



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS



OLINTO EVARISTO DA SILVA JÚNIOR

**ANÁLISE ENERGÉTICA DE UM SISTEMA HÍBRIDO SOLAR/GÁS
PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA EM UM EDIFÍCIO EM JOÃO PESSOA**

JOÃO PESSOA – PB

2020

OLINTO EVARISTO DA SILVA JÚNIOR

**ANÁLISE ENERGÉTICA DE UM SISTEMA HÍBRIDO SOLAR/GÁS
PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA EM UM EDIFÍCIO EM JOÃO PESSOA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em Sistemas de Energias Renováveis, para a obtenção do grau de Mestre.

Orientador

Prof. Dr. João Alves de Lima

Coorientador

Prof. Dr. Jesus Marlinaldo de Medeiros

JOÃO PESSOA – PB
2020

OLINTO EVARISTO DA SILVA JÚNIOR

**ANÁLISE ENERGÉTICA DE UM SISTEMA HÍBRIDO SOLAR/GÁS
PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA EM UM EDIFÍCIO EM JOÃO PESSOA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em Sistemas de Energias Renováveis, para a obtenção do grau de Mestre.

Aprovado em ____ de _____ de 2020

Prof. Dr. João Alves de Lima
Universidade Federal da Paraíba (UFPB)
Orientador

Prof. Dr. Jesus Marlinaldo de Medeiros
Instituto Federal da Paraíba (IFPB)
Coorientador

Prof. Dr. José Maurício Alves de Matos Gurgel
Universidade Federal da Paraíba (UFPB)
Examinador Interno

Prof. Dr. Fabiano Cordeiro Cavalcanti
Universidade Federal da Paraíba (UFPB)
Examinador Externo

JOÃO PESSOA – PB
2020

AGRADECIMENTOS

Ao Criador de todas as coisas e merecedor de toda honra e toda glória, Deus. O único que era, que é e que há vir.

Aos meus pais e familiares pelos constantes apoios e palavras de incentivos, as quais não me deixaram pensar em desistir ou se quer fraquejar nessa caminhada.

Ao meu estimado orientador professor Dr. João Alves de Lima, pela orientação, ensinamentos, correções, amizade e disposição em compartilhar de todo seu conhecimento.

Ao meu coorientador professor Dr. Jesus Marlinaldo de Medeiros, que sempre esteve à disposição e nunca mediu esforços para que eu pudesse crescer academicamente.

Ao meu tio Rusk (*in memoria*) que foi um dos maiores impulsionadores de pessoas que eu já conheci, sempre proferindo palavras otimistas e incentivadoras muito antes de eu iniciar minha vida acadêmica.

Aos amigos Álan, Raniê, Daniel, Ítalo, Isaac, Arturo, Nyara, Ingrid, Maria Luíza, e tantos outros, pelos vários momentos divertidos, discussões acadêmicas onde cada um defendia sua fonte renovável, mas que todas as vezes terminavam em boas gargalhadas. Todo esse tempo em que passamos juntos fez com que os obstáculos a nós impostos fossem sendo superados.

Aos professores, por terem aceitado fazer parte da banca examinadora.

A todos que, diretamente e indiretamente, contribuíram para a execução deste trabalho.

S586a Silva Júnior, Olinto Evaristo da.

Análise energética de um sistema híbrido solar/gás para aquecimento de água em um edifício em João Pessoa / Olinto Evaristo da Silva Júnior. - João Pessoa, 2020. 120 f. : il.

Orientação: João Alves de Lima.

Coorientação: Jesus Marlinaldo de Medeiros.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Energias renováveis. 2. Energia solar. 3. Aquecedores a gás. 4. Eficiência térmica. 5. Método F-Chart. 6. Aquecimento de água. I. Lima, João Alves de. II. Medeiros, Jesus Marlinaldo de. III. Título.

UFPB/BC

CDU 620.91(043)

RESUMO

O esgotamento das reservas energéticas de origem fóssil intensificou o interesse por fontes renováveis de energia, como a energia solar. O aquecimento solar de água representa uma tecnologia ambientalmente limpa, de fonte energética abundante, permanente, renovável, e que não polui nem prejudica o ecossistema. O uso desse tipo de sistema, quando instalado em edificações residenciais, reflete numa redução significativa no consumo elétrico residencial. Sob esse panorama, a presente dissertação foi proposta para avaliar um sistema de aquecimento híbrido (solar/gás) de água em um edifício residencial na cidade de João Pessoa em duas situações. Inicialmente, na configuração do projeto original a partir de dados disponíveis (2012-2013) com recirculação da água da prumada do edifício e posteriormente na configuração atual via dados coletados (2018-2019) sem recirculação da água da prumada, com desvio para a cisterna. Também foi substituído o combustível do sistema auxiliar no projeto original, GLP (gás liquefeito de petróleo), por gás natural (GN) na configuração atual. Portanto, uma análise energética foi desenvolvida para verificar o desempenho do sistema atual comparado ao sistema original. Os resultados obtidos, via método F-Chart, mostram que, como era de se esperar, o desempenho do sistema atual diminuiu, provocando um maior consumo de água quente e de gás (devido à maior demanda e menor poder calorífico do GN em relação ao GLP). Para o desenvolvimento das análises, foi realizado um levantamento de dados do sistema (temperatura e vazão em pontos característicos do sistema híbrido) para os quatro anos estudados. Verificou-se que, independente da configuração estudada, o sistema de aquecimento solar (SAS) híbrido, solar/gás, pode substituir o sistema convencional (chuveiros elétricos), implicando na redução do consumo e do custo elétrico, pela diminuição da demanda de energia elétrica no horário de ponta e pelos efeitos favoráveis ao meio ambiente, garantindo a sustentabilidade. No entanto, para que as vantagens do SAS sejam aproveitadas, os problemas associados às suas condições operacionais e de controle devem ser minimizados, de maneira que o consumo de gás do sistema auxiliar seja monitorado para evitar perdas de energia e avaliar o custo energético do sistema híbrido instalado, pois apenas o controle da temperatura de água quente não garante a operação eficiente com mínimo de perdas energéticas.

Palavras Chave: aquecimento de água; energia solar; edifício residencial; eficiência térmica; *f-chart*.

ABSTRACT

The depletion of energy reserves of fossil origin has intensified interest in renewable energy sources, such as solar energy. Solar water heating represents an environmentally clean technology, with an abundant, permanent, renewable energy source, which does not pollute or harm the ecosystem. The use of this type of system, when installed in residential buildings, reflects a significant reduction in residential electrical consumption. In this context, the present dissertation was proposed to evaluate a hybrid heating system (solar / gas) for water in a residential building in the city of João Pessoa in two situations. Initially, in the configuration of the original project from available data (2012-2013) with recirculation of water from the plumb of the building and later in the current configuration via collected data (2018-2019) without recirculation of plumb water, with diversion to the cistern. The auxiliary system fuel in the original project, LPG (liquefied petroleum gas), was also replaced by natural gas (NG) in the current configuration. Therefore, an energy analysis was developed to verify the performance of the current system compared to the original system. The results obtained, via the F-Chart method, show that, as expected, the performance of the current system has decreased, causing a greater consumption of hot water and gas (due to the greater demand and lower calorific power of NG in relation to the GLP). For the development of the analyzes, a survey of system data (temperature and flow at characteristic points of the hybrid system) was carried out for the four years studied. It was found that, regardless of the configuration studied, the hybrid solar heating system (SAS), solar / gas, can replace the conventional system (electric showers), implying a reduction in consumption and electrical cost, by decreasing energy demand during peak hours and for the favorable effects on the environment, ensuring sustainability. However, in order for the advantages of SAS to be taken advantage of, the problems associated with its operational and control conditions must be minimized, so that the gas consumption of the auxiliary system is monitored to avoid energy losses and assess the energy cost of the system. hybrid installed. Evidencing that, only the hot water temperature control does not guarantee efficient operation with minimum energy losses.

Keywords: Water heating. Solar energy. Residential building. Thermal efficiency. F-chart

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de equipamentos/tecnologias para banho quente	24
Figura 2 - Coletores solares para aquecimento de água	26
Figura 3 - Principais componentes de um coletor de placas planas	27
Figura 4 - Características construtivas de um coletor solar de placas planas	27
Figura 5 - Espectro da radiação solar terrestre	32
Figura 6 - Componentes da radiação	33
Figura 7 - Ângulos associados ao movimento do sol e à relação sol-superfície	35
Figura 8 - Localização do edifício e do sistema de aquecimento solar de água	50
Figura 9 - Representação esquemática do SAS estudado	52
Figura 10 - Arranjo do sistema de aquecimento solar na cobertura do edifício	52
Figura 11 - Representação esquemática do SAS com modificação	53
Figura 12 - Especificações da família de coletores Porto Seguro da Transsen	55
Figura 13 - Parte dos coletores TRANSSSEN, modelo Porto Seguro v2.0, instalados no edifício	55
Figura 14 - Visão geral do Boiler TRANSSSEN 5.000	56
Figura 15 - Boilers instalados em série na cobertura do edifício	57
Figura 16 - Características Técnicas do Aquecedor de Passagem REU-157	58
Figura 17 - Aquecedores RINNAI, modelo REU-157 BRS GLP	59
Figura 18 - Bombas SCHNEIDER que compõem o sistema de aquecimento	59
Figura 19 - Controlador de temperatura e sistema de aquisição de dados. Disposição na instalação	60
Figura 20 - Esquema simplificado dos fluxos energéticos do SAS híbrido	91
Figura 21. Dinâmica das temperaturas dos pontos principais do SAS ao longo do dia (Dados de 20/10/2013)	98
Figura 22 - Dinâmica das temperaturas dos pontos principais do SAS ao longo do dia (Dados de 02/12/2013)	99
Figura 23 - Perfil atípico das temperaturas nos pontos de controle do SAS híbrido (Medidas de 02/07/2013)	100

Figura 24 - Perfil atípico das temperaturas nos pontos de controle do SAS híbrido (Medidas de 22/07/2013)	101
Figura 25 - Perfil atípico das temperaturas nos pontos de controle do SAS híbrido (Medidas de 15/11/2013)	102
Figura 26 - Perfil atípico das temperaturas nos pontos de controle do SAS híbrido (Medidas de 16/11/2013)	102
Figura 27 - Perfil atípico das temperaturas nos pontos de controle do SAS híbrido (Medidas de 19/11/2013)	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Demanda de água teórica e real (dados de consumo de água de 2012, 2013, 2018 e 2019)	64
Tabela 2 - Demanda total de energia, teórica e real (dados de consumo de água teórica e de 2012, 2013, 2018 e 2019).....	67
Tabela 3 - Dias médios recomendados e valores de n para cada mês	70
Tabela 4 - Dados climatológicos para a cidade de João Pessoa	71
Tabela 5 - Dados de radiação mensal média para a localização estudada	73
Tabela 6 - Potência de aquecimento requerida dos aquecedores a gás	75
Tabela 7 - Volume de água aquecida a ser armazenada nos tanques	78
Tabela 8 - Fração da energia, teórica e real, a ser fornecida pela fonte solar	79
Tabela 9 - Rendimento do coletor e irradiação absorvida pelo sistema acumulador/coletor	82
Tabela 10 - Valores calculados para as áreas e número de coletores	83
Tabela 11 - Fração solar avaliada pelo método F-Chart (Teórica, 2012 e 2013)	87
Tabela 12 - Fração solar avaliada pelo método F-Chart (2018 e 2019)	87
Tabela 13 - Fração solar avaliada pelo método F-Chart	89
Tabela 14 - Fração solar avaliada pelo método F-Chart (Teórica, 2012 e 2013 – área de coletores instalada)	90
Tabela 15 - Fração solar avaliada pelo método F-Chart (2018 e 2019 – área de coletores instalada)	90
Tabela 16 - Volume e energia associados ao GLP (Teórico, 2012 e 2013)	93
Tabela 17 - Volume e energia associados ao GN (Teórico, 2018 e 2019)	93
Tabela 18 - Fração solar, fração solar (gás) e rendimento térmico (Teórico, 2012, 2013, 2018 e 2019)	96

LISTA DE SÍMBOLOS

c_p	Calor específico da água [J/kg.°C]
f	Fração solar [adimensional]
F_R	Fator de remoção de calor [adimensional]
$F_R U_L$	Produto relativo à perda de calor pelo coletor [W/m ² /°C]
$\frac{F'_R}{F_R}$	Fator de correção térmica [adimensional]
$F_R (\tau\alpha)_n$	Produto relativo à absorção de calor pelo coletor [adimensional]
G	Irradiância [W/m ²]
G_{sc}	Constante solar [W/m ²]
G_t	Radição solar incidente [W/m ²]
h_{aquec}	Tempo de uso dos aquecedores [horas]
h_{sol_T}	Número médio de horas de brilho de sol durante o dia característico sobre a superfície inclinada [horas]
H	Irradiação [J/m ²]
\bar{H}	Radiação solar média mensal sobre uma superfície horizontal [MJ/m ² /dia]
\bar{H}_d	Radiação solar média mensal difusa [MJ/m ² /dia]
\bar{H}_T	Radiação solar média mensal sobre uma superfície inclinada não sombreada [MJ/m ² /dia]
$\bar{H}_{T_ano_abs}$	Energia útil da fonte solar absorvida na placa do coletor [MJ/mês]
\bar{H}_0	Radiação solar média mensal extraterrestre sobre uma superfície horizontal [MJ/m ² /dia]
$K_{\tau\alpha}$	Fator de correção ótico [adimensional]
\bar{K}_T	Índice de claridade médio mensal [adimensional]

\dot{m}	Vazão mássica constante [kg/s]
N_{acc}	Número de acumuladores [unidade]
N_{aquec}	Número de aquecedores [unidade]
Pot_{aquec}	Potência do sistema auxiliar [kW/mês]
Pot_{min}	Potência mínima de aquecimento [kW]
\dot{Q}_u	Potência útil do sistema [W]
\bar{R}	Razão entre a radiação solar mensal sobre uma superfície inclinada e sobre uma superfície horizontal [adimensional]
\bar{R}_b	Razão entre a radiação diária média sobre uma superfície inclinada e àquela sobre uma superfície horizontal para um determinado mês [adimensional]
T_a	Temperatura ambiente [°C]
T_i	Temperatura de entrada do fluido [°C]
T_o	Temperatura de saída de fluido [°C]
T_{ref}	Temperatura de referência [°C]
V_{acc}	Volume de acumulação [m ³]
X	Razão entre a energia mensal perdida pelo coletor e a carga de aquecimento mensal requerida [adimensional]
Y	Razão da energia solar total absorvida pela carga total de aquecimento ou demanda durante o mesmo período [adimensional]
(U_L)	Coefficiente global de perda do coletor [W/m ² /°C]

LISTA DE LETRAS GREGAS

α_s	Ângulo de altitude solar [°]
β	Inclinação [°]
γ	Ângulo de azimute de superfície [°]
γ_s	Ângulo de azimute solar [°]
δ	Declinação solar [°]
Δt	Intervalo de tempo do mês [s]
η	Eficiência térmica instantânea [adimensional]
$\eta_{teórico}$	Eficiência térmica teórica [adimensional]
θ	Ângulo de incidência [°]
θ_z	Ângulo zênite [°]
ρ_g	Refletância do solo [adimensional]
Φ	Latitude [°]
ω	Ângulo horário [°]
ω_s	Ângulo da hora do pôr do sol [°]
$(\tau\alpha)_n$	Produto transmitância-absortância do sistema cobertura/absorvedor [adimensional]
$\frac{(\overline{\tau\alpha})}{(\tau\alpha)_n}$	Fator de correção de inclinação do coletor [adimensional]

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	Energias renováveis	17
1.2	Usos da energia solar	18
1.3	Benefícios do uso de sistemas solares	18
1.4	Objetivos.....	19
1.4.1	Objetivo geral.....	19
1.4.2	Objetivos específicos	19
1.5	Limitações do Estudo.....	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
2.1	Introdução	22
2.2	Panorama Mundial da Energia Solar Térmica	29
2.3	Panorama Brasileiro da Energia Solar Térmica	30
2.4	Fundamentos de Radiação Solar	31
2.4.1	O Sol.....	31
2.4.2	Nomenclatura da radiação solar.....	32
	– Radiação direta	32
	– Radiação difusa	33
	– Radiação total	33
	– Irradiância: G (W/m^2).....	33
	– Irradiação: H, I (J/m^2).....	33
2.4.3	Direção da radiação direta: ângulos solares	34
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	37
4	INFORMAÇÕES DE PROJETO.....	50
4.1	Localização	50
4.2	O sistema de aquecimento de água	51
4.2.a	Modificação do sistema original	53
4.3	Elementos principais do sistema	53
4.3.1	Painéis solares: Coletor solar de placa plana (FPC).....	53
4.3.2	Reservatório de água quente: <i>Boiler</i>	56
4.3.3	Aquecedores de passagem	57
4.3.4	Bombas centrífugas	59
4.3.5	Sistema de aquisição de dados e controladores de temperatura	60
5	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA.....	62
5.1	Cálculo da demanda de água quente	62

5.2	Cálculo da demanda de energia	65
5.3	Cálculo da radiação solar (Duffie e Beckman, 1991).....	68
5.4	Dimensionamento do SAS com aquecimento auxiliar	74
	5.4.1 Aquecedores a Gás	74
	5.4.2. Reservatórios Térmicos	76
	5.4.3. Coletores Solares	78
	5.4.3.a Fração solar: Valor mínimo especificado (Herranz, 2009)	79
	5.4.3.b Fração solar: Método F-Chart (Duffie e Beckman, 2006)	84
5.5	Rendimento do Sistema: SAS com aquecimento a gás.....	91
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	106
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108

1 INTRODUÇÃO

1.1 Energias renováveis

Com o avanço do conhecimento tecnológico e o crescimento avassalador da população mundial, o consumo de energia tem aumentado continuamente, principalmente em países como Japão, China e Indonésia, cujos números de habitantes por metro quadrado é elevadíssimo. Basicamente, a produção mundial de energia é proveniente de combustíveis fósseis (petróleo, carvão, etc), o que vem agravando o aquecimento global e, por sua vez, ocasionando diversos problemas ambientais. O rápido aumento da demanda de petróleo nas décadas de 1950 e 1960, por exemplo, ocorreu principalmente pela elevada produção a custo muito baixo no Oriente Médio e no norte da África. Para os países consumidores, o petróleo importado era mais barato em comparação com a produção interna de energia advinda de combustíveis sólidos (Kalogirou, 2016).

Como alternativa de minimizar a dependência dos combustíveis fósseis, pesquisadores e governos buscam elevar a eficiência de uso e baratear os custos de desenvolvimento e utilização de novas fontes de energias, as chamadas Energias Renováveis. Muitas fontes de energias alternativas podem ser usadas no lugar de combustíveis fósseis. A decisão sobre qual tipo de fonte deve ser utilizada em cada caso precisa se basear na economia, no meio ambiente e em considerações acerca da segurança. Devido ao impacto desejável ao meio ambiente e aos aspectos de segurança, é amplamente acreditado que a energia solar deveria ser utilizada no lugar de outras formas de energia alternativa, porque ela pode ser fornecida de modo sustentável e sem agredir o meio ambiente (Kalogirou, 2016).

Basicamente, todas as formas de energias no mundo que conhecemos (eólica, hídrica, solar, energia das ondas, energias das marés) podem ser consideradas como advindas direta ou indiretamente do sol. Apenas a energia solar vem diretamente da radiação solar, o resto é obtida da energia solar de forma indireta. A energia eólica não existirá se o sol não aquecer o ar, criando assim a diferença de pressão entre as massas de ar que, por sua vez, produz os fluxos de ventos que fazem com que as pás dos aerogeradores sem movimentem, gerando assim, energia. No caso da energia hídrica, o calor solar faz com que a água evapore, formando nuvens que são movidas pela energia eólica e, depois, quando acumulada nas nuvens, volte à superfície terrestre em forma de chuva ou neve. Quando as precipitações ocorrem em rios, os fluxos de água são formados e, então, estes cursos podem ser represados para obtenção de energia. Na energia das ondas, a captação ocorre pelo aproveitamento do movimento realizado pelas mesmas, não sendo nada mais

são do que a energia eólica incidindo na superfície de um corpo hídrico criando assim um deslocamento de massa que movimenta um conversor de energia. Finalmente, a energia das marés não é produzida somente pelo sol. As correntes de marés são produzidas pela lua e pelo sol em combinação, ainda, com o movimento de rotação da terra.

1.2 Usos da energia solar

Atualmente, a energia solar tem sido aplicada em diversas áreas, desde aplicações no campo, na agricultura, até estruturas multifamiliares, na geração de iluminação, refrigeração de espaços e no aquecimento de água. Mais recentemente, a energia solar vem sendo utilizada em um campo de engenharia mais avançada, nos denominados veículos solares. Também, no campo da química, tem-se estudado a aplicação da energia solar como agente impulsionador de reações químicas.

Hoje em dia, os dois principais ramos da energia solar são o da energia solar fotovoltaica e da energia solar térmica. Estes são os mais importantes, tanto na indústria quanto em edifícios residenciais, neste caso objeto do presente estudo.

1.3 Benefícios do uso de sistemas solares

Os sistemas solares, incluindo os sistemas termosolares e os sistemas fotovoltaicos, oferecem vantagens para o meio ambiente sobre o uso de fontes de energia convencionais para a geração de energia. Os benefícios decorrentes da instalação e operação dos sistemas de energia solar se dividem em duas categorias principais: as questões ambientais e as questões socioeconômicas, de acordo com Kalougirou (2014).

De um ponto de vista ambiental, o uso das tecnologias de energia solar tem várias implicações positivas que incluem (Abu-Zour; Riffat, 2006):

- Redução de emissão dos Gases do Efeito Estufa (GEE's), principalmente o CO₂ e o N₂O, e de emissão de gases tóxicos (particularmente o SO₂);
- Recuperação de áreas degradadas;
- Exigência reduzida para linhas de transmissão dentro da rede elétrica;
- Melhoria da qualidade dos recursos hídricos.

Os benefícios socioeconômicos das tecnologias solares incluem:

- Aumento da independência energética nacional e regional;
- Criação de oportunidade de emprego;
- Reestruturação do mercado de energia, devido à penetração de uma nova tecnologia e o crescimento de novas atividades de produção;
- Diversificação e segurança (estabilidade) de fornecimento de energia;
- Aceleração da eletrificação de comunidades rurais em áreas isoladas;
- Economia de moeda estrangeira.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem por objetivo geral de avaliar um sistema de aquecimento híbrido (solar/gás) de água em um edifício multifamiliar localizado na cidade de João Pessoa/PB, através da análise de projeto e operação, estudos das dificuldades observadas no monitoramento, operação e manutenção do sistema.

1.4.2 Objetivos específicos

Visando atingir o objetivo geral, os objetivos específicos são:

- Compreender e analisar os processos envolvidos no sistema de aquecimento de água com energia solar e gás para edifícios residenciais;
- Determinar as necessidades (demandas) de aquecimento em um edifício específico de uso multifamiliar;
- Aplicar a metodologia de projeto denominada *F-Chart* para elaboração de um projeto teórico de um sistema de aquecimento com energia solar e gás para esse edifício;
- Levantar dados de projeto e de operação do sistema real de aquecimento de água com energia solar e gás implantado nesse edifício;
- Determinar e comparar as eficiências dos sistemas, teórico e implementado, de aquecimento de água com energia solar e gás para esse edifício;
- Comparar os resultados obtidos do biênio 2012-2013 com o biênio 2018-2019, os quais se caracterizam por uma mudança do sistema de recirculação e do tipo de combustível (GLP para GN) no sistema de aquecimento instalado no edifício.

1.5 Limitações do Estudo

Existem duas limitações principais diretamente relacionadas ao projeto analisado. A primeira delas ocorre em relação ao espaço físico do sistema. Pelo fato do projeto pré-existente ter sido concebido na cobertura de um edifício residencial, a delimitação fixa de espaço físico não permite o acréscimo de peças em nenhum dos componentes do sistema em questão.

A segunda limitação está relacionada aos dados de entrada para o desenvolvimento dos cálculos. A escassez de dados atualizados, como temperatura de entrada da água nos coletores, radiação e quantidade de horas de radiação solar, faz com que a análise energética e operacional sejam diretamente afetadas, bem como o rendimento dos coletores e, por sua vez, a área de absorção.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Introdução

A demanda por energia no nosso planeta deve aumentar em torno de 30% até 2040, devido ao crescimento da economia global a uma taxa média de 3,4% ao ano; expansão da população de 7,4 bilhões hoje para mais de 9 bilhões em 2040 e um processo de urbanização que agrega uma cidade do tamanho de Xangai para a população urbana mundial a cada quatro (Dias, 2018).

Com recentes desenvolvimentos de novas tecnologias e a tendência do uso de energia sustentável através de fontes renováveis, tornou-se, assim, uma prioridade, seja para fins industriais, usos domésticos ou pesquisa científica (Baddou, 2017). O aproveitamento da energia solar, sob a forma de energia térmica ou de energia fotovoltaica, é uma das alternativas energéticas mais promissoras para enfrentar os desafios do novo milênio garantindo a sustentabilidade.

Nessa perspectiva, várias pesquisas em diversos países comprovam a viabilidade técnico-econômica do uso de aquecedores solares de água, comparativamente às opções de aquecimento elétrico e a gás para reduzir o consumo energético no setor residencial.

O Brasil exibe um dos maiores potenciais do mundo de utilização de energia solar, principalmente pelo fato de ser um país de dimensões continentais e situar-se quase que inteiramente numa região tropical, em especial a região Nordeste, onde há presença do sol praticamente o ano inteiro. De acordo com Salamoni; Rütther (2007), a região menos ensolarada do Brasil apresenta índices solares em torno de 1642 kWh/m²/ano, que estão acima dos valores apresentados na área de maior incidência solar da Alemanha, a qual recebe cerca de 1300 kWh/m²/ano e apesar de apresentar melhores condições climatológicas, na comparação mercadológica, o Brasil está a atrás do país europeu. Portanto, a utilização de energia solar para aquecimento de água em edifícios deve ser incentivada, sendo, assim, o foco para o desenvolvimento do presente trabalho.

Segundo dados do relatório “Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil – Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso”, o aquecimento da água para o banho era realizado em 80,9% do total de domicílios brasileiros, através de diferentes processos. Deste total, 73,5% dos sistemas de aquecimento utilizavam energia elétrica, 5,9% utilizavam gás e apenas

0,4% utilizavam aquecimento solar. Os chuveiros elétricos representavam 99,6% do total dos sistemas de aquecimento de água para banho (MME, 2011).

O uso de energia solar em edifícios tem sido estimulado no país pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), realizado pelo Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), uma ação do governo brasileiro para promoção do uso eficiente de energia elétrica e combate de seu desperdício, em parceria com o INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia). Atualmente, a certificação de eficiência energética de edificações é voluntária no país e destinada a edifícios residenciais, comerciais, públicos e de serviços, mas a tendência é que em alguns anos torne-se obrigatória (Fossati; Lamberts, 2010).

A utilização da energia solar térmica como fonte principal no aquecimento de água do banho em substituição ao chuveiro elétrico, gera benefícios para os consumidores, concessionárias de energia elétrica, governo e o meio ambiente (Vasconcellos; Limberger, 2012). Estima-se que o aquecimento de água é responsável por 25% do total de energia elétrica consumida nas residências brasileiras, o que representa um consumo da ordem de 20 bilhões de kWh (EPE, 2015). Tal demanda de energia elétrica ocorre principalmente no fim da tarde, ocasionando um pico que poderia ser reduzido em grande parte com a exploração da energia solar.

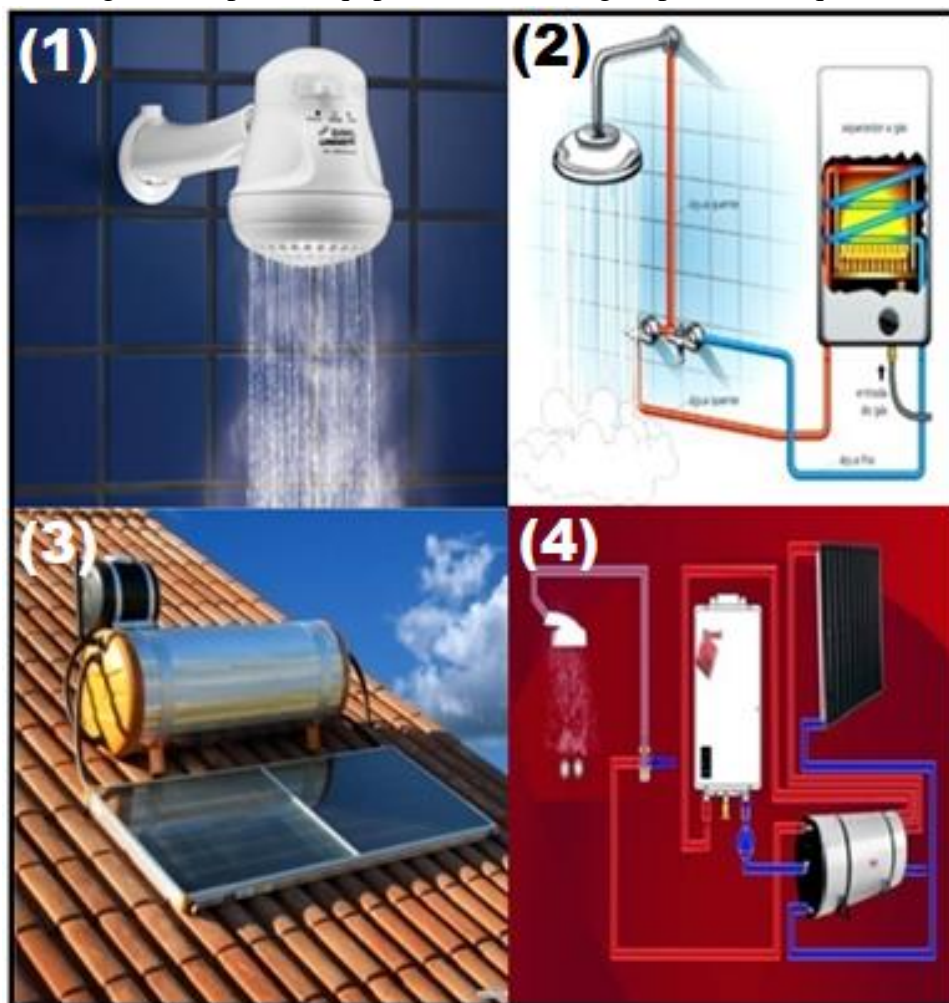
O PROCEL estima que existam mais de 30 milhões de chuveiros elétricos instalados no Brasil. Esses equipamentos, além de consumirem cerca de 8% de toda a eletricidade produzida no país, são responsáveis por aproximadamente 18% do pico de demanda do sistema elétrico nacional. De maneira mais clara, significa dizer que 18% da capacidade instalada de geração elétrica no Brasil é dedicada somente para ligar o chuveiro elétrico no horário de ponta. Isto significa uma potência total de 18 GW, o que equivale em 2014 a Itaipu (14 GW) e mais um conjunto de termelétricas de mais 4 GW construídas somente para ligar o chuveiro elétrico e perpetuar um modelo complexo de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica para aquecer água a 40 °C (Georgi, 2015). Estes números evidenciam a importância estratégica dos aquecedores solares devido ao fato de reduzirem a demanda de energia nos horários críticos do dia.

Segundo o Departamento Nacional de Energia Solar Térmica, DASOL, vinculado à Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento (ABRAVA), nosso país dispõe, atualmente, de aproximadamente 6,0 milhões de residências que possuem equipamentos para aquecimento solar, número que levou o Brasil a ocupar a terceira posição no *ranking* mundial de aquecedores solares, atrás da Turquia, em segundo, e da líder China (com

cerca de 145 milhões de metros quadrados de coletores, cerca de 60% da base mundial instalada Georgi (2015)).

Sistemas de aquecimento de água diferem entre si sobre diferentes aspectos. O chuveiro elétrico é o que apresenta o menor custo de implantação, seguido dos aquecedores a gás de passagem, aquecedores elétricos de acumulação, aquecedores a gás de acumulação e, por último, o aquecimento com energia solar. A Figura 1 representa as principais tecnologias para aquecimento de água desde o chuveiro elétrico (1), aquecedor de passagem a gás (2), aquecimento solar (3) e aquecimento híbrido (solar/gás, 4).

Figura 1. Tipos de equipamentos/tecnologias para banho quente



(Fonte: Internet)

O custo de operação associado a cada tecnologia é função do preço do combustível utilizado, da eficiência do sistema de aquecimento e do perfil de consumo. Uma característica inerente aos sistemas de aquecimento solar, em relação aos demais, é a sua necessidade de uma fonte auxiliar de energia para suprir a demanda de água quente em dias de baixa radiação solar.

O uso de sistemas de aquecimento solar de água vem crescendo significativamente, e os sistemas domésticos de aquecimento sejam, talvez, a aplicação mais popular da tecnologia solar (Kalogirou, 2016). Em nível mundial, a capacidade global instalada de energia solar térmica para aquecimento de água chegou a 325,9 GWh (Renewable Energy Policy Network, 2014), ou 465,6 milhões de metros quadrados de coletores solares. Os cinco países no topo em capacidade instalada são China, Estados Unidos, Alemanha, Turquia e Brasil (Giglio, 2015).

