

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE AQUECIMENTO DE ÁGUA PARA USO
RESIDENCIAL NO PROJETO DA CASA NORDESTE 1.0**

DENER DELMIRO MARTINS

JOÃO PESSOA-PB

2018

DENER DELMIRO MARTINS

**DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE AQUECIMENTO DE ÁGUA PARA USO
RESIDENCIAL NO PROJETO CASA NORDESTE 1.0**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Professor Dr. Fabiano Cordeiro Cavalcanti

JOÃO PESSOA-PB

2018

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

M386d Martins, Dener Delmiro.

Dimensionamento do sistema de aquecimento de água para uso residencial na CASA NORDESTE 1.0 / Dener Delmiro Martins. - João Pessoa, 2018.

0 f.

Orientação: Fabiano Cavalcanti.

Monografia (Graduação) - UFPB/CT.

1. Aquecimento Solar, CASA NORDESTE 1.0, Projeto. I. Cavalcanti, Fabiano. II. Título.

UFPB/BC

**DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE AQUECIMENTO DE ÁGUA PARA USO
RESIDENCIAL NO PROJETO CASA NORDESTE 1.0**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Professor Dr. Fabiano Cordeiro Cavalcanti

Aprovado em: ____ / ____ / ____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Fabiano Cordeiro Cavalcanti
(Orientador) – UFPB

Prof. Dr. Jacques César dos Santos (Membro interno – UFPB)

M^a Fernanda de Souza Silva - UFPB
(Membra interna – UFPB)

JOÃO PESSOA-PB

2018

Dedico este trabalho a todos aqueles que, dentro dos seus próprios projetos de vida, acreditam no trabalho de formiguinha.

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente os meus pais, Maria do Socorro e José, sem os quais essa etapa de crescimento e formação não seria tão fácil. À minha irmã Joyce Hellem por ter convivido comigo em momentos leves e momentos de estresse, me dando apoio e suporte diariamente.

Ao meu orientador professor Dr. Fabiano Cordeiro, por todos os momentos em que se debruçou sobre os mais variados questionamentos e dúvidas, com paciência e vontade de continuar aprendendo. Também pelas oportunidades de, como seu aluno monitor, resolver exercícios e diante de uma sala de aula, para o bem da minha oratória e habilidade de ensino.

Ao professor Dr. Carlos Alejandro Nome, por trazer inúmeras reflexões acerca de comprometimento e trabalho em equipe, e orientar a nós membros da equipe Casa Nordeste sobre o processo de projeto, mesmo em seus curtos períodos entre atribuições do dia-a-dia.

À toda a equipa da Casa Nordeste, pela oportunidade de conhecer novas pessoas, fazer novas amizades, aprender diariamente sobre trabalho em equipe e poder rir deliciosamente em momentos de descontração. Também pelo auxílio durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus colegas de curso, em especial, Genilton Filho, Lucas Periassu e Gessé Paulo, pela disposição de compartilhar conhecimentos ao longo da graduação e disposição quase infinita para estudar em grupo e desvendar os “mistérios” das equações de engenharia. Também ao meu colega Thiago Rodrigues, pelo laço que formamos ao longo do curso e conversas sobre a vida de cada um.

Aos meus grupos praticantes de Tai-chi Chuan e Yoga nos últimos dois anos, pela paz e serenidade que essas práticas me trouxeram em momentos turbulentos mais turbulentos do curso.

Ao meu professor de capoeira Daniel, que me ensina a cada dia a superar meus limites, respeitando o meu tempo de aprendizado.

Ao meu mestre de violão Aécio Rodrigues, que muito me ensinou sobre a importância da modéstia.

A Regilâni Ângelo, pelo conhecimento tão precioso sobre mim mesmo e amizade tão edificante.

RESUMO

A prática da sustentabilidade e inovação no contexto das habitações é, muitas vezes, rentável, o que torna importante a sua aceitação pelos próximos anos. Nesse sentido, o projeto CASA NORDESTE 1.0, desenvolvido por alunos da Universidade Federal da Paraíba, objetiva aplicar tecnologias locais, em código aberto, e de forma que possibilite a sua evolução com o crescimento da família. O objetivo do protótipo é a participação da competição internacional Solar Decathlon 2019. O presente trabalho realizou o dimensionamento do sistema de aquecimento solar de água para aplicação na CASA NORDESTE 1.0, de forma a atender os requisitos de segurança e operação estabelecidos pelas normas NBR 15569 e NBR 5626. Após o levantamento da demanda diária de água quente e obtenção dos dados climáticos médios, o cálculo do volume de armazenamento e número de coletores necessários foi efetuado. Em seguida, uma avaliação do modelo arquitetônico foi realizada para a alocação dos equipamentos, mediante modelo 3D elaborado no AutoCAD 2016. Modelos comerciais para boilers, coletores e sistemas auxiliares foram pesquisados, a fim de se obter um orçamento final. Por fim, uma análise financeira do projeto foi realizada por meio dos métodos *payback* simples, VPL e TIR.

Palavras-chave: Aquecimento solar, CASA NORDESTE 1.0, Projeto, Coletor Solar.

ABSTRACT

The sustainability and innovation practices applied to housing context is often profitable, which makes its acceptance important in next years. This way, CASA NORDESTE 1.0 project, developed by students at Universidade Federal da Paraíba, aims to apply local technologies, by open source way and allowing its evolution concomitantly to the family as well. The point of the prototype's development is the submission of the group to the international competition Solar Decathlon Latin and Caribbean 2019. This work dimensioned the water heating solar system to CASA NORDESTE's using, in order to attend security and operation request established by NBR 15569 and NBR 5626 standards. After the forecast of daily hot water demand and pointing of average climatic data, the calculation of hot water storage and collector area were done. Further the evaluation of the architectural model was needed to allocation of equipments by 3D AutoCAD 2016 model. Commercial models of boilers, solar collectors and auxiliary systems was researched, in order to obtain a final budget. Lastly, a financial analysis of the project was developed by simple payback, NPV (Net Present Value) and IRR (Internal Rate of Return) methods.

Keywords: Solar Heating, CASA NORDESTE 1.0, Project.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	21
2. OBJETIVOS	23
3. JUSTIFICATIVA.....	24
3.1 CASA NORDESTE 1.0	24
3.2 Solar Decathlon Latin American and Caribbean 2019	27
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	30
4.1. Radiação térmica.....	30
4.1.1. Aspectos gerais da radiação térmica.....	30
4.1.2. Radiação do corpo negro	31
4.1.3. Propriedades radioativas.....	33
4.1.4. Lei de Kirchhoff	35
4.1.5. Corpos cinza	37
4.1.6. Radiação solar	37
4.1.7. Radiação solar em um plano.....	39
4.2. Mecânica dos fluidos	41
4.2.1. Equação de Bernoulli.....	41
4.2.2. Perda de carga em tubos	43
4.3. Aquecimento solar de água residencial.....	46
4.3.1. Tipos de circuito	46
4.3.2. Coletores solares planos	49
4.3.3. Reservatório térmico	51
4.4. Metodologias de análise de investimentos.....	53
4.4.1. <i>Payback</i> simples	54
4.4.2. Valor presente líquido (VPL)	54
4.4.3. TIR (Taxa interna de retorno).....	55
5. METODOLOGIA	56
5.1. Dados climáticos em Santiago de Cali.....	57
5.2. Cálculo da área coletora e volume de armazenamento	60
5.2.1. Caracterização da demanda	60
5.2.2. Cálculo do volume de armazenamento.....	62
5.2.3. Cálculo da energia útil.....	63

5.2.4.	Cálculo da área coletora	63
5.3.	Alocação do sistema	65
5.4.	Dimensionamento das tubulações.....	67
5.4.1.	Seleção do material.....	67
5.4.2.	Pesos dos equipamentos	67
5.4.3.	Vazão estimada.....	68
5.4.4.	Diâmetro nominal estimado	68
5.4.5.	Velocidade de escoamento	69
5.4.6.	Perda de carga unitária	69
5.4.7.	Diferença de cotas entre entrada e saída do trecho.....	70
5.4.8.	Pressão disponível na entrada.....	70
5.4.9.	Comprimentos reais e equivalentes	70
5.4.10.	Perdas de carga totais	70
5.4.11.	Pressão disponível residual.....	70
5.4.12.	Pressão disponível no ponto de utilização.....	71
5.5.	Seleção do sistema de controle	71
5.6.	Análise financeira	71
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	72
6.1.	Seleção do reservatório térmico.....	72
6.2.	Seleção do coletor solar	76
6.3.	Seleção de material para tubulações	78
6.4.	Alocação dos boilers e coletores.....	80
6.4.1.	Boilers e alimentação de água fria.....	80
6.4.2.	Coletores solares e circuitos	82
6.5.	Dimensionamento das tubulações.....	85
6.6.	Seleção de componentes auxiliares.....	87
6.6.1.	Controlador diferencial de temperatura.....	87
6.6.2.	Sensores de temperatura	89
6.6.3.	Instalação do sistema de controle	90
6.7.	Aspectos evolutivos do sistema	91
6.8.	Considerações sobre instalação	94
6.9.	Considerações sobre manutenção	94
6.10.	Análise financeira.....	96

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	101
REFERÊNCIAS	103
APÊNDICES	i
ANEXOS	ii

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Crescimento do consumo de energia elétrica <i>per capita</i> (MWh).....	21
Figura 2: Ilustração do projeto CASA NORDESTE 1.0.....	25
Figura 3: Wikihouse na World Maker Faire 2013, Nova York.....	26
Figura 4: Equipe Casa Nordeste.....	26
Figura 5: Times de estudantes na Vila Solar.....	29
Figura 6: Espectro de radiação eletromagnética.....	30
Figura 7: Emissão ideal de um corpo negro em relação ao real.....	32
Figura 8: poder emissivo do corpo negro.....	33
Figura 9: Parcelas de radiação absorvida, refletida e transmitida.....	34
Figura 10: Situação hipotética para demonstração da Lei de Kirchhoff.....	36
Figura 11: Distribuição espectral da radiação solar.....	38
Figura 12: Ângulos associados a uma superfície receptora de radiação solar.....	39
Figura 13: Representação gráfica dos termos da equação de Bernoulli.....	43
Figura 14: Esquema do circuito termossifão.....	48
Figura 15: Esquema do circuito em circulação forçada.....	48
Figura 16: (a) Coletor solar plano típico; (b) Corte frontal.....	49
Figura 17: Balanço energético em um reservatório térmico.....	52
Figura 18: Estrutura interna típica de um <i>boiler</i>	53
Figura 19: Fluxos de caixa ao longo do tempo.....	54
Figura 20: Médias mensais: temperatura de bulbo seco e irradiação global horizontal.....	58
Figura 21: Localização de Cali no território colombiano.....	63

Figura 22: Vista aérea da cidade de Cali.	60
Figura 23: Demanda média diária de água quente para 1-5 habitantes.	62
Figura 24: (a) Planta baixa da Casa Nordeste 1.0; (b) Detalhe dos pontos de consumo.	65
Figura 25: Vista superior do telhado da CASA NORDESTE 1.0.	66
Figura 26: Consumo e armazenamento de água quente para 1-5 habitantes.	72
Figura 27: Vistas do <i>boiler</i>	73
Figura 28: Vista isométrica do <i>boiler</i> de 200 l.	74
Figura 29: Vista explodida do boiler de 200 l.	75
Figura 30: Vista explodida do coletor.	77
Figura 31: Peças da linha AQUATHERM™.	80
Figura 32: Estrutura de alocação dos <i>boilers</i>	81
Figura 33: Coletores e tubulações.	82
Figura 34: Isolamentos para tubos em polietileno expandido.	84
Figura 35: Tubulações de distribuição para os pontos de consumo.	86
Figura 36: Perdas de temperatura esperadas em CPVC	87
Figura 37: Controlador MICROSOL™.	88
Figura 38: SB59.	89
Figura 39: SB41.	89
Figura 40: Posicionamento do sistema de controle	90
Figura 41: Registros para ativação/desativação dos <i>boilers</i>	92
Figura 42: Volume de armazenamento e área coletora para 1-5 habitantes.	92
Figura 43: Posição dos registros para ativação/desativação dos coletores.	93
Figura 44: Aberturas para manutenção do sistema de armazenamento.	95

