

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA DA USP
PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA

ROGER FELIPE MICHEL

**ENERGIA SOLAR EM SISTEMA DE AQUECIMENTO HÍBRIDO
COMPARTILHADO BANHO E BANHEIRA**

SÃO PAULO - SP

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

MICHEL, ROGER FELIPE

ENERGIA SOLAR EM SISTEMA DE AQUECIMENTO HÍBRIDO
COMPARTILHADO BANHO E BANHEIRA / R. F. MICHEL -- São Paulo,
2018.79 p.

Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração
Distribuída e Eficiência Energética) - Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo. PECE – Programa de Educação
Continuada em Engenharia.

1.ENERGIA TÉRMICA 2.AQUECIMENTO DE ÁGUA 3.ENERGIA
SOLAR I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. PECE –
Programa de Educação Continuada em Engenharia II.t.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA DA USP
PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA

ROGER FELIPE MICHEL

**ENERGIA SOLAR EM SISTEMA DE AQUECIMENTO HÍBRIDO
COMPARTILHADO BANHO E BANHEIRA**

Monografia apresentada ao
Programa de Educação Continuada
da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Especialista
em Energias Renováveis, Geração
Distribuída e Eficiência Energética.

Orientador: Prof. Daniel Setrak
Sowmy

SÃO PAULO - SP

2018

RESUMO

O presente estudo teve como objetivo demonstrar a viabilidade do uso da energia solar em Sistemas de Aquecimento de Água Solar (SAS) prioritariamente para o banho e secundário no aquecimento de banheira recreativa (SPA). O arranjo concebido tira proveito do excedente de energia solar produzido pelo sistema através de coletores solares evacuados direcionando-o para o aquecimento de banheira.

Neste estudo foram analisados a performance do sistema híbrido térmico solar e gás com a utilização de coletores de tubos a vácuo e apoio a gás através de aquecedores de passagem.

Para avaliar a viabilidade técnica, foi analisada a demanda de energia térmica, além das características operacionais desse sistema.

Encontram-se também o cálculo do rendimento solar e análise de custos econômicos de uma instalação existente em operação do sistema na região da cidade de São Paulo; cálculo da fração solar através do cálculo da carta F; cálculo do custo da queima do gás para complementação da energia necessária de manutenção do sistema; e análise do ganho econômico em comparação ao sistema de aquecimento unicamente a gás.

Os resultados alcançados apontaram as vantagens na utilização da energia solar em residências para aquecimento de água de banhos como também para o uso recreativo.

Palavras-chave: energia solar, térmico, aquecimento de água.

ABSTRACT

The present study aimed to demonstrate the feasibility of using solar energy in Solar Water Heating Systems (SAS) primarily for bathing and secondary heating in recreational baths (SPA). The designed arrangement takes advantage of the surplus of solar energy produced by the system through solar collectors evacuated directing towards the heating of bathtub.

In this study, the performance of the solar thermal and gas hybrid system was analyzed with the use of evacuated tube collectors and gas support through indirect circuit heaters with the use of heat exchangers and diverter valves.

In order to evaluate the technical feasibility, it was analyzed the electric and thermal energy demand, besides the operational characteristics of this system.

There is also the calculation of the solar yield and analysis of economic costs of an existing installation in operation of the system in the region of the city of São Paulo; calculation of the solar fraction by calculating the method F-Chart; calculation of the cost of burning the gas to complement the energy required to maintain the system; and analysis of the economic gain compared to the gas-only heating system.

The results showed the advantages in the use of solar energy in homes for heating bath water as well as for recreational use.

Key words: solar energy, thermic, water heating.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 : Espectro visível ao Homem	31
Figura 2 - Ânguls declinação (δ), horário (ω) e latitude (ϕ).....	33
Figura 3: Variação da declinação solar (δ).....	34
Figura 4:Sistema solar por termosifão20	
Figura 5: SAS, circulação forçada.....	37
Figura 6: Configuração básica SAS	38
Figura 7:Exemplo de coletor solar tubo a vácuo	39
Figura 8 Tubo a vácuo.....	40
Figura 9: Reservatório térmico.....	41
Figura 10: Bomba de circulação solar Rowa 5/1S sanitária.....	43
Figura 11: Fachada da edificação após a conclusão das obras.....	51
Figura 12: Piscina e Spa	53
Figura 13: Detalhe banheira recreativa SPA.	53
.....	55
Figura 15:Coletores solares planos abertos utilizados para o aquecimento da piscina.....	56
Figura 16: Reservatórios térmicos do sistema de aquecimento de banhos	57
Figura 17: Coletor tubo a vácuo	58
Figura 18: Bombas de circulação e recirculação SAS	59
Figura 19: Fluxograma método Carta F.	60
Figura 20: Laje de cobertura da edificação	61
Figura 21: Diagrama de equipamentos SAS híbrido.....	63
Figura 22: Ducha Deca CT1990.....	65
Figura 23: Curva de vazão ducha Deca.....	66
Figura 24: Circuito de recirculação de água quente	68
Figura 25: Figura ilustrativa da tabela de consumo eficiência energética 56	
Figura 26: Local de instalação dos coletores solares tubo a vácuo57	

Figura 27: Reservatórios térmicos instalados.....	76
Figura 28: Irradiação solar no plano inclinado próximo a instalação	79
Figura 29: Trocador de calor e controlador de temperatura	82
Figura 30: Válvula 3 vias.	83
Figura 31: Trocador calor placas brasadas	85
Figura 32: Motobomba marca Jacuzzi modelo 5A-M.....	85
Figura 33: Fluxo de entrada e saída no trocador de calor	86
Figura 34: Gráfico da relação potência térmica pela temperatura.....	87
Figura 35: Custos de implantação do SAS71	
Figura 36: Fluxo de caixa acumulado	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Os dez países com maior número de instalações solares com acumuladores.....	18
Tabela 2: Faixa de parâmetros Carta F.....	34
Tabela 3: Características da edificação	38
Tabela 4: Dados da banheira SPA.....	40
Tabela 5: Coordenadas de localização da edificação	48
Tabela 6: Consumo de aparelhos sanitários	52
Tabela 7: Volume retido.....	54
Tabela 8: Dados do coletor solar tubo a vácuo	61
Tabela 9: Médias de temperaturas mensais.....	64
Tabela 10: Faixas de temperatura de piscinas	72
Tabela 11: Demanda mensal energética.....	77
Tabela 12: Fluxo de caixa	79
Tabela 13: Resultados de retorno do investimento	79

LISTA DE SÍMBOLOS

A_c	Área do coletor [m^2]
$\mathcal{C}$	A Custo dos itens do SAS instalado dependentes da área de coletor [$\$/m^2$]
C_E	Custo dos itens do SAS instalado independentes da área de coletor [$\$$]
C_p	Calor específico da água igual a 4,18 [$kJ/kg\ ^\circ C$]
C_S	Custo total do sistema de aquecimento solar instalado [$\$$]
$E_{\text{útil}}$	Demanda de energia útil diária [kWh/dia]
F	Fração solar mensal (parcela da necessidade energética atendida pelo sistema de aquecimento solar)
$\mathcal{F}$	Fração solar anual
F_R	Fator de eficiência de troca de calor do coletor
F'_R	Fator de eficiência de troca de calor do coletor até o reservatório
$Fr(\zeta\alpha)_n$	Coeficiente de eficiência do coletor conforme tabelado pelo INMETRO
$freq_{\text{uso}}$	Número total de utilizações do ponto de água quente por dia
L	Demanda energética mensal de aquecimento de água [J] Radiação total diária (direta + difusa) [kWh/m^2]
$\overline{H_T}$	Média mensal da radiação diária incidente na superfície inclinada do coletor por unidade de área [J/m^2]
N	Dias no mês
Q_{pu}	Vazão do ponto de utilização de água quente [m^3/s]
T_{ref}	Temperatura de referência [$^\circ C$]
T_{med}	Temperatura média mensal ambiente [$^\circ C$]
T_{aa}	Temperatura média anual ambiente [$^\circ C$]
T_{arm}	Temperatura de armazenamento no reservatório térmico [$^\circ C$]
T_{cons}	Temperatura de consumo da água[$^\circ C$]

T_m	Temperatura de entrada no sistema da água, ou seja, a temperatura da rede [°C]
t_u	Tempo médio de uso diário do ponto de água quente [s]
T_w	Temperatura mínima aceitável da água quente [°C]
U_L	Coefficiente geral de perda do coletor [W/m ² °C]
U_S	Coefficiente de perda de calor do reservatório [W/°C]
V_{cons}	Volume de consumo diário [m ³]
V_R	Volume de armazenamento do reservatório térmico [m ³]
X	Adimensional do método Carta f proporcional à relação entre as perdas térmicas em relação à demanda energética
X_{c1}	adimensional X corrigido para adaptá-lo à instalação de aquecimento exclusivo de água no método da Carta f
X_{c2}	adimensional X corrigido para adaptá-lo à volume de reservatório com relação diferente de volume de 75 L/m ² de área coletora no método da Carta f
Y	Adimensional do método da Carta f proporcional à razão da absorção solar em relação à demanda térmica

SÍMBOLOS GREGOS

β	Inclinação do coletor solar em relação ao plano horizontal [°]
δ	Ângulo de declinação [°]
γ □ ao norte	Ângulo azimutal de orientação dos coletores solares em relação geográfico [°]
θ_z	Ângulo zenital [°]
ρ	Massa específica da água igual a 1.000 [kg/m ³]
ω	Ângulo horário solar [°]

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
NBR	Norma Brasileira
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
SAS	Sistema de aquecimento solar
TMY	<i>Typical meteorological year</i>

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	14
1.1 Justificativa	14
1.2 Objetivos	14
2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 Energia Solar	15
2.2 Radiação solar	17
2.3 SAS – Sistema de Aquecimento Solar (SAS)	20
2.3.1 Configuração básica	20
2.3.2 O coletor Solar de Tubo a vácuo	23
2.3.3 O reservatório térmico	25
2.3.4 Bomba de circulação – Circulação forçada	27
2.4 Norma NBR 15569	28
2.4.1 Metodologia de cálculo	29
3 O SISTEMA HÍBRIDO SOLAR COMPARTILHADO ESTUDO DE CASO RESIDÊNCIA UNIFAMILIAR	34
3.1. Demanda de água quente	35
3.1.1. A Edificação	35
3.1.2 Fluxograma do método Carta F	43
3.1.3 Localização da edificação	44
	45
3.1.4 Esquema e funcionamento da instalação SAS Híbrido	45
	46
3.1.5 Demanda de água quente de banho	48
3.1.6 Demanda de energia	53
3.1.7 Parâmetros de eficiência dos coletores solares	55
3.1.8 Escolha do coletor solar	57
3.1.9 Escolha do reservatório térmico	59
3.2 Temperatura média mensal no local	60

3.2.1 Radiação solar no plano inclinado62

3.2.2 Cálculo da Fração Solar Anual 63

3.2.3 A banheira recreativa – SPA66

3.2.4 Análise de custo de implantação70

4 CONCLUSÃO76

5 REFERÊNCIAS77

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA

Desde que a energia elétrica foi “descoberta”, a humanidade presenciou, e ainda presencia, mudanças nas áreas científicas, tecnológicas, econômicas e sociais. Ao mesmo tempo em que elas se mostram benéficas para o desenvolvimento humano, há um lado em que por muito tempo não houve preocupação em preservar e poupar recursos naturais imprescindíveis para a geração de energia, trazendo consequências ao mundo atual.

Um dos maiores desastres é o aquecimento global, causado pela emissão excessiva de gases poluentes na atmosfera, modificando diretamente o clima e, conseqüentemente, trazendo problemas, como o abastecimento de água nas cidades¹. Diante deste cenário, o mundo passou a buscar alternativas sustentáveis, com menor impacto ambiental e pensando no uso eficiente dos recursos naturais. Neste cenário, as energias renováveis ganham espaço, pois buscam suprir essa nova necessidade. Dentre elas, pode-se dar lugar de destaque a energia solar.

No Brasil a energia elétrica produzida prove das usinas hidrelétricas, seguidas posteriormente por termoeletricas e finalmente nucleares.

Diante do cenário atual do setor energético brasileiro onde a escassez de recursos hídricos repercute diretamente no custo da energia elétrica com o despacho sistemático das centrais térmicas, a adoção de fontes renováveis, dentre elas a energia solar, passa a ser uma necessidade no suprimento de energia elétrica e térmica para o uso residencial.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho visou demonstrar a viabilidade do uso da energia solar em Sistemas de Aquecimento de Água Solar (SAS) prioritariamente para o banho e secundário no aquecimento de banheira recreativa (SPA).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Energia Solar

A energia solar é uma das alternativas energéticas mais promissoras para os desafios deste milênio. A rigor, a energia proveniente do Sol não é renovável, mas uma fonte inesgotável levando em consideração a escala de tempo da vida no planeta Terra.

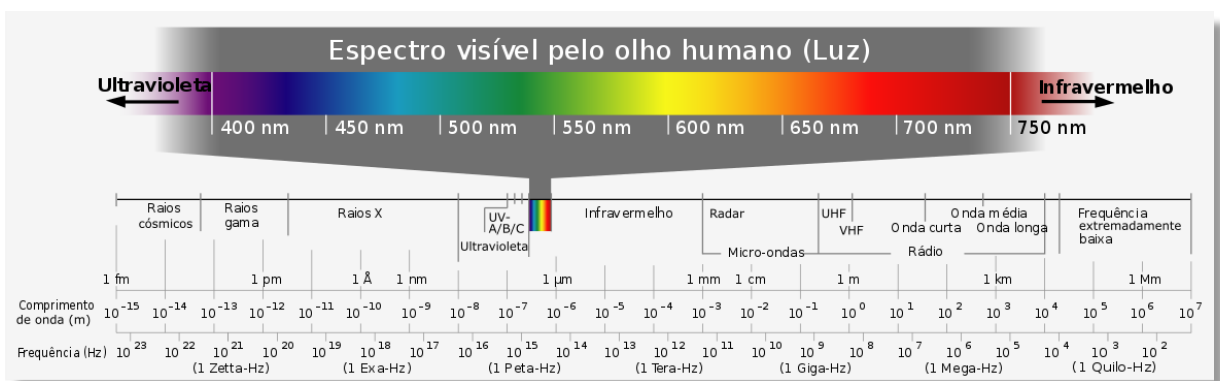


Figura 1 : Espectro visível ao Homem. Fonte: Wikipedia - Horst Frank, with some modifications by Jailbird. - Obra derivada de imageElectromagnetic_spectrum-es.svg, 1539, 5 May 2011., CC

A energia irradiada pelo Sol cobre uma ampla faixa do espectro eletromagnético, conforme a figura 1. Cerca de 81 % da energia que chega ao Sistema Terra/Atmosfera está em uma faixa de comprimento de onda que vai do invisível ao infravermelho próximo. Esta energia alimenta todos os processos térmicos, dinâmicos e químicos, sejam naturais ou artificiais.(PEREIRA, 2018)

A utilização da energia solar para o aquecimento de residências ou mesmo no uso industrial apresentaram grandes avanços tecnológicos nas últimas décadas com emprego de novas técnicas de produção e materiais. Estas técnicas permitiram o aumento da eficiência e melhor aproveitamento da energia absorvida e consequentemente ao sucesso das instalações reduzindo custos e difundindo o uso de sistemas de aquecimento solar.