No Brasil, as habitações unifamiliares financiadas por meio do programa Minha Casa, Minha Vida, por exemplo, devem receber, obrigatoriamente, um sistema de aquecimento solar com dimensionamento padronizado para todas as regiões. Este deve estar em conformidade com as especificações definidas no termo de referência da Caixa Econômica Federal (BRASIL, 2011). O sistema de aquecimento solar deve apresentar funcionamento em circuito direto, onde a água potável é aquecida diretamente pelo coletor solar (ABNT, 2008). A circulação natural (passiva), chamada de termossifão, deve ser adotada. Ela utiliza unicamente a diferença de densidade do fluido de trabalho para obter a circulação entre o coletor solar e o reservatório térmico (ABNT, 2008). As vantagens da circulação por termossifão é sua não dependência de bombas, além de ser um sistema seguro, e possuir vida útil mais longa do que os sistemas de circulação forçada (Kalogirou, 2016).

Hernandez e Kenny (2012) citam que é frequente a disseminação de estudos que demonstram o potencial de sistemas de aquecimento solar de água na redução do consumo de energia em residências. Entretanto, o real desempenho dos sistemas instalados e em uso é raramente relatado.

Basicamente, são empregadas duas tecnologias de coletores solares para aquecimento de água: os sistemas com coletores planos (Figura 2.a) e os sistemas com coletores de tubos à vácuo (Figura 2.b).

Os coletores solares planos fechados (CSPF, ou FPC em inglês) são utilizados para aquecer a água até uma temperatura de 60 °C e proporcionar o condicionamento ambiental a partir da energia solar, com aplicação em residências, edifícios, hotéis, motéis, indústrias e hospitais (Baptista, 2006).

O coletor solar com tubos horizontais e verticais é a configuração típica de coletores de placa plana. Uma cobertura transparente é usada para reduzir perdas por convecção da placa absorvedora através da contenção do ar na camada entre a placa absorvedora e o vidro. Ela também reduz perda de radiação do coletor, porque o vidro é transparente à radiação de baixo comprimento

de onda recebida do sol, mas ela é praticamente opaca à radiação térmica de longo comprimento de onda emitida pela placa absorvedora: é o denominado efeito estufa (Kalogirou, 2014).

Figura 2. Coletores solares para aquecimento de água:

a) Coletores Planos, b) Coletores de Tubos à Vácuo



(a)

(b)

(Fonte: Autor, 2018)

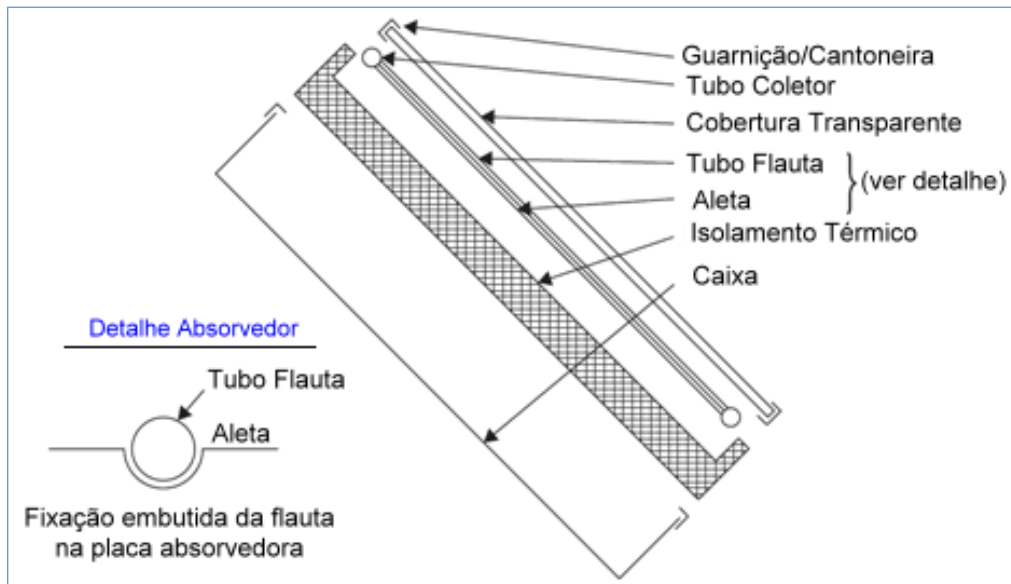
As vantagens dos FPC são que eles podem ser baratos para fabricar, coletam ambas as radiações direta e difusa e são permanentemente fixos, não havendo necessidade de rastreamento do sol. Por serem fixos, os coletores devem ser orientados diretamente na direção do equador, apontando para o sul no hemisfério norte e para o norte no hemisfério sul. O ângulo ideal de inclinação do coletor é igual à latitude da localidade, com variações de 10° a 15° aproximadamente, dependendo da aplicação (Kalogirou, 2003). Se a aplicação for para resfriamento solar, então o ângulo ideal é a latitude $- 10^\circ$ de modo que o sol será perpendicular ao coletor durante o verão, quando a energia será mais necessária. Se a aplicação é aquecimento do ambiente, então o ângulo ideal é a latitude $+ 10^\circ$ (Kalogirou, 2014).

Os principais componentes de um FPC, como ilustrados nas Figura 3 e 4, são os seguintes:

- *Cobertura:* Uma ou mais camadas de vidro ou outro material transmissor de radiação;
- *Passagens do fluido de calor e sistema de remoção do calor:* Tubos ou passagens que conduzem ou direcionam o fluido de transferência de calor da entrada para saída;
- *Placa Absorvedora:* Placas planas, onduladas ou sulcadas, pelas quais os tubos de circulação são ligados. A placa geralmente é revestida com uma camada de alta absorvidade e baixa emissividade;
- *Tubos horizontais e verticais:* Tubos e dutos para permitir a circulação do fluido;
- *Isolamento:* Usado para minimizar a perda de calor pela parte posterior e pelas laterais do coletor.

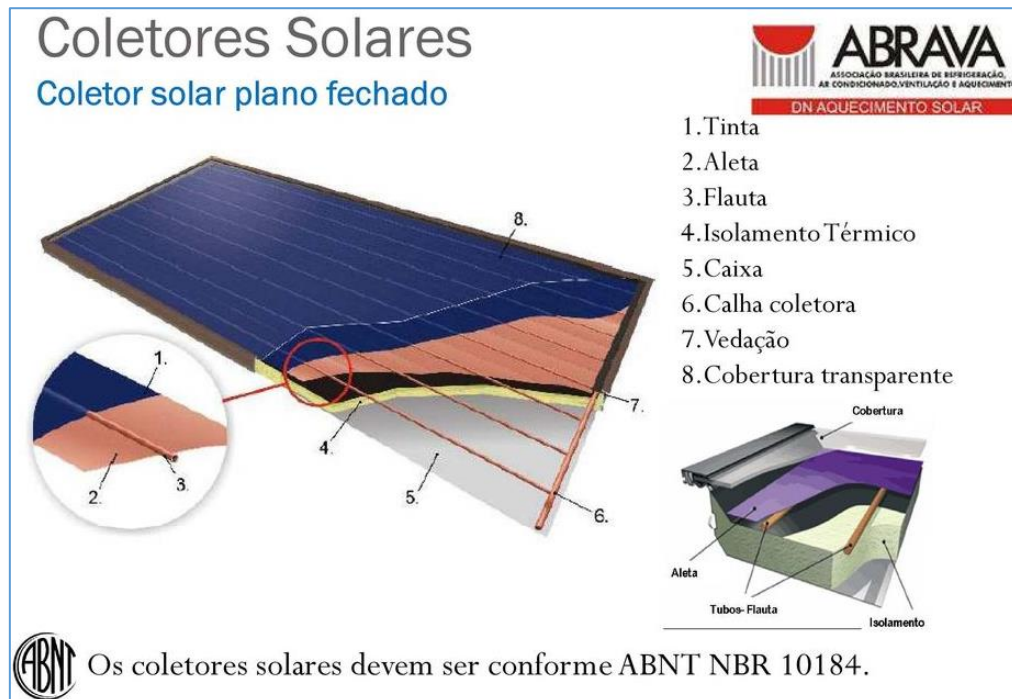
- *Recipiente ou caixa*: O revestimento envolve os componentes supracitados e protege-os da poeira, umidade, bem como qualquer outro material.

Figura 3. Principais componentes de um coletor de placas planas



(Fonte: Adaptado de Kalogirou, 2014)

Figura 4. Características construtivas de um coletor solar de placas planas



(Fonte: Internet)

Os aquecedores com coletores de tubos a vácuo são ainda pouco conhecidos no Brasil, porém são muito usados na China e Europa, por sua maior capacidade de permitir o aquecimento mesmo em dias nublados (radiação difusa), quando comparados com os coletores planos (Goerck, 2008). Nos coletores solares com tubos a vácuo tipo *fluid-in-metal* (*heat-pipes* e *U-tube*), o fluido

a ser aquecido pela radiação solar circula em um tubo metálico inserido em um tubo de vidro, viabilizando a sua utilização em altas pressões e temperaturas (Liang *et al.*, 2011).

A eficiência térmica de um coletor solar é avaliada a partir de testes de desempenho que são realizados sob condições de estado estacionário, e também dinâmicos, considerando-se a energia radiante de equilíbrio atingindo a superfície do coletor, à temperatura ambiente, T_a , e velocidade do vento constante.

Asumindo-se que o fluido, cujo calor específico é c_p , escoar no interior do coletor à uma vazão mássica constante, \dot{m} , e que a temperatura de entrada e da saída do fluido no coletor é T_i e T_o , respectivamente, o ganho de energia (potência) útil do coletor é calculado como (Kalogirou, 2014):

$$\dot{Q}_u = \dot{m} c_p (T_o - T_i) \quad (1)$$

Assim, a eficiência térmica teórica ($\eta_{teórico}$) de um coletor solar é expressa por uma relação que envolve a energia (potência) útil do sistema (\dot{Q}_u) em um dado período de tempo e a energia (potência) que está relacionada à radiação solar incidente (G_t) sobre o mesmo período de tempo, além da área do coletor (A) (Duffie; Beckman, 1991):

$$\eta_{teórico} = \frac{\int \dot{Q}_u dt}{A \int G_t dt} \quad (2)$$

Experimentalmente, a medida da eficiência térmica instantânea (η) de um coletor solar também pode ser extraída pelo balanço de energia, onde a taxa de radiação absorvida pela placa é igual a taxa de energia útil adicionada a taxa de perda de calor, sendo dada em função das temperaturas ambiente e de entrada do fluido no coletor, do fator de remoção de calor (F_R), do produto transmitância-absortância do sistema cobertura/absorvedor, $(\tau\alpha)_n$, do coeficiente global de perda do coletor (U_L) e da radiação incidente (Duffie; Beckman, 1991):

$$\eta = \frac{Q_u}{AG_t} = F_R (\tau\alpha)_n - F_R U_L \left(\frac{T_i - T_a}{G_t} \right) \quad (3)$$

O fator de remoção de calor, F_R , relaciona o ganho de energia útil real de um coletor com o ganho útil que seria obtido se toda a superfície do coletor estivesse à temperatura de entrada do fluido. O produto $F_R(\tau\alpha)_n$ fornece uma indicação de quanta energia é absorvida e o produto $F_R U_L$ é uma indicação de quanta energia é perdida.

Segundo Redpath *et al.* (2008), a eficiência anual de um coletor de placas bem dimensionado fica entre 35-40%, contra 45-50% dos coletores de tubo a vácuo. Eles avaliaram um coletor de tubos evacuados de aquecimento indireto (*heat-pipe*) durante um ano, em Ulster/UK, apontando uma eficiência média de 63,7%. Apesar de apresentarem desempenho muito bom para situações meteorológicas adversas, os coletores de tubos a vácuo têm menor eficiência de conversão da energia solar em térmica que os coletores de placas, em situações meteorológicas mais favoráveis (Manea *et al.*, 2011).

2.2 Panorama Mundial da Energia Solar Térmica

Hoje, a demanda mundial de energia é baseada, principalmente, em fontes não renováveis de energia: petróleo, carvão, gás natural e urânio, que juntos cobrem cerca de 86% das necessidades globais de energia primária. Os 14% restantes são divididos em aproximadamente 2/3 de biomassa e 1/3 de energia hidrelétrica. Claramente, um recurso ainda menos desenvolvido e abundante é a energia solar e, em uma era de crescente preocupação com a mudança climática e a segurança energética, faz sentido que a sociedade invista agora para permitir que o sol seja um importante fornecedor de energia para água residencial e aquecimento (Hernández, 2013).

Os mercados de Sistemas de Aquecimento Solar (SAS), em todo o mundo, variam consideravelmente de país para país, em termos de política e estrutura legal, tecnologias, produtos, sistemas, serviços, escala e estrutura da indústria, preços de mercado e condições econômicas, mecanismos de promoção e canais de distribuição e construção de maturidade de integração.

De acordo com o boletim *Solar Heat Markets in Europe*, documento que faz um levantamento geral sobre o mercado de sistemas de aquecimento solar e é vinculado à Federal Européia da Indústria Térmica (ESTIF), a capacidade total instalada em operação no ano de 2018 foi de 36,1 GW_{th} , representando um aumento de 8% em comparação a 2017. Estima-se que esse aumento represente uma geração anual de 25,6 TW_{th} . Como resultado, a capacidade total de armazenamento de energia solar térmica disponível é de 180 GWh_{th} . Dois anos antes do marco de 2020, com um número estimado de 10,1 milhões de sistemas instalados, a energia solar térmica

contribui para tornar milhões de consumidores europeus de calor ativos na transição energética. (SHME,2018).

Esses índices confirmam projeções realizadas pela ESTIF em 2009. Neste estudo, o cenário mais ambicioso mostrava que, em 2020, seria possível alcançar uma área de colectores instalados três vezes maior, *i.e.*, 0,56 kWth (0,8 m²) per capita. Para se ter uma ideia da evolução do uso de SAS, de acordo com Weiss et al. (2008) e Weiss & Spörk-Dür (2019), sem contar outros tipos de coletores, a área total de coletores solares planos em operação no mundo cresceu de 60 milhões de m² para 144 milhões de m², entre 2008 e 2016, um crescimento extraordinário de quase 150%.

2.3 Panorama Brasileiro da Energia Solar Térmica

O Brasil está situado numa região com incidência mais vertical dos raios solares. Esta condição favorece elevados índices de irradiação em quase todo o território nacional. Adicionalmente, a proximidade à linha do equador faz com que haja pouca variação na incidência solar ao longo do ano. Dessa forma, mesmo no inverno pode haver bons níveis de irradiação. Por exemplo, na região semi-árida do nordeste brasileiro, estão disponíveis cerca de 2,2 MWh/m² de energia solar e mais do que 5 kW/h/m²/dia de irradiação solar média (Martins *et al.*, 2012). Essas condições conferem ao país algumas vantagens para o aproveitamento energético do recurso solar.

No que diz respeito ao aproveitamento da energia solar como um todo, ou seja, tanto na forma fotovoltaica quanto na térmica, no Brasil, ele é muito menor do que em vários países europeus. Não obstante, percebe-se um crescimento acelerado das pequenas instalações de energia solar em residências, comércios e indústrias, devido principalmente, à disparada das tarifas de energia elétrica nos últimos anos, além da significativa queda nos preços dos equipamentos, a maior parte importada da China.

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2015) prevê, no PDE 2027, que renováveis, incluindo eólicas, solares e a biomassa, devem chegar a quase 61 gigawatts em capacidade em 2027, quase dobrando os atuais 33,4 gigawatts e chegando a 30% da matriz, ante 21% atuais.

Em termos de evolução do aproveitamento térmico da energia solar, o Brasil possuía, em 2006, a sétima maior área de coletores planos instalados no mundo (3,1 milhões de m²: 84% no setor residencial, 15% no setor terciário e 1% no setor industrial). No entanto, em termos populacionais, o Brasil possuía apenas 1,72 m² de área coletora instalada para cada 100 mil

habitantes, muito atrás de outros países como Chipre (84,4 m²), Barbados (26,9 m²) e Turquia (13,5 m²). Naquele ano, estimava-se que a taxa média de crescimento anual de área coletora era de 14%, enquanto que em países como Canadá, Alemanha e Grécia eram de 50%, 39% e 34%, respectivamente (Weiss *et al.*, 2008).

Após algumas iniciativas nacionais, como o projeto Cidades Solares (ABRAVA) e os projetos financiados pelos bancos nacionais para substituição de chuveiros elétricos por aquecedores solares, além do Programa Brasileiro de Etiquetagem (INMETRO), que entre outras ações, desenvolve o ensaio de coletores solares para banho e piscina e de reservatórios térmicos, a tecnologia solar térmica vem se consolidando como uma alternativa energética. Em função dessas iniciativas, o Brasil passou a ter, em 2016, a quarta maior área de coletores planos em operação no mundo (8,8 milhões de m²), um salto de mais de 180% em oito anos (Weiss & Spörk-Dür, 2019), acompanhando a tendência mundial de crescimento dessa tecnologia solar.

2.4 Fundamentos de Radiação Solar

2.4.1 O Sol

O Sol é a estrela brilhante do nosso sistema solar e, também, é a estrela mais próxima da Terra, suportando quase toda a vida na terra pela fotossíntese e impulsionando clima da Terra (Simon, 2001). É uma esfera gasosa, com uma massa em torno de 2×10^{30} kg, cerca de 330.000 vezes maior do que a Terra (Woolfson, 2000). Quase 73% da massa do sol consiste em hidrogênio, o resto é composto principalmente por hélio e quantidades relativamente pequenas de oxigênio, carbono, e ferro (Basu e Antia, 2008). O sol está localizado a cerca de 150 milhões de km da terra e a sua luz leva cerca de 8 minutos para chegar até nós (Williams, 2013).

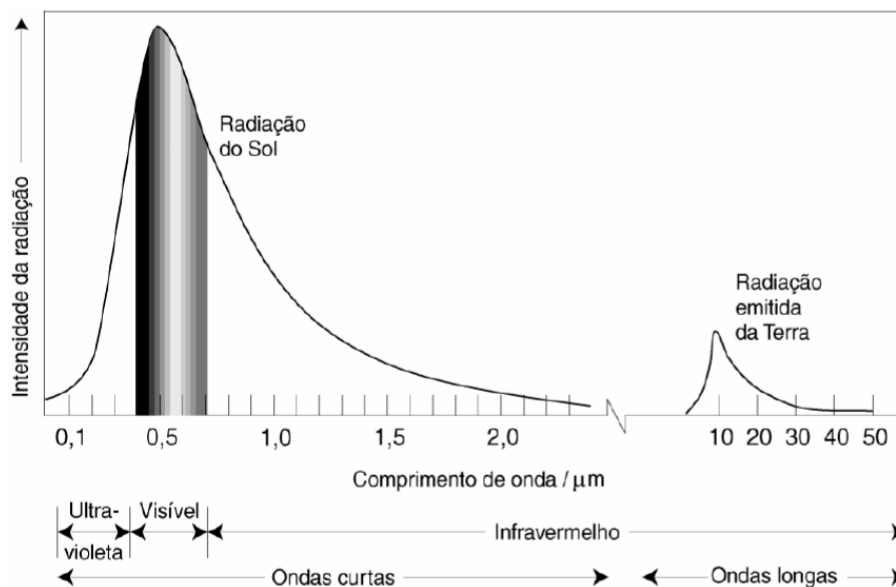
A energia solar é a energia natural suprema e a temperatura da superfície da grande estrela de fogo é em torno de 5500 °C. O sol dá à terra luz e calor, seu papel nas atividades do sistema solar é tão importante que não haveria vida sem ela. A exploração do sol começou no século XVII. Lavoisier foi uma das primeiras pessoas a usar uma lente convergente para concentrar a luz do sol com o objetivo de derreter varas de ferro colocadas no ponto focal da lente (Priestley, 1776).

A energia do sol, por unidade de tempo, recebida sobre uma área unitária de superfície (extraterrestre) perpendicular à direção da propagação da radiação é denominada de *Constante Solar*, G_{sc} , sendo estimada em torno de 1.367 W/m². Assim, em uma hora, a terra recebe energia do sol suficiente para atender a demanda de energia de todo o planeta por mais de um ano. Em

outras palavras, essa quantidade de energia é 5.000 vezes maior do que a quantidade de energia convencional produzida, atualmente, na Terra.

A radiação solar é caracterizada por uma distribuição contínua espectral (Figura 5). O espectro da radiação solar se estende da radiação ultravioleta ao infravermelho, sendo a parte visível desta radiação (0,4 a 0,7 μm) a de maior intensidade, representado cerca de 43%. A faixa do espectro correspondente aos raios infravermelhos (0,8 a 3 μm) equivale a 49% da intensidade de radiação total que incide sobre a Terra e 7% da intensidade corresponde aos raios ultravioletas (0,1 a 0,4 μm). O restante da intensidade (menos que 1%) da radiação solar correspondem aos raios X, gama e ondas de rádio. O planeta Terra absorve aproximadamente 51% de toda radiação solar incidente e a irradia sob forma de radiação vermelha (4 a 100 μm).

Figura 5. Espectro da radiação solar terrestre



(Fonte: Internet)

2.4.2 Nomenclatura da radiação solar

A radiação solar, ao interagir com a atmosfera da Terra, pode ser dividida em duas componentes básicas: radiação direta e radiação difusa (Figura 6).

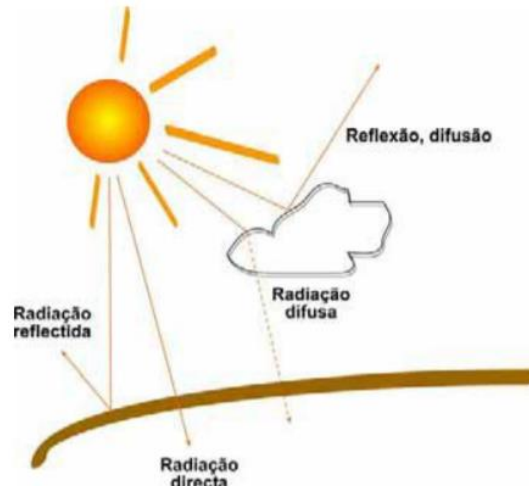
– Radiação direta

De acordo com Duffie e Beckman (1991), a radiação direta (também conhecida como radiação de feixe) é a radiação solar recebida pela Terra que não sofreu nenhum tipo de espalhamento por parte da atmosfera.

– *Radiação difusa*

É a radiação solar recebida após sua direção ter sido alterada por conta do espalhamento causado pela atmosfera e suas partículas. A radiação difusa é referida em certas literaturas meteorológicas como radiação do céu ou radiação solar do céu.

Figura 6. Componentes da radiação



(Fonte: Internet)

– *Radiação total*

É a soma da radiação solar direta e difusa sobre uma superfície. Quando a superfície é horizontal, diz-se da radiação global sobre a superfície.

– *Irradiância: G (W/m^2)*

É a taxa na qual a energia radiante incide sobre uma superfície por unidade de área da superfície. Índices associados à esta variável (G) indicam se a radiação é direta, difusa ou espectral, por exemplo.

– *Irradiação: H, I (J/m^2)*

É a energia radiante incidente sobre uma superfície por unidade de área, obtida pela integração da irradiância sobre um período de tempo, geralmente um hora ou um dia. O termo *Insolação* é empregado para a caracterizar a irradiação solar. O símbolo H é empregado para a insolação para um dia. O símbolo I é usado para a insolação para uma hora (ou outro período, se especificado).

2.4.3 Direção da radiação direta: ângulos solares

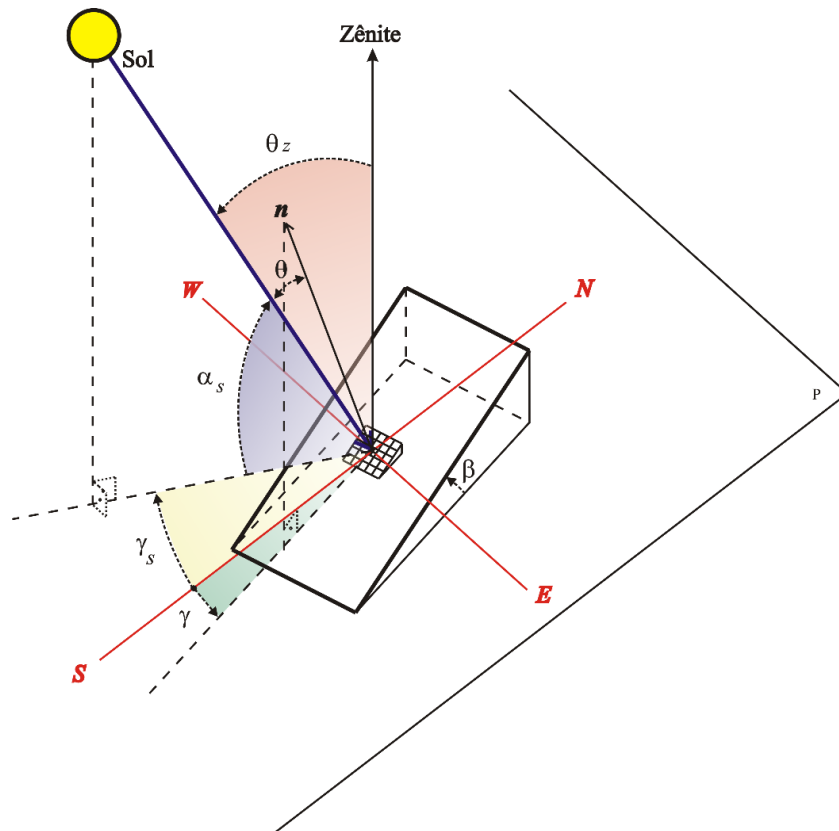
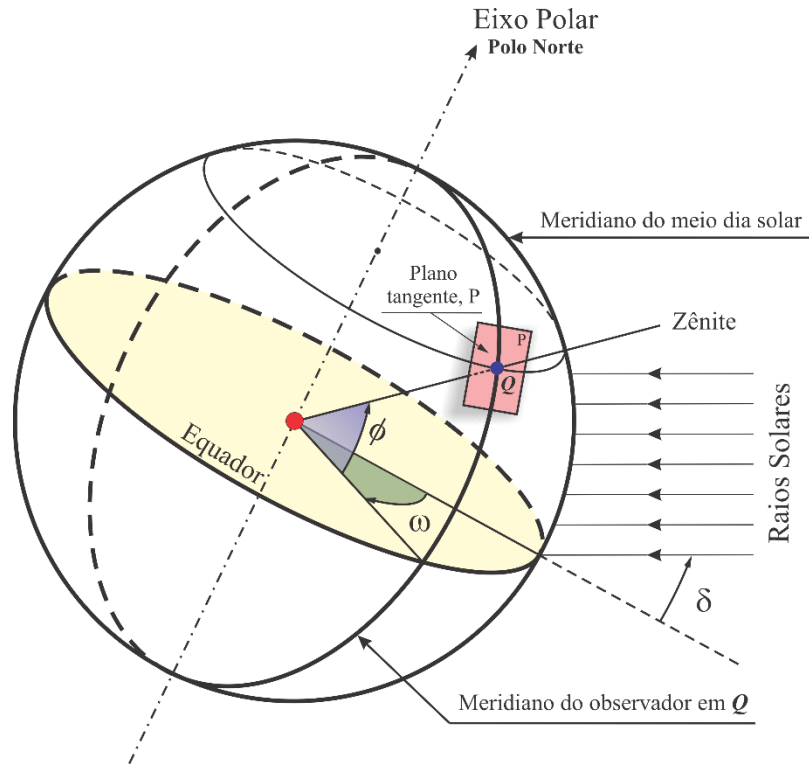
As relações geométricas entre um plano de orientação qualquer em relação a terra, em um instante qualquer, e a radiação solar direta incidente, isto é, as características associadas à posição do sol em relação a esse plano, podem ser descritas em termos de vários ângulos (Benford; Bock, 1939).

Alguns desses ângulos (e suas convenções), além de outros parâmetros correlatos estão indicados nas Figuras 7.a e 7.b, e suas definições são dadas a seguir:

- Φ **Latitude:** Localização angular, norte ou sul do equador. Norte positivo. ($-90^\circ \leq \Phi \leq 90^\circ$).
- δ **Declinação solar:** Posição angular do sol ao meio-dia solar (quando o sol está no meridiano local) em relação ao plano do equador. Norte positivo. ($-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$).
- ω **Ângulo horário:** Deslocamento angular do sol, a leste ou a oeste do meridiano local, devido à rotação da terra em seu eixo. 15° por hora, a partir do meio dia. Manhã negativo e tarde positivo.
- β **Inclinação:** Ângulo entre o plano da superfície em questão e o plano horizontal P . ($0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$). $\beta > 90^\circ$: a superfície tem a face voltada para baixo.
- γ **Ângulo azimute de superfície:** Desvio da projeção, em um plano horizontal P , da normal da superfície do plano em questão em relação ao meridiano local. Zero para o sul, leste negativo e oeste positivo. ($-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$).
- θ **Ângulo de incidência:** Ângulo entre a linha do raio solar (radiação direta) em uma superfície e a normal à essa superfície.
- θ_z **Ângulo de zênite:** Ângulo entre a vertical e a linha do raio solar, isto é, o ângulo de incidência da radiação direta sobre uma superfície horizontal.
- α_s **Ângulo de altitude solar:** Ângulo entre a linha do raio solar e sua projeção sobre um plano horizontal, isto é, o complemento do ângulo de zênite.
- γ_s **Ângulo de azimute solar:** Deslocamento angular, em relação à direção sul, da projeção da linha do raio solar (radiação direta) sobre um plano horizontal. Deslocamentos à leste do sul são negativos e à oeste do sul são positivos.

Figura 7. Ângulos associados ao movimento do sol e à relação sol-superfície:

- a) Latitude, declinação solar, ângulo horário.
 b) Ângulos: inclinação, azimute de superfície, incidência, zênite, azimute solar, altitude solar.



(Fonte: Autor, 2018)

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir, um levantamento bibliográfico sobre os principais trabalhos científicos que desenvolveram ações relacionadas ao uso, estudo e aperfeiçoamento dos sistemas de aquecimento solar será efetuado. De maneira geral, o levantamento acerca dos procedimentos e resultados de cada trabalho desenvolvido é, praticamente, uma transcrição dos resumos de cada trabalho.

Cardenas (1992) apresentou formulações analíticas para quantificar os níveis de radiação sobre superfícies inclinadas, utilizando como objeto de estudo um sistema de aquecimento solar de água via termossifão. Aplicando uma metodologia recomendada pela ONU (1976), adicionou alguns complementos à formulação original no que diz respeito ao histórico da temperatura no tanque até o início da insolação do dia seguinte. Na cidade de Huancayo, Peru, o valor de radiação média anual sobre uma superfície inclinada foi de 18,58 MJ/m²/dia, representando uma diferença de 0,64% em relação ao calculado pelo programa investigado, o SOLHYO. Foi analisada, também, a viabilidade econômica do sistema por termossifão, face ao sistema convencional de aquecimento elétrico utilizando resistências de imersão.

Cardias; Lanius (2009) estudaram um sistema de aquecimento de água com coletores solares planos para atender a demanda de 100 banhos diários de 15 minutos, com vazão média de 5 l/min. Foram analisadas três dimensões de coletores, de 100, 150 e 200 m². Os resultados mostraram que os coletores de 150 m² atenderam a demanda completa de energia em 6 meses do ano, ficando apenas os meses de abril a setembro com atendimento médio de 94% da carga. Considerando a última configuração, com 200 m², o atendimento anual fica em 8 meses do ano, com taxa média de atendimento de 97% da carga térmica nos 4 meses não atendidos integralmente. No final, o estudo apresentou uma taxa de retorno do investimento em um prazo muito pequeno, viabilizando a implantação dos coletores. Para a configuração de 100 m², o tempo de retorno do investimento foi estimado em 1,83 anos. Já para 150 m² de painéis solares, o tempo de retorno foi um pouco maior, em torno de 2,25 anos. O maior tempo de retorno do investimento foi para a configuração com 200 m², que ficou próximo de 2,67 anos.

Chaguri Júnior (2009) analisou as variáveis de um sistema predial de aquecimento central a gás e o impacto na implantação de sistemas de monitoramento e gestão, com o objetivo de reduzir as perdas térmicas. Como resultado desta análise, pôde-se concluir que a individualização do consumo de água e a possível incorporação de sistemas de aquecimento solar de água são fatores determinantes para atenuar as perdas térmicas do sistema, bem como a necessidade de otimização dos custos de instalação e operação.

Herranz (2009) projetou uma instalação mista de um sistema solar/gás de aquecimento de água para a demanda de água quente sanitária de um edifício residencial na cidade de Zaragoza. Tendo como base normas técnicas da comunidade europeia, ele empregou a metodologia *F-Chart* para avaliar a fração anual que a fonte solar seria capaz de fornecer mensal e anualmente. Realizou, ainda, uma análise econômica simplificada para determinar a viabilidade financeira para a implantação do sistema. O sistema estudo pelo autor reduziu a demanda tradicional de energia e, conseqüentemente, o consumo de gás natural em 66,23%, o que significou uma redução de 271.554,39 MJ/ano e 7.016,91 m³/ano, e essas reduções evitam uma emissão de 13.783,21 kgCO₂/ano. O tempo de *payback* do sistema foi de 21,83 anos. Essa referência será empregada como fonte básica para o desenvolvimento do presente trabalho.