Figura 45: Fluxo de caixa acumulado após o tempo de <i>payback</i>	97
Figura 46: Fluxo de caixa acumulado ao longo do tempo de investimento.	97
Figura 47: Fluxo de caixa acumulado para tarifa popular de energia.	98
Figura 48: Fluxo de caixa acumulado para tarifa popular de energia ao longo do tempo.....	99
Figura 49: Flutuações da taxa Selic	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Consumo hipotético para uso de três tecnologias de aquecimento de água	22
Tabela 2: Rugosidade equivalente para tubos novos.....	45
Tabela 3: Médias mensais de temperatura e irradiação global horizontal.....	58
Tabela 4: Demanda de água quente para 3 habitantes.....	61
Tabela 5: Pesos das peças de utilizações comuns	68
Tabela 6: Velocidades e vazões máximas para água quente	69
Tabela 7: Volume de armazenamento estimado para 3 habitantes.....	72
Tabela 8: Modelos de <i>boiler</i> para volumes variados.....	74
Tabela 9: Cálculo da área coletora.	76
Tabela 10: Especificações técnicas do coletor solar MC18 HIS.....	78
Tabela 11: Parâmetros de eficiência do modelo M18 HIS.....	78
Tabela 12: Planilha para dimensionamento de tubulações.....	85
Tabela 13: Valor total do investimento.	96
Tabela 14: Análise de viabilidade econômica por <i>payback</i> simples	96

LISTA DE SÍMBOLOS

λ	Comprimento de onda
c	Velocidade da luz no vácuo
ν	Frequência
E	Poder emissivo
E_{cn}	Poder emissivo de corpo negro
T	Temperatura absoluta
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
$E_{cn,\lambda}$	Poder emissivo espectral do corpo negro
$G_{cn,\lambda}$	Radiação espectral absorvida pelo corpo negro
C_1	Constante 1
C_2	Constante 2
G	Fluxo de radiação incidente
α	Absortividade
ε	Emissividade
ρ	Reflexividade
τ	Transmissividade
α_λ	Absortividade monocromática
ε_λ	Emissividade monocromática
ρ_λ	Reflexividade monocromática
α_λ	Absortividade monocromática

$G_{\lambda,absorvido}$	Radiação incidente absorvida
α_{cinza}	Absortividade do corpo cinza
ε_{cinza}	Emissividade do corpo cinza
$\bar{\alpha}$	Absortividade média
$\bar{\varepsilon}$	Emissividade média
G_{cs}	Constante solar
φ	Latitude
δ	Declinação solar
n	Dia do ano
β	Declive
γ	Ângulo azimutal de superfície
γ_s	Ângulo azimutal do sol
ω	Ângulo horário
θ	Ângulo de incidência
θ_z	Ângulo zenital
α_s	Ângulo de altitude solar
α_r	Azimute relativo
P	Pressão
V	Velocidade
g	Aceleração da gravidade
ρ	Massa específica
z	Altura
H	Altura total

D	Diâmetro do tubo
l	Comprimento do tubo
ε	Rugosidade do tubo
μ	Viscosidade dinâmica
f	Fator de atrito de Darcy-Weisbach
V_{med}	Velocidade média
τ_w	Tensão de cisalhamento na parede do tubo
Re	Número de Reynolds
h_L	Perda de pressão em tubo
Q	Vazão volumétrica
J	Perda de carga unitária
l_{total}	Comprimento total
l_{eq}	Comprimento equivalente
l_{real}	Comprimento real
Q_u	Energia útil transferida
G_T	Irradiância total sobre o vidro do coletor
U_L	Coefficiente global de transferência de calor do coletor
T_{pm}	Temperatura média da placa do coletor
T_a	Temperatura ambiente
A_c	Área coletora de radiação solar
F_R	Fator de remoção de calor
T_{ent}	Temperatura de entrada da água no coletor

$(\tau\alpha)_N$	Produto eficaz transmitância-absortância
S	Irradiância solar absorvida pela placa do coletor
η_e	Eficiência do coletor
\dot{m}	Vazão mássica
c_p	Calor específico
T_{arm}	Temperatura de armazenamento
\dot{Q}_H	Potência derivada dos coletores
\dot{Q}_L	Potência extraída pelo consumo
U_B	Coefficiente global de transferência de calor do <i>boiler</i>
\dot{Q}_{ac}	Taxa de energia térmica armazenada
A_B	Área da superfície do <i>boiler</i>
T_{arm}^+	Temperatura final de armazenamento
Δt	Intervalo de resfriamento
t	Tempo para recuperação do investimento
I_0	Investimento inicial
L_c	Lucro líquido por unidade de tempo
VPL	Valor presente líquido
FLC	Fluxo líquido de caixa
i	Taxa mínima de atratividade
TIR	Taxa interna de retorno
Q_{pu}	Vazão da peça de utilização
T_u	Tempo de utilização

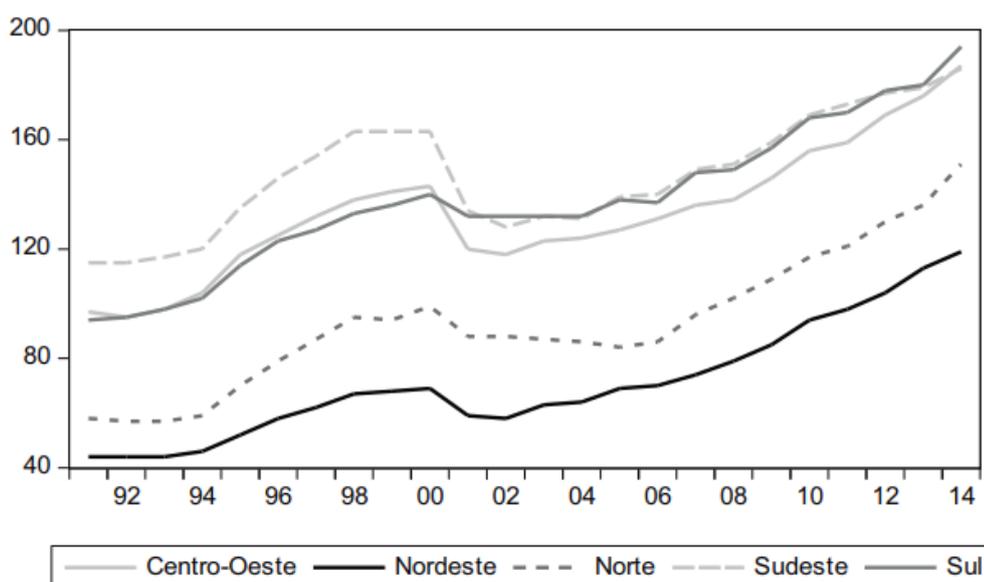
f	Frequência de utilização
$V_{consumo}$	Volume consumido
V_{armaz}	Volume armazenado
$T_{consumo}$	Temperatura no ponto de consumo
$T_{ambiente}$	Temperatura ambiente
$E_{útil}$	Energia útil
E_{perda}	Perda de energia
$PMDEE$	Produção média diária de energia específica
FC_{instal}	Fator de correção de instalação
$\beta_{ótimo}$	Inclinação ótima do coletor
$A_{coletora}$	Área coletora
I_g	Irradiação global horizontal média
C	Coefficiente de descarga
D'	Diâmetro interno estimado
v	Velocidade de escoamento
P_{disp}	Pressão disponível na saída do trecho
$P_{anterior}$	Pressão disponível na entrada do trecho anterior
$\gamma_{água}$	Peso específico da água

1. INTRODUÇÃO

A conservação e o uso racional da energia é uma das grandes questões dentro dos campos da economia e engenharia na atualidade. Buscam-se formas de aproveitamento energético de baixo custo e com menor geração de poluentes, para os mais variados contextos de utilização, desde indústrias e comércio até sistemas prediais e residenciais. (ARRUDA, 2004).

A demanda de energia em edifícios é guiada por uma série de fatores, tais como: crescimento populacional, maior adesão popular a novas tecnologias (computadores, fornos de micro-ondas, máquina de lavar etc.), condições climáticas e até fatores comportamentais (INTERACADEMY COUNCIL, 2007). Uma vez que é projetado um crescimento populacional prioritariamente nas áreas urbanas nos próximos anos, é imediato assumir a construção abrupta de grandes volumes de novos edifícios, juntamente com o consumo energético (INTERACADEMY COUNCIL, 2007). O gráfico da Figura 1 mostra a evolução do crescente do consumo energético residencial no Brasil, entre 1992 e 2014.

Figura 1: Crescimento do consumo de energia elétrica *per capita* (MWh).



Fonte: Soares; Lopes; Cunha (2016).

O relatório da InterAcademy Council (2007) salienta ainda que aumentar a eficiência energética dos edifícios é uma tarefa complexa, e exige grande integração entre os projetos de engenharia e arquitetura, a partir da forma de execução dos sistemas e materiais utilizados.

O consumo associado diretamente ao aquecimento de água residencial apresenta-se como parcela significativa do total da energia consumida nas residências. Tal valor, associado aos chuveiros elétricos, pode chegar a 32% da fatura mensal de energia elétrica (PRADO; GONÇALVES, 1992, *apud* ARRUDA, 2004). Uma estimativa para a quantidade total de consumo em aquecimento de água residencial para as regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste está mostrada na Tabela 1, para uma situação hipotética onde todas as residências utilizassem o sistema especificado (MATAFS; FAGÁ, 1996, *apud* ARRUDA, 2004).

Tabela 1: Consumo hipotético para uso de três tecnologias de aquecimento de água.

Tecnologia	Consumo (GWh)
Aquecimento com chuveiro elétrico	9.500
Aquecimento em sistema elétrico de termoacumulação	26.400
Aquecimento com aproveitamento de energia solar	7.900

Fonte: Matafs; Fagá (1996) *apud* Arruda (2004).

Como o objetivo de evitar o consumo irracional e adequar-se às novas necessidades energéticas – com ênfase no contexto habitacional –, algumas tecnologias têm se popularizado. Os sistemas de aquecimento de água com aproveitamento de energia solar se enquadram nestes requisitos (ARRUDA, 2004). Tais sistemas podem, ainda, contribuir com o desenvolvimento econômico do Brasil, uma vez que a tecnologia já é dominada nacionalmente, e contribui para a geração de empregos com mão-de-obra local, em especial, dentro dos serviços de instalação e manutenção (MESQUITA, 1996, *apud* BAPTISTA, 2006).

O presente trabalho tem como enfoque o dimensionamento de um sistema de aquecimento de água que utilize energia solar, como um subsistema do projeto estudantil CASA NORDESTE 1.0, cuja proposta é a submissão de um protótipo de habitação sustentável na competição internacional Solar Decathlon Latin and Caribbean 2019 – que terá como sede a cidade de Santiago de Cali, na Colômbia.

2. OBJETIVOS

Objetivo geral:

- Dimensionar o sistema de aquecimento de água do projeto CASA NORDESTE 1.0, selecionando componentes essenciais a esses sistemas e situando-o na planta da casa, com detalhes sobre sua instalação e manutenção.