Segundo o relatório “Solar-Heat-Worldwide-2018” da Agência Internacional de Energia de 2018²; até o final de 2016, uma capacidade instalada de 457 GWth (térmicos) correspondendo a um total de 653 milhões de metros quadrados de área de coletores estava em operação nos 66

países registrados. Esses números incluem coletores de água não vitrificados, coletores de placas planas, coletores de tubos evacuados e coletores de ar não vitrificados e envidraçados.

Com uma participação global de 71,6%, os coletores de tubo evacuados foram a tecnologia predominante de coletores solares térmicos, seguidos por coletores de placas planas com 22,1%, coletores de água não vitrificada com 6,1% e coletores de ar vidrados e não vitrificados com 0,3%.

O Brasil possui posição de destaque na utilização da energia solar térmica principalmente para o aquecimento de banhos em residências unifamiliares, onde predomina baixo LCOH (Custo nivelado do calor gerado por energia solar térmica).

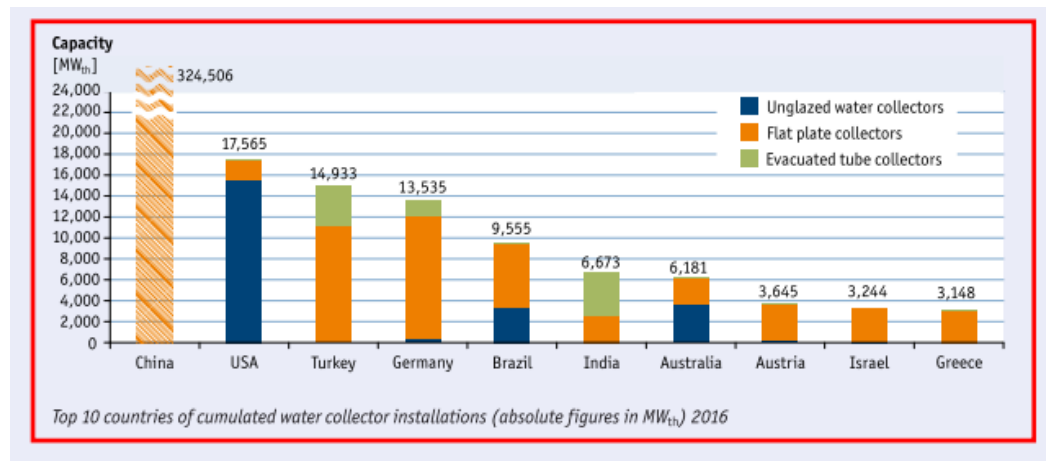


Tabela 1: Tabela 1: Os dez países com maior número de instalações solares com acumuladores. Fonte: Solar-Head-WorldWide-2018

Para aplicações domésticas, a faixa mais baixa de LCOH está entre 2 – 4 ¢-ct / kWh para sistemas de água quente em termosifão (Brasil, Índia, Turquia) e 7 – 8 ¢-ct / kWh para sistemas de água quente bombeado (Austrália, China).

Para sistemas bombeados maiores em casas multifamiliares, o LCOH é mais baixo no Brasil e na Índia (2 – 3 ¢-ct / kWh).

Pequenos sistemas combinados de água quente e aquecimento ambiente são os mais baratos no Brasil (3 ¢ - ct / kWh).

2.2 Radiação solar

Temos o Sol como a principal fonte de energia inesgotável disponível em nosso planeta. A disponibilidade do recurso energético solar e sua variabilidade espacial e temporal são intrinsecamente relacionadas a conceitos astronômicos. A energia que chega em determinado ponto do planeta Terra depende de inúmeras variáveis, mas o primeiro fator refere-se a posição relativa entre o Sol e a Terra. A Terra órbita o Sol a uma distância média de 150 milhões de quilômetros, completando seu ciclo de translação a cada 365,25 dias solares. Como a órbita que a Terra descreve em seu movimento de translação tem formato de elipse variando sua distância entre $1,47 \cdot 10^8$ km e $1,52 \cdot 10^8$ km, o fluxo de radiação solar oscila entre 1.366 W/m^2 e 1.412 W/m^2 .

A quantidade de energia incidente em qualquer ponto do globo varia em decorrência do tempo, no ciclo anual devido a inclinação do eixo axial da terra em $23,45^\circ$ em relação ao plano de órbita em volta do Sol, desta forma há uma variação da duração do dia no curso anual. A variação diária se deve ao movimento de rotação da terra em torno de seu eixo.

Para melhor aproveitamento desta energia devemos conhecer a sua localização geográfica em relação ao globo terrestre. Os principais parâmetros para cálculo do potencial solar em determinada instalação são: a constante solar, cujo valor é de $G_{sc}=1.367 \text{ W/m}^2$, os ângulos de latitude (ϕ), declinação solar (δ) e horário (ω)³. Figura 2.

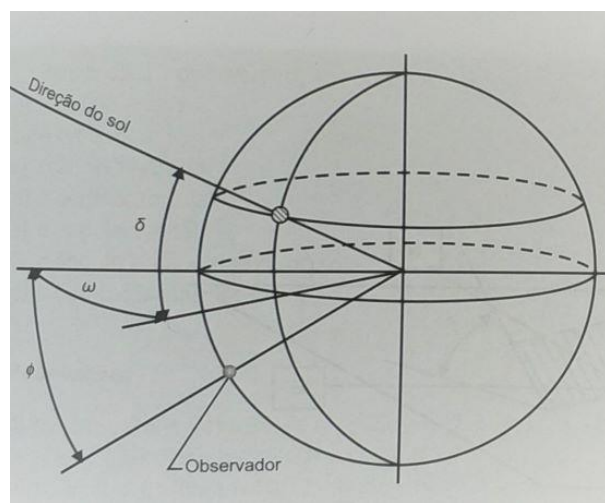


Figura 2 - Ângulos declinação (δ), horário (ω) e latitude (ϕ). Fonte: Energias Renováveis, Geração distribuída e Eficiência Energética

A declinação solar (δ) é o ângulo formado pela inclinação do plano equatorial da Terra e a linha de direção Sol-Terra, a qual apresenta variação entre $23^{\circ},27'$ e $+23^{\circ},27'$, como convenção adota-se valores positivos acima da linha do equador (hemisfério norte) e negativos abaixo da linha do equador (hemisfério sul). Figura 3.

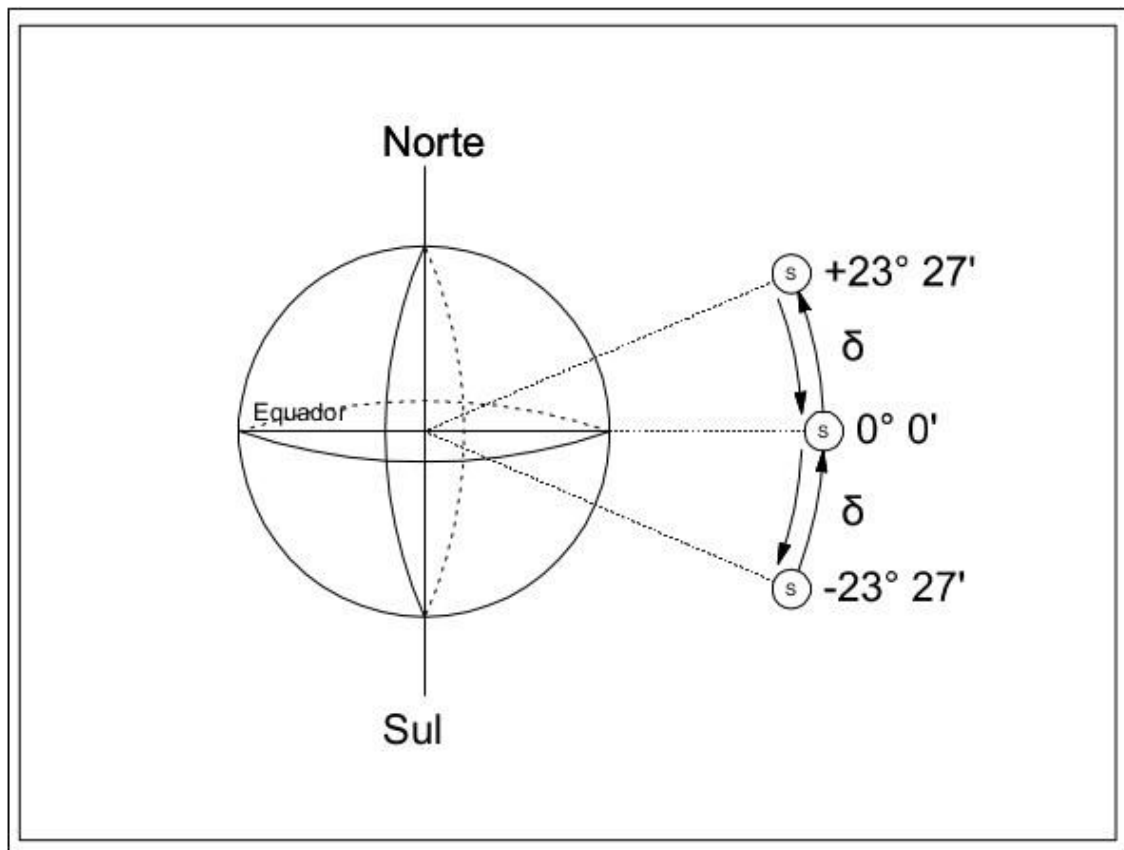


Figura 3: Variação da declinação solar (δ). Fonte: produzido pelo autor

O ângulo horário solar (ω) representa o deslocamento angular do movimento aparente do Sol devido a rotação da Terra, variando de -180° a $+180^{\circ}$, sendo positivo durante a manhã, zero ao meio dia e negativo ao entardecer.

A latitude (ϕ) é o ângulo de vértice no centro da Terra, formado pela semirreta com direção do ponto considerado e plano do Equador, por convenção é positivo no Hemisfério Norte e negativo no Hemisfério Sul.

Além dos fatores astronômicos e geográficos a intensidade da radiação solar até o ponto de captação pelos coletores solares será atenuada devido a transição através da atmosfera terrestre. Nesta transição a radiação solar sofre absorção e espalhamento através dos gases atmosféricos e aerossóis. Os processos físicos de absorção atenuam a irradiância solar fazendo que seu valor máximo atinja aproximadamente 1.000W/m^2 , em condições de nebulosidade parcial poderá atingir por curtos períodos de tempo valores e até 1.4000 W/m^2 devido ao espalhamento das bordas das nuvens.

Esta energia pode ser capturada através de coletores solares e direcionada para o aquecimento de água de uso residencial, comercial e industrial. No caso de residências esta energia pode ser armazenada em reservatórios térmicos cujo fluído é a água, que posteriormente será utilizada no banho.

2.3 SAS – Sistema de Aquecimento Solar (SAS)

2.3.1 Configuração básica

O sistema de aquecimento de água solar (SAS) tem como finalidade principal o aquecimento de fluido água; possui como itens básicos o coletor solar, o reservatório térmico, circuito hidráulico, bomba de circulação, dispositivos de segurança e sistema de apoio.

O SAS pode ser dividido em duas categorias referentes a circulação da água nos coletores sendo, por termossifão ou por circulação forçada.

A circulação de água por termossifão, consiste na movimentação da água de forma espontânea através de força motriz oriunda da diferença de densidade da variação de temperatura do fluido (água). Neste tipo de aplicação deve-se respeitar a cota mínima de altura de 30cm (Pró-sol - <http://www.prosol solar.com.br/manuais/Manual-Banho.pdf>) entre a base do reservatório e o topo do coletor solar, a fim de que implemente o efeito de termossifão FIG4.

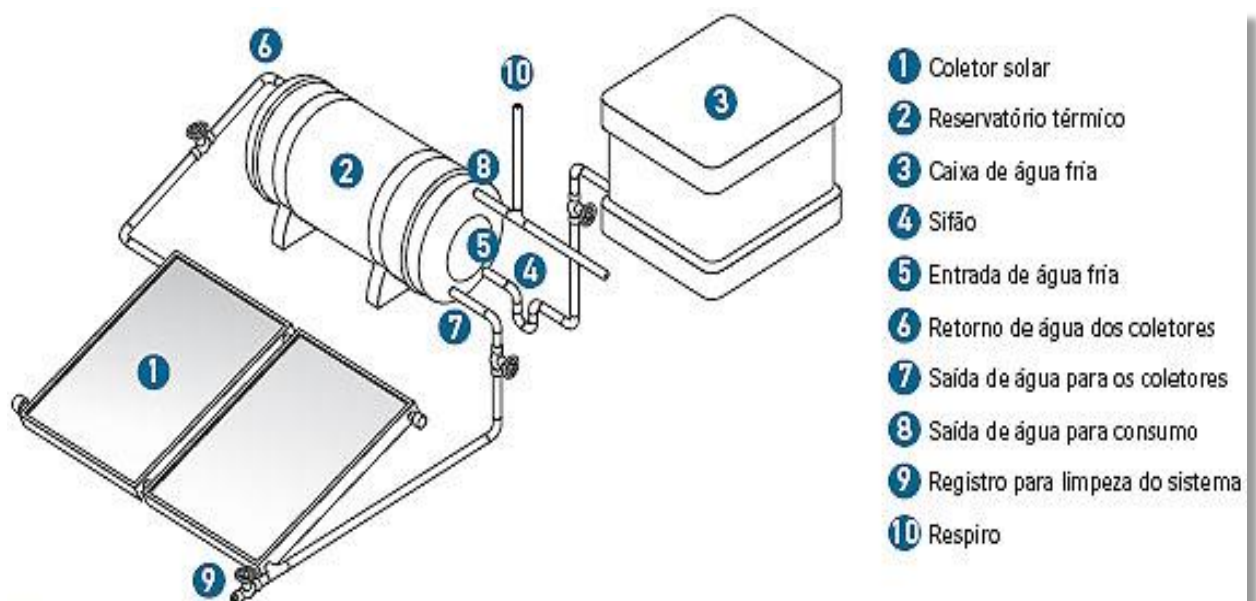


Figura 1 – Componentes básicos de sistema solar de aquecimento de água

Figura 4: Sistema solar por termossifão. Fonte: Técnica17

O maior ganho deste tipo de configuração se dá na ausência de motobomba externa para circulação do fluido do coletor ao reservatório, menor custo de instalação e manutenção. Como limitação existe a limitação da locação do reservatório, deve estar acima do coletor, limitação de números de coletores, distância máxima de tubulações devido as perdas hidráulicas e poder operar somente em baixas pressões 50kPa.

Segundo Sprenger⁸ (2007), para que haja circulação por termossifão os coletores solares devem estar instalados em cota mínima de 30 cm em relação a base do reservatório térmico. Para que o sistema opere de forma satisfatória a distância máxima do circuito hidráulico não poderá ultrapassar 5 metros devido as perdas hidráulicas impostas.