Souza (2009) desenvolveu um *software* para projeto otimizado de sistemas de aquecimento de água mediante a utilização de energia solar. Trata-se de uma ferramenta computacional destinada a auxiliar as empresas de engenharia em projetos de sistemas de aquecimento solar (SAS), utilizando dados de desempenho de equipamentos comerciais provenientes do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) e dados de radiação solar provenientes do Atlas Solarimétrico Brasileiro. A metodologia de projeto utilizada foi o *F-Chart*, acrescido da análise econômica com informações relevantes sobre a rentabilidade e o risco do investimento. Souza concluiu que o *software* desenvolvido é mais adequado a empresas de engenharia e a projetista, dentre suas facilidades apontada por ele, uma delas é que a inclinação dos coletores pode ser determinada pelo programa.

Sekhar *et al.* (2009) realizaram uma avaliação do coeficiente de perda máxima considerando os aspectos do coletor de placa plana, tanto teórica quanto experimentalmente. Esse estudo foi conduzido em uma configuração de teste desenvolvida em laboratório e chegaram à conclusão que a emissividade da placa absorvente tem um impacto significativo no coeficiente de perda máxima e, conseqüentemente, na eficiência do coletor de placa plana. Outro fato observado foi que a eficiência do FPC aumenta com o aumento da temperatura ambiente.

Zambolin; Del Col (2010) realizaram uma análise comparativa do desempenho térmico em coletores de placas planas e de tubos evacuados, em Padova/Itália. Os testes foram realizados em regime permanente e quase-dinâmicos, seguindo a norma EN 12975-2. Segundo os resultados, obteve-se eficiência de 61% no sistema dos coletores planos e 66% nos coletores de tubos evacuados.

Coelho (2011) simulou e identificou as variáveis determinantes em um sistema de aquecimento solar em um prédio residencial. Também estudou a viabilidade da substituição do

sistema convencional de aquecimento a gás existente por um sistema de aquecimento solar. Concluiu que a substituição é viável e a melhor configuração é a que atende parcialmente a demanda de água aquecida, pois, com uma fração solar de 100%, o sistema estaria superdimensionado para os meses de maior radiação solar.

Ayompe *et al.* (2011) compararam o desempenho econômico de dois SAS, um com coletores de placa plana e outro com coletores de tubos à vácuo, que operavam sob as mesmas condições climáticas em Dublin, na Irlanda. Os resultados obtidos mostraram que para um total anual de insolação solar de 1.087 kWh/m², 1.984 kWh e 2.056 kWh de energia térmica foram recolhidos pelos 4 m² do FPC e pelos 3 m² do ETC, respectivamente. As eficiências médias anuais dos coletores foram de 46,1% e 60,7%, enquanto as eficiências do sistema foram de 37,9% e 50,3%, respectivamente.

Brandão; Vasconcelos (2011) estudaram a implantação de melhorias em um empreendimento habitacional em construção em Barcarena, município da região metropolitana de Belém-PA. O objeto de estudo era um conjunto habitacional composto por 240 unidades habitacionais de baixa renda, construído com recursos do Minha Casa Minha Vida, programa do Governo Federal Brasileiro e que contava com gerenciamento do Ministério das Cidades e operacionalização da Caixa Econômica Federal. O estudo apresentava a instalação de um sistema de aquecimento solar de água em cada unidade habitacional, fazendo uma análise da economia energética gerada pelo uso do equipamento solar e uma análise dos custos envolvidos na compra, instalação e operação desse sistema. Os valores projetados mostraram que, em uma unidade habitacional, o SAS gerou uma economia de 70 kWh/mês, totalizando, para as 240 unidades, uma economia de 16.800 kWh. Levando em conta o custo da energia elétrica da época, para cada unidade, a economia energética era traduzida para um valor de R\$ 21,70, o que equivalia a 4% do salário nacional no ano de 2011.

Oliveira (2011) estudou e desenvolveu uma análise de viabilidade financeira da utilização de um sistema solar para aquecimento de água de um hotel fictício na região Nordeste, empregando técnicas de dimensionamento de coletores solares e métodos de matemática financeira, como Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e *Payback*. Foi apresentada também uma análise de sensibilidade para verificar quais fatores que mais impactam na viabilidade do aquecimento solar. Como resultado da análise, a cidade de João Pessoa foi a que se mostrou mais viável para a instalação de sistemas de aquecimento de água para uma rede hoteleira, apresentando um VPL positivo de R\$ 424.977,48, com uma TIR de 35% e *payback* em apenas 4 anos.

Miyazato (2012) propôs diretrizes de projetos de integração do sistema de aquecimento solar (SAS) em edificações residenciais com base na abordagem do desempenho dos mesmos. Esse estudo foi fundamentado na bibliografia sobre SAS no contexto brasileiro e internacional, sendo descritas as características gerais do sistema e seus componentes, onde entrevistas foram realizadas com profissionais atuantes e participações em treinamentos técnicos permitiram que a coleta de dados sobre projeto, dimensionamento e instalação fossem levantados. Por fim, concluiu-se que parte significativa dos profissionais intitulados de especialistas em desenvolvimento de projetos de SAS não possui formação acadêmica direcionada ao conhecimento técnico em projeto e sistemas prediais, ou seja, não está habilitada nem capacitada para atuar na compatibilização do projeto de SAS incorporado a edificações.

Neves (2012) avaliou a eficiência de um aquecedor solar com coletor de tubos a vácuo do tipo *all-glass* instalado na cidade de Cascavel/PR, obtendo o valor de 51% nos meses de inverno. Foi simulada a utilização da água quente para dois banhos diários no final da tarde para avaliar o consumo de energia elétrica do aquecimento auxiliar do aquecedor em três cenários. No primeiro e no segundo, o consumo foi avaliado em duas situações: uso da resistência interna durante 24 horas/dia num cenário, e apenas no período da tarde em outro, sempre que a temperatura da água era inferior a 40 °C. No terceiro cenário, com a resistência auxiliar desativada, foi monitorado o diferencial de temperaturas entre a entrada e a saída de água do sistema. Estes dados, em conjunto com a radiação solar medida no local de pesquisa, foram usados para calcular a economia gerada pelo uso de um chuveiro elétrico abastecido com água pré-aquecida pelo aquecedor solar. Concluiu-se que o chuveiro elétrico usado de forma isolada consome anualmente cerca de 6,5 vezes mais energia elétrica do que quando usado em conjunto com aquecedor solar (1.240,34 kWh e 192,55 kWh, respectivamente). Por último foi calculado o *payback* do investimento na compra de um aquecedor solar de água com tubos a vácuo tipo *all-glass*, comparado com o chuveiro eletrônico, obtendo-se um período de pouco mais de sete anos.

Santos (2012) elaborou um estudo com análises técnico-econômicas e comparativas das principais soluções solares térmicas para produção de água quente em edifícios de habitação multifamiliar. Para uma comparação mais realista entre soluções, preconizou-se um conjunto de Casos de Estudo, procedendo-se a estudos práticos de aplicação das principais soluções estudadas nos mesmos, resultando na definição dos equipamentos a aplicar e custos associados bem como a estimativa do desempenho energético de cada sistema. Após isso, seguiu-se o estudo das metodologias de dimensionamento para os sistemas em causa, que se baseiam no *software* SolTerm, obrigatório, de acordo com o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE). Como resultado da análise do sistema de acumulação individual

e o de acumulação coletiva, concluiu que o sistema com acumulação coletiva possuía custos anuais menores.

Amoabeng (2012) usou o software T*SOL® para avaliar um sistema de aquecimento solar de água proposto para um hospital de uma universidade em Gana-África. A avaliação foi baseada no desempenho térmico e na economia de duas configurações: coletores de placa plana e coletores de tubo evacuado. As análises de desempenho térmico dos coletores mostraram que o coletor de placa plana com contribuição solar anual de 38,221 kWh e emissões reduzidas de CO₂ de 25,456 kg tem um melhor desempenho sobre o coletor de tubo evacuado com contribuição solar de 37,946 kWh e reduzindo emissões de CO₂ de 25,273 kg.

Hang *et al.* (2012) avaliaram os sistemas de aquecimento solar de água para edifícios residenciais típicos dos EUA, a partir das perspectivas energética, econômica e ambiental, incluindo coletores solares planos e evacuados, dois tipos de sistemas auxiliares (gás natural e eletricidade) e três locais diferentes (Los Angeles, Atlanta e Chicago). O desempenho dos sistemas de aquecimento de água por energia solar também é comparado ao dos sistemas convencionais que usam gás natural ou eletricidade. Os resultados mostraram que os sistemas de aquecimento solar de água usando coletores planos usando aquecedor auxiliar de gás natural tem o melhor desempenho entre todos os tipos e em todos os locais. Os períodos de retorno energético e ambiental para os sistemas de aquecimento solar de água são inferiores à meio ano, e o retorno do custo de ciclo de vida variam de 4 a 13 anos para diferentes cidades e diferentes configurações, tomando-se o sistema elétrico convencional de aquecimento de água em cada cidade como referência.

Altoé *et al.* (2013) realizaram uma análise comparativa das diferentes ferramentas computacionais disponíveis para modelagem de aquecedores solares de água. Entre os principais programas de simulação de sistemas solares térmicos estavam: *RETScreen International*, *EnergyPlus*, *TRNSYS*, *SolDesigner*, *SolarPro* e T*SOL. Dentre essas ferramentas, apenas o *EnergyPlus* e o *RETScreen International* são gratuitos, mas permitiram a obtenção de resultados interessantes quando aplicadas em conjunto. O primeiro possui um módulo de análise energética detalhado de aquecedores solares de água, enquanto o segundo possibilita um estudo detalhado de viabilidade econômica e uma avaliação de emissões de gases de efeito estufa. Com isso, conclui-se que, em função da gama de simuladores de aquecedores solares de computador disponíveis atualmente, é necessário que o usuário conheça as especificações das ferramentas, como linguagem de programação e capacidades, para que possa escolher o programa mais adequado para produzir os resultados esperados habilidades de modelagem.

Hazami *et al.* (2013) monitorou o desempenho energético durante um ano de um novo tipo de sistema de aquecimento solar de água para uso doméstico, baseado em coletor de tubo evacuado (ETC) comercializado na Tunísia. Este estudo foi realizado através da elaboração de um modelo completo levando em consideração vários modos de transferência de calor usando o programa *TRNSYS*. Para validar o modelo *TRNSYS*, testes experimentais sob condições climáticas locais foram realizados por 6 dias, distribuídos por 2 meses (novembro e julho de 2010). Os resultados mostraram que para uma insolação solar total anual de 5.489,3 MJ/m², um total de 4.653,13 MJ/m² foram recolhidos pelo coletor e a fração solar foi de 84,4%.

Greening; Azapagic (2013) analisaram o ciclo de vida sustentável de SAS em regiões de baixa irradiação solar como o Reino Unido, considerando 11 impactos ambientais listados pelos autores. Os resultados sugeriram que os coletores de placas planas têm impactos ambientais ligeiramente inferiores aos de tubos evacuados. O estudo também comparou o SAS a uma caldeira a gás, onde os SAS foram melhores em cinco dos onze impactos ambientais considerados. Quando comparado com o aquecimento elétrico de água, também pontuou melhor, oito em onze dos impactos, o que também aconteceu em relação as bombas de calor, onde a pontuação foi de sete categorias. Embora todas essas pontuações comprovavam a sustentabilidade do sistema, o potencial do mesmo ainda era dificultado pelo fato dos SAS precisarem de um sistema de aquecimento alternativo/secundário e por esse motivo, devido à falta de locais adequados e baixa eficiência, o potencial da energia solar térmica no Reino Unido é limitado.

Rosa *et al.* (2013) executaram um estudo comparativo entre as principais tecnologias de aquecimento de água, principalmente no ambiente doméstico, relacionando o tipo de coletor, o seu custo e o local de aplicação. Cada modelo de coletor pode ter uma relação custo-benefício diferente em cada região. Também foi realizado um cálculo estabelecido pelos procedimentos do INMETRO, para estimar a produção mensal específica de energia do coletor ensaiado (PMEE). Este valor é utilizado por este órgão como parâmetro para classificação de coletores solares. Dessa forma, conclui-se que os coletores planos sem cobertura se mostraram como boa opção para locais onde o clima é quente, e a temperatura de banho é próxima a ambiente, com até 10°C de diferença. Mas, se o objetivo da instalação for a utilização em local de clima frio, com temperaturas ambiente muito baixas, e com uso principalmente no inverno, o coletor de tubo evacuado permitirá um melhor funcionamento e rendimento que um plano comum. Com o cálculo de etiquetagem de coletores utilizado pelo Inmetro (2011), observou-se que o coletor ensaiado teve uma classificação C em uma escala de A à E. Concluíram que o fato de um coletor com isolamento a vácuo e superfície seletiva ter uma classificação inferior a coletores de construção mais simples é devido, principalmente, a consideração da área total para estimativa da PMEE, tendo em vista que a área

total dos coletores de tubos a vácuo é maior, devido ao espaçamento entre os tubos, do que coletores planos que possuem a mesma área de abertura.

Medeiros *et al.* (2014) realizaram uma análise técnica e de viabilidade econômica de um sistema de aquecimento solar com recirculação num edifício residencial mostrando que o mesmo operou com fração solar entre 48-88% e eficiência térmica entre 47-73%. Na análise econômica, apresentou Valor Presente Líquido positivo, Taxa Interna de Retorno superior à taxa de atratividade e recuperação do investimento (*Payback*) em menos de oito anos para vida útil de 20 anos, mostrando, portanto, que o sistema era viável.

Yirfa (2014) investigou, com auxílio do *software* T-Sol, um aquecedor solar de água que foi dimensionado e instalado para uso doméstico em Apinto Ridge, uma área residencial localizada em Goldfields Ghana Limited, Tarkwa Mine. O consumo médio de água quente foi estimado em cerca de 80 litros por dia. O desempenho do aquecedor solar de água instalado foi monitorado por um período de seis meses de teste (38 semanas) e os dados de temperaturas compiladas das 6h às 18h durante seis meses mostraram que o projeto era viável, mesmo considerando a natureza nebulosa do clima e também as frequentes chuvas na região.

Nikoofard *et al.* (2014) estudaram e avaliaram o impacto sobre o consumo de energia e as emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE), bem como a viabilidade técnico-econômica do uso de sistemas de aquecimento solar de água para as casas de um conjunto habitacional canadense. O estudo foi conduzido usando o Modelo de Uso Híbrido Final de Energia Residencial Canadense e Emissões de GEE. Assumiu-se que todas as casas que tinham um SAS com um tanque, e um telhado voltado para o sul, sudoeste ou sudeste poderiam ser adaptadas para uso de um sistema de aquecimento solar de água. Como conclusão do estudo estabeleceu-se que caso todas as casas desse conjunto tivessem um SAS, o consumo de energia e as emissões de GEE do setor residencial seriam reduzidos em 2%, isso equivaleria a 22,7 PJ de economia de energia de uso final e 1 ton de redução nas emissões de GEE. Já os resultados de viabilidade econômica demonstraram o impacto dos custos de instalação e de combustível, bem como as taxas de escalonamento de preços de juros e energia no período de retorno, porém sob os cenários econômicos realistas que foram apresentados no trabalho, se fazia necessário um incentivo por parte do governo para tornar possível que os SAS se tornassem economicamente atrativos para o Canadá, o que resultaria em um aumento da difusão desse sistema.

Vidotto (2014) desenvolveu um aplicativo computacional para realizar o dimensionamento de sistemas solares de aquecimento de água de pequeno porte. O aplicativo foi desenvolvido na plataforma MATLAB e seu algoritmo foi estruturado de modo a minimizar a

intervenção do usuário. No desenvolvimento do aplicativo foram utilizadas metodologias consolidadas e relações práticas buscando a otimização técnica e econômica da instalação. Como metodologias de projeto foram utilizadas a Carta-F (*F-Chart*) e a NBR 15569, acrescidas de análise econômica. O banco de dados foi construído utilizando dados de desempenho de equipamentos comerciais provenientes do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) e dados meteorológicos fornecidos pelo Atlas Solarimétrico Brasileiro e pelo Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR). O aplicativo desenvolvido possibilita o dimensionamento de sistemas de circulação natural e de circulação forçada, constituídos por coletores planos ou coletores a vácuo do tipo U, reservatório térmico horizontal e fonte de energia auxiliar (elétrica ou a gás). Também permite que o usuário modifique, a qualquer instante, os parâmetros de entrada, possibilitando simular diferentes situações de utilização e encontrar a melhor solução técnica/econômica sem recorrer ao uso de métodos demorados. Sua utilização se mostra bastante simples, exigindo do utilizador não mais do que o conhecimento básico em energia solar.

Georgi (2015) avaliou a eficiência energética e a relação custo/benefício de um sistema de aquecimento solar de água – SAS, com 1,00 m² de coletor solar plano – FPC instalado na Casa Inteligente – campus Unioeste, cidade de Cascavel – PR. Esse estudo contemplava benefícios e avanços tecnológicos para eficiência energética e sustentabilidade, sem danos ao meio ambiente, empregando materiais como o polietileno expandido, tubos de PVC, alumínio, vidro e mantas de isolamento térmico, mesclando-os com materiais de reuso para minimizar a perda de eficiência e ao mesmo tempo diminuir o seu custo de aquisição. O sistema foi testado ao longo de um ano e o coletor obteve temperatura máxima registrada de fluido de saída de 69 °C, enquanto a temperatura máxima da água na parte inferior do reservatório de água quente foi de 57 °C. A eficiência média diária do coletor solar foi de 60,6%, enquanto a eficiência média do sistema foi 52,8%.

Sangoi (2015) estudou o desempenho, durante a fase de operação, de diferentes tipos de sistemas de aquecimento de água em edificações residenciais. Foram analisados sistemas com chuveiro elétrico, aquecedor a gás individual, aquecimento solar com apoio elétrico e com apoio a gás, em edificações unifamiliares e multifamiliares. As análises foram realizadas através de simulações computacionais com o programa *EnergyPlus*, considerando cinco cidades brasileiras de climas diferentes: Curitiba, São Paulo, Brasília, Salvador e Belém. Os sistemas foram comparados quanto ao consumo de energia final, energia primária e consumo de água. Verificou-se que os sistemas com chuveiro elétrico, que tem menor vazão, levam a um menor consumo de água e de energia primária. Para residências unifamiliares, o aquecimento solar combinado com chuveiro elétrico é a opção com menor consumo energético, e o sistema solar com resistência elétrica no reservatório com água armazenada a 60 °C é o que mais consome energia primária.

Para os edifícios multifamiliares, o aquecimento solar, principalmente se combinado com aquecedores a gás, se mostra uma alternativa de baixo consumo. Entretanto, para edifícios de maior porte e para cidades de clima frio, em que as perdas térmicas na distribuição são mais significativas, o chuveiro elétrico é a opção mais eficiente. Foram comparados, ainda, os custos de instalação, de operação, e o custo global de cada tipo de aquecimento, e concluiu-se que o consumo de água e energia durante a operação é o fator mais impactante no custo global dos sistemas. Chama-se a atenção às conclusões desse estudo, pois de acordo com a autora, os resultados foram conflitantes, sendo que sistemas com baixo consumo anual de energia, como chuveiros elétricos, são classificados com os piores níveis de eficiência, enquanto que sistemas de alto consumo, como aquecedores a gás individuais e sistema solar com resistência elétrica no reservatório, são classificados com os níveis mais altos.

Mazarrón *et al.* (2016) analisaram o projeto, instalação e avaliação de um sistema de aquecimento solar de água com coletores evacuados e circulação ativa. O objetivo principal foi determinar a energia útil necessária em função da temperatura da água no reservatório térmico que o sistema é capaz de fornecer e, conseqüentemente, sua lucratividade. Os resultados mostram como a energia que é coletada e entregue ao tanque diminui com o aumento da temperatura requerida devido ao menor desempenho do coletor e às perdas nos tubos. A eficiência anual do sistema atingiu valores médios de 66%, 64%, 61%, 56% e 55% para as temperaturas necessárias de 40 °C, 50 °C, 60 °C, 70 °C e 80 °C. Como resultado, a rentabilidade diminui à medida que a temperatura aumenta. A rentabilidade do sistema foi determinada em dois casos: considerando a rentabilidade máxima do sistema, assumindo 100% de utilização de energia útil (cenário 1); assumindo uma demanda particular, considerando que em muitos dias toda a energia útil que o sistema pode fornecer não é utilizada (cenário 2). A análise mostra que através do dimensionamento adequado do sistema, otimizando o número de coletores solares, o investimento no sistema solar pode ser rentável com valores de rentabilidade semelhantes nos dois cenários contemplados. O número de coletores que maximiza a lucratividade depende da temperatura exigida; portanto, ao projetar este tipo de instalação, os requisitos de temperatura da água devem sempre ser levados em consideração. Do ponto de vista ambiental, as emissões de CO₂ podem ser reduzidas entre 392 e 325 kg de CO₂ por m² de coletor, dependendo da temperatura exigida. Os resultados deste estudo podem ser muito úteis para determinar a viabilidade de usar tais sistemas para suprir uma parte da demanda por água quente.

Cruz (2016) analisou o potencial técnico e econômico da inserção da energia solar térmica para o aquecimento de água do banho no setor residencial brasileiro. A análise foi estática e levava em consideração parâmetros próprios do tomador de decisão, como financiamento, custo de

oportunidade do consumidor, custo de capital, etc. O modelo geral proposto foi elaborado em ambiente *Excel* e auxiliado pelo *software RETScreen*. Como resultado, foi possível observar os melhores locais para instalação do SAS de acordo com a viabilidade financeira, assim como sua inserção ao longo do período analisado (2010-2050).

Sadiq (2017) apresentou uma análise de custo-benefício do SAS no setor residencial de Islamabad, Paquistão, ressaltando que a avaliação econômica do SAS é uma ferramenta essencial para concluir a viabilidade deste sistema, e que pode aumentar a conscientização pública sobre os benefícios associados à sua adoção. Os resultados indicam que se o SAS substituir energia elétrica ou gás natural para aquecimento de água, pode-se economizar 430,95 euros e 67,81 euros de custo de energia por ano por agregado familiar, respectivamente. Dependendo da instalação inicial custo do SAS, o período de retorno varia de 1,16 a 1,38 anos para energia elétrica e 6,95 e 8,27 anos para sistemas de aquecimento de água movidos a gás natural.

Ghorab *et al.* (2017) realizaram uma análise detalhada e uma avaliação do desempenho de um sistema de aquecimento solar doméstico de água quente, o qual usava dois coletores solares instalados no telhado de uma casa, monitorando os dados de outubro/2014 a setembro/2015. O sistema incluía um circuito de recirculação de água quente sob condições meteorológicas canadenses para uma família de 2 adultos e 2 crianças. Os resultados mostraram que as condições externas (radiação solar e temperatura) têm um efeito significativo sobre a temperatura dentro do reservatório térmico. O desempenho do sistema depende principalmente do consumo de água quente, do consumo de gás, da temperatura da água fria, do temporizador do laço da recirculação e do nível de isolamento dos componentes. A energia do gás aumenta devido ao aumento do consumo de água quente durante o inverno. As perdas de calor (dentro e fora do reservatório térmico) representa 8,5% da energia solar total coletada. A perda de calor do circuito de recirculação apresenta uma parcela significativa 34,9% da energia total do sistema. A contribuição para a carga de aquecimento do sistema é de cerca de 69,4% do gás natural e 30,6% da energia solar.

Altoé *et al.* (2017) analisaram a viabilidade econômica e as potenciais reduções de emissões de gases com efeito de estufa associadas à utilização de aquecedores solares de água em uma típica casa brasileira. Os sistemas térmicos solares foram simulados em diferentes níveis de eficiência energética e taxas de fluxo de água do chuveiro. Verificou-se que o uso de aquecedor solar de água, em comparação com aquecedor elétrico sem um armazenamento de água quente, apresentou taxa de retorno interno de aproximadamente 26% ao ano, retorno simples em torno de 4,5 anos, valor presente líquido de US\$ 2.194,00 e custo de energia conservada em torno de US\$

0,12 kW/h. Verificou-se também que o uso de aquecedor solar de água em habitação brasileira reduziu as emissões, em comparação com o aquecimento elétrico e a gás, em aproximadamente 256 kg CO₂/ano, respectivamente.

Baddou (2017) analisou um sistema de aquecimento solar de água doméstica em um edifício residencial e desenvolveu um modelo numérico baseado no método *F-Chart*, a fim de prever o comportamento térmico do sistema solar e comparar os resultados com dados reais coletados do sistema solar usando um contador de energia chamado *SunEye*. O sistema que fora estudado estava localizado em Terrassa-Barcelona e fornece água quente para um edifício residencial de 17 apartamentos, sendo composto por 8 coletores solares com 17 tanques de armazenamento (10 de 100L e 7 de 150L). Como resultado, destacaram-se os aspectos positivos do uso da energia solar para aquecimento de água sanitária doméstica, ressaltando que a diminuição das emissões de CO₂ são muito importantes, pois significa que o uso de combustível fóssil tradicional foi evitado. Por outro lado, no aspecto econômico, observou-se que a economia do sistema solar estudado não foi alta, no entanto, pelo fato de na Espanha ser obrigatório a instalação de sistemas de aquecimento solar, o investimento se torna rentável.

Nizzoli Filho; Marques (2017) analisaram a redução dos custos financeiros de energia elétrica no aquecimento de água de chuveiros e torneiras de um edifício empresarial, localizado em Santos-SP, através do uso de cem coletores solares planos, utilizando cálculo do desempenho térmico do equipamento que foram fornecidos pela empresa fabricante. O estudo foi baseado nos cálculos de dimensionamento do desempenho térmico e geração de energia elétrica por mês de 1 coletor solar e depois utilizando 100 coletores instalados na cobertura do edifício. Após determinar o consumo médio mensal de energia elétrica do edifício durante o mês de agosto, chegou-se a uma variação diária entre 18 MWh e 27 MWh, sendo a média do período de 23 MWh, implicando em um valor monetário de R\$ 5.820,96/dia, do qual R\$ 2.941,36 são destinados ao aquecimento de água, o que refletiu uma economia expressiva de 50,53%.

Aisa (2017) estudou em detalhe o sistema de armazenamento de energia solar térmica utilizado para fins de aquecimento de água doméstica em uma típica casa isolada em *St. John, Newfoundland*, Canadá. Estudos incluindo modelos experimentais e de simulação foram revisados, ajudando a comparar abordagens anteriores ao tratamento atual do problema. Além disso, para estabelecer os resultados do estudo, um modelo de simulação de armazenamento de energia solar térmica para uso doméstico de água foi criado com a ajuda do software SAM, bem como vários parâmetros do *software* MATLAB também foram levados em consideração para estabelecer o *design* desejado do sistema. No final do estudo, conclui-se que o desempenho

operacional do sistema aponta para resultados de desempenho que estão significativamente acima do intervalo aceitável, sendo assim o sistema proposto no estudo oferece capacidades de desempenho que rivalizam com o outro sistema descrito no trabalho.

Jenichen (2017) estudou a viabilidade econômica acerca das instalações prediais de sistemas de aquecimento de água advindos de fontes de energia diferentes: energia elétrica, gás combustível GLP e energia solar. O estudo pretendia: estabelecer as peculiaridades envolvidas em cada sistema de aquecimento de água, fornecer uma lista de materiais hidráulicos e elétricos necessários ao suporte das instalações dos aquecedores, fornecer orçamentos sobre a instalação dos aquecedores considerando material e mão de obra, calcular o custo mensal gasto com energia em cada situação estudada e fazer a análise econômica para decidir qual o sistema de aquecimento e qual a fonte mais vantajosa em termos econômicos. Os resultados apontaram que cada sistema tem suas especificidades em termos de complexidade do equipamento e instalações, porém, não houve significativa diferença entre a quantidade dos materiais hidráulicos e elétricos envolvidos no suporte à instalação dos mesmos. Os orçamentos apontaram o sistema elétrico como o de menor custo inicial de aquisição e instalação e o sistema solar como o de maior custo (+1729 %). O cálculo do custo mensal de energia apontou o sistema elétrico como o de maior custo mensal, comparado com o a gás (-1 %), onde o sistema solar não possui custo. Porém, com a análise global dos custos, iniciais e recorrentes, por intermédio do Valor Presente Líquido (VPL), ao longo de 5 anos, concluiu-se que o sistema elétrico é o mais viável economicamente para o aquecimento de água para banho, sendo 36 % mais atrativo que o sistema a gás e 202 % mais atrativo que o sistema solar.

4 INFORMAÇÕES DE PROJETO

4.1 Localização

O sistema de aquecimento solar (SAS) em análise, em funcionamento desde dezembro de 2010, está localizado em um edifício residencial de 27 andares com 52 apartamentos, sendo 2 por andar, na cidade de João Pessoa-PB. Adota-se, no presente trabalho, que cada apartamento seja habitado por 4 pessoas.

A edificação, ilustrada via sistema *maps* do Google (Figura 8), está localizada em torno das seguintes coordenadas geográficas: Latitude: $\phi = -7,12^\circ$ ($7,12^\circ$ S); Longitude: $-34,83^\circ$ ($34,83^\circ$ W). Também, pode ser identificada uma medida aproximada do ângulo de inclinação dos coletores solares instalados em relação à linha geográfica norte-sul de cerca de 15° anti-horários (um ângulo azimutal de superfície de cerca de $\gamma \cong -165^\circ$).

Figura 8. Localização do edifício e do sistema de aquecimento solar de água.



(Fonte: Autor, 2018)

4.2 O sistema de aquecimento de água

A Figura 9 ilustra, esquematicamente, a instalação compreendendo a captação da radiação solar incidente nos coletores solares, o armazenamento da energia térmica em dois reservatórios térmicos horizontais em série, a distribuição da água aquecida para consumo, o sistema auxiliar para complementar o aquecimento solar em períodos de baixa insolação solar ou instantes de grande consumo e o sistema de recirculação de água para garantir um fornecimento de água aquecida confortável em todos os andares.

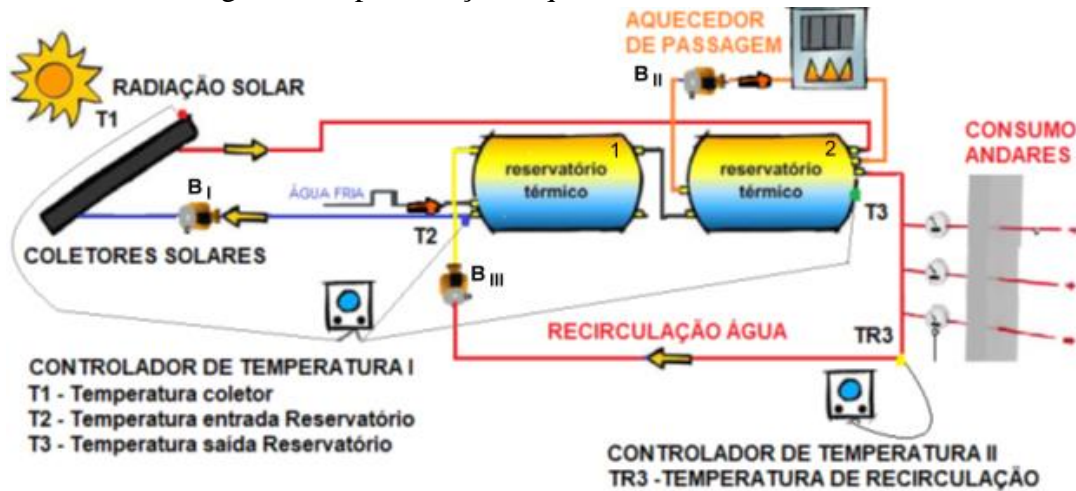
Tal sistema caracteriza-se por uma configuração de sistema direto ativo, pois a circulação de água é realizada através de bombas e a água que é usada para consumo é aquecida diretamente pelos coletores solares. Com isso, o reservatório pode ser instalado em qualquer altura em relação aos coletores. O sistema ativo possui controles que acionam a bomba sempre que a energia solar estiver disponível e a desativa quando não. Deve operar com intervalos que possibilitem o máximo desempenho e em condições estáveis de funcionamento (Sáles, 2008).

O princípio de funcionamento e controle do sistema é baseado nos procedimentos:

- 1) O controlador de temperatura I tem como função comandar o grupo de bombas de água B_I para os coletores, permitindo seu acionamento quando a diferença de temperatura da água entre o sensor 1, T_1 , localizado na saída dos coletores, e o sensor 2, T_2 , localizado na entrada do primeiro reservatório térmico, é superior a $4\text{ }^\circ\text{C}$, isto é, $(T_1 - T_2) > 4\text{ }^\circ\text{C}$, e o desligamento quando o diferencial é de $2\text{ }^\circ\text{C}$, ou seja, $(T_1 - T_2) = 2\text{ }^\circ\text{C}$.
- 2) O sensor 3 registra a temperatura da água na saída do reservatório térmico de consumo, T_3 . Caso, a temperatura seja menor que $45\text{ }^\circ\text{C}$, o sistema auxiliar (aquecedor de passagem a gás) entrará em funcionamento, com acionamento do grupo de bombas B_{II} , e o seu desligamento, quando a temperatura atingir $50\text{ }^\circ\text{C}$.
- 3) No projeto original, o controlador diferencial de temperatura II aciona a bomba de recirculação B_{III} instalada no subsolo do edifício, quando a temperatura da água de recirculação na prumada do edifício, TR_3 , for inferior a $35\text{ }^\circ\text{C}$ e a desliga, quando a temperatura alcançar $38\text{ }^\circ\text{C}$.