Objetivos específicos:

- Fazer um levantamento das características climáticas de Santiago de Cali, afim de obter parâmetros necessários ao projeto;
- Prever a necessidade de armazenamento de água quente em função da demanda;
- Prever a necessidade de energia solar útil a ser absorvida pelos coletores;
- Dimensionar as tubulações dos circuitos de recirculação e distribuição para os pontos de consumo, através da quantificação das perdas de carga nas tubulações e pressão de serviço nos componentes;
- Selecionar componentes auxiliares ao circuito de água quente;
- Realizar uma análise de viabilidade econômica do projeto.

3. JUSTIFICATIVA

Nesta seção, será detalhada a proposta de uso do sistema de aquecimento solar, com ênfase nas características do projeto CASA NORDESTE 1.0 e na competição internacional Solar Decathlon Latin American and Caribbean 2019 (SDLAC 2019).

3.1 CASA NORDESTE 1.0

O projeto CASA NORDESTE 1.0 está associado ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo (PPGAU) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Seu desenvolvimento foi concebido pelos pesquisadores do Laboratório de Modelos e Prototipagem (LM+P), ligado ao Centro de Tecnologia (CT) da UFPB, e conta com o apoio do Centro de Energias Alternativas e Renováveis (CEAR) e Laboratório de Urbanismo (LABURBE).

O projeto foi concebido para integrar as diversas áreas que competem ao desenvolvimento do protótipo de uma residência, desde os sistemas mais compactos de engenharia até o que concerne à inserção do projeto em escala urbana. Nesse sentido, reúne alunos de Graduação e Pós-Graduação para buscar soluções que atendam a múltiplas faces da sustentabilidade em suas definições mais gerais, com uso de pesquisas preferencialmente locais.

O desenvolvimento projetual assenta-se em alguns pilares que buscam trazer um caráter transformador e inovador no que se refere ao ato de construir moradias acessíveis e de baixo custo, cujo conceito está ilustrado na Figura 2. A casa reúne características adaptadas ao clima nordestino, juntamente com novas propostas tecnológicas. Em particular, visa mostrar a viabilidade, em termos concretos, da construção de um conjunto habitacional no município do Conde-PB. São eles:

- 1) **Casa evolutiva**: As famílias são naturalmente expansíveis em função do tempo, por razões diversas – econômicas, sociais, etc. Nesse sentido, a CASA NORDESTE 1.0 busca contemplar tais variações dinâmicas, de forma que possua uma infraestrutura adaptável. Por exemplo, o sistema estrutural em madeira compensada é baseado no conceito WikiHouse, no qual uma geometria estrutural é repetida no espaço. As paredes são compostas de painéis, e o tamanho da construção é função da quantidade destes (Figura 3).

Código aberto: Entende-se que a tecnologia digital tem potencial para grandes mudanças de paradigma tecnológico no Brasil e no mundo. Além disso, há muitos impactos ambientais resultantes de má gestão de obras, sistemas construtivos insustentáveis, entre outras causas. Nesse sentido, a adoção do código aberto pode tornar o processo construtivo acessível, possibilitando que o usuário fabrique as próprias peças e construa uma habitação de baixo custo.

- 2) **Cem por cento Nordeste:** A CASA NORDESTE 1.0 visa trazer impactos dentro da realidade da região Nordeste do Brasil. Para tanto, busca alinhar o tema da sustentabilidade em construções, por meio do uso de fontes de energia renovável, valorização da produção científica local e preferência, também, ao uso de tecnologias locais. Tal postura implica na escolha de materiais e equipamentos que preferencialmente sejam desenvolvidos, projetados, fabricados ou distribuídos naquela região. Espera-se, com esse posicionamento, fomentar o mercado nordestino, incentivar a pesquisa e a busca de soluções alternativas para o contexto da habitação.

Figura 2: Ilustração do projeto CASA NORDESTE 1.0.



Fonte: Próprio autor.

Figura 3: Wikihouse na World Maker Faire 2013, Nova York.



Disponível em: < <http://www.architecture00.net/news/3251>>. Acesso em: 19 de set. de 2018.

Figura 4: Equipe Casa Nordeste.



Fonte: Próprio autor.

Atualmente, o projeto conta com a participação de membros e colaboradores, sendo esses alunos de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo pelo PPGAU, e alunos de

bacharelado de 7 cursos graduação da UFPB (Arquitetura e urbanismo, Eng. civil, Eng. mecânica, Eng. ambiental, Eng. de energias renováveis, Eng. elétrica e Eng. de materiais) - vistos na Figura 4 - e 6 professores mentores vinculados ao Departamento de Arquitetura, Departamento de Engenharia de Energias Renováveis e Departamento de Engenharia Elétrica.

3.2 Solar Decathlon Latin American and Caribbean 2019

O Solar Decathlon é uma competição criada pelo Departamento de Energia dos Estado Unidos , realizada apenas internamente entre 1999 e 2010. A partir desse período, as edições da competição passaram a abranger inúmeros países de outros continentes, realizando eventos especificamente voltados para África, América Latina, China, Europa e Oriente Médio.

A principal proposta da competição é promover discussões a respeito de novas formas de se conceber e construir habitações, proposta que traz consigo o estímulo ao trabalho em equipe e à liderança dos estudantes, além do incentivo à pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias. Nesse sentido, o projeto CASA NORDESTE 1.0 é a resposta da Universidade Federal da Paraíba ao Solar Decathlon Latin American and Caribbean 2019, em Santiago de Cali, localizada no Valle del Cauca, Colômbia.

Os eventos consistem na submissão de projetos de habitações a 10 provas distintas, nas quais o desempenho de estudantes universitários é avaliado nas etapas de projeto e construção do protótipo em escala real. Os estudantes devem, portanto, projetar, construir e operar uma residência energeticamente eficiente, cuja matriz energética seja 100% solar. Vários aspectos são exigidos pelas regras oficiais e avaliados pelo júri, associados à responsabilidade ecológica do projeto como um todo.

As provas do Solar Decathlon são as seguintes:

- 1) **Architecture Contest**: Avaliação dos conceitos arquitetônicos e design, do ponto de vista de integração geral do projeto, inovação e funcionalidade.
- 2) **Market Potential Contest**: Avaliação dos possíveis impactos do projeto na indústria e mercado, e como o produto se direciona aos possíveis clientes.
- 3) **Engineering Contest**: Avaliação dos aspectos de design, eficiência energética, inovação e capacidade de integração dos componentes de engenharia da casa, bem como seu correto funcionamento e manutenibilidade.

- 4) **Communications Contest**: Avaliação das estratégias adotadas pelas equipes para a divulgação de seus projetos ao público geral e às empresas potencialmente patrocinadoras (Website, redes sociais, vídeos promocionais etc.)
- 5) **Innovation Contest**: Avaliação dos aspectos inovadores dos subprojetos integrados.
- 6) **Water Contest**: Avaliação do consumo de água da casa e estratégias para o uso racional de tal recurso, como reuso de águas cinza e captação de água da chuva.
- 7) **Health and Comfort Contest**: Avaliação, perante medição direta, de parâmetros de conforto da habitação, como temperatura média de bulbo seco, umidade média, luminosidade etc.
- 8) **Appliance Contest**: Avaliação dos eletrodomésticos utilizados mediante seu desempenho operacional.
- 9) **Home Life Contest**: Avaliação do dia-a-dia dos usuários, em termos de conforto e facilidade de execução de suas atividades na casa.
- 10) **Energy Contest**: Avaliação da capacidade produção de energia elétrica das casas, em termos de contribuição para a linha fornecida pela Organização.

O Solar Decathlon teve sua primeira versão em 2002, tendo ocorrido especificamente nos anos de 2005, 2007, 2009, 2011, 2013, 2015 e 2017. Em cada uma das regiões do globo, há uma quantidade limitada de vagas para equipes, que submetem sua inscrição com 2 anos de antecedência. O projeto deve, a partir daí, ser desenvolvido em etapas, mediante 5 entregas de documentação projetual antes da participação efetiva dos estudantes na competição, que ocorre em um espaço comum (Vila Solar) e tem duração de 1 semana. A Figura 5 mostra vários estudantes participantes do Solar Decathlon 2017, nos Estados Unidos.

Figura 5: Times de estudantes na Vila Solar



Fonte: US Department of Energy. Disponível em: < <https://www.solardecathlon.gov/2017/competition-teams.html> >. Acesso em: 22 de set. de 2018.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1. Radiação térmica

A radiação eletromagnética se manifesta das mais variadas formas. Apenas a radiação térmica, no entanto, é de interesse neste trabalho.

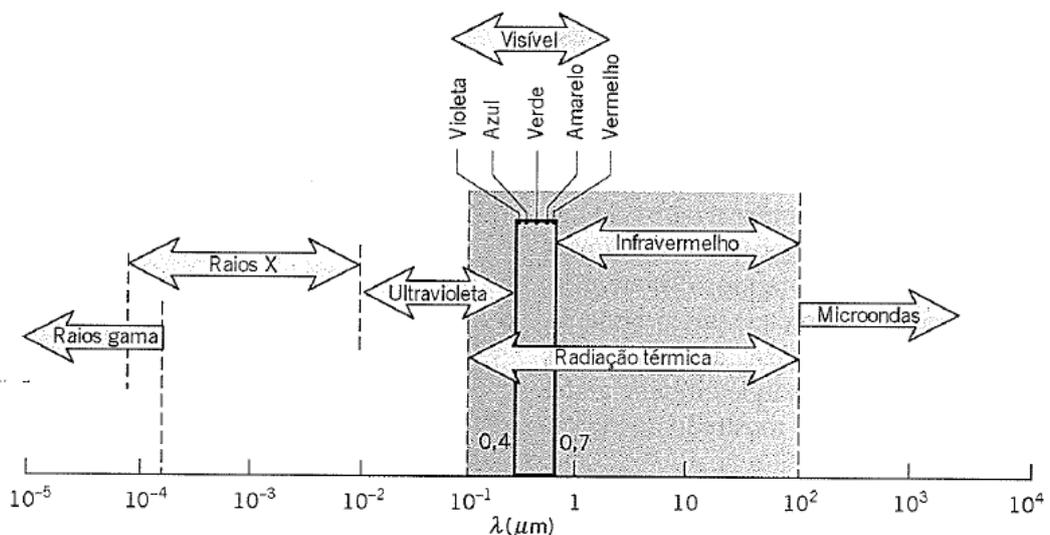
4.1.1. Aspectos gerais da radiação térmica

A radiação pode ser definida como um mecanismo de propagação de energia sem a necessidade de um meio material, através de fótons ou ondas eletromagnéticas, a depender da abordagem utilizada. De qualquer forma, a velocidade de propagação, frequência e comprimento de onda de uma porção de radiação estão definidas (INCROPERA, 2008):

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (6)$$

Onde λ é o comprimento de onda (metros), ν é a frequência (hertz) c a velocidade da luz no vácuo (aproximadamente $2,998 \times 10^8$ m/s). O espectro eletromagnético é composto por múltiplas regiões (Figura 6), onde se situam ondas de variados comprimentos.

Figura 6: Espectro de radiação eletromagnética.



Fonte: Incropera (2008).

Ondas de alta energia estão localizadas na faixa ultravioleta e faixas mais à esquerda do gráfico ($\lambda < 0,4 \mu\text{m}$), enquanto ondas de baixa energia se localizam na região infravermelha, imediatamente acima do espectro visível ($0,4 < \lambda < 0,7 \mu\text{m}$), à direita do gráfico. A radiação térmica, por sua vez, se situa numa larga faixa entre 0,1 e 100 μm , que inclui o espectro visível.

4.1.2. Radiação do corpo negro

Um corpo a uma temperatura termodinâmica (escala Kelvin) acima do zero absoluto é capaz de emitir radiação em todas as direções, numa larga faixa de comprimentos de onda. A quantidade de energia emitida para um determinado comprimento de onda λ depende do material do corpo e de sua temperatura. Portanto, corpos diferentes emitem, naturalmente, quantidades diferentes de radiação por unidade de área (ÇENGEL, 2011).

