solar para três diferentes vazões de água salobra (100, 150 e 200 kg/h). Essa análise permite compreender como o SUF, uma métrica fundamental na avaliação de sistemas de dessalinização solar, responde a alterações nos parâmetros geométricos (área) e operacionais (vazão) do sistema.

Observa-se uma relação inversa entre o SUF e a área do coletor solar para todas as vazões analisadas. Em áreas menores (5 m²), o SUF apresenta valores elevados, refletindo uma maior eficiência relativa do sistema. À medida que a área do coletor aumenta, o SUF diminui de forma não linear, evidenciando uma redução na utilização eficiente da energia solar captada. Esse comportamento é atribuído ao fato de que, com o aumento da área, a energia captada excede a demanda energética do sistema, reduzindo proporcionalmente o aproveitamento efetivo.

Para a menor vazão analisada (100 kg/h), os valores de SUF variam de aproximadamente 0,70 para uma área de 5 m² a 0,17 para 45 m². Esse declínio significativo reflete a baixa demanda energética associada a menores vazões, o que leva a uma saturação na utilização da energia captada por áreas maiores. Esse resultado sugere que, para sistemas operando em vazões mais baixas.

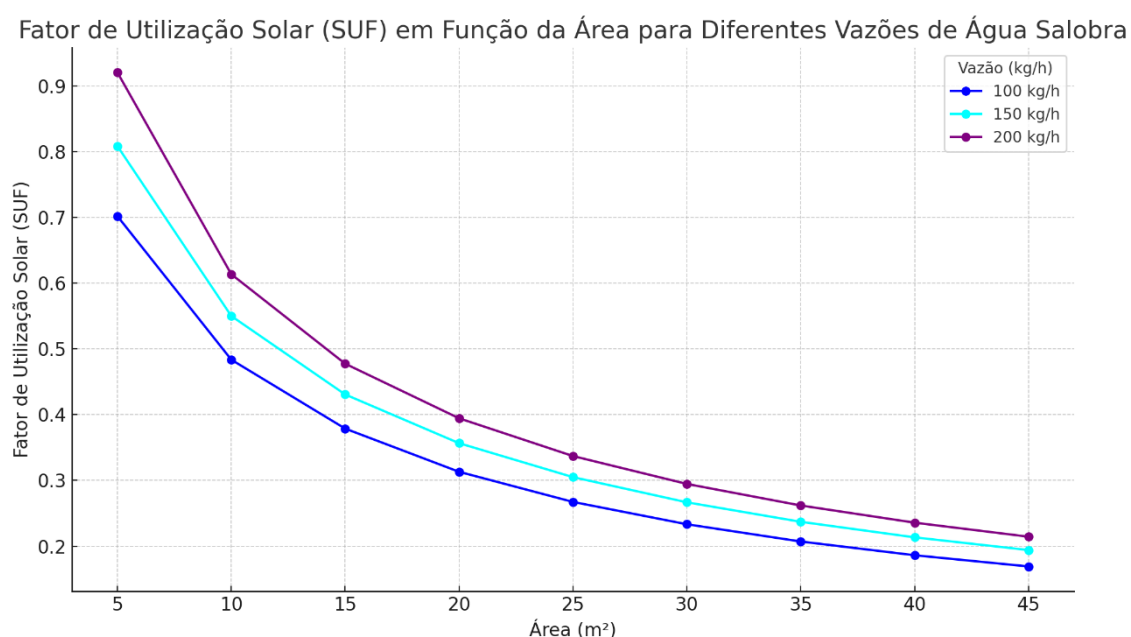
Com o aumento da vazão para 150 kg/h, o SUF mantém uma tendência decrescente, porém com valores mais elevados em comparação à vazão de 100 kg/h. Para uma área de 5 m², o SUF é de 0,81, enquanto para 45 m² reduz-se para 0,19. Esse comportamento reflete a maior demanda energética do sistema, que possibilita uma melhor utilização da energia captada por áreas maiores. No entanto, o declínio do SUF com o aumento da área reforça a necessidade de um equilíbrio entre a área do coletor e a vazão.

Para a maior vazão analisada (200 kg/h), o SUF alcança os maiores valores absolutos para áreas pequenas, iniciando em aproximadamente 0,92 para 5 m² e reduzindo-se para 0,21 em 45 m². Esse resultado é consistente com o aumento da demanda energética do sistema, o que maximiza o aproveitamento da energia solar captada em áreas menores. Contudo, o mesmo padrão de declínio do SUF com o aumento da área permanece evidente, indicando

que mesmo em altas vazões, a eficiência relativa do sistema é comprometida para áreas excessivamente grandes.

A comparação entre as três vazões revela que sistemas operando em maiores vazões apresentam maior SUF para todas as áreas analisadas. Isso ocorre porque a maior demanda energética resulta em uma maior utilização proporcional da energia solar captada, especialmente em áreas pequenas. Por outro lado, para áreas maiores, o declínio do SUF é mais acentuado nas menores vazões, evidenciando uma maior sensibilidade à saturação energética.

Figura 19 – SUF em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra



A Figura 20 ilustra a relação entre o FWP e a área do coletor solar para três diferentes vazões de água salobra: 100, 150 e 200 kg/h. O FWP é uma métrica fundamental para avaliar a eficiência de sistemas de dessalinização solar, indicando a fração de água doce produzida em função da energia solar disponível. À medida que a área do coletor aumenta, o gráfico evidencia um comportamento de crescimento quase linear do FWP para todas as vazões analisadas. Este crescimento pode ser atribuído ao aumento da energia captada pela maior superfície disponível, que resulta em maior produção de água doce.

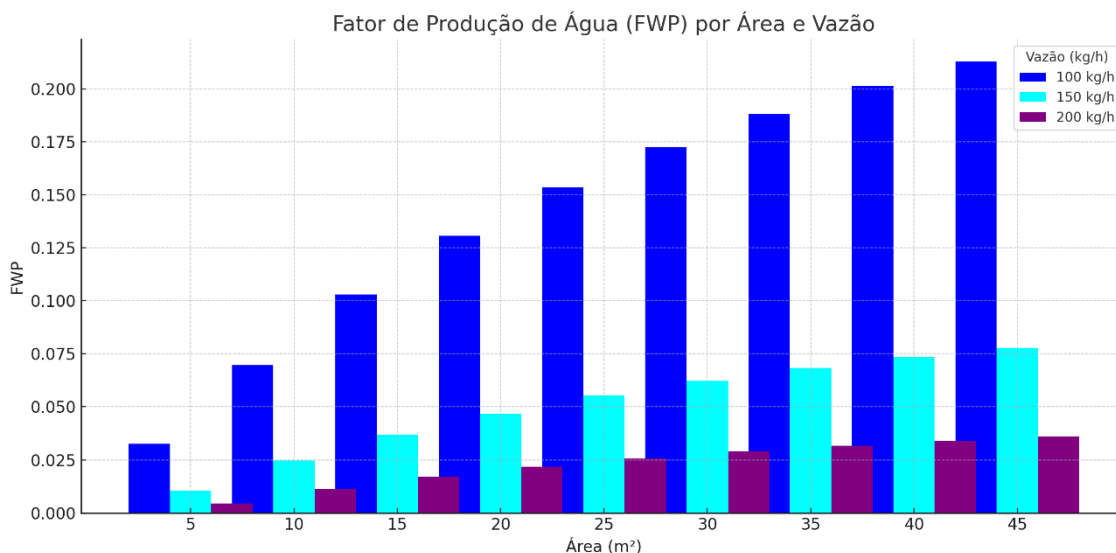
Para a vazão de 100 kg/h, o FWP apresenta os maiores valores em todas as áreas analisadas. Isso ocorre porque a menor vazão implica em uma menor demanda hídrica, permitindo um maior aproveitamento relativo da energia captada pelo coletor. Para áreas de 5 m², o FWP inicia em aproximadamente 0,03 e cresce consistentemente, atingindo cerca de 0,21 para uma área de 45 m². Esse comportamento demonstra que, para menores vazões, a

utilização de áreas maiores continua a incrementar significativamente a produção de água doce, sem sinais evidentes de saturação dentro do intervalo analisado.

Na vazão de 150 kg/h, observa-se uma redução do FWP em relação à vazão de 100 kg/h, com valores iniciais próximos de 0,01 para 5 m², alcançando aproximadamente 0,08 para 45 m². Essa diminuição reflete a maior demanda hídrica associada à vazão intermediária, que reduz a eficiência relativa do sistema em converter energia solar em água doce. Contudo, o comportamento linear do FWP com o aumento da área do coletor sugere que sistemas operando nessa vazão podem continuar a se beneficiar de áreas maiores para atender às demandas energéticas do processo de dessalinização.

Para a maior vazão analisada, 200 kg/h, o FWP apresenta os menores valores absolutos, iniciando em cerca de 0,004 para 5 m² e atingindo aproximadamente 0,036 para 45 m². Essa redução significativa é atribuída à alta demanda hídrica do sistema, que supera a capacidade do coletor solar em fornecer energia suficiente para maximizar a produção de água doce. Embora o FWP continue a crescer com o aumento da área, os incrementos são menores em comparação às vazões mais baixas, evidenciando um efeito de saturação energética mais pronunciado para vazões elevadas.

Figura 20 – FWP em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra



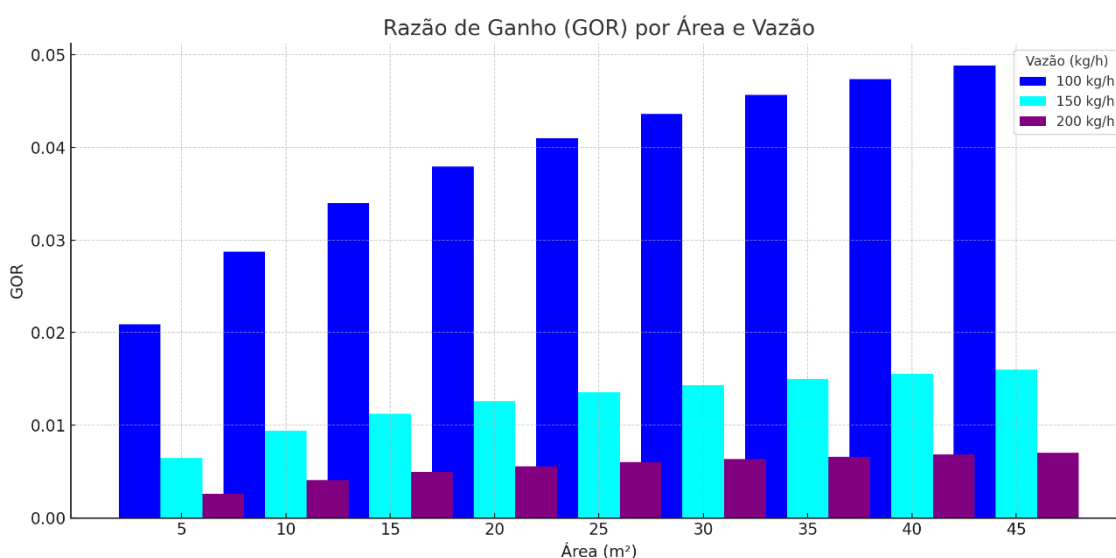
A Figura 21 demonstra a relação entre o GOR e a área do coletor solar para três diferentes vazões de água salobra: 100, 150 e 200 kg/h. A GOR, que mede a eficiência termodinâmica do sistema ao relacionar a quantidade de água doce produzida com a energia

térmica utilizada, apresenta um comportamento crescente em função da área para todas as vazões analisadas. No entanto, o impacto desse crescimento varia consideravelmente conforme a vazão, com sistemas de menor vazão exibindo valores absolutos mais elevados e maior sensibilidade ao aumento da área do coletor.

Para a menor vazão, 100 kg/h, os valores de GOR são os mais altos em todo o intervalo de áreas estudado, variando de aproximadamente 0,021 para 5 m² até 0,049 para 45 m². Esse resultado reflete a maior eficiência do sistema em situações de menor demanda energética, onde a energia térmica captada pelo coletor é proporcionalmente mais aproveitada no processo de dessalinização. Além disso, o crescimento constante do GOR com o aumento da área destaca a contribuição direta de coletores maiores para melhorar a eficiência global em sistemas com baixa vazão.

A vazão intermediária, 150 kg/h, apresenta valores de GOR mais modestos, oscilando entre cerca de 0,006 e 0,016 no intervalo analisado. Embora o padrão de crescimento com a área do coletor persista, o incremento da GOR é menos expressivo em comparação com a vazão de 100 kg/h. Essa diferença se deve à maior quantidade de energia exigida pelo sistema para lidar com o aumento da vazão, o que reduz a eficiência termodinâmica relativa. Ainda assim, o aumento da área continua a trazer benefícios ao desempenho do sistema, mas em um ritmo menos acentuado.

Figura 21 – GOR em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra



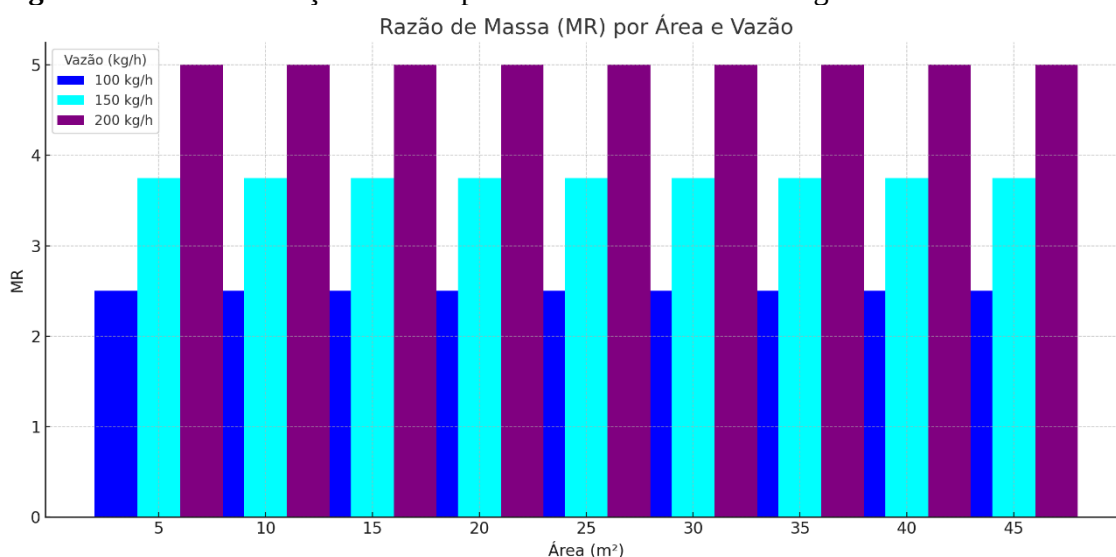
A Figura 22 mostra MR em função da área do coletor para três vazões diferentes: 100, 150 e 200 kg/h. A MR, que indica a relação entre a massa de vapor gerado e a massa de água

alimentada no sistema, é um parâmetro essencial para entender o desempenho dos sistemas de dessalinização em diferentes condições operacionais.

O comportamento observado no gráfico evidencia que a MR permanece constante para cada vazão ao longo de todas as áreas analisadas. Para a vazão de 100 kg/h, o valor da MR é consistentemente 2,5, indicando que, para essa vazão, o sistema gera uma quantidade fixa de vapor proporcional à massa de água alimentada, independentemente da área do coletor. De maneira semelhante, para as vazões de 150 kg/h e 200 kg/h, a MR permanece em 3,75 e 5,0, respectivamente, ao longo de todas as áreas do coletor.

Esse comportamento constante reflete a natureza intrínseca da MR como uma razão puramente dependente da vazão do sistema e não diretamente influenciada pela área do coletor solar. Em sistemas de dessalinização, a área do coletor influencia a quantidade de energia térmica captada, mas a relação entre o vapor gerado e a água alimentada é governada pela dinâmica termodinâmica interna do sistema, que é mais dependente das condições de operação, como vazão, temperatura e pressão, do que da área.

Figura 22 – MR em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra



A Figura 23 demonstra claramente o aumento da energia coletada em função da área do coletor solar para diferentes vazões de água salobra: 100, 150 e 200 kg/h. Esse comportamento reflete a natureza proporcional da captação de energia solar, onde uma maior área do coletor resulta em um maior potencial de absorção de radiação solar, independentemente da vazão analisada.

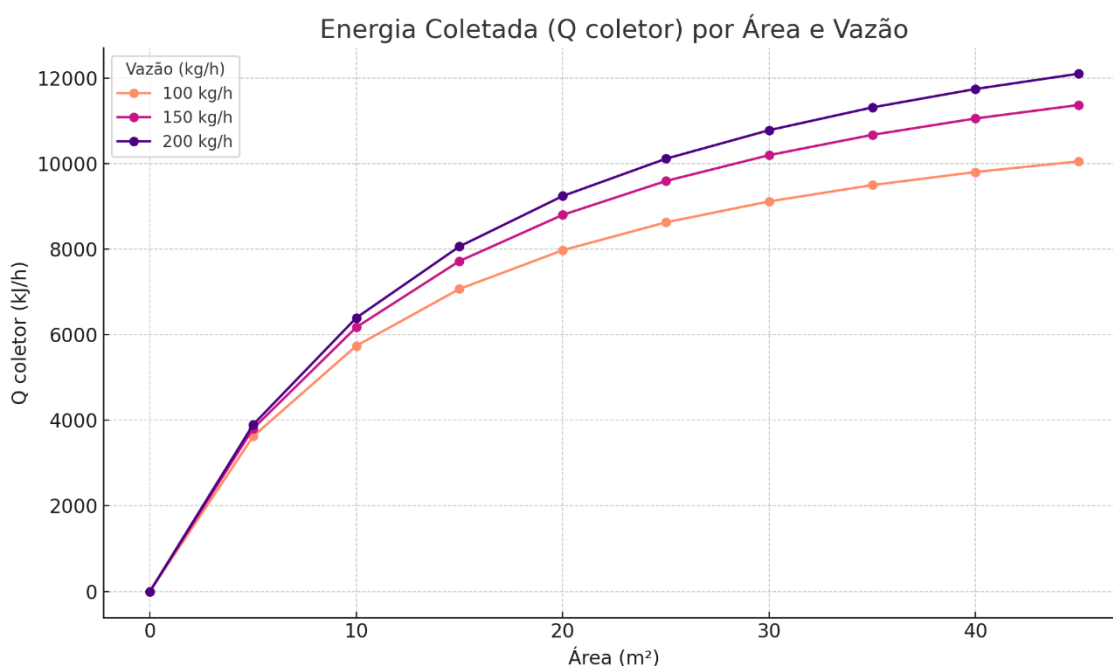
Para a vazão de 100 kg/h, a energia coletada cresce de aproximadamente 3.622 kJ/h para 5 m² até 10.053 kJ/h para 45 m². Esses valores mais baixos, em comparação às demais

vazões, estão relacionados à menor quantidade de água processada, que demanda menos energia térmica. Esse cenário evidencia que sistemas de menor vazão operam de forma eficiente mesmo com áreas reduzidas de coletor, mas também continuam a se beneficiar de áreas maiores, dado que o aumento de Q_{coletor} é constante com o crescimento da área.

A vazão intermediária, 150 kg/h, apresenta valores mais elevados, com Q_{coletor} variando entre 3.806 kJ/h para 5 m² e 11.371 kJ/h para 45 m². Essa vazão requer uma quantidade maior de energia para o aquecimento e evaporação da água, o que se traduz em uma maior dependência do coletor solar para suprir essa demanda. O aumento do Q_{coletor} com a área indica que o sistema responde bem ao incremento de captação, mostrando que áreas maiores são adequadas para atender ao aumento da vazão sem comprometer a eficiência térmica do processo.

Já para a vazão de 200 kg/h, os valores de Q_{coletor} são os mais altos entre as vazões analisadas, variando de cerca de 3.897 kJ/h para 5 m² a 12.102 kJ/h para 45 m². Esse aumento expressivo destaca a capacidade do sistema em capturar energia para lidar com demandas elevadas de água. No entanto, o gráfico sugere que vazões maiores necessitam de áreas de captação proporcionalmente maiores para manter o equilíbrio entre a energia disponível e a energia requerida para o processo de dessalinização.

Figura 23 – Energia no Coletor em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra

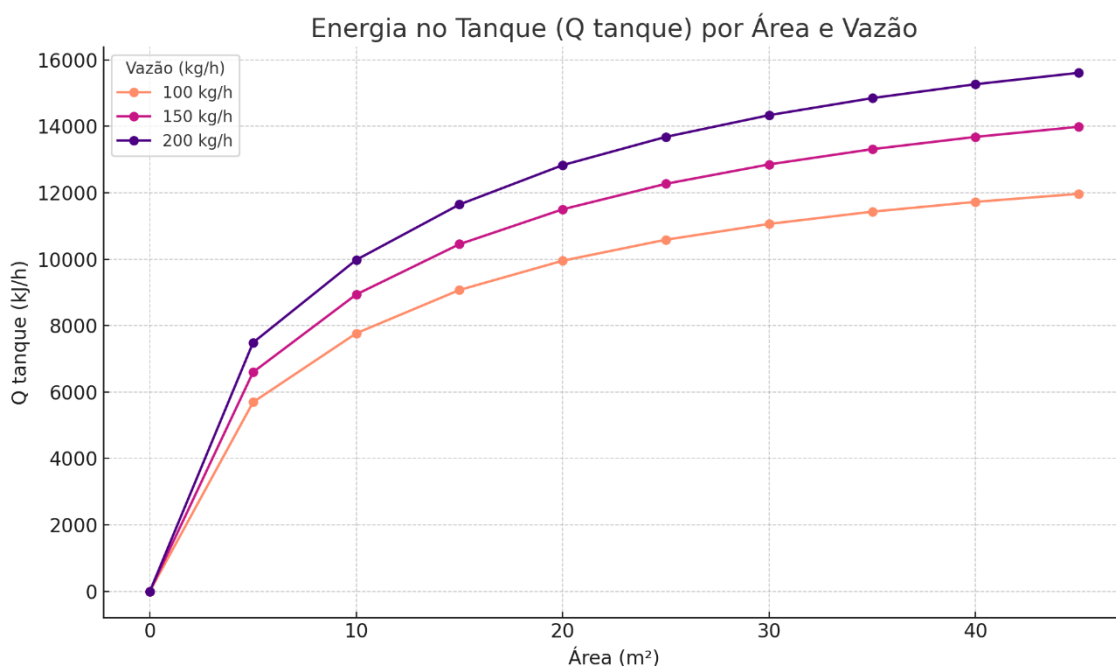


A Figura 24 apresenta a relação entre a energia acumulada no tanque (Q_{tanque}) e a área do coletor solar para três vazões de água salobra: 100, 150 e 200 kg/h. Observa-se um comportamento crescente para todas as vazões, com o Q_{tanque} aumentando proporcionalmente à área do coletor. Esse comportamento reflete a capacidade do sistema de acumular mais energia térmica à medida que a área de captação aumenta.

Para a vazão de 100 kg/h, o Q_{tanque} varia de 0 kJ/h para 0 m² até aproximadamente 11.966 kJ/h para uma área de 45 m². Já para a vazão de 150 kg/h, o Q_{tanque} atinge valores mais altos, indo de 0 kJ/h para 0 m² até cerca de 13.985 kJ/h para 45 m². Na vazão de 200 kg/h, os valores de Q_{tanque} são os mais elevados, começando em 0 kJ/h para 0 m² e alcançando aproximadamente 15.610 kJ/h para 45 m².

O gráfico evidencia que, para vazões maiores, o Q_{tanque} aumenta mais rapidamente com a área do coletor, refletindo a maior demanda energética desses sistemas. No entanto, a relação linear sugere que o aumento da área do coletor é eficiente e previsível para suprir as demandas de energia térmica em diferentes condições operacionais. Esses resultados reforçam a importância de dimensionar adequadamente a área do coletor de acordo com a vazão, garantindo um desempenho eficiente e sustentável do sistema de dessalinização solar.

Figura 24 – Energia no Tanque em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra



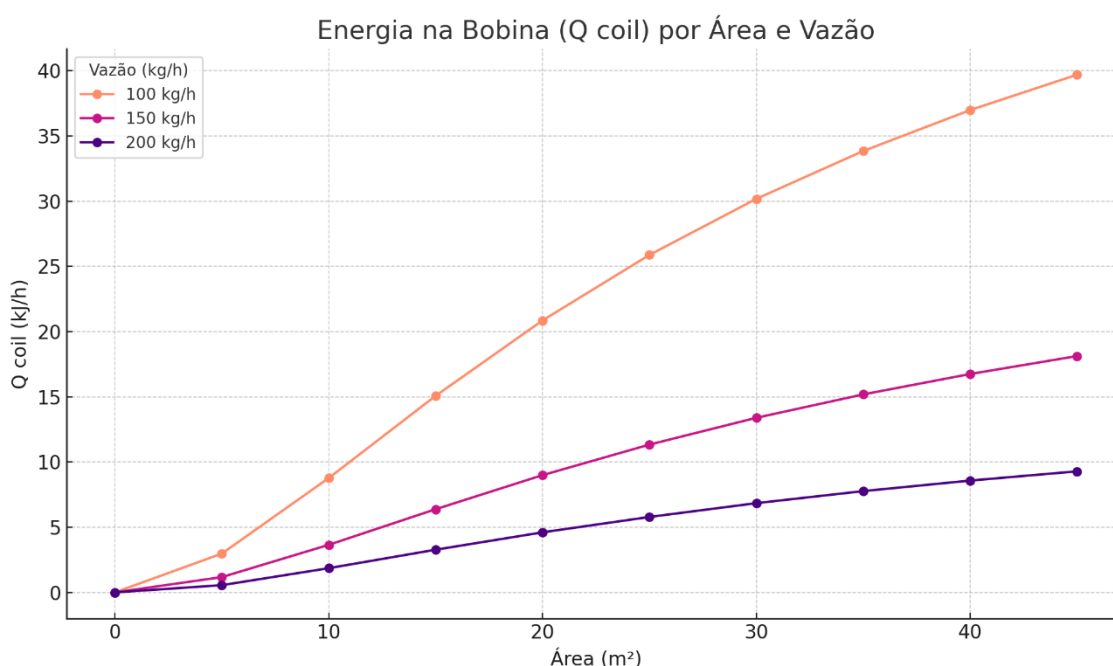
O gráfico (Figura 25) apresenta a relação entre a energia acumulada na bobina (Q_{coil}) e a área do coletor solar para três diferentes vazões de água salobra: 100, 150 e 200 kg/h. Observa-se que, à medida que a área do coletor aumenta, o Q_{coil} também cresce para todas as vazões analisadas. Esse comportamento reflete a maior quantidade de energia térmica disponível para acumulação na bobina conforme a área de captação aumenta.

Para a vazão de 100 kg/h, os valores de Q_{coil} são consistentemente os mais altos em todas as áreas, começando em 0 kJ/h para 0 m² e atingindo aproximadamente 39,69 kJ/h para 45 m². Esse comportamento é explicado pela menor demanda de energia associada à baixa vazão, o que permite que uma maior fração da energia captada seja acumulada na bobina.

Na vazão intermediária de 150 kg/h, os valores de Q_{coil} são menores do que na vazão de 100 kg/h, variando de 0 kJ/h para 0 m² até cerca de 18,12 kJ/h para 45 m². Esse padrão reflete a maior demanda energética para o processo de dessalinização, o que reduz a quantidade de energia disponível para acumulação na bobina.

Por fim, para a vazão de 200 kg/h, os valores de Q_{coil} são os menores entre as três vazões, indo de 0 kJ/h para 0 m² até aproximadamente 9,28 kJ/h para 45 m². Isso ocorre porque a maior parte da energia captada pelo coletor é utilizada diretamente no processo de dessalinização para atender à alta demanda hídrica.

Figura 25 – Energia no Coil em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra

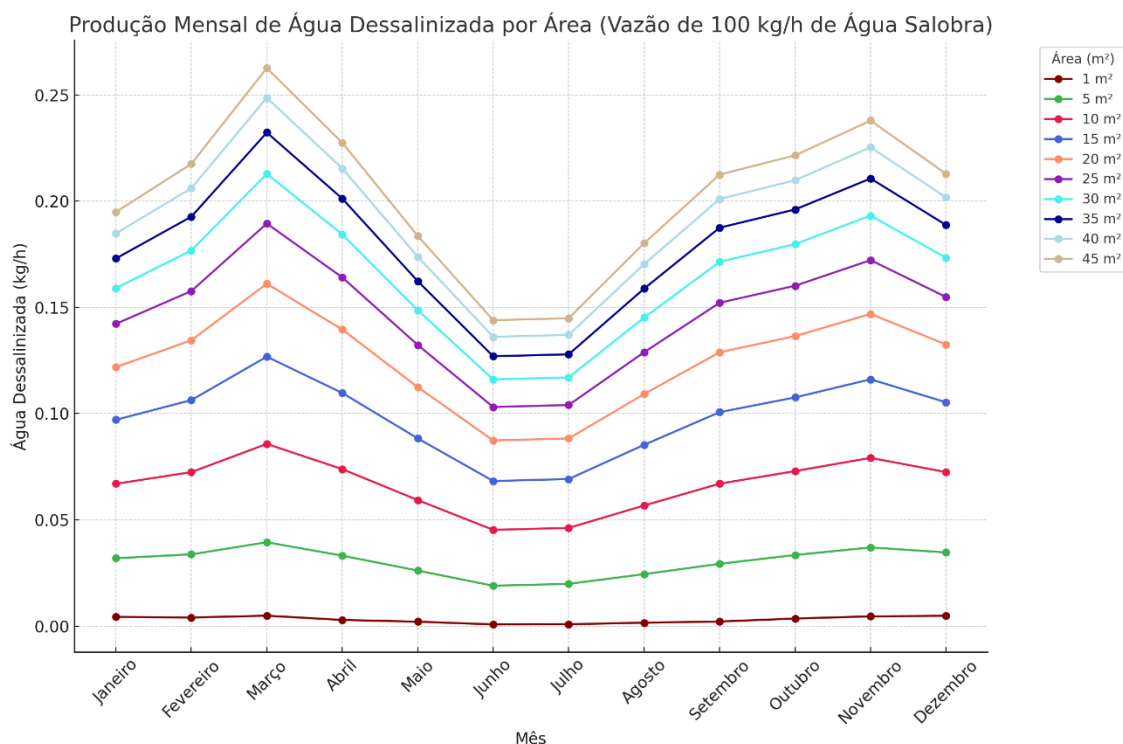


A Figura 26 ilustra a produção mensal de água dessalinizada em função da área do coletor solar, variando de 1 m² a 45 m² ao longo dos meses do ano, e destaca a relação direta entre o aumento da área e a capacidade de dessalinização do sistema. Considerando que o sistema opera por 12 horas diárias, é possível estimar a produção diária e mensal de água dessalinizada a partir dos valores apresentados no gráfico.

Para áreas menores, como 1 m², a produção diária de água dessalinizada é relativamente baixa, alcançando valores de aproximadamente 0,0516 kg/dia em março (0,0043 kg/h). No contexto mensal, considerando uma média de 30 dias, a produção mensal seria de cerca de 1,55 kg/mês para março. Em contrapartida, para áreas maiores, como 45 m², a produção diária em março atinge valores próximos a 3,15 kg/dia (0,2626 kg/h), resultando em uma produção mensal de aproximadamente 94,68 kg/mês.

A análise sazonal é evidente no gráfico, com os meses de março e novembro apresentando as maiores taxas de produção de água dessalinizada. Para uma área de 25 m², por exemplo, a produção diária em março é de aproximadamente 2,27 kg/dia (0,1894 kg/h), com um total mensal estimado de 68,1 kg/mês. Nos meses de menor radiação solar, como junho, a produção cai significativamente. Para a mesma área de 25 m², a produção diária em junho é de cerca de 1,24 kg/dia (0,1031 kg/h), resultando em aproximadamente 37,2 kg/mês.

Figura 26 – Produção Mensal de Água Dessalinizada por Área (Vazão de 100 kg/h de Água Salobra)

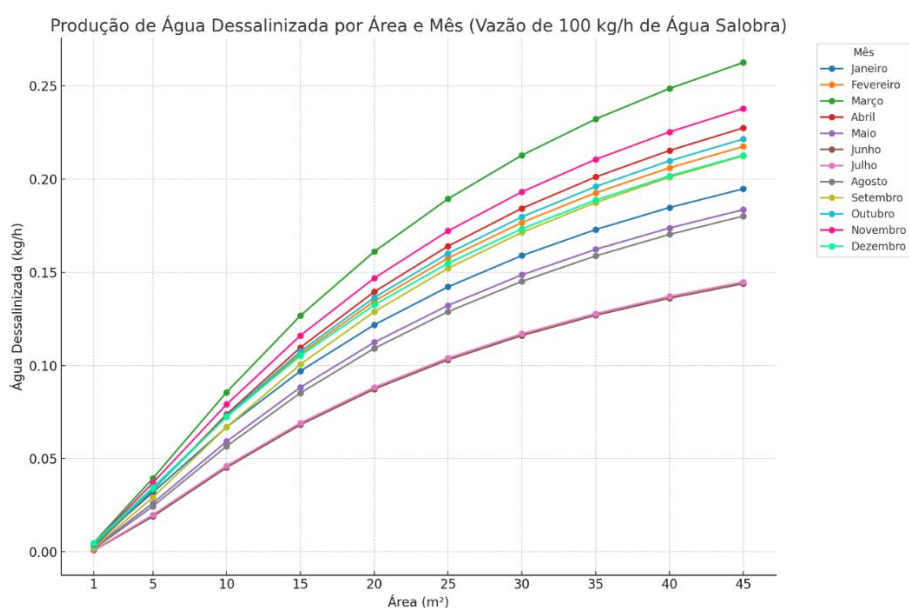


Os resultados reforçam a importância do dimensionamento adequado da área do coletor para atender às demandas hídricas específicas. Além disso, a análise sazonal sugere a necessidade de ajustes operacionais ou suplementação em meses de menor radiação solar, garantindo a continuidade do fornecimento de água dessalinizada. A operação por 12 horas diárias permite uma produção consistente e previsível, o que é essencial para aplicações em regiões com alta demanda hídrica, como o agreste.

Na Figura 27 é vista a produção de água dessalinizada por mês em relação à área. O gráfico apresentado demonstra a relação entre a produção de água doce dessalinizada (kg/h) e a área do sistema (m²) para diferentes meses do ano, evidenciando um comportamento crescente na produção à medida que a área aumenta. Esse aumento ocorre devido à maior captação de energia solar em sistemas com áreas maiores, favorecendo o processo de dessalinização. Os meses com maior radiação solar, como março e novembro, apresentam produção significativamente superior, refletindo a sazonalidade do recurso solar. Em contraste, meses como junho e julho, com menor radiação, mostram produção mais baixa.

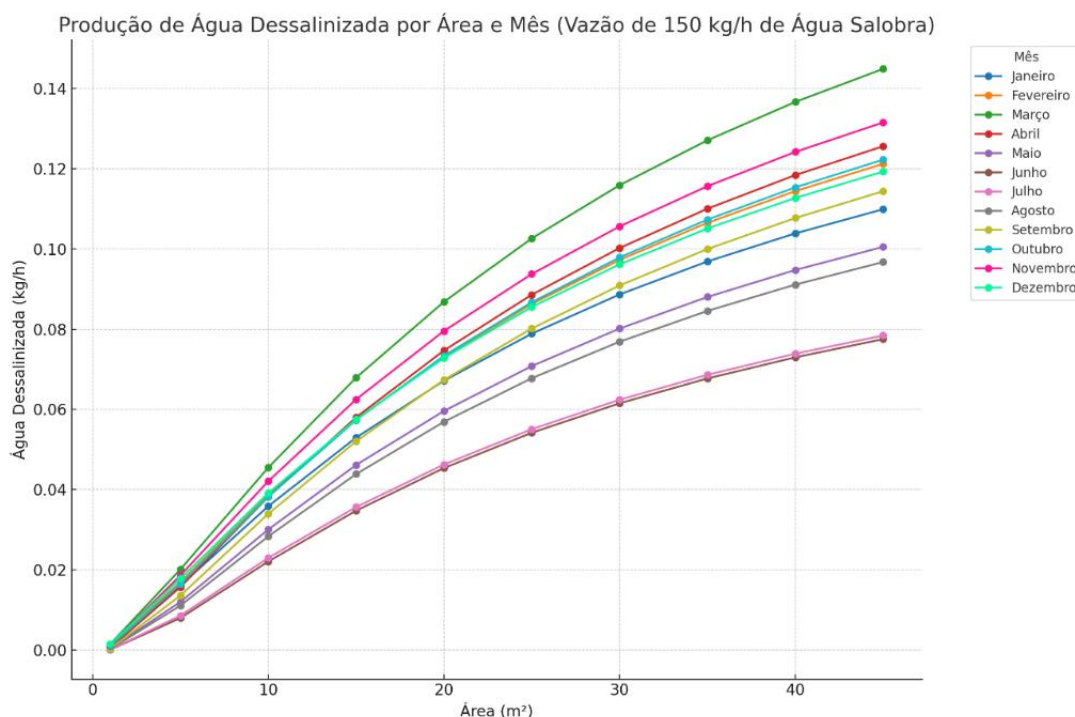
Para áreas menores (1 a 10 m²), o incremento na produção é mais discreto, devido à limitação na captura de energia. Por outro lado, áreas médias e grandes (20 a 45 m²) apresentam um aumento mais pronunciado na produção, evidenciando a maior eficiência na dessalinização com sistemas de maior porte. A variação sazonal observada entre os meses reforça a influência de fatores climáticos, como radiação solar, temperatura ambiente e eficiência térmica do sistema, no desempenho anual.

Figura 27 – Produção de Água Dessalinizada por Área e Mês (Vazão de 100 kg/h de Água Salobra)



A Figura 28 mostra a produção de água dessalinizada (kg/h) em função da área do sistema (m^2) para diferentes meses, considerando uma vazão de 150 kg/h de água salobra. Observa-se que a produção aumenta consistentemente com o aumento da área, sendo influenciada pela sazonalidade, com meses de maior radiação solar, como março e novembro, apresentando maior produção. Já os meses de menor insolação, como junho e julho, têm menor desempenho.