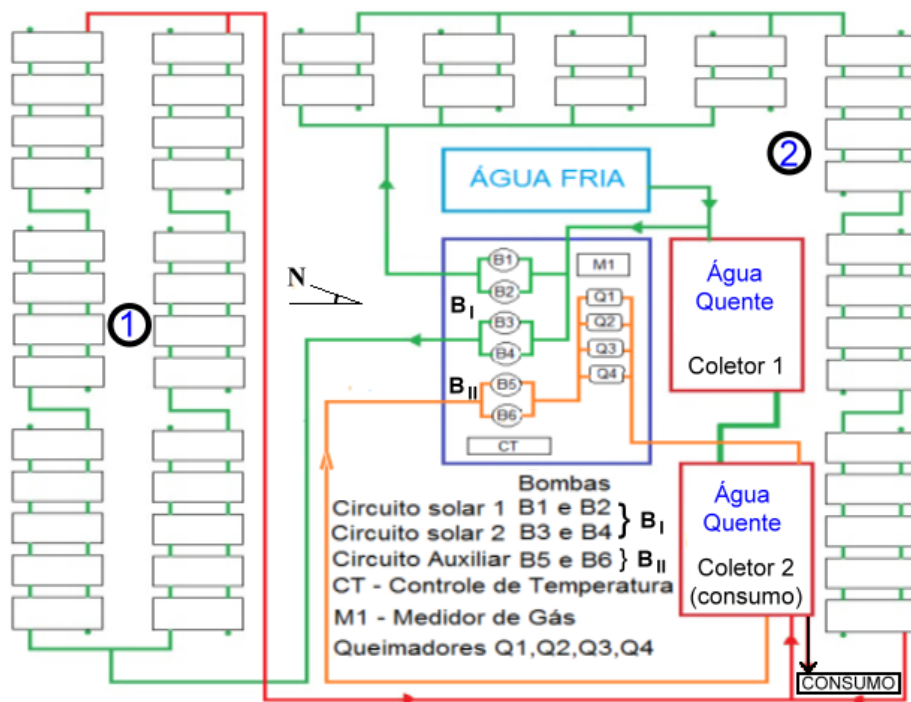
A montagem e disposição dos componentes do sistema de aquecimento solar na cobertura do edifício residencial em estudo, detalhando a quantidade de coletores e arranjo misto série/paralelo em dois circuitos, é apresentada na Figura 10.

Figura 9. Representação esquemática do SAS estudado



(Fonte: Medeiros, 2014)

Figura 10. Arranjo do sistema de aquecimento solar na cobertura do edifício



(Fonte: Medeiros, 2014)

O circuito solar 1 (lado esquerdo do arranjo) apresenta 26 coletores sem sombreamento, enquanto o circuito solar 2 (lado superior e direito do arranjo) apresenta 21 coletores, dos quais 8 com sombreamento parcial (lado superior do arranjo) em determinados horários e dias do ano. Dessa forma, o sistema foi projetado com 47 coletores planos, cujas características serão descritas

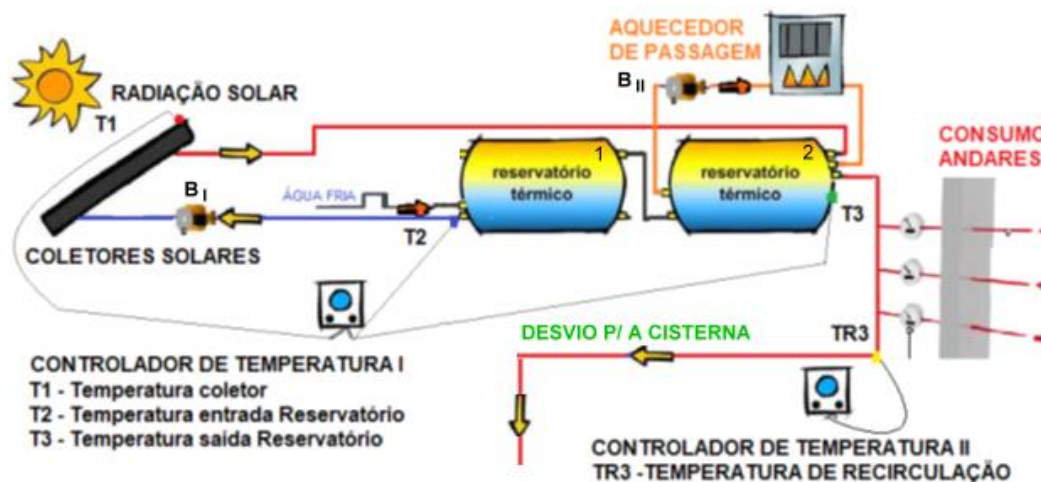
na seção seguinte. Na Figura 10 também está representada a montagem do sistema auxiliar a gás (composto por quatro queimadores e duas bombas), sua interligação ao reservatório térmico 2, o medidor de consumo de gás e o controlador de temperatura diferencial.

4.2.a Modificação do sistema original

Conforme ilustrado na Figura 9, o sistema híbrido (solar/gás) de aquecimento de água multifamiliar no edifício dispunha, originalmente, de um anel de recirculação de água, o qual era empregado para manter a prumada principal do edifício numa temperatura mínima e uniforme entre os diversos andares, $TR_3 = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Com a ocupação gradual do edifício, começou a ocorrer um aumento excessivo de pressão nas tubulações de água quente e fria, de maneira que, em 2015, o sistema sofreu uma modificação do seu projeto original: o anel de recirculação foi interrompido e a solução adotada até o presente momento, embora não eficiente sob o ponto de vista energético, foi redirecionar o volume de água da prumada para a cisterna, através de uma válvula termostática que abre quando a temperatura cair abaixo de $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ e fecha quando a temperatura for superior a $38\text{ }^{\circ}\text{C}$.

A Figura 11 ilustra a nova configuração, sem o anel de recirculação. O impacto dessa modificação sobre a eficiência do SAS será avaliado, a partir de medições do volume desviado.

Figura 11. Representação esquemática do SAS com modificação



(Fonte: Medeiros, 2014)

4.3 Elementos principais do sistema

4.3.1 Painéis solares: Coletor solar de placa plana (FPC)

O tipo de coletor solar escolhido no projeto foi o de placa plana fechado. Em geral, esse tipo de coletor é o mais utilizado em edifícios. A empresa que instalou o SAS selecionou o coletor

de placa plana da marca TRANSSEN, modelo Porto Seguro v2.0, de 1,87 m² e espessura 80 mm, tubulação do material absorvedor de polipropileno com diâmetro entrada/saída de 32 mm. A sua eficiência teórica foi avaliada em 56%, e os dois parâmetros da sua curva de eficiência são: $F_R(\tau\alpha)_n = 0,741$ e $F_{RUL} = 7,969$. Conforme já informado, no projeto original foram empregados 47 coletores desse modelo, totalizando uma área de coletores de 87,89 m².

As características desse mesmo tipo de coletor também serão utilizadas nos procedimentos de análise, especificação da fração solar e avaliação através do método de cálculo *F-Chart*, para determinação e comparação do número de coletores que atenda a demanda real (medida) de água quente.

A Figura 12 (quadro), a seguir, fornece as principais características técnicas da família desse modelo de coletor (os dados da versão selecionada, a v2.0, estão na última coluna do quadro), enquanto a Figura 13 ilustra uma fotografia de parte desses coletores instalados na cobertura do edifício.

Figura 12. Especificações da família de coletores Porto Seguro da Transsen

COLETOR PORTO SEGURO			
Modelo	V1.2	V1.5	V2.0
Largura (mm)	935	935	935
Comprimento (mm)	1200	1500	2000
TUBULAÇÃO			
Material absorvedor	polipropileno	polipropileno	polipropileno
Diâmetro Entrada/Saída (mm)	32	32	32
PESO (KG)			
Vazio	15	18,5	25
Cheio	19	23,7	31
Pressão de Trabalho (kgf/cm ²)	0,5	0,5	0,5
APLICAÇÃO BANHO			
Classificação INMETRO	A	A	A
Eficiência (%)	56%	56%	56%
Produção mensal de energia (kWh/mês)	86,8	108,5	144,9
Produção esp. de energia (kWh/mês.m ²)	77,5	77,5	77,5
Vazão banho L/min/m ²	1,2	1,2	1,2
Termos da equação da curva de eficiência: Porto Seguro Banho FR() = 0,741 FrUL = 7,969			
APLICAÇÃO PISCINA			
Classificação INMETRO	A	A	A
Eficiência (%)	70,9%	70,9%	70,9%
Produção mensal de energia (kWh/mês)	110,2	137,8	184,0
Produção esp. de energia (kWh/mês.m ²)	98,4	98,4	98,4
Vazão piscina L/min/m ²	4,2	4,2	4,2
Termos da equação da curva de eficiência: Porto Seguro Banho FR() = 0,776 FrUL = 7,928			

(Fonte: www.transsen.com.br)

Figura 13. Parte dos coletores TRANSSSEN, modelo Porto Seguro v2.0, instalados no edifício



(Fonte: Autor, 2018)

4.3.2 Reservatório de água quente: *Boiler*

O reservatório térmico para armazenamento de água quente, também chamado de *boiler*, é responsável por acumular a água aquecida para atender a demanda, sem que grandes variações de temperatura da água quente sejam sentidas. Os reservatórios não podem apresentar corrosão ou degradação do seu material interno, bem devem como suportar as pressões envolvidas no sistema (Brandão; Vasconcelos, 2011). De acordo com ASHRAE, 1996, apesar de extremamente importante, “o projeto e seleção do equipamento de armazenamento é um dos elementos mais negligenciados no sistema de energia solar”.

O isolamento térmico dos reservatórios segue o mesmo padrão dos coletores solares, podendo ser de poliuretano expandido, lã de vidro ou lã de rocha. Este material conserva a temperatura da água e garante a eficiência térmica do reservatório (Brandão; Vasconcelos, 2011). O revestimento externo deve ser fabricado com um material que proteja o isolamento térmico adequadamente. Geralmente, é escolhido o alumínio ou aço inox, por serem materiais leves com boa resistência mecânica.

De acordo com a demanda projetada foram selecionados 2 *boilers* horizontais da TRANSSSEN com capacidade máxima de 5.000 litros, em aço inoxidável, proteção do aço inox em PU elastomérico, isolamento térmico em poliuretano expandido e revestimento externo em alumínio. Esse mesmo modelo de *boiler* também será utilizado no procedimento de análise, via método de cálculo *F-Chart*, para determinação e comparação do número que atenda a demanda real (medida) de água quente.

A Figura 14 fornece uma visão geral de um desses reservatórios, enquanto a Figura 15 ilustra os dois *boilers* instalados, em série, na cobertura do edifício.

Figura 14. Visão geral do Boiler TRANSSSEN 5.000



(Fonte: www.transssen.com.br)

Figura 15. *Boilers* instalados em série na cobertura do edifício



(Fonte: Autor, 2018)

4.3.3 Aquecedores de passagem

Os aquecedores de passagens são os equipamentos responsáveis por realizar o aquecimento da água, por meio de uma fonte de combustão, quando a energia solar não é suficiente para que essa água possa atingir a temperatura de aquecimento determinada.

Para a seleção adequada desse equipamento, é de suma importância se ressaltar três pontos. O primeiro deles é a potência do aquecedor, ou seja, a sua capacidade de aquecimento do fluido em questão, neste caso a água. Quanto maior o projeto, maior potência devem ter os aquecedores. O segundo ponto é a eficiência dos mesmos, pois é esse fator que determinará o consumo de combustível para o devido aquecimento da água. Quanto mais eficiente o aquecedor, maior será a transferência de calor do combustível para a água. Por último, o terceiro ponto a ser observado é o tipo de combustível a ser utilizado pelo aquecedor, uma vez que ele determinará e afetará diretamente os cálculos de custo e economia de qualquer sistema dimensionado. Os combustíveis mais comuns para aquecedores à gás são o gás natural (GN), gás liquefeito do petróleo (GLP), querosene, carvão e a própria eletricidade.

De acordo com a demanda projetada foram selecionados 4 aquecedores à base de GLP, modelo REU-157 BRS GLP, da marca RINNAI. Este modelo tem a potência nominal de 24,3 kW. Embora quatro aquecedores tenham sido instalados, apenas dois eram necessários para suprir a demanda projetada, os dois outros queimadores ficam em modo *standby*, caso houvesse necessidade de manutenção.

A Figura 16 (quadro) fornece as principais características técnicas do aquecedor de passagem supracitado, enquanto a Figura (quadro) 17 disponibiliza uma fotografia desses aquecedores instalados na cobertura do edifício. Note que as eficiências do aquecedor associadas ao GLP e ao gás natural como combustíveis são de 85% e 86%, respectivamente.

Figura 16. Características Técnicas do Aquecedor de Passagem REU-157

Características	GLP	Gás Natural																									
Potência nominal	24,3 kW 348,33 kcal/min. 20.900 kcal/hora	24 kW 344,17 kcal/min. 20.650 kcal/hora																									
Rendimento	85%	86%																									
Dimensões:	610 mm																										
Altura	350 mm																										
Largura	190 mm																										
Profundidade	10,5 kg																										
Peso	Ø 125 mm																										
Diâmetro da chaminé	1,76 kg/hora	2,17 m ³ /hora																									
Consumo máximo gás	NM-ISO 7 – R 1/2																										
Entrada de gás	NM-ISO 7 – R 1/2																										
Entrada/saída de água	Acendimento eletrônico com adaptador 127/220 volts 60Hz																										
Sistema de ignição	15 l/min	15 l/min																									
Vazão de água (no misturador) na condição padrão elevando a temperatura em: Δt 20°C	<table border="1"> <thead> <tr> <th>TABELA PRESSÃO DE ÁGUA (mca) X Vazão (litros/min)</th> <th>PERDA DE CARGA</th> <th>HASTE de controle de água, fluxo máximo (± 1 l/min)</th> <th>HASTE de controle de água, fluxo mínimo (± 1 l/min)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>5 mca</td> <td></td> <td>10</td> <td>4,5</td> </tr> <tr> <td>10 mca</td> <td></td> <td>14</td> <td>6,5</td> </tr> <tr> <td>15 mca</td> <td></td> <td>18</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td>20 mca</td> <td></td> <td>21</td> <td>9,5</td> </tr> <tr> <td>25 mca</td> <td></td> <td>23</td> <td>11</td> </tr> </tbody> </table>			TABELA PRESSÃO DE ÁGUA (mca) X Vazão (litros/min)	PERDA DE CARGA	HASTE de controle de água, fluxo máximo (± 1 l/min)	HASTE de controle de água, fluxo mínimo (± 1 l/min)	5 mca		10	4,5	10 mca		14	6,5	15 mca		18	8	20 mca		21	9,5	25 mca		23	11
TABELA PRESSÃO DE ÁGUA (mca) X Vazão (litros/min)	PERDA DE CARGA	HASTE de controle de água, fluxo máximo (± 1 l/min)	HASTE de controle de água, fluxo mínimo (± 1 l/min)																								
5 mca		10	4,5																								
10 mca		14	6,5																								
15 mca		18	8																								
20 mca		21	9,5																								
25 mca		23	11																								
Vazão / pressão estática mínima de água para acionamento*	8,5 litros/min																										
	5 mca																										
Pressão de gás	280 mmca	200 mmca																									
Regulador de gás (Vazão mínima obrigatória)	2 kg/hora	3 m ³ /hora																									

(Fonte: Manual 157 BRS)

Figura 17. Aquecedores RINNAI, modelo REU-157 BRS GLP



(Fonte: Autor, 2018)

4.3.4 Bombas centrífugas

As bombas selecionadas para ativação deste sistema são da marca SCHNEIDER com rotor de bronze e selo mecânico *viton*, hidrômetro tipo volumétrico de pistão rotativo Aquadis ITRÓN. Ao todo, o sistema possui 7 bombas desse modelo: 4 para circulação de água através dos coletores solares, 2 para circulação de água através do sistema auxiliar de aquecimento e 1 para bombeamento de água através do anel de recirculação. A Figura 18 mostra algumas delas instaladas no sistema.

Figura 18. Bombas SCHNEIDER que compõem o sistema de aquecimento



(Fonte: Autor, 2018)

4.3.5 Sistema de aquisição de dados e controladores de temperatura

Os controladores de temperaturas selecionados (1) possuem dois estágios de apoio MICROSOL II PLUS da *Full Gauge Controls* e o sistema de aquisição de dados (2) é composto por sensores de temperatura e *software* também da *Full Gauge Controls* para gerenciamento do sistema de aquecimento solar adquirido, SITRAD, comercializado pela empresa *Control Master*. Esse sistema realiza todas as medições de temperatura e consumo de gás do SAS e as armazena em arquivos para análises posteriores. A vazão de água consumida é obtida através de medidores individuais em cada apartamento.

A Figura 19 mostra esses equipamentos de forma isolada, e a maneira como eles estão distribuídos espacialmente em relação às bombas centrífugas e aos queimadores de passagem.

Figura 19. Controlador de temperatura e sistema de aquisição de dados. Disposição na instalação



(Fonte: Autor, 2018)

5 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA

Nesta seção, todas as etapas dos cálculos serão explicadas detalhadamente, bem como apresentadas as equações, tabelas e gráficos.

Conforme já citado, dois tipos de cálculos serão realizados no presente trabalho: 1) dimensionamento teórico de um sistema de aquecimento solar que atenda o edifício, dada suas características/ocupação e, 2) avaliação técnica do sistema de aquecimento solar instalado, a partir de medições da demanda de aquecimento e consumo de energia reais. A primeira metodologia identificará se o projeto original foi bem dimensionado, enquanto a segunda mostrará qual o comportamento térmico do sistema instalado em pleno funcionamento, em relação ao projeto teórico.

5.1 Cálculo da demanda de água quente

Em qualquer sistema de energia solar, seja ele térmico ou fotovoltaico, o primeiro fator a ser calculado é a demanda, e no presente caso será calculada a demanda de água quente mensal para suprir o consumo de todos os moradores do edifício.

Teoricamente, a demanda diária de água quente por pessoa ($V_{H_2O_pessoa_dia}$) é avaliada levando-se em conta a vazão média de um chuveiro ($Q_{chuveiro}$), o tempo de utilização ($tempo_{uso}$), a frequência de utilização do mesmo ($freq_{uso}$) e o número de pessoas. Assim, o volume total de água consumido diariamente é dado por:

$$V_{H_2O_pessoa_dia} = Q_{chuveiro} \times tempo_{uso} \times freq_{uso} \quad (4)$$

Para o dimensionamento de sistemas de aquecimento solar de água a NBR 15569 (ABNT, 2008) sugere o tempo médio de banho de 10 minutos, por pessoa. Já na pesquisa de posses e hábitos de consumo da Eletrobrás (2007), realizada em 2005 a partir de entrevista com 4310 moradores de todo o Brasil, obteve-se que 48,3% das pessoas demoram menos de 10 minutos no banho e 19,9% demoram de 10 a 20 minutos. Salienta-se que os dados em relação à duração do banho foram obtidos com base nas declarações dos usuários sem medições para aferição dos reais valores.

Para se efetuar os cálculos da demanda mensal de água quente, as seguintes valores são adotados (assumindo-se que cada pessoa toma um banho por dia):

$Q_{chuveiro} = 3,0$ l/min	ABNT NBR 15569 – Anexo C (Vazão Mínima)
$t_{uso} = 10$ min	ABNT NBR 15569 – Anexo C
$freq_{uso} = 2$ banhos/dia	Estimativa

$$V_{H_2O_pessoa_dia} = 3,0 \times 10 \times 2 \qquad V_{H_2O_pessoa_dia} = \begin{cases} 60 \text{ l/pessoa/dia} \\ 0,060 \text{ m}^3/\text{pessoa/dia} \end{cases}$$

Assim, considerando os 52 apartamentos e que em cada apartamento residem 4 pessoas, o consumo total diária de água para todo o edifício será:

$$n_{pessoas} = n_{aptos} n_{resd_apto} \qquad (5)$$

$$n_{pessoas} = 52 \times 4 = 208 \text{ pessoas}$$

$$V_{H_2O_dia} = V_{H_2O_pessoa_dia} n_{pessoas} \qquad (6)$$

$$V_{H_2O_dia} = 60 \times 208 = \begin{cases} 12.480 \text{ l/dia} \\ 12,480 \text{ m}^3/\text{dia} \end{cases}$$

De maneira que o consumo mensal estimado de água quente é dado por:

$$V_{H_2O_mês} = V_{H_2O_dia} n_{dias_mês} \qquad (7)$$

A Tabela 1 compara as demandas estimadas de água para cada mês com as demandas reais medidas para os anos de 2012, 2013, 2018 e 2019, além do volume redirecionado (medido) para a cisterna dos dois últimos anos. As demandas reais representam médias mensais de medidas diárias tomadas ao longo desses anos.

Chama-se a atenção para a elevada demanda de água (seja pelo elevado consumo pelos apartamentos ou desviado para a cisterna) no mês de agosto de 2018, bem como em alguns meses de 2019. No ano de 2019, há meses em que o volume de água desviado para a cisterna chega a ser maior do que o consumo dos apartamentos. Esse comportamento impactará, certamente, a eficiência do sistema de aquecimento solar, principalmente em um meses característico da estação de frio no nordeste.

Tabela 1. Demanda de água teórica e real (dados de consumo de água de 2012, 2013, 2018 e 2019).

DEMANDA DE ÁGUA - $V_{H2O_mês}$										
Mês	n_{dias_mes}	Teórica ^a [m ³ /mês]	Medida [m ³ /mês]							
			2012	2013	2018 ^b			2019 ^b		
			V_{aptos}	V_{aptos}	V_{aptos}	$V_{cisterna}$	$V_{aptos+cisterna}$	V_{aptos}	$V_{cisterna}$	$V_{aptos+cisterna}$
Jan	31	386,88	228,31	197,95	319,30	100	419,30	260,90	191	451,90
Fev	28	349,44	215,26	197,91	295,20	82	377,20	325,80	245	570,80
Mar	31	386,88	273,11	196,10	263,00	35	298,00	190,10	101	291,10
Abr	30	374,40	223,50	219,69	305,40	118	423,40	252,80	173	425,80
Mai	31	386,88	226,70	228,56	382,00	174	556,00	338,60	224	562,60
Jun	30	374,40	248,92	234,10	310,40	125	435,40	288,30	262	550,30
Jul	31	386,88	305,59	287,15	332,10	222	554,10	375,90	290	665,90
Ago	31	386,88	385,59	306,85	411,20	323	734,20	312,90	324	636,90
Set	30	374,40	290,71	337,88	329,00	210	539,00	376,70	284	660,70
Out	31	386,88	273,90	245,46	257,60	152	409,60	295,20	340	635,20
Nov	30	374,40	253,72	270,20	337,90	257	594,90	231,30	323	554,30
Dez	31	386,88	186,71	245,31	281,80	229	510,80	312,80	198	510,80
$V_{H2O_média_mês}$	---	379,60	259,34	247,26	318,74	168,92	487,66	296,78	246,25	543,03
$V_{H2O_ano} - [m^3/ano]$	---	4.555,20	3.112,02	2.967,16	3.824,90	2.027,00	5.851,90	3.561,30	2.955,00	6.516,30

a Equação (10)

b Sem anel de recirculação.

A elevação no consumo de água pelos apartamentos (de 2018 e 2019, em relação aos anos 2012 (23% e 14%) e 2013 (29% e 20%)) é explicada, em parte, pela maior ocupação do edifício, uma vez que nos anos anteriores a 2018 e 2019 nem todos os apartamentos estavam ocupados ou totalmente ocupados. Essa afirmativa pode ser verificada nas planilhas de consumo por apartamento nesses anos (Apêndice A), que mostram que, mesmo em 2019, alguns apartamentos ainda não estavam ocupados.

Como se pode ver, sem considerar o volume de água desviado para a cisterna, as medidas reais de consumo para os anos de 2018 e 2019 são, também, as que mais se aproximam dos cálculos da demanda teórica (baseada em metodologia descrita na norma ABNT NBR 15569). No entanto, o que mais chama a atenção nos anos de 2018 e 2019 é justamente o elevado volume de água desviado para a cisterna (53% e 83% de água a mais, respectivamente), o qual levará, certamente, a um grande consumo de gás e, por consequência, a baixa eficiência do sistema.

Como se verá na próxima seção, as demandas de energia que tomam como base a demanda teórica de água poderão ser, por consequência, superdimensionadas em relação às demais demandas (dos apartamentos). Espera-se que o projeto do SAS em funcionamento atenda, no mínimo, essa demanda teórica, de maneira a confirmar a capacidade de projeto da empresa que o dimensionou.

5.2 Cálculo da demanda de energia

Após a determinação das demandas de água, a próxima análise é efetuar o cálculo da demanda da energia necessária para realizar o aquecimento daquele volume de água. A demanda mensal de energia, independente do sistema de aquecimento utilizado, pode ser avaliada a partir das temperaturas de entrada e de saída da água no SAS e da demanda mensal de água:

$$DE_{mês} = V_{H_2O_mês} \rho_{H_2O} c_{pH_2O} (T_{H_2O_sai} - T_{H_2O_entra}) \quad (8)$$

Onde:

$V_{H_2O_mês}$	é a demanda mensal de água
ρ_{H_2O}	é a massa específica da água
c_{pH_2O}	é o calor específico da água
$T_{H_2O_sai}$	é a temperatura da água na saída do SAS (saída do reservatório 2)
$T_{H_2O_entra}$	é a temperatura da água na entrada do SAS (entrada do reservatório 1)

A temperatura de entrada da água no reservatório 1, $T_{H_2O_ent}$, foi adotada com a do ar ambiente, menos 2 °C (obtida a partir dos dados do BDMEP/INMET, estação João Pessoa/PB - OMM: 82798). Para os cálculos teóricos, a menor temperatura mensal de cada ano foi usada como valor de entrada. Por sua vez, a temperatura da água na saída dos coletores (entrada do reservatório 1) foi fixada em $T_{H_2O_sai} = 52$ °C, valor normalmente imposto aos sistemas de controle e suficiente para manter a média nos reservatórios próximo de 45 °C.

Adotando-se $\rho_{H_2O} = 1.000$ kg/m³, $c_{pH_2O} = 4,184$ kJ/(kg.°C), as temperaturas em graus Celsius e a demanda de água em metros cúbicos por mês, as demandas de energia, em MJ/mês e em MWh/mês, são dadas respectivamente por:

$$DE_{mes} = \frac{V_{H_2O_mês} \rho_{H_2O} c_{pH_2O} (T_{H_2O_sai} - T_{H_2O_entra})}{1000} \quad (9)$$

$$DE_{mês} = \frac{DE_{mes}}{3600} \quad (10)$$

Em termos anuais, as demandas de energia, em MJ/ano, podem ser escritas como:

$$DE_{ano} = \sum_{12} DE_{mês} \quad (11)$$

$$DE_{ano} = \sum_{12} DE_{mês} \quad (12)$$

A Tabela 2 compara as demandas de energia total a partir das demandas de água estimadas, e das reais medidas do seu consumo em cada mês, para os anos de 2012, 2013, 2018 e 2019. Para a demanda estimada (teórica), empregou-se como temperatura de entrada da água no reservatório, $T_{H_2O_entra}$, as menores temperaturas de cada mês para aqueles anos.

Chama-se a atenção para os meses de maior demanda energética de cada ano/situação (teórico: julho, 2012: agosto, 2013: setembro e 2018: agosto e 2019: julho). Estes são meses da estação de frio em João Pessoa, onde o número de horas de insolação normalmente é menor e as temperaturas de entrada de água são mais baixas, de maneira que, possivelmente, maior consumo de gás deverá ser observado. Conforme esperado, o desvio de água para a cisterna acarreta em aumento de demanda energética nas mesmas proporções (53% e 83% de energia a mais).

Tabela 2. Demanda total de energia, teórica e real (dados de consumo de água teórica e de 2012, 2013, 2018 e 2019).

DEMANDA DE ENERGIA – $DE_{mês}$													
Mês	$T_{H2O_sai}^a$	Teórica		2012		2013		2018			2019		
		$T_{H2O_entra}^b$	$DE_{mês}^c$	$T_{H2O_entra}^d$	$DE_{mês}^e$	$T_{H2O_entra}^d$	$DE_{mês}^e$	$T_{H2O_entra}^d$	$DE_{mês}^e$		$T_{H2O_entra}^d$	$DE_{mês}^e$	
									Aptos	Aptos + Cisterna		Aptos	Aptos + Cisterna
		[°C]	[°C]	[MJ/mês]	[°C]	[MJ/mês]	[°C]	[MJ/mês]	[°C]	[MJ/mês]	[MJ/mês]	[°C]	[MJ/mês]
Jan	52	25,5	42.896	25,5	25.314	26,2	21.368	26,2	34.468	45.262	26,4	27.945	48.403
Fev	52	25,6	38.598	25,6	23.777	26,6	21.033	26,0	32.113	41.033	26,1	35.306	61.855
Mar	52	26,1	41.924	26,1	29.596	26,9	20.594	26,2	28.390	32.168	26,3	20.441	31.302
Abr	52	25,1	42.139	25,9	24.407	25,9	23.991	25,1	34.373	47.654	26,0	27.501	46.320
Mai	52	24,6	44.353	25,0	25.610	25,3	25.533	24,6	43.793	63.741	25,9	36.976	61.437
Jun	52	23,7	44.332	23,7	29.474	24,0	27.425	23,9	36.494	51.190	23,9	33.896	64.699
Jul	52	23,0	46.942	23,4	36.568	23,0	34.842	23,6	39.462	65.841	23,4	44.981	79.683
Ago	52	23,2	46.619	23,2	46.463	23,7	36.333	24,0	48.173	86.013	23,7	37.050	75.414
Set	52	24,0	43.862	24,0	34.057	24,2	39.301	24,7	37.579	61.566	24,4	43.501	76.297
Out	52	24,8	44.029	24,8	31.171	25,4	27.318	26,0	28.023	44.558	25,1	33.225	71.492
Nov	52	25,5	41.512	25,7	27.919	25,5	29.959	26,5	36.051	63.471	26,0	25.162	60.299
Dez	52	26,0	42.086	26,1	20.233	26,0	26.686	26,3	30.302	54.926	26,2	33.766	55.139
Média	---	24,8	43.274	24,9	29.549	25,2	27.865	25,3	35.768	54.785	25,3	33.312	61.028
DE_{ano}	---	---	519.291	---	354.589	---	334.382	---	429.220	657.424	---	399.748	732.340

(a) Temperatura imposta, baseada no controle de temperatura do SAS

(b) Menor valor de temperatura dos anos 2012, 2013, 2018 e 2019

(c) Baseada da demanda teórica de água

(d) Temperatura do ar menos 2 °C (dados *BDMEP/INMET*)

(e) Baseada na demanda medida de água

Também, pela relação direta com a demanda de água, as demandas de energia que tomam como base a demanda teórica de água estarão superdimensionadas, em relação às que tem como base as demandas medidas dos anos 2012, 2013, 2018 e 2019 (à exceção do mês de agosto de 2018, quando a demanda medida foi maior do que a teórica). Assim, tomando a média anual, e sem levar o desvio da água para a cisterna, o projeto de um SAS que tenha como base a demanda teórica deverá apresentar um número maior de coletores solares e de outros componentes em maior número ou tamanho.

5.3 Cálculo da radiação solar (Duffie e Beckman, 1991)

Independente da metodologia a ser empregada para o dimensionamento do SAS, a avaliação da quantidade de energia solar (radiação) disponível no local de instalação do sistema deve ser *a priori* efetuada, de maneira a se determinar o tamanho do sistema (o qual depende intrinsecamente também da eficiência dos seus coletores) que atenda, ao menos parcialmente, a demanda energética requerida.

No presente trabalho, a avaliação da radiação solar será totalmente baseada na metodologia descrita por Duffie e Beckman (1991), cujas equações serão repetidas nessa seção, para melhor entendimento e como um guia geral para esse tipo de cálculo.

A intensidade da radiação que atinge uma determinada superfície varia de acordo com a inclinação da superfície em relação ao ângulo de incidência dos raios solares, sendo máxima quando a radiação é perpendicular a esta superfície ($\theta=0$, Figura 7.b). Para que a radiação seja sempre perpendicular às superfícies dos coletores solares, um sistema de acompanhamento do sol é exigido para os coletores. No entanto, esta opção elevaria os custos do SAS, tornando-o inviável para aplicação em edifícios, de maneira que a alternativa mais barata, mas eficiente, é posicionar os coletores solares em uma inclinação fixa, mas que ao menos torne máxima a captação de energia no período do inverno, meses de baixa incidência solar.

Nesse sentido, para absorção da maior quantidade possível de radiação no inverno, para os países localizados abaixo da linha do Equador, recomenda-se que os coletores solares sejam instalados em uma inclinação tal que seja adicionado um ângulo de cerca de 10° à sua latitude, mantendo a face voltada para o polo norte. Logo, uma vez que a latitude local é $7,12^\circ$ (sul), a inclinação final da superfície dos painéis será $\beta = 17^\circ$ (Figura 17.b), face voltada para o norte.