Como circulação forçada de água intende-se a imposição externa de pressão no circuito hidráulico (utilização de motobomba). Este tipo de instalação tem vantagens quanto ao volume de água quente produzido, pode ser utilizado por um número maior de coletores solares interligados em série e paralelo; não há limitação quanto a localização dos reservatórios térmicos em relação a cota de altura dos coletores; pode operar em baixa 40kPa e alta pressão 400kPa.

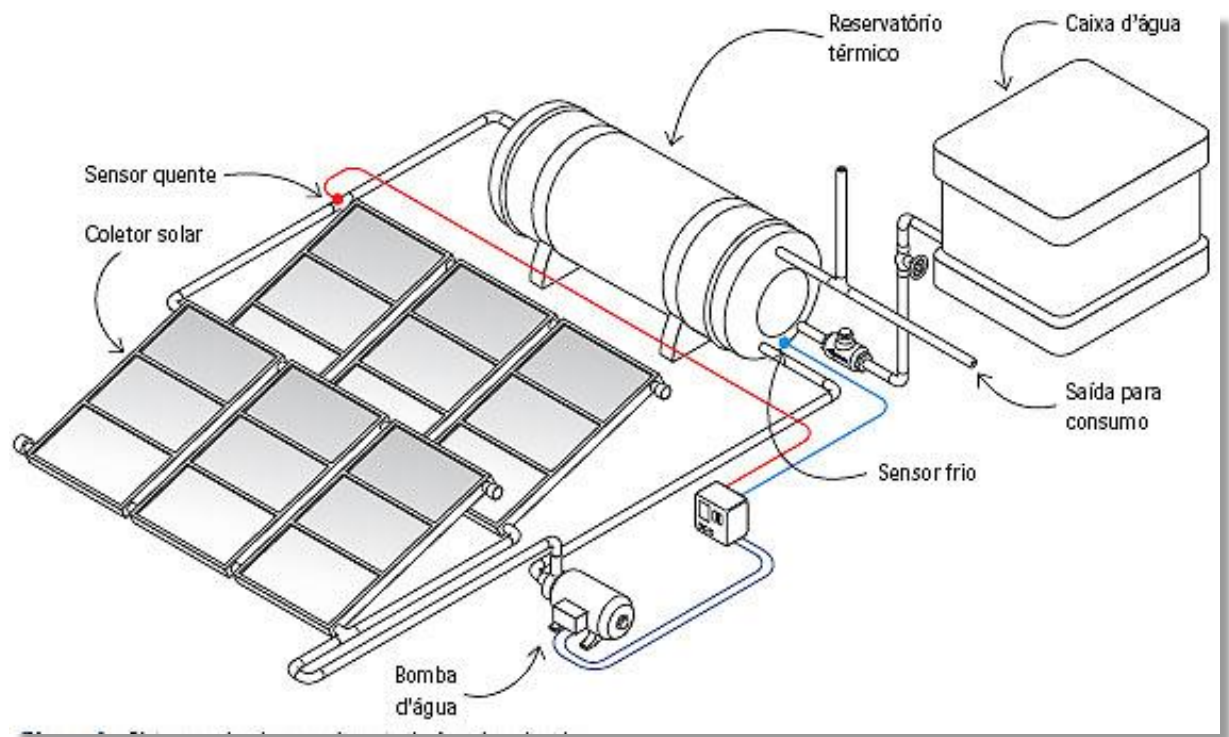


Figura 5: SAS, circulação forçada. Fonte: Techne17

Como desvantagens apresenta maior custo de instalação e manutenção, necessidade de instalação de proteções de sobre pressão e pressão negativa; painel de comando com diferencial de temperatura para acionamento de motobomba.

Em ambos os casos recomenda-se adotar sistema de apoio para a reposição de água quente para complementar a demanda energética para o perfil de consumo previsto. Este sistema poderá ser elétrico através de resistência blindada instalada no interior do reservatório, ou qualquer outra fonte térmica externa como aquecedores de passagem a gás, bombas de calor entre outros.

A figura 6 representa uma instalação típica com a utilização de coletor de tubo a vácuo em circulação forçada em regime de acumulação (reservatório térmico) e alívio de pressão através de conjunto de válvulas.

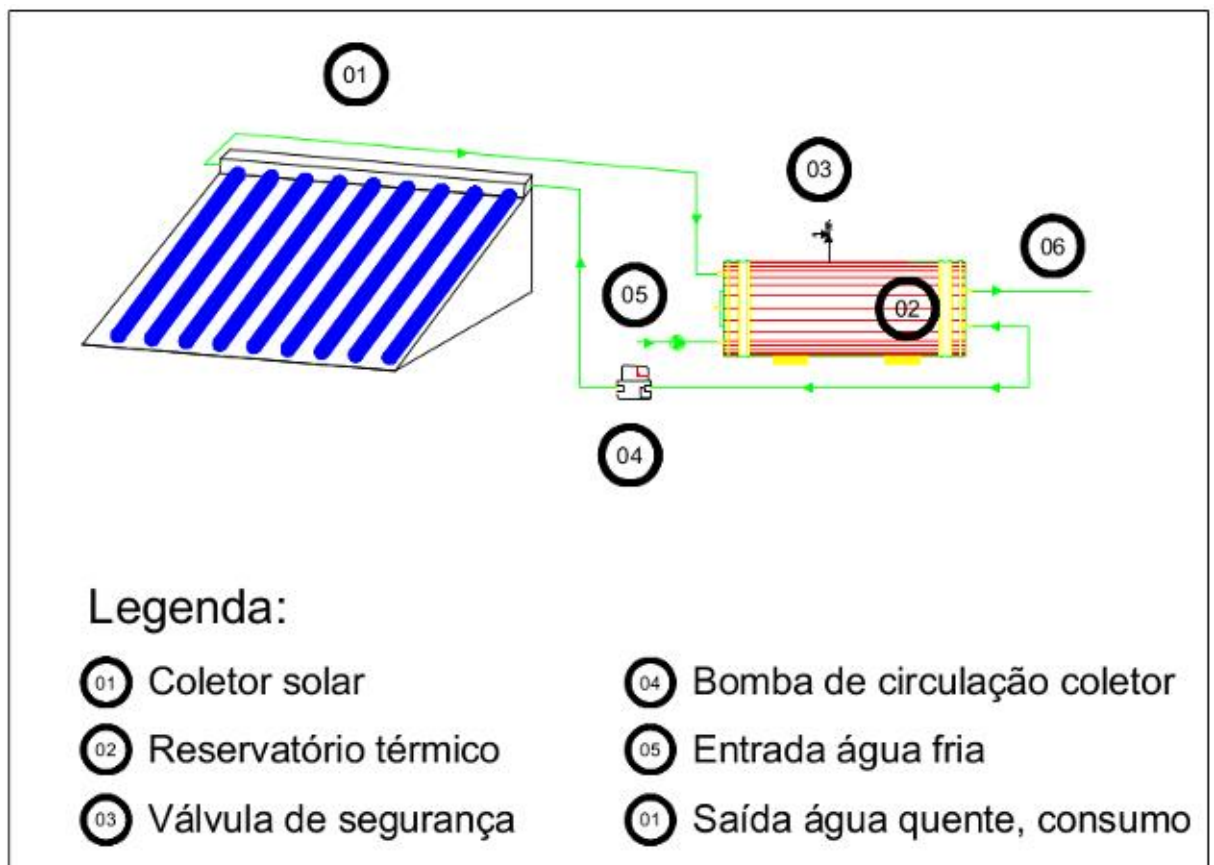


Figura 6: Configuração básica SAS. Fonte: Produzido pelo autor

2.3.2 O coletor Solar de Tubo a vácuo

O coletor solar é um dispositivo projetado para absorver a radiação solar e transferir a energia térmica produzida para um fluido que passa pelo equipamento⁴.

Existem várias formas construtivas para os coletores solares, entre eles coletores planos fechados, coletores planos abertos e coletores de tubos evacuados. Este estudo utiliza os coletores evacuados, comumente chamados de tubos a vácuo.

Este coletor se diferencia dos coletores planos por possuir várias linhas de tubos paralelos de vidro evacuados conectados a uma caixa coletora Figura 7.



Figura 7:Exemplo de coletor solar tubo a vácuo. Fonte:Shivshaktisolar.com

Cada tubo a vácuo é constituído por dois tubos concêntricos evacuados entre eles feitos do vidro de borosilicato extremamente forte. O tubo exterior é transparente e permite que a luz solar passe completamente com reflexão mínima. No tubo interno há um revestimento de alumínio e nitreto (Al-N/Al). Esta superfície seletiva é excelente absorvente em radiação solar com perdas mínimas de reflexão.

Durante o processo de manufatura, o ar contido no espaço entre as duas camadas de vidro é bombeado para fora quando a parte superior dos tubos é exposta às altas temperaturas. Isto funde os dois tubos em um único tubo evacuado. Figura 8.



Figura 8: Tubo a vácuo. Fonte: Hi-Min Solar

Esta “evacuação” do gás dá forma a um vácuo, motivo pelo qual se consegue elevado desempenho. Este arranjo permite absorver a irradiação solar, transmiti-la ao fluído interno, com mínimas perdas devido à presença de vácuo entre as paredes.

2.3.3 O reservatório térmico

Devido ao fator da variação da radiação Solar, os coletores solares são conectados a reservatórios termicamente isolados para armazenagem da água por eles aquecida, comumente chamados “*boilers*”, cujo significado da língua inglesa é caldeira⁶.

Segundo a ABNT, NBR10185:2013⁷, o reservatório térmico é o conjunto constituído por um tanque e demais componentes destinados ao armazenamento de energia térmica. São consideradas partes do reservatório térmico: fluído de trabalho, tanque, isolamento térmico e, desde que integrados ao próprio reservatório, dispositivos como trocadores de calor, sistema de controle de escoamento (válvulas chicanas) e sistemas de aquecimento auxiliar (elétrico e gás).

O reservatório térmico solar é provido de resistência elétrica blindada ligada a termostato bi-metálico ou a controlador de temperatura digital. A função é complementar ao aquecimento do fluído, ou seja, dar apoio ao aquecimento da água na falta de troca térmica entre os coletores solares e o reservatório. Figura 9.



Figura 9: Reservatório térmico. Fonte: Nadin Indústria de Aquecedores

Os reservatórios térmicos são divididos em dois grupos, sendo eles de baixa pressão até 40 kPa e os de alta pressão 400 kPa. Os reservatórios em baixa pressão são comumente utilizados em sistemas que operam em termossifão, já os de alta pressão são comumente utilizados no circuito de circulação forçada e pressurizados, onde a entrada de água de abastecimento do reservatório é interligada a motobomba pressurizadora, cuja função é manter o circuito em pressões mais elevadas tanto para a água fria como para a água quente.

2.3.4 Bomba de circulação – Circulação forçada

Nos sistemas de circuito forçado que utilizam reservatórios de alta pressão o bombeamento entre os coletores solares e o reservatório se dá através de motobomba hidráulica. Estes equipamentos devem ser capazes de operar a temperaturas de até 110°C.



Figura 10: Bomba de circulação solar Rowa 5/1S sanitária. Fonte: Rowa do Brasil

A utilização de sistemas solar de alta pressão apresenta vantagens, como melhor flexibilidade no local de instalação, pois não há necessidade de respeitar a cota mínima da base do reservatório; além de permitir que o sistema possa ser pressurizado na entrada de água fria, aumentando a qualidade do banho.

2.4 Norma NBR 15569

A norma ABNT (2008)⁹ estabelece as diretrizes para os sistemas de aquecimento solar de água (SAS) em circuito direto, visando os aspectos de concepção, dimensionamento, arranjo hidráulico, instalação e manutenção.

Esta norma é destinada a sistemas com coletores planos, com ou sem reservatórios térmicos e eventualmente com o uso de sistemas auxiliares. Esta norma não inclui o dimensionamento de sistema de aquecimento solar para piscinas ou em circuitos indiretos.

São detalhados na norma os diversos itens que compõem o sistema de aquecimento solar (SAS), bem como as diretrizes de projetos, segurança e proteção.

Em seu item 9.1 trata do dimensionamento do sistema.

O objetivo do dimensionamento é determinar qual é a área coletora e o volume do sistema de armazenamento necessário para atender à demanda de energia útil de um determinado perfil de consumo.

O dimensionamento do SAS pode ser realizado por qualquer procedimento tecnicamente reconhecido.

Métodos de cálculo são sugeridos no Anexo B.

2.4.1 Metodologia de cálculo

A norma prevê em seu “Anexo B” duas metodologias de cálculo do SAS, sendo:

- Metodologia de cálculo 1

Metodologia da “Carta F” conforme Solar Heating Design pelo método F-Chart¹⁰.

- Metodologia de cálculo 2

Esta metodologia de cálculo é recomendada para dimensionamento de SAS em residências unifamiliares atendendo aos critérios estabelecidos nesta Norma.

O método de cálculo apresentado considera uma fração solar de 70% e que não exista sombreamento sobre os coletores solares.

A metodologia utilizada neste trabalho é baseada no método da “Carta F” cuja fonte baseia-se em Duffie e Beckman (2013), haja vista que apresentam revisões mais recentes.

O método da Carta F é uma metodologia para avaliação da performance de sistemas de aquecimento de água em longos períodos, é baseada na correlação de um grande número de simulações detalhadas.

Os resultados destes experimentos numéricos levaram a correlação de duas variáveis adimensionais, as quais identificamos como X e Y , com a fração de aproveitamento solar f . Esta metodologia tem como referência Duffie e Beckman (2013).

Admitimos que $F'_R = F_R$, pois consideramos que as perdas existentes do coletor ao reservatório são desprezíveis e em nosso caso não há trocador de calor na linha até o reservatório.

O parâmetro X relaciona as perdas térmicas com a demanda térmica, ou seja, quanto maior, menor será a fração solar f .

$$X = \frac{A_c F_R U_L (T_{ref} - \bar{T}_a) \Delta t}{L} \quad (2.1)$$

O parâmetro Y é a razão entre a absorção solar e a demanda térmica, quanto maior, maior será a fração solar f .

$$Y = \frac{A_c F_R \overline{\tau \alpha} \overline{H_T} N}{L} \quad (2.2)$$

Sendo:

A_c = Área do coletor solar [m²]

F'_R = Fator de eficiência de troca de calor do coletor até o reservatório

U_L = Coeficiente geral de perda do coletor [W/m² °C]

$\overline{\tau \alpha}$ = Média mensal do produto transmitância – absorção do coletor

T_{ref} = Temperatura de referência fixa (100°C) [°C]

T_a = Média mensal da temperatura ambiente [°C]

L = Total da demanda mensal de aquecimento de água [J]

$\overline{H_T}$ = Média mensal da radiação diária incidente na superfície inclinada do coletor por unidade de área [J/m²]

Δt = Total de segundos no mês

N = Dias no mês

A demanda mensal é calculada a partir do volume consumido e da elevação da temperatura da água fornecida da rede até a temperatura alvo. Esses valores sofrem variação mensal no cálculo, sendo que a temperatura da rede sofre a influência da variação da temperatura média do ambiente.