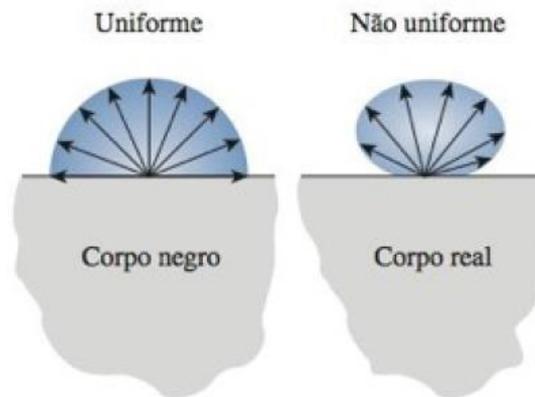
Para uma dada temperatura, adota-se como referência um emissor perfeito, o *corpo negro*, que emite a quantidade máxima de radiação a uma dada temperatura, além de ser um perfeito absorvedor (absorve toda a radiação incidente, independente do comprimento e direção) e um emissor difuso (emite radiação com a mesma intensidade para todas as direções). Tal hipótese é comumente utilizada para que se possa padronizar uma referência com a qual os corpos reais podem ser comparados (ÇENGEL, 2011). A Figura 7 exibe o comportamento de um emissor difuso – corpo negro –, em comparação a um emissor real.

A equação que descreve o poder emissivo de um corpo negro é a equação de Stefan-Boltzmann (ÇENGEL, 2011):

$$E_b(T) = \sigma T^4 \quad (7)$$

Onde $E_b(T)$ é o poder emissivo (W/m^2), T é a temperatura absoluta (K) do corpo negro e $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$ a constante de Stefan-Boltzmann.

Figura 7: Emissão ideal de um corpo negro em relação ao real.



Fonte: Çengel (2011).

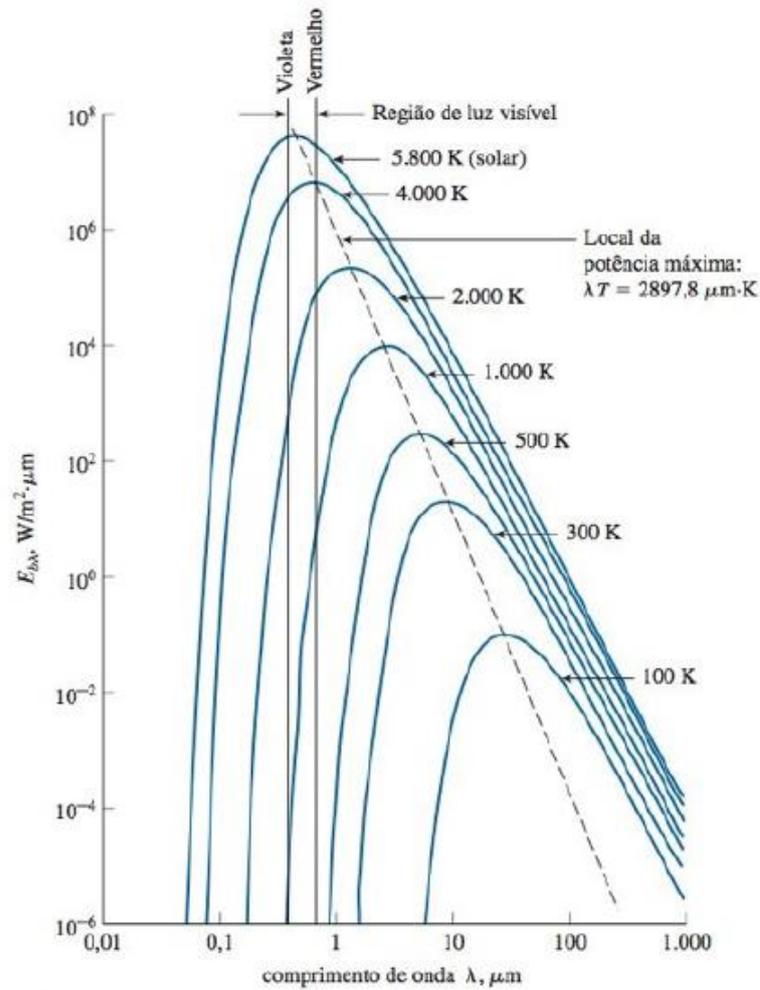
Tal equação fornece o poder emissivo total de um corpo negro, isto é, a soma dos poderes emissivos para todas as regiões do espectro. Uma vez que o poder emissivo de fato varia com λ , define-se $E_{cn,\lambda}$ como o poder emissivo espectral do corpo negro, que pode ser calculado pela lei de Plank (para propagação no vácuo ou em meios gasosos):

$$E_{cn,\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad (8)$$

Onde $E_{cn,\lambda}$ é dado em $W/(m^2 \cdot \mu m)$ $C_1 = 3,74177 \times 10^8 W \cdot \mu m^4 / m^2 e$ $C_2 = 1,43878 \times 10^4 \mu m \cdot K$.

As curvas mostradas na Figura 8 exprimem valores para o poder emissivo espectral de corpos negros a variadas temperaturas. Verifica-se que a radiação emitida é uma função contínua do comprimento de onda e, para qualquer temperatura especificada, ela cresce até atingir o pico, decrescendo gradualmente em seguida. Além disso, à medida que a temperatura aumenta, as curvas se deslocam para a direita. Para o Sol, considera-se a curva de corpo negro a 5800 K, cujo pico se encontra, naturalmente, dentro do espectro visível (ÇENGEL, 2011).

Figura 8: poder emissivo do corpo negro.



Fonte: Çengel (2011).

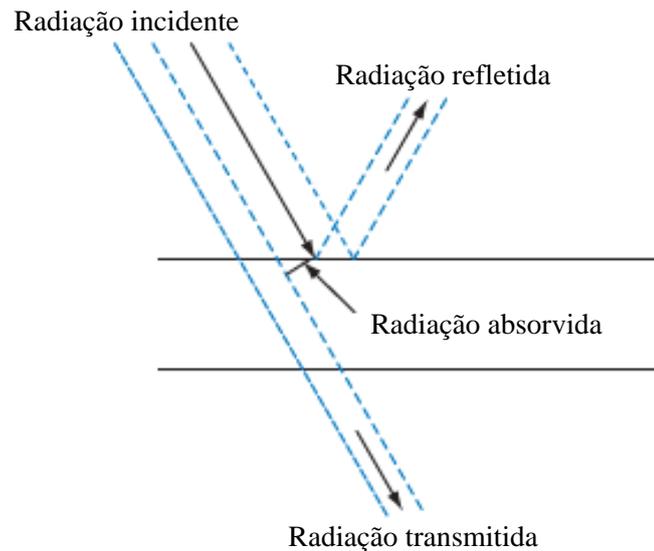
4.1.3. Propriedades radioativas

Os materiais reais não se comportam, naturalmente, como corpos negros. Quando radiação incide sobre um corpo a um fluxo G , nem toda essa radiação é absorvida. A Figura 9 ilustra esse fato, onde parte da radiação incidente é refletida, outra parte, transmitida através do sólido e, por fim, a parcela remanescente é absorvida pela superfície. A fração de G correspondente a cada uma dessas parcelas é um valor adimensional denominado *absortividade* (α), *reflexividade* (ρ) e *transmissividade* (τ), respectivamente. Por esta definição, as Equações (9) e (10) são imediatas (KREITH, 2011):

$$\alpha G + \rho G + \tau G = G \quad (9)$$

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (10)$$

Figura 9: Parcelas de radiação absorvida, refletida e transmitida.



Fonte: Adaptado de Kreith (2011).

Outra propriedade importante é a *emissividade* (ε), definida como a razão entre o poder emissivo do corpo real e o poder emissivo de um corpo negro à mesma temperatura absoluta (KREITH, 2011):

$$\varepsilon = \frac{E(T)}{\sigma T^4} \quad (11)$$

Corpos opacos não transmitem radiação, e, portanto, sua transmissividade é nula ($\tau = 0$). Bons espelhos tem reflexividade próxima de 1. Além disso, corpos negros absorvem completamente a radiação ($\alpha = 1$), assim como emitem o máximo de radiação possível a uma dada temperatura, conforme descrito na seção 4.1.2 ($\varepsilon = 1$). Apesar de, nas equações anteriores, partir-se da radiação total absorvida G , também é possível definir as propriedades

monocromáticas de um corpo, isto é, α_λ , ρ_λ e τ_λ , para um dado comprimento de onda (KREITH, 2011):

$$\varepsilon_\lambda = \frac{E_\lambda(T)}{E_{cn,\lambda}(T)} \quad (12)$$

$$\alpha_\lambda = \frac{G_{\lambda,absorvido}(T)}{G_{cn,\lambda}(T)} \quad (13)$$

De tais definições, mostra-se que:

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1 \quad (14)$$

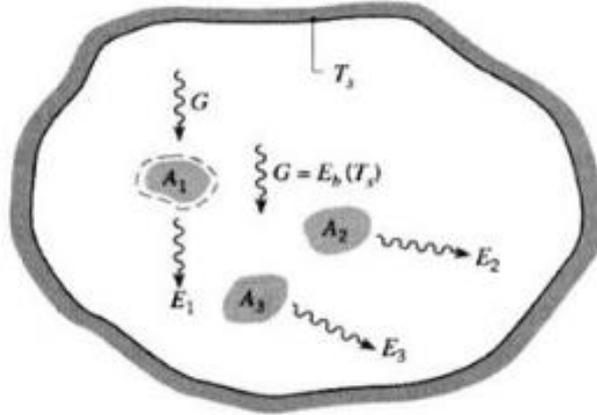
4.1.4. Lei de Kirchhoff

Uma vez que se conhecem as propriedades radioativas, a seguinte situação pode ser idealizada, a fim de obter uma simplificação importante a respeito das mesmas (INCROPERA, 2008). Vários corpos com áreas superficiais A_1, A_2, \dots , propriedades $\alpha_1, \alpha_2, \dots$ e $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots$, e temperaturas absolutas T_1, T_2, \dots , estão confinados em uma cavidade completamente fechada (corpo negro), de temperatura constante T_s – o sistema se encontra, portanto, em equilíbrio térmico (Figura 10).

Fazendo um balanço de energia no corpo 1 (selecionado arbitrariamente), é evidente que:

$$\alpha_1 G A_1 - E_1(T_s) A_1 = 0 \quad (15)$$

Figura 10: Situação hipotética para demonstração da Lei de Kirchoff.



Fonte: Incropera (2008).

Uma vez que, na Figura 10, a irradiação total é igual à emissão da cavidade (corpo negro), isto é, $G = E_{cn}(T_s)$, logo:

$$\frac{E_1(T_{sup})}{\alpha_1} = E_{cn}(T_s) \quad (16)$$

Aplicando o resultado da Equação (16) a todos os corpos, conclui-se que:

$$\frac{E_1(T_s)}{\alpha_1} = \frac{E_2(T_s)}{\alpha_2} = \dots = 1 \quad (17)$$

Incropera (2006) ainda mostra que a forma alternativa é válida:

$$\frac{\varepsilon_1}{\alpha_1} = \frac{\varepsilon_2}{\alpha_2} = \dots = 1 \quad (18)$$

As Equações (17) e (18) fundamenta a Lei de Kirchhoff. As conclusões para as igualdades demonstradas são (INCROPERA, 2008):

- Para qualquer superfície no interior do recipiente, $\varepsilon = \alpha$, isto é, a emissividade total da superfície é igual à sua absorptividade total;
- $E_n(T_s) \leq E_{cn}(T_s)$, ou seja, o poder emissivo do corpo negro a uma dada temperatura é sempre maior que a do corpo real, pois $\alpha \leq 1$.