O cálculo da radiação mensal (baseado nas médias diárias) pode ser obtido através de alguns métodos específicos. Os mais comuns são o método de Li e Jordan (1960) e o método KT, para superfícies azimutalmente orientadas em $\gamma = 0$ (ou $\gamma = 180$) $\pm 15^\circ$, e o método KT generalizado, para qualquer ângulo azimutal de superfície, γ , os quais assumem que a radiação difusa e a refletida pelo terreno são isotrópicas.

Uma vez que os coletores solares estão posicionados de tal forma que o ângulo azimutal de superfície é $\gamma = -165^\circ$ E (ou 195° W), o método de Liu e Jordan (1960) pode ser empregado com boa precisão para a obtenção da **radiação solar média mensal sobre uma superfície inclinada não sombreada**, \bar{H}_T . Para a sua determinação, avalia-se, primeiro, a razão (\bar{R}) entre ela e a radiação solar média mensal sobre uma superfície horizontal, \bar{H} .

$$\bar{R} = \frac{\bar{H}_T}{\bar{H}} = \left(1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}\right)\bar{R}_b + \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}\left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right) + \rho_g\left(\frac{1 - \cos\beta}{2}\right) \quad (13)$$

A fração mensal relativa à radiação solar média mensal difusa, \bar{H}_d/\bar{H} , é uma função do índice de claridade médio mensal, $\bar{K}_T = \bar{H}/\bar{H}_0$, definido como a razão entre a radiação solar média mensal sobre uma superfície horizontal e a radiação solar média mensal extraterrestre sobre uma superfície horizontal. As correlações desenvolvidas por Erbs *et al.* (1982) são aqui empregadas.

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = \begin{cases} 1,391 - 3,560 \times \bar{K}_T + 4,189 \times \bar{K}_T^2 - 2,137 \times \bar{K}_T^3 & ; \quad \omega_s \leq 81,4^\circ, \quad 0,3 \leq \bar{K}_T \leq 0,8 \\ 1,311 - 3,022 \times \bar{K}_T + 3,427 \times \bar{K}_T^2 - 1,821 \times \bar{K}_T^3 & ; \quad \omega_s > 81,4^\circ, \quad 0,3 \leq \bar{K}_T \leq 0,8 \end{cases} \quad (14)$$

$$\bar{K}_T = \bar{H}/\bar{H}_0 \quad (15)$$

Para latitudes entre $+60^\circ$ e -60° , a radiação solar média mensal extraterrestre sobre uma superfície horizontal, \bar{H}_0 , pode ser obtida a partir da radiação solar média diária extraterrestre, H_0 , sendo suficiente substituir o n -ésimo dia do ano, n , pelo dia médio do mês (dia para o qual H_0 é o mais próximo de \bar{H}_0). Isto é, $\bar{H}_0 = H_0$, para n dado pela Tabela 3.

$$H_0 = \frac{24 \times 3600}{\pi} G_{sc} \left[1 + 0,033 \times \cos\left(\frac{360 \times n}{365}\right) \right] \times \left[\cos\phi \times \cos\delta \times \sin\omega_s + \frac{\pi\omega_s}{180} \sin\phi \times \sin\delta \right] \quad (16)$$

$G_{sc} = 1.367 \text{ W/m}^2$ é a constante solar e δ é a declinação solar (calculada em graus), para o dia n :

$$\delta = 23,45 \times \sin \left[\frac{\pi}{180} \left(360 \frac{284 + n}{365} \right) \right] \quad (17)$$

A Tabela 3 apresenta os dias médios recomendados de cada mês e os valores de n por mês ao longo do ano (Klein, 1977). Esses dados não podem ser empregados para $|\phi| > 65^\circ$.

Tabela 3. Dias médios recomendados e valores de n para cada mês.

Mês	n_{dias_mes}	n para o i -ésimo dia do mês	Para os dias médios do mês	
			data	n
Jan	31	i	17	17
Fev	28	$31 + i$	16	47
Mar	31	$59 + i$	16	75
Abr	30	$90 + i$	15	105
Mai	31	$120 + i$	15	135
Jun	30	$151 + i$	11	162
Jul	31	$181 + i$	17	198
Ago	31	$212 + i$	16	228
Set	30	$243 + i$	15	258
Out	31	$273 + i$	15	288
Nov	30	$304 + i$	14	318
Dez	31	$334 + i$	10	344

Na Equação (15), ω_s é o ângulo, em graus, da hora do pôr do sol (o do nascer do sol é o negativo), o qual é dado por:

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \times \tan \delta) \quad (18)$$

Agora, diferentemente da radiação extraterrestre, a radiação solar média diária para um determinado mês que incide sobre uma superfície horizontal na superfície da Terra, \bar{H} , é uma informação que só pode ser quantificada a partir de dados experimentais diários, uma vez que depende da atenuação devida ao espalhamento e absorção atmosférica (devido ao ar, água, poeira).

Existem algumas correlações que tentam avaliar a influência desses efeitos, no entanto, no presente trabalho, adotou-se empregar os dados fornecidos diretamente pelo *software* de gerenciamento de energia limpa do Ministério de Recursos Naturais do Canadá (RETScreen), que tem como colaborador a agência espacial americana (NASA)

Para a localização considerada (cidade de João Pessoa), os seguintes valores da radiação solar média diária sobre uma superfície horizontal na superfície da Terra, H , podem ser retirados do *RETScreen* (Tabela 4). Essa radiação também representa a radiação solar mensal para o dia médio representativo n do mês sobre a superfície horizontal, \bar{H} (note os menores valores para os meses de junho e julho).

Tabela 4. Dados climatológicos para a cidade de João Pessoa. Fonte: RETScreen.

Mês	Dia representativo n	\bar{T}_{amb}^a [°C]	T_{solo}^a [°C]	Irradiação $\bar{H} = H^*$	
				[MJ/m ² /dia]	[kWh/m ² /dia]
Jan	17	25,8	28,4	19,30	5,36
Fev	47	25,2	28,6	20,59	5,72
Mar	75	28,2	28,5	19,80	5,50
Abr	105	25,5	27,8	18,11	5,03
Mai	135	27,0	27,0	18,22	5,06
Jun	162	26,2	26,0	15,41	4,28
Jul	198	23,7	25,2	16,42	4,56
Ago	228	25,4	25,0	19,40	5,39
Set	258	27,5	25,7	20,48	5,69
Out	288	27,7	26,7	23,11	6,42
Nov	318	27,0	27,7	23,80	6,61
Dez	344	24,1	28,3	22,79	6,33
Média	---	26,1	27,1	19,78	5,50

a RETScreen. Dados médios históricos

A partir dessa tabela e da Eq. (15), aplicada para o dia médio representativo do mês, o índice de claridade médio mensal pode ser determinado e, em seguida, a razão \bar{H}_d/\bar{H} , Eq. (14).

A razão entre a radiação diária média sobre uma superfície inclinada e àquela sobre uma superfície horizontal para um determinado mês, $\bar{R}_b = \bar{H}_{bT}/\bar{H}_b$, é obtida como (para superfícies no localizadas no hemisfério sul e inclinadas em relação ao equador e, também, $\gamma = 180^\circ$):

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\phi + \beta) \times \cos \delta \times \sin \omega'_s + \frac{\pi \omega'_s}{180} \sin(\phi + \beta) \times \sin \delta}{\cos \phi \times \cos \delta \times \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \phi \times \sin \delta} \quad (19)$$

Onde:

$$\omega'_s = \min \left[\cos^{-1}(-\tan \phi \times \tan \delta), \cos^{-1}(-\tan(\phi + \beta) \times \tan \delta) \right] \quad (20)$$

Finalmente, para concluir os parâmetros da Eq. (13), é necessário ainda avaliar a refletância do solo, ρ_g , para cada mês do ano, o qual também depende da localização. Por falta de dados locais sobre esse parâmetro, atribui-se o valor fixo de 0,40 (próximo ao do concreto) para todos os meses do ano. Apesar dessa falta de informação, é importante salientar que esse parâmetro exerce pequena influência no cálculo da radiação média mensal sobre uma superfície inclinada.

A Tabela 5 apresenta os valores mensais de todos os parâmetros (em especial a oferta de energia pela fonte solar) envolvidos nas Eqs. (13) a (19), tendo como base, ainda, a Tabela 4. Deve-se observar que, de posse de \bar{R} e de \bar{H} , a radiação média diária para um determinado mês sobre uma superfície inclinada, \bar{H}_T , é obtida pela multiplicação desses parâmetros:

$$\bar{H}_T = \bar{R} \times \bar{H} \quad (21)$$

Os cálculos da tabela foram efetuados para a situação analisada do edifício:

Latitude: $\phi = -7,12^\circ$

Inclinação das superfícies dos coletores: $\beta = 17^\circ$

Deve-se lembrar que no momento da avaliação da energia solar disponível nas placas absorvedoras dos coletores solares, em especial pelo método empregado por Herranz (2009), a energia avaliada pelas equações anteriores deve ser multiplicada pelos rendimentos dos coletores solares e pelo sistema de acumulação, se houver.

Em alguns cálculos de sistemas de aquecimento solar, a irradiância (G : W/m^2) é empregada no lugar da irradiação (H : J/m^2), sendo avaliada como:

$$\bar{G}_T \left[\text{W}/\text{m}^2/\text{dia} \right] = \frac{10^6 \times \bar{H}_T \left[\text{MJ}/\text{m}^2/\text{dia} \right]}{h_{sol_T} \times 3600 \left[\text{s} / \text{hora} \right]} \quad (22)$$

Onde h_{sol_T} é o número médio de horas de brilho de sol durante o dia característico, n , sobre a superfície inclinada.

Tabela 5. Dados de radiação mensal média para a localização estudada (João Pessoa/PB, $\phi = -7,12^\circ$; $\beta = 17^\circ$).

Mês	n	\bar{H} ^a	δ	ω_s	\bar{H}_0	$\bar{K}_T = \bar{H}/\bar{H}_0$	\bar{H}_d/\bar{H}	ω_s'	h_{sol_T}	$\bar{R}_b = \bar{H}_{bT}/\bar{H}_b$	ρ_g	$\bar{R} = \bar{H}_T/\bar{H}$	\bar{H}_T	\bar{G}_T	n _{dias}	\bar{H}_T _{mes}
		[MJ/m ² /dia]	[graus]	[graus]	[MJ/m ² /dia]	[graus]	[h/dia]	[graus]	[MJ/m ² /dia]	[W/m ² /dia]	[MJ/m ² /mês]					
Jan	17	19,30	-20,9	92,7	38,68	0,50	0,43	86,2	11,5	0,83	0,40	0,90	17,40	420,55	31	539,32
Fev	47	20,59	-13,0	91,6	38,88	0,53	0,40	87,7	11,7	0,89	0,40	0,93	19,24	457,04	28	538,73
Mar	75	19,80	-2,4	90,3	37,92	0,52	0,41	89,6	11,9	0,97	0,40	0,98	19,48	453,13	31	603,99
Abr	105	18,11	9,4	88,8	35,34	0,51	0,42	88,8	11,8	1,07	0,40	1,04	18,86	442,40	30	565,80
Mai	135	18,22	18,8	87,6	32,25	0,57	0,37	87,6	11,7	1,16	0,40	1,10	20,05	477,03	31	621,55
Jun	162	15,41	23,1	86,9	30,52	0,50	0,42	86,9	11,6	1,20	0,40	1,12	17,19	411,99	30	515,83
Jul	198	16,42	21,2	87,2	31,16	0,53	0,40	87,2	11,6	1,18	0,40	1,11	18,20	434,76	31	564,29
Ago	228	19,40	13,5	88,3	33,79	0,57	0,36	88,3	11,8	1,11	0,40	1,07	20,75	489,66	31	643,28
Set	258	20,48	2,2	89,7	36,67	0,56	0,37	89,7	12,0	1,01	0,40	1,01	20,63	479,06	30	618,95
Out	288	23,11	-9,6	91,2	38,32	0,60	0,34	88,3	11,8	0,92	0,40	0,95	21,86	515,77	31	677,76
Nov	318	23,80	-18,9	92,5	38,55	0,62	0,32	86,6	11,5	0,84	0,40	0,90	21,33	513,19	30	639,81
Dez	344	22,79	-23,0	93,0	38,39	0,59	0,34	85,8	11,4	0,81	0,40	0,88	19,99	485,74	31	619,79
Média	---	19,78	---	---	35,87	0,55	0,38	---	11,7	1,00	0,40	1,00	19,58	465,03	---	595,76
Total Anual																
\bar{H}_T _{ano}																
7.149,09 [MJ/m ² /ano]																

a Tabela 4. RETScreen. Dados médios históricos

OBS: Observa-se, nessa tabela, que a irradiação calculada para a superfície inclinada, \bar{H}_T , é maior do que a irradiação sobre a superfície horizontal, \bar{H} , nos meses de abril a setembro. Esse comportamento é esperado, uma vez que foi empregada uma inclinação para os coletores solares ($\beta = 17^\circ$) que favorecesse o sistema de aquecimento solar nesses meses (os meses de frio).

5.4 Dimensionamento do SAS com aquecimento auxiliar

O dimensionamento do sistema de aquecimento solar é diretamente dependente de quanta energia solar deverá ser utilizada para atender a demanda térmica e da área disponível para instalação dos coletores. Os sistemas de aquecimento por energia solar são normalmente dimensionados assumindo-se que nem toda energia necessária para aquecer a demanda de água será fornecida pela fonte solar. Assim, parte da energia para o aquecimento deverá ser providenciada por um sistema auxiliar de aquecimento, que no presente trabalho consistirá de um sistema a gás (GLP a princípio e gás natural posteriormente).

Por outro lado, embora o sistema auxiliar de aquecimento seja pensado para complementar a demanda de energia térmica, parcialmente atendida pela fonte solar, o seu dimensionamento deve levar em conta a falha do SAS, de modo que toda a demanda de aquecimento seja atendida pelo sistema auxiliar a gás.

5.4.1 Aquecedores a Gás

No mercado, a seleção de um aquecedor a gás é realizada através da especificação de sua potência nominal. Dessa forma, para a seleção dos aquecedores, a demanda total de energia deve ser especificada em termos de potência. Para isso, deve-se considerar o tempo de uso dos aquecedores, h_{aquec} , para atender a demanda diária.

Assim, a partir da demanda mensal de energia, DE_{mes} , e do número de dias de cada mês, n_{dias} , a potência de aquecimento pode ser calculada como:

$$Pot_{aquec_min} [kW] = MAX_{val} \left[\frac{DE_{mes} \times 10^3}{3600 \times h_{aquec} \times n_{dias}} \right] \quad (23)$$

No presente trabalho, considerou-se que, no caso de falha do sistema de aquecimento pela fonte solar, o aquecedor de passagem a gás deve ter uma potência tal que seja capaz de atender toda a demanda diária por água quente em, no máximo, 5 horas.

Esse valor é uma estimativa de tempo para o pior cenário operacional do sistema auxiliar a gás, quando todo o volume de água deve ser aquecido desde a temperatura de entrada até a de temperatura de saída dos aquecedores. No entanto, em outros cenários, por exemplo, quando os

tanques de armazenamento já estiverem com água pré-aquecida, o tempo de acionamento dos aquecedores será consideravelmente menor (outras fórmulas são disponíveis)

O número de aquecedores é calculado, de forma arredondada para cima, como (empregando-se as funções matemáticas do *Excel*):

$$N_{aquec} = TETO \left[0,5 + INT \left(\frac{Pot_{aquec_min}}{Pot_{1aquec}} \right) \right] \quad (24)$$

A Tabela 6 apresenta os valores das potências mensais requeridas, quando o aquecimento se fizer exclusivamente pelo sistema a gás por esse período de tempo, para as demandas teóricas e para os anos 2012, 2013, 2018 e 2019. A partir dessas potências mensais, deve-se selecionar a maior entre elas, para se determinar o número de aquecedores necessários, em função da potência nominal do aquecedor de passagem selecionado e do tipo de combustível/gás.

Tabela 6. Potência de aquecimento requerida dos aquecedores a gás.
(Situação em que toda demanda energética é atendida pelos aquecedores)

POTÊNCIA SISTEMA AUXILIAR – Pot_{aquec} [kW/mês]									
Mês	ndias	h_{aquec} [h/dia]	Teórica	2012	2013	2018		2019	
						Aptos	Aptos + Cisterna	Aptos	Aptos + Cisterna
Jan	31	5	76,87	45,37	38,29	61,77	81,12	50,08	86,74
Fev	28	5	76,58	47,18	41,73	63,72	81,42	70,32	122,73
Mar	31	5	75,13	53,04	36,91	50,88	57,65	36,63	56,10
Abr	30	5	78,03	45,20	44,43	63,65	88,25	50,93	85,78
Mai	31	5	79,48	45,90	45,76	78,48	114,23	66,27	110,10
Jun	30	5	82,10	54,58	50,79	67,58	94,80	62,77	119,81
Jul	31	5	84,13	65,30	62,44	70,72	118,00	80,61	142,80
Ago	31	5	83,55	83,27	65,11	86,33	154,15	66,40	135,15
Set	30	5	81,23	63,07	72,78	69,59	114,01	80,56	141,29
Out	31	5	78,90	55,86	48,96	50,22	79,85	59,54	128,12
Nov	30	5	76,87	51,70	55,48	66,76	117,54	46,60	111,66
Dez	31	5	75,42	36,26	47,82	54,30	98,43	60,51	98,82
Pot_{max}	---	---	84,13	83,27	72,78	86,33	154,15	80,61	142,80
N_{aquec}	---	---	4 (3,46 GLP) (3,51 GN)	4 (3,43 GLP)	3 (3,00 GLP)	4 (3,60 GN)	7 (6,42 GN)	4 (3,36 GN)	6 (5,95 GN)

* Em destaque as potências máximas de cada situação analisada, a qual deverá ser a potência mínima para seleção dos aquecedores a gás. $Pot_{1aquec} = 24,3$ kW (GLP) e $24,0$ kW (GN).

O número de aquecedores para cada situação analisada também é disponibilizado na Tabela 6, tendo em vista que, conforme informado na Seção 4.3.3, o modelo de aquecedor escolhido foi o REU-157 BRS GLP, da marca RINNAI, cuja potência nominal é de $Pot_{aquec} = 24,3$ kW (no caso de GLP) e de $Pot_{aquec} = 24,0$ kW (no caso de GN).

Os resultados baseados nos dados teóricos e os baseados nos dados experimentais para o consumo dos apartamentos apontam que seriam necessários, de maneira geral, 4 aquecedores para atender a demanda no tempo estabelecido. Por outro lado, para os anos de 2018 e 2019, quando a demanda por aquecimento cresce, devido ao redirecionamento da água da prumada, os cálculos indicam que no mínimo 7 aquecedores seriam necessários. Esse comportamento revela o grande problema de se adotar o procedimento empregado para a água da prumada, tendo em vista que, como não será empregado esse número de aquecedores, mas apenas 4, o sistema auxiliar passará grande parte do tempo em funcionamento para poder atender a demanda.

5.4.2. Reservatórios Térmicos

O cálculo do volume de armazenamento de água quente segue, no presente trabalho, a norma ABNT NBR 15569 (2008), a qual orienta que o reservatório tenha um volume igual ou superior a 75% do volume de consumo diário, $V_{H_2O_dia}$. No presente trabalhos, adotou-se:

$$V_{acc} = 0,75 \times V_{H_2O_dia} \quad (25)$$

Uma vez que $V_{H_2O_dia} = 12.480$ l/dia, tem-se: $V_{acc} = 0,75 \times 12.480$

$$V_{acc} = \begin{cases} 9.360 \text{ l} \\ 9,36 \text{ m}^3 \end{cases}$$

Agora, o número de tanques de armazenamento de água quente pode ser calculado pela razão entre o volume calculado e o volume de um tanque selecionado de algum fabricante (arredonda, para cima, para o número par mais próximo) entre a área total de coletores e a área de um coletor (fornecida pelo fabricante, quando da seleção do tipo de coletor). Empregando-se as funções do *Excel*:

$$N_{acc} = TETO \left[0,5 + INT \left(\frac{V_{acc}}{V_{lacc}} \right) \right] \quad (26)$$

Para a marca e modelo de reservatório de armazenamento selecionado no projeto original (TRANSSSEN 5.000, $V_{Iacc} = 5.000$ litros), o número de reservatório é:

$$N_{acc} = TETO \left[0,5 + INT \left(\frac{9.300}{5.000} \right) \right]$$

$N_{acc} = 2$ reservatórios <table style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr> <td style="font-size: 2em;">{</td> <td> Marca: TRANSSSEN 5.000 Capacidade: 5.000 litros </td> </tr> </table>	{	Marca: TRANSSSEN 5.000 Capacidade: 5.000 litros
{	Marca: TRANSSSEN 5.000 Capacidade: 5.000 litros	

Dessa forma, o sistema híbrido do edifício pode armazenar um volume total de 10.000 litros de água quente.

Uma outra forma, também bastante empregada para se avaliar o volume do tanque de armazenamento de um SAS, leva em conta o consumo diário de água, as temperaturas de consumo, armazenamento e ambiente:

$$V_{acc} = MAX_{val} \left[V_{H_2O_dia} \times \left(\frac{T_{consumo} - \bar{T}_{amb}}{T_{armazena} - \bar{T}_{amb}} \right) \right] \quad (27)$$

Das informações de projeto, os seguintes valores foram empregados para a temperatura de consumo e de armazenamento de água:

$$T_{H_2O_consumo} = 38 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{H_2O_armazena} = 45 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Assim, o que vai definir o volume dos tanques de armazenamento é o volume de água consumido e a temperatura ambiente. O número de tanques de armazenamento continua sendo dado pela Eq. (26).

Assim, tomando-se os valores de volume de água (Tabela 4) e os valores disponíveis da temperatura do ar ambiente (Teórico, 2012, 2013 e 2018), a Tabela 7 apresenta os volumes dos tanques de armazenamento obtidos para cada situação, além do número de tanques que atenderiam esse volume (em função do modelo selecionado - TRANSSSEN 5.000, $V_{Iacc} = 5 \text{ m}^3$).

Como se pode perceber dos resultados dessa tabela, qualquer uma das alternativas pode ser empregada (embora a Eq. (25) seja bem simples) para a determinação, com boa estimativa, do

volume de acumulação de água quente para atender a demanda do edifício e, assim, do número de acumuladores (para todos os casos analisados, resultou em 2 reservatórios).

Tabela 7. Volume de água aquecida a ser armazenada nos tanques

Volume a ser armazenado – V_{acc} [m ³]							
Mês	Teórica	2012	2013	2018		2019	
				Aptos	Aptos + Cisterna	Aptos	Aptos + Cisterna
Jan	7,49	4,42	3,72	6,01	7,89	4,87	8,43
Fev	7,46	4,60	4,05	6,20	7,92	6,82	11,94
Mar	7,31	5,16	3,58	4,95	5,61	3,56	5,45
Abr	7,60	4,40	4,33	6,20	8,59	4,96	8,35
Mai	7,73	4,47	4,46	7,63	11,11	6,45	10,72
Jun	7,95	5,29	4,93	6,55	9,19	6,09	11,62
Jul	8,11	6,34	6,02	6,85	11,42	7,80	13,81
Ago	8,07	8,04	6,31	8,38	14,96	6,43	13,09
Set	7,88	6,12	7,07	6,77	11,09	7,83	13,73
Out	7,68	5,44	4,77	4,89	7,77	5,80	12,48
Nov	7,49	5,04	5,40	6,48	11,42	4,54	10,87
Dez	7,34	3,53	4,65	5,28	9,57	5,89	9,61
V_{acc_max}	8,11	8,04	7,07	8,38	14,96	7,83	13,81
N_{acc}	2 (1,62)	2 (1,61)	2 (1,41)	2 (1,68)	3 (2,99)	2 (1,57)	3 (2,76)

* Número de acumuladores avaliado em função do volume do tanque selecionado ($V_{Iacc} = 5 \text{ m}^3$).

5.4.3. Coletores Solares

No dimensionamento dos coletores solares, a variável fração solar, f , a razão entre a energia fornecida pela fonte solar e a demanda total de energia é o principal parâmetro de projeto. Como se verá mais adiante, a fração solar possui uma relação direta com a eficiência do coletor solar, de maneira que no cálculo de uma delas, uma variável estará presente na outra. Em projetos de SAS, a fração solar poderá ser avaliada, normalmente, de duas formas:

a) pré-estabelecida: a área total de coletor solar será calculada em função de uma fração mínima especificada que atenda a necessidade de aquecimento pela fonte solar.

b) calculada através de métodos específicos (como o *F-Chart*): a partir de uma área útil estimada de coletores (por exemplo, a área calculada pelo método anterior, ou a área da cobertura do edifício onde o sistema será instalado), a fração solar será calculada para se verificar a viabilidade do projeto. Caso a fração obtida seja menor do que um valor mínimo aceitável, e

exista área disponível para instalação, uma nova área deverá ser assumida, e os cálculos refeitos até o atendimento do valor aceitável.

O presente trabalho fará uso das duas metodologias, para verificar suas características e impacto no dimensionamento do SAS. Por exemplo, as áreas calculadas pelo método de fração mínima especificada serão testadas pelo método *F-Chart*.

5.4.3.a Fração solar: Valor mínimo especificado (Herranz, 2009)

Sob essa metodologia, o dimensionamento do SAS será efetuado a partir do estabelecimento de uma fração mínima desejável de energia que deve ser atendida pela fonte solar. Nesse trabalho, será estabelecido que o SAS atenda 65% da demanda total de energia. A Tabela 8 apresenta a energia que deve ser atendida unicamente por energia solar, sendo a fração ($f = 65\%$) da demanda de energia original da Tabela 2. De posse desses valores, os elementos que compõem o SAS podem ser, em seguida, dimensionados.

Tabela 8. Fração da energia, teórica e real, a ser fornecida pela fonte solar.

$DE_{solar} = 0,65 \times DE_{mês} - [MJ/mês]$							
Mês	Teórica	2012	2013	2018		2019	
				Aptos	Aptos + Cisterna	Aptos	Aptos + Cisterna
Jan	27.882	16.454	13.889	22.404	29.420	18.164	31.462
Fev	25.089	15.455	13.671	20.873	26.672	22.949	40.206
Mar	27.251	19.237	13.386	18.454	20.909	13.287	20.346
Abr	27.390	15.864	15.594	22.342	30.975	17.875	30.108
Mai	28.829	16.646	16.597	28.466	41.431	24.034	39.934
Jun	28.816	19.158	17.826	23.721	33.274	22.032	42.054
Jul	30.513	23.769	22.647	25.650	42.797	29.238	51.794
Ago	30.302	30.201	23.617	31.312	55.908	24.082	49.019
Set	28.510	22.137	25.545	24.427	40.018	28.275	49.593
Out	28.619	20.261	17.757	18.215	28.963	21.596	46.469
Nov	26.983	18.147	19.473	23.433	41.256	16.355	39.194
Dez	27.356	13.151	17.346	19.696	35.702	21.948	35.841
DE_{solar_media}	28.128	19.207	18.112	23.249	35.610	21.653	39.668
DE_{solar_ano} [MJ/ano]	337.539	230.483	217.348	278.993	427.325	259.836	476.021

* Demandas de energia, $DE_{mês}$, da Tabela 2.

A área de coletor solar necessária para atender a demanda de aquecimento pode ser calculada pela razão, anual, entre a energia que deve ser atendida/coberta pela fonte solar, DE_{solar_ano} , e a energia útil da fonte solar absorvida na placa do coletor, $\bar{H}_{T_ano_abs}$ (que leva em conta as perdas associadas ao próprio coletor, ao reservatório térmico, entre outros):

$$A_{coletor_tot} = \frac{DE_{solar_ano}}{\bar{H}_{T_ano_abs}} \quad (28)$$

Para avaliação da energia útil absorvida pela placa do coletor, $\bar{H}_{T_ano_abs}$, as eficiências do coletor solar ($\eta_{coletor}$) e do tanque de armazenamento (η_{boiler}) devem ser aplicadas à radiação disponível no plano inclinado do coletor, uma vez que, além das perdas associadas ao coletor solar, os reservatórios de armazenamento também dissipam energia para o meio ambiente (é, também, uma forma de levar em conta as demais perdas associadas ao sistema de aquecimento solar). De maneira simplificada, será assumida uma eficiência de cerca 85% para o equipamento de armazenamento ($\eta_{boiler} = 0,85$).

$$\bar{H}_{T_mês_abs} = \bar{H}_{T_mês} \times \eta_{coletor} \times \eta_{boiler} \quad (29)$$

$$\bar{H}_{T_ano_abs} = \sum_{12} \bar{H}_{T_mês_abs} \quad (30)$$

Por sua vez, a eficiência (mensal) de um coletor solar ($\eta_{coletor}$) depende de algumas variáveis. Duas delas são intrínsecas às características construtivas do próprio coletor, outras são variáveis climatológicas, como a temperatura de entrada, a temperatura ambiente e a irradiação. A equação que relaciona o rendimento do coletor (mensal) com as outras variáveis é dada por:

$$\eta_{coletor} = F_R (\tau\alpha)_n K_{\tau\alpha} - F_R U_L \times \frac{(T_{col_entra} - \bar{T}_{amb})}{\bar{G}_T} \quad (31)$$

Onde:

$F_R U_L$:	Produto relativo à perda de calor pelo coletor [W/m ² /°C]
$F_R (\tau\alpha)_n$:	Produto relativo à absorção de calor pelo coletor [adimensional]
T_{col_entra} :	Temperatura média da água na entrada do coletor [°C]
\bar{T}_{amb} :	Temperatura média mensal do ambiente [°C]
\bar{G}_T :	Irradiância sobre a superfície inclinada [W/m ² /dia]

Para se levar em conta a incidência inclinada dos raios solares sobre o vidro do coletor ao longo do ano, aplicou-se um fator de correção ótico na expressão do rendimento. De maneira geral, sem informações técnicas confiáveis, atribui-se o valor de 0,96 a esse fator ($K_{\tau\alpha} = \eta_{opt} = 0,96$).

Uma vez que o rendimento do coletor é também uma variável mensal, e que depende da irradiância no plano inclinado, conforme mostra a Eq. (31), ele é disponibilizado na Tabela 9, juntamente com os valores da irradiação mensal absorvida pelo coletor, para as cinco situações estudadas (teórico, 2012, 2013, 2018 e 2019). Nos cálculos, a média entre as temperaturas de entrada de água no reservatório 1, de consumo e de armazenamento ($T_{col_entra} = [T_{H2O_entra} + T_{H2O_consumo} + T_{H2O_armazena}]/3$) foi empregada como a temperatura da água na entrada do coletor. Embora seja uma estimativa, é uma medida razoável da temperatura da água na entrada do coletor quando o SAS estiver em funcionamento, e se aproxima muito da temperatura da água de consumo (38 °C).

A Tabela 9 mostra que o rendimento do coletor (e, por extensão, a irradiação absorvida) praticamente não varia para as situações estudadas ($\eta_{coletor} \cong 55$ e $\bar{H}_{T_ano_abs} \cong 3.350$ MJ/m²/ano). Esse fato se deve à pequena variação do segundo termo na equação da eficiência do coletor, para as condições térmicas do SAS aqui estudado (os valores do rendimento obtido para o coletor são muito próximos do valor disponibilizado pelo fabricante, $\eta_{col_fab} = 56\%$). Observa-se que os menores rendimentos dos coletores solares ocorrem nos meses de junho, em especial do ano de 2019 (49%). É também nesse mês que as menores intensidades de energia solar estão disponíveis para o coletor.

Adicionalmente, foi percebido que a temperatura de entrada do coletor, bem como o comportamento do sistema de acumulação de água quente, tem uma forte influência sobre esse rendimento, de maneira que a área de coletores calculada (e, por consequência, o número de coletores) poderá sofrer influência desses parâmetros.

O número de coletores a ser empregado no projeto será, então, dado pela razão (arredada, para cima, para o número par mais próximo) entre a área total de coletores e a área de um coletor (fornecida pelo fabricante, quando da seleção do tipo de coletor). Em função do arredondamento do número de coletores, a área total de coletores deve ser corrigida.

$$N_{coletor} = PAR_{maior} \left[\frac{A_{coletor_tot}}{A_{1coletor}} \right] \quad (32)$$

A Tabela 10 apresenta os valores para as áreas e o número de coletores solares, obtidos a partir dos dados da Tabela 8 (demanda de energia baseada na fração solar de 65%) e da Tabela 9 (irradiação absorvida, a qual leva em conta o rendimento do sistema coletor/acumulador).

Tabela 9. Rendimento do coletor e irradiação absorvida pelo sistema acumulador/coletor.