Figura 28 – Produção de Água Dessalinizada por Área e Mês (Vazão de 150 kg/h de Água Salobra)

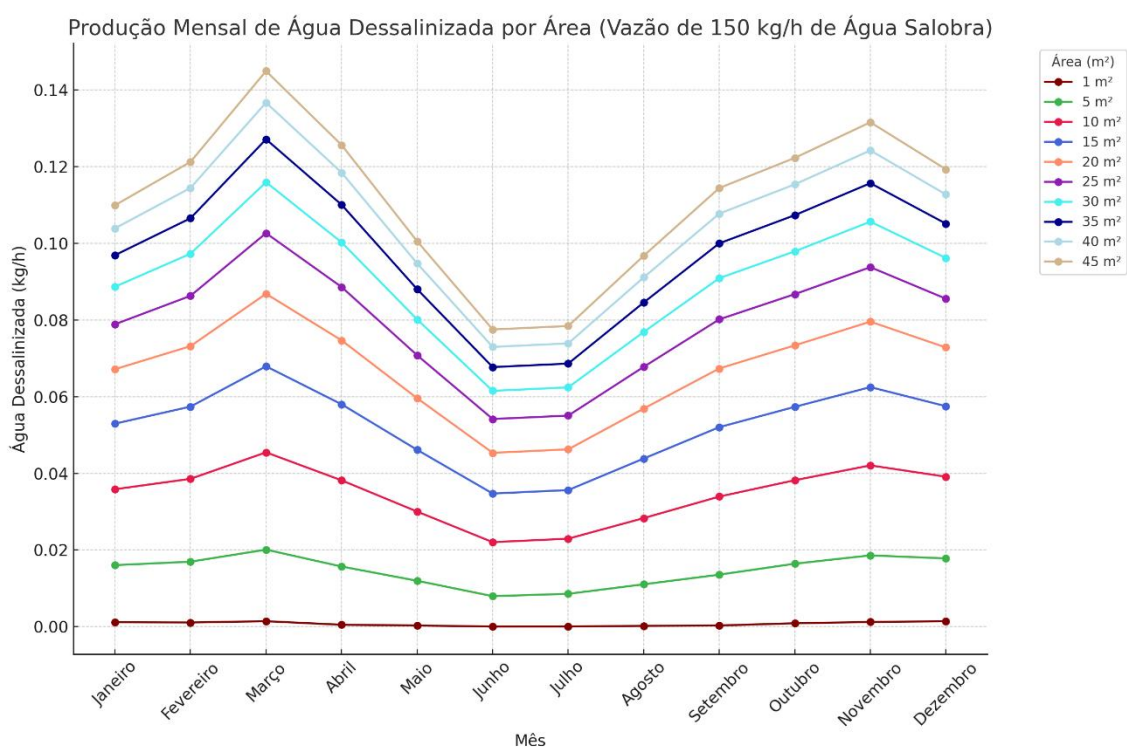


A Figura 29 apresenta a produção mensal de água dessalinizada (kg/h) em função da área do sistema (m^2), com cada linha representando uma área específica. Considerando que o sistema opera por 12 horas diárias, é possível calcular a produção total diária e mensal. Para sistemas menores, como o de 1 m^2 , a produção horária em março é de 0,00143 kg/h, resultando em uma produção diária de 0,01716 kg/dia e uma produção mensal de 0,5148 kg/mês. Já para sistemas maiores, como o de 45 m^2 , a produção horária no mesmo mês é de 0,14489 kg/h, resultando em 1,73868 kg/dia e 52,16 kg/mês.

A produção é influenciada pela sazonalidade, apresentando os valores mais altos em março e novembro, que coincidem com períodos de maior radiação solar no agreste. Em contraste, meses como junho e julho mostram menor produção devido à redução da insolação, característica do inverno austral.

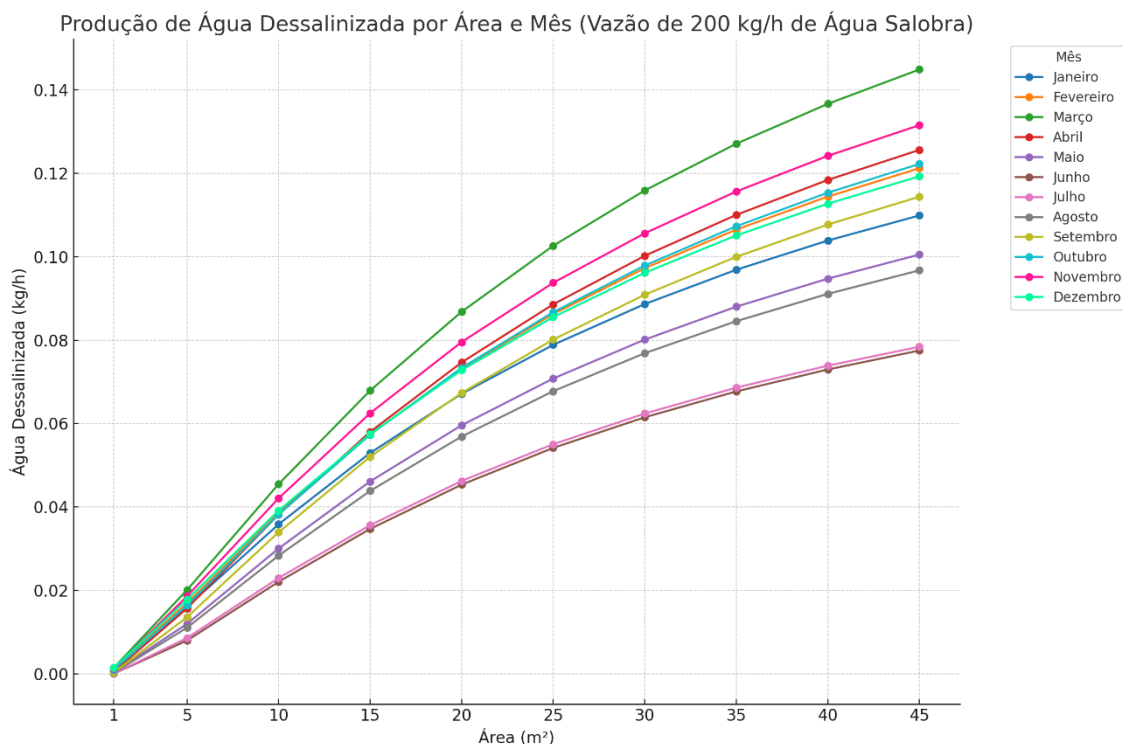
Além disso, a produção aumenta proporcionalmente com a área do sistema. Sistemas menores, como os de 1 m², possuem produções limitadas, adequadas para pequenas demandas. Já sistemas maiores, como os de 45 m², são mais eficientes para atender a demandas significativas.

Figura 29 – Produção Mensal de Água Dessalinizada por Área (Vazão de 150 kg/h de Água Salobra)



A Figura 30 mostra a produção de água dessalinizada (kg/h) em função da área do sistema (m²) para cada mês do ano, considerando uma vazão de 200 kg/h de água salobra. Observa-se que a produção aumenta proporcionalmente com a área, sendo maior nos meses de março e novembro, devido à maior radiação solar. Já nos meses de junho e julho, a produção é menor, refletindo a sazonalidade do clima.

Figura 30 – Produção de Água Dessalinizada por Área e Mês (Vazão de 200 kg/h de Água Salobra)

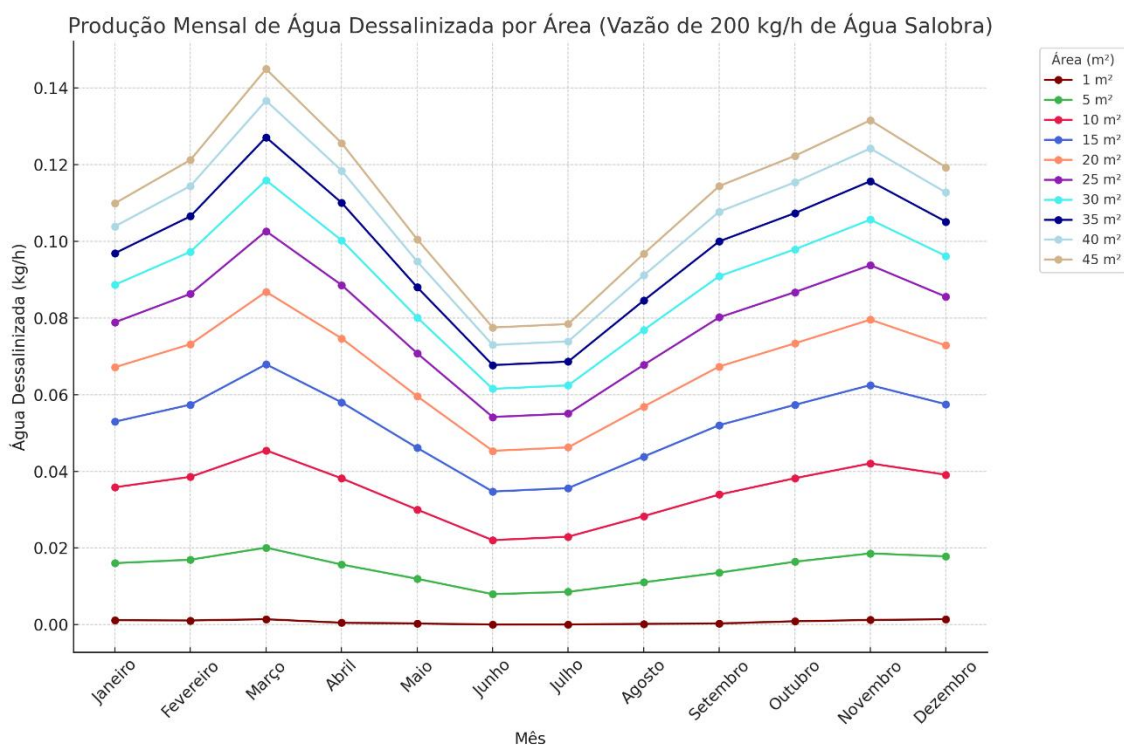


O gráfico apresenta a produção mensal de água dessalinizada (kg/h) em função da área do sistema (m²), considerando uma vazão de 200 kg/h de água salobra e um funcionamento de 12 horas diárias. Para sistemas menores, como o de 1 m², a produção horária em março é de 0,00143 kg/h, resultando em uma produção diária de 0,01716 kg/dia e uma produção mensal de 0,5148 kg/mês. Já para sistemas maiores, como o de 45 m², a produção horária no mesmo mês é de 0,1449 kg/h, resultando em 1,7388 kg/dia e 52,164 kg/mês.

A análise sazonal destaca que os meses de março e novembro apresentam os maiores valores de produção devido à maior radiação solar, enquanto meses como junho e julho mostram menor produção, refletindo a redução da insolação durante o inverno austral, como pode ser reparado na Figura 31.

Além disso, o impacto da área do sistema é evidente: a produção aumenta proporcionalmente com o tamanho da área, tornando sistemas maiores, como os de 45 m², mais eficientes para demandas significativas, enquanto sistemas menores, como os de 1 m², são mais indicados para menores aplicações.

Figura 31 – Produção Mensal de Água Dessalinizada por Área (Vazão de 200 kg/h de Água Salobra)



4.2. CONFIGURAÇÃO II

A Figura 32 evidencia a relação entre a fração solar (F_r , %) e a área do coletor solar para três diferentes vazões de água salobra (100 kg/h, 150 kg/h e 200 kg/h). A fração solar aumenta de maneira não linear com o incremento da área do coletor solar. Este comportamento é esperado, uma vez que uma área maior proporciona maior absorção da radiação solar, aumentando a contribuição da energia térmica captada. Contudo, os ganhos incrementais na fração solar se tornam menos expressivos à medida que a área do coletor atinge valores maiores, sugerindo a existência de um ponto de saturação, no qual os benefícios adicionais de aumentar a área se tornam economicamente menos viáveis.

A vazão de água salobra desempenha um papel crítico na eficiência do sistema. Para a vazão de 100 kg/h, a fração solar atinge valores máximos de aproximadamente 42,87% para uma área de 45 m², o maior valor entre as três vazões analisadas. Isso indica que, com uma demanda térmica menor, o sistema consegue atender de maneira mais eficiente às necessidades energéticas apenas com energia solar. Para a vazão intermediária de 150 kg/h, a fração solar é menor, atingindo 31,82% na área máxima de 45 m². Embora a curva apresente uma tendência similar à da vazão de 100 kg/h, a eficiência é reduzida devido à maior demanda de energia térmica. Na maior vazão, 200 kg/h, os valores de fração solar são

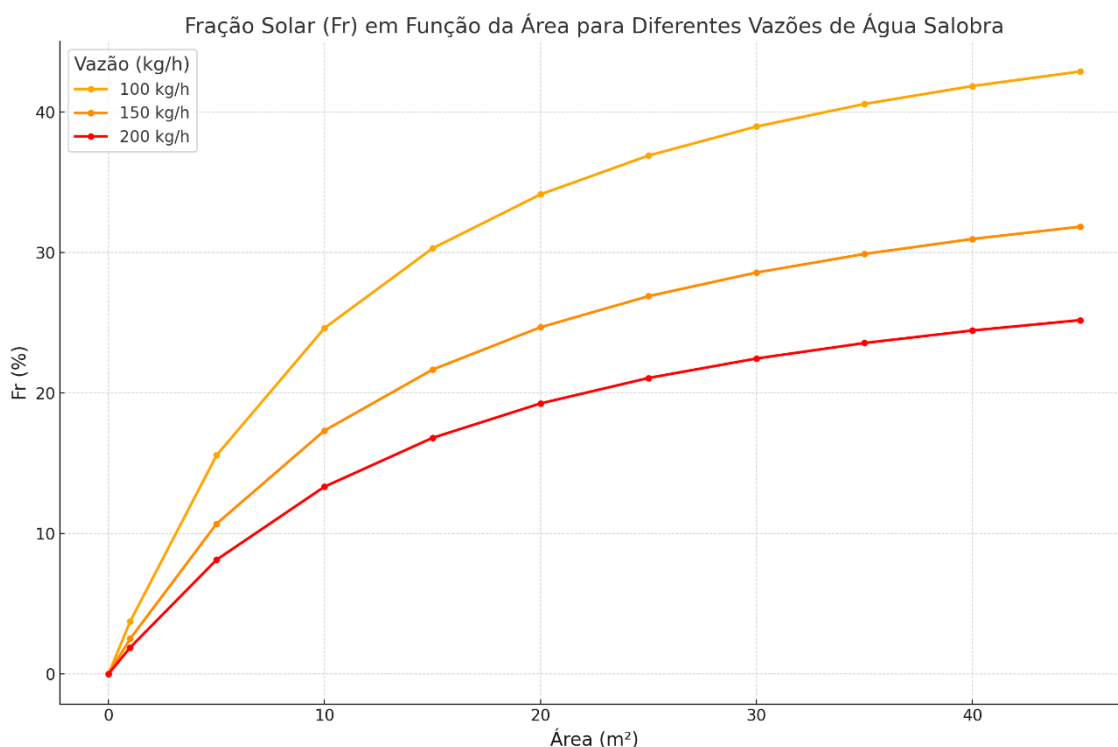
significativamente menores, alcançando um máximo de apenas 25,17% na área máxima. Este resultado reflete a dificuldade do sistema em atender à maior demanda térmica apenas com energia solar, destacando a importância de fontes auxiliares de calor para aplicações com vazões elevadas.

Estatisticamente, a taxa de crescimento relativa da fração solar em função da área diminui à medida que a área aumenta. Para a vazão de 100 kg/h, o incremento da fração solar ao aumentar a área de 0 m² para 1 m² é de 3,73%, enquanto o incremento entre 40 m² e 45 m² é de apenas 1,04%, representando uma redução de mais de 70% na taxa de crescimento incremental. Comportamentos similares são observados para as vazões de 150 kg/h e 200 kg/h, onde os incrementos de fração solar no intervalo inicial (0-1 m²) são, respectivamente, 2,49% e 1,87%, enquanto no intervalo final (40-45 m²) são reduzidos para 0,88% e 0,74%, respectivamente.

A diferença percentual na fração solar entre as vazões é mais pronunciada para áreas menores. Por exemplo, para uma área de 5 m², a fração solar para 100 kg/h é 15,55%, enquanto para 200 kg/h é 8,12%, representando uma diferença de aproximadamente 91%. Para áreas maiores, como 45 m², a diferença relativa entre as mesmas vazões é reduzida para cerca de 70%. Esse comportamento indica que, embora aumentos na área do coletor beneficiem todas as vazões, os ganhos relativos são mais expressivos para menores vazões.

A análise evidencia que, para vazões menores, o sistema é capaz de alcançar maior eficiência utilizando apenas energia solar. No entanto, à medida que a vazão aumenta, a dependência de fontes auxiliares de calor torna-se mais evidente. Assim, para aplicações em sistemas com alta demanda, é necessário considerar o uso de aquecedores auxiliares ou a otimização do sistema para aumentar a eficiência térmica.

Figura 32 – Fração Solar em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra



A Figura 33 apresenta a variação do Solar Utilization Factor (SUF) em função da área do coletor solar para três diferentes vazões de água salobra (100 kg/h, 150 kg/h e 200 kg/h). A análise evidencia tendências importantes relacionadas à eficiência do sistema e ao impacto do dimensionamento da área do coletor solar.

Os resultados demonstram que o SUF diminui significativamente à medida que a área do coletor solar aumenta, independentemente da vazão. Este comportamento é mais acentuado nas áreas menores, onde os valores de SUF são elevados devido ao melhor aproveitamento da energia solar captada. Com o aumento da área, os valores de SUF convergem gradualmente, indicando um ponto de saturação no qual a eficiência do sistema diminui rapidamente, tornando o uso da energia adicional captada marginalmente menos eficaz. Por exemplo, para a vazão de 100 kg/h, o SUF diminui de 17,15 em 1 m² para apenas 0,38 em 45 m², representando uma redução de aproximadamente 97,8%. Este padrão é consistente para as demais vazões analisadas.

A influência da vazão é evidente nos valores iniciais de SUF. Para 100 kg/h, o valor inicial é de 17,15 em 1 m², enquanto para 150 kg/h e 200 kg/h, os valores sobem para 25,52 e 33,98, respectivamente. Isso reflete que vazões maiores inicialmente aproveitam melhor a energia captada devido à maior demanda térmica. No entanto, à medida que a área aumenta, os valores de SUF para todas as vazões convergem, com diferenças pouco expressivas em

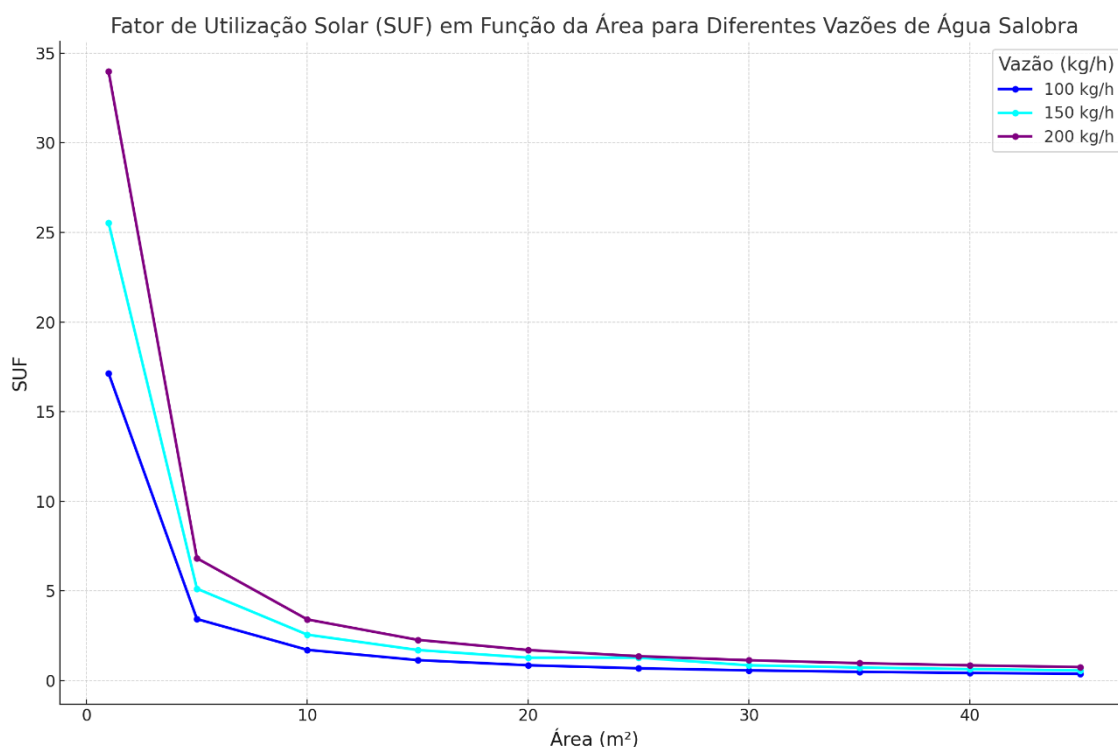
áreas maiores. Para 45 m², o SUF é de 0,38 (100 kg/h), 0,57 (150 kg/h) e 0,76 (200 kg/h), indicando que o aumento da área do coletor se torna ineficaz para todas as vazões.

Analisando o comportamento estatístico, observa-se que a taxa de redução do SUF é mais acentuada nas áreas iniciais. Para 100 kg/h, o declínio do SUF ao aumentar a área de 1 m² para 5 m² é de aproximadamente 80%, enquanto no intervalo entre 40 m² e 45 m², a redução é de apenas 10%. Padrões similares são observados para 150 kg/h e 200 kg/h, com reduções iniciais de cerca de 80% e reduções finais de aproximadamente 11%. Esses dados refletem a saturação do sistema em áreas maiores, onde a eficiência incremental diminui de forma acentuada.

A análise comparativa entre as vazões mostra que, em áreas pequenas, as vazões maiores (200 kg/h) apresentam os maiores valores de SUF, enquanto as vazões menores (100 kg/h) apresentam menor eficiência relativa. No entanto, em áreas maiores, essa diferença diminui significativamente, indicando que o aumento da área não beneficia diretamente sistemas com alta demanda térmica, uma vez que o SUF converge para valores baixos em todas as vazões.

Esses resultados têm implicações práticas significativas. A rápida queda do SUF com o aumento da área reforça a necessidade de um dimensionamento otimizado do coletor solar. Áreas muito grandes tornam-se economicamente inviáveis, pois não resultam em um aumento proporcional da eficiência energética. Para sistemas com vazões elevadas (200 kg/h), o uso de áreas menores de coletor solar aliado a fontes auxiliares de calor pode ser uma solução mais eficiente, enquanto sistemas com vazões menores podem operar de forma mais eficiente com áreas pequenas e médias.

Figura 33 – SUF em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra



A Figura 34 ilustra os valores de FWP (*Fresh Water Production*) em função da área do coletor solar para três diferentes vazões de água salobra (100 kg/h, 150 kg/h e 200 kg/h). A análise detalhada avalia o comportamento do sistema, enfatizando os aspectos de desempenho e tendências estatísticas.

Os valores de FWP permanecem praticamente constantes em função da área do coletor solar para todas as vazões analisadas. Esse comportamento sugere que, na Configuração II, o aumento da área não impacta diretamente a produção de água doce. Para a vazão de 100 kg/h, os valores de FWP variam de 0,8789 a 0,8807 (incremento de apenas 0,2%), indicando que a produção de água doce é estável independentemente do aumento da área. Comportamentos semelhantes são observados para as vazões de 150 kg/h e 200 kg/h.

Os valores de FWP seguem a ordem esperada em relação às vazões. Vazões menores resultam em maiores valores de FWP, evidenciando que, para uma menor quantidade de água salobra processada, o sistema consegue converter uma fração maior em água doce. Para a vazão de 100 kg/h, os valores de FWP são os maiores, com uma média de 0,8793 ao longo de todas as áreas analisadas, demonstrando a alta eficiência do sistema para vazões menores. Na vazão intermediária de 150 kg/h, o valor médio de FWP é de 0,7034, representando uma redução de aproximadamente 20% em relação à vazão de 100 kg/h. Já na maior vazão, 200

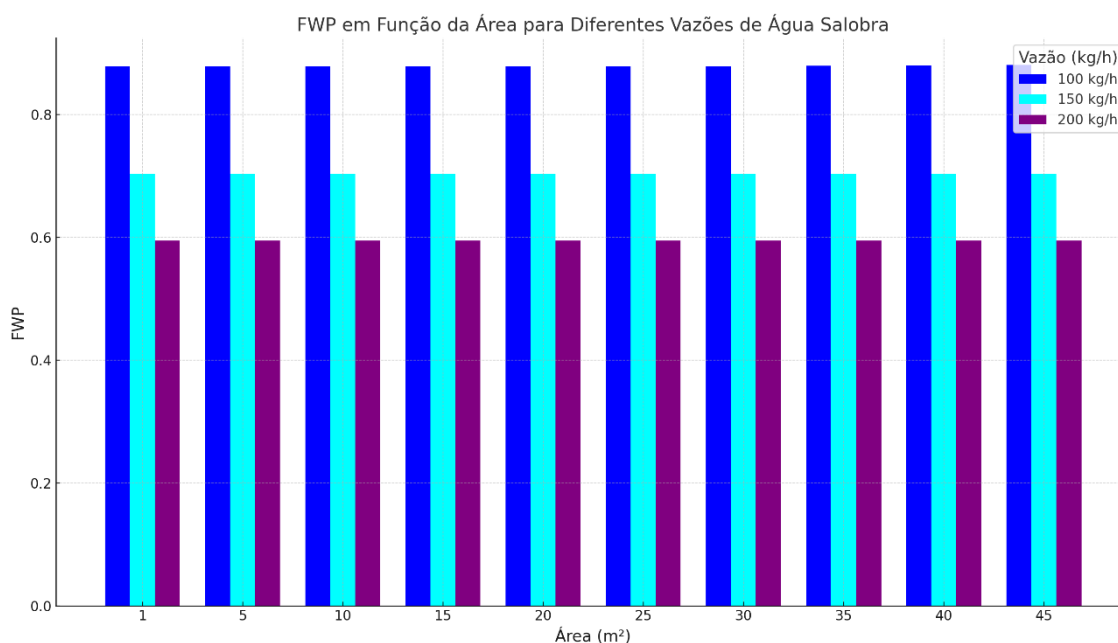
kg/h, os valores de FWP são os menores, com uma média de 0,5948, indicando uma redução de cerca de 15,4% em relação à vazão de 150 kg/h e 32,3% em relação à vazão de 100 kg/h.

Essa ordem decrescente nos valores de FWP reflete a limitação do sistema em processar vazões mais elevadas com a mesma eficiência térmica. Para a vazão de 100 kg/h, a diferença absoluta entre os menores e maiores valores de FWP é de apenas 0,0018, enquanto para as vazões de 150 kg/h e 200 kg/h, os valores de FWP permanecem constantes ao longo de todas as áreas analisadas. A constância dos valores de FWP em função da área sugere que, na Configuração II, o aumento da área do coletor solar não oferece ganhos adicionais em termos de produção de água doce.

Esses resultados indicam que, na Configuração II, o dimensionamento da área do coletor solar tem pouca influência na produção de água doce (FWP). Para sistemas que utilizam esta configuração, o dimensionamento da área pode ser otimizado considerando outros parâmetros, como eficiência térmica ou custos de instalação, já que a produção de água doce é praticamente insensível ao aumento da área. Além disso, a análise dos valores de FWP para diferentes vazões ressalta a importância de ajustar o sistema à demanda de água doce. Vazões menores apresentam maior eficiência, mas sistemas projetados para atender vazões mais elevadas devem considerar configurações que aumentem a eficiência térmica, como o uso de trocadores de calor mais eficientes ou fontes auxiliares de energia.

Em conclusão, os valores de FWP na Configuração II permanecem praticamente constantes em função da área do coletor solar, indicando que o aumento da área não proporciona ganhos significativos em termos de produção de água doce. Esse comportamento sugere que, para esta configuração, o dimensionamento do coletor solar deve ser baseado em outros critérios, como custos ou eficiência térmica. Além disso, vazões menores apresentam maior eficiência na produção de água doce, reforçando a necessidade de considerar a demanda hídrica e a capacidade térmica do sistema no projeto.

Figura 34 – FWP em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra



A Figura 35 apresenta os valores de GOR (*Gain Output Ratio*) em função da área do coletor solar para três diferentes vazões de água salobra (100 kg/h, 150 kg/h e 200 kg/h). A análise evidencia que os valores de GOR na Configuração II são caracteristicamente baixos, indicando uma eficiência limitada na conversão da energia térmica captada em água dessalinizada. Para a vazão de 100 kg/h, que apresenta os maiores valores, o GOR permanece em torno de 0,085, enquanto para as vazões de 150 kg/h e 200 kg/h, os valores caem para 0,044 e 0,027, respectivamente. Em termos absolutos, esses valores sugerem uma eficiência térmica baixa, especialmente para vazões mais elevadas.

A estabilidade dos valores de GOR em relação à área do coletor solar reforça que o aumento da área não tem impacto significativo na eficiência térmica do sistema nesta configuração. A vazão, por exemplo, de 100 kg/h, o GOR varia de 0,08512 (1 m²) a 0,08469 (45 m²), uma redução de apenas 0,5%. Tendências similares são observadas para as demais vazões, indicando que o dimensionamento da área não é um fator relevante para o desempenho do sistema.

Os valores de GOR também diminuem significativamente com o aumento da vazão de água salobra, evidenciando que o sistema é menos eficiente em processar maiores volumes de água. Para a vazão de 100 kg/h, o valor médio de GOR é 0,0847, o mais alto entre as vazões analisadas. Para 150 kg/h, o valor médio de GOR é 0,0444, representando uma redução de aproximadamente 47,5% em relação à vazão de 100 kg/h. Para 200 kg/h, o valor médio de GOR é 0,0279, uma redução adicional de 37,2% em relação à vazão de 150 kg/h e

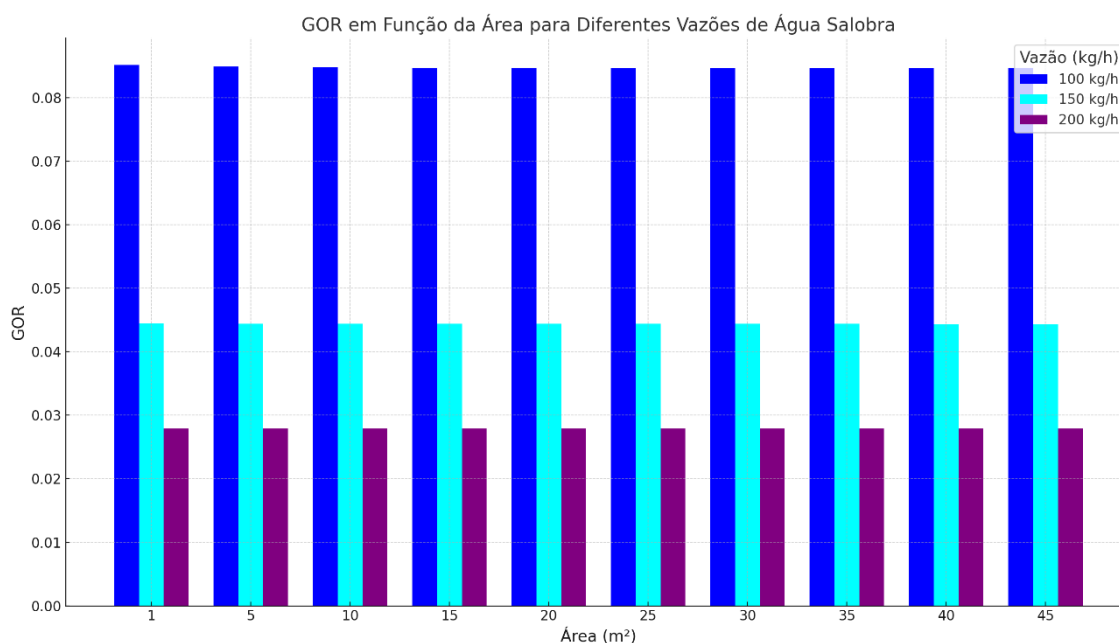
de 67,1% em relação à vazão de 100 kg/h. Esses resultados refletem a limitação do sistema em atender maiores demandas hídricas com a mesma eficiência térmica.

Os valores observados de GOR estão muito abaixo dos considerados elevados na literatura para sistemas de dessalinização, que variam entre 0,5 e 1,5 em configurações mais otimizadas. Isso evidencia que a Configuração II apresenta limitações importantes na eficiência térmica, provavelmente devido à ausência de mecanismos que potencializem o uso do calor disponível, como trocadores de calor mais avançados ou aproveitamento mais eficaz do calor residual.

A análise estatística reforça a estabilidade do sistema em termos de GOR para diferentes áreas, mas evidencia a dependência direta da eficiência em relação à vazão. Para a vazão de 100 kg/h, a variabilidade dos valores de GOR em função da área é de apenas 0,0004, enquanto para as vazões de 150 kg/h e 200 kg/h, as diferenças absolutas são ainda menores, com variações na casa de 0,0001 ou menos. Essa constância sugere que o aumento da área do coletor solar não contribui para ganhos na eficiência térmica, tornando o sistema insensível a esse parâmetro.

Os resultados indicam que a Configuração II é mais adequada para vazões baixas, onde a eficiência térmica, embora baixa em termos absolutos, é menos impactada pela demanda hídrica. Para vazões maiores, o desempenho do sistema diminui significativamente, reforçando a necessidade de modificações na configuração, como o uso de fontes auxiliares de calor ou trocadores de calor mais eficientes, para melhorar o GOR. Além disso, o baixo impacto da área do coletor solar no GOR sugere que o dimensionamento da área pode ser minimizado para reduzir custos, sem prejuízo na eficiência. Melhorias tecnológicas são indispensáveis para tornar o sistema competitivo em termos de eficiência térmica.

Figura 35 – GOR em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra



A Figura 36 apresenta os valores de MR (*Mass Ratio*) em função da área do coletor solar para três diferentes vazões de água salobra (100 kg/h, 150 kg/h e 200 kg/h). A análise evidencia comportamentos consistentes, com valores constantes de MR para cada vazão ao longo de todas as áreas analisadas, indicando estabilidade no desempenho do sistema e insensibilidade ao aumento da área do coletor solar.

Os valores de MR são constantes para todas as áreas dentro de cada vazão, evidenciando que o aumento da área do coletor não impacta a relação de massa processada pelo sistema. Para a vazão de 100 kg/h, o MR é fixo em 2,5, enquanto para 150 kg/h e 200 kg/h, os valores são de 3,75 e 5,0, respectivamente. Isso sugere que a massa de água salobra processada é proporcional à vazão de entrada, independentemente da área disponível para captação de energia solar. Esse comportamento destaca que, na configuração analisada, o desempenho do sistema é definido exclusivamente pela vazão e não pelo tamanho do coletor.

Os valores de MR aumentam proporcionalmente com a vazão de água salobra, refletindo a demanda térmica adicional necessária para processar maiores volumes de água. Para a vazão de 100 kg/h, o MR de 2,5 representa a menor relação de massa, indicando maior eficiência relativa na utilização da energia térmica captada. À medida que a vazão aumenta para 150 kg/h, o MR cresce para 3,75, uma elevação de 50% em relação à vazão de 100 kg/h. Para 200 kg/h, o MR alcança 5,0, representando um aumento adicional de 33,3% em relação

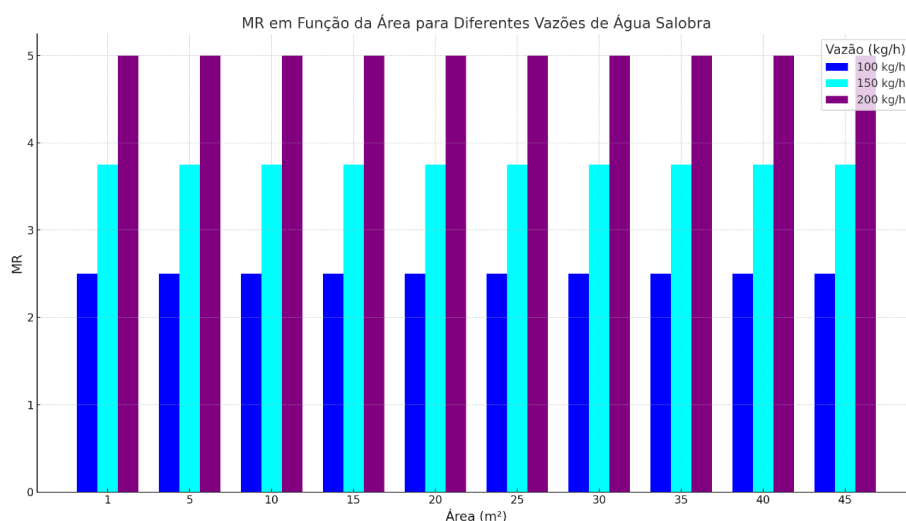
à vazão de 150 kg/h e de 100% em relação à vazão de 100 kg/h. Esses resultados refletem a limitação do sistema em atender maiores demandas hídricas sem comprometer a eficiência.

A constância dos valores de MR para todas as áreas dentro de uma mesma vazão reflete a insensibilidade do sistema ao aumento da área do coletor solar. Esse comportamento sugere que, para esta configuração, o dimensionamento da área pode ser minimizado sem impacto significativo na relação de massa processada, o que é relevante do ponto de vista econômico, pois áreas maiores implicam custos adicionais de instalação e manutenção sem ganhos práticos no desempenho. No entanto, para atender vazões mais elevadas com maior eficiência, seriam necessárias modificações no sistema, como o uso de trocadores de calor mais avançados ou fontes auxiliares de energia térmica.

A análise estatística dos dados reforça essa estabilidade, evidenciando que os valores constantes de MR eliminam a variabilidade dentro de cada vazão. Por outro lado, as diferenças absolutas entre as vazões refletem o impacto direto do aumento da demanda térmica sobre a eficiência global do sistema. A linearidade dos valores de MR em relação à vazão indica que o sistema é projetado para atender demandas crescentes, mas sem ganhos proporcionais na eficiência térmica.

Os resultados sugerem que o sistema analisado é mais adequado para vazões menores, onde o MR é mais baixo, indicando maior eficiência na conversão da energia térmica captada em água doce. Para demandas maiores, o MR cresce proporcionalmente à vazão, reduzindo a eficiência relativa do sistema. Além disso, o impacto insignificante da área do coletor solar no MR ressalta que melhorias tecnológicas no sistema térmico são mais importantes do que ampliar a área de captação solar.

Figura 36 – MR em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra



A Figura 37 que mostra o Q_{coletor} (kJ/h) em função da área do coletor solar para diferentes vazões de água salobra (100 kg/h, 150 kg/h e 200 kg/h) demonstra uma relação crescente entre a área e a quantidade de energia térmica captada, com comportamento consistente entre as vazões. O Q_{coletor} aumenta de forma não linear com o incremento da área, apresentando uma tendência de crescimento desacelerado à medida que a área cresce. Para a vazão de 100 kg/h, os valores variam de 866 kJ/h (1 m²) a 10.053 kJ/h (45 m²), enquanto para 150 kg/h e 200 kg/h, os valores atingem 11.371 kJ/h e 12.102 kJ/h, respectivamente, indicando que áreas maiores captam mais energia, mas com ganhos marginais reduzidos.

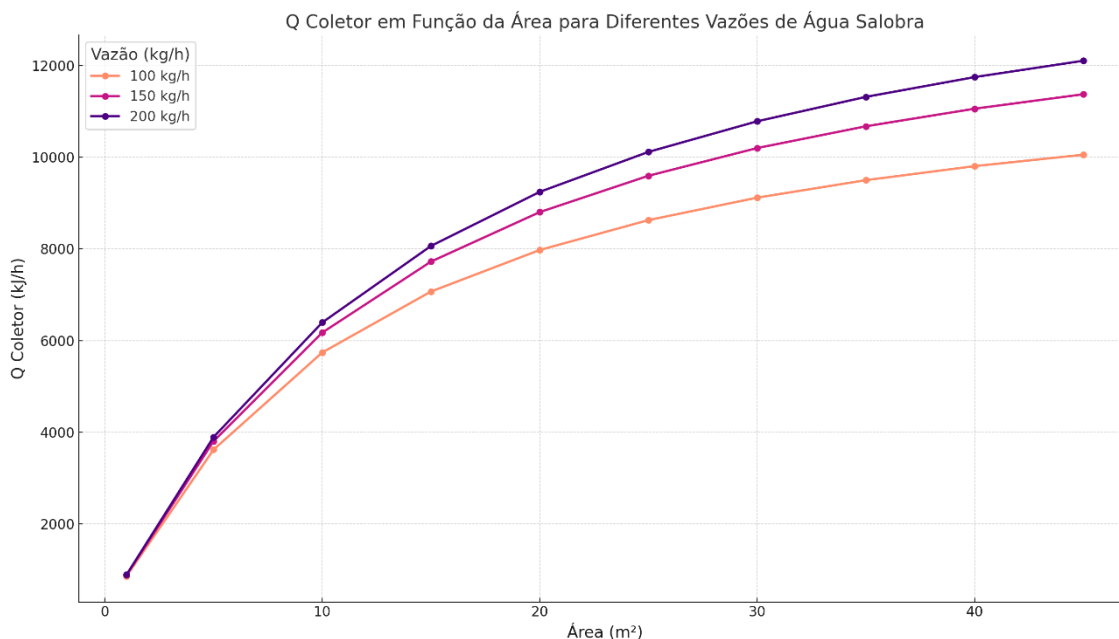
As vazões maiores exigem maior energia térmica, refletida nos valores crescentes de Q_{coletor} , mas os incrementos não são proporcionais à demanda. Por exemplo, o Q_{coletor} para 150 kg/h é cerca de 13,1% maior do que para 100 kg/h, enquanto para 200 kg/h, o aumento em relação a 150 kg/h é de apenas 6,4%, evidenciando a limitação do sistema em fornecer energia proporcional a vazões mais altas. Além disso, o sistema apresenta eficiência de captação estável, mas os ganhos marginais para áreas maiores são limitados. Para a vazão de 100 kg/h, o incremento de 1 m² para 5 m² resulta em um aumento de 318% no Q_{coletor} , enquanto o aumento de 40 m² para 45 m² gera apenas 2,5% a mais de energia captada.