A equação abaixo indica o valor da demanda mensal (L_i) onde os índices i correspondem à indicação que os valores utilizados podem variar para cada mês.

$$L_i = V_{cons(i)} N_i \rho C_p (T_{w(i)} - T_{m(i)}) \quad (2.3)$$

Onde:

$V_{\text{cons}(i)}$ = Volume de água consumido diariamente [m^3]

N = Dias do mês

ρ = Massa específica da água igual a 1.000 [kg/m^3]

C_p = Calor específico da água igual a 4.180 [$\text{J}/\text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}$]

T_w = Temperatura mínima aceitável da água quente [$^\circ\text{C}$]

T_m = Temperatura de entrada no sistema da água, água da rua [$^\circ\text{C}$]

A temperatura de entrada do sistema será avaliada mês a mês, levando-se em consideração as médias mensais de temperatura do local da instalação, para tanto elaboramos a seguinte regra:

$$T_{m.i} = \frac{\overline{T_{a.i}} + \overline{T_{a.i-1}}}{2} \quad (2.4)$$

Sendo:

T_m = Temperatura da água de entrada no sistema, temperatura da rede [$^\circ\text{C}$]

$\overline{T_{a.i}}$ = Temperatura média mensal ambiente [$^\circ\text{C}$]

Este método deve respeitar as faixas de aplicação com os valores dados na tabela abaixo:

Faixas dos parâmetro para o Método Carta F
$0,6 \leq \tau \bar{\alpha} \leq 0,9$
$5 \leq F'_R A_c \leq 120 \text{ m}^2$
$30 \leq \beta \leq 90^\circ$
$2,1 \leq U_L \leq 8,3 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$

Tabela 2: Faixa de parâmetros Carta F. Fonte: tabela 20.2.1. DUFFIE , J.A; BECKMAN , W, A (2013)

As inclinações usuais no Brasil são menores ou próximas ao limite inferior para β . A norma ABNT (2008) recomenda como inclinação ótima a adoção da latitude acrescida de 10° .

O adimensional X passa a ser corrigido por dois fatores, o primeiro por ser utilizado em sistemas exclusivos de água sendo o mesmo:

$$\frac{X_{c1}}{X} = \frac{11,6 + 1,18T_w + 3,86T_m - 2,32\bar{T}_a}{100 - \bar{T}_a} \quad (2.5)$$

Onde:

T_w = Temperatura mínima aceitável da água quente [$^\circ\text{C}$]

T_m = Temperatura da água de entrada no sistema, temperatura da rede [$^\circ\text{C}$]

$\bar{T}_a$ = Temperatura média mensal ambiente [$^\circ\text{C}$]

Como a norma da ABNT⁹ (2008) sugere, adotamos para a temperatura de consumo 40°C , o mesmo valor para T_w .

Outro fator de correção se refere ao fato de as simulações numéricas adotarem uma relação de 75 L/m² para o volume dos reservatórios e áreas dos coletores, neste caso temos:

$$\frac{X_{c2}}{X_{c1}} = \left(\frac{V_{Rreal}}{V_{Rpadrão}} \right)^{-0,25} \quad (2.6)$$

Para:

$$0,5 \leq \left(\frac{V_{Rreal}}{V_{Rpadrão}} \right) \leq 4,0 \quad (2.7)$$

Sendo:

V_{Rreal} = Volume real do reservatório [m³]

$V_{Rpadrão}$ = Volume oriundo do cálculo da relação padrão 75 L/m² x A_c [m³]

Após os cálculos dos adimensionais suas devidas correções, a fração solar mensal pode ser estimada como:

$$f = 1,029 Y - 0,065 X - 0,245 Y^2 + 0,0018 X^2 + 0,0215 Y^3 \quad (2.8)$$

Onde X deve ser substituído por X_{c1} ou X_{c2} dependendo do caso.

As frações solares mensais f são utilizadas para obtenção da fração anual $\mathcal{F}$ através da média ponderada pela carga mensal:

$$F = \frac{\sum(f_i L_i)}{\sum L_i} \quad (2.9)$$

3 O SISTEMA HÍBRIDO SOLAR COMPARTILHADO ESTUDO DE CASO RESIDÊNCIA UNIFAMILIAR

Para a análise e cálculo do rendimento solar e dos custos econômicos para a implantação do sistema proposto escolhemos uma instalação existente localizada na cidade de São Paulo – SP.

As premissas do projeto para a edificação conforme a necessidade do cliente são:

1. Atender a demanda de água quente para banhos.
2. Reduzir custos de operação do sistema de aquecimento de água.
3. Utilizar área reduzida para a instalação dos coletores solares no pavimento da cobertura.
4. Não interferir no paisagismo e fachada da construção.
5. Utilizar o excedente de energia para o aquecimento de banheira recreativa (SPA).

3.1. Demanda de água quente

3.1.1. A Edificação



Figura 11: Fachada da edificação após a conclusão das obras.

A figura 11 refere-se a fachada da edificação após a conclusão das obras, não se nota a presença do sistema de aquecimento solar instalado no pavimento de cobertura interferindo com o paisagismo e fachada; atendendo a umas das premissas de projeto. Os coletores solares e reservatórios térmicos foram posicionados na porção dos fundos da laje de cobertura.

A edificação deste estudo é uma residência unifamiliar cujas características são apresentadas na tabela 3.

CARACTERÍSTICA DA EDIFICAÇÃO	
TIPO DE HABITAÇÃO	UNIFAMILIAR
NÚMERO DE HABITANTES	04 PESSOAS
PAVIMENTOS	1o. SUBSOLO, TÉRREO, SUPERIOR E COBERTURA
USO DE ÁGUA QUENTE – SAS	BANHOS E SPA

Tabela 3: Características da edificação

A área técnica da piscina e spa está localizada no pavimento subsolo onde estão instalados os equipamentos de filtração, bombas de circulação, bombas de hidroterapia, sistemas de aquecimento de água solar e a gás e sistemas de tratamento de água.

A banheira de uso recreativo SPA, está localizada no pavimento térreo ao lado da piscina.

Na figura 12 nota-se a banheira SPA localizada à direita da piscina. As tubulações hidráulicas percorrem o corredor técnico no subsolo até a casa de máquinas.

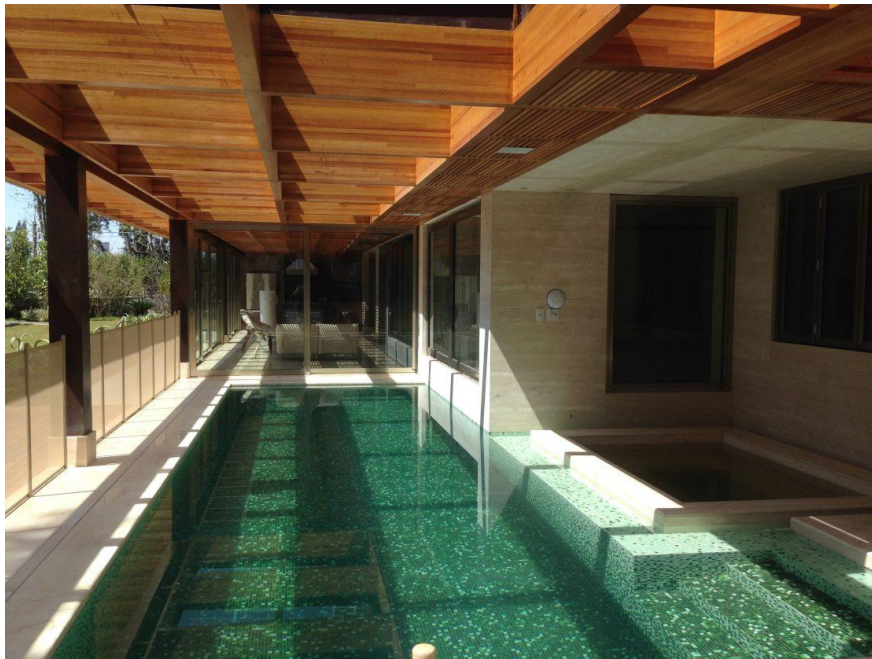


Figura 12: Piscina e Spa. Fonte: Acervo próprio



Figura 13: Detalhe banheira recreativa SPA. Nota-se que o volume de água do SPA não se comunica com a água da piscina, portanto não há troca térmica entre os dois volumes. Fonte: Acervo próprio

A banheira recreativa está localizada em área parcialmente fechada com pouca incidência de ventos, sempre cheia de água, porém não na temperatura de conforto (38°C), deverá ser aquecida somente aos finais de semana, tabela 4. O aquecimento auxiliar da banheira é através de aquecedor de passagem a gás.

BANHEIRA (SPA)	
TIPO	RECREATIVA
VOLUME DE ÁGUA	3,5 m ³
TEMPERATURA DE CONFORTO	38°C
UTILIZAÇÃO EM DIAS /MÊS	8 DIAS
ÁREA DE SUPERFÍCIE	6,2 m ²

Tabela 4: Dados da banheira SPA. Fonte Produzida pelo autor.

Ainda no andar térreo está instalado o abrigo dos aquecedores de passagem a gás, figura 14.

Neste abrigo existem 05 aquecedores a gás instantâneo da marca Rinnai modelo REU2802FEC1, sendo que dois são dedicados ao SAS, Sistema de Aquecimento de Água Solar, que abastece a edificação com água quente para banhos.



Figura 14: Abrigo de aquecedores. Sistema de apoio de aquecimento para banhos e SPA. Fonte: Acervo próprio

A utilização de água quente para cozinha e demais dependências se dá através de um aquecedor de passagem a gás instantâneo não interligado ao SAS e os dois restantes atendem ao apoio a gás da piscina e spa.

O andar superior é dedicado para a área de quartos e banheiros da edificação, é nesta área que está concentrado o maior consumo de água quente da edificação.

Na cobertura da edificação estão instalados os coletores solares de banhos, reservatórios térmicos, bombas de circulação e recirculação do SAS e coletores solares planos abertos da piscina.



Figura 15:Coletores solares planos abertos utilizados para o aquecimento da piscina. Fonte: Acervo próprio.



Figura 16: Reservatórios térmicos do sistema de aquecimento de banhos. Capacidade de 500 litros interligados em série. Fonte: Acervo próprio.



Figura 17: Coletor tubo a vácuo. Fonte: Acervo próprio.



Figura 18: Bombas de circulação e recirculação SAS. Fonte: Acervo próprio.

3.1.2 Fluxograma do método Carta F

O fluxograma a seguir ilustra os principais parâmetros e premissas para realização do cálculo da fração solar $\mathcal{F}$ através do método da Carta F.

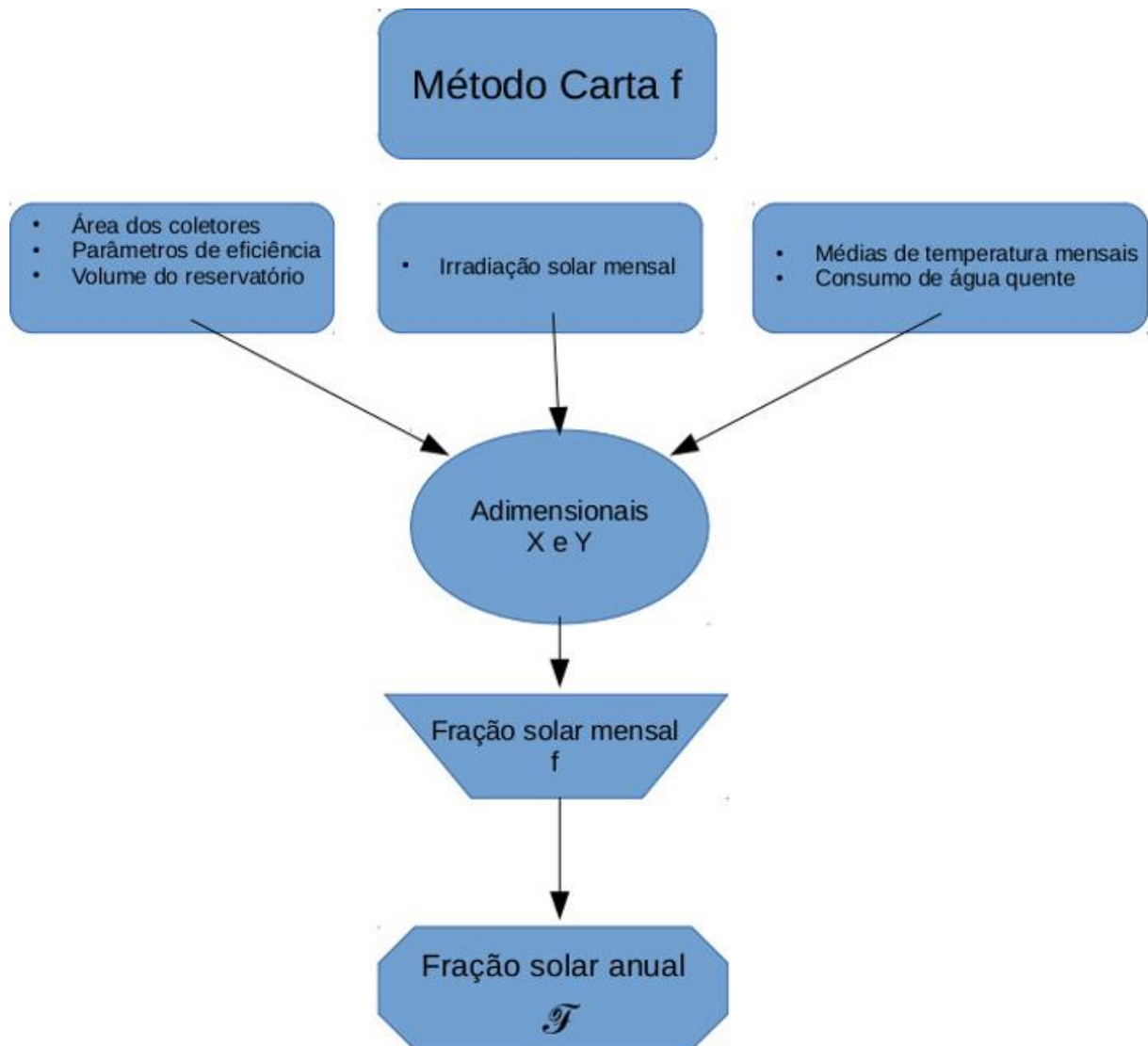


Figura 19: Fluxograma método Carta F. Fonte: produzido pelo autor

3.1.3 Localização da edificação

A construção está localizada na cidade de São Paulo – SP, e tem como coordenada geográfica, latitude Φ e longitude L identificadas na tabela 5.



Figura 20: Laje de cobertura da edificação anterior a reforma sem a instalação do SAS.

LOCALIZAÇÃO DA INSTALAÇÃO	
ESTADO DA FEDERAÇÃO	SÃO PAULO
MUNICÍPIO	SÃO PAULO
LATITUDE Φ	23,635°S
LONGITUDE L	46.683°O

Tabela 5: Coordenadas de localização da edificação. Fonte: Google-Maps

3.1.4 Esquema e funcionamento da instalação SAS Híbrido

A figura 21 representa o esquema de instalação dos equipamentos.