 $(\eta_{opt} = 0,96; \eta_{boiler} = 0,85; F_R U_L = 0,741; F_R(\tau\alpha)_n = 7,969 \text{ W/m}^2/\text{C}).$

Mês	$T_{col_entra} - [^{\circ}\text{C}]$					η_{boiler}	$\eta_{coletor}$					$\bar{H}_{T_mês_abs} - [\text{MJ/m}^2/\text{mês}]$				
	Teórica	2012	2013	2018	2019		Teórico	2012	2013	2018	2019	Teórico	2012	2013	2018	2019
Jan	36,2	36,2	36,4	36,4	36,5	0,85	0,55	0,55	0,56	0,56	0,52	250,82	250,82	254,87	254,87	238,66
Fev	36,2	36,2	36,5	36,3	36,4	0,85	0,56	0,56	0,57	0,57	0,53	257,08	257,08	262,40	259,21	243,77
Mar	36,4	36,4	36,6	36,4	36,4	0,85	0,57	0,57	0,58	0,57	0,53	290,57	290,57	295,39	291,17	273,72
Abr	36,0	36,3	36,3	36,0	36,3	0,85	0,55	0,56	0,56	0,55	0,53	264,72	269,34	269,34	264,72	252,59
Mai	35,9	36,0	36,1	35,9	36,3	0,85	0,56	0,56	0,56	0,56	0,54	294,04	296,39	298,16	294,04	284,04
Jun	35,6	35,6	35,7	35,6	35,6	0,85	0,52	0,52	0,52	0,52	0,48	228,22	228,22	229,92	229,35	212,39
Jul	35,3	35,5	35,3	35,5	35,5	0,85	0,52	0,53	0,52	0,53	0,49	250,35	252,70	250,35	253,87	235,11
Ago	35,4	35,4	35,6	35,7	35,6	0,85	0,55	0,55	0,55	0,55	0,52	298,20	298,20	301,16	302,94	283,37
Set	35,7	35,7	35,7	35,9	35,8	0,85	0,55	0,55	0,55	0,56	0,52	289,65	289,65	290,82	293,74	274,48
Out	35,9	35,9	36,1	36,3	36,0	0,85	0,57	0,57	0,58	0,58	0,54	328,51	328,51	332,07	335,63	312,49
Nov	36,2	36,2	36,2	36,5	36,3	0,85	0,58	0,58	0,58	0,59	0,55	313,68	314,80	313,68	319,31	299,60
Dez	36,3	36,4	36,3	36,4	36,4	0,85	0,57	0,58	0,57	0,58	0,54	302,73	303,31	302,73	304,46	286,60
Média	35,9	36,0	36,1	36,1	36,1	0,85	0,55	0,56	0,56	0,56	0,53	280,71	281,63	283,41	283,61	266,40
Anual	$\bar{H}_{T_ano_abs} - [\text{MJ/m}^2/\text{ano}]$											3.368,58	3.379,60	3.400,90	3.403,32	3.196,82

$$* \quad T_{col_entra} = \frac{T_{H_2O_entra} + T_{H_2O_consumo} + T_{H_2O_armazena}}{3}$$

(33)

$$** \quad \eta_{col_fab} = 56\%$$

Tabela 10. Valores calculados para as áreas e número de coletores.
(Fabricante: $A_{coletor} = 1,87 \text{ m}^2$)

$A_{coletor} [\text{m}^2]$ e $N_{coletor}$							
	Teórica	2012	2013	2018^a	2018^b	2019^a	2019^b
$A_{coletor_tot} - [\text{m}^2]$: (Calculada)	100,20	68,20	63,91	81,98	125,56	81,28	148,90
$N_{coletor}$	54 (53,58)	37 (36,47)	35 (34,18)	44 (43,84)	68 (67,15)	44 (43,46)	80 (79,63)
$A_{coletor_tot} - [\text{m}^2]$: (Corrigida)	100,98	69,19	65,45	82,28	127,16	82,28	149,60

OBS: * $A_{proj} = 87,89 \text{ m}^2$ (Área instalada de coletores, área de projeto)

** $N_{coletor_projeto} = 47$

a Demanda associada apenas aos apartamentos.

b Demanda total associada à soma dos apartamentos e do redirecionado à cisterna.

De acordo com essa tabela, o número (e a área) de coletores calculado pela demanda teórica (54 coletores, $100,98 \text{ m}^2$) é o que mais se apresenta de forma conservativa (7 coletores em excesso), quando em condições normais de operação, comparativamente ao número de coletores (e da área) instalados no edifício (47 coletores, $87,89 \text{ m}^2$ de área total).

Para as demandas medidas de 2012 e 2013, as áreas e os respectivos números de coletores são bem menores do que os de instalação e, como já explicado, se devem à baixa ocupação do edifício, que leva à baixa demanda energética. Certamente, essas áreas não serão suficientes para atender a demanda de energia mínima por fonte solar, quando da ocupação total do edifício.

Para os anos de 2018 e 2019, sem se considerar a água desviada para a cisterna, os resultados são mais realísticos (44 coletores para os dois anos), uma vez que a ocupação do edifício é mais próxima da ocupação total (e semelhante para os dois anos). Por outro lado, quando se considera o volume de água (e a respectiva demanda energética) associada ao redirecionamento para a cisterna (também medida), que pode ser considerado como um “vazamento”, observa-se que o seu impacto sobre tamanho do sistema, isto é, a área ou o número de coletores, seria extremamente elevada(o), em comparação às situações teóricas e sem vazamento.

O comportamento geral da metodologia teórica demonstra que ela pode ser empregada com boa segurança para o projeto de SAS, apesar de ainda depender de conhecimentos práticos sobre o rendimento do sistema de coletores e de acumulação.

Como observação final, levanta-se a questão acerca do não conhecimento das informações de projeto empregadas no presente trabalho para comparação, quando de um projeto novo. Nesse caso, não se poderia afirmar que a área e o número de coletores calculados pela

metodologia teórica seriam as melhores. Essa consideração pode ser melhor trabalhada pelo emprego do método *F-Chart*, para determinação da fração solar, a partir de uma área conhecida.

5.4.3.b Fração solar: Método *F-Chart* (Duffie e Beckman, 2006)

O método *F-Chart* foi desenvolvido por Klein e colaboradores (1976, 1977) e Beckman e colaboradores (1977), sendo um dos mais empregados em projeto de SAS. Nesse método, a principal variável é a área do coletor, ao passo que as variáveis secundárias são a capacidade de armazenamento, o tipo de coletor, a carga e o tamanho do coletor e a vazão do fluido.

O método é uma correlação entre os resultados de centenas de simulações de desempenho térmico de sistemas de aquecimento solar realizados com o TRNSYS, em que as condições de simulação foram variadas ao longo de intervalos de parâmetros específicos dos projetos do sistema prático (Klein *et al.*, 1977). Essa correlação permite determinar a fração solar f , considerando-se uma área especificada de coletores solares.

A fração solar depende de duas variáveis adimensionais “ X ” e “ Y ” que interpretam as perdas térmicas e os ganhos de energia do sistema solar, respectivamente. Esses dois parâmetros também levam em conta as características térmicas específicas de cada coletor, fornecidas pelos seus fabricantes, a carga de aquecimento mensal, a radiação solar diária média mensal incidente no plano do coletor, e a temperatura diária média mensal ambiente (Oliveira *et al.*, 2006).

A função empírica que descreve a relação entre a fração solar e essas variáveis é dada por (Capítulo 20 - Duffie e Beckman, 2006):

$$f = 1,029 \times Y - 0,065 \times X - 0,245 \times Y^2 + 0,0018 \times X^2 + 0,0215 \times Y^3 \quad (34)$$

O parâmetro X , adimensional, representa a razão entre a energia mensal perdida pelo coletor e a carga de aquecimento mensal requerida, sendo expressa pela seguinte equação:

$$X = F_R U_L \times \frac{F'_R}{F_R} \times (T_{ref} - \bar{T}_{amb}) \times \Delta t \times \frac{A_{coletor}}{DE_{mês}} \quad (35)$$

Onde:

$F_R U_L$: Fator de remoção de perda de calor do coletor [W/m²/°C]

$\frac{F'_R}{F_R}$: Fator de correção térmica [adimensional]

T_{ref} :	Temperatura de referência [= 100 °C]
T_{amb} :	Temperatura média mensal do ambiente [°C]
Δt :	Segundos do mês (= $h_{mês} \times 3600 = 24 \times n_{dias_mes} \times 3600$)
$A_{coletor}$:	Estimativa da área total de coletores a serem instalados [m ²].
$DE_{mês}$:	Demanda de aquecimento mensal [J/mês]

O fator de remoção de perda de calor do coletor ($F_R U_L$) é fornecido pelo fabricante quando das especificações técnicas do coletor selecionado.

O fator de correção térmica (F_R'/F_R) corrige o desempenho do coletor em relação à queda de temperatura entre o coletor e o tanque de armazenamento (*boiler*) introduzida pela presença de um trocador de calor em SAS com troca de calor indireta. Como o sistema analisado é direto (sem trocador de calor intermediário), $F_R'/F_R = 1$. A temperatura de referência (\bar{T}_{ref}) usada no presente trabalho foi de 100 °C.

O parâmetro Y , também adimensional, representa a razão da energia solar total absorvida pela carga total de aquecimento ou demanda ($DESOL$) durante o mesmo período. Essa variável é expressa pela seguinte equação:

$$Y = F_R (\tau\alpha)_n \times \frac{F_R'}{F_R} \times \left[\frac{(\overline{\tau\alpha})}{(\tau\alpha)_n} \right] \times \bar{H}_{T_mês} \times \frac{A_{coletor}}{DE_{mês}} \quad (36)$$

Onde:

$F_R (\tau\alpha)_n$:	Produto transmitância-absortância normal [adimensional]
$\frac{(\overline{\tau\alpha})}{(\tau\alpha)_n}$:	Fator de correção de inclinação do coletor [adimensional]
$\bar{H}_{T_mês}$:	Média mensal da radiação diária no plano do coletor [MJ/m ² /mês]
$A_{coletor}$:	Estimativa da área total de coletores a serem instalados [m ²].
$DE_{mês}$:	Demanda de aquecimento mensal [MJ/mês]

O produto $F_R (\tau\alpha)_n$ também é fornecido pelo fabricante do coletor, quando das suas especificações técnicas.

O fator de correção de inclinação do coletor, $(\overline{\tau\alpha})/(\tau\alpha)_n$, quando não fornecido, é geralmente especificado, e no presente trabalho é adotado o valor $(\overline{\tau\alpha})/(\tau\alpha)_n = K_{\tau\alpha} = \eta_{opt} = 0,96$.

Finalmente, após a avaliação da fração solar para cada mês, a fração solar anual é avaliada como ($EC_{mês} = f_{mês} \times DE_{mês}$: Energia Coberta pela fonte solar, a cada mês):

$$f_{anual} = \frac{\sum_{12} EC_{mês}}{DE_{ano}} = \frac{\sum_{12} f_{mês} \times DE_{mês}}{DE_{ano}} \quad (37)$$

A Tabela 11 apresenta os resultados para a fração solar esperadas, mensal e anual, obtidos pelo método *F-Chart*, empregando-se as áreas e as demandas energéticas apresentadas na Tabela 10 (obtidas com o primeiro método), caso essas áreas de coletores fossem instaladas no edifício para atender a demanda específica de água e energia de cada situação: a área teórica (100,98 m²) e áreas associadas aos consumos medidos dos anos de 2012 (69,19 m²), 2013 (65,45 m²). A Tabela 12 apresenta os mesmos resultados, agora para os anos de 2018 (82,28 m² e 127,16 m²) e 2019 (82,28 m² e 149,60 m²), desconsiderando-se ou considerando-se a demanda de energia associada ao retorno da água para a cisterna.

Nos cálculos, os dados dos coletores solares empregados, disponibilizados na Seção 3.4.1, além de outros requeridos nas Eqs. (35) e (36) são aqui repetidos para melhor detalhamento:

$$\begin{aligned} \eta_{col_fab} &= 0,56 & T_{ref} &= 100 \text{ }^\circ\text{C} \\ F_R (\tau\alpha)_n &= 0,741 & F_R U_L &= 7,969 \\ F'_R / F_R &= 1 & (\overline{\tau\alpha})/(\tau\alpha)_n &\cong K_{\tau\alpha} = \eta_{opt} = 0,96 \end{aligned}$$

Os resultados obtidos com o método *F-Chart* apontam que a fração solar mínima de 65%, exigida pelo método empregado por Herranz (2009), não é alcançada, embora a média anual esteja próxima de 60%. Em termos mensais, há situações em que a fração solar é muito baixa, em torno de 45%. Assim, as áreas obtidas com a metodologia anterior seriam insuficientes para que a fonte solar supra o mínimo exigido.

Deve-se lembrar, no entanto, que os resultados apresentados nessas tabelas não são muito úteis para comparação com o comportamento do sistema real, instalado, uma vez que são avaliados em função de uma área hipotética, obtida a partir da demanda de cada ano, a qual não é a demanda representativa do edifício, uma vez que a sua ocupação não é a total (principalmente para os anos de 2012 e 2013). Os resultados servem apenas para comparar as duas metodologias, de uma maneira global. Exceção deve ser feita para a área obtida a partir da demanda teórica.

Tabela 11. Fração solar avaliada pelo método *F-Chart*. Teórica, 2012 e 2013.
Áreas de coletores calculadas com a metodologia anterior. Demandas de energia real.

Fração Solar - <i>f</i>									
Mês	Teórica			2012			2013		
	$A_{coletor} = 100,98 \text{ m}^2$ $N_{col} = 54$ coletores $DE_{mês_teórico}$			$A_{coletor} = 69,19 \text{ m}^2$ $N_{col} = 37$ coletores $DE_{mês_2012}$			$A_{coletor} = 65,45 \text{ m}^2$ $N_{col} = 35$ coletores $DE_{mês_2013}$		
	X	Y	<i>f</i>	X	Y	<i>f</i>	X	Y	<i>f</i>
Jan	3,64	0,90	0,53	4,23	1,05	0,59	4,69	1,18	0,64
Fev	3,65	1,00	0,59	4,06	1,12	0,64	4,28	1,19	0,67
Mar	3,70	1,03	0,61	3,59	1,00	0,60	4,82	1,37	0,73
Abr	3,61	0,96	0,57	4,22	1,14	0,64	4,06	1,10	0,63
Mai	3,57	1,01	0,60	4,21	1,19	0,67	3,98	1,13	0,65
Jun	3,50	0,84	0,50	3,60	0,86	0,51	3,65	0,88	0,51
Jul	3,44	0,86	0,52	3,01	0,76	0,47	3,01	0,75	0,47
Ago	3,46	0,99	0,60	2,38	0,68	0,45	2,86	0,82	0,52
Set	3,52	1,01	0,61	3,11	0,89	0,56	2,54	0,73	0,48
Out	3,58	1,11	0,66	3,47	1,07	0,64	3,71	1,16	0,68
Nov	3,64	1,11	0,66	3,70	1,13	0,66	3,27	0,99	0,61
Dez	3,69	1,06	0,62	5,25	1,51	0,78	3,77	1,08	0,63
<i>f</i> anual	---	---	0,59	---	---	0,58	---	---	0,59

Tabela 12. Fração solar avaliada pelo método *F-Chart*. 2018 e 2019.
Áreas de coletores calculadas com a metodologia anterior. Demandas de energia real.

Fração Solar - <i>f</i>												
Mês	2018						2019					
	$A_{coletor} = 82,28 \text{ m}^2$ $N_{col} = 44$ coletores $DE_{mês_2018}^a$			$A_{coletor} = 127,16 \text{ m}^2$ $N_{col} = 68$ coletores $DE_{mês_2018}^b$			$A_{coletor} = 82,28 \text{ m}^2$ $N_{col} = 44$ coletores $DE_{mês_2019}^b$			$A_{coletor} = 149,60 \text{ m}^2$ $N_{col} = 80$ coletores $DE_{mês_2019}^b$		
	X	Y	<i>f</i>	X	Y	<i>f</i>	X	Y	<i>f</i>	X	Y	<i>f</i>
Jan	3,66	0,92	0,54	4,31	1,08	0,60	4,50	1,13	0,62	4,72	1,19	0,64
Fev	3,56	0,98	0,59	4,30	1,19	0,67	3,23	0,89	0,55	3,35	0,93	0,56
Mar	4,44	1,25	0,69	6,06	1,70	0,82	6,16	1,73	0,83	7,31	2,05	0,89
Abr	3,60	0,96	0,57	4,02	1,07	0,62	4,45	1,20	0,67	4,80	1,30	0,70
Mai	2,94	0,83	0,52	3,13	0,88	0,55	3,42	0,98	0,59	3,75	1,08	0,63
Jun	3,45	0,83	0,49	3,80	0,91	0,53	3,72	0,89	0,52	3,54	0,85	0,50
Jul	3,31	0,84	0,51	3,07	0,78	0,48	2,91	0,73	0,46	2,99	0,75	0,47
Ago	2,70	0,78	0,50	2,34	0,68	0,45	3,52	1,02	0,61	3,15	0,91	0,56
Set	3,32	0,96	0,59	3,13	0,91	0,56	2,88	0,83	0,53	2,98	0,86	0,54
Out	4,51	1,42	0,77	4,39	1,38	0,76	3,85	1,19	0,69	3,26	1,01	0,62
Nov	3,37	1,04	0,63	2,96	0,91	0,57	4,86	1,49	0,79	3,69	1,13	0,67
Dez	4,16	1,20	0,68	3,54	1,02	0,61	3,73	1,07	0,63	4,16	1,20	0,68
<i>f</i> anual	---	---	0,58	---	---	0,58	---	---	0,61	---	---	0,60

a Demanda associada apenas aos apartamentos.

b Demanda total associada à soma dos apartamentos e do redirecionado à cisterna.

Para mostrar que as áreas (ou número de coletores) calculadas baseadas nas demandas energéticas dos anos 2012 e 2013 são insuficientes para atender a demanda quando o edifício estiver completamente ocupado, a Tabela 13 reavalia a fração solar, substituindo-se a demanda energética medida de cada ano pela demanda teórica (a maior demanda, sem considerar a demanda devido ao desvio para a cisterna dos anos 2018 e 2019).

Como se pode ver na Tabela 13, as áreas de coletores baseadas nos anos de 2012 e 2013 não atendem a demanda por energia solar (fração solar anual de 0,44 e 0,42, respectivamente). Com as áreas calculadas para os anos de 2018 e 2019 e considerando, nos seus cálculos, as demandas dos apartamentos apenas ($A_{coletor} = 82,28 \text{ m}^2$; $N_{col} = 44$ coletores), a fração solar também diminui (de 58% e 61% para 51%), uma vez que a demanda de energia teórica é maior do que as demandas dos apartamentos. Por outro lado, se as áreas obtidas com as demandas associadas ao desvio da água da prumada para a cisterna forem consideradas ($A_{coletor} = 127,16 \text{ m}^2$; $N_{col} = 68$ coletores e $A_{coletor} = 149,60 \text{ m}^2$; $N_{col} = 80$ coletores), o sistema operaria com fração solar mais elevada (69% e 75%), respectivamente, e a fração mínima requerida seria naturalmente satisfeita.

Finalmente, para concluir essa análise, nas Tabelas 14 e 15 são refeitos os cálculos, empregando a área real instalada de coletores ($N_{col} = 47$ coletores, $A_{proj} = 87,89 \text{ m}^2$), mas mantendo as demandas energéticas específicas de cada situação/ano. O objetivo é avaliar a eficiência do projeto original, mostrando se essa área é adequada (fração solar em torno de 65%) à demanda energética. Além disso, essa tabela irá mostrar o problema pelo qual o sistema de aquecimento está passando (o desvio da água da prumada para a cisterna, em vez da recirculação).

Essas tabelas revelam que o sistema de aquecimento opera nos limites do aceitável, sob o ponto de vista de fração solar. Apenas nos anos 2012 e 2013, quando a demanda por aquecimento é baixa (em virtude da baixa ocupação do edifício), o sistema opera com fração solar anual em torno do valor mínimo requerido (0,68 e 0,71, respectivamente). Mesmo assim, para esses anos, nos meses mais frios (de junho a setembro), o sistema opera abaixo do exigido (mínimos de 0,54 e 0,58, respectivamente). Também, embora o panorama não seja tão ruim (considerando-se apenas as demandas dos apartamentos) para os anos de 2018 (fração anual de 0,61) e 2019 (fração anual de 0,63), há meses em que a fração solar é baixa (0,52 em junho/2018, 0,48 em julho/2019). Nesse sentido, é de se esperar que um consumo de gás maior seja observado em relação ao esperado.

Agora, ao se considerar um aumento de demanda, como a demanda teórica ou considerando-se o desvio da água da prumada para a cisterna, o cenário não é energeticamente favorável para o SAS nos anos 2018 e 2019 em termos de suficiência solar .

Tabela 13. Fração solar avaliada pelo método *F-Chart*.
 Áreas de coletores calculadas com a metodologia anterior. Demandas de energia teórica ($DE_{mês_teórico}$)

Fração Solar - <i>f</i>																		
Mês	2012			2013			2018						2019					
	$A_{coletor} = 69,19 \text{ m}^2$ $N_{col} = 37$ coletores $DE_{mês_teórico}$			$A_{coletor} = 65,45 \text{ m}^2$ $N_{col} = 35$ coletores $DE_{mês_teórico}$			$A_{coletor} = 82,28 \text{ m}^2$ ^a $N_{col} = 44$ coletores $DE_{mês_teórico}$			$A_{coletor} = 127,16 \text{ m}^2$ ^b $N_{col} = 68$ coletores $DE_{mês_teórico}$			$A_{coletor} = 82,28 \text{ m}^2$ ^a $N_{col} = 44$ coletores $DE_{mês_teórico}$			$A_{coletor} = 149,60 \text{ m}^2$ ^b $N_{col} = 80$ coletores $DE_{mês_teórico}$		
	X	Y	<i>f</i>	X	Y	<i>f</i>	X	Y	<i>f</i>	X	Y	<i>f</i>	X	Y	<i>f</i>	X	Y	<i>f</i>
Jan	2,50	0,62	0,40	2,34	0,59	0,38	2,94	0,74	0,46	4,54	1,14	0,63	2,93	0,74	0,46	5,33	1,34	0,69
Fev	2,50	0,69	0,45	2,33	0,65	0,43	2,96	0,82	0,51	4,57	1,26	0,69	2,95	0,82	0,51	5,37	1,49	0,76
Mar	2,53	0,71	0,46	2,37	0,67	0,44	3,01	0,84	0,53	4,65	1,30	0,71	3,00	0,84	0,53	5,46	1,53	0,78
Abr	2,45	0,66	0,43	2,31	0,63	0,41	2,94	0,79	0,49	4,54	1,21	0,67	2,90	0,79	0,49	5,28	1,43	0,74
Mai	2,43	0,69	0,45	2,29	0,65	0,43	2,91	0,82	0,52	4,49	1,27	0,70	2,85	0,82	0,52	5,19	1,49	0,77
Jun	2,40	0,57	0,37	2,26	0,54	0,35	2,84	0,68	0,42	4,39	1,05	0,59	2,84	0,68	0,42	5,17	1,24	0,65
Jul	2,35	0,59	0,38	2,23	0,56	0,37	2,78	0,70	0,44	4,30	1,09	0,61	2,79	0,70	0,44	5,07	1,28	0,68
Ago	2,37	0,68	0,45	2,23	0,64	0,43	2,79	0,81	0,52	4,31	1,25	0,70	2,80	0,81	0,51	5,09	1,47	0,77
Set	2,41	0,69	0,46	2,27	0,66	0,44	2,84	0,83	0,52	4,39	1,28	0,71	2,85	0,83	0,52	5,19	1,50	0,78
Out	2,46	0,76	0,50	2,30	0,72	0,48	2,87	0,90	0,57	4,44	1,39	0,76	2,91	0,90	0,57	5,29	1,64	0,83
Nov	2,49	0,76	0,50	2,36	0,72	0,48	2,93	0,90	0,57	4,52	1,39	0,76	2,95	0,90	0,57	5,36	1,64	0,83
Dez	2,52	0,72	0,47	2,39	0,69	0,45	2,99	0,86	0,54	4,62	1,33	0,72	3,00	0,86	0,54	5,45	1,57	0,79
<i>f_{anual}</i>	---	---	0,44	---	---	0,42	---	---	0,51	---	---	0,69	---	---	0,51	---	---	0,75

a Área obtida pelo método anterior, considerando a demanda dos apartamentos apenas.

b Área obtida pelo método anterior, considerando a demanda total (apartamentos e cisterna).

Tabela 14. Fração solar avaliada pelo método *F-Chart*. Teórica, 2012 e 2013.
 Área instalada de coletores ($A_{coletor} = A_{proj} = 87,89 \text{ m}^2$), demandas de energia específicas.

Fração Solar – <i>f</i>									
$A_{coletor} = A_{proj} = 87,89 \text{ m}^2$									
$N_{col} = 47 \text{ coletores}$									
Mês	Teórica			2012			2013		
	$DE_{mês_teórico}$			$DE_{mês_2012}$			$DE_{mês_2013}$		
Jan	3,17	0,79	0,48	5,37	1,33	0,69	6,30	1,58	0,76
Fev	3,18	0,87	0,54	5,16	1,42	0,74	5,75	1,60	0,79
Mar	3,22	0,90	0,55	4,56	1,28	0,70	6,48	1,83	0,85
Abr	3,14	0,84	0,52	5,36	1,45	0,75	5,46	1,47	0,75
Mai	3,10	0,88	0,54	5,35	1,52	0,78	5,34	1,52	0,78
Jun	3,04	0,73	0,45	4,58	1,09	0,60	4,90	1,18	0,63
Jul	3,00	0,75	0,47	3,83	0,96	0,56	4,04	1,01	0,58
Ago	3,01	0,86	0,54	3,02	0,87	0,54	3,84	1,11	0,65
Set	3,06	0,88	0,55	3,94	1,14	0,66	3,41	0,98	0,60
Out	3,12	0,96	0,60	4,41	1,36	0,75	4,99	1,55	0,81
Nov	3,17	0,96	0,60	4,70	1,43	0,77	4,39	1,34	0,74
Dez	3,21	0,92	0,57	6,67	1,92	0,87	5,06	1,45	0,76
<i>fanual</i>	---	---	0,53	---	---	0,68	---	---	0,71

Tabela 15. Fração solar avaliada pelo método *F-Chart*. 2018 e 2019.
 Área instalada de coletores ($A_{coletor} = A_{proj} = 87,89 \text{ m}^2$), demandas de energia específicas.

Fração Solar – <i>f</i>												
$A_{coletor} = 87,89 \text{ m}^2$												
$N_{col} = 47 \text{ coletores}$												
Mês	2018						2019					
	$DE_{mês_2018}^a$			$DE_{mês_2018}^b$			$DE_{mês_2019}^a$			$DE_{mês_2019}^b$		
Jan	3,91	0,98	0,57	2,98	0,74	0,46	4,81	1,21	0,65	2,77	0,70	0,44
Fev	3,80	1,05	0,61	2,97	0,82	0,51	3,45	0,95	0,57	1,97	0,54	0,37
Mar	4,74	1,33	0,72	4,19	1,17	0,66	6,58	1,85	0,85	4,30	1,21	0,68
Abr	3,85	1,03	0,60	2,78	0,74	0,47	4,75	1,29	0,70	2,82	0,76	0,48
Mai	3,14	0,89	0,55	2,16	0,61	0,41	3,66	1,05	0,62	2,20	0,63	0,42
Jun	3,69	0,88	0,52	2,63	0,63	0,40	3,97	0,95	0,55	2,08	0,50	0,33
Jul	3,54	0,89	0,53	2,12	0,54	0,35	3,11	0,78	0,48	1,76	0,44	0,30
Ago	2,88	0,83	0,53	1,61	0,47	0,33	3,76	1,09	0,64	1,85	0,53	0,37
Set	3,54	1,03	0,62	2,16	0,63	0,42	3,07	0,89	0,55	1,75	0,51	0,35
Out	4,82	1,51	0,80	3,03	0,95	0,59	4,12	1,28	0,72	1,91	0,59	0,41
Nov	3,60	1,11	0,66	2,05	0,63	0,43	5,19	1,59	0,81	2,17	0,66	0,45
Dez	4,44	1,28	0,71	2,45	0,71	0,46	3,99	1,15	0,66	2,44	0,70	0,46
<i>fanual</i>	---	---	0,61	---	---	0,44	---	---	0,63	---	---	0,40

a Demanda associada apenas aos apartamentos.

b Demanda total associada à soma dos apartamentos e do redirecionado à cisterna.

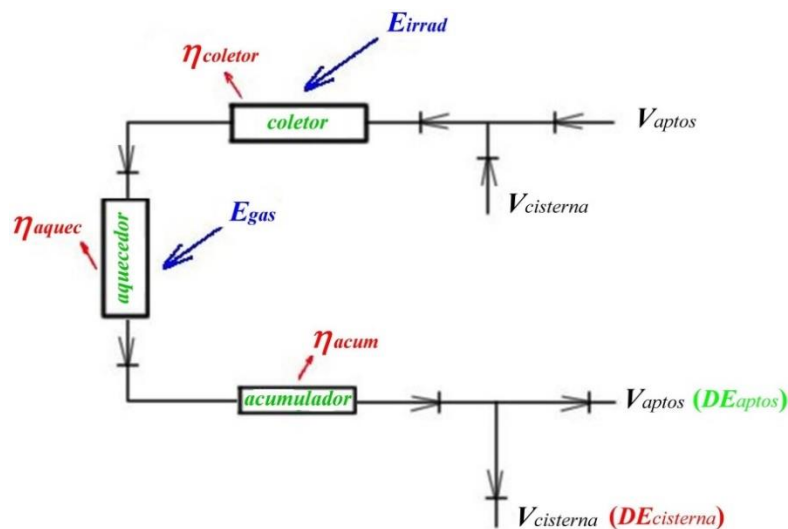
Considerando-se a demanda extra, devido ao desvio do volume da prumada para a cisterna, no ano de 2018, a eficiência solar do sistema é drasticamente reduzida (de 61% para 44%) e no ano de 2019, de 63% para 40%. Isto é, o SAS não é capaz de atender a demanda energética nessa situação, indicando que a solução adotada para o problema de aumento de pressão no sistema não é adequada. Chama a atenção o baixíssimo valor da fração solar para os meses de agosto/2018 (33%) e de julho/2019 (0,30). Certamente, sob essa dinâmica, o sistema de aquecimento auxiliar a gás deverá ser muito utilizado, tornando o sistema inviável economicamente.

A partir da análise de todos os resultados apresentados até o momento, pode-se concluir, de maneira geral, que o método *F-Chart* apresenta vantagens em relação ao primeiro método, uma vez que o mesmo permitir verificar o comportamento do SAS de maneira mais detalhada, mês a mês e não apenas global/anual, além de levar em conta a eficiência do coletor de maneira mais aprofundada. Por outro, a primeira metodologia é muito mais simples e direta, e por isso mesmo, é recomendado que seja empregada para produção de uma estimativa inicial para as áreas de coletores, as quais deverão ser, posteriormente, reavaliadas pelo método *F-Chart*.

5.5 Rendimento do Sistema: SAS com aquecimento a gás

Para avaliar a influência do uso do sistema auxiliar a gás sobre o rendimento do sistema de aquecimento de água, a Figura 20 apresenta um esquema simplificado do sistema completo, no qual estão indicadas as principais parcelas energéticas e as perdas associadas a cada componente do sistema. Para fins de generalização, embora não apareça nos anos 2012 e 2013, o volume de água (e a demanda de energia) redirecionado à cisterna é também inserido na figura.

Figura 20. Esquema simplificado dos fluxos energéticos do SAS híbrido.



(Fonte: Autor, 2019)

A energia associada à combustão do gás, de poder calorífico inferior PCI [energia/m³], em um sistema de combustão, cuja eficiência é η_{aquec} , é descrita como:

$$E_{gas_mês} = V_{gas_mês} \times PCI_{gas} \quad (38)$$

$$E_{gas_util_mês} = E_{gas_mês} \times \eta_{aquec} \quad (39)$$

No cálculo dos volumes de gás e das energias teóricas, foram utilizados os seguintes valores para o poder calorífico inferior de cada combustível (Costa, 2013):

$$\begin{aligned} \text{GLP: } PCI_{GLP} &= 11.100 \text{ kcal/kg.} & \text{Considerando-se, } \rho_{GLP} &= 1,838 \text{ m}^3/\text{kg} \\ & & PCI_{GLP} &= 20.402 \text{ kcal/m}^3 \cong 85.418 \text{ kJ/m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{GN: } PCI_{GN} = 8.800 \text{ kcal/m}^3 \cong 36.844 \text{ kJ/m}^3$$

Com relação ao rendimento do processo de combustão, de acordo com o fabricante, caso se empregue gás liquefeito de petróleo (GLP) como combustível, a eficiência do queimador é $\eta_{aquec} = 85\%$, enquanto que, para gás natural (GN), a eficiência é $\eta_{aquec} = 86\%$.

O histórico de consumo de gás (V_{gas} , em destaque) e as respectivas energias, para os anos de 2012 e 2013 (GLP) e de 2018 e 2019 (GN), estão disponibilizados nas Tabelas 16 e 17.

Além dos consumos medidos dos anos 2012, 2013, 2018 e 2019, é também mostrado o volume de gás teórico, o qual é associado à demanda teórica de energia não atendida pela fonte solar que deve ser fornecida pelo GLP (2012 e 2013) ou GN (2018 e 2019), tendo como base de cálculo o volume teórico de água. Para essa situação, a energia teórica útil do gás é a informação de entrada, enquanto que o volume de gás é a informação a ser obtida.