4.1.5. Corpos cinza

Corpos cinza são superfícies cuja absorptividade e emissividade monocromática assumem valores que não dependem do comprimento de onda para a faixa espectral da radiação emitida e da radiação incidente. Embora objetos reais não obedeçam rigorosamente esta proposição, é possível obter uma média dos valores de ε e α , cuja consequência matemática seja, na prática, não crítica para aplicações de engenharia (KREITH, 2011). Em suma, para tais aplicações, pode-se aceitar que:

$$\varepsilon_\lambda = \bar{\varepsilon} = \bar{\alpha} = \alpha_\lambda = \varepsilon_{cinza} = \alpha_{cinza} \quad (19)$$

Onde ε_{cinza} e α_{cinza} são a emissividade e a absorptividade do corpo cinza, respectivamente.

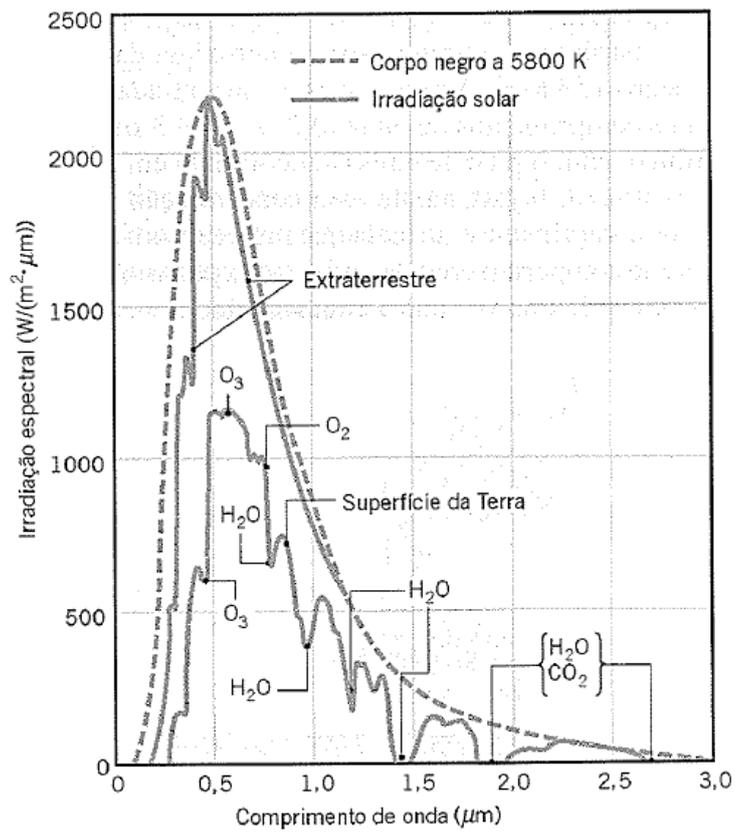
4.1.6. Radiação solar

O fato de a distância entre o Sol e Terra apresentar variações resulta, naturalmente, em flutuações relacionadas ao clima do planeta. Entretanto, a quantidade de energia transportada pelas ondas eletromagnéticas que atinge a superfície terrestre é aproximadamente constante, e é denominada *constante solar* G_{cs} . O valor da constante solar oscila em torno de 1367 W/m^2 , com uma incerteza da ordem de 1% (DUFFIE & BECKMAN, 2006).

O contato com os gases da atmosfera produz mudanças de magnitude, distribuição espectral e direcional da radiação solar. Esses efeitos se devem à *absorção* da radiação pelos gases atmosféricos, e pelo *espalhamento* em função dos componentes da mesma. Na Figura 11, é possível observar o efeito da absorção da radiação solar pelos gases ozônio (O_3), O_2 (oxigênio), CO_2 (dióxido de carbono) e H_2O (vapor de água) na diminuição da irradiação

espectral na superfície, quando comparada à irradiação espectral extraterrestre e à irradiação de corpo negro ideal (INCROPERA, 2008).

Figura 11: Distribuição espectral da radiação solar.



Fonte: Incropera (2008).

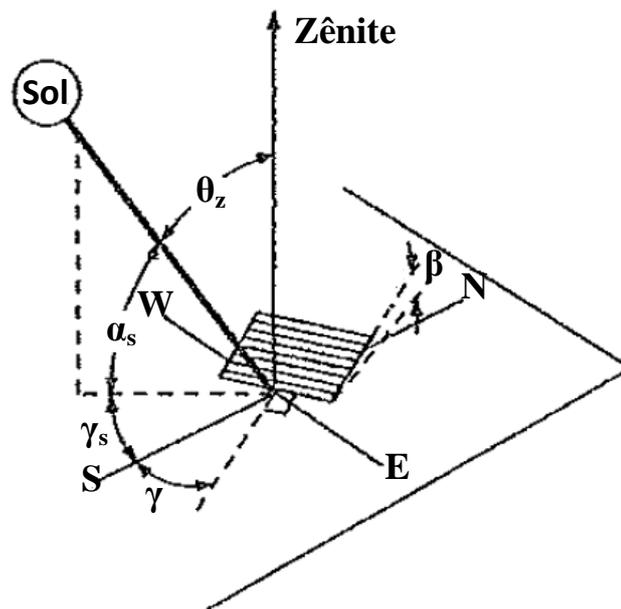
Em função do espalhamento, observa-se a existência de duas parcelas, a saber:

- **Radiação solar direta:** Parcela da radiação solar que não sofre difração ou espalhamento;
- **Radiação solar difusa:** Parcela da radiação solar que sofre espalhamento e têm, dessa forma, sua direção alterada. Incropera (2008) salienta dois mecanismos comuns relacionados à radiação solar difusa: o *espalhamento de Rayleigh*, provocado por moléculas muito pequenas de gases, e o *espalhamento de Mie*, ocasionado por poeira e partículas maiores.

4.1.7. Radiação solar em um plano

O modelo de uma superfície inclinada que recebe a radiação solar é extremamente útil no estudo de inúmeros processos térmicos em engenharia. Duffie & Beckman (2006) definem, para este fim, as seguintes variáveis:

Figura 12: Ângulos associados a uma superfície receptora de radiação solar.



Fonte: Adaptado de Duffie & Beckman (2006).

- **Latitude (φ):** Posição angular em relação ao equador, sendo norte positivo e sul, negativo ($-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$).
- **Declinação solar (δ):** Posição angular do sol ao meio-dia, em relação ao plano do equador, tendo como base o norte positivo ($-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$). A declinação solar pode ser calculada em função e tais ângulos, pela equação (COOPER, 1969, *apud* DUFFIE & BECKMAN, 2006):

$$\delta = 23,45 \text{sen} \left[360 \left(\frac{284+n}{365} \right) \right] \quad (20)$$

Onde n é o número inteiro que representa o dia do ano (1° de janeiro corresponde a $n = 1$).

- **Declive (β):** Posição angular da superfície em questão em relação ao plano horizontal ($0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$) ($\beta > 90^\circ$ implica que a superfície está ou tem um componente direcionado “para o solo”).
- **Ângulo azimutal da superfície (γ):** Posição angular da projeção do vetor normal à superfície, sobre o plano horizontal, em relação ao sul (0°). A leste, seu valor é negativo, a oeste, positivo ($-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$).
- **Ângulo horário (ω):** Posição angular do sol a leste ou oeste do meridiano local, devida à rotação da Terra em torno de seu eixo a uma taxa de 15° por hora. Negativo pela manhã, e positivo à tarde.
- **Ângulo de incidência (θ):** Ângulo entre a radiação direta sobre a superfície e a normal da superfície.
- **Ângulo zenital (θ_z):** Ângulo entre a linha zenital (vertical) e a linha do Sol, isto é, ângulo de incidência da radiação direta em uma superfície horizontal.
- **Ângulo de altitude solar (α_s):** Ângulo entre a horizontal e a linha do Sol, isto, é, o complementar do ângulo zenital.
- **Ângulo azimutal do sol (γ_s):** Posição solar em relação ao sul, a partir da projeção da radiação direta sobre o plano horizontal.

A partir do conhecimento da posição geográfica (latitude φ), ângulo horário ω associado e dia do ano (daí a declinação solar δ), é possível determinar a posição do Sol para qualquer instante do dia, por meio das Equações (21) e (22) demonstradas por Duffie & Beckman (2006):

$$\text{sen}(\alpha_s) = \text{sen}(\delta)\text{sen}(\varphi) + \cos(\delta) \cos(\varphi) \cos(\omega) \quad (21)$$

$$\gamma = \text{ sinal de } \omega \cdot \left| \arccos \left[\frac{\cos(\theta_z)\text{sen}(\varphi) - \text{sen}(\delta)}{\text{sen}(\theta_z)\cos(\varphi)} \right] \right| \quad (22)$$

para $\omega < 0 \rightarrow \text{ sinal de } \omega = -1$;

para $\omega > 0 \rightarrow \text{ sinal de } \omega = +1$;

O ângulo de incidência da radiação solar pode ser calculado também a partir do conhecimento dos ângulos anteriores, pois segundo Duffie & Beckman (2006):

$$\cos(\theta) = \cos(\theta_z) \cos(\beta) + \text{sen}(\theta_z) \sin(\beta) \cos(a_r) \quad (23)$$

Onde a_r é o azimute relativo. Valor absoluto do menor ângulo formado entre γ e γ_s .

4.2. Mecânica dos fluidos

Nos tópicos seguintes, alguns temas de mecânica dos fluidos serão apresentados, com ênfase nos conceitos necessários para o dimensionamento de sistemas hidráulicos residenciais que será mostrado posteriormente.

4.2.1. Equação de Bernoulli

A equação de Bernoulli parte da consideração de um elemento diferencial de fluido que se desloca com velocidade V ao longo de uma linha de corrente, e em regime estacionário, cuja conservação da quantidade de momento linear (segunda Lei de Newton) fornece o balanço de forças (ÇENGEL, 2015):

$$\int \frac{dP}{\rho} + \int V dV + \int g dz = 0 \quad (24)$$

De acordo com Hibbeler (2015), parte-se da hipótese de *fluido perfeito* a partir deste ponto, isto é, tanto invíscido quanto incompressível. Dessa forma, assumindo que a massa específica ρ pode ser escrita em função da pressão P , a integração toma a forma:

$$\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz = \text{constante} \quad (25)$$

Tal equação é denominada equação de Bernoulli, onde z é uma altura medida a partir de um referencial horizontal arbitrário (HIBBELER, 2015). Em outras palavras, ela expressa que a soma das energias cinética, potencial e de escoamento do fluido ao longo da linha de corrente é uma constante para o regime estacionário. Uma vez que parte de uma hipótese demasiadamente restritiva, a equação de Bernoulli apresenta, em suma, as seguintes limitações de uso, segundo Çengel (2015):

- Escoamento estacionário;
- Escoamento com efeitos viscosos desprezíveis;
- Nenhum trabalho de eixo;
- Escoamento incompressível;
- Transferência de calor desprezível;
- Escoamento ao longo de uma linha de corrente.