O sistema é composto por:

- 02 reservatórios térmicos de 500 litros em aço inox
- 01 bomba de circulação do solar
- 01 bomba de circulação do apoio a gás
- 01 bomba de recirculação da prumada
- 01 bomba de circulação do aquecimento solar do spa
- 03 coletores solares de tubo a vácuo
- 02 aquecedores de passagem instantâneos a gás
- 01 válvula 03 vias
- 01 trocador de calor de placas brasadas
- 02 válvulas de segurança
- 03 válvulas eliminadores de ar
- 02 válvulas quebra vácuo
- 02 tanques hidropneumáticos 24 litros
- 01 painel de controle de temperatura

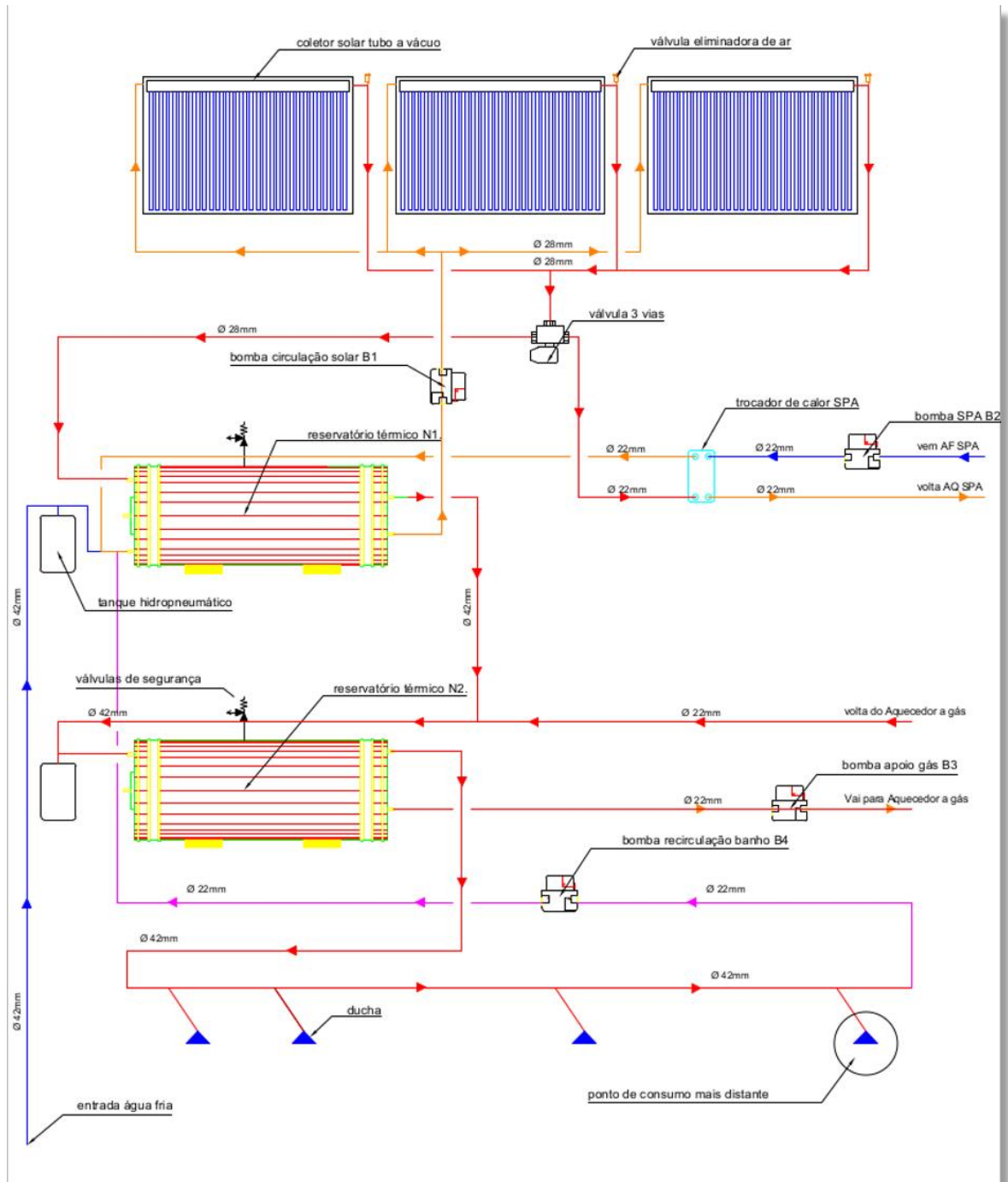


Figura 21: Diagrama de equipamentos SAS híbrido. Fonte: produzido pelo autor

Os reservatórios térmicos são interligados na configuração em série, onde a circulação dos coletores solares é realizada através de bomba de circulação solar B1 interligada ao reservatório N1.

A bomba de circulação solar B1 é comandada por controlador de temperatura o qual mede a temperatura no coletor solar e no interior do reservatório N1. Quando a temperatura do coletor for superior a 8° C o controlador aciona a bomba e circula o fluído aquecido para o interior do reservatório através da válvula 3 vias.

Quando o reservatório térmico atingir a temperatura de armazenamento (50°C), o controlador envia o sinal para que a válvula de 3 vias mude de direção, enviando o fluído aquecido para o interior do trocador de calor. O controlador envia o sinal para que a bomba de aquecimento da banheira SPA (localizada no subsolo) seja acionada, permitindo a troca de calor e aquecimento da água da banheira.

Caso o reservatório de consumo N2, não atinja a temperatura de armazenamento (50°) com a circulação do sistema solar, a bomba B3 é acionada circulando a água através dos aquecedores instantâneos a gás (localizados no pavimento térreo) complementando a temperatura até o valor de 50°C.

O sistema conta ainda com circuito de recirculação de água da prumada de abastecimento de água quente dos banhos.

3.1.5 Demanda de água quente de banho

Por se tratar a edificação de uso residencial, a utilização de água quente diária tem o seguinte perfil: dois banhos por dia/pessoa, utilização do lavatório 03 vezes ao dia/pessoa. A análise do consumo leva em consideração os equipamentos sanitários utilizados, suas curvas de vazão, o tempo de utilização, a frequência os quais são requisitados durante o dia e a temperatura recomendada para o uso.

As duchas instaladas são da marca Deca® com sistema de economia de água por injeção de ar, modelo CT1990.



Figura 22: Ducha Deca CT1990. Fonte: Deca

A curva de vazão das duchas é apresentada na figura 23, nota-se que a vazão de saída se mantém praticamente constante para várias pressões de entrada.



Figura 23: Curva de vazão das duchas. Fonte: Deca

As bicas dos lavatórios são da marca Deca® modelo 2875 com monocomando incorporado para a mistura da água quente e fria.

A tabela 6 foi construída através das curvas de vazão dos aparelhos sanitários para a pressão de entrada de água do reservatório térmico. Como trata-se de circuito hidráulico pressurizado através de motobomba controlada por transdutor em regime de pressão constante, a pressão de entrada está fixa em 2,5kgf/cm².

O consumo dos aparelhos sanitários são:

Modelo	Vazão	Tempo de utilização por peça	Frequência de uso	Número de pessoas	Temperatura de consumo °C
DUCHA – Chuveiro Deca® modelo CT1990 ar	12 L/min	10 min	02 vezes ao dia	4	39 - 40
LAVATÓRIO – Misturador Deca® modelo Drop C91	05 L/min	2 min	03 vezes ao dia	4	39 - 40

Tabela 6: Consumo de aparelhos sanitários, vazões para pressão de entrada de 2,5kgf/cm². Fonte: Deca

Segundo sugere a ABNT¹¹ NBR 15569:2008 o cálculo simplificado para o volume diário de consumo de água quente é:

$$V_{consumo} = \sum (Q_{pu} \times t_u \times frequencia de uso) \quad (3.1)$$

Onde:

$V_{consumo}$: Volume total de água quente consumido em m³.

Q_{pu} : Vazão da peça de utilização, expressa em m³/s.

T_u : Tempo médio de uso diária da peça de utilização, expresso em segundos.

Frequência de uso: N° de vezes que o aparelho é solicitado durante as 24 horas.

Então:

O consumo total de água quente das duchas e lavatórios devem ser calculados obtendo-se os valores médios de vazão do aparelho da tabela 6 e aplicando as características de ocupação e uso da residência tabela 1, para a pressão de entrada do reservatório térmico, 2,5kgf/cm².

$$V_{ducha} = 12,0 \frac{L}{min} \times 10min \times 2banhos \times n.pessoas \quad (3.2)$$

$$V_{ducha} = 960L \quad (3.3)$$

V_{ducha} : Vazão de consumo da ducha [L]

Para o cálculo da vazão de água quente do lavatório:

$$V_{lavatório} = 5,0 \frac{L}{min} \times 2min \times n.pessoas \times frequencia \quad (3.3)$$

$$V_{lavatório} = 120L \quad (3.4)$$

$V_{lavatório}$: Vazão de consumo do lavatório [L]

O circuito de abastecimento de água quente conta com bomba de recirculação de água, cuja função é fornecer água quente em instantes após a abertura de qualquer ponto de consumo. Está medida se faz necessária para que não haja o desperdício da água, haja vista que em períodos de baixo consumo haverá perda de temperatura para meio externo dentro da tubulação hidráulica.

O cálculo do volume de água no interior da tubulação é realizado através da tabela abaixo:

Volume de água nos tubos de cobre classe E	
Diâmetro Nominal (mm / pol)	Volume retido em litros por metro linear de tubo
15 (1/2")	0,15
22 (3/4")	0,34
28 (1")	0,56
35 (1 1/4")	0,89
42 (1 1/2")	1,28

Tabela 7: Volume de água retido no interior da tubulação. Fonte: Eluma

O ponto de consumo com maior distância do SAS está a 40 metros, tem diâmetro de 42 mm em tubulação de cobre classe E. A linha de retorno está conectada a bomba de recirculação com comprimento linear de 12 metros, diâmetro de 22mm em cobre classe E. Figura 24.

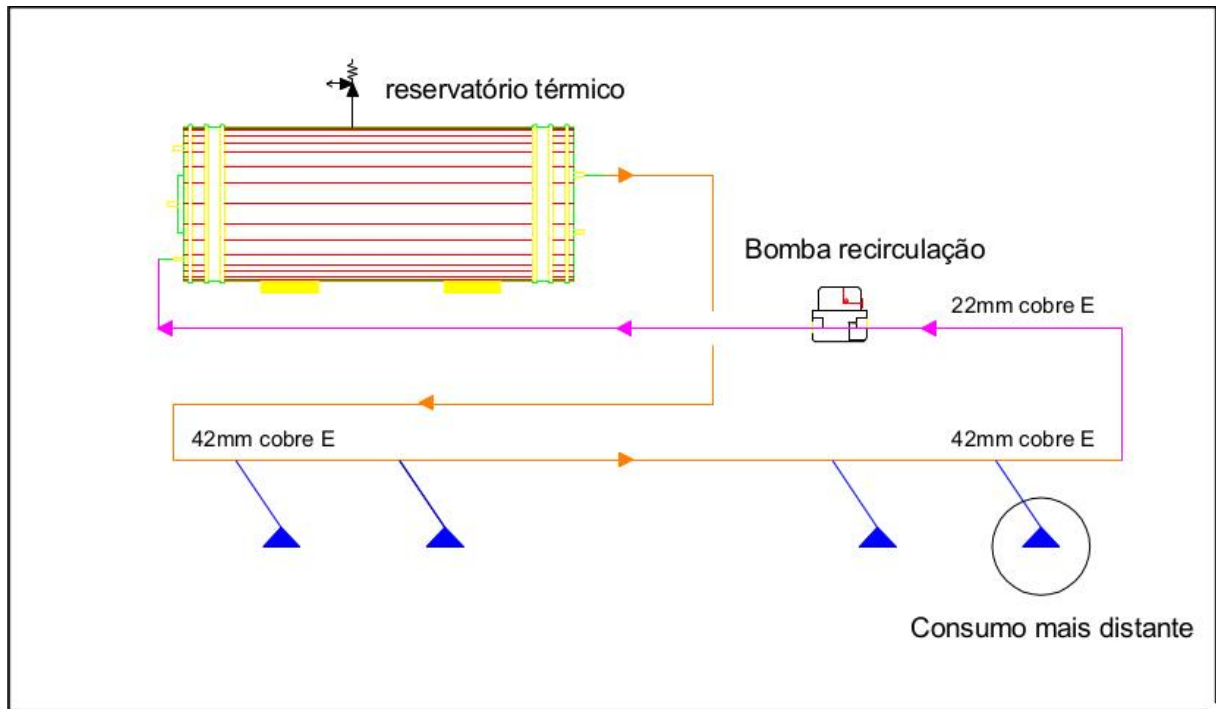


Figura 24: Circuito de recirculação de água quente

Conhecida as bitolas e distâncias lineares do ponto mais distante de consumo de água quente e seu retorno, o consumo de água quente a ser repostado devido a recirculação é fornecido pela fórmula:

$$V_{recirc} = \Sigma(C_{tubul} \times V_{retido}) \quad (3.5)$$

V_{recirc} = volume de água quente do circuito de recirculação em litros

C_{tubul} = comprimento linear da tubulação em metros

V_{retido} = volume retido na tubulação hidráulica em litros

$$V_{recirc} = (40 \times 1,28) + (12 \times 0,34) \quad (3.6)$$

$$V_{recirc} = 55,28L \quad (3.7)$$

O consumo total de água quente da edificação será a soma de todas as vazões:

$$V_{Consumo} = \Sigma(V_{ducha} + V_{lavatório} + V_{recirc}) \quad (3.8)$$

$$V_{Consumo} = 960 + 120 + 55,28 = 1.135,28L = 1,135 \frac{m^3}{dia} \quad (3.9)$$

Portanto, o sistema a ser dimensionado deverá atender a uma demanda mínima de água quente de 1,14 m³/dia em 24 horas ininterruptas.

3.1.6 Demanda de energia

Segundo ABNT NBR 15569:2008 a energia útil armazenada no volume de consumo é calculada através da fórmula:

$$E_{\text{útil}} = V_{\text{Consumo}} \gamma \times C_p \times (T_{\text{armaz}} - T_{\text{amb}}) \quad (3.10)$$

Onde:

$E_{\text{útil}}$ = Energia útil diária [kWh/dia]

γ = Massa específica da água igual a 1.000 [kg/m³]

C_p = Calor específico da água igual a $11,63 \times 10^{-4}$ [kWh/km °C]

T_{armaz} = Temperatura de armazenamento [°C]

T_m = Temperatura de entrada no sistema da água, água da rua [°C]

$$E_{\text{útil}} = 1,135 \times 1.000 \times 11,63 \times 10^{-4} (50 - 20,20) \quad (3.11)$$

$$E_{\text{útil}} = 19,61 \frac{kWh}{dia} \quad (3.12)$$

Ou seja, o sistema necessita de 19,61 kWh/dia para atender a demanda de água quente de consumo da edificação.