A análise estatística reforça a previsibilidade do desempenho do sistema, com coeficiente de variação mínimo para cada vazão. Para vazões menores, o crescimento médio do Q_{coletor} por incremento de área é maior, reduzindo-se progressivamente em áreas maiores. Esses resultados sugerem que o aumento da área é mais eficaz em dimensões pequenas e médias, enquanto áreas maiores apresentam incrementos marginais que podem comprometer a viabilidade econômica. Para vazões maiores, o sistema requer fontes auxiliares ou ajustes tecnológicos, como trocadores de calor mais eficientes, para atender às demandas crescentes.

Repara-se um comportamento semelhante o gráfico da Fração Solar (Figura 32). A análise do Q_{coletor} (kJ/h) em relação à Fração Solar (F_r) evidencia que, para vazões menores, como 100 kg/h, o sistema pode alcançar uma alta fração solar, próxima de 100% em áreas maiores, enquanto para vazões maiores, como 200 kg/h, a F_r é significativamente reduzida, atingindo apenas cerca de 25% mesmo com áreas grandes. O comportamento do Q_{coletor} segue uma tendência de crescimento desacelerado com o aumento da área do coletor solar, indicando que ganhos expressivos ocorrem em áreas pequenas e médias, enquanto áreas maiores resultam em incrementos marginais. Para demandas mais altas, estratégias híbridas ou tecnologias de armazenamento térmico são essenciais para aumentar a fração solar e

reduzir a dependência de fontes auxiliares, otimizando a eficiência do sistema e sua viabilidade econômica.

Figura 37 – Energia no Coletor em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra



A Figura 38 que apresenta o Q_{tanque} (kJ/h) em função da área do coletor solar para diferentes vazões de água salobra (100 kg/h, 150 kg/h e 200 kg/h) destaca a relação entre a demanda térmica do sistema e a energia acumulada no tanque. Os valores de Q_{tanque} aumentam de forma desacelerada com o crescimento da área do coletor solar, indicando maiores volumes de energia acumulada em áreas maiores, mas com ganhos marginais reduzidos. Para a vazão de 100 kg/h, os valores variam de 2.911 kJ/h (1 m²) a 11.966 kJ/h (45 m²), enquanto para 150 kg/h e 200 kg/h, os valores alcançam 13.985 kJ/h e 15.610 kJ/h, respectivamente.

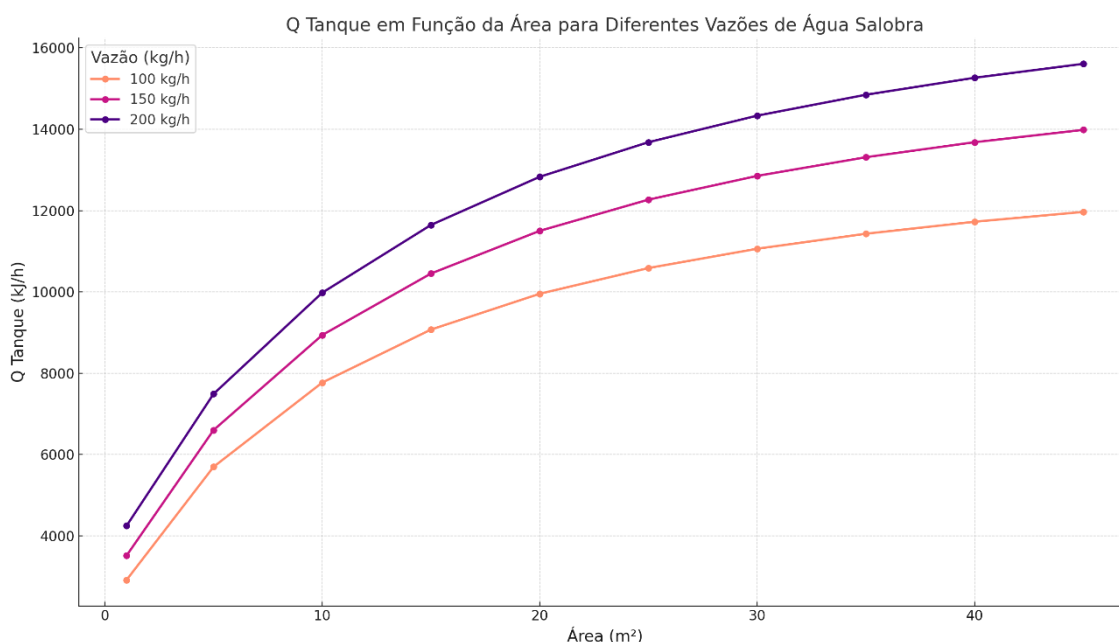
O gráfico evidencia que vazões maiores resultam em valores mais elevados de Q_{tanque} , devido à maior energia necessária para processar volumes maiores de água. Para 100 kg/h, o Q_{tanque} atinge 11.966 kJ/h, enquanto para 150 kg/h e 200 kg/h, os valores aumentam para 13.985 kJ/h e 15.610 kJ/h, respectivamente, representando incrementos de 16,9% e 30,4% em relação à menor vazão. Contudo, a eficiência térmica diminui com o aumento da vazão, evidenciado por ganhos percentuais progressivamente menores.

A relação não linear entre a área do coletor solar e o Q_{tanque} reflete a saturação do sistema em áreas maiores. Para 100 kg/h, o incremento da área de 1 m² para 5 m² gera um aumento de 95,5% no Q_{tanque} , enquanto o incremento de 40 m² para 45 m² resulta em apenas

2,1%. Tendências semelhantes são observadas para 150 kg/h e 200 kg/h, reforçando que o dimensionamento deve priorizar áreas pequenas e médias, onde os ganhos de energia acumulada são mais significativos.

Estatisticamente, o sistema apresenta consistência em termos de crescimento do Q_{tanque} , com coeficiente de variação mínimo em todas as vazões. Para 100 kg/h, o ganho médio de energia acumulada é de 1.759 kJ/h por 5 m² nas áreas iniciais, reduzindo-se para 485 kJ/h em áreas maiores. Para 200 kg/h, o incremento médio inicial é de 2.300 kJ/h, caindo para 800 kJ/h nas áreas finais. Esses resultados confirmam que os ganhos mais significativos ocorrem nas primeiras expansões de área.

Figura 38 – Energia no Tanque em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra



O gráfico de Q_{AquecAux} (kJ/h) em função da área do coletor solar para diferentes vazões de água salobra (100 kg/h, 150 kg/h e 200 kg/h) demonstra uma relação inversa entre a área do coletor e a energia necessária do aquecedor auxiliar, evidenciando que o aumento da área melhora a eficiência do sistema solar. Para a vazão de 100 kg/h, o Q_{AquecAux} diminui de 22.641 kJ/h (1 m²) para 13.505 kJ/h (45 m²), uma redução de 40,3%, enquanto para 200 kg/h, os valores caem de 47.686 kJ/h para 36.221 kJ/h, representando uma redução menor, de cerca de 24%, devido à maior demanda térmica das vazões mais altas.

A vazão de água salobra tem impacto direto na necessidade de energia do aquecedor auxiliar. Vazões maiores, como 200 kg/h, exigem mais energia devido à maior demanda

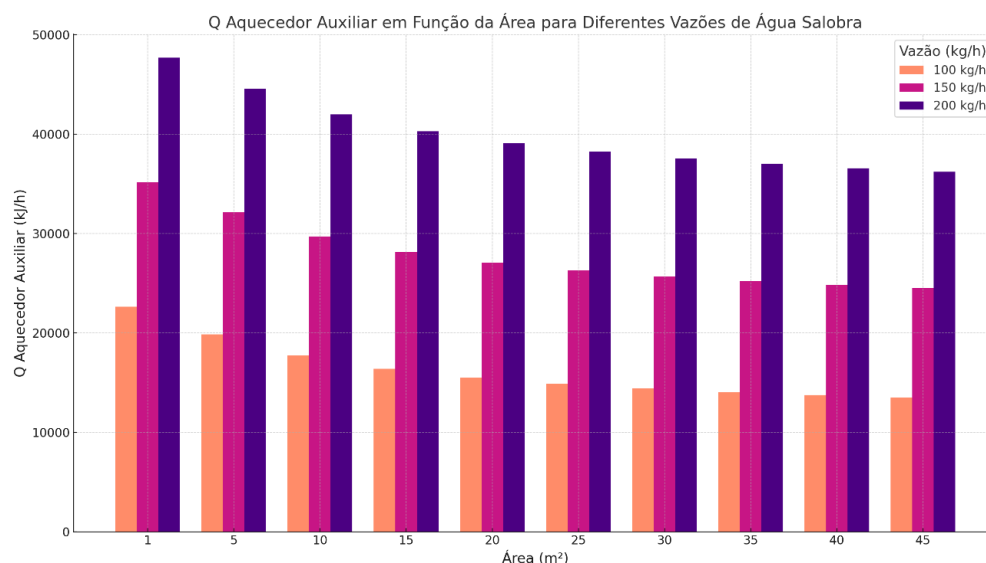
térmica. Para uma área de 1 m², o Q_{AquecAux} aumenta de 22.641 kJ/h para 35.153 kJ/h (150 kg/h, um aumento de 55,2%) e para 47.686 kJ/h (200 kg/h, um aumento de 35,7% em relação a 150 kg/h e 110,6% em relação a 100 kg/h). Esse comportamento reflete a maior dependência de fontes auxiliares para atender a alta demanda hídrica, mesmo com o aumento da área.

A eficiência do sistema em reduzir a dependência do aquecedor auxiliar é evidente, mas os ganhos marginais diminuem à medida que a área aumenta. Para a vazão de 100 kg/h, o aumento de 1 m² para 5 m² reduz o Q_{AquecAux} em 12,5%, enquanto o aumento de 40 m² para 45 m² gera apenas uma redução de 1,7%. Para 200 kg/h, os ganhos marginais são ainda menores, com reduções de 6,6% nas primeiras expansões de área e 1,2% nas últimas.

Estatisticamente, o sistema apresenta consistência, com coeficientes de variação baixos que reforçam a previsibilidade do comportamento. As maiores dispersões são observadas em sistemas de maior vazão, como 200 kg/h, devido à influência mais significativa da alta demanda térmica.

Do ponto de vista prático, os resultados sugerem que o aumento da área do coletor solar é mais eficaz em sistemas de menor vazão, como 100 kg/h, onde a energia solar pode suprir uma fração maior da demanda térmica. Em sistemas com vazões maiores, como 200 kg/h, o impacto do aumento da área é limitado, e estratégias híbridas, como o uso de trocadores de calor mais eficientes ou armazenamento térmico, podem ser necessárias para melhorar o desempenho do sistema.

Figura 39 – Energia no Aquecedor Auxiliar em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra



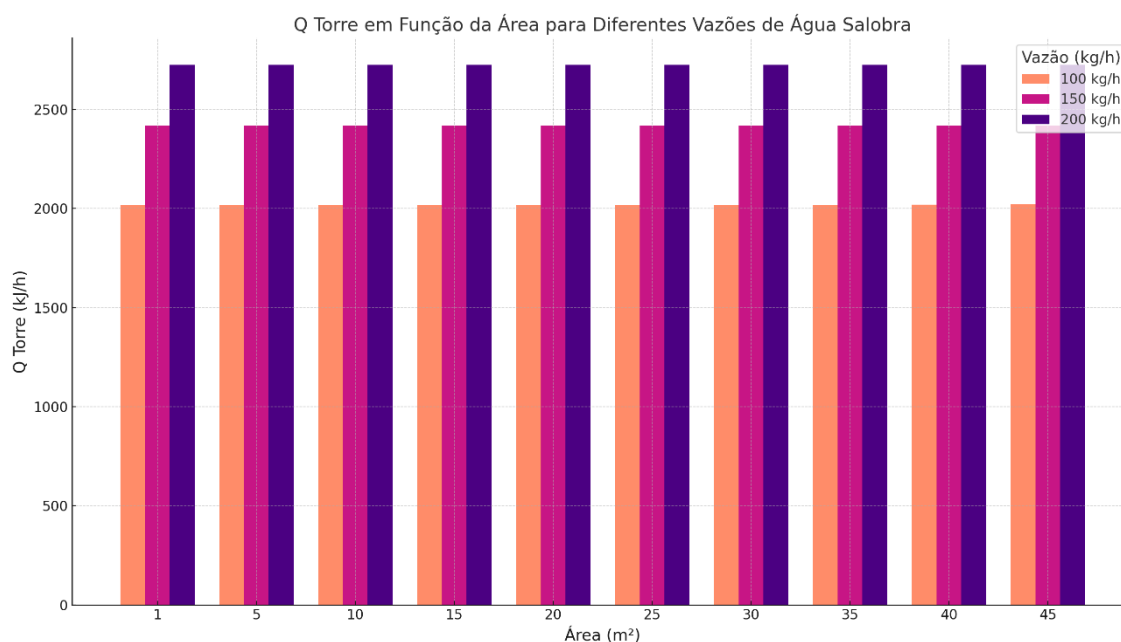
O gráfico de Q_{torre} (kJ/h) (Figura 40) em função da área do coletor solar para diferentes vazões de água salobra (100 kg/h, 150 kg/h e 200 kg/h) revela que a energia térmica dissipada pela torre de resfriamento permanece praticamente constante, independentemente do aumento na área do coletor solar. Os valores de Q_{torre} para a vazão de 100 kg/h variam minimamente, de 2.016 kJ/h (1 m²) para 2.021 kJ/h (45 m²), um incremento de apenas 0,2%. Para vazões de 150 kg/h e 200 kg/h, os valores mantêm-se completamente constantes em 2.419 kJ/h e 2.725 kJ/h, respectivamente, ao longo de todas as áreas analisadas. Esses resultados sugerem que a dissipação térmica da torre é praticamente independente da área do coletor solar, sendo mais influenciada pela vazão de água salobra.

A análise da influência da vazão no Q_{torre} destaca que a demanda térmica cresce proporcionalmente à vazão, resultando em maiores valores de dissipação para maiores vazões. Comparando as médias de Q_{torre} entre as vazões, observa-se que o valor para 150 kg/h é 19,9% maior que para 100 kg/h, enquanto para 200 kg/h, o aumento em relação a 150 kg/h é de 12,6% e de 35,1% em relação a 100 kg/h. Esses resultados refletem a relação direta entre a vazão processada e a quantidade de calor que precisa ser dissipada pela torre, independentemente da área do coletor solar.

A eficiência do sistema de resfriamento da torre não é impactada pela área do coletor solar, como evidenciado pela constância dos valores de Q_{torre} ao longo de todas as áreas avaliadas. Essa constância sugere que o sistema de resfriamento opera em um regime estável, determinado unicamente pela vazão. A análise estatística reforça essa conclusão, com coeficientes de variação inferiores a 0,1% em todas as vazões, indicando uma operação previsível e eficiente.

Na prática, esses resultados simplificam o processo de dimensionamento da torre de resfriamento, pois mostram que a área do coletor solar não influencia significativamente a dissipação térmica. O dimensionamento da torre deve priorizar a vazão de água salobra processada, que é a variável determinante para a demanda térmica. Além disso, a estabilidade do sistema ao longo de diferentes condições reforça sua confiabilidade operacional. Esse comportamento é igual à Configuração IV e VI.

Figura 40 – Energia na Torre em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra



A Figura 41 apresenta os valores de Q_{coil} (kJ/h) em função da área do coletor solar para três diferentes vazões de água salobra (100 kg/h, 150 kg/h e 200 kg/h). A análise demonstra que o calor transferido para o coil mantém-se praticamente constante, com variações mínimas ao longo do aumento da área, destacando que o Q_{torre} é essencialmente dependente da vazão e não da área do coletor solar. A Configuração II, IV e VI tem o mesmo comportamento.

Para a vazão de 100 kg/h, os valores de Q_{coil} iniciam em 201,28 kJ/h para 1 m² e aumentam ligeiramente para 201,74 kJ/h em 45 m², um incremento de apenas 0,2%. Já para as vazões de 150 kg/h e 200 kg/h, os valores permanecem constantes em 250,81 kJ/h e 289,17 kJ/h, respectivamente, ao longo de todas as áreas analisadas. Esses resultados indicam que o calor transferido para o coil é determinado principalmente pela vazão processada e não sofre influência relevante do aumento da área do coletor solar.

A influência da vazão no Q_{coil} é significativa, com os valores aumentando proporcionalmente à vazão de água salobra. Para 100 kg/h, a média de 201,28 kJ/h reflete a menor transferência térmica devido à menor vazão. Já para 150 kg/h, a média aumenta para 250,81 kJ/h, representando um incremento de 24,6% em relação a 100 kg/h. Por fim, para 200 kg/h, a média é de 289,17 kJ/h, correspondendo a aumentos de 15,3% em relação a 150 kg/h e 43,7% em relação a 100 kg/h. Esse comportamento destaca que o coil responde

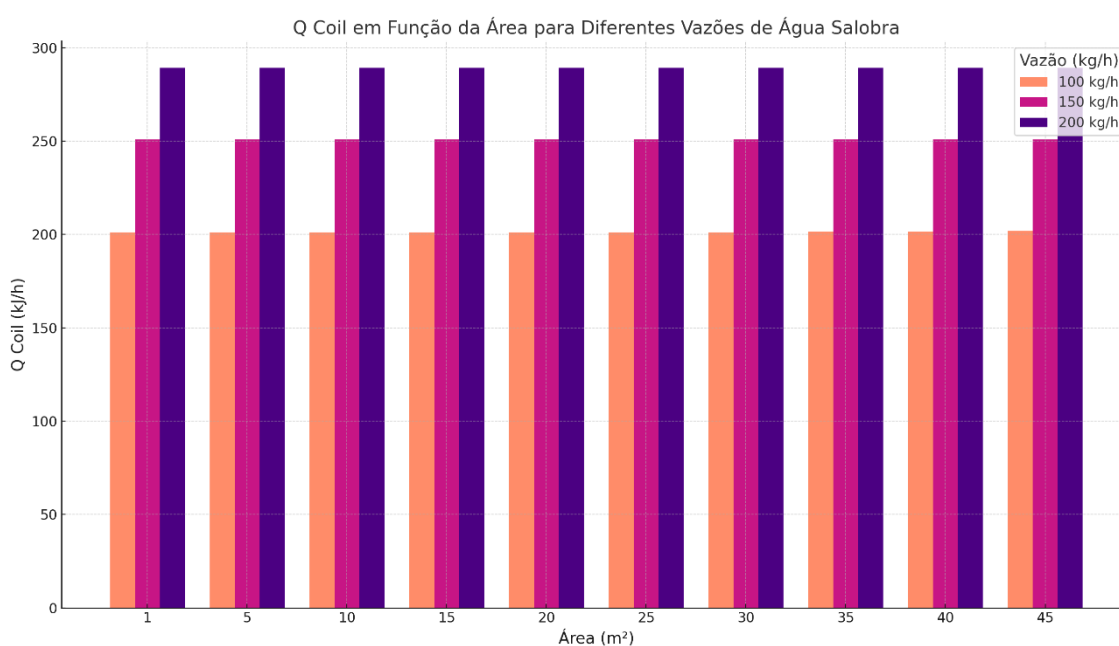
diretamente à vazão, transferindo mais calor para atender às demandas térmicas associadas a volumes maiores de água.

A estabilidade dos valores de Q_{coil} ao longo das áreas reflete a eficiência operacional do sistema, com o coil mantendo uma transferência térmica consistente para cada vazão. Essa constância sugere que o desempenho do coil não é afetado pela área do coletor solar, mas sim pela carga térmica imposta pela vazão processada. As variações mínimas observadas para 100 kg/h em áreas maiores podem ser atribuídas a flutuações operacionais insignificantes.

Do ponto de vista estatístico, o comportamento do Q_{coil} é altamente previsível, com coeficientes de variação desprezíveis para todas as vazões. Para 100 kg/h, o incremento máximo de 0,2% ao longo das áreas reforça a estabilidade do sistema, enquanto para 150 kg/h e 200 kg/h, os valores são completamente constantes, evidenciando uniformidade no comportamento do sistema.

Na prática, os resultados mostram que o dimensionamento do coil pode ser realizado com base exclusivamente na vazão de água salobra processada, sem necessidade de considerar a área do coletor solar. Essa independência simplifica o processo de projeto, permitindo maior flexibilidade no ajuste da área do coletor sem impacto significativo na transferência de calor para o coil. Para vazões maiores, os sistemas devem ser configurados para suportar o aumento proporcional no Q_{coil} , garantindo que a demanda térmica seja atendida de forma eficiente.

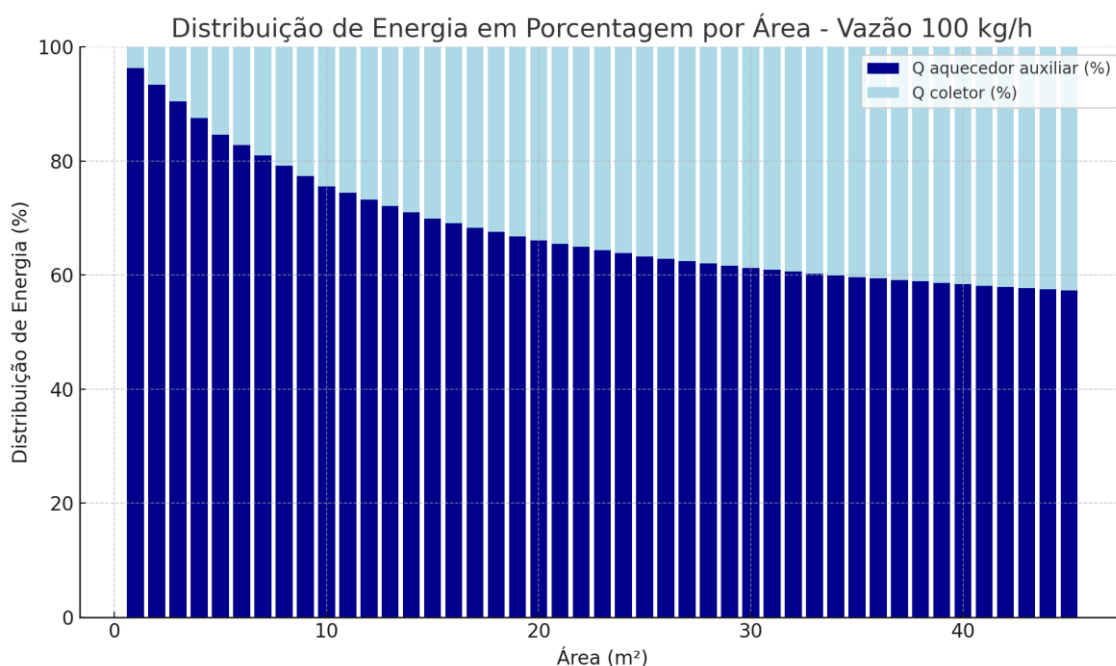
Figura 41 – Energia no Coil em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra



É interessante notar também a relação entre a energia envolvida no coletor solar e no aquecedor auxiliar. As Figuras 42, 43 e 44 ilustram a distribuição percentual de energia entre o calor do aquecedor auxiliar e o calor captado pelo coletor solar para três diferentes vazões de água salobra (100, 150 e 200 kg/h). Essa análise é essencial para avaliar a contribuição relativa de cada componente no sistema de dessalinização em função da área do coletor solar.

Para a vazão mais baixa (100 kg/h), observa-se que a contribuição relativa do aquecedor auxiliar é majoritária para pequenas áreas do coletor solar, superando 95% do total de energia fornecida ao sistema. Com o aumento da área, a fração de energia do coletor solar cresce gradativamente, reduzindo a dependência do aquecedor auxiliar. Para áreas acima de 40 m², a energia captada pelo coletor solar alcança aproximadamente 40% do total. Esse comportamento indica que o aumento da área do coletor pode reduzir significativamente o consumo de energia auxiliar em sistemas com baixa vazão.

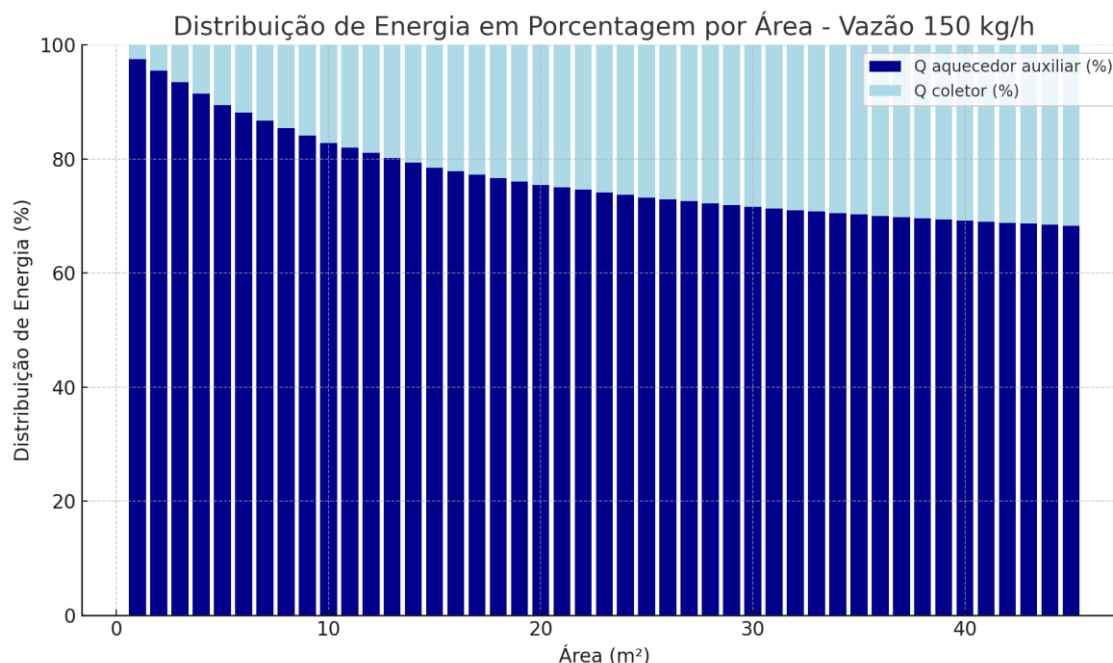
Figura 42 – Distribuição de Energia em Porcentagem por Área – 100 kg/h



Quando a vazão é incrementada para 150 kg/h, o mesmo padrão de comportamento é observado, mas com uma menor contribuição relativa do coletor solar para áreas pequenas. Nesse caso, a energia do aquecedor auxiliar predomina ainda mais para áreas pequenas, com uma redução mais lenta à medida que a área do coletor aumenta. Para áreas próximas de 45 m², a energia captada pelo coletor solar atinge cerca de 30% do total, o que reforça a

importância de otimizar a área do coletor para vazões intermediárias, onde o consumo de energia auxiliar permanece significativo.

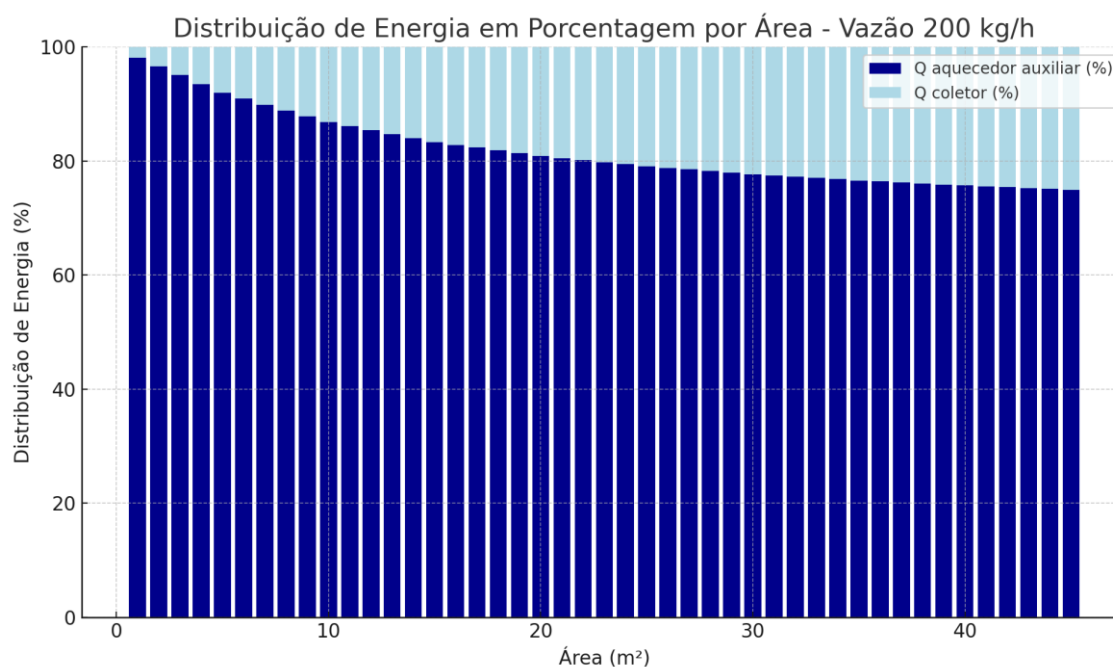
Figura 43 – Distribuição de Energia em Porcentagem por Área – 150 kg/h



Na maior vazão analisada (200 kg/h), o papel do aquecedor auxiliar torna-se ainda mais preponderante. Para áreas menores que 10 m², o coletor solar contribui com menos de 5% da energia total. Mesmo para áreas maiores, como 45 m², a energia captada pelo coletor solar não excede 25% do total. Esse resultado sugere que, para vazões mais elevadas, o dimensionamento do coletor solar deve ser ainda mais estratégico, dado que a dependência do aquecedor auxiliar permanece alta mesmo com grandes áreas de captação.

Os gráficos revelam que o aumento da vazão de água salobra resulta em uma maior dependência do aquecedor auxiliar, independentemente da área do coletor solar. Isso ocorre porque a demanda energética do sistema aumenta com a vazão, enquanto a capacidade do coletor solar de fornecer energia adicional é limitada, mesmo com o incremento da área. Essa relação é particularmente importante para o dimensionamento de sistemas de dessalinização que operam em condições de maior demanda hídrica.

Figura 44 – Distribuição de Energia em Porcentagem por Área – 200 kg/h



A análise evidencia que, para vazões menores (100 kg/h), é possível alcançar uma significativa redução na dependência do aquecedor auxiliar por meio do aumento da área do coletor solar. No entanto, para vazões mais elevadas (150 e 200 kg/h), o impacto do aumento da área do coletor na redução da energia auxiliar é menos expressivo. Assim, para sistemas de alta vazão, alternativas como a integração de tecnologias híbridas (solar e geotérmica) ou a otimização de parâmetros operacionais podem ser mais eficazes para reduzir o consumo energético.

Os resultados demonstram a importância de considerar a vazão de operação e a área do coletor solar no dimensionamento de sistemas de dessalinização. Para aplicações de baixa vazão, o aumento da área do coletor solar apresenta um impacto positivo mais significativo na redução do consumo de energia auxiliar. Por outro lado, para vazões mais elevadas, a dependência do aquecedor auxiliar permanece alta, destacando a necessidade de estratégias complementares de eficiência energética.

4.3. CONFIGURAÇÃO III

A Figura 45 apresenta a relação entre o Fator de Utilização Solar (SUF) e a área do coletor para diferentes vazões de água salobra (100 kg/h, 150 kg/h e 200 kg/h). Repara-se que o SUF diminui à medida que a área aumenta, destacando uma maior eficiência proporcional em áreas menores.

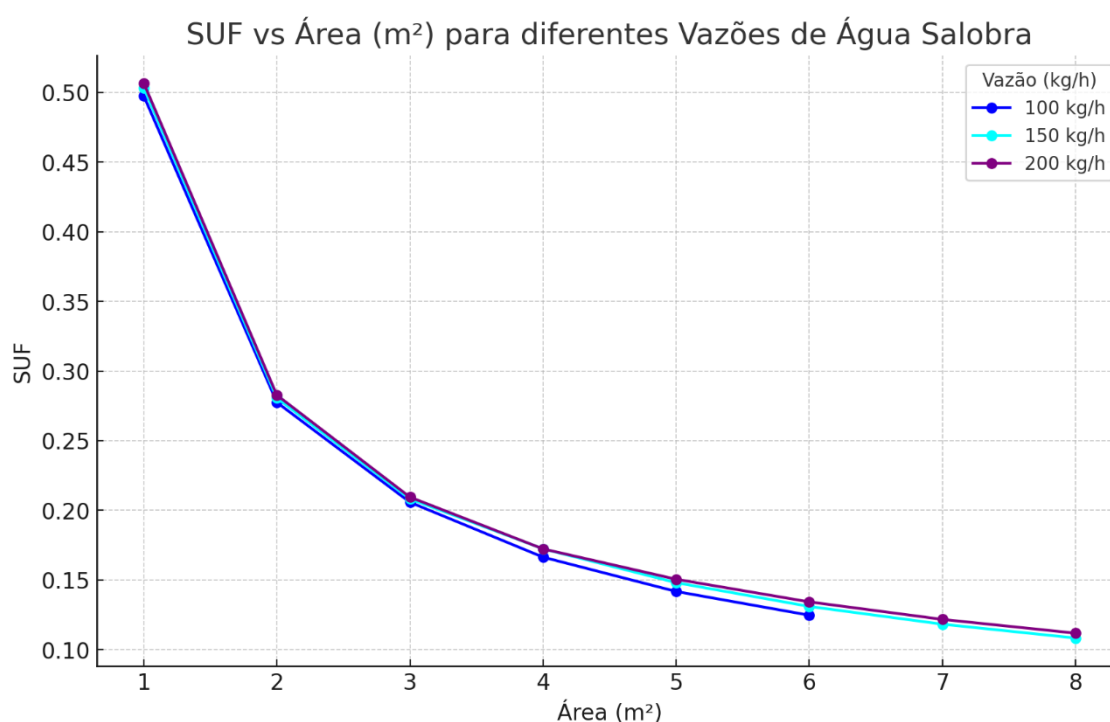
Para a vazão de 100 kg/h, o SUF inicia em 0,4976 para 1 m² e reduz-se para 0,1247 em 6 m². Essa vazão apresenta os menores valores de SUF ao longo das áreas, refletindo uma menor dependência do aproveitamento solar em áreas maiores.

Na vazão de 150 kg/h, o SUF começa em 0,5033 para 1 m², diminuindo para 0,1083 em 8 m². Essa vazão apresenta valores intermediários, com uma redução gradual do SUF conforme a área aumenta, indicando maior estabilidade em relação ao aproveitamento solar.

Para a vazão de 200 kg/h, o SUF tem o maior valor inicial, 0,5068 em 1 m², reduzindo-se para 0,1038 em 8 m². Essa vazão mostra uma dependência significativa do tamanho da área para manter o fator de utilização solar, destacando a importância de áreas menores para maximizar o desempenho.

Esses dados evidenciam que o SUF é inversamente proporcional à área e que vazões maiores, como 200 kg/h, exigem áreas menores para maximizar o fator de utilização solar. Sistemas com vazões menores, como 100 kg/h, apresentam uma eficiência mais estável em diferentes áreas, reforçando a necessidade de um dimensionamento otimizado para cada vazão.

Figura 45 – SUF em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra



Observa-se que na Figura 46, para todas as vazões, o FWP aumenta com o incremento da área, indicando uma maior produção de água doce com sistemas de maior área disponível.

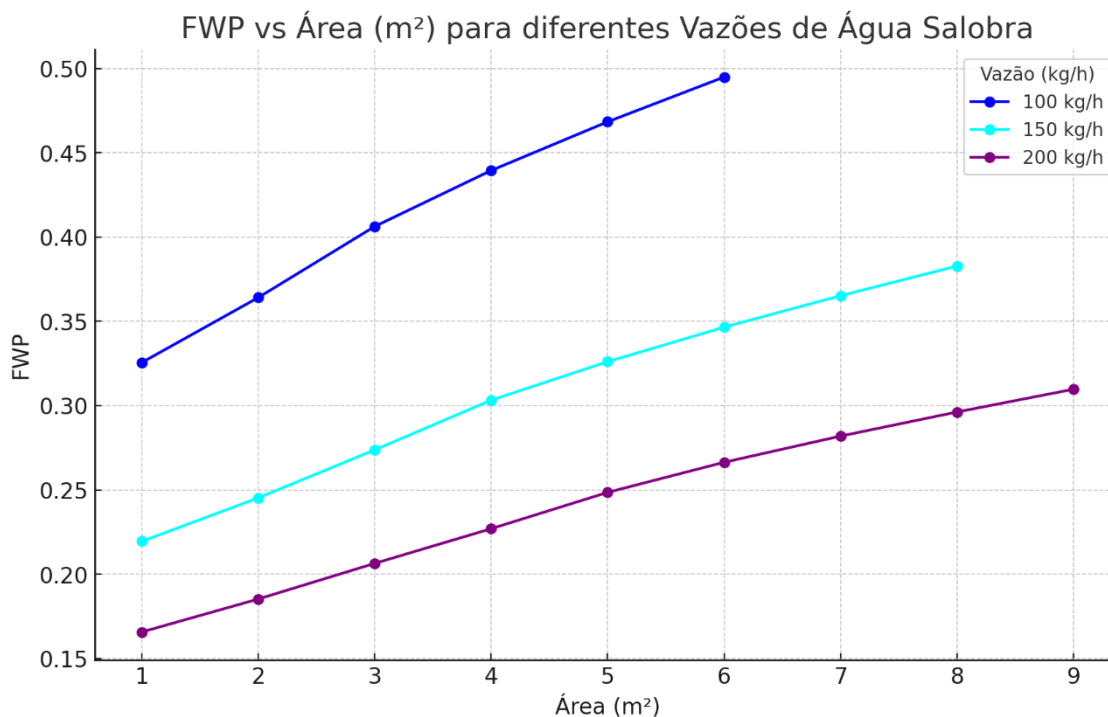
Para a vazão de 100 kg/h, o FWP apresenta valores crescentes, iniciando em 0,3255 para uma área de 1 m² e alcançando 0,4949 em 6 m². Esse comportamento demonstra uma maior eficiência na produção de água doce com o aumento da área coletora para baixas vazões.

Na vazão de 150 kg/h, o FWP também aumenta progressivamente, partindo de 0,2194 em 1 m² e atingindo 0,3828 em 8 m². Apesar do crescimento contínuo, os valores são inferiores aos observados para 100 kg/h, refletindo a relação inversa entre a vazão e a eficiência do sistema.

Por fim, para a vazão de 200 kg/h, o FWP começa em 0,1656 para 1 m² e cresce até 0,3097 em 9 m². Este comportamento confirma que, em sistemas de maior vazão, a eficiência é reduzida, embora a produção total aumente com o incremento da área.