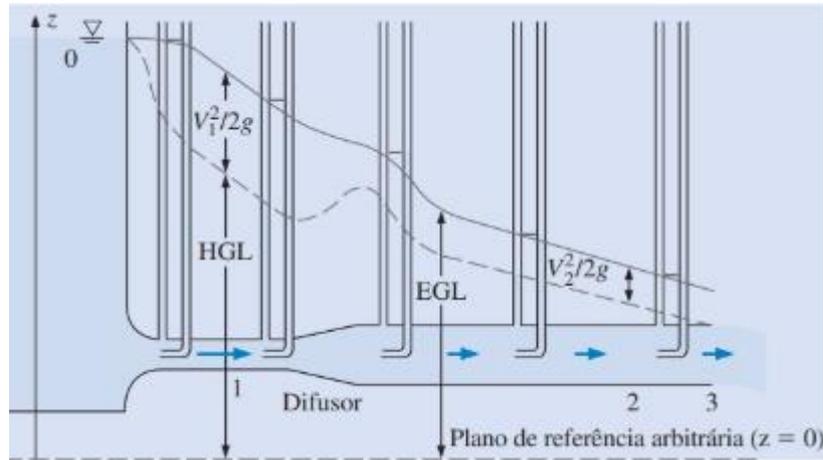
É comum representar as parcelas da equação de Bernoulli em termos de alturas:

$$\frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z = H = \text{constante} \quad (26)$$

Uma representação gráfica torna-se intuitiva a partir da Equação (26) (Figura 13). Os termos representam (ÇENGEL, 2015):

- *Carga de pressão* ($P/\rho g$): Altura de coluna d'água associada a uma pressão estática P ;
- *Carga de velocidade* ($V^2/2g$): Queda livre necessária para o fluido atingir uma velocidade V .
- *Carga de elevação* (z): Energia potencial a uma altura z .

Figura 13: Representação gráfica dos termos da equação de Bernoulli.



. Fonte: Çengel (2015).

4.2.2. Perda de carga em tubos

De acordo com Munson (2004), a representação funcional da queda de pressão em um tubo fechado, para um escoamento turbulento, assume a forma:

$$\Delta P = F(V, D, l, \varepsilon, \mu, \rho) \quad (27)$$

Onde: l é o comprimento do tubo, V é a velocidade média, D é o diâmetro, ε é a rugosidade, μ é a viscosidade dinâmica e ρ , a massa específica. Para a obtenção de uma generalização, o fator de atrito de Darcy-Weisbach é calculado por (ÇENGEL, 2015):

$$f = \frac{8\tau_w}{\rho V_{med}^2} \quad (28)$$

Onde τ_w é a tensão de cisalhamento na parede. Escoamentos laminares plenamente desenvolvidos, em geral, sofrem quedas de pressão independentes da rugosidade dos dutos, de forma que o fator de atrito para tubos de seção circular é calculado simplesmente por (MURSON, 2004):

$$f = \frac{64}{Re} \quad (29)$$

Dessa forma, o fator de atrito é utilizado como constante de proporcionalidade na equação de Darcy-Weisbach, válida para tubos horizontais e inclinados:

$$h_L = f \frac{l V^2}{D 2g} \quad (30)$$

A Equação (30) calcula a perda de pressão em um tubo, e conforme visto, o material do mesmo é relevante na determinação do fator de atrito. É comum o uso do diagrama de Moody (ver ANEXO A) para a avaliação do valor desse coeficiente, disposto graficamente para várias rugosidades relativas (ε/D). A rugosidade de alguns materiais típicos está mostrada na Tabela 2.

É comum utilizar-se, ainda, fórmulas empíricas para a determinação da perda de carga. Macintyre (1990) traz algumas dessas relações:

Fórmula de Fair-Whipple para aço galvanizado e ferro fundido:

$$Q = 27,1113 \cdot J^{0,632} \cdot D^{2,596} \quad (31)$$

Fórmula de Fair-Whipple para PVC e cobre de até 100 mm:

$$Q = 55,934 \cdot J^{0,571} \cdot D^{2,714} \quad (32)$$

Fórmula de Willian-Hazen para diversos materiais de 50 mm a 2400 mm:

$$Q = 0,278531.C.D^{2,63}.J^{0,51} \quad (33)$$

Nas Equações (31), (32) e (33), Q é a vazão (l/s), J é a perda de carga unitária (m.c.a./m) e D , o diâmetro (mm). C é uma constante adimensional e admite diversos valores entre 100 e 130 (MACINTYRE, 1990).

Tabela 2: Rugosidade equivalente para tubos novos.

Tubo	Rugosidade equivalente, ε (mm)
Aço rebitado	0,9 - 9,0
Concreto	0,3 - 3,0
Madeira aparelhada	0,18 - 0,9
Ferro fundido	0,26
Ferro galvanizado	0,15
Aço comercial ou extrudado	0,045
Tubo estirado	0,0015
Plástico, vidro	0,0 (liso)

Fonte: Moody (1944), Colebrook (1939), *apud* Murson (2004).

O fluido em escoamento pode, ainda, sofrer perdas de pressão acidentais ou localizadas, que ocorrem na passagem deste por válvulas e peças de conexão. Nesse sentido, para o uso direto da Equação (30), é comum determinar *um comprimento equivalente, ou virtual*, associado a tais peças (MACINTYRE, 1990). Assim:

$$l_{total} = l_{real} + l_{eq}. \quad (34)$$

A literatura traz tabelas com valores característicos de comprimento equivalente em peças hidráulicas (ver ANEXO C).

4.3. Aquecimento solar de água residencial

A energia solar possui aplicações diversas, que vão desde sistemas térmicos e fotovoltaicos a aplicações passivas, como iluminação em arquitetura (GUERRA, 2016). Neste trabalho, somente uma aplicação térmica será frisada: os coletores solares planos e sua aplicação para o aquecimento de água residencial.

De acordo com a NBR 15569 (2008), os sistemas convencionais de aquecimento solar de água funcionam pelo princípio do termossifão ou pela circulação forçada. Os detalhes sobre cada tipo serão mostrados a seguir.

4.3.1. Tipos de circuito

Os sistemas de aquecimento solar, em geral, são compostos por dois circuitos independentes, segundo a NBR 15569 (2008). O *circuito primário* abrange todas as tubulações envolvidas na circulação da água quente entre os coletores solares e o reservatório térmico. São comumente isolados (especialmente se compostos de materiais metálicos). O *circuito secundário*, por sua vez, é composto pelas tubulações de distribuição da água quente aos pontos de consumo. O projeto desses circuitos é regido especificamente pelas normas NBR 7198 (1992) – Projeto e execução de instalações prediais de água quente - e NBR 5626 (1998) – Instalação predial de água fria. Os circuitos primários comuns são detalhados nas seções 4.3.1.1 e 4.3.1.2.

4.3.1.1. Circuito termossifão

O circuito termossifão tem como força motriz o diferencial de densidade do fluido em virtude da temperatura em seu interior, ou seja, a convecção natural. Pode-se verificar na Figura 14 que o reservatório é posicionado em uma cota superior aos coletores planos, de forma que a água recém-aquecida desses ascenderá através da tubulação de inclinação α , atingindo a parte superior do reservatório. Essa dinâmica mantém as camadas superiores mais aquecidas, de forma a promover uma estratificação da temperatura no interior do tanque (DUFFIE & BECKMAN, 2006). A saída para os pontos de consumo também se localiza ligada às camadas mais elevadas, a fim de promover melhor aproveitamento térmico. Devido a essa mesma estratificação, tanto a saída para os coletores (recirculação) quanto a entrada de água fria se localizam na parte inferior do reservatório (DUFFIE & BECKMAN, 2006).

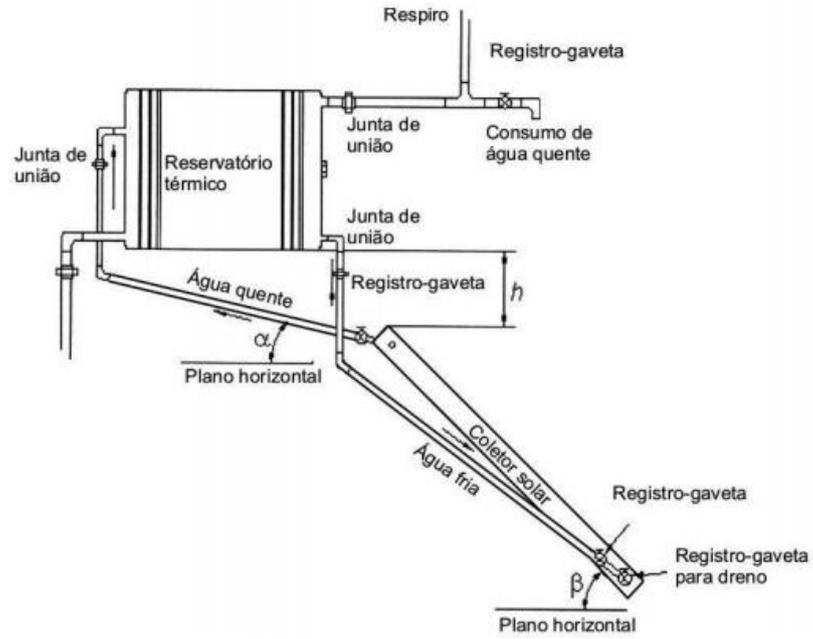
A NBR 15569 (2008) traz recomendações a respeito da geometria da estrutura, que devem ser adotadas a fim de vencer as perdas de carga características, como uma altura h (entre a extremidade superior dos coletores e o nível inferior do reservatório) mínima para evitar o fluxo reverso de água, ângulo de inclinação do coletor β e ângulo de inclinação da tubulação coletor-reservatório α – função das características informadas pelos fabricantes. Além disso, recomenda a minimização do uso de curvas de 90°, substituindo-as, quando possível, por curvas de 45°. O uso dos registros visíveis na Figura 14 é necessário, tanto para manutenção das linhas quanto para a extração da água dos coletores quando necessário (NBR 15569, 2008).

4.3.1.2. Circuito de circulação forçada

As características do espaço físico da instalação são importantes para a determinação do tipo de circuito. Nesse sentido, o sistema termossifão nem sempre pode ser utilizado, em particular, nos casos em que não é possível situar os coletores em um nível abaixo do reservatório térmico. Nesses casos, faz-se necessário o uso de uma bomba para a recirculação, cujo acionamento pode ser efetuado digitalmente (NBR 15569, 2008). A Figura 15 mostra os requisitos mínimos para um sistema convencional de circuito forçado utilizado em residências, cujo projeto e detalhamento adaptado ao contexto da CASA NORDESTE 1.0 é o objetivo deste trabalho.

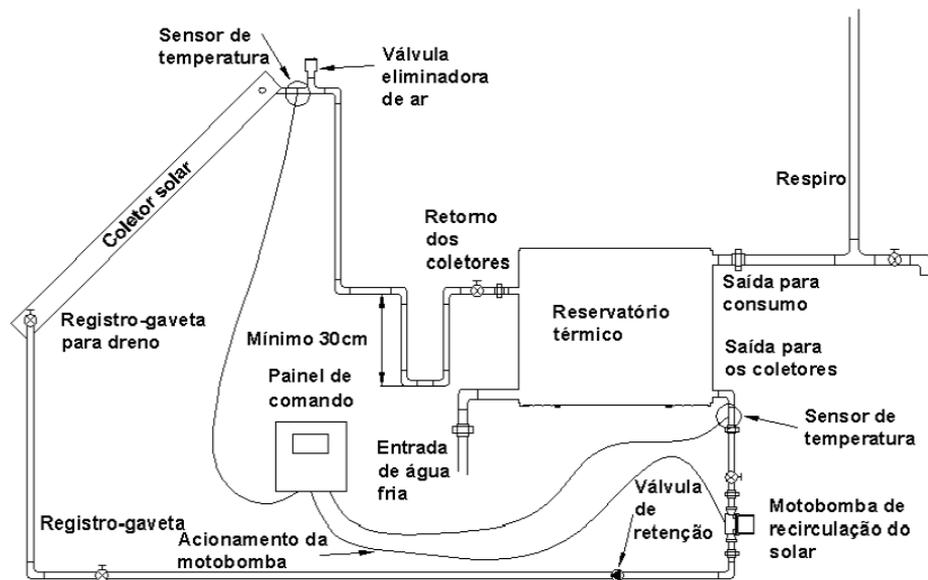
Observa-se que a bomba é instalada na saída do reservatório para os coletores, de forma que aspira as camadas mais frias da parte inferior daquele. Na saída dos coletores, deve-se instalar uma válvula ventosa, ou válvula de eliminação de ar, para que as bolhas acumuladas nas tubulações de água quente possam ser eliminadas. Além disso, há o emprego de um controlador diferencial, cuja função é comparar as temperaturas na saída do coletor para o reservatório com a temperatura da saída do segundo para o coletor. Caso essa diferença atinja um valor específico - configurado pelo usuário -, a bomba é desligada automaticamente, cessando assim o funcionamento do sistema até que o diferencial seja reestabelecido. Tais sistemas, portanto, possibilitam melhor controle de superaquecimento do que os circuitos por termossifão (NBR 15569, 2008).