As perdas térmicas impostas pelo circuito hidráulico ao sistema são:

$$E_{\text{perdas}} = 0,15 \times E_{\text{útil}} \quad (3.13)$$

Sendo:

E_{perdas} = somatório das perdas térmicas dos circuitos primário e secundário [kWh/dia]

$$E_{\text{perdas}} = 2,94 \frac{kWh}{dia} \quad (3.14)$$

Portanto a energia total a qual deverá ser gerada pelo SAS é de:

$$E_{total} = E_{\acute{u}til} + E_{perdas} \quad (3.15)$$

$$E_{total} = 19,61 + 2,94 = 22,55 \frac{kWh}{dia} \quad (3.16)$$

3.1.7 Parâmetros de eficiência dos coletores solares

Os coletores solares para banho são compulsoriamente certificados no INMETRO⁶ (2008), atendendo os mesmos a NBR 15747. Desta forma foi extraído do sítio do INMETRO as características dos coletores solares utilizados na edificação.

A eficiência a de um coletor solar é a sua capacidade de converter a radiação solar incidente em sua superfície em energia útil, energia térmica.

$$G_T = \frac{I_T}{3600} \quad (3.17)$$

A eficiência de um coletor é dada pela fórmula:

$$\eta = F_R(\tau\alpha)_N - \frac{F_R U_L (T_{fi} - T_{amb})}{G_T} \quad (3.18)$$

Onde:

$F_R(\tau\alpha)_N$: admissional de absorção do coletor solar

$F_R U_L$: admissional de perdas do coletor solar

G_T : fluxo de radiação médio solar no plano inclinado [W/m²]

T_{fi} : temperatura de entrada no coletor solar [°C]

T_{amb} : temperatura ambiente [°C]

I_T : Irradiação solar sobre a superfície inclinada [J/m²]

A figura 25 ilustra um exemplo de tabela extraída do sítio da INMETRO o qual fornece rendimento, admissional de absorção e perda dos coletores solares comercializados e certificados no território nacional.

INMETRO INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA

PBE- Coletor Solar aplicação Banho e Piscina

Tabela de Consumo / Eficiência Energética

Empresas: 20
Marcas: 31
Modelos: 227

Data de Atualização: 1/30/2017

Produção de Energia Solar (PME)

Produção de Energia Solar (PME) Específica em m² (Wh/m².m²)

Empresa	Marca	Modelo	Aplicação	Pressão de Funcionamento (GPa)	Área Externa do Coletor (m²)	Produção Média mensal de Energia (kWh/m²)	Por m² (Especifico kWh/m².m²)	Eficiência Energética Média(%)	Classificação	Material Superfície Absorvedora	Folga(m)	Fritul	Número de Registro de Objeto	Data de Concessão	Data do cancelamento
ACQUA-SOL	ACQUA-SOL	ACQUA-SOL I	Banho	49	5,80	242	153,2	61,30	75,1	D	Vidro de Borossilicato	0,006	2,871	06/02/2016	24/10/2016
ACQUA-SOL	ACQUA-SOL	ACQUA-SOL II	Banho	49	5,80	318	201,0	61,22	75,1	D	Vidro de Borossilicato	0,006	2,871	06/02/2016	24/10/2016
ACQUA-SOL	ACQUA-SOL	ACQUA-SOL III	Banho	49	5,80	395	249,7	61,22	75,1	D	Vidro de Borossilicato	0,006	2,871	06/02/2016	24/10/2016
ACQUA-SOL	ACQUA-SOL	ACQUA-SOL IV	Banho	49	5,80	470	297,1	61,22	75,1	D	Vidro de Borossilicato	0,006	2,871	06/02/2016	24/10/2016
ACCOSOL	Accosol	Accosol 278 BP	Banho	58	5,80	318	204,7	80,49	54,9	A	Vidro de Borossilicato	0,752	0,718	06/08/2015	25/09/2015
ACCOSOL	Accosol	Accosol 30 BP	Banho	58	5,80	379	224,0	80,49	64,8	A	Vidro de Borossilicato	0,546	3,795	06/08/2015	25/09/2015
ACCOSOL	Accosol	Accosol 50 BP	Banho	58	5,80	645	297,3	66,75	72,1	C	Vidro de Borossilicato	0,562	2,184	06/08/2015	25/09/2015
ACCOSOL	Accosol	Accosol 40 BP	Banho	58	5,80	583	399,2	66,75	72,1	C	Vidro de Borossilicato	0,562	2,184	06/08/2015	25/09/2015
ACCOSOL	Accosol	Accosol 50 BP	Banho	58	5,80	692	472,9	66,36	72,1	C	Vidro de Borossilicato	0,562	2,184	06/08/2015	25/09/2015
A.C.F. Indústria e Comércio Ltda	ACP	10000 Coletor Solar Plano	Piscina	58	10,00	0,07	84,0	87,89	62,83	C	Polipropileno	0,757	15,863	06/02/2015	17/09/2015

Figura 25: Figura ilustrativa da tabela de consumo eficiência energética de coletores solar. Fonte: INMETRO

3.1.8 Escolha do coletor solar

Os coletores solares instalados na edificação atenderam a dois requisitos principais:

1. A área disponível para instalação na laje de cobertura era limitada.
2. O sistema SAS deveria atender a demanda de água quente de banhos e gerar excedente de energia térmica para o aquecimento da banheira recreativa.



Figura 26: Local de instalação dos coletores solares tubo a vácuo

Optou-se por escolher os coletores com as seguintes características:

COLETOR SELECIONADO	
TIPO	TUBO A VÁCUO
MODELO	30 TUBOS BP
FABRICANTE	MAXSUN
APLICAÇÃO	BANHO
ÁREA EXTERNA DO COLETOR	4,25 m ²
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	68,3
$Fr\zeta\alpha$	0,736
FrUL	1,71
CLASSIFICAÇÃO	A

Tabela 8: Dados do coletor solar tubo a vácuo. Fonte INMERO

A escolha do coletor solar estava baseada em obter o maior rendimento possível pela menor área disponível para a instalação.

3.1.9 Escolha do reservatório térmico

A definição do tamanho e capacidade do reservatório térmico instalado na edificação deve ser ajustado para suprir o volume da demanda solicitada e se adequar aos reservatórios fornecidos pelo mercado.

Na edificação optou-se por utilizar 02 reservatórios térmicos em aço inox 304 certificados pelo INMETRO com capacidade de 500 litros cada e pressão de trabalho de 400 kPa. Os reservatórios possuem resistência de apoio elétrica com potência de 5kW.

Os reservatórios não possuem uma escala de eficiência energética similar aos coletores, porém o PROCEL estabelece parâmetros mínimos de perda de energia térmica.

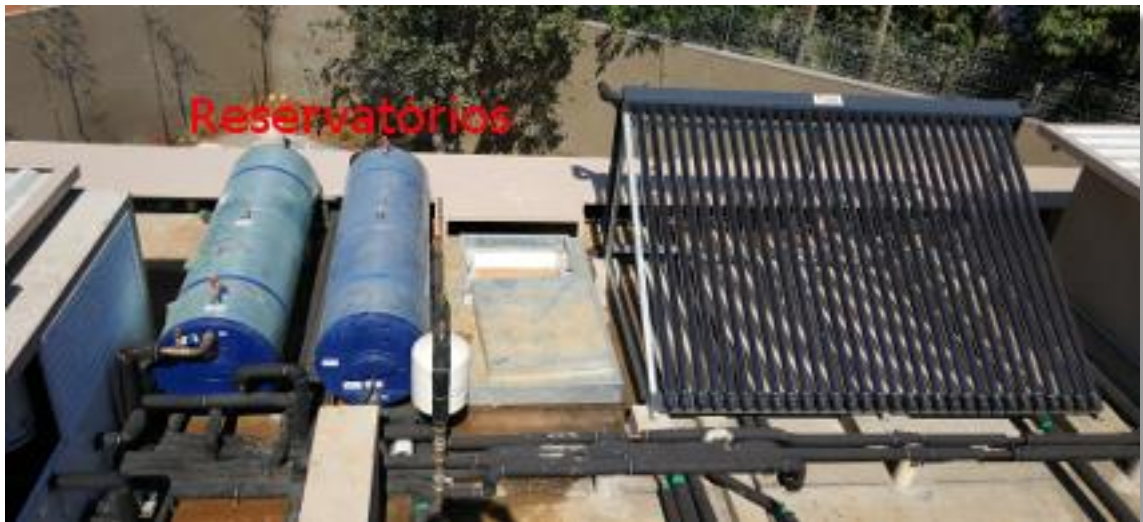


Figura 27: Reservatórios do sistema solar em ligação série. Fonte: Acervo próprio.

3.2 Temperatura média mensal no local

A temperatura média mensal do local deve ser obtida pelos órgãos competentes ABNT¹¹ NBR 15569:2008.

Normal Climatológica do Brasil 1981-2010 Temperatura Média Compensada - Bulbo Seco (°C) SÃO PAULO(MIR.de SANTANA)	
janeiro	22,90
fevereiro	23,20
março	22,40
abril	21,00
maio	18,20
junho	17,10
julho	16,70
agosto	17,70
setembro	18,50
outubro	20,00
novembro	21,20
dezembro	22,10
No Ano	20,10
Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (normal climatológica de 1981-2010)	

Tabela 9: Médias de temperaturas mensais para a cidade de São Paulo. Fonte: INMET

Os valores foram obtidos através de consulta ao sítio do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) para a cidade de São Paulo. O levantamento das temperaturas mensais permite inserir no modelo Carta F o fator de correção da temperatura de entrada do fluido no reservatório.

Temos que a temperatura média anual para a cidade de São Paulo é:

$$T_{ambiente} = 20,10^{\circ}C \quad (3.19)$$

A temperatura de armazenamento utilizada na instalação é de 55 °C, suficiente para atender a demanda de 40 °C na utilização da mistura de água quente e fria para o banho, bem como o excedente a ser utilizado no sistema de aquecimento indireto da banheira SPA.

3.2.1 Radiação solar no plano inclinado

Através do sítio do CRESESB (Centro de Referência para Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito) são extraídos os índices de irradiação solar da estação mais próxima à da instalação.

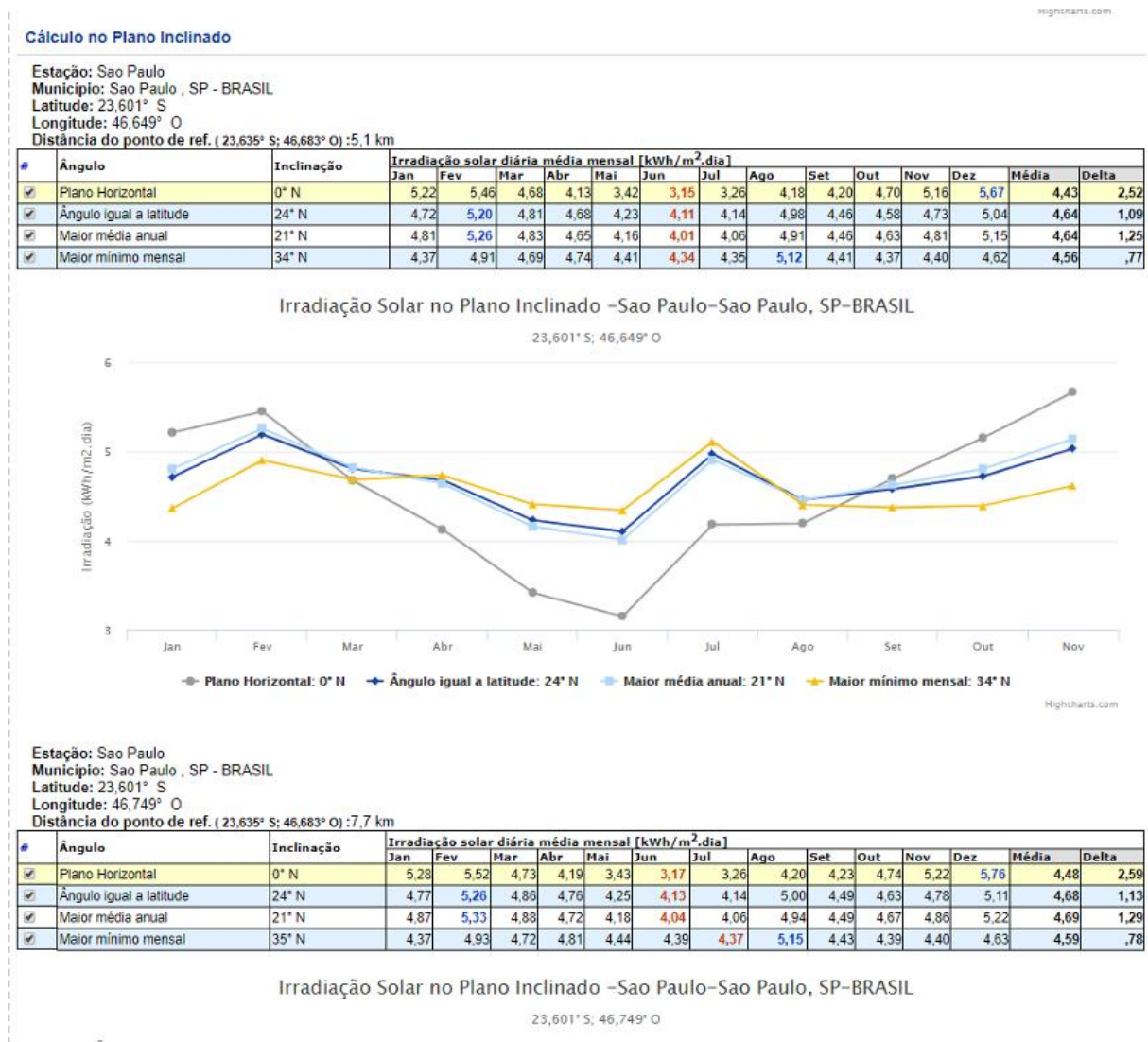


Figura 28: Irradiação solar no plano inclinado próximo ao local da instalação. Fonte: CRESESB

3.2.2 Cálculo da Fração Solar Anual $\mathcal{F}$

O cálculo da fração solar referente a instalação foi executado aplicando o método descrito no item 3.1.2 fluxogramas (FIG19).

O primeiro passo consiste em verificar se a instalação atende as faixas de parâmetros da Carta F (tabela 2), onde os parâmetros $F_R \overline{\tau\alpha}$ e $F_R U_L$ são obtidos na tabela 8, o ângulo de inclinação do coletor $\beta = 33^\circ$, latitude da cidade de São Paulo 23° (tabela 8) + 10° .

$$\beta = 23^\circ + 10^\circ \quad (3.20)$$

$$\beta = 33^\circ \quad (3.21)$$

Conhecida a média de temperatura ambiente para a cidade de São Paulo $20,1^\circ\text{C}$ (3.19) através da tabela 9 do tópico 3.1.9, a temperatura mínima aceitável de consumo de água quente ($40,0^\circ\text{C}$), o volume de consumo dado pela equação (3.9) $V_{\text{cons}} = 1,138\text{m}^3$; calculamos através da equação (2.3) a demanda térmica L para cada mês do ano.