O gráfico permite concluir que a área coletora desempenha um papel fundamental na eficiência de produção de água doce, especialmente em baixas vazões, enquanto maiores vazões reduzem a eficiência relativa do sistema devido à limitação da capacidade de captura e conversão energética.

Figura 46 – FWP em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra



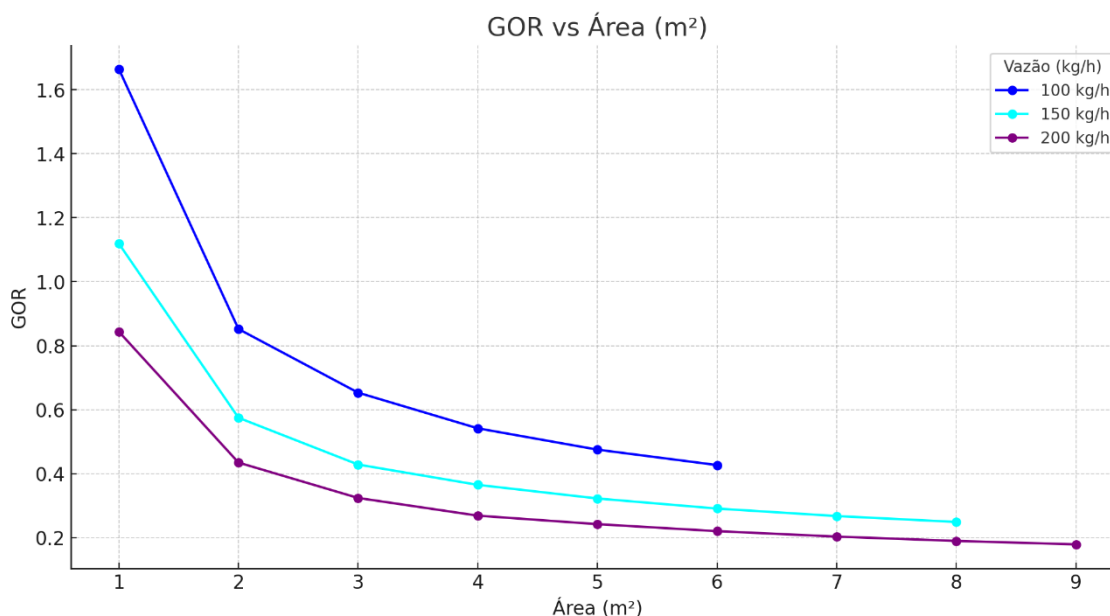
Nota-se que na Figura 47 que o GOR diminui à medida que a área aumenta, independentemente da vazão considerada, indicando que a eficiência de conversão térmica do sistema é mais significativa em áreas menores.

Para uma vazão de 100 kg/h, os valores de GOR começam em 1,664 para uma área de 1 m² e reduzem-se progressivamente até 0,427 em 6 m². Esse comportamento sugere que, para baixas vazões, o sistema opera de forma mais eficiente em áreas menores, devido à maior concentração de energia térmica.

Na vazão de 150 kg/h, o GOR inicia em 1,119 para uma área de 1 m², caindo para 0,249 em 8 m². Embora o desempenho seja inferior ao observado para 100 kg/h, a queda mais gradual no GOR em áreas maiores evidencia que o sistema ainda mantém uma eficiência aceitável, mesmo com o aumento da área.

Para a vazão de 200 kg/h, o GOR apresenta os menores valores, partindo de 0,844 em 1 m² e decrescendo até 0,179 em 9 m². Esses resultados confirmam que, em sistemas operando com vazões mais altas, a eficiência térmica é consideravelmente reduzida, especialmente em áreas maiores. De modo geral, o gráfico destaca a influência significativa da vazão e da área na eficiência térmica do sistema, evidenciada pelo GOR.

Figura 47 – GOR em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra

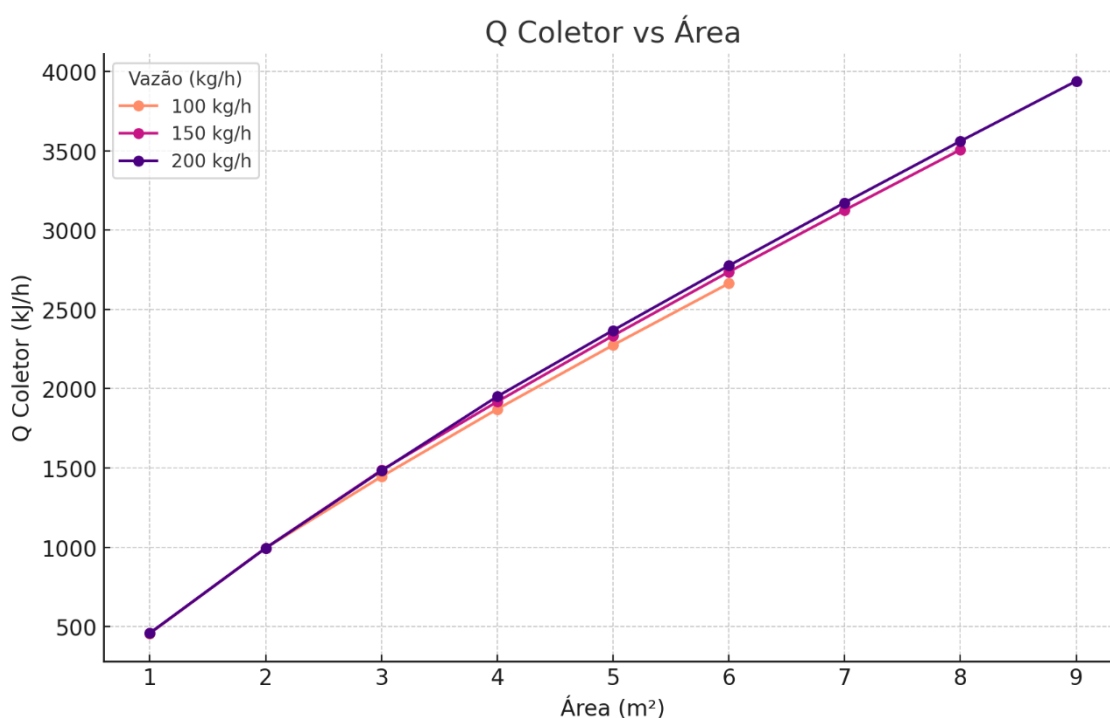


A Figura 48 que relaciona o calor coletado com a área evidencia uma relação linear direta para as três vazões de água salobra avaliadas: 100, 150 e 200 kg/h. Para a vazão de 100 kg/h, observa-se que Q_{coletor} começa em 456,55 kJ/h para uma área de 1 m², aumentando

para 995,43 kJ/h em 2 m² e alcançando 2663,50 kJ/h em 6 m². Já para a vazão de 150 kg/h, o calor coletado inicia em 458,30 kJ/h para 1 m², crescendo para 995,18 kJ/h em 2 m² e atingindo 3506,31 kJ/h em 8 m². Na maior vazão avaliada (200 kg/h), os valores começam em 459,05 kJ/h para 1 m² e chegam a 3939,24 kJ/h para 9 m².

A diferença observada entre as vazões demonstra que, para uma mesma área, maiores vazões resultam em maior quantidade de calor captado, o que é esperado devido ao maior fluxo de massa. Por exemplo, em uma área de 5 m², os valores de Q_{coletor} foram de 2274,37 kJ/h para 100 kg/h, 2333,92 kJ/h para 150 kg/h e 2367,65 kJ/h para 200 kg/h.

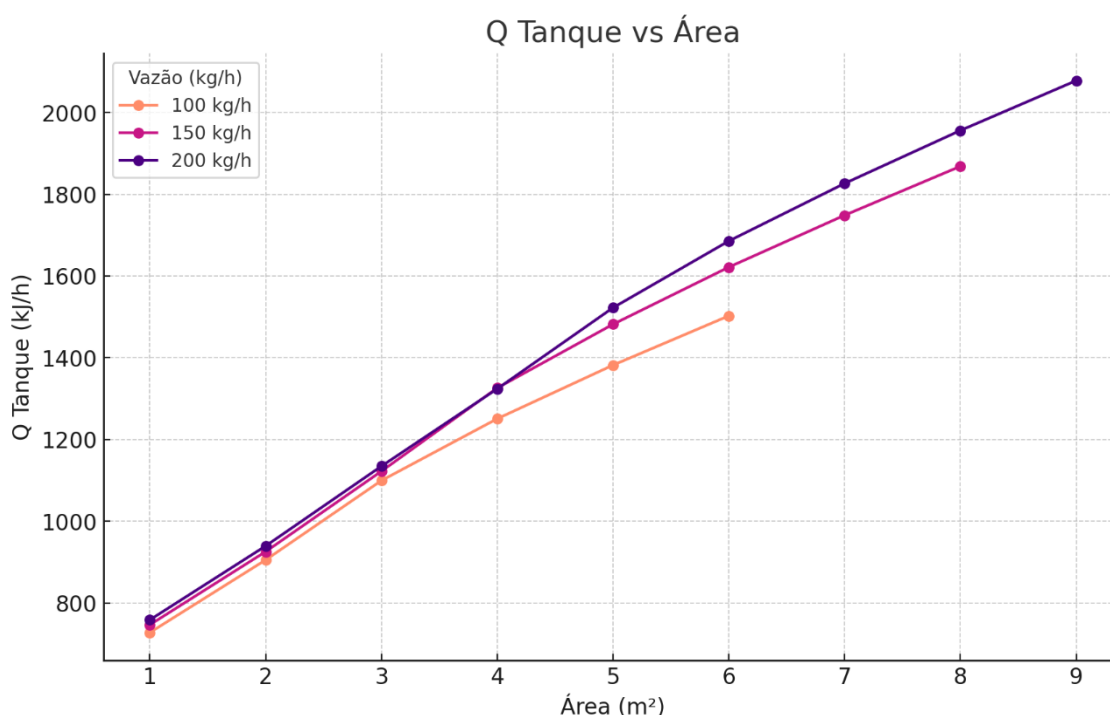
Figura 48 – Energia no Coletor em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra



O calor acumulado no tanque Q_{tanque} também apresenta um crescimento linear em função da área, mas com valores geralmente maiores que os observados para Q_{coletor} , devido ao armazenamento térmico no sistema. Para a vazão de 100 kg/h, Q_{tanque} começa em 727,67 kJ/h para 1 m² e aumenta progressivamente até 1502,52 kJ/h para 6 m². No caso da vazão de 150 kg/h, os valores começam em 746,65 kJ/h em 1 m² e chegam a 1868,35 kJ/h em 8 m². Já para 200 kg/h, o calor acumulado inicia em 758,72 kJ/h em 1 m² e atinge 2077,95 kJ/h em 9 m².

Para uma mesma área, o Q_{tanque} aumenta com a vazão. Por exemplo, em 3 m², os valores foram de 1099,50 kJ/h, 1122,32 kJ/h e 1134,70 kJ/h para as vazões de 100, 150 e 200 kg/h, respectivamente. Esse comportamento reforça o papel do tanque como componente de armazenamento térmico, fundamental para estabilizar o sistema e garantir a continuidade do processo, mesmo sob condições variáveis de entrada.

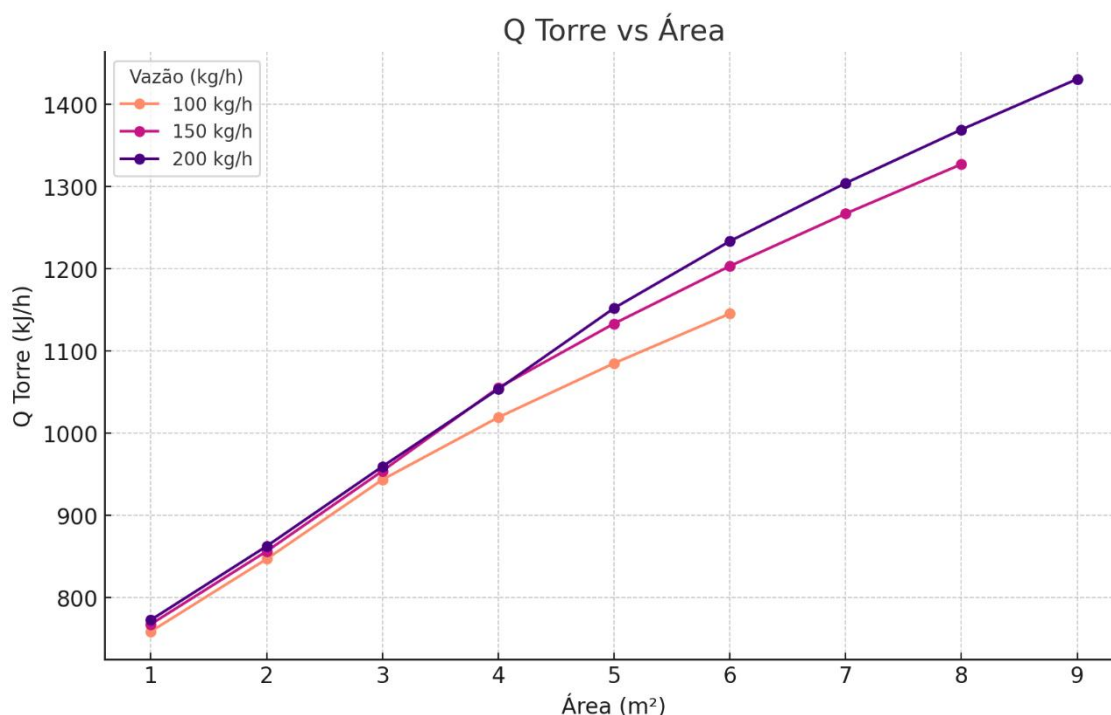
Figura 49 – Energia no Tanque em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra



O calor dissipado na torre Q_{torre} é diretamente proporcional à área, com valores que refletem o balanço térmico do sistema. Para 100 kg/h, Q_{torre} inicia em 759,07 kJ/h para 1 m² e aumenta linearmente até 1145,24 kJ/h para 6 m². Na vazão de 150 kg/h, os valores começam em 767,88 kJ/h e atingem 1326,73 kJ/h para 8 m². Já para 200 kg/h, o calor dissipado começa em 773,10 kJ/h e chega a 1430,24 kJ/h em 9 m².

A dissipação térmica também aumenta com a vazão para uma mesma área. Por exemplo, em 4 m², Q_{torre} foi de 1019,16 kJ/h para 100 kg/h, 1055,15 kJ/h para 150 kg/h e 1053,49 kJ/h para 200 kg/h. Esses valores evidenciam que a torre é responsável por regular a temperatura do sistema, especialmente em áreas maiores e vazões elevadas, prevenindo o superaquecimento e mantendo o sistema em equilíbrio.

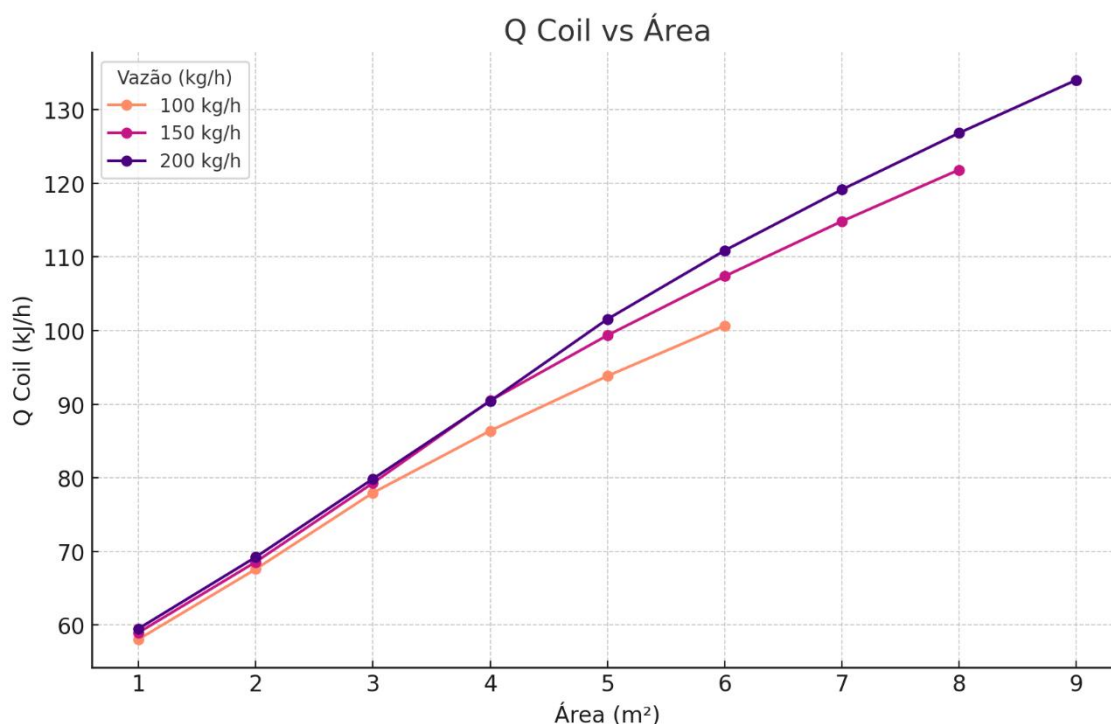
Figura 50 – Energia na Torre em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra



O calor trocado no coil (Q_{coil}) apresenta um comportamento linear crescente, mas com valores significativamente menores em comparação com os outros componentes. Para 100 kg/h, (Q_{coil}) inicia em 58,08 kJ/h para 1 m² e cresce para 100,68 kJ/h em 6 m². Para 150 kg/h, os valores começam em 58,99 kJ/h em 1 m² e chegam a 121,84 kJ/h em 8 m². Já para 200 kg/h, o calor trocado no coil inicia em 59,53 kJ/h e atinge 134,03 kJ/h em 9 m².

Embora os valores de (Q_{coil}) sejam menores, seu crescimento constante com a área demonstra que o coil desempenha um papel de suporte na troca térmica, especialmente em condições de maior área e vazão. Por exemplo, em 3 m², os valores de (Q_{coil}) foram de 77,98 kJ/h, 79,30 kJ/h e 79,87 kJ/h para 100, 150 e 200 kg/h, respectivamente.

Figura 51 – Energia no Coil em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra



A Figura 52 analisa a vazão de água dessalinizada (kg/h) ao longo dos meses para diferentes áreas de operação (1 m² a 6 m²). Os resultados evidenciam a influência da sazonalidade e da área coletora no desempenho do sistema de dessalinização. Nos meses de maior incidência solar, como março, observa-se um desempenho superior. Por exemplo, para uma área de 1 m², a vazão máxima em março é de 0,3458 kg/h, enquanto para 6 m² o valor correspondente é de 0,5618 kg/h, representando um incremento de 62%. Esse comportamento demonstra a relação direta entre a radiação solar disponível e a eficiência do sistema, especialmente para áreas maiores.

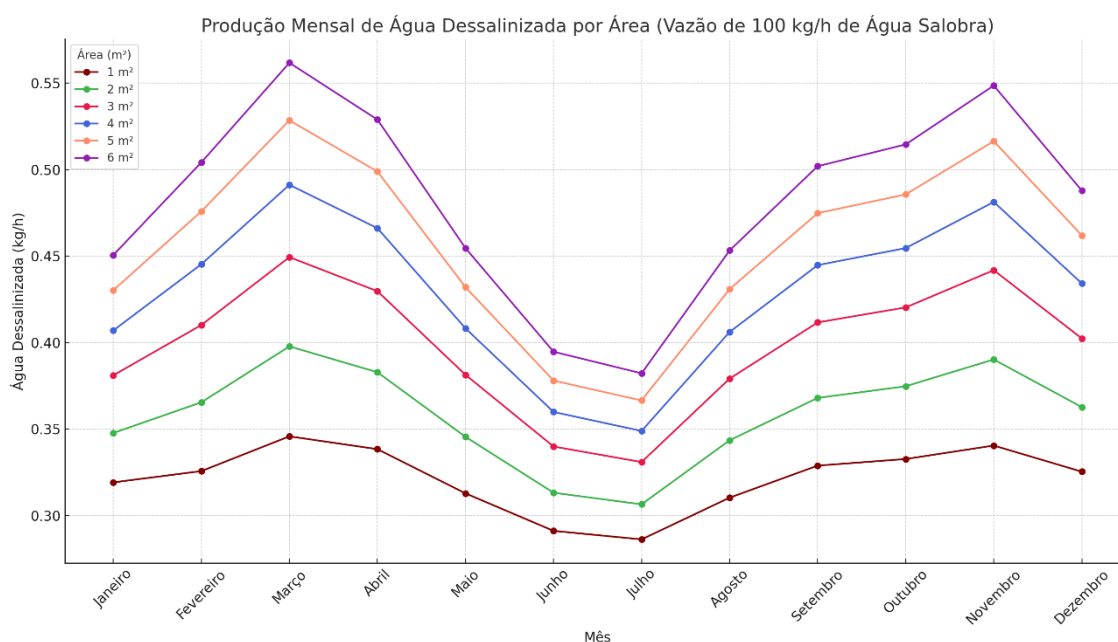
Por outro lado, nos meses de menor radiação solar, como junho e julho, ocorre uma queda acentuada na produção de água dessalinizada. Em julho, a vazão mínima para uma área de 1 m² é de 0,2862 kg/h, enquanto para 6 m² o valor correspondente é de 0,3822 kg/h. Essa redução é atribuída à menor disponibilidade de energia térmica, limitando a capacidade de dessalinização do sistema. Apesar disso, o aumento da área coletora continua a desempenhar um papel importante na manutenção da produção, ainda que em níveis inferiores.

Ao considerar o funcionamento do sistema por 12 horas diárias, é possível estimar a produção diária de água dessalinizada. Em março, que apresenta os melhores resultados, a produção diária varia de 4,15 kg/dia para uma área de 1 m² até 6,74 kg/dia para 6 m². Já em

julho, durante o período de menor desempenho, a produção diária varia de 3,43 kg/dia (1 m^2) a 4,59 kg/dia (6 m^2). Esses valores destacam a importância do dimensionamento adequado da área coletora para atender às demandas específicas de água, considerando as variações sazonais.

Os resultados apresentados reforçam a relevância do sistema de dessalinização solar como uma alternativa viável e sustentável. A análise detalhada evidencia que, além da sazonalidade, o aumento da área coletora contribui diretamente para melhorar o desempenho do sistema, maximizando a produção de água dessalinizada em períodos críticos. Assim, os dados obtidos são fundamentais para o planejamento e a implementação de sistemas otimizados, garantindo maior eficiência no uso de energia solar para atender às necessidades hídricas de regiões vulneráveis.

Figura 52 – Produção Mensal de Água Dessalinizada por Área (Vazão de 100 kg/h de Água Salobra)



A Figura 53 evidencia a produção mensal de água dessalinizada (em kg/h) para diferentes áreas de operação (1 m^2 a 8 m^2) ao longo do ano. A análise mostra como a sazonalidade e a área coletora influenciam diretamente o desempenho do sistema de dessalinização solar.

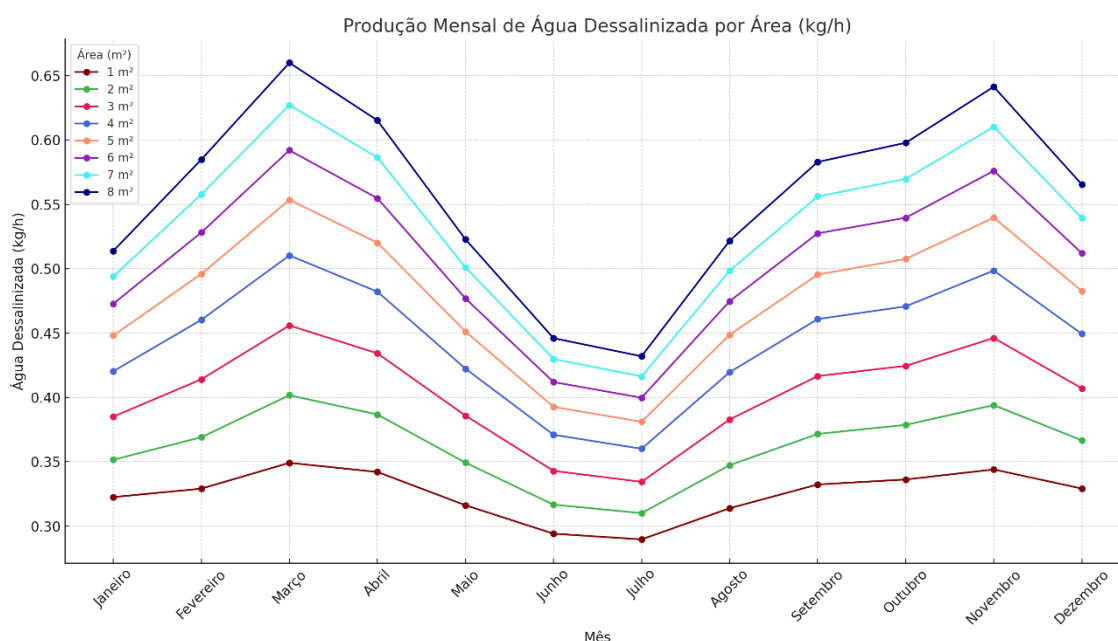
Nos meses de maior radiação solar, como março e setembro, observa-se o melhor desempenho do sistema. Para uma área de 1 m^2 , a produção máxima em março é de 0,3492 kg/h, enquanto para 8 m^2 , no mesmo mês, a produção chega a 0,6601 kg/h, um aumento de

aproximadamente 89%. Esse comportamento evidencia que o incremento da área coletora é fundamental para potencializar a eficiência do sistema, especialmente nos períodos de maior insolação.

Em contrapartida, nos meses de menor radiação solar, como junho e julho, há uma redução significativa na produção. Em julho, a menor produção é registrada, com 0,2897 kg/h para 1 m² e 0,4320 kg/h para 8 m². Apesar dessa queda, o aumento da área coletora continua a proporcionar uma vantagem significativa, mostrando a resiliência do sistema mesmo sob condições menos favoráveis.

Considerando que o sistema opera por 12 horas diárias, é possível estimar a produção diária de água dessalinizada. Em março, durante o período de maior produção, a estimativa para diferentes áreas é: 4,19 kg/dia para 1 m², 4,82 kg/dia para 2 m², 5,47 kg/dia para 3 m², 6,13 kg/dia para 4 m² e 7,92 kg/dia para 8 m². Já em julho, que apresenta os menores valores, a produção diária é de 3,48 kg/dia para 1 m², 3,72 kg/dia para 2 m², 4,32 kg/dia para 4 m² e 5,18 kg/dia para 8 m².

Figura 53 – Produção Mensal de Água Dessalinizada por Área (Vazão de 150 kg/h de Água Salobra)



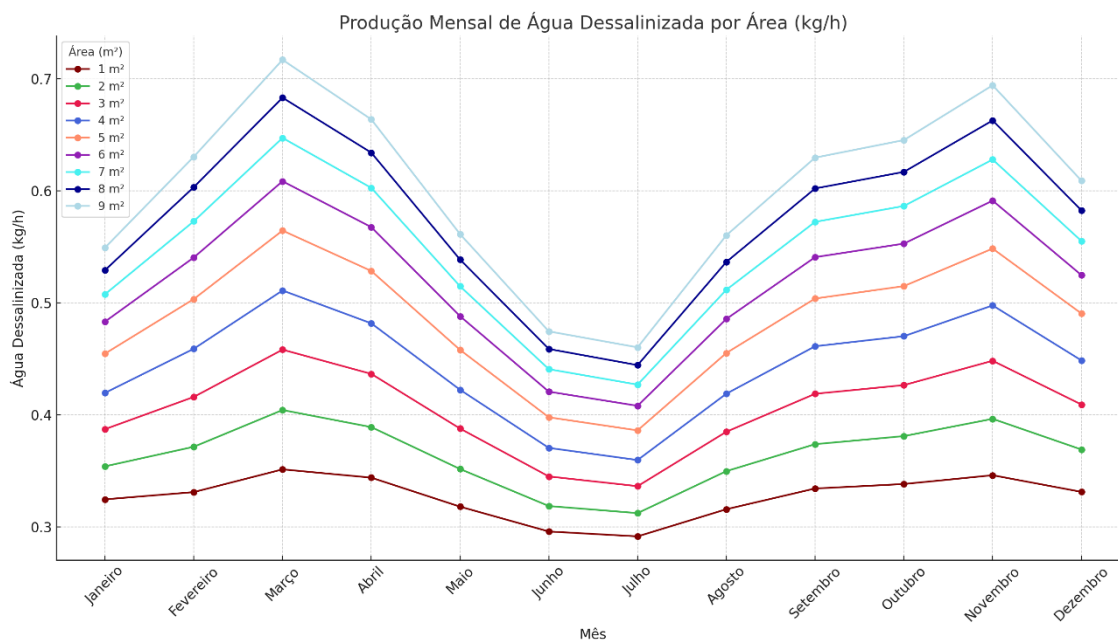
A Figura 54 demonstra a produção mensal de água dessalinizada (em kg/h) para diferentes áreas de operação (1 m² a 9 m²) ao longo do ano, destacando a influência da sazonalidade e da área coletora no desempenho do sistema de dessalinização solar. Observa-se que os picos de produção ocorrem em março e setembro, períodos de maior incidência

solar. Para uma área de 1 m², a produção em março é de 0,3515 kg/h, enquanto para 9 m², no mesmo mês, a produção alcança 0,7170 kg/h, representando um aumento de mais de 104%. Esse comportamento evidencia que o aumento da área coletora potencializa a eficiência do sistema, especialmente durante os meses de alta radiação solar.

Nos meses de menor incidência solar, como junho e julho, a produção de água dessalinizada é reduzida. Em junho, por exemplo, a produção mínima para 1 m² é de 0,2960 kg/h, enquanto para 9 m² é de 0,4746 kg/h. Apesar da queda, o aumento da área coletora proporciona uma vantagem significativa, garantindo maior resiliência e estabilidade na produção, mesmo sob condições menos favoráveis.

Considerando o funcionamento do sistema por 12 horas diárias, a produção diária de água dessalinizada varia significativamente de acordo com a área e o mês analisado. Em março, que apresenta os melhores resultados, a produção diária é de 4,22 kg/dia para 1 m², 6,78 kg/dia para 5 m² e 8,60 kg/dia para 9 m². Já em julho, o período de menor produção, os valores são de 3,50 kg/dia para 1 m², 4,64 kg/dia para 5 m² e 5,52 kg/dia para 9 m².

Figura 54 – Produção Mensal de Água Dessalinizada por Área (Vazão de 200 kg/h de Água Salobra)



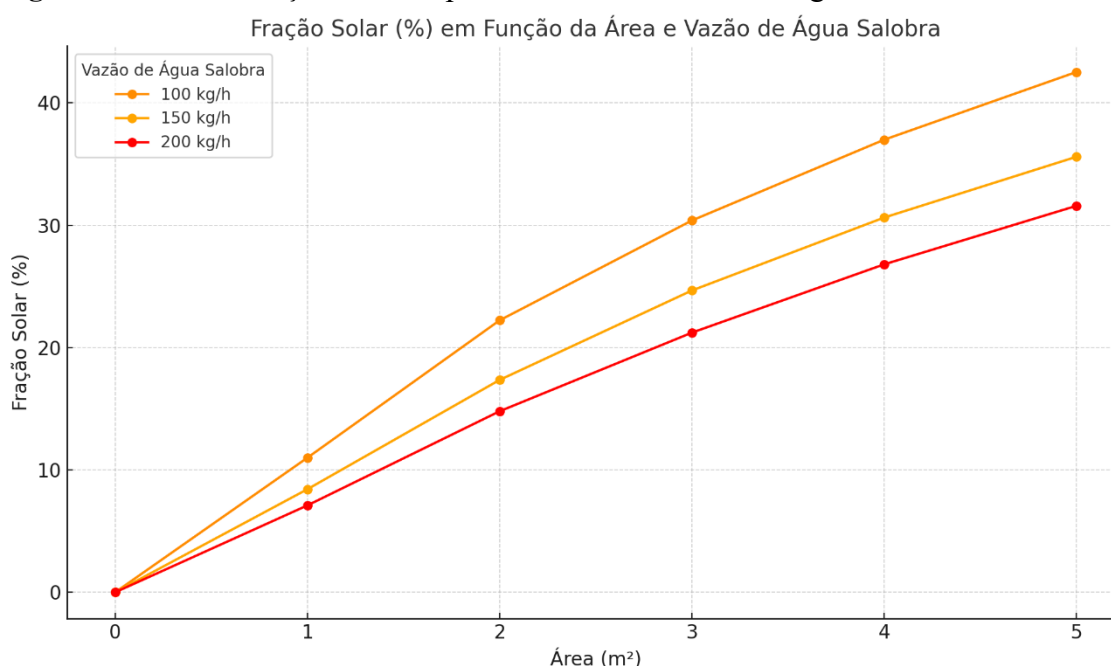
4.4. CONFIGURAÇÃO IV

A Figura 55 apresenta a variação da fração solar (%) em função da área do coletor solar (m^2) para diferentes vazões de água salobra (100, 150 e 200 kg/h). Observa-se que, para todas as vazões, a fração solar aumenta linearmente com o aumento da área do coletor, o que era esperado, uma vez que coletores maiores captam mais energia solar.

A maior eficiência é registrada para a vazão de 100 kg/h, alcançando uma fração solar de aproximadamente 42,5% para 5 m^2 de área. À medida que a vazão aumenta para 150 kg/h e 200 kg/h, a fração solar diminui, chegando a cerca de 35,6% e 31,6%, respectivamente, para a mesma área. Essa diferença ocorre porque vazões maiores exigem mais energia para aquecer a água salobra, enquanto a energia captada permanece constante para uma área fixa.

Esses resultados indicam que, para maximizar a fração solar, é ideal trabalhar com menores vazões ou aumentar proporcionalmente a área dos coletores.

Figura 55 – F_r em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra

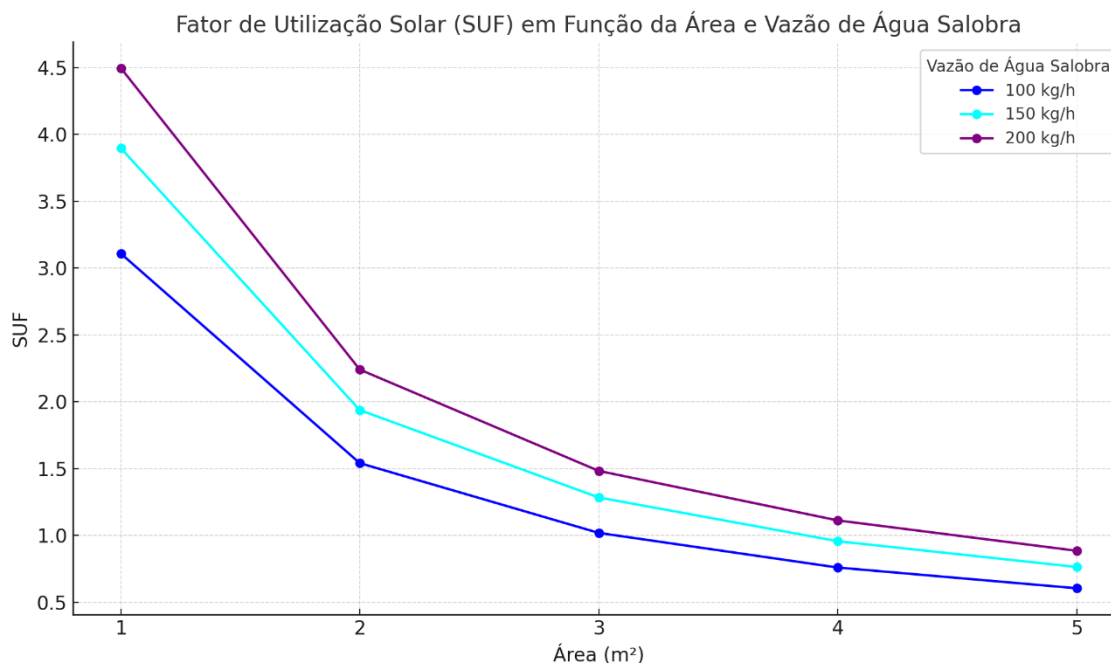


A Figura 56 mostra a relação entre o Fator de Utilização Solar (SUF) e a área do coletor para vazões de 100, 150 e 200 kg/h. Observa-se que o SUF diminui à medida que a área do coletor aumenta, independentemente da vazão, o que indica uma eficiência reduzida com coletores maiores devido à menor demanda de calor auxiliar proporcional.

A vazão de 200 kg/h apresenta os maiores valores de SUF, atingindo 4,49 para 1 m^2 , enquanto a vazão de 100 kg/h possui os menores valores iniciais. Isso ocorre porque vazões

maiores necessitam de mais calor, tornando a contribuição solar mais significativa em termos relativos.

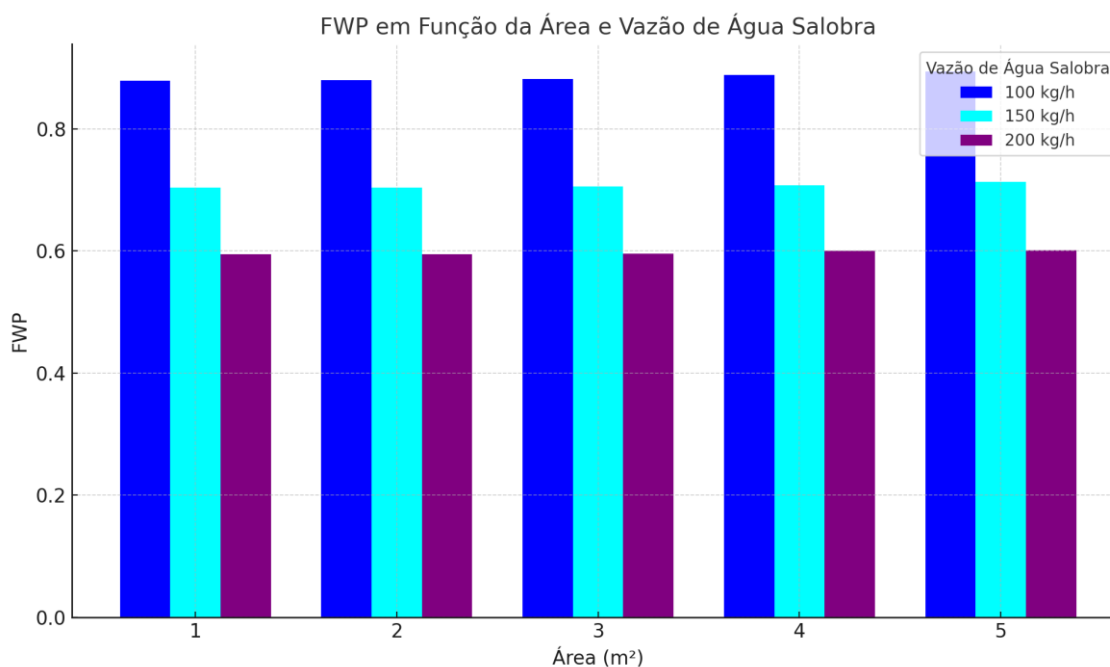
Figura 56 – SUF em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra



O gráfico apresenta o FWP em função da área do coletor solar para três vazões de água salobra (100, 150 e 200 kg/h). Observa-se que o FWP aumenta marginalmente com a área do coletor para todas as vazões, mas o impacto é mais pronunciado para a vazão de 100 kg/h, que apresenta os maiores valores em todas as áreas analisadas.