O volume de gás teórico (GLP ou GN) é então calculado igualando-se a demanda de energia teórica não coberta pela fonte solar (dos apartamentos), $ENC_{mês} = (1-f) \times DE_{mês}$, à energia útil associada à queima do gás, $E_{gas_util_mês}$. Nesse procedimento, assume-se que toda energia liberada pela queima do gás deve ser transferida ao volume de água, cujo aquecimento não é coberto pela energia solar. A fração solar a ser empregada nessa situação é aquela relativa à demanda teórica:

$$V_{gas_teórico} = \frac{E_{gas_util_mês}}{\eta_{aquec} \times PCI_{gas}} = \frac{(1 - f_{teórico}) \times DE_{mês_teórico}}{\eta_{aquec} \times PCI_{gas}} \quad (40)$$

Tabela 16. Volume e energia associados ao GLP. Teórico, 2012 e 2013.

Mês	GLP - $PCI_{GLP} = 11.100 \text{ kcal/kg} = 20.402 \text{ kcal/m}^3 = 85.418 \text{ kJ/m}^3$, $\eta_{aquec} = 85\%$								
	Teórico ^a			2012			2013		
	$E_{gas_util}^a$ [MJ/mês]	E_{gas} [MJ/mês]	$V_{gas_teorico}$ [m ³ /mês]	V_{gas_2012} [m ³ /mês]	E_{gas} [MJ/mês]	E_{gas_util} [MJ/mês]	V_{gas_2013} [m ³ /mês]	E_{gas} [MJ/mês]	E_{gas_util} [MJ/mês]
Jan	22.309	26.246	307,26	137,34	11.731	9.972	93,23	7.964	6.769
Fev	17.861	21.013	246,00	124,64	10.647	9.050	42,12	3.598	3.058
Mar	18.728	22.032	257,94	134,91	11.524	9.795	92,48	7.899	6.715
Abr	20.332	23.920	280,04	101,24	8.648	7.351	126,77	10.828	9.204
Mai	20.246	23.819	278,86	245,73	20.990	17.841	167,63	14.319	12.171
Jun	24.556	28.889	338,21	207,75	17.746	15.084	262,37	22.411	19.050
Jul	25.093	29.521	345,61	112,02	9.569	8.133	328,69	28.076	23.865
Ago	21.451	25.237	295,45	143,01	12.216	10.383	259,31	22.150	18.827
Set	19.751	23.236	272,03	146,75	12.535	10.655	202,61	17.307	14.711
Out	17.728	20.857	244,17	121,97	10.418	8.856	172,15	14.705	12.499
Nov	16.799	19.764	231,38	157,25	13.432	11.417	254,87	21.771	18.505
Dez	18.247	21.467	251,31	311,27	26.588	22.600	180,69	15.434	13.119
Média	20.258	23.833	279,02	161,99	13.837	11.761	181,91	15.538	13.208
Total [MJ/ano]	243.101	286.002	3.348,25	1.943,88	166.043	141.136	2.182,92	186.461	158.492

a A informação de entrada é a energia não coberta pela fonte solar ($ENC_{mês}$), associada à demanda teórica.

Tabela 17. Volume e energia associados ao GN. Teórico, 2018 e 2019.

Mês	GN - $PCI_{GN} = 8.800 \text{ kcal/m}^3 = 36.844 \text{ kJ/m}^3$, $\eta_{aquec} = 86\%$								
	Teórico			2018			2019		
	$E_{gas_util}^a$ [MJ/mês]	E_{gas} [MJ/mês]	$V_{gas_teorico}$ [m ³ /mês]	V_{gas_2018} [m ³ /mês]	E_{gas} [MJ/mês]	E_{gas_util} [MJ/mês]	V_{gas_2019} [m ³ /mês]	E_{gas} [MJ/mês]	E_{gas_util} [MJ/mês]
Jan	22.309	25.940	704,06	143	5.269	4.531	224	8.253	7.098
Fev	17.861	20.769	563,69	147	5.416	4.658	223	8.216	7.066
Mar	18.728	21.776	591,04	79	2.911	2.503	123	4.532	3.897
Abr	20.332	23.642	641,68	254	9.358	8.048	235	8.658	7.446
Mai	20.246	23.542	638,98	211	7.774	6.686	364	13.411	11.534
Jun	24.556	28.554	774,99	214	7.885	6.781	440	16.211	13.942
Jul	25.093	29.178	791,94	275	10.132	8.714	497	18.311	15.748
Ago	21.451	24.944	677,01	414	15.253	13.118	557	20.522	17.649
Set	19.751	22.966	623,33	271	9.985	8.587	358	13.190	11.343
Out	17.728	20.614	559,50	259	9.543	8.207	332	12.232	10.520
Nov	16.799	19.534	530,19	235	8.658	7.446	303	11.164	9.601
Dez	18.247	21.217	575,86	196	7.221	6.210	290	10.685	9.189
Média	20.258	23.556	639,36	224,83	8.284	7.124	328,83	12.115	10.419
Total [MJ/ano]	243.101	282.676	7.672,27	2.698,00	99.405	85.488	3.946,00	145.386	125.032

a A informação de entrada é a energia não coberta pela fonte solar ($ENC_{mês}$), associada à demanda teórica.

Essas tabelas revelam alguns fatos interessantes, em especial, a dinâmica de consumo do edifício, associado às condições climáticas e operacionais. Em especial, nota-se a elevação do consumo do gás nos meses mais frios (jun/jul/ago) em todos os anos analisados, como era de se esperar. No entanto, observa-se um pico de consumo no mês de dezembro/2012 (22.600 MJ/mês), comportamento totalmente atípico para esse período (quente) do ano, ainda mais comparando-o com a média anual daquele ano (11.761 MJ/mês). Por outro lado, embora o mês de fevereiro seja tipicamente quente, requerendo-se menos energia auxiliar, o consumo de gás relacionado a esse mês no ano de 2013 é extremamente baixo (3.058 MJ/mês)

Uma característica não esperada foi observada nos anos de 2018 e 2019, quando o sistema passou a operar com gás natural (GN). Para esses anos, esperava-se, como de fato ocorreu, um aumento do volume de gás utilizado pelo edifício, por dois motivos: primeiro, pela substituição do combustível GLP, de maior poder calorífico, pelo GN, de menor poder calorífico e, segundo, pela maior taxa de ocupação do edifício. No entanto, observando-se a energia útil fornecida à água, percebe-se que uma menor quantidade de energia auxiliar foi consumida nesses anos (no caso teórico, essa energia é a mesma). A energia útil associada ao gás foi 141.136 MJ/ano (em 2012), 158.492 MJ/ano (em 2013), 85.488 MJ/ano (em 2018) e 125.032 MJ/ano em (2019). Para o ano de 2019, o valor é até consistente com o consumo dos anos anteriores. Para o ano de 2018, o valor avaliado para a energia útil consumida está totalmente diferente dos (é muito inferior aos) valores médios dos demais anos. Por outro lado, com a retirada da recirculação da água da prumada, era de se esperar que o consumo de energia auxiliar fosse maior ainda nos anos 2018 e 2019, em relação aos anos 2012 e 2013.

Essas discrepâncias podem estar associadas a fatores e condições operacionais não contabilizadas no presente trabalho, ou, sob outro ponto de vista, as frações solares reais dos anos 2018 e 2019 foram maiores do que a avaliadas pelos dois métodos analíticos.

Para maior discussão dos resultados obtidos anteriormente, emprega-se a definição de fração solar para sistemas com aquecimento auxiliar (no presente caso, a energia associada ao gás), $f_{gás}$. Para isso, a energia atendida pela fonte solar, o numerador da Eq. (37), é escrita levando em conta o consumo real de gás, sendo avaliada pela diferença entre a demanda mensal e a energia útil associada à queima do gás, de forma que:

$$E_{solar_mês} = DE_{mês} - E_{gas_util_mês} \quad (41)$$

$$f_{gás_mês} = \frac{E_{solar_mês}}{DE_{mês}} \quad (42)$$

Na base anual:

$$f_{gás_ano} = \frac{\sum_{12} E_{solar_mês}}{DE_{ano}} \quad (43)$$

Nessas fórmulas, a demanda de energia a ser considerada (numerador) é aquela relacionada ao consumo dos apartamentos apenas ($DE_{mês_aptos}$, a que é efetivamente atendida pelo aquecimento solar, ou seja, a energia solar útil), e não a total (apartamentos e cisterna). Por outro lado, para se definir a fração solar com gás, emprega-se, no denominador, a demanda total ($DE_{mês_total}$), por se entender que é essa demanda a verdadeira carga do sistema de aquecimento.

Finalmente, para se avaliar globalmente o sistema de aquecimento híbrido, solar/gás, o seu rendimento térmico, dado pela relação entre a energia que é consumida/demandada pelo sistema e a energia total fornecida ao sistema (radiante, que atinge o coletor solar, mais a energia térmica do gás), é também calculado (em base mensal ou anual):

$$\eta_{term} = \frac{DE}{(E_{irrad} + E_{gas})} \quad (44)$$

$$E_{irrad} = \bar{H}_T \times A_{coletor} \quad (45)$$

A Tabela 18 disponibiliza os valores das frações solares obtidas com esse procedimento, bem como dos rendimentos mensais para cada situação (teórico, 2012, 2013, 2018 e 2019). Nessa tabela, a área de projeto, $A_{proj} = 87,89 \text{ m}^2$, foi empregada como a área de coletores, uma vez que se quer estudar o efeito da presença/uso do gás como parte do sistema de aquecimento. Os resultados dessa tabela são bem representativos do sistema misto de aquecimento estudado, solar e gás, oferecendo uma visão bem característica do seu comportamento, mês a mês e ano a ano.

Na situação teórica, a fração solar que tem o consumo de gás como uma das variáveis é igual à fração solar calculada pelo método *F-Chart*, uma vez que a energia não coberta pela fração solar, baseada no complemento da fração solar, é empregada como a energia útil fornecida pelo gás (o valor do denominador da Eq. (42) é a própria demanda teórica de energia).

Tabela 18. Fração solar, fração solar (gás) e rendimento térmico. Teórico, 2012, 2013, 2018 e 2019.

Mês	GLP/GN			GLP $PCI_{GLP} = 11.100 \text{ kcal/kg} = 20.402 \text{ kcal/m}^3 = 85.418 \text{ kJ/m}^3$ $\eta_{aquec} = 85\%$						GN $PCI_{GN} = 8.800 \text{ kcal/m}^3 = 36.844 \text{ kJ/m}^3$ $\eta_{aquec} = 86\%$					
	Teórico ^a			2012			2013			2018			2019		
	f	$f_{gás}$	η_{term}	f	$f_{gás}$	η_{term}	f	$f_{gás}$	η_{term}	f	$f_{gás}$	η_{term}	f	$f_{gás}$	η_{term}
Jan	0,48	0,48	0,58	0,69	0,61	0,43	0,76	0,68	0,39	0,46	0,66	0,65	0,44	0,43	0,50
Fev	0,54	0,54	0,56	0,74	0,62	0,41	0,79	0,85	0,41	0,51	0,67	0,61	0,37	0,46	0,64
Mar	0,55	0,55	0,56	0,70	0,67	0,46	0,85	0,67	0,34	0,66	0,80	0,51	0,68	0,53	0,35
Abr	0,52	0,52	0,57	0,75	0,70	0,42	0,75	0,62	0,40	0,47	0,55	0,58	0,48	0,43	0,47
Mai	0,54	0,54	0,57	0,78	0,30	0,34	0,78	0,52	0,37	0,41	0,58	0,70	0,42	0,41	0,54
Jun	0,45	0,45	0,60	0,60	0,49	0,47	0,63	0,31	0,40	0,40	0,58	0,69	0,33	0,31	0,55
Jul	0,47	0,47	0,59	0,56	0,78	0,62	0,58	0,32	0,45	0,35	0,47	0,66	0,30	0,37	0,66
Ago	0,54	0,54	0,57	0,54	0,78	0,68	0,65	0,48	0,46	0,33	0,41	0,67	0,37	0,26	0,48
Set	0,55	0,55	0,56	0,66	0,69	0,51	0,60	0,63	0,55	0,42	0,47	0,58	0,35	0,42	0,64
Out	0,60	0,60	0,55	0,75	0,72	0,45	0,81	0,54	0,37	0,59	0,44	0,41	0,41	0,32	0,46
Nov	0,60	0,60	0,55	0,77	0,59	0,40	0,74	0,38	0,38	0,43	0,45	0,56	0,45	0,26	0,37
Dez	0,57	0,57	0,55	0,87	-0,12	0,25	0,76	0,51	0,38	0,46	0,44	0,49	0,46	0,45	0,52
Anual	0,53	0,53	0,57	0,68	0,60	0,45	0,71	0,53	0,41	0,44	0,52	0,59	0,40	0,38	0,52

As colunas referentes aos anos 2012 e 2013 da Tabela 18 demonstram que os rendimentos térmicos da instalação de aquecimento com auxílio de gás são, como esperado, os menores entre todos (45% e 41%), embora as frações solares sejam as mais elevadas (0,68 e 0,71). Como as frações solares são as mais altas entre os casos, isto é, uma vez que há maior disponibilidade de energia térmica solar (seja pela maior irradiação ou pela maior área de coletores), de maneira que um volume/consumo de gás menor seria observado, o rendimento térmico deveria ser maior. No entanto, as frações solares avaliadas como o consumo real de gás são menores (0,60 e 0,53) do que as frações obtidas pelo método *F-Chart* (0,68 e 0,71), revelando o porquê dos menores rendimentos. Assim, o SAS operava de maneira ineficiente, uma vez que a disponibilidade energética (solar + gás) era muito maior do que a energia aproveitada pelo sistema. Nesse período, o sistema estava superdimensionado para o baixo consumo de energia, seja pela disponibilidade da fonte solar, ou por problemas operacionais que levaram a um maior consumo de gás.

Por outro lado, quando se considera os resultados para os anos de 2018 e 2019, acontece o oposto, isto é, as frações solares são menores (0,44 e 0,40), mas os rendimentos são maiores (59% e 52%), em comparação com os anos de 2012 e 2013.

Conforme já comentado, o ano de 2018 é bem atípico: a fração solar obtida com o método *F-Chart* é menor (0,44) do que àquela obtida com o consumo de gás (0,52), ou seja, o consumo de gás real é menor do que o consumo esperado pela análise do *F-Chart*, mesmo em um cenário em que a demanda energética devido o desvio do volume de água da prumada é maior (53% a mais). Por outro lado, para o ano de 2019, a fração solar obtida com o método *F-Chart* é ligeiramente maior (0,40) do que àquela obtida com o consumo de gás (0,38), ou seja, o consumo de gás real é um apenas pouco maior do que o consumo esperado pela análise do *F-Chart*, mesmo em um cenário em que a demanda energética devido o desvio do volume de água da prumada é a pior possível (83% a mais).

De maneira geral, uma comparação entre os dados medidos de consumo de gás, bem como uma comparação entre as frações solares (gás) mostram que, apesar dos efeitos deletérios do desvio da água da prumada para a cisterna, um menor consumo energético anual de gás foi observado para anos de 2018 e 2019 (em relação aos anos 2012 e 2013).

Esse fato é parece paradoxal, no entanto, como se tem alguma certeza de que o SAS híbrido foi bem projetado, é possível que tal comportamento tenha acontecido, provavelmente, devido a problemas técnicos, de medição inadequada de temperatura, por exemplo, ou que a radiação solar nesses meses tenha sido extremamente baixa, não sendo representativa do histórico empregado para a previsão (fazendo com que a fração solar real seja muito menor do que a calculada).

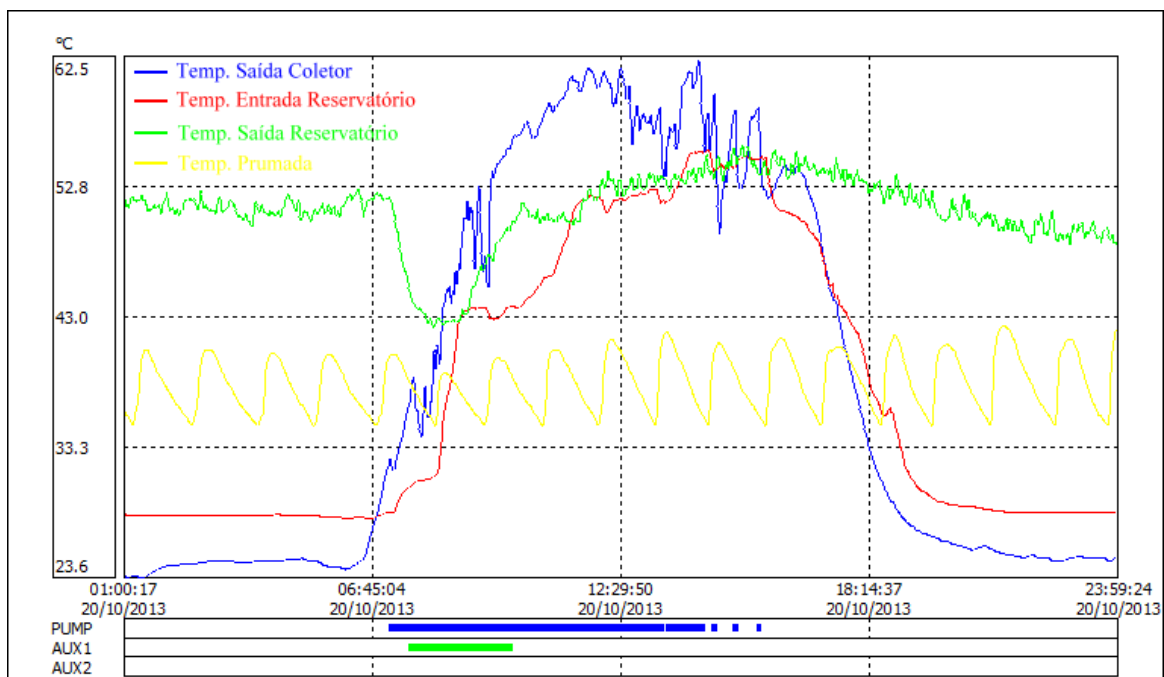
Outra possibilidade bem plausível é que as demandas energéticas são avaliadas assumindo-se que a temperatura de entrada de água no sistema de coletores é a temperatura do ar menos dois graus Celsius. Essa hipótese pode ser válida para os anos de 2012 e 2013, onde a temperatura da água da cisterna não era alterada pela água da prumada, fato que acontece nos anos 2018 e 2019 (sendo assim, uma menor demanda energética seria empregada nos cálculos, a qual levaria a maiores frações solares, como de fato ocorreu).

De maneira geral, por reduzir as incertezas nas variáveis apresentadas, pode-se afirmar que as frações solares que levam em conta o consumo de gás são muito mais realistas dos que as avaliadas com a demanda de energia solar apenas.

Para se construir uma relação com essas possibilidades, as Figuras 21 a 25 oferecem uma comparação dos históricos das temperaturas da água na saída dos coletores (azul), na entrada (vermelha) e na saída (verde) dos reservatórios térmicos e na base da prumada (amarela). Abaixo do eixo das abscissas, estão indicados os instantes/duração de acionamento das bombas do circuito de água dos coletores (*pump*, barra azul), do sistema auxiliar de aquecimento (*aux1*, barra verde) e de recirculação da água na prumada (*aux2*, vermelho: não mostrada na figura).

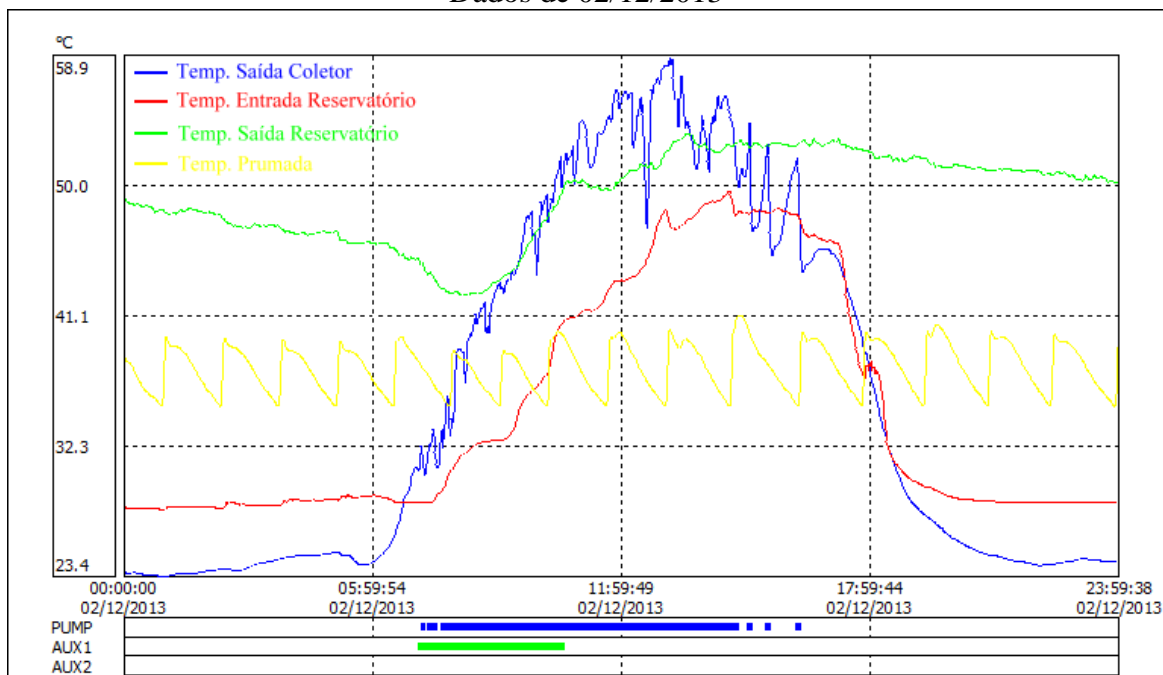
As Figuras 21 e 22 ilustram o comportamento para dois dias típicos (20/10/2013 e 02/12/2013), nos quais o sistema e o seu sistema de controle funcionam adequadamente.

Figura 21. Dinâmica das temperaturas dos pontos principais do SAS ao longo do dia.
Dados de 20/10/2013



(Fonte: Medeiros, 2014)

Figura 22. Dinâmica das temperaturas dos pontos principais do SAS ao longo do dia.
Dados de 02/12/2013



(Fonte: Medeiros, 2014)

Observa-se, na Figura 21, que a temperatura da água na saída do reservatório se mantém em torno de 50 (entre 48 °C e 52 °C) no período de tempo entre 1h a 6h45 da manhã (e entre 20h e 24h), períodos sem consumo, de maneira que a temperatura indicada é a da água acumulada no reservatório (o sistema de isolamento dos tanques se mostra adequado).

As curvas de temperatura da água na entrada do reservatório (28 °C), saída do coletor (entre 24 °C e 25 °C) e prumada (entre 35 °C e 42 °C) se mantém aproximadamente constantes (oscilam em torno de suas médias), confirmando a hipótese de não haver consumo nesse período. No intervalo de tempo em que a radiação solar atua, a curva de temperatura da água na entrada do reservatório (após o coletor) acompanha a curva de temperatura da água na saída do coletor. Chama-se a atenção, nesse momento, que esses valores de temperatura estão de acordo com aqueles informados na Seção 4.2, quando da caracterização do sistema de controle.

Um pouco antes das 6h45, as temperaturas na saída do coletor (curva azul, que tem relação direta com a irradiação solar) e da água na entrada do reservatório (curva vermelha) começam a se elevar, indicando que a radiação solar começa a atuar no sistema. Instantes depois, a temperatura de saída do reservatório começa a cair, indicando o início do consumo de água quente e, ao mesmo tempo, que a radiação solar é insuficiente para atender a demanda de energia.

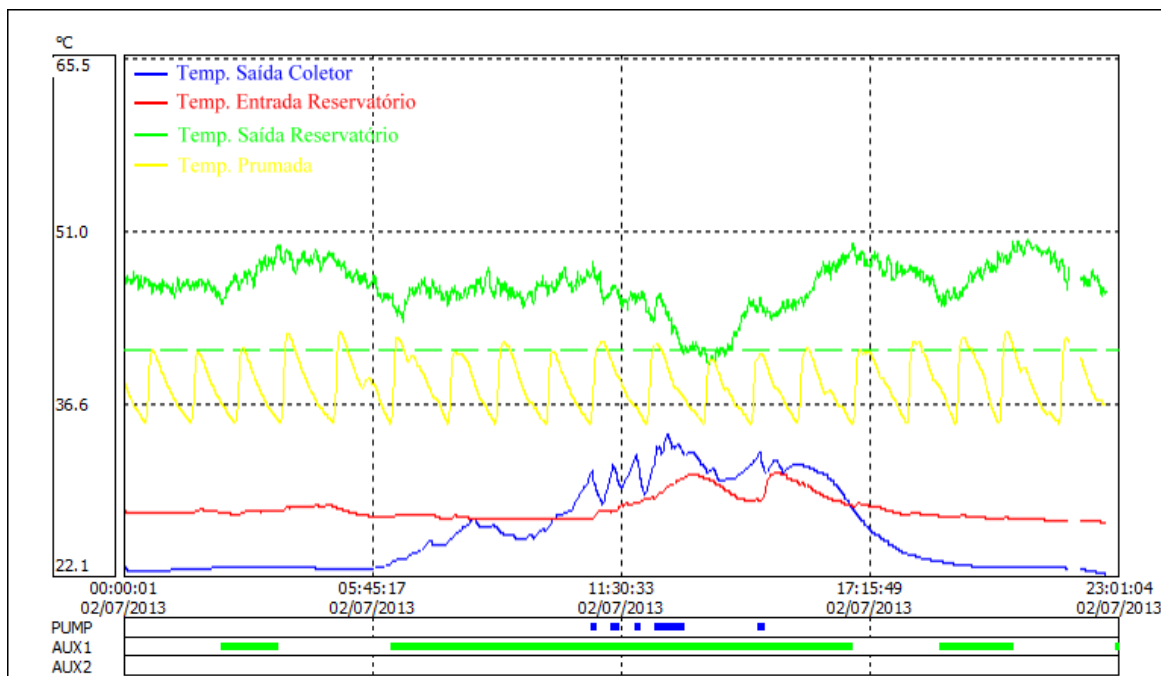
Quando a temperatura de saída do reservatório atingir um mínimo de cerca de 43 °C, o sistema de aquecimento auxiliar entra em funcionamento (início da barra verde, *aux1*), de maneira

que essa temperatura começa a se elevar. Em torno de 10h da manhã, quando a radiação solar é suficiente para atender a demanda residual de energia, o sistema de aquecimento auxiliar é desligado (fim da barra verde, *aux1*). Observe-se, também, o acionamento da bomba de alimentação de água aos coletores, para compensar o consumo de água (e, ao mesmo tempo, restringir possíveis elevações extremas de temperatura da água nos coletores).

De maneira geral, as Figuras 21 e 22 (e curvas, não mostradas, para outros dias) demonstram que o sistema de aquecimento híbrido, solar/gás, do edifício foi bem projetado, atendendo as demandas de maneira adequada e operando em observância com o projeto original.

Por sua vez, as Figura 23 a 27 ilustram a dinâmica das temperaturas para 5 dias atípicos: as duas primeiras, quando não houve incidência solar que pudesse atender, minimamente, a demanda por aquecimento; as três últimas, quando se verificou, posteriormente, que um dos termopares do sistema de medição/controla havia se soltado da sua posição correta de medição. Tais situações fazem com que o sistema de controle acione os aquecedores a gás por um período de tempo elevado (ou ininterruptamente), para atender a demanda por aquecimento.

Figura 23. Perfil atípico das temperaturas nos pontos de controle do SAS híbrido. Medidas de 02/07/2013. Praticamente sem incidência solar.



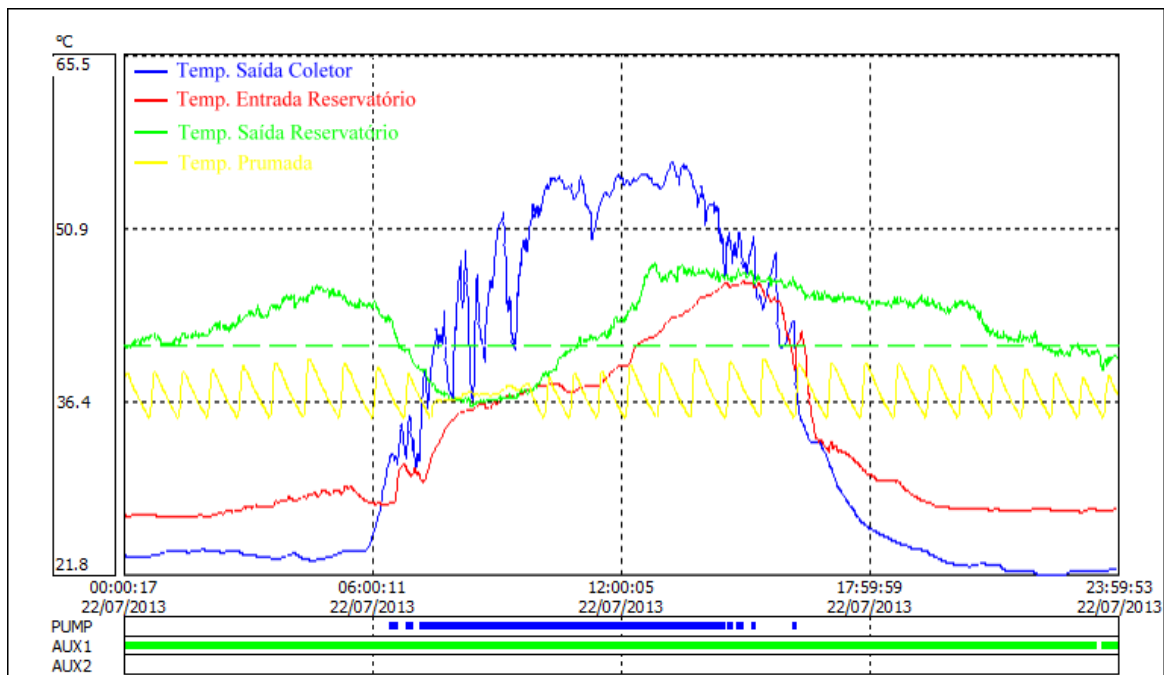
(Fonte: Medeiros, 2014)

A baixa incidência solar é identificada, na Figura 23, não apenas pelos baixos valores da temperatura da água na saída dos coletores, mas pela ratificação de características semelhantes da temperatura da água na entrada do reservatório, isto é, as duas curvas de temperatura se aproximam

uma da outra, em valores baixos. Observa-se, então, um maior intervalo de funcionamento do sistema auxiliar de aquecimento (barras verdes), bem como pouca circulação de água pelos coletores (barras azuis), devido às baixas temperaturas nos mesmos.

Na Figura 24, as curvas mostram que apesar de existir alguma incidência solar, ela não é suficiente para atender a demanda energética e, como a temperatura de saída da água no reservatório encontrava-se muito baixa, o sistema de aquecimento auxiliar teve que funcionar ininterruptamente.

Figura 24. Perfil atípico das temperaturas nos pontos de controle do SAS híbrido. Medidas de 22/07/2013. Incidência solar insuficiente.

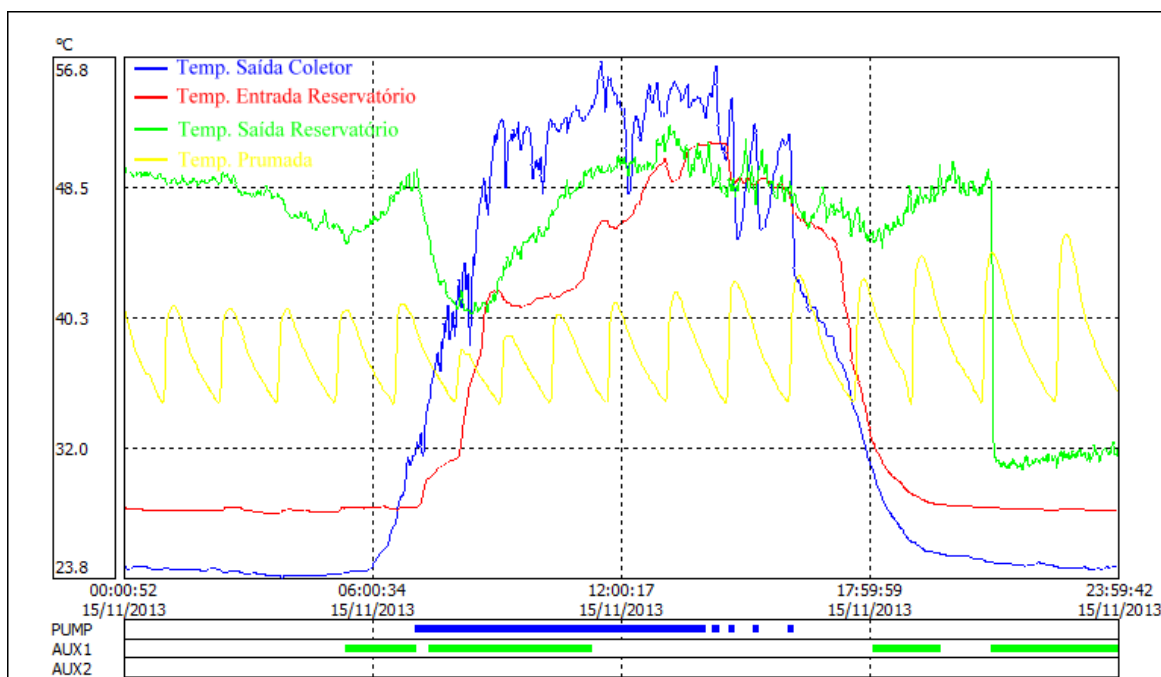


(Fonte: Medeiros, 2014)

A Figura 25 mostra que o SAS vinha operando normalmente, até que, em torno das 21h do dia 15/11/2013, a temperatura da água na saída do reservatório sofreu uma queda brusca (de 48,5 °C para 32 °C). A partir desse instante, o sistema de aquecimento auxiliar entrou em funcionamento ininterrupto (como mostra a Figura 26) até que, às 10h do dia 19/11/2013, a temperatura voltou aos seus valores normais de operação e o sistema de aquecimento auxiliar foi desligado automaticamente (Figura 27). O sistema de aquecimento auxiliar funcionou de maneira ininterrupta por quase cinco dias, elevando ligeiramente o consumo de GLP naquele mês (ver Tabela 16).