Para o mês de janeiro temos:

$$L_1 = 1,138 \times 31 \times 1.000 \times 4.180 \times (40 - 20,50) \quad (3.22)$$

$$L_1 = 2,57\text{MJ} \quad (3.23)$$

Sendo que a instalação utiliza 03 coletores solares de $4,25\text{ m}^2$ (tabela 8) cada temos:

$$A_C = 4,25 \times 3 = 12,75\text{m}^2 \quad (3.24)$$

A primeira correção X_{C1} (2.5) deve ser realizada para sistema exclusivamente de aquecimento de água utilizando o adimensional X (2.1), com temperatura média ambiente T_m referente ao mês de cálculo através da equação (2.4).

$$X_1 = \frac{12,75 \times 1,71 \times (100 - 22,90) \times 2.678.400}{(2,57 \times 10^9)} \quad (3.25)$$

$$X_1 = 1,75 \quad (3.26)$$

$$\frac{X_{c1}}{X_1} = \frac{11,6 + 1,75 \times 40 + 3,86 \times 22,50 - 2,32 \times 22,90}{100 - 22,90} \quad (3.27)$$

$$X_{c1} = 2,1 \quad (3.28)$$

A segunda correção X_{c2} (2.6) refere-se a relação de volume do reservatório e a área dos coletores, sendo o volume do reservatório de 1.000 litros e a relação com os coletores 75 l/m² atendendo (2.7).

$$0,5 \leq \left(\frac{1.000}{956,25} \right) \leq 4,0 \quad (3.29)$$

$$X_{c1} = 0,99 \times 2,1 \quad (3.30)$$

$$X_{c1} = 2,08 \quad (3.31)$$

O adimensional Y (2.2) é calculado através da média de radiação solar no plano inclinado $\bar{H}_T$ no mês (FIG. 28) para a inclinação do coletor β , $F_r \tau \alpha$ do coletor escolhido (tabela 8) e a demanda L_1 (3.23).

$$Y = \frac{12,75 \times 0,74 \times 4,37 \times 31}{2,57 \times 3,6 \times 1.000} \quad (3.32)$$

$$Y = 1,78 \quad (3.33)$$

A fração solar mensal referente ao mês de janeiro após as devidas correções é calculada através da equação (2.8).

$$f = (1,29 \times 1,87) - (0,065 \times 2,18) - (0,245 \times 1,87^2) + (0,0018 \times 2,18^2) + (0,0215 \times 1,87^3) \quad (3.34)$$

$$f = 1,05 \quad (3.35)$$

Ou seja, a fração solar no mês de janeiro é superior a energia necessária para suprir a demanda térmica de uso, neste caso há sobre de energia a ser redirecionada para o SPA.

Esta sobra é redirecionada para o aquecimento da banheira recreativa através de válvula automática de 3 vias para circuito secundário no trocador de calor (diagrama FIG21) e detalhe (FIG29).



Figura 29: Trocador de calor de placas e painel controlador de temperatura do sistema solar e gás.

A fração solar anual $\mathcal{T}$ (2.9) é calculada através da média ponderada das frações solares mensais (3.36) pela carga térmica mensal (3.37), neste caso:

$$\sum_i f_i \times L_i = 34,64 \quad (3.36)$$

$$\sum L_i = 34,52 \quad (3.37)$$

$$\mathcal{T} = 1,00 \quad (3.38)$$

O desenvolvimento completo das frações mensais, cargas térmicas e correções dos adimensionais estão em tabela no Anexo A.

3.2.3 A banheira recreativa – SPA

Foi projetado para a edificação um sistema de aquecimento da banheira recreativa (SPA) solar com apoio a gás. O sistema solar entra em operação quando os reservatórios térmicos de banho (FIG.16) atingem a temperatura máxima de armazenamento (50°C).

Neste instante o controlador de temperatura (FIG.29) verifica se há diferencial positivo acima de 8°C entre a temperatura do SPA e os coletores solares, neste momento o circuito de comando do SAS aciona uma válvula 3 vias (FIG.30) e a bomba de circulação do aquecimento da banheira, o fluxo de calor é direcionado ao trocador de calor.



Figura 30: Válvula de 3 vias do sistema de solar. Fonte: Genebre

As faixas de temperaturas baseada na ASHRAE (1999b) recomendadas para piscinas e banheiras recreativas (SPA) podem ser visualizadas na tabela 10.

Tipo de Utilização da Piscina	Temperatura do Ar Ambiente (°C)	Temperatura da Água da Piscina (°C)	Umidade Relativa Ambiente (%)
Recreativo	24 a 29	24 a 29	50 a 60
Terapêutico	27 a 29	29 a 35	50 a 60
Competição	26 a 29	24 a 28	50 a 60
Salto	27 a 29	27 a 32	50 a 60
Ofurô / Spa	27 a 29	36 a 40	50 a 60

Fonte: Baseado em ASHRAE, 1999b apud Lund, 2000.

Tabela 10: Faixas de temperaturas de piscina. Fonte: Maluf (2010).

A temperatura de conforto do SPA está fixa em 38°C conforme solicitação do cliente e encontra-se na faixa recomendada pela tabela 10. O sistema de apoio a gás tem acionamento independente do controlador de temperatura solar.

Segundo Maluf (2010), a quantidade de calor transferida para a piscina será:

$$\dot{Q} = \frac{(\dot{m} \times c \times \Delta T)}{860} \quad (3.37)$$

Onde:

$\dot{Q}$ = quantidade de calor [kW]

$\dot{m}$ = vazão mássica da água [kg/s]

c = calor específico da água 1 [kcal/kg °C]

ΔT = diferença entre a temperatura de entrada e saída da água

860 = fator de conversão de unidade kcal para kW

O cálculo de transferência de calor do sistema solar SAS no trocador de calor de placas brasadas (FIG31) foi realizado através do programa fornecido pelo fabricante Emmeti em configuração de contracorrente.



Figura 31: Trocador calor placas brasadas modelo SPE526/20.Fonte: Emmeti

O sistema de aquecimento do SPA foi construído com a utilização de trocador de calor em configuração de contracorrente empregando uma bomba da marca Rowa (FIG10) na entrada do circuito primário e uma bomba Jacuzzi modelo 5A-M (FIG32) na entrada do circuito secundário.



**Figura 32: Bomba de circulação do SPA marca Jacuzzi modelo 5A-M.
Fonte: Jacuzzi do Brasil.**

No circuito primário circula o fluido aquecido proveniente dos coletores solares após o direcionamento da válvula de 3 vias (FIG30). No circuito secundário a água do SPA circula através da motobomba através do comando do painel controlador de temperatura (FIG29).

A vazão mássica que a bomba do primário fornece é de 1.200 kg/h e a bomba do secundário 8.000 kg/h, considerando que a temperatura de início do aquecimento está em equilíbrio com a temperatura ambiente média (20,20°C) e a temperatura alvo é de 38°C (FIG33).

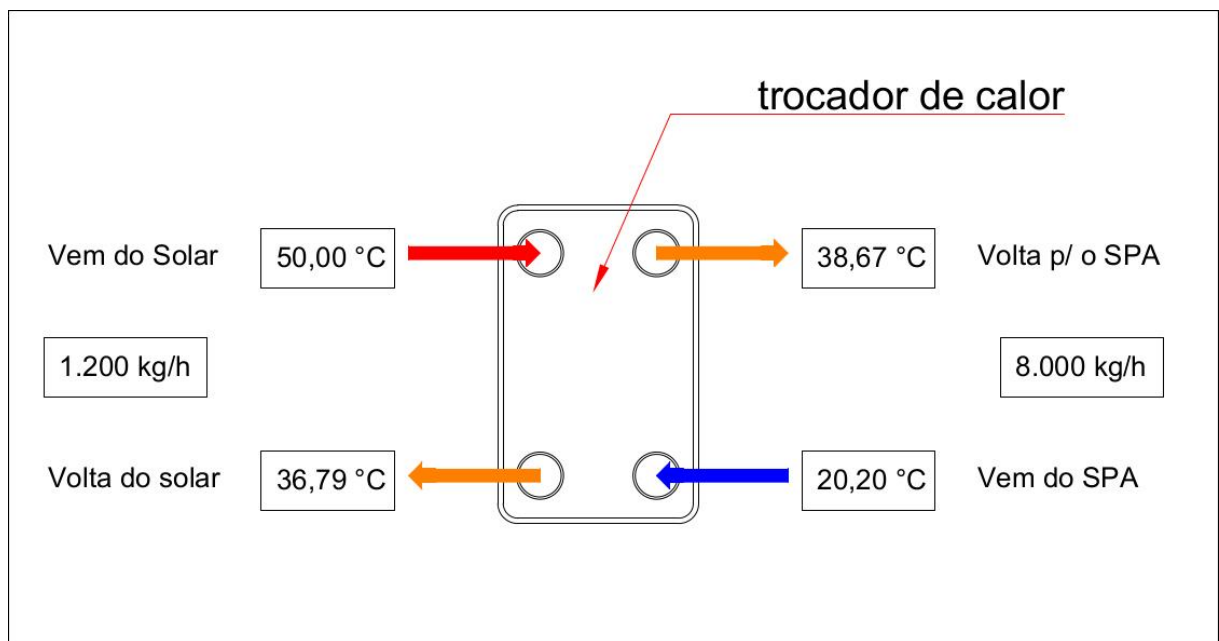


Figura 33: Fluxo de entrada e saída no trocador de calor. Fonte: programa de cálculo trocador de calor Emmeti

A relação de potência térmica fornecida pelo sistema através do SAS via trocador de calor pela temperatura de entrada e saída é representada pelo gráfico da figura 35.

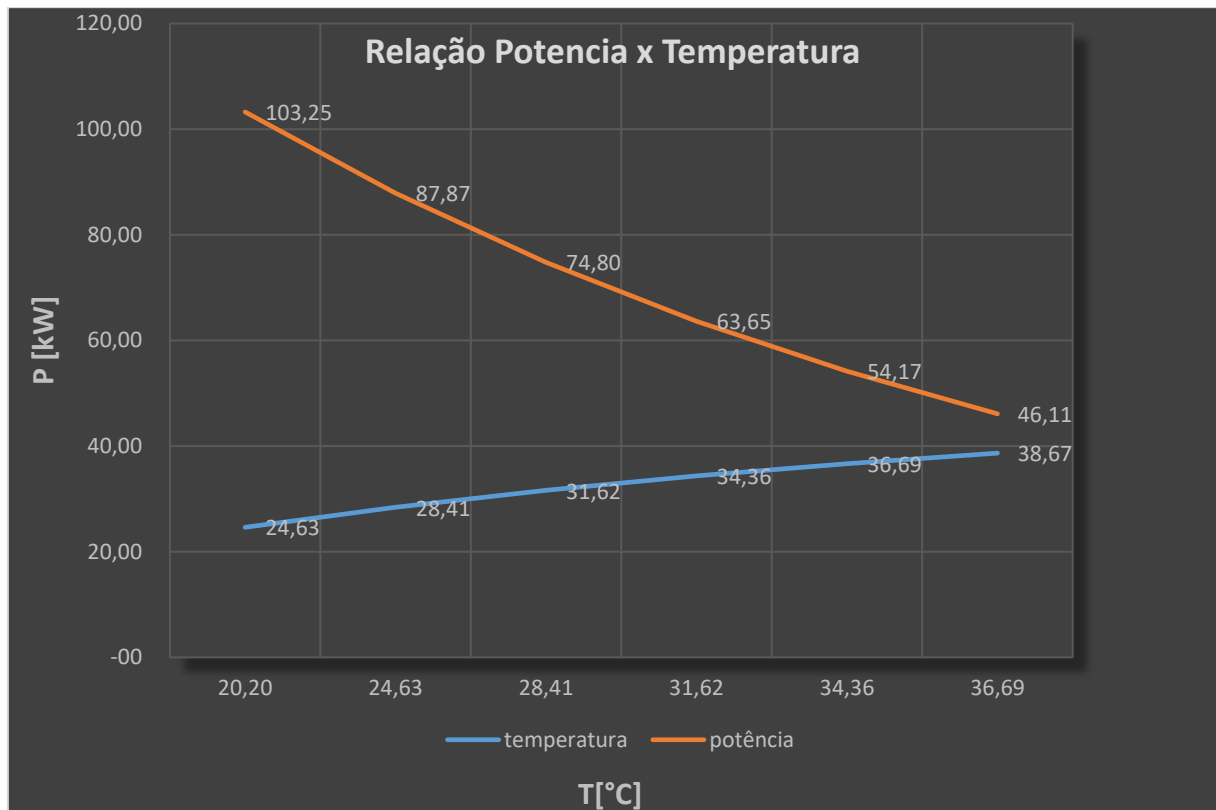


Figura 34: Gráfica da relação potência térmica fornecida pela temperatura de saída no trocador de calor circuito secundário. Fonte: produzido pelo autor.

3.2.4 Análise de custo de implantação

Foi realizada uma análise de custos de investimento do sistema solar para o abastecimento da residência e comparado com uso de sistema exclusivamente a gás.

O custo de implantação do sistema solar inclui o fornecimento de equipamentos, acessórios e a mão de obra de instalação no local (FIG35).

ITEM	EQUIPAMENTOS CENTRAL TÉRMICA BANHOS SOLAR 2x500 litros	QT	UNIT.	TOTAL
01	Boiler 500 litros em aço Inox 304, com fundo abaulado, entradas e saídas para sistema de circulação interna e externa com resistência 5KW	2	4.288,00	8.576,00
02	Aquecedor de passagem à gás da marca Rinnai modelo REU2802FEC1	2	4.582,80	9.165,60
03	Bomba de circulação interna entre aquecedores e entre coletores marca Rowa modelo 18/1 S	4	1.965,78	7.863,12
04	Bomba de circulação externa marca Rowa modelo 12/1S 220V	1	1.581,20	1.581,20
05	Painel Controlador de temperatura digital	1	3.901,50	3.901,50
06	Válvula de segurança 3/4 04kgf/cm ²	2	108,00	216,00
07	Válvula quebra vácuo, vaso de expansão	3	322,08	966,25
08	Tubulação em cobre e conexões	2	4.480,00	8.960,00
09	Coletor solar a vácuo	4	3.247,20	12.988,80
10	Trocador de calor SPE326/30	1	1.902,80	1.902,80
11	Válvula 3 vias automática 1 1/2"	1	876,15	876,15
TOTAL DE MATERIAL				R\$ 56.997,42

ITEM	EQUIPAMENTOS AQUECIMENTO SPA A GÁS	QT	PR. UNIT.	TOTAL
01	Painel de comando compreendendo contadores, relés térmicos, rele falta-de-fase, sinaleiros, controladores de temperatura digital e sensores	1	1.584,00	1.584,00
02	Trocador de calor de placas brasadas Inox para aquecimento SPE526-20	1	2.144,00	2.144,00
03	Bomba de circulação externa marca Rowa modelo 7/1S 220V	1	1.581,20	1.581,20
04	Vaso de expansão hidropneumático 24 litros	1	321,30	321,30
05	Válvula quebra-vácuo, válvula palheta – Fluxostato	1	663,40	663,40
06	Bomba de circulação de aquecimento solar Jacuzzi 5A-M	1	1.142,10	1.142,10
TOTAL EQUIPAMENTOS				R\$ 7.436,00

ITEM	DESCRIÇÃO SERVIÇOS	QT	UNIT.	TOTAL
01	Serviços para instalação e aferição de equipamentos	1	3.800,00	R\$ 3.800,00
TOTAL				R\$ 3.800,00

TOTAL CENTRAL TÉRMICA BANHOS				R\$ 56.997,42
TOTAL AQUECIMENTO SPA				R\$ 7.436,00
TOTAL SERVIÇOS				R\$ 3.800,00
TOTAL GLOBAL DA PROPOSTA				R\$ 68.233,42

Figura 35: Custos de implantação do SAS.