A vazão de 150 kg/h apresenta um comportamento intermediário, enquanto a vazão de 200 kg/h demonstra o menor FWP, com um crescimento quase constante, atingindo valores ligeiramente superiores a 0,6 em 5 m². Este comportamento é coerente com a teoria, uma vez que vazões menores permitem maior tempo de residência no sistema, favorecendo a eficiência de dessalinização.

Figura 57 – FWP em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra

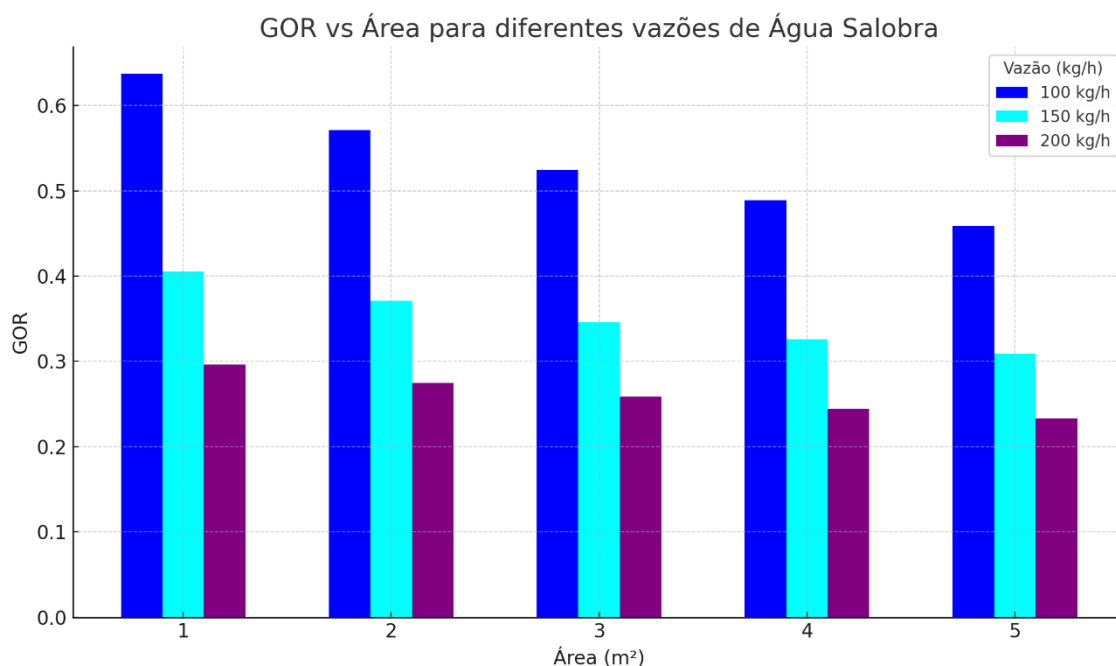


O gráfico apresenta a relação entre GOR e a área para diferentes vazões de água salobra (100 kg/h, 150 kg/h e 200 kg/h). Os dados indicam uma tendência decrescente do GOR conforme a área aumenta, evidenciando a diminuição da eficiência do sistema à medida que a área cresce.

Para a vazão de 100 kg/h, os valores de GOR começam em 0,6369 para uma área de 1 m² e reduzem-se para 0,4588 em uma área de 5 m². Essa é a vazão que apresenta os maiores valores de GOR em todas as áreas analisadas, destacando sua superior eficiência energética. Na vazão de 150 kg/h, o GOR inicia-se em 0,4052 para 1 m² e diminui para 0,3089 em 5 m². Apesar de menor do que para 100 kg/h, os valores permanecem intermediários entre as três vazões, indicando uma eficiência moderada. Já para a vazão de 200 kg/h, os valores de GOR variam de 0,2965 para 1 m² até 0,2331 em 5 m². Essa vazão apresenta a menor eficiência, com os valores de GOR mais baixos ao longo de toda a análise.

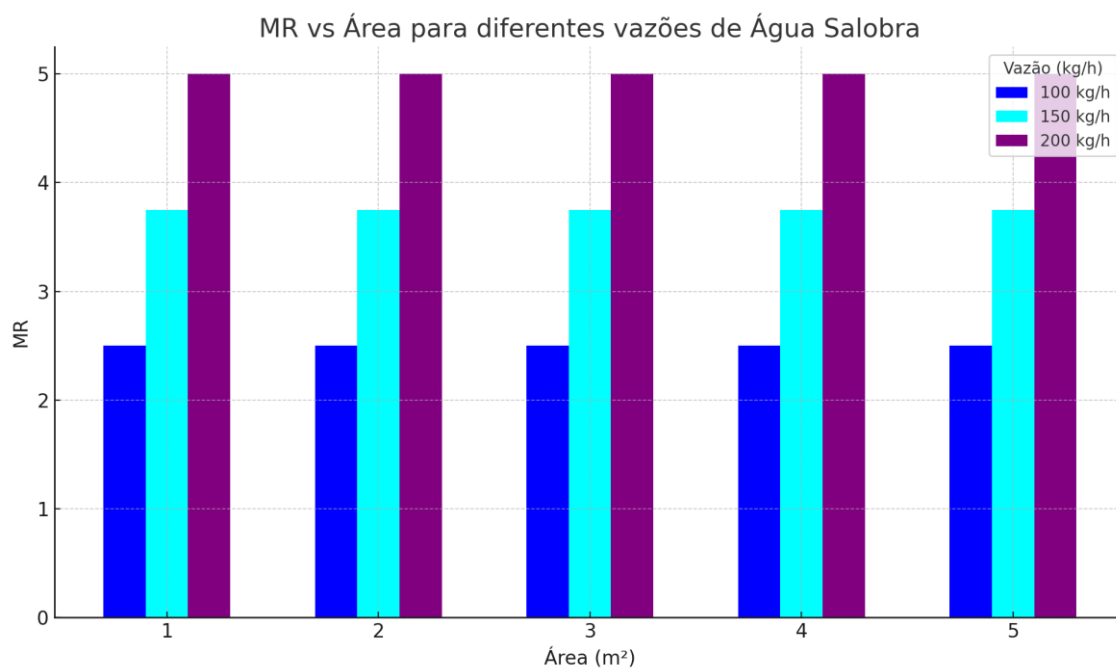
Esses resultados mostram que a vazão de 100 kg/h proporciona a maior eficiência (GOR) em todas as áreas analisadas. Por outro lado, o impacto do aumento da área é mais pronunciado para vazões maiores (150 kg/h e 200 kg/h), sugerindo que o sistema opera de forma menos eficiente com maiores fluxos. Portanto, para maximizar o desempenho energético, a vazão de 100 kg/h é a mais indicada, especialmente em sistemas com restrição de área.

Figura 58 – GOR em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra



A Figura 59 apresenta a relação entre MR e a área para diferentes vazões de água salobra (100 kg/h, 150 kg/h e 200 kg/h). Observa-se que, para cada vazão analisada, o MR permanece constante independentemente da área. Para a vazão de 100 kg/h, o MR é de 2,5; para 150 kg/h, o valor aumenta para 3,75; e, para 200 kg/h, o MR alcança 5, o maior valor registrado.

Figura 59 – MR em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra

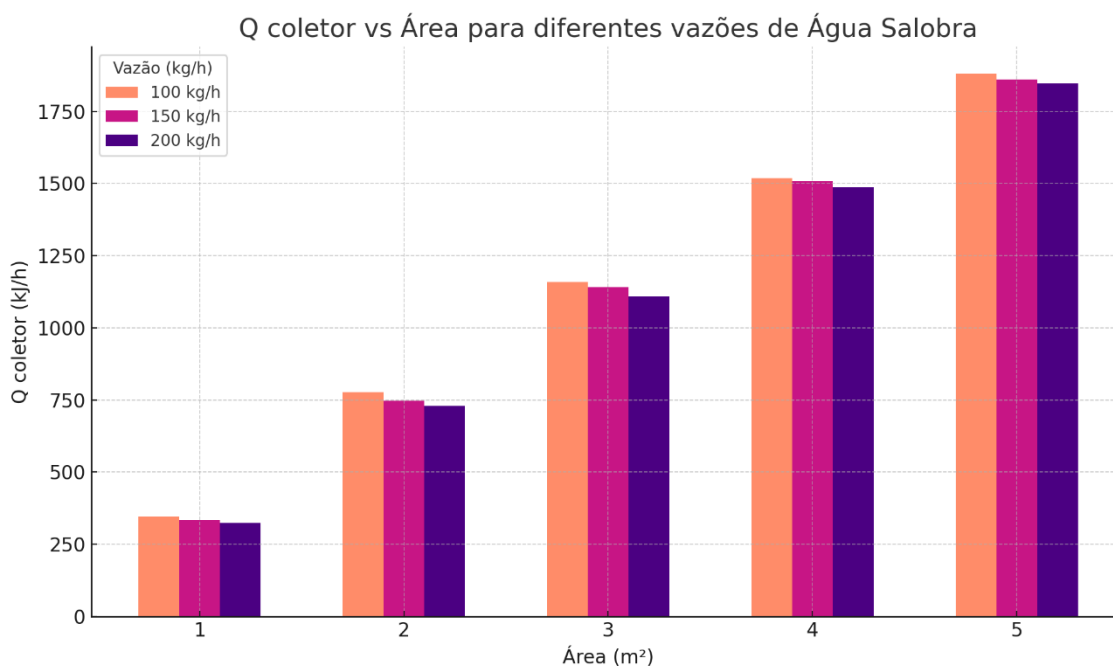


Esse comportamento constante do MR em função da área indica que o aumento da área não influencia diretamente a eficiência de recuperação de água dentro dessas condições. Por outro lado, o MR aumenta proporcionalmente com a vazão, demonstrando que a taxa de recuperação está mais relacionada ao fluxo de água salobra do que à variação da área.

A Figura 60 apresenta a relação entre o calor coletado pelo coletor solar Q_{coletor} e a área do coletor para diferentes vazões de água salobra (100 kg/h, 150 kg/h e 200 kg/h), destacadas pelas cores coral, rosa escuro e roxo escuro, respectivamente. Observa-se que, para todas as vazões, o Q_{coletor} aumenta linearmente com o crescimento da área, indicando que coletores maiores capturam mais energia térmica.

A vazão de 100 kg/h apresenta os maiores valores de Q_{coletor} em todas as áreas, alcançando 1879,79 kJ/h para 5 m². A vazão de 150 kg/h apresenta valores intermediários, chegando a 1861,44 kJ/h, enquanto a vazão de 200 kg/h registra o menor Q_{coletor} , atingindo 1847,05 kJ/h para a mesma área. Embora os valores sejam próximos, nota-se uma leve redução no Q_{coletor} para vazões maiores, possivelmente devido a diferenças na eficiência térmica do sistema em função do fluxo de água. Esses resultados mostram que o Q_{coletor} é diretamente proporcional à área do coletor, mas varia levemente com a vazão, sendo mais eficiente para menores fluxos de água.

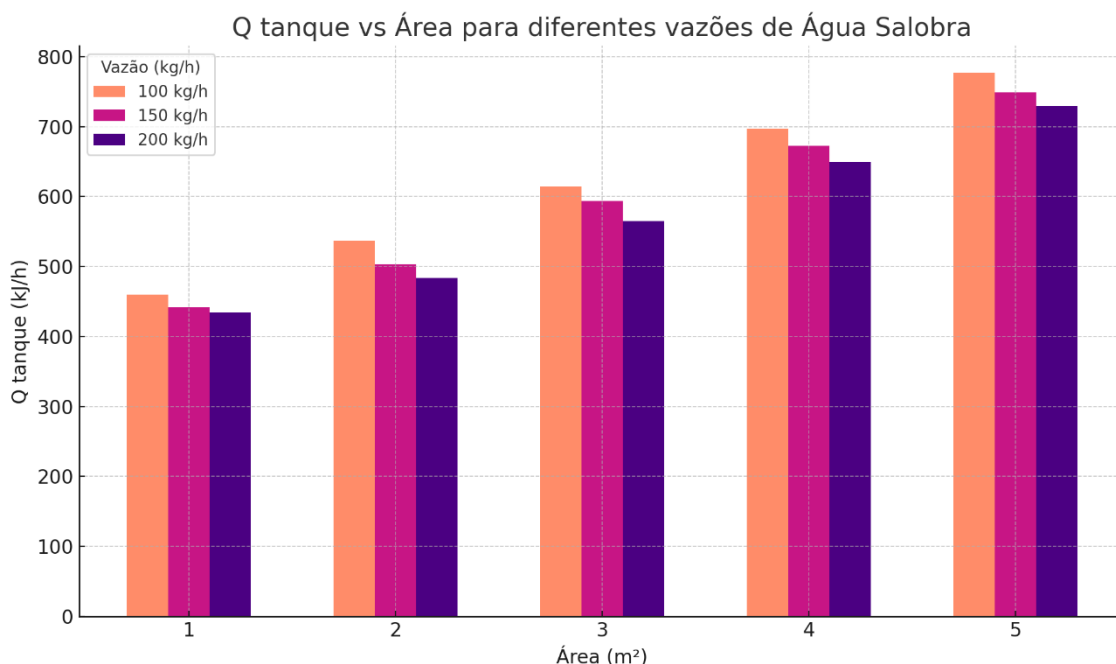
Figura 60 – Energia no Coletor em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra



A Figura 61 apresenta a relação entre o calor armazenado no tanque Q_{tanque} e a área do coletor solar para diferentes vazões de água salobra (100 kg/h, 150 kg/h e 200 kg/h), representadas pelas cores coral, rosa escuro e roxo escuro, respectivamente. Os resultados mostram que o Q_{tanque} aumenta proporcionalmente com o crescimento da área em todas as vazões analisadas, refletindo a relação direta entre a área do coletor e a energia térmica armazenada.

Para a vazão de 100 kg/h, o Q_{tanque} apresenta os maiores valores, alcançando 776,60 kJ/h para uma área de 5 m². Já para 150 kg/h, os valores são intermediários, chegando a 748,75 kJ/h na mesma área. Por fim, a vazão de 200 kg/h registra os menores valores, atingindo 729,59 kJ/h em 5 m². Essa diferença destaca que vazões menores resultam em maior armazenamento térmico no tanque, devido à menor demanda térmica associada, permitindo mais tempo para troca de calor.

Figura 61 – Energia no Tanque em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra



Na relação entre o calor fornecido pelo aquecedor auxiliar (Q_{AquecAux}) e a área do coletor solar para diferentes vazões de água salobra (100 kg/h, 150 kg/h e 200 kg/h), observa-se uma tendência decrescente do (Q_{AquecAux}) com o aumento da área, indicando que coletores maiores capturam mais energia solar, reduzindo a necessidade de calor suplementar.

Para a vazão de 200 kg/h, o (Q_{AquecAux}) apresenta os maiores valores, começando com 4255,61 kJ/h para uma área de 1 m² e diminuindo para 4037,27 kJ/h em 5 m². A vazão

de 150 kg/h apresenta valores intermediários, variando de 3629,85 kJ/h a 3402,14 kJ/h. Por fim, a vazão de 100 kg/h registra os menores valores, começando com 2802,37 kJ/h e diminuindo para 2569,73 kJ/h.

Esses resultados mostram que vazões maiores exigem mais calor suplementar devido à maior demanda térmica do sistema. No entanto, o aumento da área do coletor ajuda a reduzir essa necessidade, evidenciando a importância do dimensionamento correto do coletor solar para minimizar o consumo energético.

Resumindo, repara-se que para vazões menores, combinadas com áreas maiores de coletor solar, são mais eficientes para reduzir a demanda de energia do aquecedor auxiliar, contribuindo para uma operação mais econômica e energeticamente eficiente em sistemas de dessalinização solar.

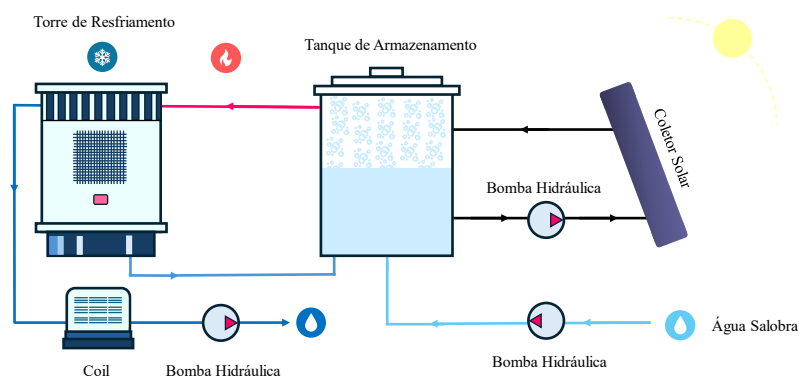
O comportamento da Energia da torre de resfriamento e do coil é igual da Configuração II.

Em relação as Configurações V e VI reparou-se que o rendimento de água produzida foi inferior à III e IV.

4.5. DESSALINIZAÇÃO COM COLETOR DE TUBO EVACUADO

De acordo com as análises realizadas em relação ao coletor de placa plana, concluiu-se que as configurações III e IV apresentaram os melhores desempenhos. Dessa forma, essas configurações serão adotadas como referência para os estudos com o coletor de tubo evacuado, conforme Figura 63 (sem aquecedor auxiliar).

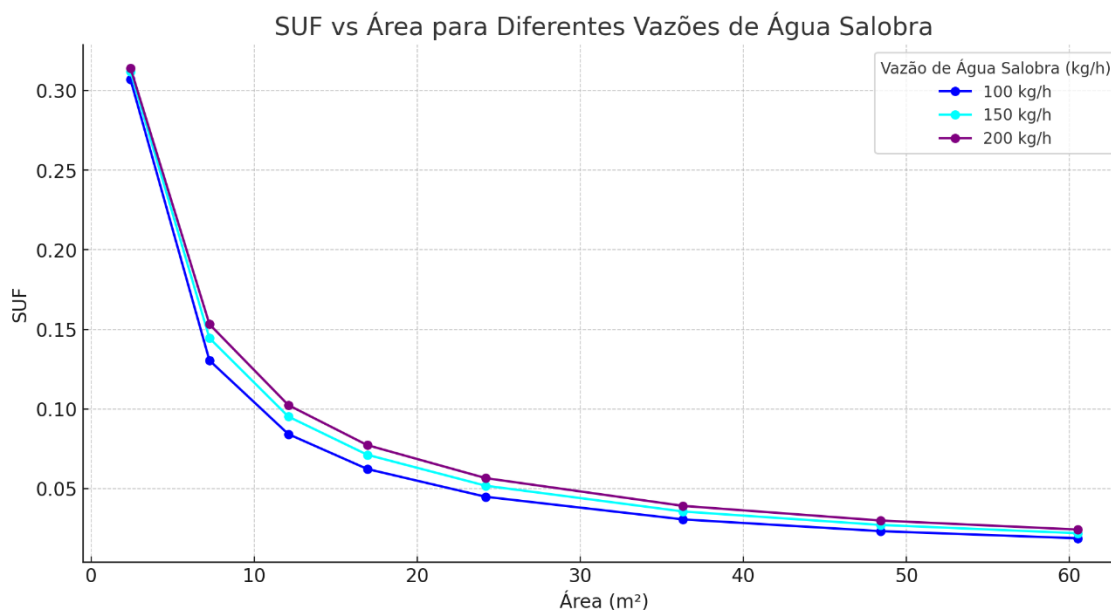
Figura 62 – Layout – Configuração VII



4.5.1. Configuração VII

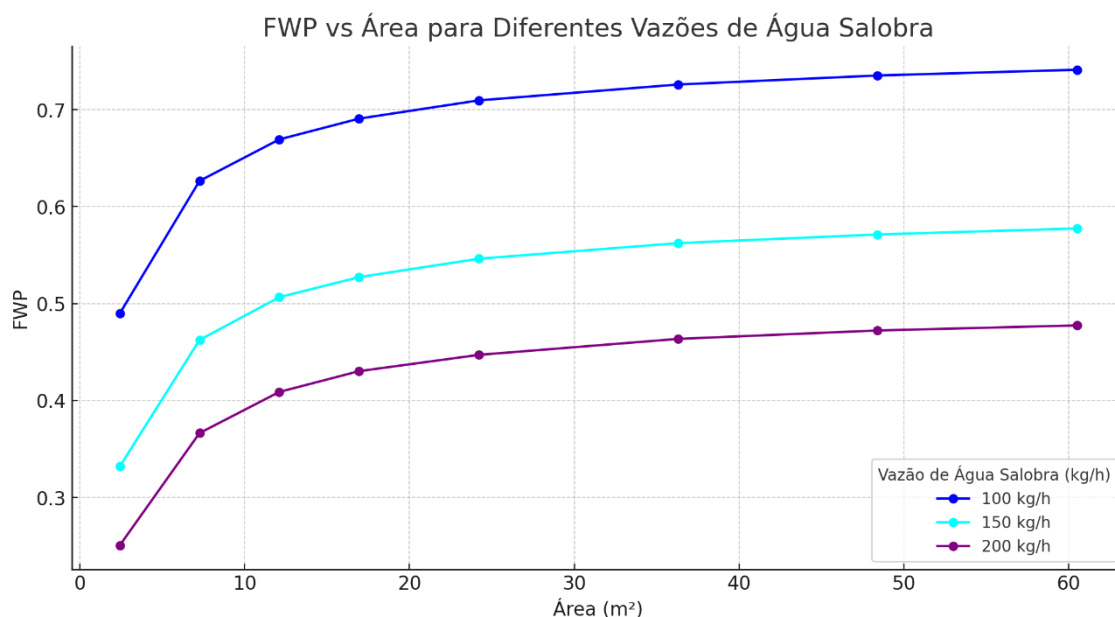
O gráfico de SUF (Figura 63) demonstra uma clara redução do índice com o aumento da área coletora. Para a vazão de 100 kg/h, o SUF começa em 0,3069 para uma área de 2,42 m² e reduz-se drasticamente para 0,0188 em 60,5 m². Resultados similares são observados para 150 kg/h, com o SUF inicial de 0,3120 caindo para 0,0220, e para 200 kg/h, com valores decrescendo de 0,3142 para 0,0243. Isso ocorre devido à distribuição mais ampla da radiação solar sobre superfícies maiores, reduzindo a eficiência relativa do sistema.

Figura 63 – SUF em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra



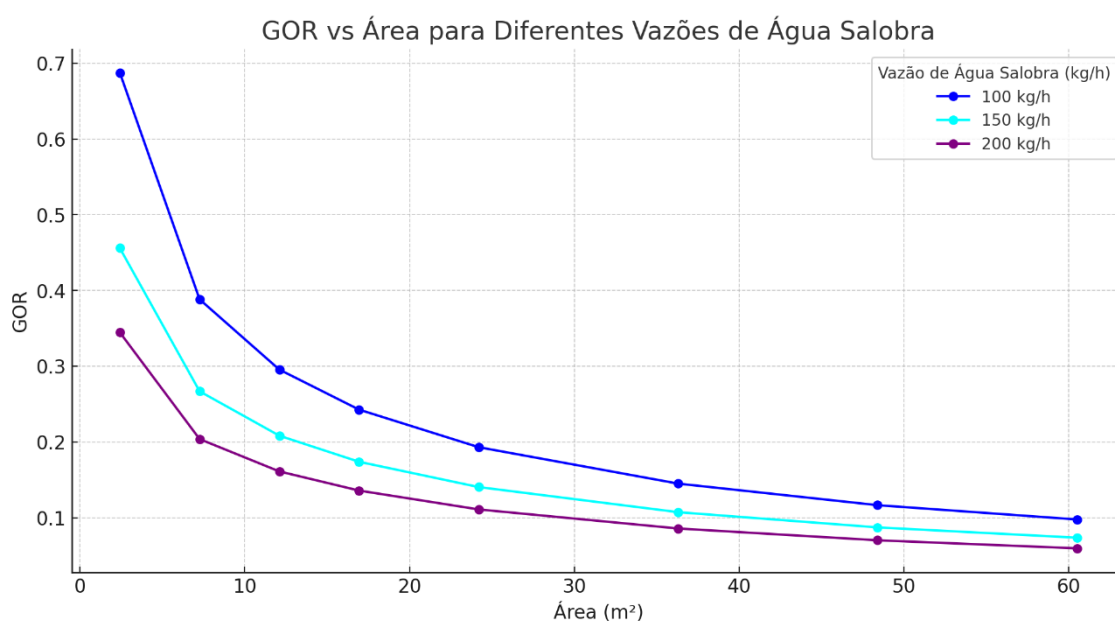
O gráfico de FWP (Figura 64) mostra um comportamento de crescimento com o aumento da área coletora. Para uma vazão de 100 kg/h, a FWP começa em 0,4898 para 2,42 m² e atinge 0,7412 em 60,5 m². Para 150 kg/h, a FWP varia de 0,3320 a 0,5775, enquanto para 200 kg/h, os valores oscilam entre 0,2506 e 0,4775 na mesma faixa de área. Esses dados indicam que, embora a eficiência relativa (SUF) diminua, a produção absoluta aumenta significativamente com áreas maiores, favorecendo a operação em alta capacidade.

Figura 64 – FWP em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra



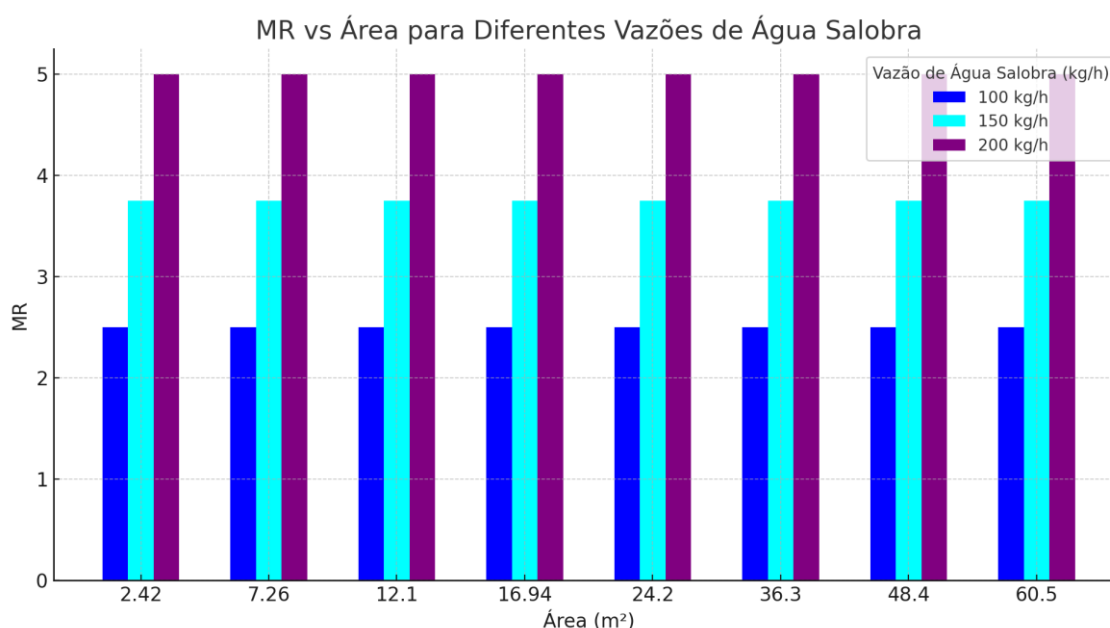
O gráfico de GOR (Figura 65) evidencia uma queda acentuada com o aumento da área coletora. Para 100 kg/h, o GOR inicia em 0,6874 (2,42 m²) e reduz-se para 0,0976 (60,5 m²). Da mesma forma, para 150 kg/h, os valores variam de 0,4558 a 0,0736, e para 200 kg/h, de 0,3446 a 0,0595. Esses resultados refletem a diminuição da eficiência térmica relativa do sistema, indicando que áreas maiores, apesar de produzirem mais água (FWP), são menos eficientes na conversão da energia disponível.

Figura 65 – GOR em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra



No gráfico de MR (Figura 66), observa-se um comportamento constante em relação à área coletora. Para uma vazão de 100 kg/h, o MR mantém-se em 2,5 para todas as áreas analisadas. Valores semelhantes são observados para 150 kg/h (MR = 3,75) e 200 kg/h (MR = 5,0). Esse comportamento destaca que a taxa de recuperação depende exclusivamente da vazão de água salobra e não é influenciada pelo tamanho da área coletora, refletindo um equilíbrio na proporção entre a água produzida e a entrada.

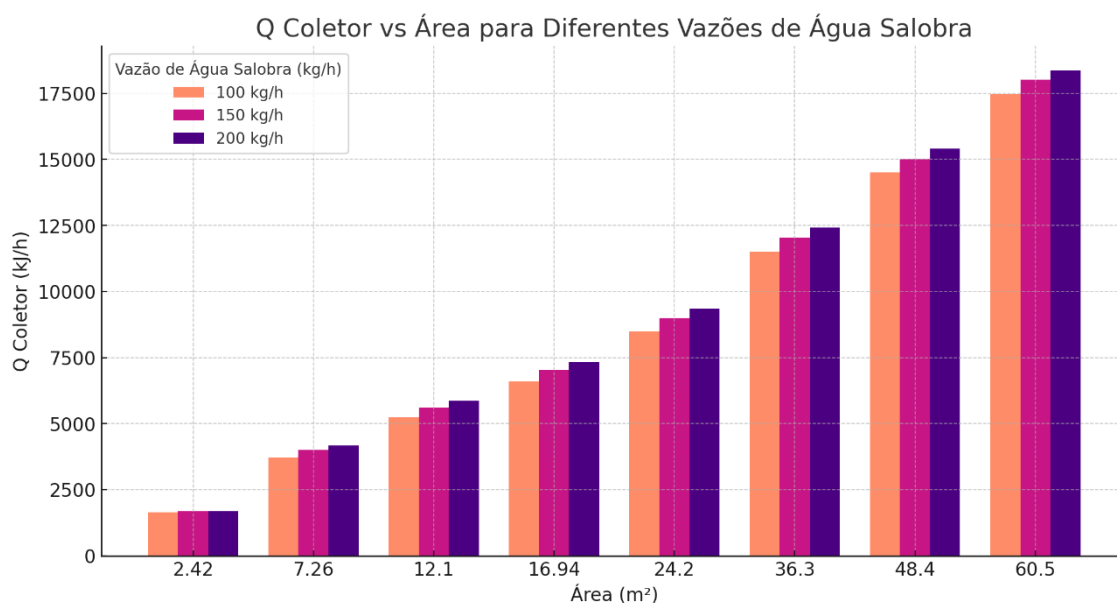
Figura 66 – MR em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra



O calor coletado Q_{coletor} aumenta com a área para todas as vazões (Figura 67). Para uma área de 2,42 m², os valores de Q_{coletor} variam de 1646,9 kJ/h para 100 kg/h até 1685,7 kJ/h para 200 kg/h. Já para 60,5 m², os valores alcançam até 18.378,1 kJ/h para 200 kg/h. Isso reflete a proporcionalidade direta entre a área do coletor e a radiação solar captada, indicando que maiores áreas possibilitam a coleta de mais energia, sendo especialmente relevante em sistemas dimensionados para altas vazões.

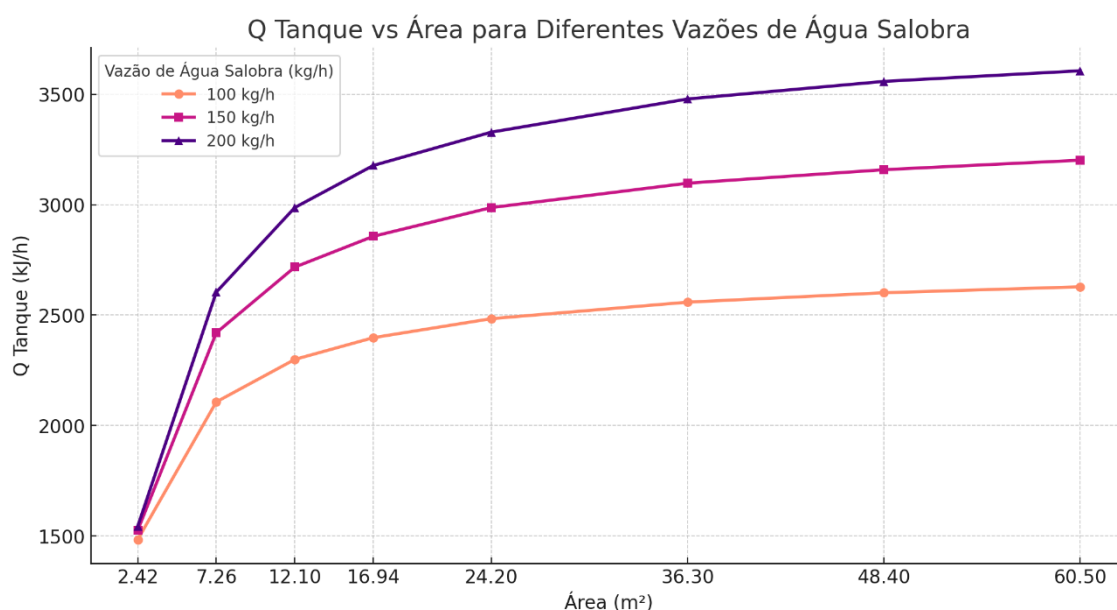
O comportamento linear evidencia que o aumento da área do coletor é uma estratégia eficiente para ampliar a captação de energia solar, mas requer atenção no dimensionamento de outros componentes do sistema, como o tanque e a torre de resfriamento, para garantir que toda a energia captada seja efetivamente aproveitada.

Figura 67 – Energia no Coletor em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra



O calor no tanque (Q_{tanque}) aumenta de forma não linear com a área, apresentando um comportamento de saturação para áreas maiores. Para 100 kg/h, (Q_{tanque}) cresce de 1483,6 kJ/h em 2,42 m² para 2628,1 kJ/h em 60,5 m². Já para 200 kg/h, o aumento é mais expressivo, variando de 1543,6 kJ/h para 3606,3 kJ/h. Este comportamento pode ser explicado pelas perdas térmicas acumuladas e pela eficiência limitada no armazenamento de calor em tanques maiores (Figura 68).

Figura 68 – Energia no Tanque em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra

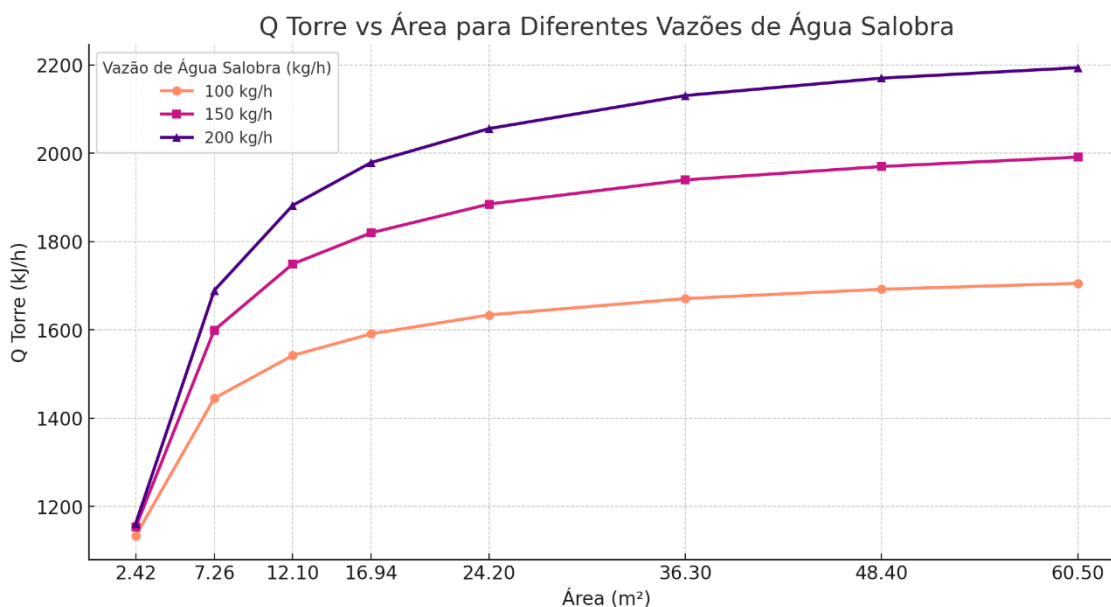


O fenômeno de saturação destaca a importância de equilibrar o aumento da área com o tamanho do tanque, uma vez que perdas térmicas mais altas podem reduzir a eficiência geral do sistema. Estratégias como a implementação de múltiplos tanques interligados podem otimizar a eficiência do armazenamento térmico.

O calor dissipado pela torre (Q_{torre}) apresenta um crescimento contínuo com o aumento da área, sendo mais evidente em vazões maiores (Figura 69). Para 100 kg/h, (Q_{torre}) vai de 1133,9 kJ/h em 2,42 m² para 1705,4 kJ/h em 60,5 m². Em 200 kg/h, esse valor aumenta de 1161,8 kJ/h para 2193,6 kJ/h. Esses resultados refletem a necessidade de maior dissipação de calor em sistemas maiores, indicando a importância de dimensionar torres de resfriamento adequadas para evitar sobrecarga térmica.

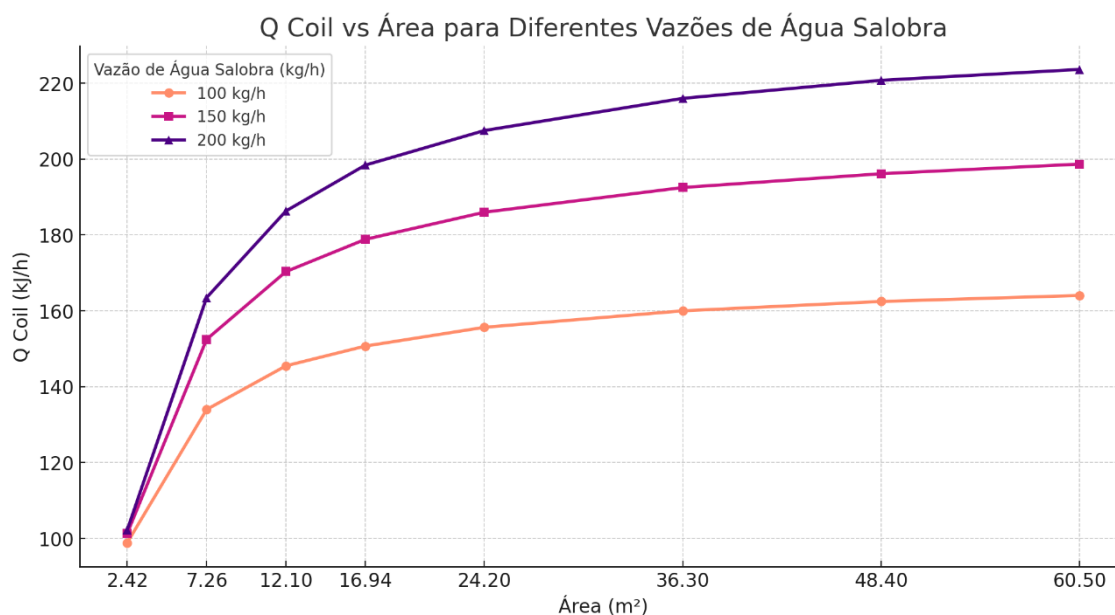
A necessidade crescente de dissipação térmica em áreas maiores reforça a relevância de torres de resfriamento eficientes no projeto de sistemas solares de dessalinização. Adotar tecnologias avançadas, como torres de fluxo cruzado ou sistemas híbridos de resfriamento, pode melhorar a capacidade de dissipação e evitar sobrecargas térmicas em climas quentes.