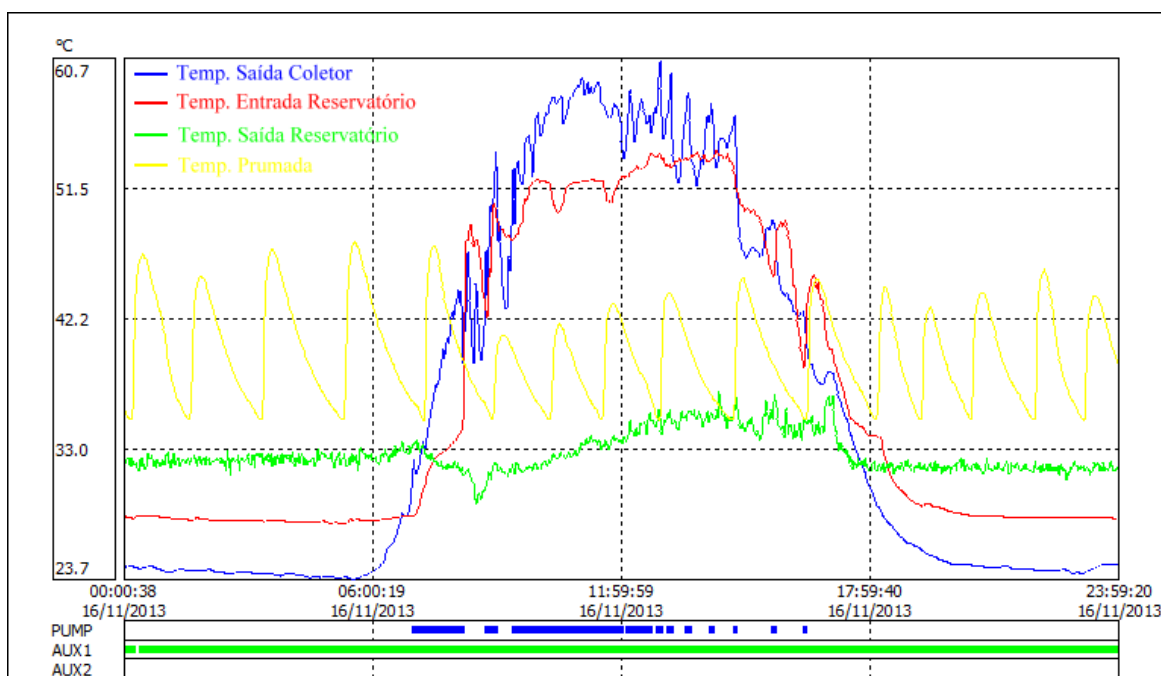
Conforme já comentado, tal comportamento se deveu ao desprendimento do sensor de temperatura do seu local correto de medição.

Figura 25. Perfil atípico das temperaturas nos pontos de controle do SAS híbrido. Medidas de 15/11/2013. Início de medição inadequada de temperatura.



(Fonte: Medeiros, 2014)

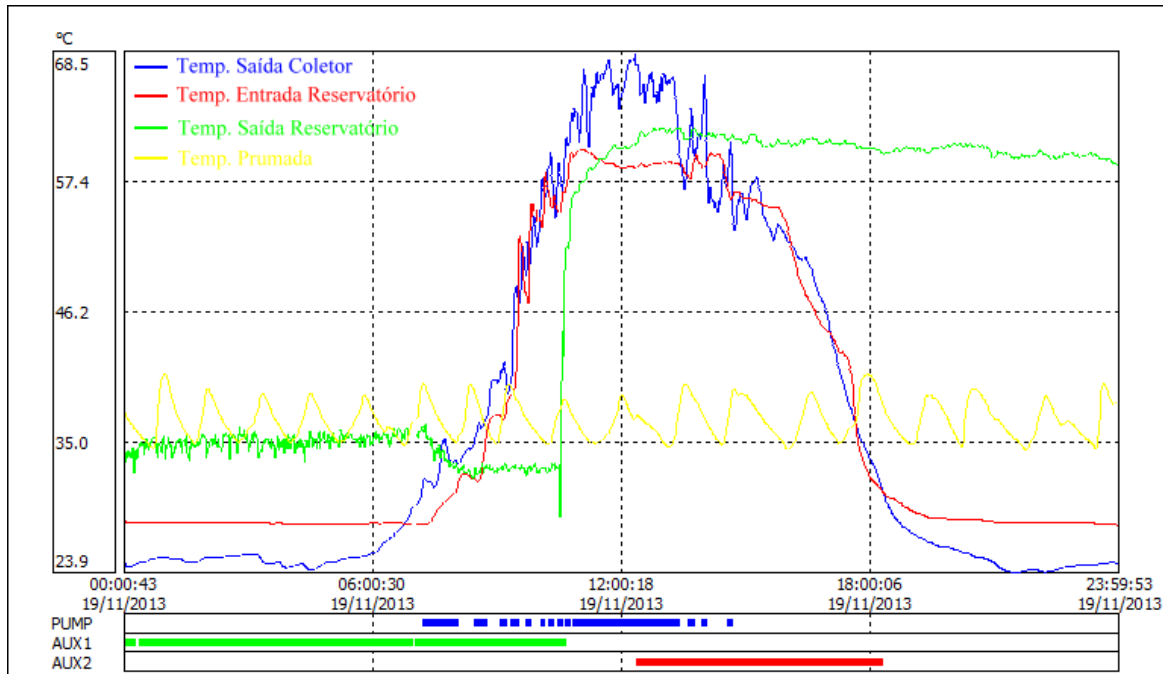
Figura 26. Perfil atípico das temperaturas nos pontos de controle do SAS híbrido. Medidas de 16/11/2013. Medição inadequada da temperatura.



(Fonte: Medeiros, 2014)

Percebe-se também, na Figura 27 que, devido à baixa temperatura da água na prumada, a bomba do anel de recirculação de água entrou em funcionamento (barra vermelha).

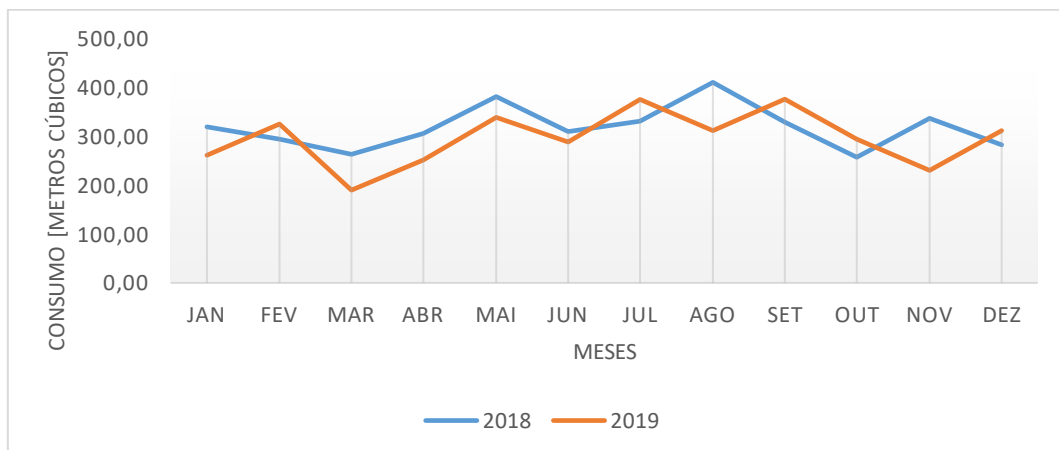
Figura 27. Perfil atípico das temperaturas nos pontos de controle do SAS híbrido. Medidas de 19/11/2013. Fim de medição inadequada da temperatura.



(Fonte: Medeiros, 2014)

Analisando os resultados referentes ao ano de 2018, no Gráfico 1, percebe-se que, após a tentativa de solucionar o problema do excesso de pressão nas tubulações do prédio, o consumo de água quente aumentou consideravelmente em relação aos anos de 2012 e 2013, conforme mostrado no início deste estudo na Tabela 1. Se considerarmos apenas o consumo dos apartamentos observa-se que, para os anos de 2018 e 2019, esse consumo mostrou-se, relativamente semelhante, muito embora o ano de 2018 teve maior consumo do que o de 2019.

Gráfico 1. Consumo de água quente dos anos 2018 e 2019



A seguir, os Gráficos 2 e 3 mostram o volume de água desviado para cisterna e consumo de gás medido para os anos de 2018 e 2019, respectivamente. Percebe-se que ambos estão intrinsecamente ligados pelo fato de que o consumo de gás ser diretamente proporcional ao volume de água aquecido, neste caso é levado em consideração o volume de água total (apartamentos + cisterna), também apresentado na Tabela 1.

Tendo dito isto, observa-se que o comportamento dos gráficos é similar, com exceção do mês de abril, aonde em 2018 o volume de água desviado foi menor do que o ano de 2019, porém o consumo de gás foi maior. Outro fato identificado foi que o consumo de gás foi mais acentuado no ano de 2019, também, por conta da troca de combustível realizada, aonde o GLP foi substituído pelo GN, e este, por ter menor poder calorífico, é consumido em maior quantidade para aquecer um mesmo volume de água que o GLP.

Gráfico 2. Volume de água desviado para cisterna nos anos de 2018 e 2019.

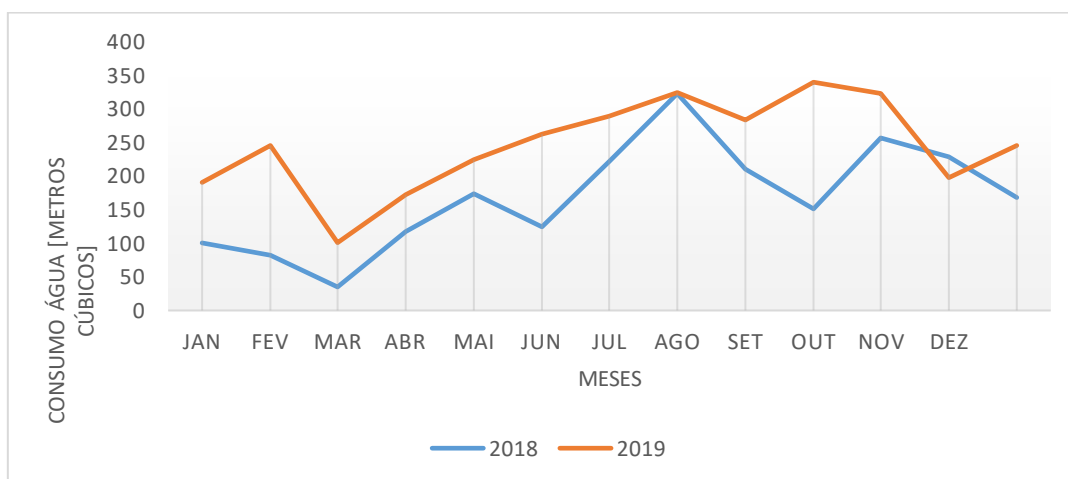
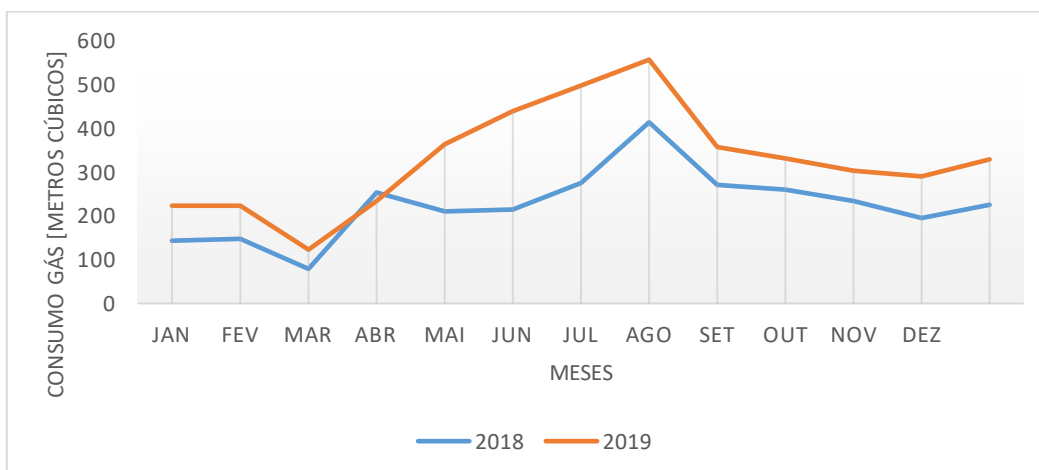


Gráfico 3. Consumo de gás medido para os anos de 2018 e 2019



6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Esta dissertação teve por objetivo avaliar um sistema de aquecimento híbrido (solar/gás) de água em um edifício multifamiliar localizado na cidade de João Pessoa/PB, através da análise de projeto e operação, estudos das dificuldades observadas no monitoramento, operação e manutenção do sistema.

Iniciando pelo consumo de água do edifício estudado, percebeu-se que após a mudança no sistema (retirada do anel de recirculação) houve uma alteração considerável no consumo de água dos apartamentos. O biênio 2018/2019 apresentou altos índices de consumo se comparado ao biênio 2012/2013. Conforme falado anteriormente, foram observados dois motivos para esse aumento: o primeiro deles foi a medida tomada para resolver o problema da pressão interna dos tubos, e, o segundo, foi o aumento da ocupação nos apartamentos. Sendo assim, foi observado que tanto o consumo de gás, quanto a quantidade de água desviada para cisterna foram em maior quantidade no ano de 2019. Já o consumo de água quente mostrou-se semelhante entre os anos de 2018 e 2019, porém, se comparado aos anos de 2012 e 2013, estes foram elevados.

Estendendo a análise ao sistema atual sem a recirculação usando os dados de 2018, verificou-se diminuição da temperatura mantida no reservatório térmico ocasionado maior consumo de água quente nos apartamentos. Portanto, é possível que a retirada da bomba de recirculação na configuração anterior modificou os parâmetros de projeto e possibilitou maiores perdas de energia devido a retirada de grande volume de água ainda aquecida para cisterna na configuração atual. Sendo necessário um controle rigoroso da operação e manutenção do sistema atual para análise e tomada de decisão a respeito da continuidade dessa configuração atual.

Em relação ao cálculo dos aquecedores de passagem, mais uma vez foi observado que, para o ano de 2018, a quantidade desses aparelhos foi bem maior do que dos outros anos estudado (2012 e 2013), conforme apresentado na seção 5.4.1. Sabendo que para os anos de 2012 e 2013 foram calculados 4 aquecedores, o ano de 2018 ter apresentado a quantidade de 7 aquecedores mostra que o sistema auxiliar terá que funcionar mais do que o necessário tendo em vista o maior consumo e, por consequência, maior demanda de energia sendo suprida por uma quantidade menor do que o calculado, esse comportamento revela a ineficiência da medida adotada para solucionar o aumento da pressão da prumada.

No que diz respeito a quantidade de coletores, o número e área que mais se aproximou do real, foi a quantidade calculada pela demanda teórica, com apenas dois coletores a mais. Neste caso, destacamos, desta vez positivamente, ao ano de 2018, caso desconsideremos o volume de água

desviado para cisterna, os resultados são os mais realísticos, porém caso seja considerado este volume, foi possível observar o impacto no dimensionamento do projeto.

Por fim, a análise energética desenvolvida, mostrou que o método *F-Chart* é uma ferramenta de cálculo interessante para o dimensionamento e avaliação de projetos de SAS, detalhando, mês a mês, o comportamento do mesmo. Para a sua aplicação otimizada, entretanto, informações de consumo de água e dados do fabricante dos componentes do sistema solar (como informados no presente trabalho) são fundamentais para a avaliação contínua do sistema de aquecimento.

O monitoramento das temperaturas do sistema de aquecimento solar e medição da quantidade de água quente utilizada e gás utilizado permitiram verificar que o sistema de controle automático é ineficiente e precisa ser melhorado para otimizar a operação com mínimo de perdas, de maneira que o consumo de gás do sistema auxiliar seja monitorado para evitar perdas de energia e avaliar o custo energético do sistema híbrido instalado, pois apenas o controle da temperatura de água quente não garante a operação eficiente com mínimo de perdas energéticas.

O estudo também mostrou que, caso o sistema não possua um sistema de manutenção preventiva (e corretiva), de maneira que se possa identificar e avaliar qualquer avaria no sistema, os custos associados ao sistema de aquecimento solar dificilmente serão minimizados ao longo do seu uso. Pelo contrário, o sistema passará simplesmente a ser um gerador de custos diários, como o SAS estudado. Especificamente, pela análise dos resultados, a solução técnica adotada para a resolução do problema de elevação da pressão nos tubos do sistema solar não se mostrou adequada, de maneira que se recomenda um estudo mais aprofundado do mesmo e a busca por uma solução mais adequada, que faça com que o sistema de aquecimento volte a operar de forma funcional.

A falta de mão de obra treinada e especializada para operação e manutenção dos sistemas de aquecimento solar pode comprometer o uso dessa tecnologia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AISA, A. M., 2017. **Modeling and simulation of solar water heating system with Thermal storage**. Dissertação de mestrado, Faculty of Engineering and Applied Science Memorial University of Newfoundland, Canada.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT., 2008 **NBR 15.569: Sistemas de aquecimento solar de água em circuito direto – Projeto e instalação**. Rio de Janeiro.

ABU-ZOUR, A., RIFFAT, S., 2006. **Environmental and economic impact of a new type of solar louver thermal collector**. Int. J. Low Carbon Technol. 1 (3), 217–227.

ALTOÉ, L.; FILHO, D.O.; CARLO, J.C.; MONTEIRO, P. M. B., 2013. **COMPUTER TOOLS APPLIED TO ANALYSIS OF SOLAR WATER HEATERS**. Eng. Agríc., Jaboticabal, v.34, n.5, p.1072-1078.

ALTOÉ, L.; FILHO, D.O.; CARLO, J.C.; MONTEIRO, P. M. B; MARTINS, I. T. A, 2017. **An analysis of the economic viability and greenhouse gas emissions reductions resulting from the use of solar water heaters in a typical Brazilian dwelling**. Latin American Journal of Energy Research – Lajer (2017) v. 4, n. 2, p. 1 – 10.

AMOABENG, O. K., 2012. **Assessing The Feasibility of A Solar Water Heating System Based On Performance And Economic Analysis**. Dissertação de mestrado, The School of Graduate Studies Kwame Nkrumah University of Science and Technology, Kumasi, Ghana.

AYOMPE, L.M.; DUFFY, A.; KEEVER, M. MC; CONLON, M.; MCCORMACK, S.J., 2011. **Comparative field performance study of flat plate and heat pipe evacuated tube collectors (ETCs) for domestic water heating systems in a temperate climate**. Energy 36 (5), pp. 3370-3378.

BADDOU, Y., 2017. **Solar thermal systems for domestic water heating applications in residential buildings. Efficiency and economic viability analysis of monitored plants**. Dissertação de mestrado. UEMF-MOROCCO/UPC-BARCELONA-SPAIN.

BAPTISTA, A. S. C., 2006 **Análise da viabilidade econômica da utilização de aquecedores solares de água em resorts no nordeste do Brasil**. Rio de Janeiro. Universidade Federal Do Rio De Janeiro. Dissertação de Mestrado de Ciências em Planejamento Energético, Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal Do Rio De Janeiro.

BASU, S.; ANTIA, H. M., 2008. **Helioseismology and Solar Abundances**.

BENFORD, F.; BOCK, J. E., 1939. **A Time Analysis of Sunshine**. Trans. Am. Illumin. Eng. Soc., 34, p. 200.

BRANDÃO, C. C. M.; VASCONCELOS, D. A.; 2011. **Análise energética e financeira da instalação de sistemas solares de aquecimento de água em casas de baixa renda**. 74p. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil. Universidade da Amazônia.

BRASIL. Caixa Econômica Federal., 2011 Termo de Referência – **Sistemas de Aquecimento Solar de Água – Minha Casa, Minha Vida**. Disponível em <http://www.scribd.com/doc/59949591/Termo-deReferencia-CAIXA-MCMV-FINAL>.

CARDENAS, A. B.; 1992. **Análise do Aquecimento Solar de Água por Sistema a Termossifão**. 150p. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

CARDIAS, W. H.; LANIUS, C. E. P., 2009. **Projeto de Sistemas de Aquecimento de Água de Postos de Combustíveis Através do uso de Painéis Solares Planos**. 09f. Trabalho de Conclusão da Disciplina de Energias Alternativas do Curso de Engenharia Mecânica – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CHAGURI JÚNIOR, J. J., 2009. **Sistemas prediais de aquecimento de água a gás: parâmetros de dimensionamento e gerenciamento**. 104p. Dissertação de mestrado – Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo.

COELHO, D.M., 2011. **Identificação de variáveis críticas e simulação do uso de coletores solares em prédios residenciais**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

COSTA, F.C., 2013. **Gases Combustíveis como Alternativas à Eletrotermia em Aquecimento Direto e Calor de Processo no Setor Industrial Brasileiro**. Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Energia. Universidade de São Paulo.

CRUZ, T. B., 2016. **Análise do potencial de inserção de energia solar térmica para aquecimento de água em residências unifamiliares no Brasil**. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético, COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

DIAS, 2008. **Conjuntura energética global – Insights em demanda de energia (2/3)**. Disponível em: (<https://www.cubienergia.com/insights-demandadeenergia>).

DUFFIE, J.A.; BECKMAN, W.A., 1991. **Solar Engineering of Thermal Processes**. Ed. John Wiley & Sons, New York.

DUFFIE, J.A.; BECKMAN, W.A., 2006. **Solar Engineering of Thermal Processes, 3rd Edition**, Wiley, Hoboken.

ERBS, D. G.; KLEIN, S. A.; DUFFIE, J. A. **Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation**. *Solar Energy*, [S.l.], v. 28, p. 293-302.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2015. **Balanco Energético Nacional 2015: Ano base 2014**. Rio de Janeiro.

FOSSATI, M.; LAMBERTS, R., 2010. **Eficiência Energética da Envoltória de Edifícios de Escritórios de Florianópolis: discussões sobre a aplicação do método prescritivo do RTQ-C**. *Ambiente Construído*, Vol. 10, N°. 2, pp. 59-69.

GEORGI, A.L.V., 2015 **Aquecimento solar de água: desempenho e racionalização de materiais e energia alternativa fundamental para o desenvolvimento sustentável**. 118 f.: Tese (doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais – PIPE, Curitiba, 2015.

GIGLIO, T.G.F., 2015. **Influência do usuário na economia de energia obtida por meio do uso de sistema de aquecimento solar de água em habitações de interesse social**. UFSC. Tese de doutorado. SC. Brasil.

GOERCK, M., 2008 **Determinação do potencial energético de um coletor solar foto térmico na região do vale do Taquari – RS Brasil**. Lajeado. Centro Universitário Univates. 92p. Dissertação (Mestrado em Ambiente e Desenvolvimento).

GHORAB, M.; ENTCHEV, E.; YANG, L., 2017. **Inclusive analysis and performance evaluation of solar domestic hot water system (a case study)**; *Alexandria Engineering Journal*.

GREENING, B.; AZAPAGIC, A., 2013. **Domestic solar thermal water heating: A sustainable option for the UK**. *Renewable Energy*, vol. 63, pp. 23-26.

HANG, Y.; QU, M.; ZHAO, F., 2012. **Economic and environmental life cycle analysis of solar hot water systems in the United States**. *Energy and Buildings*. Vol. 45, pp.181-188.

- HAZAMI, M.; KOOLI, S.; NAILI, N.; FARHAT, A., 2013. **Long-term performances prediction of an evacuated tube solar water heating system used for single-family households under typical Nord-African climate (Tunisia)**. *Solar Energy*. Vol. 94, pp. 283-298.
- HERNANDEZ, P.; KENNY, P., 2012. Net Energy Analysis of Solar Water Heating Installations in Operation. **Renewable and Sustainable Energy reviews**. Vol. 16, p. 170-177.
- HERNÁNDEZ, M. B., 2013. **Solar heat use for hot water and heating preparation in a residential building**. Tese de doutorado, Vilniaus Gediminas Technical University.
- HERRANZ, D. S., 2009. Design of a solar water heating system in a residential building. Dissertação de mestrado. University of Gavle.
- JENICHEN, M. I. B., 2017. **ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DA INSTALAÇÃO DE UM SISTEMA DE AQUECIMENTO DE ÁGUA DE UM CHUVEIRO CONSIDERANDO TRÊS DIFERENTES FONTES DE ENERGIA: ELÉTRICA, GÁS COMBUSTÍVEL E SOLAR**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Tuiuti do Paraná.
- KALOGIROU S. A. 2003. **The potential of solar industrial process heat applications**. *Application Energy*; pp76:337–61.
- KALOGIROU, S., 2014. **Solar Energy Engineering, Processes and Systems. Second Edition**.
- KALOGIROU, S., 2016. **Engenharia de Energia Solar: Processos e Sistemas**, Elsevier, Rio de Janeiro, 864p.
- KLEIN, S.A. **Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces**. *Solar Energy*, [S.l.], v. 19, p. 325-29, 1977.
- LIANG R. et al., 2011. **Theoretical and experimental investigation of filled-type evacuated tube solar collector with U tube**. Dalian, China. *Solar Energy*. Vol. 85, p. 1735-1744.
- LIU, B. Y. H.; JORDAN, R. C., 1960. **The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation**. *Solar Energy*, [S.l.], v. 4, p. 1-19.
- MANEA, T. F. et al., 2011. **Determinação de parâmetros de desempenho para coletores solares tubulares a vácuo**. LABSOL – Laboratório de energia solar – PROMEC –UFRGS.
- MAZARRÓN, F. R.; PORRAS-PRIETO, C. J.; GARCÍA, J. L.; BENAVENTE, R. M., 2016. **Feasibility of active solar water heating systems with evacuated tube collector at different operational water temperatures**. *Energy Conversion and Management*, vol. 113, pp. 16–26.

MEDEIROS, J. M. *et al*, 2014. **Análise de um sistema de aquecimento solar de água em um edifício residencial**. VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Uberlândia-MG.

MEDEIROS, J. M. *Et al*, 2014. **Avaliação técnica e viabilidade econômica de um sistema de aquecimento solar em um edifício residencial**. Revista Princípios, nº 24.

MIYAZATO, T.; 2012. **Integração do Sistema de Aquecimento Solar (SAS) ao projeto de edificações residenciais**. 193f. Dissertação de mestrado, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo.

MME. **Ministério de Minas e Energia. Plano Nacional de Eficiência Energética versão 18-10-11**, Brasília, 2011. 134 p. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/PlanoNacEfiEnergetica.pdf>.

NEVES, J.C.M., 2012. **Avaliação técnico-econômica de um aquecedor solar de água com coletor de tubos a vácuo na cidade de Cascavel-PR**. Brasil. Paraná.

NIKOOFARD, S.; UGURSAL V. I; BEAUSOLEIL-MORRISON, I., 2014. **An investigation of the techno-economic feasibility of solar domestic hot water heating for the Canadian housing stock**. Solar Energy, vol 101, pp. 308-320.

NIZZOLI FILHO, I. N.; MARQUES, G. I., 2017. **Utilização de coletores solares como alternativa energética para aquecimento de água em um edifício empresarial**. Anais do Encontro Nacional de Pós-Graduação – VI ENPG Vol.1.

OLIVEIRA, T.U.M., 2011. **Análise da Viabilidade Econômica de um Sistema de Aquecimento Solar de Água para uma Empresa do Setor Hoteleiro**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Rio Grande do Norte, UFRN, Natal.

OLIVEIRA, M. P. D. L.; NETO, J. H. M; VIDAL, A. M. A., BARBIERI, P. E. L., 2006. **ANÁLISES TÉCNICA E ECONÔMICA DE UM SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR COM BOMBA DE CALOR**. Anais do 16º Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Vol. 16.

PRIESTLEY, J., 1776. **Experiments and Observations on Different Kinds of Air**. Vol.2

REDPATH, D. A. G et al., 2008 **Experimental investigation of fluid flow regime in thermosiphon heat-pipe evacuated tube solar heat heaters**. Dublin. Conference on Passive and Low Energy Architecture, 22.

- RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK. Renewable 2014: **Global Status Report**. Disponível em: www.ren21.net/gsr.
- ROSA, F. N.; MANEA, T. F.; KRENZINGER, A., 2013. **Estudo comparativo da utilização de coletores solares planos e tubulares para aquecimento de água**. Revista Brasileira de Energia Solar Volume IV Número 2, p. 93-100.
- SADIQ, M., 2017. **Solar water heating system for residential consumers of Islamabad, Pakistan: A cost benefit analysis**. Journal of Cleaner Production. Vol. 172. P. 2443-2453.
- SALAMONI, I.; RÜTHER, R., 2007. **Potencial Brasileiro da Geração Solar Fotovoltaica conectada à Rede Elétrica: Análise de Paridade de Rede**. IX Encontro Nacional e V Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído. Ouro Preto.
- SANGOI, J. M., 2015. **Análise comparativa do desempenho de sistemas de aquecimento de água em edificações residenciais**. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina
- SANTOS, A.D.S., 2012. **Avaliação de sistemas solares térmicos de produção de água quente sanitária em edifícios de habitação multifamiliar**. Dissertação de mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, UTL, Lisboa.
- SEKHAR, Y. R.; SHARMA, K. V.; RAO, M. B., 2009. **Evaluation of heat loss coefficients in solar flat plate collectors**. Journal of Engineering and Applied Sciences. Vol. 4 (5), pp. 15-19.
- SIMON, A., 2001. **The Real Science Behind the X-Files: Microbes, meteorites, and mutants**.
- SHME, 2018. **Solar Heat Markets in Europe Trends and Market Statistics 2017** Disponível em: <http://solarheateurope.eu/publications/market-statistics/solar-heat-markets-in-europe/>
- SOUZA, A.G.L., 2009. **Desenvolvimento de software para projeto e sistemas centralizados de aquecimento solar de água**. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação Engenharia Mecânica – UERJ, Rio de Janeiro.
- VASCONCELLOS, L.E.M.; LIMBERGER, M.A.C. (Org.), 2012. **Energia Solar para aquecimento de água no Brasil: Contribuições da Eletrobrás Procel e Parceiros**. Rio de Janeiro: Eletrobrás.
- VIDOTTO, M. L., 2014. **Aplicativo computacional para dimensionamento e tomada de decisão de sistemas de aquecimento solar de água**. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura. Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

WEISS, W *et al.*, 2008. **Solar Heat Worldwide: markets and contribution to the energy supply 2006**. Gleisdorf: Solar Heating & Cooling Programme/International Energy Agency: 2008.

WEISS, W; Spörk-Dür, M., 2019. **Solar Heat Worldwide: markets and contribution to the energy supply 2017**. Gleisdorf: Solar Heating & Cooling Programme/International Energy Agency: 2019

WILLIAMS, D. R., 2013. **Sun Fact Sheet**.

WOOLFSON, M., 2000. **The origin and evolution of the solar system**. Astronomy & Geophysics, Volume 41, Issue 1, February 2000, Pages 1.12–1.19,

YIRFA, N. N., 2014. **Feasibility study on substituting electric water heaters with solar water heaters in ghana; a case study of official residential facility of goldfields ghana limited, tarkwa mine**. Dissertação de mestrado. Kwame Nkrumah University of Science and Technology, Kumasi, Ghana.

ZAMBOLIN E., DEL COL D., 2010. **Experimental analysis of thermal performance of flat plate and evacuated tube solar collectors in stationary standard and daily conditions**. Solar Energy. 84 (8) pp. 1382-1396.

APÊNDICE

Tabela A.1. Temperatura do ar. Fonte: BDMEP/INMET

Mês	2012	2013	2018	2019	Teórica: min (2012, 2013, 2018,2019)	RETScreen*
Jan	27,5	28,2	28,2	28,4	27,5	25,8
Fev	27,6	28,6	28,0	28,0	27,6	25,2
Mar	28,1	28,9	28,2	28,3	28,1	28,2
Abr	27,9	27,9	27,1	28,0	27,1	25,5
Mai	27,0	27,3	26,6	27,9	26,6	27,0
Jun	25,7	26,0	25,9	25,9	25,7	26,2
Jul	25,5	25,0	25,6	25,4	25,0	23,7
Ago	25,2	25,7	26,0	25,6	25,2	25,4
Set	26,0	26,2	26,7	26,4	26,0	27,5
Out	26,8	27,4	28,0	27,1	26,8	27,7
Nov	27,7	27,5	28,4	28,0	27,5	27,0
Dez	28,1	28,0	28,3	28,2	28,0	24,1
Média	26,9	27,2	26,8	27,3	26,8	26,1

* Fonte: RETScreen