Figura 14: Esquema do circuito termossifão.



Fonte: NBR 15569 (2008).

Figura 15: Esquema do circuito em circulação forçada.



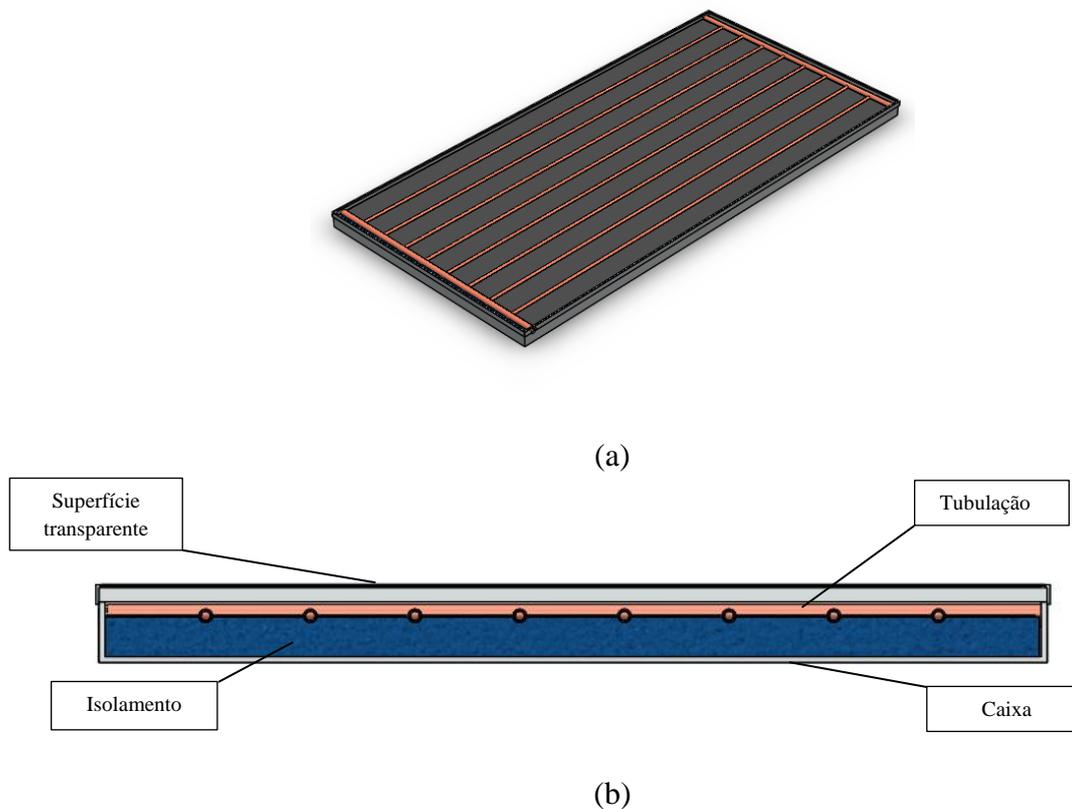
Fonte: NBR 15569 (2008).

4.3.2. Coletores solares planos

Os coletores planos funcionam com radiação solar direta ou difusa. Proporcionam calor de baixas temperaturas (geralmente abaixo de 70°C), e são utilizados não apenas para a presente aplicação, mas para o aquecimento de ambientes e piscinas (ROSA, 2015).

Esses sistemas podem aquecer a água diretamente ou utilizar um fluido intermediário para a transferência de calor. A Figura 16-a verifica-se uma superfície montada entre os tubos, geralmente coberta por esmaltes especiais, para absorção da radiação e condução do calor aos tubos. A tampa é coberta de vidro, temperado ou não. (ROSA, 2015). A Figura 16-b, por sua vez, mostra a vista de corte de um coletor plano comum, os tubos são confeccionados em cobre ou alumínio – sendo o segundo mais susceptível à corrosão pela água, embora mais barato – e envoltos por uma camada de isolamento em espuma de poliuretano na parte inferior.

Figura 16: (a) Coletor solar plano típico; (b) Corte frontal.



Fonte: Próprio autor.

De acordo com Krenzinger *et al.* (2016), o ganho de energia térmica em coletores solares planos pode ser calculado pela Equação (35), cujos termos estão associados ao ganho solar e à perda térmica decorrente da diferença de temperaturas entre o ambiente e o coletor.

$$Q_u = A_c [G_T(\tau\alpha)_N - U_L(T_{pm} - T_a)] \quad (35)$$

Onde: Q_u é a energia útil transferida para o fluido (W), A_c é a área coletora de radiação solar (m^2), G_T é a irradiância solar total sobre o vidro do coletor (W/m^2), U_L é o coeficiente global de transferência de calor ($W/m^2.K$), T_{pm} a temperatura média da placa absorvedora do coletor e T_a a temperatura ambiente (ambas em $^{\circ}C$). No entanto, a temperatura média da placa absorvedora é, em geral, difícil de ser quantificada, pois depende das variáveis de projeto do coletor. Para corrigir tal problema, utiliza-se um fator de remoção de calor F_R obtido experimentalmente, e definido como a razão entre a energia útil real extraída pelo coletor e a energia que seria absorvida caso toda a superfície absorvedora estivesse à temperatura de entrada da água (T_{ent}) (KREZNINGER, 2016). Ou seja:

$$F_R = \frac{Q_u}{A_c [G_T(\tau\alpha)_N - U_L(T_{ent} - T_a)]} \quad (36)$$

E, dessa forma, a estimativa do ganho de energia térmica pode ser efetuada sem o uso da temperatura média:

$$Q_u = A_c F_R [G_T(\tau\alpha)_N - U_L(T_{ent} - T_a)] \quad (37)$$

Como se vê, o fator de remoção de calor depende do termo $(\tau\alpha)_N$, denominado produto eficaz transmitância-absortância (relativo ao vidro e ao absorvedor). Seu valor para vidros comuns pode ser aproximado para $(\tau\alpha)_N = 1,02$. Além disso, um parâmetro S é

definido como sendo a irradiância solar absorvida pela placa do coletor (KRENZINGER, 2016):

$$S = G_T(\tau\alpha)_N \quad (38)$$

Naturalmente, um parâmetro importante do projeto de coletores planos é a sua eficiência, dada pela equação:

$$\eta_e = \frac{Q_u}{G_{TA_C}} = \frac{\dot{m}c_p\Delta T}{G_{TA_C}} = F_R(\tau\alpha)_N - F_R U_L \frac{(T_{ent}-T_a)}{G_T} \quad (39)$$

De acordo com o INMETRO (2005), o termo $\frac{(T_{ent}-T_a)}{G_T}$ determina a eficiência térmica instantânea do coletor solar. Este termo é tido como $0,02 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}/\text{m}^2$ no cálculo da eficiência média de coletores usados para banho, e $0,005^\circ\text{C}/\text{W}/\text{m}^2$ para coletores destinados ao aquecimento de piscinas. Essa escolha é baseada na monitoração das condições operacionais reais observadas.

4.3.3. Reservatório térmico

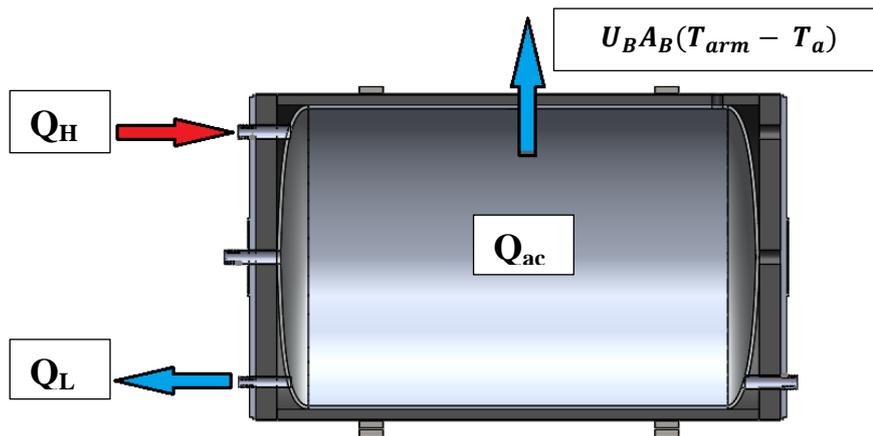
Os reservatórios térmicos (ou *boilers*) são geralmente os primeiros componentes dimensionados em sistemas de água quente residencial, uma vez que o seu volume está diretamente associado ao consumo diário dos usuários. A relação não é necessariamente direta, uma vez que, para maior segurança, recomenda-se superdimensionamento para aplicações residenciais, e uso do volume mínimo necessário em aplicações maiores (hospitais, hotéis etc.) (KLUPPEL, 1985).

Por simplificação, é comum assumir que esses reservatórios não possuem estratificação, isto é, a temperatura - e, naturalmente, as propriedades termodinâmicas - da água são constantes em todo o volume. Tal simplificação permite expressar os ganhos e perdas de energia térmica em uma equação resultante do balanço de energia, conforme se verifica na Figura 17 (DUFFIE & BECKMAN, 2006):

$$(\dot{m}c_p)_{\text{água}} \frac{dT_{\text{arm}}}{dt} = \dot{Q}_H - \dot{Q}_L - U_B A_B (T_{\text{arm}} - T_a) \quad (40)$$

Onde: T_{arm} é a temperatura de armazenamento ($^{\circ}\text{C}$), \dot{Q}_H , a potência derivada dos coletores solares (W), \dot{Q}_L , a potência extraída pelo consumo (W), U_B , o coeficiente global de transferência de calor associado à parede do boiler ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$), A_B , a área de transferência e calor com o meio (m^2) e T_a , a temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$). A Figura 18 mostra ilustra as parcelas da Equação (40), na qual o termo $\dot{Q}_{ac} = (\dot{m}c_p)_{\text{água}} \frac{dT_{\text{arm}}}{dt}$ representa a taxa de energia térmica armazenada no boiler (W).

Figura 17: Balanço energético em um reservatório térmico.



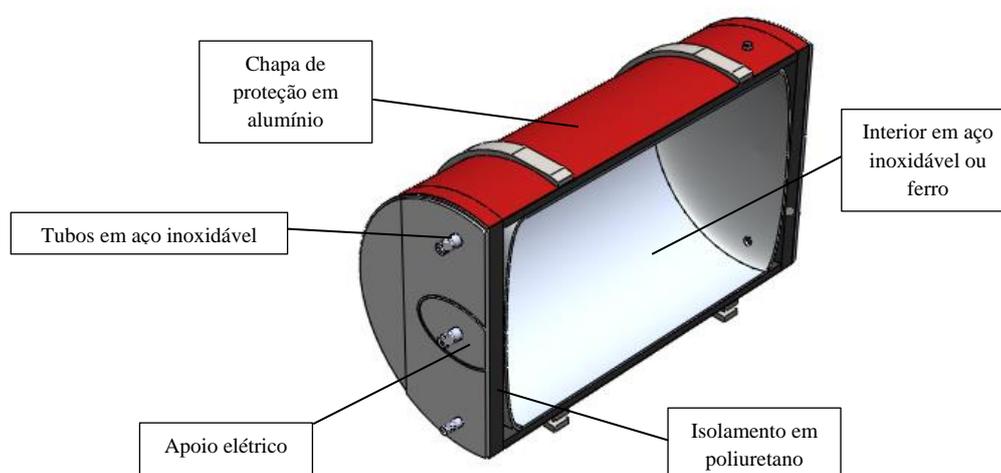
Fonte: Próprio autor.