Figura 69 – Energia na Torre em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra



O calor do coil (Q_{coil}) também aumenta com a área, mas em uma escala menor em relação às outras variáveis. Para 100 kg/h, o Q_{coil} varia de 98,9 kJ/h em 2,42 m² para 164,0 kJ/h em 60,5 m², enquanto para 200 kg/h, vai de 102,3 kJ/h para 223,6 kJ/h. Esses resultados destacam o papel das serpentinas em manter o sistema operando de forma eficiente, mesmo em sistemas com maior área coletora. Repara-se esse comportamento na Figura 70.

Figura 70 – Energia no Coil em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra



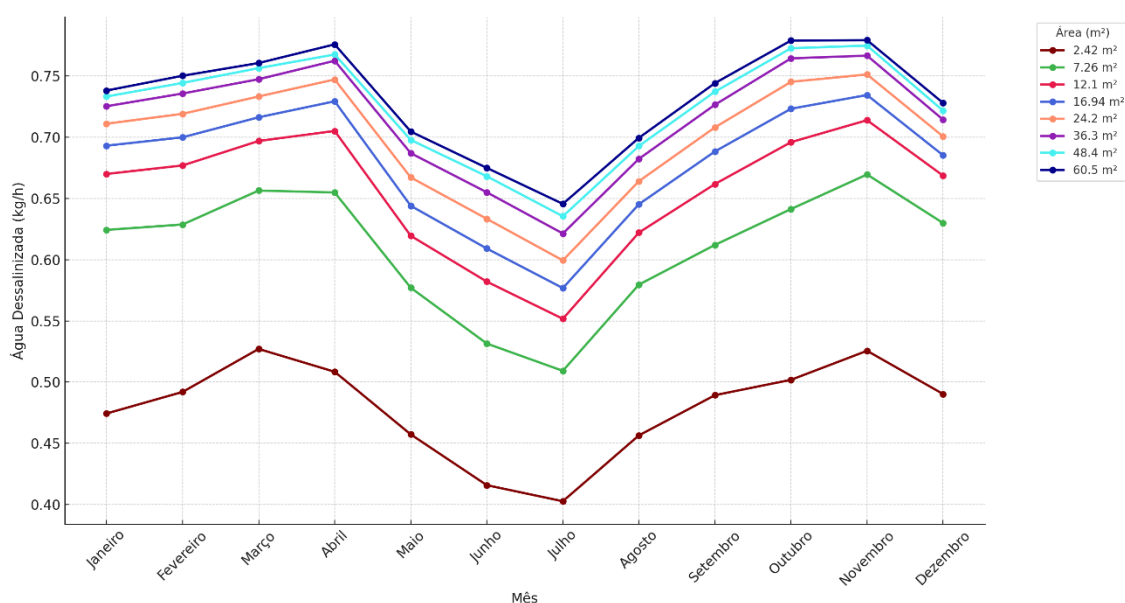
A produção mensal de água dessalinizada por diferentes áreas de captação solar, considerando uma vazão de água salobra de 100 kg/h e um regime operacional de 12 horas diárias é mostrado na Figura 71. A análise contempla áreas variando de 2,42 m² a 60,5 m², com dados apresentados em kg/h. As curvas demonstram tendências sazonais, com picos de produção em março, abril e novembro, enquanto os menores rendimentos são observados nos meses de junho e julho. Essa variação está diretamente associada à disponibilidade de radiação solar ao longo do ano, que influencia a eficiência dos sistemas.

Sistemas maiores, como o de 60,5 m², apresentam desempenho superior, atingindo uma produção máxima de 0,775 kg/h em abril. Por outro lado, sistemas menores, como o de 2,42 m², alcançam sua produção máxima de 0,527 kg/h em março. Essa diferença evidencia a influência positiva do aumento da área de captação na eficiência do processo de dessalinização. Por exemplo, no mês de novembro, o sistema de 2,42 m² produziu 0,525 kg/h, enquanto o sistema de 60,5 m² alcançou 0,779 kg/h, representando um aumento significativo na capacidade de produção.

Ao considerar o regime operacional de 12 horas diárias, a produção diária pode ser estimada a partir dos valores horários apresentados no gráfico. Para o sistema de 2,42 m², a produção diária no mês de março é de aproximadamente 6,32 kg/dia, tendo 6,324 kg/dia. Por sua vez, o sistema de 60,5 m² em abril, com uma produção horária de 0,775 kg/h, resulta em uma produção diária de 9,3 kg/dia.

De maneira geral, sistemas menores produzem entre 4,83 e 6,33 kg/dia, enquanto sistemas maiores variam entre 8,06 e 9,34 kg/dia, dependendo das condições sazonais. Os resultados obtidos demonstram o potencial da dessalinização solar como uma solução viável para o abastecimento de água. A área de captação exerce um papel fundamental na eficiência do processo, com maior produção associada a áreas maiores. Contudo, a sazonalidade da radiação solar implica variações significativas na produção, mesmo para os sistemas de maior capacidade.

Figura 71 – Produção Mensal de Água Dessalinizada por Área (Vazão de 100 kg/h de Água Salobra)



O gráfico apresentado ilustra a produção de água dessalinizada ao longo dos meses do ano para diferentes áreas de captação solar, considerando uma vazão constante de água salobra de 150 kg/h (Figura 72). As áreas variam entre 2,42 m² e 60,5 m², e a produção está representada em kg/h. O comportamento das curvas reflete a influência sazonal na eficiência do sistema, com os meses de maior produção concentrados em março, abril e novembro, enquanto junho e julho apresentam os menores valores, devido à redução na radiação solar disponível.

Para sistemas menores, como o de 2,42 m², a produção máxima foi registrada em março (0,543 kg/h), enquanto o menor desempenho foi observado em julho (0,406 kg/h). Já o sistema de maior área, com 60,5 m², apresentou sua maior produção em abril (0,909 kg/h) e a menor em julho (0,740 kg/h). A variação observada evidencia a importância da área de

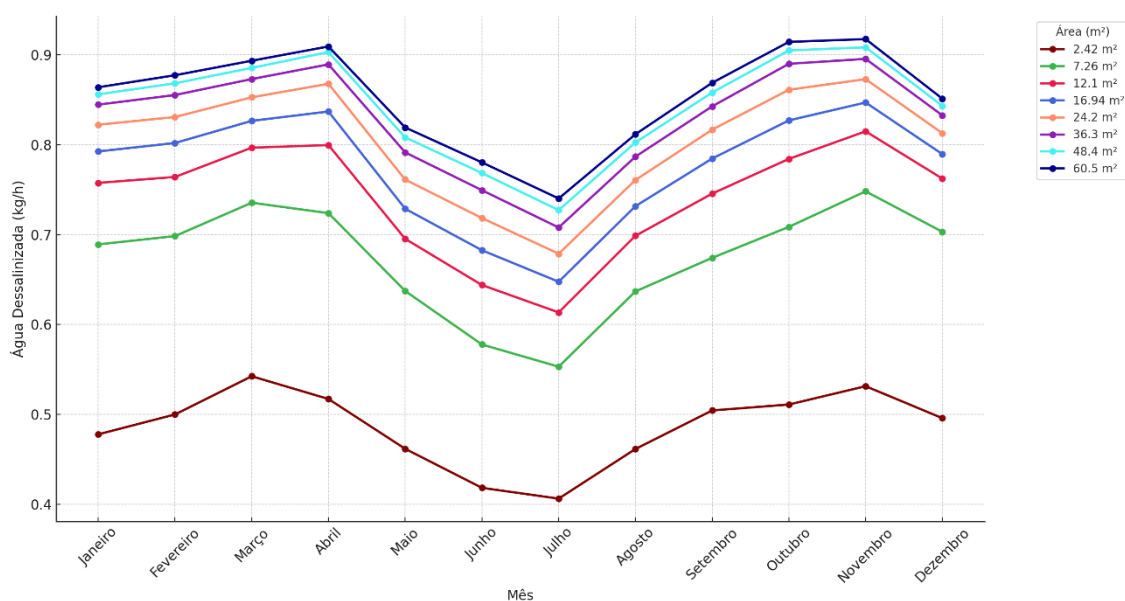
captação na eficiência do processo, pois sistemas maiores conseguem captar e converter mais energia solar, mesmo em períodos de menor insolação.

Considerando o regime operacional de 12 horas diárias, é possível estimar a produção diária de água dessalinizada para cada configuração. Para o sistema de 2,42 m² no mês de março, a produção diária foi de 6,52 kg/dia, enquanto o sistema de 60,5 m² alcançou 10,91 kg/dia em abril. Em termos gerais, os sistemas menores produziram entre 4,88 kg/dia (julho) e 6,52 kg/dia (março), enquanto os sistemas maiores variaram entre 8,88 kg/dia (julho) e 10,91 kg/dia (abril).

A análise reforça a importância de considerar a área de captação e a sazonalidade na etapa de dimensionamento de sistemas de dessalinização solar. Sistemas com maior área não apenas apresentam maior eficiência geral, mas também são mais resilientes a variações sazonais, oferecendo maior consistência na produção ao longo do ano. Em contrapartida, sistemas menores podem ser mais indicados para aplicações localizadas e de menor escala, onde a demanda é reduzida e os custos de instalação são limitados.

Os resultados demonstram que onde a disponibilidade de água é crítica, o dimensionamento adequado desses sistemas pode atender tanto a necessidades domésticas quanto comunitárias, desde que as condições de radiação solar local sejam devidamente consideradas.

Figura 72 – Produção Mensal de Água Dessalinizada por Área (Vazão de 150 kg/h de Água Salobra)



A Figura 73 analisa a produção de água dessalinizada ao longo dos meses do ano para diferentes áreas de captação solar, considerando uma vazão de entrada de água salobra

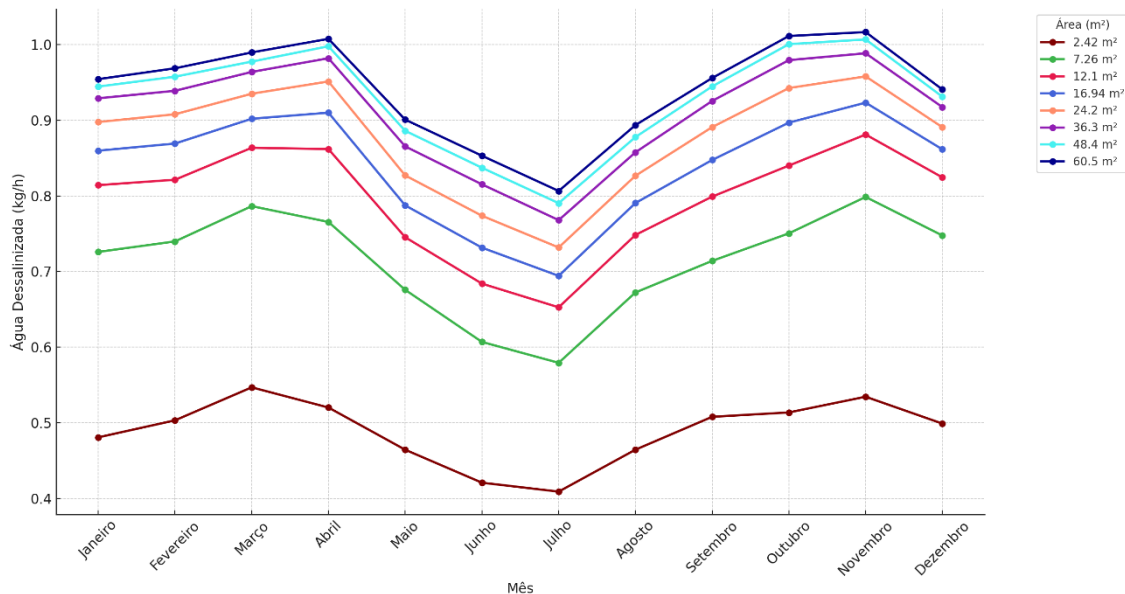
constante de 200 kg/h. Os dados indicam que o desempenho do sistema é diretamente proporcional à área de captação e à disponibilidade de radiação solar, com uma evidente sazonalidade no comportamento das curvas. Essa relação é demonstrada pelos picos de produção registrados nos meses de março e abril, seguidos por uma queda acentuada durante os meses de junho e julho, quando a radiação solar é tradicionalmente menor.

Sistemas com áreas maiores apresentaram maior eficiência e consistência ao longo do ano. Por exemplo, em abril, o sistema de 60,5 m² atingiu uma produção máxima de 1,007 kg/h, enquanto o sistema de 2,42 m² produziu apenas 0,520 kg/h. Contudo, durante os meses de menor radiação, como julho, ambos os sistemas tiveram reduções significativas, com valores de 0,806 kg/h e 0,409 kg/h, respectivamente. Por outro lado, sistemas intermediários, como o de 24,2 m², mostraram um equilíbrio interessante entre produção e custo, com produções de 0,951 kg/h em abril e 0,732 kg/h em julho, evidenciando sua viabilidade para cenários que demandam eficiência com recursos limitados.

Considerando um regime operacional de 12 horas diárias, é possível estimar a produção diária para cada configuração de área. O sistema de 2,42 m², no mês de março, produziria aproximadamente 6,56 kg/dia, enquanto o sistema de 60,5 m² alcançaria 11,87 kg/dia no mesmo período. Nos meses de menor eficiência, como julho, o sistema de menor área produziria cerca de 4,91 kg/dia, enquanto o de maior área geraria aproximadamente 9,68 kg/dia. Esses resultados mostram a influência direta das condições climáticas locais e da área de captação no desempenho do sistema.

Os resultados demonstram que a escolha da área de captação deve ser cuidadosamente considerada, levando em conta a demanda específica de água dessalinizada, as condições climáticas da região e os recursos disponíveis para instalação. Sistemas maiores se mostram mais resilientes às variações sazonais, garantindo uma produção mais estável ao longo do ano. Em contrapartida, sistemas menores podem ser economicamente mais viáveis para aplicações localizadas, especialmente em meses de alta insolação.

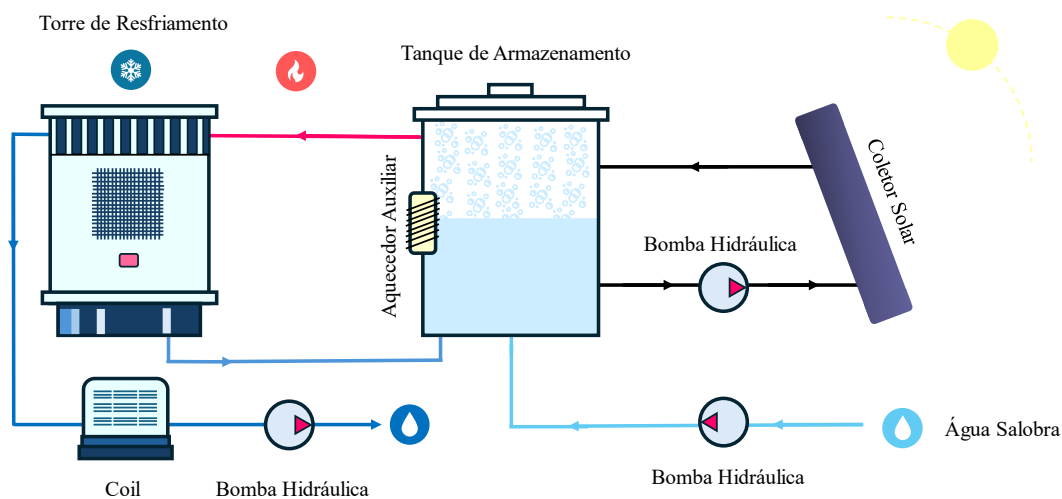
Figura 73 – Produção Mensal de Água Dessalinizada por Área (Vazão de 200 kg/h de Água Salobra)



4.5.2. Configuração VIII

A Figura 74 demonstra o sistema da Configuração VII.

Figura 74 – Layout – Configuração VIII



A Figura 75 mostra relação entre a fração solar (F_r) e a área de captação (m^2) para diferentes vazões de água salobra (100, 150 e 200 kg/h). A análise dos dados revela tendências claras e consistentes, destacando o impacto significativo do aumento da área de captação na eficiência do sistema.

Para todas as vazões analisadas, observa-se que a fração solar aumenta com a área de captação, mas em uma taxa decrescente. Este comportamento é típico de sistemas que atingem limitações físicas ou operacionais à medida que a área cresce, indicando uma aproximação ao limite máximo de eficiência. Por exemplo, para a vazão de 100 kg/h, a fração solar cresce rapidamente até 36,3 m², atingindo 87,97%, e depois aumenta de forma mais modesta, chegando a 92,34% com 60,5 m². Comparando as diferentes vazões, a fração solar é maior para vazões menores em qualquer área de captação. Para uma área de 24,2 m², a fração solar é de 83,18% para 100 kg/h, 77,36% para 150 kg/h e 72,43% para 200 kg/h. Isso ocorre porque o aumento da vazão reduz o tempo de exposição do fluxo de água à radiação solar, diminuindo a eficiência de captura de energia térmica.

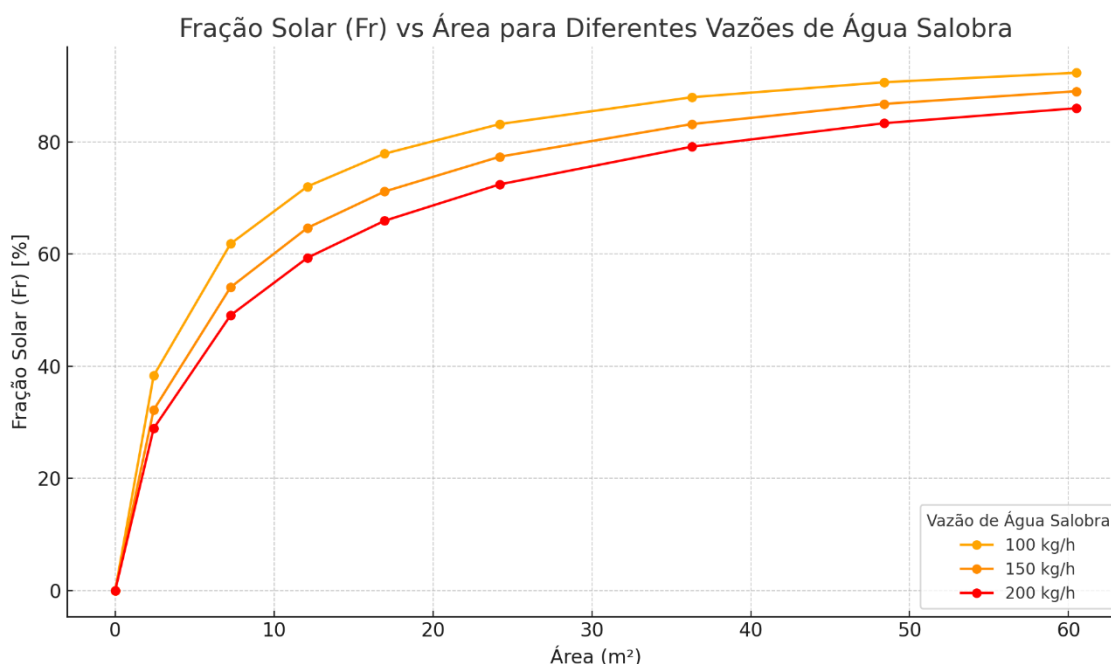
No caso específico de uma vazão de 100 kg/h, observa-se o maior desempenho relativo. Sistemas com áreas acima de 48,4 m² atingem mais de 90% de fração solar, evidenciando a viabilidade de sistemas altamente eficientes para vazões menores. Por exemplo, com 7,26 m², a fração solar já é de 61,84%, mostrando um retorno rápido no investimento em área.

Para a vazão intermediária de 150 kg/h, a relação é semelhante, mas a fração solar é consistentemente menor do que para 100 kg/h. Com 36,3 m², a fração solar é de 83,19%, ainda significativamente alta, mas não tão próxima ao limite máximo quanto o observado para a menor vazão.

Por outro lado, a vazão de 200 kg/h apresenta a menor fração solar em todas as áreas, com um desempenho de 59,33% para 12,1 m² e 86,01% para 60,5 m². Este comportamento destaca os desafios de aumentar a vazão sem comprometer a eficiência, especialmente em áreas menores.

O gráfico destaca a importância de dimensionar adequadamente a área de captação com base na vazão de água salobra requerida. Para aplicações que demandam altas vazões, como 200 kg/h, é evidente que áreas maiores são necessárias para atingir frações solares aceitáveis. Por outro lado, para vazões menores, como 100 kg/h, sistemas com áreas moderadas (24,2 m²) já apresentam frações solares superiores a 83%, sendo uma solução mais econômica.

Figura 75 – F_r em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra



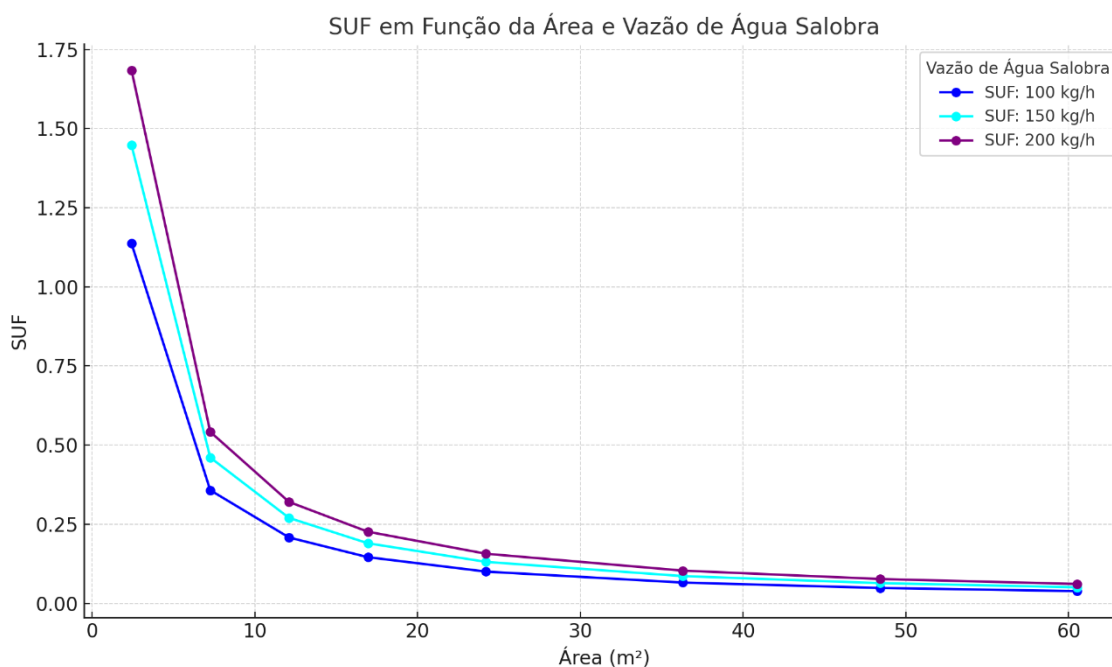
A Figura 76 mostra como o Fator de Utilização Solar (SUF) varia com a área de captação para diferentes vazões de água salobra (100, 150 e 200 kg/h). Dá para perceber que o SUF é bem maior quando a vazão é menor e vai diminuindo conforme a área aumenta, o que faz sentido, já que uma vazão menor permite mais tempo para o sistema absorver energia solar.

Para a vazão de 100 kg/h, o SUF começa alto, em 1,14 para uma área de 2,42 m², mas cai rapidamente conforme a área aumenta, chegando a apenas 0,038 para uma área de 60,5 m². Isso mostra que sistemas menores são mais eficientes para essa vazão, mas a eficiência cai muito quando a área é maior.

No caso da vazão de 150 kg/h, o padrão é parecido, mas o SUF é um pouco menor em todas as áreas. Por exemplo, com 2,42 m², o SUF é de 1,45, e com 60,5 m², é de 0,050. Ou seja, quanto maior a vazão, menor o aproveitamento da energia solar em sistemas grandes.

Já para a vazão de 200 kg/h, a eficiência cai ainda mais. O SUF começa em 1,68 para 2,42 m², mas diminui rapidamente para 0,061 quando a área chega a 60,5 m². Isso mostra que, para vazões altas, o sistema não consegue aproveitar tão bem a energia solar, especialmente em áreas grandes.

Figura 76 – SUF em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra



A Figura 77 apresenta a relação entre o FWP e a área de captação (m²) para diferentes vazões de água salobra (100, 150 e 200 kg/h). As barras agrupadas permitem comparar diretamente o desempenho do sistema em diferentes condições de vazão e área.

Para a menor vazão analisada (100 kg/h), o FWP é praticamente constante, com valores próximos de 0,88 para todas as áreas. Por exemplo, o FWP é de 0,8789 para uma área de 2,42 m² e aumenta ligeiramente para 0,8806 para uma área de 60,5 m². Esse comportamento indica que, para vazões baixas, o sistema utiliza eficientemente a energia disponível, independentemente da área de captação.

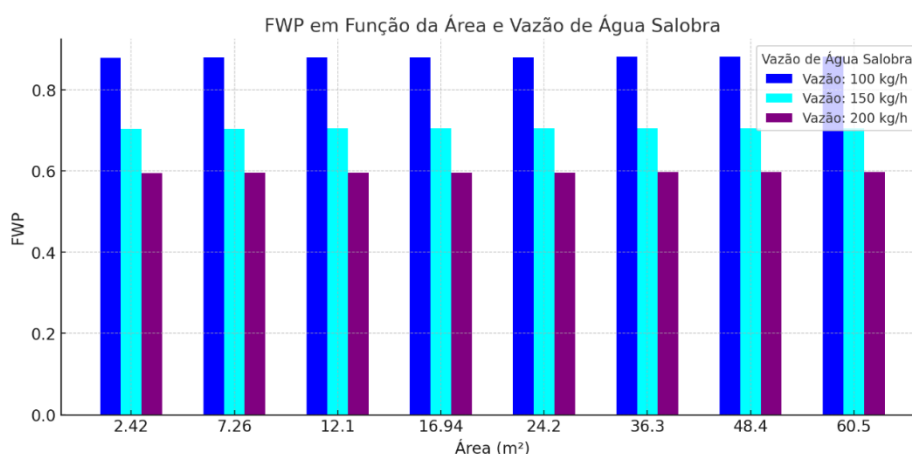
Já para a vazão de 150 kg/h, o FWP é menor do que para 100 kg/h, mas também apresenta um comportamento estável, variando entre 0,7034 e 0,7050. Por exemplo, para uma área de 2,42 m², o FWP é 0,7034, enquanto para 60,5 m² é 0,7050. Esse resultado demonstra que, apesar do aumento da vazão, o sistema ainda mantém boa eficiência em diferentes áreas.

Para a maior vazão (200 kg/h), o FWP é ainda menor, refletindo o impacto do maior volume de água processado no sistema. Os valores variam de 0,5948 para 2,42 m² a 0,5963 para 60,5 m². Embora a eficiência seja menor para maiores vazões, o sistema apresenta estabilidade, com variações mínimas de FWP em função da área de captação.

No geral, o gráfico evidencia que o FWP varia pouco com a área de captação, mas é sensivelmente influenciado pela vazão. Vazões menores (100 kg/h) garantem maior eficiência

no sistema, enquanto vazões maiores (200 kg/h) resultam em menor FWP, independentemente da área. Essa análise destaca a importância de dimensionar adequadamente a vazão de entrada para maximizar o desempenho do sistema, especialmente em aplicações que demandam alta eficiência.

Figura 77 – FWP em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra



A Figura 78 mostra como o GOR varia com a área de captação para três diferentes vazões de água salobra: 100, 150 e 200 kg/h. É fácil perceber que o GOR diminui à medida que a área aumenta, mas também que ele é mais alto para vazões menores. Isso faz sentido porque, em sistemas de dessalinização, maiores vazões reduzem o tempo que a água tem para interagir com a energia disponível, diminuindo a eficiência do sistema.

Para a vazão de 100 kg/h, o GOR começa em 0,56 para uma área de 2,42 m² e cai gradualmente para 0,11 quando a área chega a 60,5 m². Esse comportamento mostra que, mesmo com uma área maior, o aumento da captação não compensa a eficiência inicial que o sistema alcança com uma menor área.

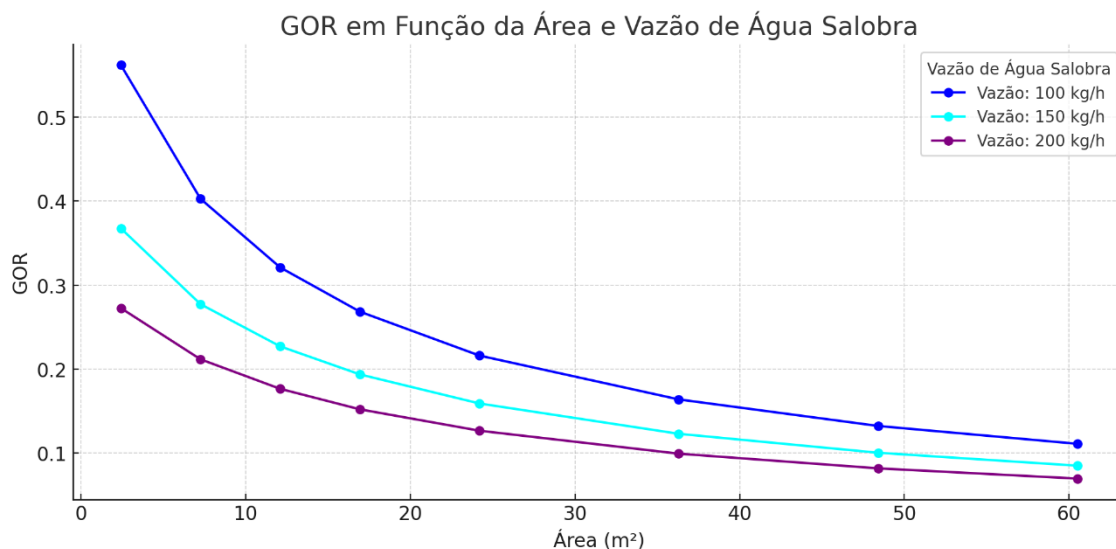
Já para 150 kg/h, o padrão é semelhante, mas o GOR começa menor, em 0,36 para 2,42 m², e atinge apenas 0,08 com 60,5 m². A diferença em relação à menor vazão destaca como o sistema perde eficiência conforme a quantidade de água processada aumenta.

A vazão de 200 kg/h apresenta os valores mais baixos de GOR. O sistema começa com um GOR de 0,27 para 2,42 m² e desce para 0,07 com 60,5 m². Isso evidencia o desafio de manter a eficiência em condições de maior demanda, onde o sistema precisa lidar com volumes maiores de água sem tempo suficiente para aproveitar a energia solar disponível.

No geral, o gráfico mostra que o GOR é diretamente afetado pela vazão de água salobra e pela área de captação. Vazões menores são claramente mais eficientes, enquanto

áreas maiores, embora captem mais energia, têm menos impacto no desempenho quando a vazão é alta.

Figura 78 – GOR em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra

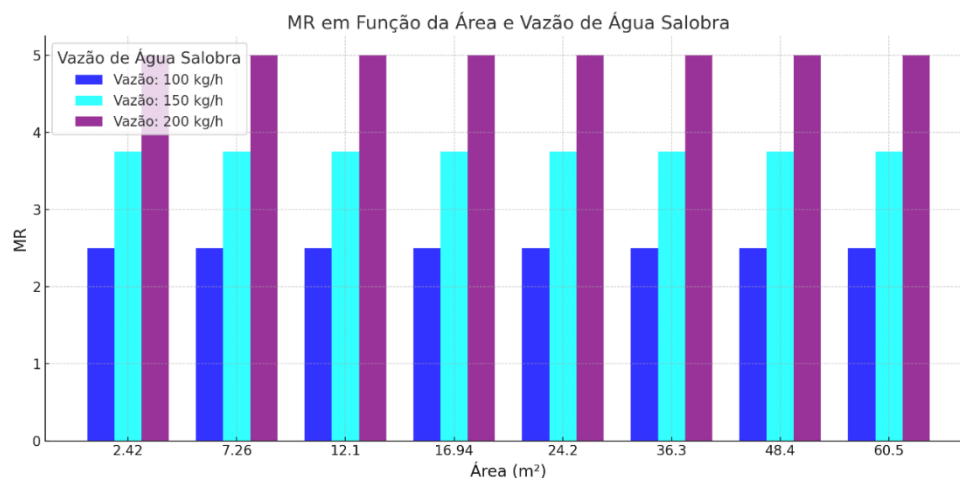


A Figura 79 apresenta o comportamento do MR em função da área de captação para diferentes vazões de água salobra (100, 150 e 200 kg/h). O que chama atenção de imediato é que o MR permanece constante para cada vazão, independentemente do tamanho da área de captação. Isso indica que, neste caso, o parâmetro analisado não é influenciado pela área, mas sim pela vazão.

Para a vazão de 100 kg/h, o MR é fixo em 2,5, enquanto para 150 kg/h sobe para 3,75, e para 200 kg/h atinge 5,0. Esse comportamento deixa claro que o aumento da vazão está diretamente relacionado a um aumento no MR, o que reflete o impacto da maior demanda no sistema.

Esse tipo de comportamento pode ser útil para dimensionamento prático de sistemas, já que torna desnecessário considerar a área de captação para determinar o MR em diferentes condições de vazão. Em outras palavras, o sistema se comporta de forma previsível em relação ao MR, o que simplifica a análise e o planejamento para diferentes cenários de operação.

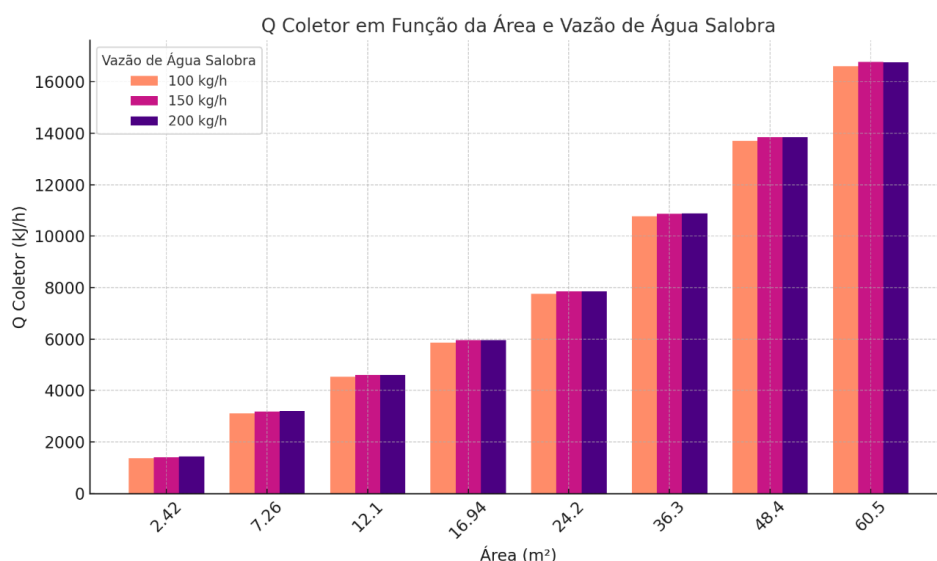
Figura 79 – MR em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra



O gráfico apresenta a relação entre o Q_{coletor} (kJ/h) e a área dos coletores (m²) para diferentes vazões de água salobra (100, 150 e 200 kg/h). Observa-se que, para todas as vazões, há um aumento quase linear do Q_{coletor} à medida que a área cresce, indicando que o sistema é proporcionalmente mais eficiente com áreas maiores.

Para a vazão de 100 kg/h, o Q_{coletor} inicia em 1.366,68 kJ/h com 2,42 m² e atinge 16.614,79 kJ/h em 60,5 m². Já na vazão de 150 kg/h, o Q_{coletor} varia de 1.404,48 kJ/h para 16.776,78 kJ/h na mesma faixa de área, mostrando uma pequena diferença em relação à vazão de 100 kg/h. Para a maior vazão, 200 kg/h, os valores se elevam de 1.436,61 kJ/h em 2,42 m² para 16.764,70 kJ/h em 60,5 m².

Figura 80 – Energia no Coletor em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra

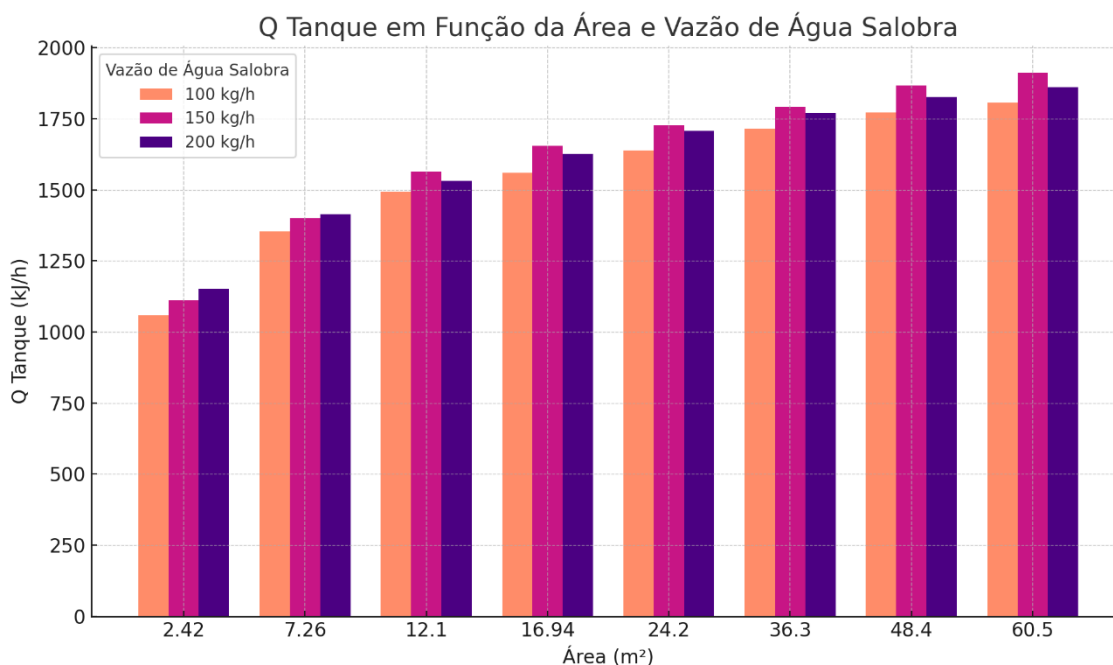


A Figura 81 apresenta os valores de Q_{tanque} (kJ/h) em função da área do coletor (m^2) para diferentes vazões de água salobra (100 kg/h, 150 kg/h e 200 kg/h). Observa-se que, conforme a área do coletor aumenta, o valor de Q_{tanque} também cresce para todas as vazões analisadas, evidenciando a relação direta entre a área disponível para captação de energia e a transferência de calor para o tanque.

Para a vazão de 100 kg/h, os valores de Q_{tanque} são ligeiramente inferiores em comparação às vazões de 150 kg/h e 200 kg/h, principalmente em áreas maiores. Isso se deve à menor quantidade de água salobra que necessita de aquecimento, exigindo menos energia do sistema. Por outro lado, para 200 kg/h, observa-se uma tendência de valores de Q_{tanque} ligeiramente mais altos em áreas intermediárias, mas essa diferença se reduz em áreas maiores, o que pode ser explicado pela eficiência termodinâmica do sistema.

Por fim, destaca-se que a vazão de 150 kg/h apresenta uma transição equilibrada entre as demais vazões, sugerindo uma relação intermediária de demanda energética, o que torna essa configuração ideal para determinadas condições operacionais.

Figura 81 – Energia no Tanque em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra



A Figura 82 representa o comportamento do calor fornecido pelo aquecedor auxiliar em função da área do sistema e das vazões de água salobra (100 kg/h, 150 kg/h e 200 kg/h).