O custo de operação do sistema somente através de aquecedores de passagem a gás é calculado através da potência fornecida para demanda energética da edificação (tabela 11), descontadas as perdas devido o rendimento dos queimadores. Neste caso adotamos os mesmos aquecedores existentes para o apoio solar.

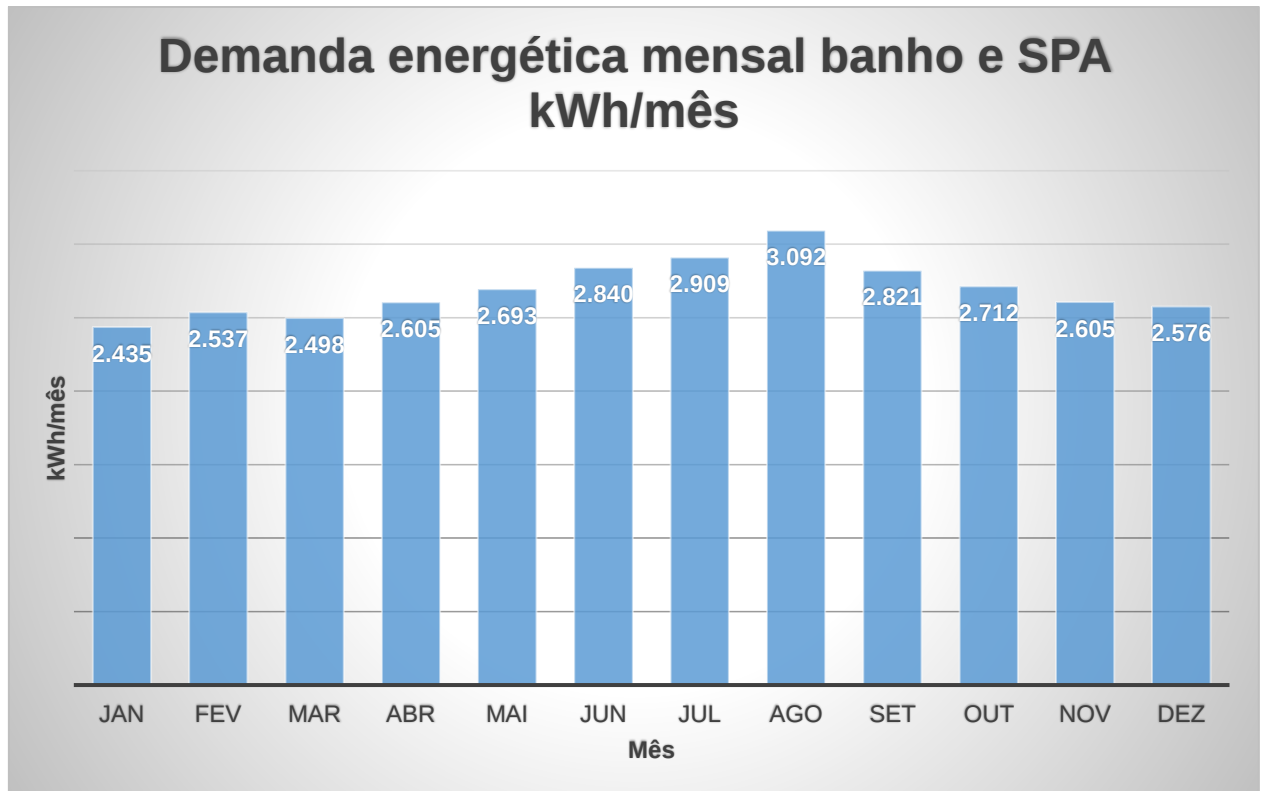


Tabela 11: Demanda mensal energética

O aquecedor de passagem Rinnai modelo REU2802FEC1 possui rendimento de 87% operando com gás GLP e tem potência nominal de 56,9kW e consumo de 4,13 kg/h. Segundo AALBORG INDUSTRIES o PCI para o gás GLP a 50% é:

$$PCI_{50\%} = 11.025 \text{ kcal/kg} = 12,82 \text{ kWh/kg} \quad (3.38)$$

Sabendo-se que o rendimento dos queimadores é de 87% a potência térmica do GLP é:

$$Potênciatérmica = 113,80 \times 0,87 = 99 \text{ kW} \quad (3.39)$$

O consumo anual da edificação é de 32.798,78 kWh/ano, ou seja, a potência térmica a ser atendida pelo sistema GLP.

$$Consumo_{GLP} = 99kW \times 331 \frac{h}{ano} = 32.798,78 \frac{kW}{ano} \quad (3.40)$$

Sabendo que o $PCI_{GLP} = 12,83 \text{ kWh/kg}$, o consumo anual de GLP:

$$Consumo_{GLP} em kg = 32.798,78 \frac{kW}{ano} \div 12,83 \frac{kWh}{kg} = 2.556 \frac{kg}{ano} \quad (3.41)$$

Levando-se consideração que a média do kg do GLP entregue a granel na edificação custa R\$6,23/kg, temos:

$$Custo_{GLP} anual = 2.556 \frac{kg}{ano} \times 6,23 \frac{R\$}{kg} = R\$ \frac{15.926,45}{ano} \quad (3.42)$$

A análise do fluxo de caixa tem como valor inicial o custo do investimento do sistema SAS (FIG35).

O valor presente líquido é calculado através de equação:

$$VLP = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{1+r^t} - IIO \quad (3.43)$$

Onde:

VLP = valor líquido presente

FC_t = fluxo de caixa para t

r = taxa de desconto

IIO = investimento inicial em t=0

Aplicando os valores em (3.43) temos:

Parâmetros Financeiros

Inv. Inicial Adicional	-R\$ 68.233	<u>Ilo</u>
Fluxo de Caixa	R\$ 15.926	<u>FLC</u>
Taxa de desconto	8%	<u>r</u>
Período (anos)	10	<u>n</u>

<u>Ano</u>	<u>FLC</u>	<u>FLCD</u>	<u>FLCA</u>
0	-68.233	-68.233	-68.233
1	15.926	14.747	-53.487
2	15.926	13.654	-39.832
3	15.926	12.643	-27.189
4	15.926	11.706	-15.483
5	15.926	10.839	-4.644
6	15.926	10.036	5.393
7	15.926	9.293	14.686
8	15.926	8.605	23.290
9	15.926	7.967	31.257
10	15.926	7.377	38.634

Tabela 12: Fluxo de caixa

O tempo de retorno do investimento através do Payback simples é de 4,3 anos com a taxa de retorno TIR de 19,4% (FIG15).

Resultado Financeiro

<u>Payback</u> simples	4,3 anos
<u>Payback</u> Descontado	5,4 anos
<u>VPL</u>	R\$ 38.634
<u>TIR</u>	19,4%

Tabela 13: Resultados de retorno do investimento.

O fluxo de caixa é representado na figura 36.

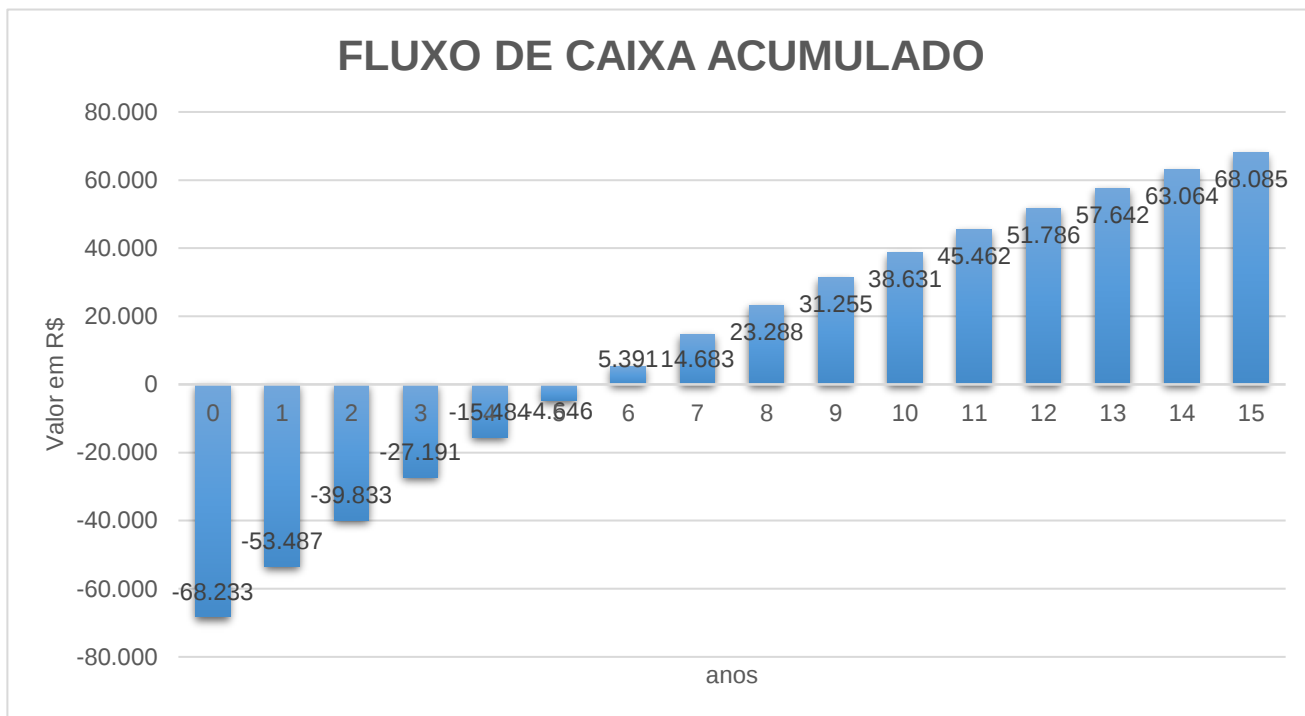


Figura 36: Fluxo de caixa acumulado.

4 CONCLUSÃO

O objetivo desta monografia foi apresentar diferentes usos da energia solar não somente para o aquecimento de água de banho, mas o aproveitamento da energia ociosa para o aquecimento de outros processos, como o caso da banheira de uso recreativo.

Conforme exposto na revisão bibliográfica a instalação de sistemas de aquecimento de água solar deve seguir parâmetros mínimos de dimensionamento. Um estudo minucioso das necessidades de cada instalação e suas condições locais. A utilização do método da Carta F se justifica no refinamento do cálculo da fração solar para diferentes períodos do ano, onde as temperaturas ambientes podem sofrer variações bruscas durante as estações do ano. Este método permite adequar o ganho térmico as áreas disponíveis para os coletores solares, onde muitas vezes se torna o pré-requisito para a viabilização de projetos, principalmente devido a arquitetura da edificação.

Após as análises de ganho através do retorno financeiro do investimento nota-se ser vantajoso o uso da energia solar na substituição parcial por combustíveis fósseis na geração térmica tanto para banho como para aquecimento de outros sistemas.

Como continuidade deste estudo está a sugestão de utilização da energia térmica solar também para as demais áreas da edificação, como cozinha e dependências de empregados, uma vez que o sistema atual não contempla estas áreas.

5 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) — Sistemas solares térmicos e seus componentes NBR 15747-1 2009. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - **Sistemas solares térmicos e seus componentes – Coletores solares parte 2**. NBR 15747-2:2009. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - **Sistemas de aquecimento solar de água em circuito direto**. NBR 15569: 2008. Rio de Janeiro, 2008

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – **Reservatórios térmicos para líquidos destinados a sistemas de energia solar**. NBR 10185: 2013. Rio de Janeiro, 2013.

ÇENGEL, Y.A.; BOLES, M.A.; **Termodinâmica**; AMGH Editora, 2013 7^a. ed.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, A. **Solar Energy of Thermal Processes**. John Wiley & Sons, New York.

INCOPERA F.P., et Al.; **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**; Rio de Janeiro, LTC Editora, 2016 7^a. ed.

MALUF, C. A. –**Desempenho Energético e Caracterização dos Sistemas de Aquecimento de Água de Piscinas** – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F.R.; ABREU, S. L.; RUTHER, R. V. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2ª. ed. São José dos Campos. INPE, 2017.

PROENÇA, E. D. **A energia solar fotovoltaica em Portugal**. Universidade Técnica em Lisboa. Lisboa, 2007.

SPRENGER, R. L. **Aplicação do Sistema Fechado no Aquecedor Solar de Água de Baixo Custo para Reservatórios Residenciais Isolados Termicamente: concepção e comissionamento de um sistema-piloto de testes**. Universidade Federal do Paraná: Curitiba, 2007.

ANEXO A

Memória de cálculo método Carta F.

Mês	Número dias	Ht kWh/m².dia	Ht MJ/m².dia	Tamb	Tm	L	x	xc1	xc2	y	f	Fi * Li	
JAN	31	4,37	15,73	22,90	22,50	2,57	1,75	2,10	2,08	1,78	1,05	2,70	
FEV	28	4,91	17,68	23,20	23,05	2,25	1,80	2,20	2,18	2,06	1,14	2,56	
MAR	31	4,69	16,88	22,40	22,80	2,53	1,79	2,19	2,16	1,94	1,10	2,78	
ABR	30	4,74	17,06	21,00	21,70	2,60	1,71	2,04	2,01	1,84	1,08	2,80	
MAI	31	4,41	15,88	18,20	19,60	3,00	1,59	1,80	1,78	1,54	0,97	2,92	
JUN	30	4,34	15,62	17,10	17,65	3,18	1,47	1,55	1,53	1,38	0,92	2,91	
JUL	31	4,36	15,70	16,70	16,90	3,40	1,43	1,47	1,45	1,34	0,90	3,07	
AGO	31	5,12	18,43	17,70	17,20	3,35	1,43	1,47	1,45	1,60	1,02	3,41	
SET	30	4,41	15,88	18,50	18,10	3,12	1,48	1,55	1,54	1,43	0,94	2,93	
OUT	31	4,37	15,73	20,00	19,25	3,05	1,53	1,66	1,64	1,50	0,96	2,94	
NOV	30	4,4	15,84	21,20	20,60	2,76	1,61	1,82	1,80	1,61	1,00	2,77	
DEZ	31	4,62	16,63	22,10	21,65	2,70	1,69	1,97	1,95	1,79	1,06	2,86	
					Σ Li	34,52						Σ fi * Li	34,64