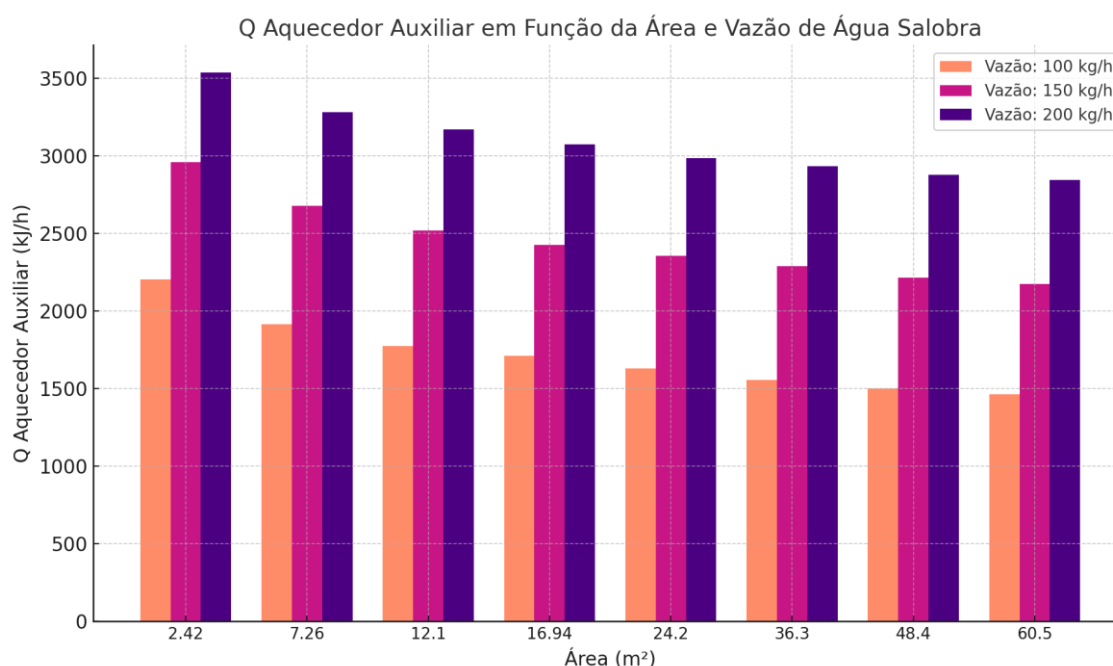
A análise dos dados revela que, para todas as vazões analisadas, há uma tendência de redução do calor fornecido pelo aquecedor auxiliar com o aumento da área do sistema.

Para a vazão de 100 kg/h, representada pela cor coral, observa-se que Q_{AquecAux} inicia em aproximadamente 2201 kJ/h para uma área de 2,42 m² e reduz gradativamente até cerca de 1463 kJ/h em 60,5 m². Esse comportamento demonstra que sistemas maiores, com maior área coletora, conseguem captar mais energia solar, reduzindo a dependência do aquecedor auxiliar.

De forma similar, para a vazão de 150 kg/h, Q_{AquecAux} parte de 2958 kJ/h em 2,42 m² e diminui para aproximadamente 2172 kJ/h em 60,5 m². Já para a vazão de 200 kg/h, representada pela cor roxo escuro, Q_{AquecAux} é inicialmente maior, com 3537 kJ/h em 2,42 m², e reduz-se para 2843 kJ/h em 60,5 m².

O comportamento observado é coerente com a expectativa teórica de que maiores áreas de captação solar proporcionam maior contribuição da energia solar para o sistema, diminuindo a demanda por energia auxiliar. Além disso, a maior vazão de água salobra requer proporcionalmente mais energia para atingir as condições desejadas, refletindo em valores mais altos de Q_{AquecAux} para 200 kg/h ao longo de todas as áreas analisadas.

Figura 82 – Energia no Aquecedor Auxiliar em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra

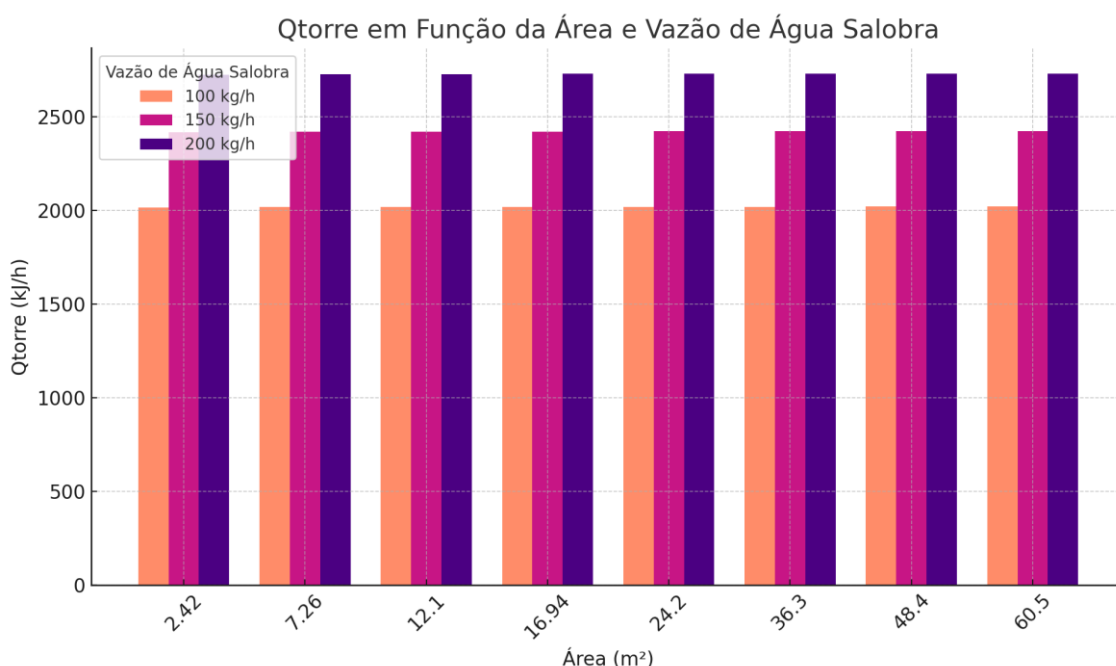


A Figura 83 apresenta a relação entre o calor rejeitado pela torre de resfriamento (Q_{torre}) e a área do coletor solar para diferentes vazões de água salobra (100 kg/h, 150 kg/h e 200 kg/h). Utilizando os dados da tabela, é possível observar que, para a vazão de 100 kg/h, o Q_{torre} aumenta de 2016,88 kJ/h para uma área de 2,42 m² até 2020,79 kJ/h em 60,5 m², indicando uma variação muito pequena, com uma estabilização próxima ao limite superior.

Para a vazão de 150 kg/h, os valores de Q_{torre} começam em 2418,56 kJ/h para 2,42 m² e atingem 2423,85 kJ/h em 60,5 m². Esse aumento, apesar de maior que para 100 kg/h, também se estabiliza, evidenciando que o sistema atinge um ponto de eficiência térmica com menor impacto do aumento da área.

Já para a vazão de 200 kg/h, o Q_{torre} inicia com 2724,91 kJ/h para 2,42 m² e cresce até 2731,91 kJ/h em 60,5 m². Assim como nas outras vazões, há um aumento progressivo inicial, mas que se torna marginal com o aumento da área, sugerindo que a influência da área é limitada a partir de certo ponto.

Figura 83 – Energia na Torre em Função da Área para Diferentes Vazões de Água Salobra



Na relação entre a área do coletor (em metros quadrados) e o calor transferido pelo coil (Q_{coil}) em kJ/h para diferentes vazões de água salobra (100 kg/h, 150 kg/h e 200 kg/h), para a vazão de 100 kg/h, o Q_{coil} apresenta um comportamento quase constante, com valores variando de 201,29 kJ/h para 2,42 m² a 201,77 kJ/h para 60,5 m². Essa pequena variação indica que, para vazões mais baixas, o impacto do aumento da área é mínimo. Já para a vazão

de 150 kg/h, o calor transferido pelo coil começa em 250,82 kJ/h e aumenta gradualmente até 251,51 kJ/h, novamente apresentando uma variação pouco significativa. Esse comportamento sugere que a eficiência de transferência de calor do coil é levemente influenciada pelo aumento da área.

Por fim, para a vazão de 200 kg/h, os valores de Q_{coil} aumentam de 289,17 kJ/h para 2,42 m² até 290,09 kJ/h em 60,5 m². Assim como nas vazões anteriores, a diferença é pequena, indicando que o sistema atinge rapidamente sua eficiência máxima, mesmo com maiores áreas coletoras.

Os ETCs têm sido amplamente explorados devido à sua capacidade de minimizar perdas térmicas por meio do isolamento a vácuo. Esses coletores convertem a radiação solar em calor, que é utilizado para evaporar e condensar água em sistemas de destilação. Liu et al. (2013) destacaram um sistema de dessalinização baseado na destilação de múltiplos efeitos em baixa temperatura (LT-MED) acoplado a ETCs. O estudo demonstrou que o custo da água doce é reduzido com o aumento da área de coleta e da temperatura de saída do coletor. Além disso, essa abordagem evita o consumo de combustíveis fósseis e reduz a emissão de poluentes.

Sistemas ativos e passivos de dessalinização solar foram revisados por Kumar et al. (2021) [69]. Sistemas ativos, que combinam ETCs com outros coletores ou concentradores solares, apresentaram maior rendimento de água doce devido ao aquecimento suplementar. Em contrapartida, a eficiência de sistemas passivos depende de fatores como a profundidade da água, o ângulo de inclinação do coletor e a otimização do fluxo de calor. Um estudo experimental mostrou que a produtividade diária aumentou 77% ao integrar um ETC a um destilador solar simples, elevando o rendimento diário para 3,8 kg/m². Outro sistema com design otimizado alcançou uma produção máxima de 4,77 kg/m²/dia utilizando 30 tubos evacuados em um destilador solar.

Adicionalmente, Alwaer e Gryzagoridis (2021) [177] exploraram um protótipo que utilizava tubos evacuados com condensação de vapor sob pressão reduzida. Esse sistema, operando em condições de pressão subatmosférica, reduziu a temperatura de ebulição, o que resultou em maior produtividade de água doce. Os testes realizados em laboratório mostraram uma taxa de produção de água destilada de 7,5 litros por ciclo de teste (7 horas). Essa abordagem destacou a viabilidade para aplicações em áreas onde a consistência dos resultados é essencial.

A eficiência de produção de água doce está diretamente relacionada à capacidade de transferência de calor nos ETCs. Estudos apontam que a integração de nanofluidos e a variação nos ângulos de inclinação podem melhorar o desempenho térmico. Além disso, a profundidade da água no destilador e o controle da pressão afetam significativamente a taxa de evaporação e condensação. Kumar et al. (2021) [69] destacaram que sistemas com profundidades de água de 0,03 m a 0,05 m alcançam rendimentos variáveis entre 2,3 kg/m²/dia e 3,4 kg/m²/dia, dependendo da configuração e do número de tubos evacuados.

O estudo conduzido por Liu et al. (2013) [178] analisou um sistema de dessalinização solar integrado a coletores de tubo evacuado (ETCs) e destilação de múltiplos efeitos em baixa temperatura (LT-MED). A produção diária de água doce variou diretamente com a área do coletor solar. Para uma área de 4.000 m², o sistema alcançou uma produção de aproximadamente 220 toneladas de água doce por dia, com uma produção média por unidade de área de 33 litros/m²/dia. Além disso, o aumento na temperatura de saída do coletor solar (de 88°C para 96°C) resultou em uma redução significativa no custo da água, indicando a eficiência térmica aprimorada do sistema na conversão de energia solar em água potável.

Concluindo, os avanços no design de sistemas de dessalinização solar, especialmente aqueles que utilizam ETCs, indicam um caminho promissor para atender à crescente demanda por água doce em regiões vulneráveis. Embora desafios relacionados ao custo e à escalabilidade ainda existam, estudos experimentais e modelagens econômicas sugerem que melhorias tecnológicas podem viabilizar a adoção comercial em maior escala, mostrando que o presente estudo tem ótimos resultados.

4.6. CONFIGURAÇÃO GEOTÉRMICA

Com base no sistema de dessalinização solar, houve uma readaptação para o sistema geotérmico, conforme Figuras 84 e 85

Figura 84 – Layout – Configuração IX

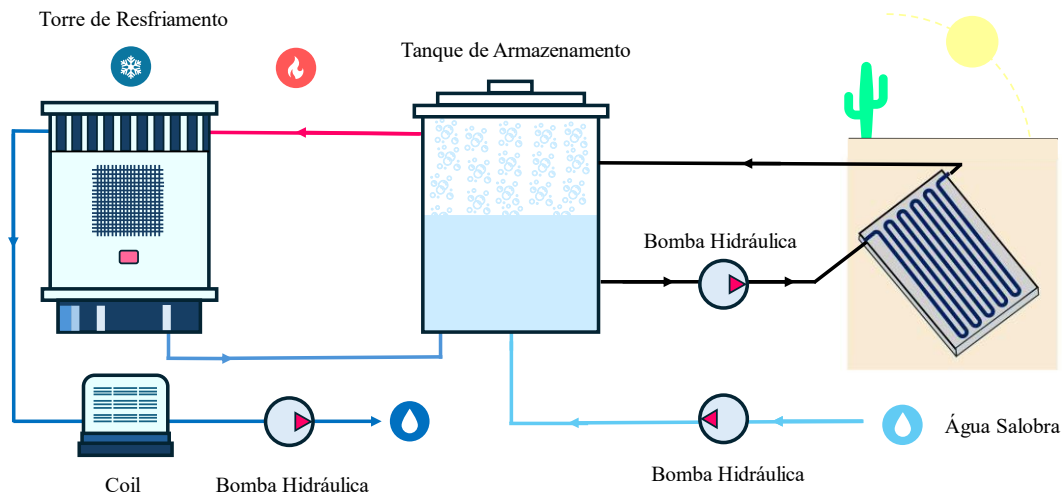
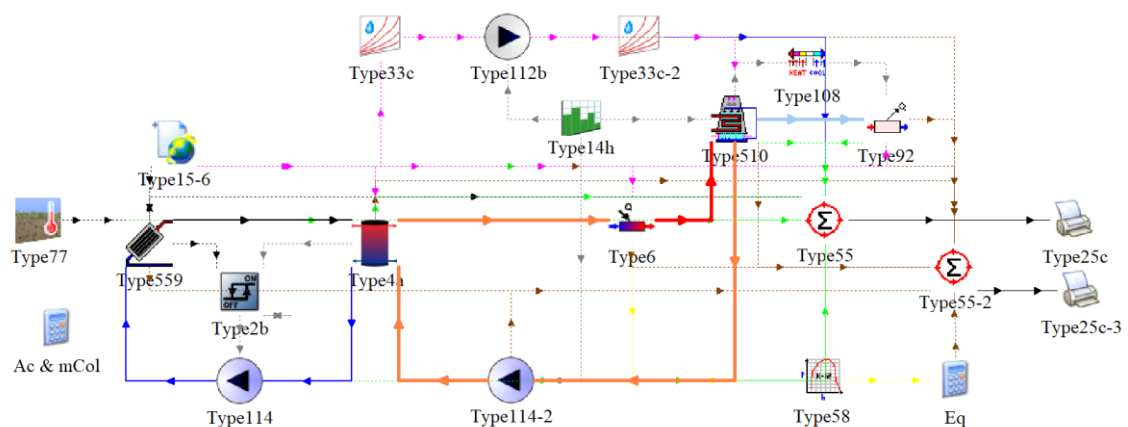


Figura 85 – Configuração IX – TRNSYS



A Figura 86 fornece uma análise da distribuição da temperatura do solo em profundidades variando de 0 a 10 m ao longo dos meses do ano, evidenciando claramente a interação entre os fatores climáticos sazonais e as propriedades térmicas do solo. Essa análise é fundamental para compreender como o calor se propaga nas camadas do solo e como essas variações térmicas podem ser aproveitadas em aplicações práticas, como geotérmica, agricultura e dessalinização.

Na superfície (0 m), a temperatura do solo apresenta uma variação acentuada, com máximos registrados em meses de maior radiação solar, como dezembro e janeiro ($\sim 39^{\circ}\text{C}$), e mínimos durante os meses de menor radiação, como junho e julho ($\sim 12^{\circ}\text{C}$). Essas oscilações refletem a interação direta da superfície do solo com a radiação solar e as condições atmosféricas, como temperatura do ar e vento, o que resulta em um gradiente térmico mais pronunciado próximo à superfície. O gradiente térmico é de particular interesse para aplicações que exploram o fluxo de calor, como o uso de coletores solares acoplados ao solo.

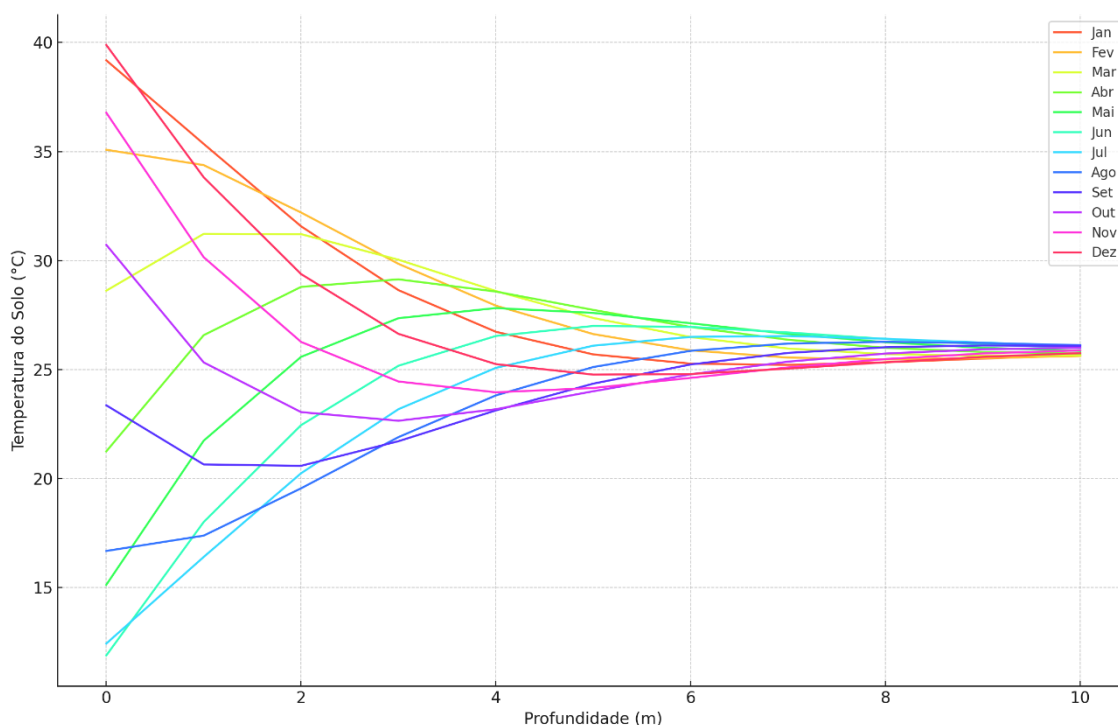
À medida que a profundidade aumenta, as variações de temperatura começam a diminuir devido ao efeito de amortecimento térmico do solo, governado pelas suas propriedades, como capacidade térmica, condutividade térmica e difusividade térmica. Em profundidades intermediárias (1 a 5 m), ainda é possível observar flutuações térmicas sazonais, mas essas flutuações são significativamente reduzidas em comparação à superfície. Isso demonstra que o solo atua como um meio natural de isolamento térmico, dissipando gradualmente as oscilações sazonais.

Em profundidades superiores a 5 m, a temperatura do solo permanece praticamente constante ($\sim 25^{\circ}\text{C}$), refletindo a média térmica anual da região. Essa estabilização térmica é extremamente relevante para aplicações que dependem de condições térmicas estáveis, como sistemas de dessalinização geotérmica e solar híbrida, além de sistemas de armazenamento de energia térmica. A capacidade do solo de manter uma temperatura estável nessas profundidades reforça sua utilidade como meio de armazenamento de calor em regiões, onde as flutuações climáticas são intensas.

O comportamento descrito no gráfico também destaca a influência de fatores climáticos, como radiação solar, sazonalidade e condições atmosféricas, na propagação do calor no solo. Meses de alta radiação, como dezembro e janeiro, contribuem para o aumento significativo da temperatura nas camadas superiores, enquanto os meses de baixa radiação, como junho e julho, resultam em menores valores de temperatura, especialmente próximo à superfície.

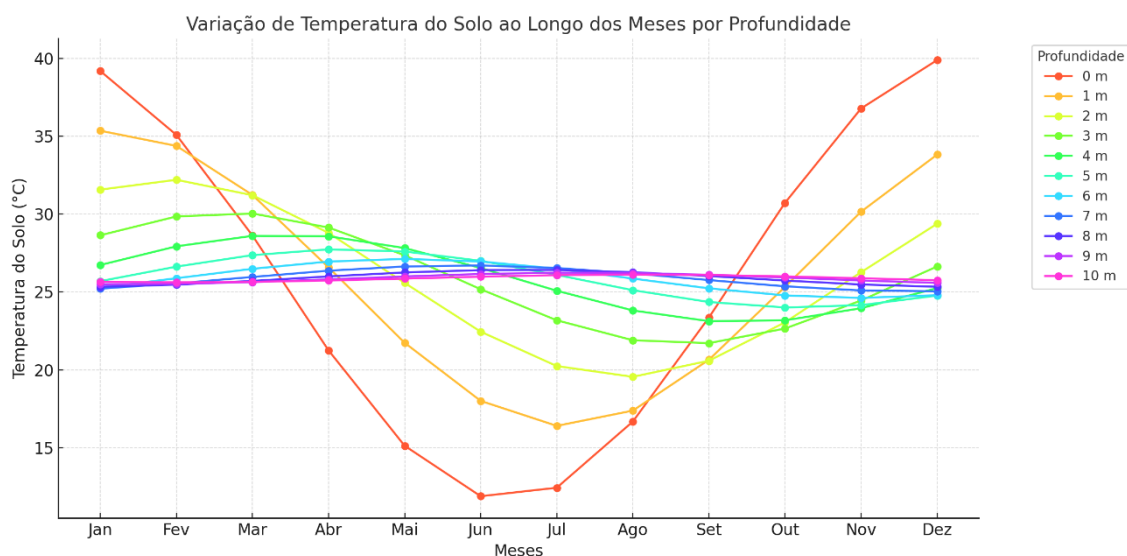
A análise apresentada neste gráfico é essencial para entendimento de sistemas energéticos no agreste pernambucano, onde o solo pode ser explorado como um recurso natural para armazenamento e transferência de calor. Além disso, a variação térmica sazonal descrita é útil para a modelagem de sistemas de dessalinização, que dependem da interação entre o solo e os coletores solares para maximizar a eficiência do processo.

Figura 86 – Variação da Temperatura do Solo com a Profundidade



A variação da temperatura do solo com a profundidade é influenciada por propriedades físicas como textura, composição mineralógica, umidade e densidade do solo, que modulam a propagação do calor. Solos arenosos apresentam maior condutividade térmica, enquanto solos argilosos e úmidos amortecem melhor as flutuações térmicas. Esse comportamento, combinado com o atraso térmico sazonal, afeta diretamente ecossistemas e atividades como agricultura, onde a temperatura do solo influencia o desenvolvimento de raízes, germinação de sementes e atividade microbiana. Tecnologias como energia geotérmica e sistemas de dessalinização solar e híbrida aproveitam a estabilidade térmica em profundidades superiores a 5 m para maximizar a eficiência energética. Além disso, dados térmicos do solo são úteis no monitoramento climático e no planejamento sustentável em regiões mais secas.

Figura 87 –Variação da Temperatura do Solo ao Longo dos Meses por Profundidade



A análise da vazão (kg/h) ao longo dos meses para diferentes profundidades revela comportamentos distintos em relação à produção de água, demonstrando a influência de fatores sazonais e da profundidade do solo no desempenho do sistema de dessalinização. Os dados analisados abrangem profundidades de 0 metros até 10 metros, ao longo dos 12 meses do ano.

De modo geral, a profundidade de 0 m apresentou as maiores vazões durante o ano, com o pico em janeiro ($0,1416 \text{ kg/h}$) e o mínimo em junho ($0,0097 \text{ kg/h}$). Após o período de menor vazão, ocorre uma recuperação gradual, atingindo portanto uma vazão de $0,1153 \text{ kg/h}$ em dezembro. Nas profundidades intermediárias, de 1 m a 3 m, os valores de vazão são mais baixos do que na superfície, mas ainda apresentam comportamento sazonal semelhante, com picos nos meses de maior insolação e declínios nos meses mais frios. Já nas profundidades de 4 m a 6 m, os valores são mais estáveis ao longo do ano, com menor variação sazonal, indicando que as trocas térmicas são menos impactadas pelas condições climáticas da superfície. Por fim, nas profundidades de 7 m a 10 m, observam-se as menores vazões, refletindo o menor impacto térmico em camadas mais profundas, embora a sazonalidade ainda seja perceptível, com valores mais baixos durante o inverno e leve recuperação no segundo semestre.

O mês de janeiro se destaca como o período de maior produção em praticamente todas as profundidades, indicando forte influência da alta insolação e temperaturas do solo. Em contrapartida, os meses de maio e junho marcam os períodos de menor vazão, refletindo a diminuição da energia disponível para o processo. De agosto a dezembro, há uma recuperação

gradual das vazões, especialmente nas profundidades mais superficiais, devido ao aumento da radiação solar e da temperatura do solo.

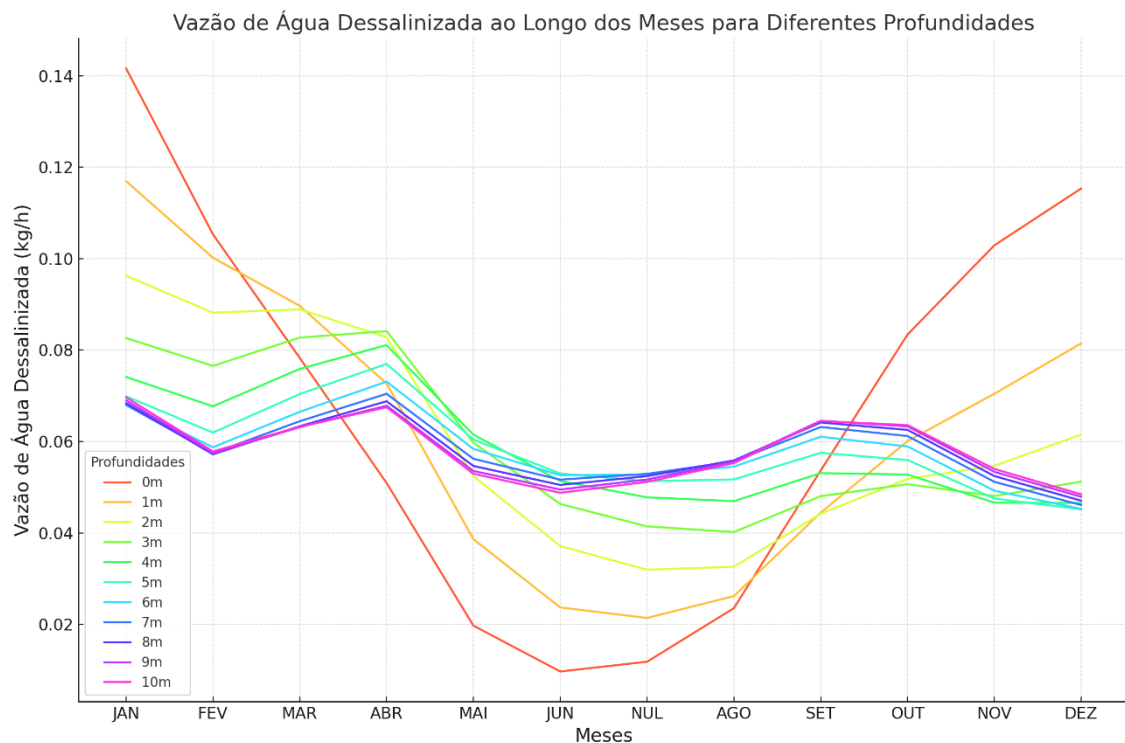
Em relação à produção de água nos meses de janeiro e dezembro há um destaque com valores máximos registrados em profundidades como 0 *m* (52,68 *kg* em janeiro) e 1 *m* (43,50 *kg* em janeiro), refletindo as condições favoráveis de radiação solar e temperaturas mais altas no solo. Em contrapartida, os meses de maio, junho e julho apresentam os menores valores, especialmente em profundidades de 0 *m* (7,33 *kg* em maio) e 1 *m* (14,37 *kg* em maio), devido à redução da radiação solar e das temperaturas do solo.

Cada profundidade apresenta um comportamento específico. Na profundidade de 0 *m*, a produção máxima é de 52,68 *kg* em janeiro e a mínima de 3,49 *kg* em junho, evidenciando forte dependência das condições sazonais. A 1 *m*, a produção máxima é de 43,50 *kg* em janeiro e a mínima de 7,70 *kg* em junho e julho, com um padrão semelhante à profundidade de 0 *m*, mas ligeiramente menos impactada. Profundidades entre 2 *m* e 4 *m* mostram maior estabilidade em relação às variações sazonais, mas ainda refletem uma produção considerável nos meses mais quentes, como os 33,07 *kg* em março na profundidade de 2 *m*. Já nas profundidades de 5 *m* a 6 *m*, observa-se uma produção moderada e mais consistente ao longo do ano, com máximas de aproximadamente 26 *kg* em janeiro e mínimas de cerca de 18 *kg* em junho. Por fim, nas profundidades de 7 *m* a 10 *m*, os menores valores de produção são registrados devido ao menor impacto térmico em profundidades mais elevadas, embora ainda haja variações sazonais, com máximas em torno de 25 *kg* e mínimas próximas a 17 *kg*.

A sazonalidade desempenha um papel fundamental na eficiência do sistema. Durante os meses de maior radiação solar, como janeiro e dezembro, as profundidades mais superficiais captam mais energia, resultando em produções elevadas. Nos meses de menor insolação, como maio e junho, a redução de energia térmica impacta negativamente a produção em todas as profundidades, especialmente nas mais rasas.

Os dados reforçam a importância de considerar a sazonalidade e a profundidade na otimização de sistemas de dessalinização. Profundidades mais próximas da superfície são ideais para aproveitar ao máximo os períodos de maior radiação solar, enquanto profundidades maiores oferecem maior estabilidade ao longo do ano. O uso de aquecedores auxiliares, permitiu uma produção média mensal de 317,55 *kg/h*, representando uma solução eficaz para mitigar os impactos da sazonalidade.

Figura 88 – Vazão de Água Dessalinizada ao Longo dos Meses para Diferentes Profundidades



Os dados analisados corroboram a influência significativa da profundidade e da sazonalidade no desempenho de sistemas de dessalinização solar-geotérmica. A análise das vazões em diferentes profundidades demonstra que profundidades mais rasas captam de forma mais eficiente a energia solar durante períodos de alta insolação, enquanto camadas mais profundas apresentam estabilidade térmica ao longo do ano. Este comportamento é consistente com as observações relatadas por [172], que identificaram que o uso de coletores solares planos resultou em uma produção anual de $7,5 \text{ m}^3/\text{m}^2$ de coletor e que a eficiência foi maximizada com áreas de coletor de até 360 m^2 . Além disso, o uso combinado de energia solar e geotérmica permitiu alcançar maior estabilidade e eficiência na produção de água, com incrementos de até 33,16% na vazão ao ajustar as configurações do sistema.

Prajapati et al. (2021)[179] destacam que a integração de energia geotérmica em sistemas de dessalinização oferece vantagens como operação contínua e menor impacto das condições climáticas sazonais. Este comportamento foi observado em profundidades entre 4 m e 6 m, onde as vazões são mais estáveis e variam de aproximadamente 18 kg em junho a 26 kg em janeiro. Para profundidades entre 7 m e 10 m, os valores são menores, mas consistentes, com máximas em torno de 25 kg e mínimas próximas a 17 kg, indicando um menor impacto térmico das condições sazonais. No entanto, as produções anuais nestas

profundidades também são relevantes para atender a demanda por água em regiões de maior seca.

Yadav et al. (2023)[180], ao analisar um sistema de destilação multistágio integrado a energia solar e geotérmica, relataram que a produção de água dessalinizada pode alcançar até 17,6% da capacidade global de água doce em instalações com destilação multistágio (MSF). Em sistemas híbridos similares, o uso de coletores solares com tubos evacuados e energia geotérmica permitiu alcançar uma produção de até 194 *ppm* de água dessalinizada com custos de 0,1034 *USD/m³*, reforçando a viabilidade técnica e econômica para implementação em áreas remotas e com infraestrutura limitada. Os resultados gerais reforçam que a sazonalidade desempenha um papel crucial na eficiência dos sistemas, com picos de produção registrados em profundidades de 0 m e 1m, que alcançaram 52,68 *kg* em janeiro e 43,50 *kg* em janeiro, respectivamente

4.7. CONFIGURAÇÃO HÍBRIDA

A análise do gráfico que apresenta a produção mensal de água dessalinizada em um sistema híbrido, sem aquecedor auxiliar, revela comportamentos importantes para o desempenho do sistema, considerando as profundidades de 0 m, 5 m e 10 m. Os resultados fornecem insights sobre a interação entre as condições sazonais e as propriedades térmicas do solo, além de sua influência na eficiência do sistema.

O gráfico evidencia uma variação sazonal significativa na produção de água dessalinizada. Os meses de maior produção correspondem a janeiro, novembro e dezembro, com valores máximos de 263,16 *kg/mês* para a profundidade de 0 m e 234,44 *kg/mês* para 10 m em dezembro. Esses picos ocorrem devido ao aumento da radiação solar e da temperatura ambiente, que impactam positivamente a transferência de calor no sistema, mesmo sem o uso de aquecedor auxiliar. Por outro lado, os meses de menor produção, como maio, junho e julho, mostram reduções significativas, com mínimos de 50,47 *kg/mês* em julho (0 m) e 77,45 *kg/mês* em julho (10 m). Esse comportamento está associado à menor disponibilidade de energia solar nesses períodos, o que limita a capacidade do sistema híbrido.

As profundidades analisadas apresentam variações distintas. A profundidade superficial (0 m) apresenta a maior produção mensal ao longo do ano, destacando-se especialmente nos meses de maior radiação solar. No entanto, essa profundidade também é a mais sensível às variações sazonais, com uma queda acentuada durante os meses mais frios, como junho (52,00 *kg/mês*). Por outro lado, as profundidades de 5 m e 10 m mostram

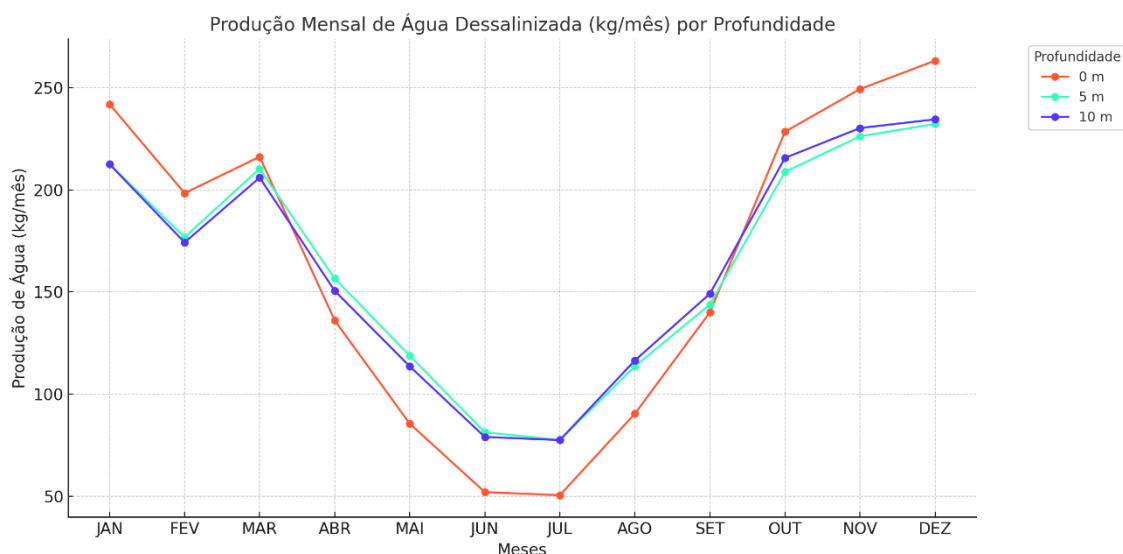
desempenhos mais estáveis, com menor sensibilidade às oscilações sazonais. Embora a produção mensal seja inferior à de 0 m nos meses de pico, essas profundidades mantêm uma produção mais consistente durante os meses de baixa radiação solar. Por exemplo, em junho, a produção em 10 m é de 78,99 kg/mês, superior à de 0 m (52,00 kg/mês).

A ausência de um aquecedor auxiliar no sistema destaca a importância de maximizar o aproveitamento da radiação solar direta e da condução térmica pelo solo. A profundidade de 0 m, embora apresente picos mais elevados, é limitada pela alta sensibilidade às condições sazonais, o que pode prejudicar sua eficiência em períodos de menor insolação. Por outro lado, as profundidades de 5 m e 10 m demonstram maior estabilidade térmica, com menor variação na produção mensal, o que pode ser vantajoso em cenários onde a consistência é mais importante do que a produção máxima.

Comparativamente, com o uso de um aquecedor auxiliar, a produção mensal de água dessalinizada atinge uma média de 315 kg/mês, com uma energia no aquecedor auxiliar inferior à metade usada nos sistemas solar e geotérmico. Essa diferença significativa evidencia o impacto positivo do aquecedor auxiliar na eficiência do sistema, garantindo maior produção, especialmente nos meses de menor insolação. Contudo, a análise do sistema sem aquecedor é relevante para avaliar a viabilidade de sistemas mais sustentáveis e independentes de fontes externas de energia térmica. Vale ressaltar que para essa produção de água usa em torno de 20% da energia do aquecedor auxiliar usados no sistema anteriormente.

Esses resultados são fundamentais para a otimização de sistemas híbridos de dessalinização. Eles sugerem que sistemas em profundidades intermediárias e profundas podem ser mais eficazes em garantir produção estável ao longo do ano, especialmente em regiões com grande variação sazonal de radiação solar. Além disso, o uso de estratégias complementares, como isolamento térmico ou o desenvolvimento de coletores solares mais eficientes, pode ajudar a melhorar o desempenho do sistema híbrido, particularmente em profundidades superficiais. A análise sazonal deve ser integrada ao planejamento de sistemas híbridos, com foco em atender às demandas de água durante períodos críticos de menor produção.

Figura 89 – Produção Mensal de Água Dessalinizada (kg/mês) por Profundidade



Os dados analisados corroboram a influência significativa da profundidade e da sazonalidade no desempenho de sistemas de dessalinização solar-geotérmica. A análise das vazões em diferentes profundidades demonstra que profundidades mais rasas captam de forma mais eficiente a energia solar durante períodos de alta insolação, enquanto camadas mais profundas apresentam estabilidade térmica ao longo do ano. Este comportamento é consistente com as observações relatadas por Farahani et al. (2024), que identificaram um aumento de 10,60% a 33,16% na produção de água ao ampliar a área de coletores solares planos em sistemas híbridos. Além disso, o uso combinado de energia solar e geotérmica potencializou a eficiência do sistema, especialmente em regiões de alta radiação solar.

Prajapati et al. (2021) destacam que a integração de energia geotérmica em sistemas de dessalinização oferece vantagens como a operação contínua e menor impacto das condições climáticas sazonais. Esta característica é particularmente relevante em profundidades entre 4m e 6m, onde as vazões são mais estáveis, refletindo menor dependência das condições de superfície. O uso de sistemas híbridos, como a destilação multistágio com energia geotérmica, apresenta ainda um custo competitivo, com valores médios de produção de água de 0,55–1,02 USD/m³, alinhados às necessidades econômicas de regiões semiáridas.

Yadav et al. (2023), ao analisar um sistema de destilação multistágio integrado a energia solar e geotérmica, evidenciaram que a combinação dessas fontes não apenas melhora a eficiência térmica, mas também reduz significativamente a concentração de sal na água tratada, atingindo níveis adequados para consumo humano. Este desempenho é relevante para profundidades maiores, onde a estabilidade térmica facilita a operação do sistema, resultando em vazões menores porém consistentes, como observado nas profundidades entre 7 m e 10 m.

Os resultados gerais reforçam a importância de considerar a configuração ótima de sistemas de dessalinização híbridos, com a possibilidade de ajustar a profundidade e o tipo de coletor em função das condições climáticas locais.

5. CONCLUSÃO

O objetivo deste estudo foi investigar um sistema de dessalinização que utiliza o processo de umidificação-desumidificação e avaliar a produção de água doce por meio do software TRNSYS. O ciclo proposto foi analisado no município de Pernambuco de São João. O sistema simulado foi projetado para aproveitar diferentes fontes de calor, incluindo energia solar e energia geotérmica. Foram examinados os efeitos do uso de dois tipos de coletores solares – coletor de tubo evacuado e coletor de placa plana – nas configurações em que a energia solar foi empregada como fonte de calor. Adicionalmente, foi avaliado o desempenho do sistema híbrido, que combina as melhores características das fontes solar e geotérmica.

Além disso, o desempenho do sistema de dessalinização foi analisado com base em simulações realizadas no TRNSYS, considerando as propriedades térmicas do solo em diferentes profundidades (até 10 metros) e dados climáticos da região estudada. Os principais resultados desta pesquisa são especificados a seguir:

- Produção de água doce máxima na configuração híbrida: O maior valor de produção de água doce (FWP) foi obtido na configuração híbrida. Essa configuração demonstrou maior eficiência devido à estabilidade térmica do solo e ao alto desempenho do coletor solar.
- Influência das propriedades térmicas do solo: A análise das propriedades térmicas do solo em São João revelou que profundidades maiores (de cinco metros em diante) proporcionam maior estabilidade térmica;
- Variações sazonais no desempenho: O sistema apresentou melhores resultados durante os meses de alta radiação solar (outubro e novembro), enquanto a componente geotérmica garantiu produção estável durante períodos de menor radiação, como em dias nublados ou durante a noite, para maiores profundidades;
- Impacto da vazão de entrada: O desempenho do sistema de dessalinização em São João permaneceu constante mesmo com o aumento da vazão de ar;
- Eficiência do coletor de tubo evacuado: Entre os coletores analisados, o coletor de tubo evacuado apresentou maior eficiência na captação de energia solar, contribuindo para o aumento da produção de água doce, especialmente nos meses mais quentes;
- Viabilidade local do sistema híbrido: A combinação de energia solar e geotérmica mostrou-se tecnicamente viável, na questão energética, para São João. O sistema

híbrido atende à demanda hídrica local e oferece maior resiliência em relação às condições climáticas adversas.

- Otimização e replicabilidade: O uso do software TRNSYS permitiu identificar as condições ideais de operação para São João, destacando que o sistema pode ser replicado em outras localidades do semiárido com características semelhantes, desde que haja adaptação às condições locais de solo e clima.
- Redução de emissões e sustentabilidade: O sistema híbrido proposto para São João contribui para a redução de emissões de gases de efeito estufa, destacando-se como uma solução sustentável para o abastecimento hídrico na região.

6. TRABALHOS FUTUROS

- Modelagem e Otimização Térmica-Energética de Sistemas Híbridos de Dessalinização Solar-Geotérmica para Aplicação no Semiárido Pernambucano;
- Avaliação Tecnoeconômica e Análise de Ciclo de Vida de Sistemas Sustentáveis de Dessalinização em Regiões Semiáridas;
- Síntese e Caracterização de Materiais Avançados para a Maximização da Eficiência Térmica em Sistemas de Dessalinização Solar-Geotérmica;
- Integração de Armazenamento Térmico com Materiais de Mudança de Fase (PCM) em Sistemas Híbridos de Dessalinização Solar-Geotérmica: Análise de Desempenho Transiente;
- Modelagem Numérica e Avaliação de Viabilidade Técnico-Econômica de Sistemas Híbridos de Dessalinização para Regiões Semiáridas em Escala Global

REFERÊNCIA

1. Santos TEM dos, Montenegro AAA (2012) Erosividade e padrões hidrológicos de precipitação no Agreste Central pernambucano. *Rev Bras Eng Agrícola e Ambient* 871–880
2. Leal M, Netto C (2004) Utilização de águas subterrâneas em aluviões no agreste pernambucano. *XIII Congr Bras Águas Subterrâneas* 1–19
3. Silva FMB da, Ramos NMR, Cirilo A (2019) Dessalinização De Água Como Alternativa Para Minimizar a Escassez Hídrica No Semiárido Brasileiro. *14º Silusba* 2–5
4. Blázquez CS, Borge-Diez D, Nieto IM, et al (2021) Multi-parametric evaluation of electrical, biogas and natural gas geothermal source heat pumps. *Renew Energy* 163:1682–1691. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.080>
5. IPCC I panel on climate change (2021) *Climate Change 2021: the Physical Science Basis - Summary for Policymakers*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1260/095830507781076194>
6. Soltani M, Moradi Kashkooli F, Dehghani-Sanij AR, et al (2019) A comprehensive review of geothermal energy evolution and development. *Int J Green Energy* 16:971–1009. <https://doi.org/10.1080/15435075.2019.1650047>
7. Vargas-Payera S, Ibarra C, Hurtado N (2023) Social and cultural aspects in the adoption of geothermal heat pump systems to replace wood-burning heaters in educational spaces: The Chilean Patagonian case. *J South Am Earth Sci* 128:. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104426>
8. Idrissi S, Sangkyu P, Oualid M, et al (2024) Design parameters influencing the energy performance and indoor comfort of net zero energy building “ NZEB ” designed for semi-arid urban areas : Digital workflow methodology , sensitivity analysis and comparative assessment. *Sol Energy* 268:112264. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112264>
9. Algarni S, Irshad K (2023) Case Studies in Thermal Engineering Performance evaluation of a hybrid thermoelectric generator and flat plate solar collector system in a semi-arid climate. *Case Stud Therm Eng* 44:102842. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102842>
10. Allouhi A (2022) Techno-economic and environmental accounting analyses of an innovative power-to-heat concept based on solar PV systems and a geothermal heat pump. *Renew Energy* 191:649–661. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.001>
11. Saeidi R, Karimi A, Noorollahi Y (2024) The novel designs for increasing heat transfer in ground heat exchangers to improve geothermal heat pump efficiency. *Geothermics* 116:102844. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2023.102844>
12. Marina A, Spoelstra S, Zondag HA, Wemmers AK (2021) An estimation of the

- European industrial heat pump market potential. *Renew Sustain Energy Rev* 139:110545. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110545>
13. Zhang L, Liu Y, Zhan H, et al (2021) ~ o-Southern Oscillation on precipitation Influence of solar activity and El Ni n extremes , streamflow variability and flooding events in an arid-semiarid region of China. *J Hydrol* 601:126630. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126630>
 14. Birdsell DT, Adams BM, Deb P, et al (2024) Analytical solutions to evaluate the geothermal energy generation potential from sedimentary-basin reservoirs. *Geothermics* 116:102843. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2023.102843>
 15. Wang X, Zhan T, Liu G, Ni L (2023) A field test of medium-depth geothermal heat pump system for heating in severely cold region. *Case Stud Therm Eng* 48:103125. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103125>
 16. Bellos E, Tzivanidis C (2021) Parametric investigation of a ground source co2 heat pump for space heating. *Energies* 14:. <https://doi.org/10.3390/en14123563>
 17. Aljubran MJ, Horne RN (2024) FGEM: Flexible Geothermal Economics Modeling tool. *Appl Energy* 353:122125. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122125>
 18. Alegría P, Catalán L, Araiz M, et al (2024) Design and optimization of thermoelectric generators for harnessing geothermal anomalies: A computational model and validation with experimental field results. *Appl Therm Eng* 236:121364. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121364>
 19. Arslan O, Arslan AE, Kurtbas I (2023) Exergoeconomic and exergoenvironmental based multi-criteria optimization of a new geothermal district heating system integrated with thermal energy storage driven heat pump. *J Build Eng* 73:106733. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106733>
 20. Arslan O, Ergenekon Arslan A, Eddine Boukelia T (2023) Modelling and optimization of domestic thermal energy storage based heat pump system for geothermal district heating. *Energy Build* 282:112792. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112792>
 21. Fouquet R, Pearson PJG (2012) Past and prospective energy transitions: Insights from history. *Energy Policy* 50:1–7. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.08.014>
 22. Farzanehkhameneh P, Soltani M, Moradi Kashkooli F, Ziabasharhagh M (2020) Optimization and energy-economic assessment of a geothermal heat pump system. *Renew Sustain Energy Rev* 133:110282. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110282>
 23. Kim H, Junghans L (2023) Economic feasibility of achieving net-zero emission building (NZEB) by applying solar and geothermal energy sources to heat pump systems: A case in the United States residential sector. *J Clean Prod* 416:137822. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137822>
 24. Turner JA (1999) A realizable renewable energy future. *Science (80-)* 285:687–688
 25. Zhang Q, Dahi Taleghani A, Li G (2024) Fracture conductivity management to improve heat extraction in enhanced geothermal systems. *Int J Heat Mass Transf*

- 218:124725. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124725>
26. Yu CR, Guo H Sen, Wang QC, Chang RD (2020) Revealing the impacts of passive cooling techniques on building energy performance: A residential case in Hong Kong. *Appl Sci* 10:.. <https://doi.org/10.3390/APP10124188>
 27. Al-Shetwi AQ (2022) Sustainable development of renewable energy integrated power sector: Trends, environmental impacts, and recent challenges. *Sci Total Environ* 822:153645. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153645>
 28. Weck-Ponten S, Frisch J, van Treeck C (2022) Simplified heat pump system model integrated in a tool chain for digitally and simulation-based planning shallow geothermal systems. *Geothermics* 106:102579. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102579>
 29. Soltani M, Moradi Kashkooli F, Souri M, et al (2021) Environmental, economic, and social impacts of geothermal energy systems. *Renew Sustain Energy Rev* 140:110750. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110750>
 30. Roberta W, Maniçoba A, Jardim F, et al (2024) Can changes in land use in a semi-arid region of Brazil cause seasonal variation in energy partitioning and evapotranspiration ? 367:.. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121959>
 31. Italo G, Andr C, Souza D, et al (2024) Do different densities and planting orientations of forage cactus alter agronomic , morphophysiological characteristics , and soil water dynamics in a semiarid region ? Ana Virgínia Marinho Silveira , Abelardo Ant o. 159:.. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127271>
 32. Maniçoba da Rosa Ferraz Jardim A, de Souza LSB, Alves CP, et al (2023) Intercropping forage cactus with sorghum affects the morphophysiology and phenology of forage cactus. *African J Range Forage Sci* 40:129–140. <https://doi.org/10.2989/10220119.2021.1949749>
 33. Alves HKMN, Silva TGF da, Jardim AM da RF, et al (2023) The use of mulch in cultivating the forage cactus optimizes yield in less time and increases the water use efficiency of the crop. *Irrig Drain* 72:75–89. <https://doi.org/10.1002/ird.2758>
 34. Cunha DPS, Pontes K V (2022) Desalination plant integrated with solar thermal energy : A case study for the Brazilian semi-arid. *J Clean Prod* 331:129943. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129943>
 35. Pimentel da Silva GD, Sharqawy MH (2020) Techno-economic analysis of low impact solar brackish water desalination system in the Brazilian Semiarid region. *J Clean Prod* 248:119255. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119255>
 36. Ye W, Ma E, Liao L, et al (2023) Science of the Total Environment Applicability of photovoltaic panel rainwater harvesting system in improving water-energy-food nexus performance in semi-arid areas. *Sci Total Environ* 896:164938. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164938>
 37. Hou W, Zhang X, Deng H, et al (2023) Resources , Conservation & Recycling Comprehensive regionalization and potential water crisis for solar power development in arid and semi-arid regions of northwest China. *Resour Conserv Recycl* 193:106939. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.106939>

38. Melo PR (2007) Avaliação Climática Do Agreste Pernambucano Para Os Três Cenários Pluviométricos - Anos Secos , Normais E Chuvosos. Soc Bras Agrometeorol
39. Filho GQ de L, Pinto KKM, Rosal MCF, et al Qualidade da água e vulnerabilidade à degradação de reservatórios do agreste pernambucano: uma análise em diferentes escalas. XVII Simpósio Recur Hídricos do Nord 1–10
40. Liang C, Yin Z, Sun Y, et al (2022) Pyrolysis of waste Fischer-Tropsch wax: An experimental study. J Clean Prod 350:131529. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131529>
41. Lampert A (2019) Over-exploitation of natural resources is followed by inevitable declines in economic growth and discount rate. Nat Commun 10:1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09246-2>
42. Wang F, Li W, Bao W, Lv Z (2021) Gauss–Seidel method with oblique direction. Results Appl Math 12:100180. <https://doi.org/10.1016/j.rinam.2021.100180>
43. Du X, Wu S, Li T, et al (2022) Ozone oxidation pretreatment of softwood kraft lignin: An effective and environmentally friendly approach to enhance fast pyrolysis product selectivity. Fuel Process Technol 231:107232. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2022.107232>
44. Jiang Y, Mori T, Naganuma H, Ninomiya Y (2022) Effect of the optimal combination of bituminous coal with high biomass content on particulate matter (PM) emissions during co-firing. Fuel 316:123244. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123244>
45. Bilgen S, Keleş S, Sarikaya I, Kaygusuz K (2015) A perspective for potential and technology of bioenergy in Turkey: Present case and future view. Renew Sustain Energy Rev 48:228–239. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.096>
46. Karimi Alavijeh M, Karimi K (2019) Biobutanol production from corn stover in the US. Ind Crops Prod 129:641–653. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.12.054>
47. Mckendry P (2002) Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. Bioresour Technol 83:37–46
48. Maria F, Castro R, Maria G, et al (2022) Biomass and Bioenergy Accumulation of biomass and lignocellulosic compounds in photoperiod-sensitive biomass sorghum genotypes. Biomass and Bioenergy 158:. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106344>
49. Haghighi S, Hossein A, Tabatabaei M (2013) Lignocellulosic biomass to bioethanol , a comprehensive review with a focus on pretreatment. Renew Sustain Energy Rev 27:77–93. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.033>
50. Scott V, Haszeldine RS, Tett SFB, Oschlies A (2015) Fossil fuels in a trillion tonne world. Nat Publ Gr 5:419–423. <https://doi.org/10.1038/nclimate2578>
51. Kevin A, Glen P (2016) The trouble with negative emissions. Science (80-) 354:182–183
52. Kong R, Bi D, Yao D, et al (2022) CFD-DEM study of a V-shaped Down-tube

- pyrolysis Reactor : Flow and heat transfer between heat carrier and biomass. *Appl Therm Eng* 207:118179.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118179>
53. Wang Z, Bui Q, Zhang B, et al (2021) The nexus between renewable energy consumption and human development in BRICS countries : The moderating role of public debt. *Renew Energy* 165:381–390.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.144>
 54. Abo-zahhad EM, Hares E, Esmail MFC (2024) Case Studies in Thermal Engineering Simplified modeling of polycrystalline solar module performance in a semi-arid region. *Case Stud Therm Eng* 60:104762.
<https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104762>
 55. Amjith LR, Bavanish B (2022) Chemosphere A review on biomass and wind as renewable energy for sustainable environment. *Chemosphere* 293:133579.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133579>
 56. Empresa de Pesquisa Energética (2024) Balanço Energético Nacional: Summary Report 2024. 72
 57. Zhang L, Hu Y, Chu J, et al (2024) Performance investigation on a concentrating photovoltaic thermal system integrated with spectral splitter and absorption heat pump. *Appl Therm Eng* 237:121772.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121772>
 58. Loni R, Askari Asli-Areh E, Ghobadian B, et al (2020) Research and review study of solar dish concentrators with different nanofluids and different shapes of cavity receiver: Experimental tests. *Renew Energy* 145:783–804.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.056>
 59. Akrami E, Gholami A, Ameri M, Zandi M (2018) Integrated an innovative energy system assessment by assisting solar energy for day and night time power generation: Exergetic and Exergo-economic investigation. *Energy Convers Manag* 175:21–32. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.075>
 60. Pantoja MH de A, Esteves SN, Jacinto MAC, et al (2017) Thermoregulation of male sheep of indigenous or exotic breeds in a tropical environment. *J Therm Biol* 69:302–310. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2017.09.002>
 61. Leite JHGM, Façanha DAE, Bermejo JVD, et al (2021) Adaptive assessment of small ruminants in arid and semi-arid regions. *Small Rumin Res* 203:..
<https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2021.106497>
 62. Mascarenhas H, Araújo D, Rodrigues M, et al (2023) Morphology of coat and skin of small ruminants reared in the Brazilian semi-arid region. 112:..
<https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2022.103418>
 63. Al-Karaghoul A, Kazmerski LL (2013) Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes. *Renew Sustain Energy Rev* 24:343–356.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.064>
 64. Xiao G, Wang X, Ni M, et al (2013) A review on solar stills for brine desalination. *Appl Energy* 103:642–652.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.10.029>

65. Tiwari GN, Sahota L (2017) Review on the energy and economic efficiencies of passive and active solar distillation systems. *Desalination* 401:151–179. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.08.023>
66. Sharshir SW, Yang N, Peng G, Kabeel AE (2016) Factors affecting solar stills productivity and improvement techniques : A detailed review. *Appl Therm Eng* 100:267–284. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.11.041>
67. Kabeel AE, Omara ZM, Essa FA (2014) Enhancement of modified solar still integrated with external condenser using nanofluids: An experimental approach. *ENERGY Convers Manag* 78:493–498. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.11.013>
68. Bhandari, H.C., Mitra, A.K., Kumar S (2014) Development of desalination unit using solar still coupled with evacuated tubes for domestic use in rural areas. *Curr Sci* 107:1683–1693
69. Kumar R, Singh DB, Dewangan A, et al (2021) Performance of evacuated tube solar collector integrated solar desalination unit — a review. *Desalin Water Treat* 230:92–115. <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27463>
70. Firozuddin S, Aasim M, Ahmad N (2014) Single Basin Solar Still Performance with Evacuated Tubes Solar Collector. *J Mech Civ Eng* 64–70
71. Issa RJ, Chang B (2017) Performance Study on Evacuated Tubular Collector Coupled Solar Still in West Texas Climate. *Int J Green Energy* 14:793–800. <https://doi.org/10.1080/15435075.2017.1328422>
72. Liao J, Xie H, Wang J, et al (2024) Effect of operating conditions on the output performance of a compact TEG for low-grade geothermal energy utilization. *Appl Therm Eng* 236:121878. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121878>
73. Li G, Ji J, Song X, et al (2022) Research advances in multi-field coupling model for geothermal reservoir heat extraction. *Energy Rev* 1:100009. <https://doi.org/10.1016/j.enrev.2022.100009>
74. Gao T, Long X, Xie H, et al (2024) A review of advances and applications of geothermal energy extraction using a gravity-assisted heat pipe. *Geothermics* 116:102856. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2023.102856>
75. Barbier E (2002) Geothermal energy technology and current status: An overview. *Renew Sustain Energy Rev* 6:3–65. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(02\)00002-3](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(02)00002-3)
76. Abrasaldo PMB, Zarrouk SJ, Kempa-Liehr AW (2024) A systematic review of data analytics applications in above-ground geothermal energy operations. *Renew Sustain Energy Rev* 189:113998. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113998>
77. Tutua-Nathan T (1992) Maori tribal rights to ownership and control: the geothermal resource in New Zealand. *Appl Geogr* 12:192–198. [https://doi.org/10.1016/0143-6228\(92\)90007-A](https://doi.org/10.1016/0143-6228(92)90007-A)

78. Ascione F, Bellia L, Minichiello F (2011) Earth-to-air heat exchangers for Italian climates. *Renew Energy* 36:2177–2188. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.01.013>
79. Battaglia V, Vanoli L, Verde C, et al (2023) Dynamic modelling of geothermal heat pump system coupled with positive-energy building. *Energy* 284:128557. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128557>
80. Nouri M, Homae M (2021) Contribution of soil moisture variations to high temperatures over different climatic regimes. *Soil Tillage Res* 213:105115. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105115>
81. Wulfmeyer V, Turner DD, Baker B, et al (2018) A new research approach for observing and characterizing land-atmosphere feedback. *Bull Am Meteorol Soc* 99:1639–1667. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0009.1>
82. Sharma T, Singh S (2021) Influence of marble dust, bagasse ash and paddy straw fibers on the density and optimum water content of unfired soil block. *Mater Today Proc* 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.439>
83. Wahab A, Embong Z, Ahmad Tajudin SA, et al (2021) The electrokinetic stabilization (EKS) impact on soft soil (peat) stability towards its physical, mechanical and dynamic properties at Johor state, Peninsular Malaysia. *Phys Chem Earth* 123:. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2021.103028>
84. Zhang N, Wang Z (2017) Review of soil thermal conductivity and predictive models. *Int J Therm Sci* 117:172–183. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.03.013>
85. Kogut Z, Sergiel L (2021) The effect of roller pressure and share of plant matter in mulching soil cultivation on its density and water content. *J Terramechanics* 97:119–131. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2021.08.001>
86. Hatano R, Lipiec J (2004) Effects of land use and cultural practices on greenhouse gas fluxes in soil. *Acta Agrophysica* 6:60
87. Cao Y, Su Y, Huang G, Li Y (2021) Soil texture modulates the intensity of fertile islands through affecting the distribution of shrub fine roots. *J Arid Environ* 189:104503. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104503>
88. Mora JL, Lázaro R (2013) Evidence of a threshold in soil erodibility generating differences in vegetation development and resilience between two semiarid grasslands. *J Arid Environ* 89:57–66. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.10.005>
89. Zhang Y, Wang S, Gao Z, et al (2021) Contamination characteristics, source analysis and health risk assessment of heavy metals in the soil in Shi River Basin in China based on high density sampling. *Ecotoxicol Environ Saf* 227:112926. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112926>
90. Cao H, Chen J, Zhang J, et al (2010) Heavy metals in rice and garden vegetables and their potential health risks to inhabitants in the vicinity of an industrial zone in Jiangsu, China. *J Environ Sci* 22:1792–1799. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(09\)60321-1](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(09)60321-1)
91. Duan M, Zhang X (2021) Using remote sensing to identify soil types based on

- multiscale image texture features. *Comput Electron Agric* 187:106272.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106272>
92. Lal R (1993) Tillage effects on soil degradation, soil resilience, soil quality, and sustainability. *Soil Till Res* 27:1–8. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(93\)90059-X](https://doi.org/10.1016/0167-1987(93)90059-X)
 93. Crespo C, Wyngaard N, Sainz Rozas H, et al (2021) Effect of intensified cropping sequences on soil physical properties in contrasting environments. *Catena* 207:. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105690>
 94. Wright AL, Hons FM (2004) Soil Aggregation and Carbon and Nitrogen Storage under Soybean Cropping Sequences. *Soil Sci Soc Am J* 68:507–513.
<https://doi.org/10.2136/sssaj2004.5070>
 95. Romaniuk R, Beltrán M, Brutti L, et al (2018) Soil organic carbon, macro- and micronutrient changes in soil fractions with different lability in response to crop intensification. *Soil Tillage Res* 181:136–143.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2018.04.014>
 96. ClimSoil (2008) Final Report: Review of existing information on the interrelations between soil and climate change. [//ec.europa.eu/environment/soil/pdf](https://ec.europa.eu/environment/soil/pdf).
 97. Secco D, Bassegio D, Villa B de, et al (2021) Crambe oil yield and soil physical properties responses to no-tillage, cover crops and chiseling. *Ind Crops Prod* 161:1–7. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113174>
 98. Capowiez Y, Sammartino S, Keller T, Bottinelli N (2021) Decreased burrowing activity of endogeic earthworms and effects on water infiltration in response to an increase in soil bulk density. *Pedobiologia (Jena)* 85–86:..
<https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2021.150728>
 99. Hansen S (1996) Effects of manure treatment and soil compaction on plant production of a dairy farm system converting to organic farming practice. *Agric Ecosyst Environ* 56:173–186. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(95\)00646-X](https://doi.org/10.1016/0167-8809(95)00646-X)
 100. Håkansson I, Lipiec J (2000) A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil Tillage Res* 53:71–85
 101. Nawaz MF, Bourrié G, Trolard F (2013) Soil compaction impact and modelling. A review. *Agron Sustain Dev* 33:291–309. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0071-8>
 102. Pielke RA, Avissar R, Raupach M, et al (1998) Interactions between the atmosphere and terrestrial ecosystems: influence on weather and climate. *Glob Chang Biol* 4:461–475. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.1998.00176.x>
 103. Silva PF da, Lima JR de S, Antonino ACD, et al (2017) Seasonal patterns of carbon dioxide, water and energy fluxes over the Caatinga and grassland in the semi-arid region of Brazil. *J Arid Environ* 147:71–82.
<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2017.09.003>
 104. Wever LA, Flanagan LB, Carlson PJ (2002) Seasonal and interannual variation in evapotranspiration, energy balance and surface conductance in a northern temperate grassland. *Agric For Meteorol* 112:31–49.

[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(02\)00041-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00041-2)

105. Rao TVR, Silva BB, Moreira AA (2005) Soil thermal characteristics at Salvador, BA. *Rev Bras Eng Agrícola e Ambient* 9:.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1590/S1415-43662005000400018>
106. Bi J, Zhang M, Chen W, et al (2018) A new model to determine the thermal conductivity of fine-grained soils. *Int J Heat Mass Transf* 123:407–417.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.02.035>
107. He H (2017) Bhaviveka vs. candrananda. *Acta Orient* 70:1–20.
<https://doi.org/10.1556/062.2017.70.1.1>
108. Zhang T, Cai G, Liu S, Puppala AJ (2017) Investigation on thermal characteristics and prediction models of soils. *Int J Heat Mass Transf* 106:1074–1086. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.10.084>
109. He H, Zhao Y, Dyck MF, et al (2017) A modified normalized model for predicting effective soil thermal conductivity. *Acta Geotech* 12:1281–1300.
<https://doi.org/10.1007/s11440-017-0563-z>
110. Zhang M, Zhang X, Li S, et al (2015) Evaluating the cooling performance of crushed-rock interlayer embankments with unperforated and perforated ventilation ducts in permafrost regions. *Energy* 93:874–881.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.08.059>
111. Lai Y, Pei W, Zhang M, Zhou J (2014) Study on theory model of hydro-thermal-mechanical interaction process in saturated freezing silty soil. *Int J Heat Mass Transf* 78:805–819. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.07.035>
112. Jia GS, Tao ZY, Meng XZ, et al (2019) Review of effective thermal conductivity models of rock-soil for geothermal energy applications. *Geothermics* 77:1–11.
<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.08.001>
113. Silans AP, Silva FM, Barbosa FAR (2006) In Loco determination of the thermal diffusivity in a soil of the Caatinga region, Paraíba. *Rev Bras Ciência do Solo* 30:. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832006000100005>
114. Cuny M, Lin J, Siroux M, Fond C (2020) Influence of rainfall events on the energy performance of an earth-air heat exchanger embedded in a multilayered soil. *Renew Energy* 147:2664–2675.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.071>
115. Maciel Neto JDA (2011) Caracterização térmica de solos. Universidade Federal de Pernambuco
116. Tim LC (2004) Solo, Planta e Atmosfera: Conceitos, Processos e Aplicações, 1ª ed. Barueri
117. Reichardt K (1990) A água em sistemas agrícolas. São Paulo
118. Zhang T, Wang C jin, Liu S yu, et al (2020) Assessment of soil thermal conduction using artificial neural network models. *Cold Reg Sci Technol* 169:102907. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.102907>
119. Bansal V, Misra R, Agarwal G Das, Mathur J (2013) Transient effect of soil thermal conductivity and duration of operation on performance of Earth Air

- Tunnel Heat Exchanger. *Appl Energy* 103:1–11.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.10.014>
120. Bayat H, Ebrahimzadeh G, Mohanty BP (2021) Investigating the capability of estimating soil thermal conductivity using topographical attributes for the Southern Great Plains, USA. *Soil Tillage Res* 206:104811.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104811>
 121. Usowicz B, Łukowski MI, Rüdiger C, et al (2017) Thermal properties of soil in the Murrumbidgee River Catchment (Australia). *Int J Heat Mass Transf* 115:604–614. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.08.021>
 122. Ochsner TE, Horton R, Ren T (2001) A New Perspective on Soil Thermal Properties. *Soil Sci Soc Am J* 65:1641–1647.
<https://doi.org/10.2136/sssaj2001.1641>
 123. Malek K, Malek K, Khanmohammadi F (2021) Response of soil thermal conductivity to various soil properties. *Int Commun Heat Mass Transf* 127:105516. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105516>
 124. Mohanty BP, Skaggs TH (2001) Spatio-temporal evolution and time-stable characteristics of soil moisture within remote sensing footprints with varying soil, slope, and vegetation. *Adv Water Resour* 24:1051–1067.
[https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(01\)00034-3](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(01)00034-3)
 125. Liu Z, Xu J, Li X, Wang J (2018) Mechanisms of biochar effects on thermal properties of red soil in south China. *Geoderma* 323:41–51.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.02.045>
 126. Molina-Rodea R, Wong-Loya JA (2021) A new model to predict subsoil-thermal profiles based on seasonal rain conditions and soil properties. *Geothermics* 97:102261. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102261>
 127. Donde S, Maurya RS (2021) Characterizing soil's thermal property for earth air heat exchanger through experiment. *Mater Today Proc.*
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.311>
 128. Liu L, Cai G, Liu X (2020) Investigation of thermal conductivity and prediction model of recycled tire rubber-sand mixtures as lightweight backfill. *Constr Build Mater* 248:118657. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118657>
 129. Balland V, Arp PA (2005) Modeling soil thermal conductivities over a wide range of conditions. *J Environ Eng Sci* 4:549–558. <https://doi.org/10.1139/s05-007>
 130. EPA (1997) A short primer and environmental guidance for geothermal heat pumps. US Environ. Prot. Agency
 131. Lund JW, Toth AN (2021) Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review. *Geothermics* 90:101915.
<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101915>
 132. Zhu J, Hu K, Lu X, et al (2015) A review of geothermal energy resources, development, and applications in China: Current status and prospects. *Energy* 93:466–483. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.08.098>

133. Wang C, Fang H, Lu J, et al (2021) A two-step parameter estimation method for estimating soil thermal properties of coaxial ground heat exchangers. *Geothermics* 96:102229. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102229>
134. Jahanger ZK (2021) Evaluation of the thermal conductivity of middle part of Iraqi soil. *Mater Today Proc* 42:2431–2435. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.553>
135. Dong Y, McCartney JS, Lu N (2015) Critical Review of Thermal Conductivity Models for Unsaturated Soils. *Geotech Geol Eng* 33:207–221. <https://doi.org/10.1007/s10706-015-9843-2>
136. Shi Z, Muir Wood D, Huang M (2021) Interpreting temperature effects in soils using thermally-enhanced viscoplastic model. *Comput Geotech* 136:104208. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104208>
137. Brandl H (2006) Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Geotechnique* 56:81–122. <https://doi.org/10.1680/geot.2006.56.2.81>
138. Adam D, Markiewicz R (2009) Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers. *Geotechnique* 59:229–236. <https://doi.org/10.1680/geot.2009.59.3.229>
139. Dinh BH, Go GH, Kim YS (2021) Performance of a horizontal heat exchanger for ground heat pump system: Effects of groundwater level drop with soil–water thermal characteristics. *Appl Therm Eng* 195:. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117203>
140. Johnston IW, Narsilio GA, Colls S (2011) Emerging geothermal energy technologies. *KSCE J Civ Eng* 15:643–653. <https://doi.org/10.1007/s12205-011-0005-7>
141. Morais T da SO, Tsuha C de HC, Neto LAB, Singh RM (2020) Effects of seasonal variations on the thermal response of energy piles in an unsaturated Brazilian tropical soil. *Energy Build* 216:. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109971>
142. Lopes HL dos S (2014) *Sistemas Geotérmicos de Baixa Entalpia - Estudos de Caracterização Térmica*. Universidade Nova de Lisboa
143. Menaceur H, Cuisinier O, Masrouri F, Eslami H (2021) Impact of monotonic and cyclic suction variations on the thermal properties of a stabilized compacted silty soil. *Transp Geotech* 28:100515. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100515>
144. Mitchell JK, Soga K (2005) *Fundamentals of Soil Behavior*
145. Obia A, Cornelissen G, Martinsen V, et al (2020) Conservation tillage and biochar improve soil water content and moderate soil temperature in a tropical Acrisol. *Soil Tillage Res* 197:104521. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104521>
146. McCorry M *Geotrained Training Manual for Designers of Shallow Geothermal Systems*, Brussels:
147. Kim D, Oh S (2020) Measurement and comparison of thermal conductivity of porous materials using box, dual-needle, and single-needle probe methods-A case study. *Int Commun Heat Mass Transf* 118:104815.

<https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104815>

148. He H, Dyck M, Lv J (2020) A new model for predicting soil thermal conductivity from matric potential. *J Hydrol* 589:125167.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125167>
149. Du Y, Li R, Zhao L, et al (2020) Evaluation of 11 soil thermal conductivity schemes for the permafrost region of the central Qinghai-Tibet Plateau. *Catena* 193:104608. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104608>
150. Lu S, Ren T, Horton R (2020) Estimating the components of apparent thermal conductivity of soils at various water contents and temperatures. *Geoderma* 376:114530. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114530>
151. Yu M, Fan X, Walawwe Ranasinghe TSBKM, Wang L (2015) Effects of liquid morphology and distribution on the apparent properties of porous media made of stacked particles. *Adv Mech Eng* 7:1–9.
<https://doi.org/10.1177/1687814015586119>
152. Huang X, Chen X, Li A, et al (2019) Shape-stabilized phase change materials based on porous supports for thermal energy storage applications. *Chem Eng J* 356:641–661. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.09.013>
153. Xu X, Zhang W, Fan C, Li G (2020) Effects of temperature, dry density and water content on the thermal conductivity of Genhe silty clay. *Results Phys* 16:102830. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102830>
154. Wang Z, Zhang N, Ding J, et al (2020) Thermal conductivity of sands treated with microbially induced calcite precipitation (MICP) and model prediction. *Int J Heat Mass Transf* 147:. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118899>
155. Noborio K, McInnes KJ (1993) Thermal Conductivity of Salt-Affected Soils. *Soil Sci Soc Am J* 57:329–334.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1993.03615995005700020007x>
156. Abu-Hamdeh NH, Reeder RC (2000) Soil thermal conductivity effects of density, moisture, salt concentration, and organic matter. *Soil Sci Soc Am J* 64:1285–1290. <https://doi.org/https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6441285x>.
157. Rizvi ZH, Husain SMB, Haider H, Wuttke F (2019) Effective thermal conductivity of sands estimated by group method of data handling (GMDH). *Mater Today Proc* 26:2103–2107. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.454>
158. Kersten MS (1949) Laboratory research for the determination of the thermal properties of soils. Rep. DTIC Doc.
159. Wang J, Zhang X, Du L (2017) A laboratory study of the correlation between the thermal conductivity and electrical resistivity of soil. *J Appl Geophys* 145:12–16.
<https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.07.009>
160. Lu N, Dong Y (2015) Closed-Form Equation for Thermal Conductivity of Unsaturated Soils at Room Temperature. *J Geotech Geoenvironmental Eng* 141:04015016. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001295](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001295)
161. Kong D, Wan R, Chen J, et al (2020) Effect of gradation on the thermal conductivities of backfill materials of ground source heat pump based on loess

- and iron tailings. *Appl Therm Eng* 180:115814.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115814>
162. Zhang N, Zou H, Zhang L, et al (2020) A unified soil thermal conductivity model based on artificial neural network. *Int J Therm Sci* 155:106414.
<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2020.106414>
 163. Gao Y, Dong S, Wang C, et al (2020) Effect of thermal intensity and initial moisture content on heat and moisture transfer in unsaturated soil. *Sustain Cities Soc* 55:102069. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102069>
 164. Côté J, Konrad JM (2005) A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials. *Can Geotech J* 42:443–458.
<https://doi.org/10.1139/t04-106>
 165. Lu S, Ren T, Gong Y, Horton R (2007) An Improved Model for Predicting Soil Thermal Conductivity from Water Content at Room Temperature. *Soil Sci Soc Am J* 71:8–14. <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0041>
 166. Johansen O (1975) Thermal conductivity of soils. Trondheim, Norway
 167. Sakata Y, Katsura T, Nagano K (2020) Estimation of ground thermal conductivity through indicator kriging: Nation-scale application and vertical profile analysis in Japan. *Geothermics* 88:101881.
<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101881>
 168. João S (2021) São João. <http://www.saojoao.pe.gov.br/historia.php#main>
 169. EMBRAPA (2006) Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, Segunda ed. Centro Nacional de Pesquisa de Solos, Rio de Janeiro
 170. Maciel Neto JA, Antonino ACD, Lima JRS, et al (2015) Caracterização Térmica de Solos no Agreste Meridional do Estado de Pernambuco, Brasil. *Rev Bras Geogr Física* 08:167–178.
<https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.2.p855-869>
 171. Machado C, Lima J, Antonino A, et al (2015) Fluxos de água no consórcio milho-pastagem na microbacia hidrográfica do Rio Mundaú, Pernambuco. *Rev Bras Recur Hídricos* 20:731–740. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v20n3.p731-740>
 172. Farahani SD, Farahani AD (2024) Machine learning models for predicting the performance of solar-geothermal desalination in different meteorological conditions. *Ain Shams Eng J* 15:102591.
<https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102591>
 173. El-Agouz SA, Abd El-Aziz GB, Awad AM (2014) Solar desalination system using spray evaporation. *Energy* 76:276–283.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.08.009>
 174. Fath HES, El-Samanoudy M, Fahmy K, Hassabou A (2003) Thermal-economic analysis and comparison between pyramid-shaped and single-slope solar still configurations. *Desalination* 159:69–79. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(03\)90046-4](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(03)90046-4)
 175. Gude VG, Nirmalakhandan N, Deng S, Maganti A (2012) Low temperature desalination using solar collectors augmented by thermal energy storage. *Appl*

- Energy 91:466–474. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.10.018>
176. DUFFIE, J. A.; BECKMAN WA (2013) Solar Engineering of Thermal Processes. Willey
 177. Alwaer A, Gryzagoridis J (2015) Experimental study of a solar water desalination system utilizing evacuated tube heat pipe collector. Proc 23rd Conf Domest Use Energy, DUE 2015 155–162. <https://doi.org/10.1109/DUE.2015.7102976>
 178. Liu X, Chen W, Shen S, et al (2013) The research on thermal and economic performance of solar desalination system with evacuated tube collectors. Desalin Water Treat 51:3728–3734. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.794765>
 179. Prajapati M, Shah M, Soni B (2021) A review of geothermal integrated desalination: A sustainable solution to overcome potential freshwater shortages. J Clean Prod 326:129412. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129412>
 180. Yadav K, Gudjonsdottir M, Axelsson G, et al (2023) Geothermal-solar integrated Multistage Flash Distillation Cogeneration system: A cleaner and sustainable solution. Desalination 566:.. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.116897>