Duffie & Beckman (2006) propõem que a Equação (40) seja utilizada na forma discreta com porções de tempo Δt , tal que se torne possível calcular a temperatura final de armazenamento pontualmente:

$$T_{\text{arm}}^+ = T_{\text{arm}} + \frac{\Delta t}{(\dot{m}c_p)_{\text{água}}} [\dot{Q}_H - \dot{Q}_L - U_B A_B (T_{\text{arm}} - T_a)] \quad (41)$$

A maioria dos reservatórios possui uma resistência elétrica para compensar horários energeticamente deficientes. O material de construção interna deve possuir grande resistência à corrosão. Para baixas pressões de trabalho, chapas de aço inoxidável são de uso comum e, desde que sejam tomadas as devidas precauções, a vida útil desses equipamentos é quase ilimitada – precauções estas que envolvem o uso de ânodos de sacrifício em magnésio (KLUPPEL, 1985). Além disso, devem possuir bons isolamentos a fim de reduzir o valor do coeficiente U_B na Equação (40), e conseqüentemente uma parcela de perda de energia. Para este fim, o a espuma de poliuretano é recomendada, pois ainda traz consigo a vantagem de conferir ao *boiler* maior rigidez estrutural (KLUPPEL, 1985). A Figura 18 mostra a composição típica de um *boiler*, composto basicamente por um tanque de aço inoxidável ou ferro, recoberto pelo isolamento em poliuretano. Uma fina chapa de aço protege o isolamento. O apoio elétrico é comumente removível, composto por uma resistência elétrica acoplada à lateral (KLUPPEL, 1985).

Figura 18: Estrutura interna típica de um *boiler*.



Fonte: Próprio autor.

4.4. Metodologias de análise de investimentos

Análise de investimentos refere-se a um procedimento que visa avaliar a viabilidade financeira de um determinado investimento, dentro de uma série de condições e critérios.

Pode ser também denominado *orçamento de capital*, uma vez que trabalha com investimentos em longo prazo (BROM, 2007).

Existem diversos métodos para avaliação de viabilidade de investimentos, e três deles serão expostos a seguir.

4.4.1. Payback simples

O método visa calcular o tempo necessário para que o investidor recupere o capital investido (BROM, 2007). Ou, matematicamente:

$$t = \frac{I_0}{L_c} \quad (42)$$

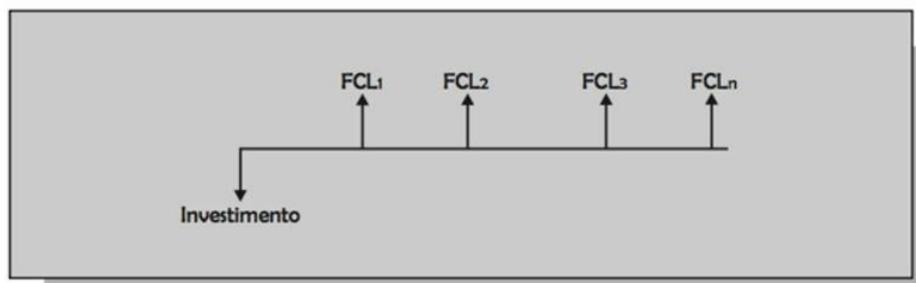
Onde I_0 é o investimento inicial e L_c o lucro líquido do investimento em reais por unidade de tempo.

4.4.2. Valor presente líquido (VPL)

Segundo Brom (2007), a pergunta central a ser respondida por este método é: qual seria o retorno financeiro (ganho) de um investimento para além do retorno mínimo esperado?

O método visa avaliar todo o fluxo de caixa ao longo do tempo do investimento (Figura 20), trazendo à tona o conceito de *taxa de atratividade*. Essa taxa permite trazer o fluxo de caixa para um valor presente.

Figura 19: Fluxos de caixa ao longo do tempo.



Fonte: Brom (2007).

Matematicamente:

$$VPL = -I_0 + \frac{FLC_1}{(1+i)} + \frac{FLC_2}{(1+i)^2} + \frac{FLC_3}{(1+i)^3} + \dots + \frac{FLC_n}{(1+i)^n} \quad (43)$$

Onde FLC_n é o fluxo líquido de caixa no período n , e i a taxa mínima de atratividade ou taxa mínima de desconto.

4.4.3. TIR (Taxa interna de retorno)

O método propõe, por sua vez, responder a questão: qual a taxa de retorno oferecida por um dado investimento? A resposta é obtida em forma de uma taxa média de retorno por período de tempo, e é um parâmetro de rentabilidade do investimento realizado (BROM, 2007).

Matematicamente, o método iguala o valor VPL à zero, de forma a induzir o cálculo da taxa interna (BROM, 2007):

$$0 = -I_0 + \frac{FLC_1}{(1+TIR)} + \frac{FLC_2}{(1+TIR)^2} + \frac{FLC_3}{(1+TIR)^3} + \dots + \frac{FLC_n}{(1+TIR)^n} \quad (44)$$

Essa taxa deve, então, ser comparada com a taxa mínima de atratividade, a fim de obter uma avaliação qualitativa do investimento:

- Se $TIR > i$, se aceita o investimento;
- Se $TIR = i$, VPL será nulo, logo, se mantem indiferente;
- Se $TIR < 0$, se rejeita o investimento.

5. METODOLOGIA

De acordo com a NBR 15569 (2008), projetos para a instalação de sistemas de aquecimento solar devem contemplar os seguintes requisitos:

- a) Premissas de cálculo;
- b) Dimensionamento;
- c) Fração solar;
- d) Memorial descritivo;
- e) Volume de armazenamento;
- f) Pressão de trabalho;
- g) Fontes de abastecimento de água;
- h) Área coletora;
- i) Ângulos de orientação e de inclinação dos coletores solares;
- j) Estudo de sombreamento;
- k) Previsão de dispositivos de segurança;
- l) Massa dos principais componentes;
- m) Considerações a respeito de propriedades físico-químicas da água;
- n) Localização;
- o) Indicação do norte geográfico;
- p) Plantas e isométricas do sistema, com ligações hidráulicas;
- q) Detalhes sobre operação e controle de sistemas elétricos (quando aplicável);
- r) Especificação dos coletores solares e reservatório térmico;
- s) Tipos e localização dos suportes para fixação dos equipamentos (quando aplicável);
- t) Especificação de sistema de aquecimento auxiliar.

O método para a obtenção desses dados será exposto nesta seção – não necessariamente na sequência da lista. A princípio, os dados de entrada disponíveis, ligados à caracterização da irradiação solar média no local da instalação e levantamento da demanda de água quente foram levantados. Em seguida, o equacionamento proposto pela referida Norma foi utilizado, para determinação da área coletora e volume de armazenamento. A análise do espaço físico da CASA NORDESTE 1.0 foi realizada, a fim de alocar todos os componentes do sistema, e por fim, foi realizada uma análise financeira.

5.1. Dados climáticos em Santiago de Cali

Projetos associados ao aproveitamento direto da energia solar tem seu desempenho atrelado diretamente às condições climáticas no local de instalação. Nesse sentido, os dados climáticos da cidade de Santiago de Cali foram necessários como entrada nas equações da Norma NBR 15569 (2008). A base de dados utilizada para este fim foi o arquivo EPW (*EnergyPlus Weather Data*) da cidade de Cali, encontrado à venda no site da White Box Technologies™.

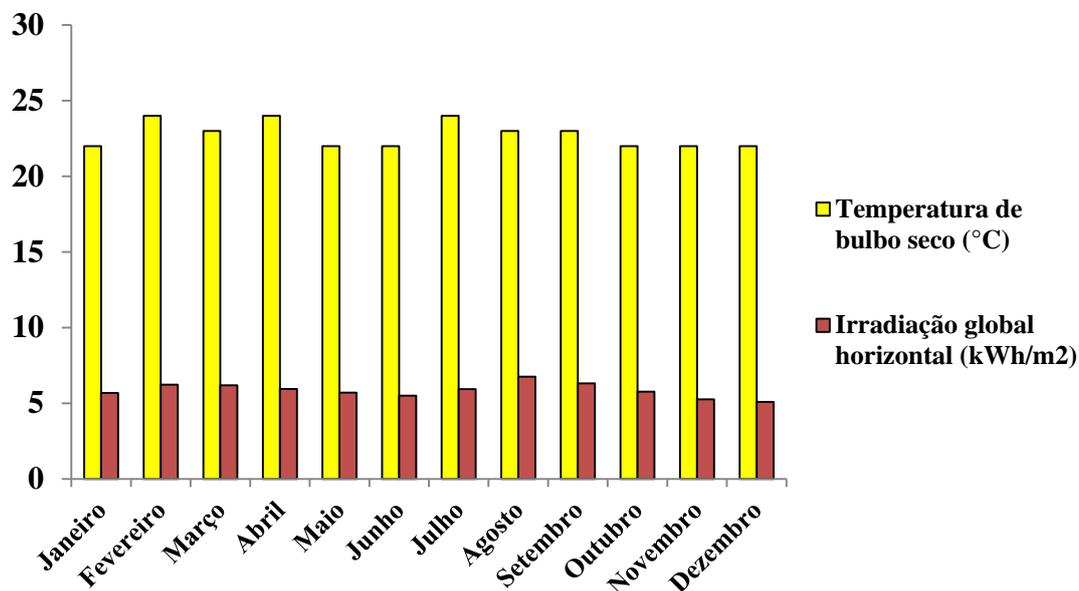
Arquivos EPW são compostos de dados meteorológicos obtidos por mais de mil estações meteorológicas, ao longo de todas às 8760 horas do ano. São comumente utilizados como base de dados para softwares de análise energética em construções, como o EnergyPlus™.

Para a organização e visualização didática do arquivo, o software gratuito desenvolvido pela Energy Design Tools, o Climate Consultant 6.0, foi utilizado. Trata-se de uma ferramenta de fácil utilização, cuja função é exibir graficamente o arquivo climático em várias seções de interesse dos usuários – inclusive simulações simples para estudos de conforto térmico em edificações genéricas, e o efeito de várias estratégias disponíveis para este fim (sombreamento, ventilação passiva etc.).

Os dados de temperatura média de bulbo seco estão mostrados na Figura 20 e no gráfico da Tabela 3. Para o propósito deste trabalho, foram tomados os valores médios entre as médias mensais informadas. Procurou-se, dessa forma, uma aproximação razoável para adaptar o funcionamento do sistema ao longo de todo o ano. A média obtida para a temperatura de bulbo seco foi de 22,75 °C. Já para a irradiação global horizontal, 5,871 kWh/m². Esses dados foram utilizados como entrada, conforme será mostrado no Capítulo 6.

A cidade de Santiago de Cali está localizada no Valle del Cauca, Colômbia, a 3,55° Norte e 76,38° oeste. Sua elevação média é de 969 m. As Figuras 21 e 22 mostram a perspectiva aérea da região.

Figura 20: Médias mensais: temperatura de bulbo seco e irradiação global horizontal.



Fonte: IWEC2.

Tabela 3: Médias mensais de temperatura e irradiação global horizontal.

Mês	Temperatura média de bulbo seco (°C)	Irradiação global média mensal (kWh/m ²)
Janeiro	22	5,690
Fevereiro	24	6,238
Março	23	6,196
Abril	24	5,951
Maió	22	5,708
Junho	22	5,513
Julho	24	5,937
Agosto	23	6,769
Setembro	23	6,321
Outubro	22	5,768
Novembro	22	5,263
Dezembro	22	5,099
MÉDIA	22,75	5,871

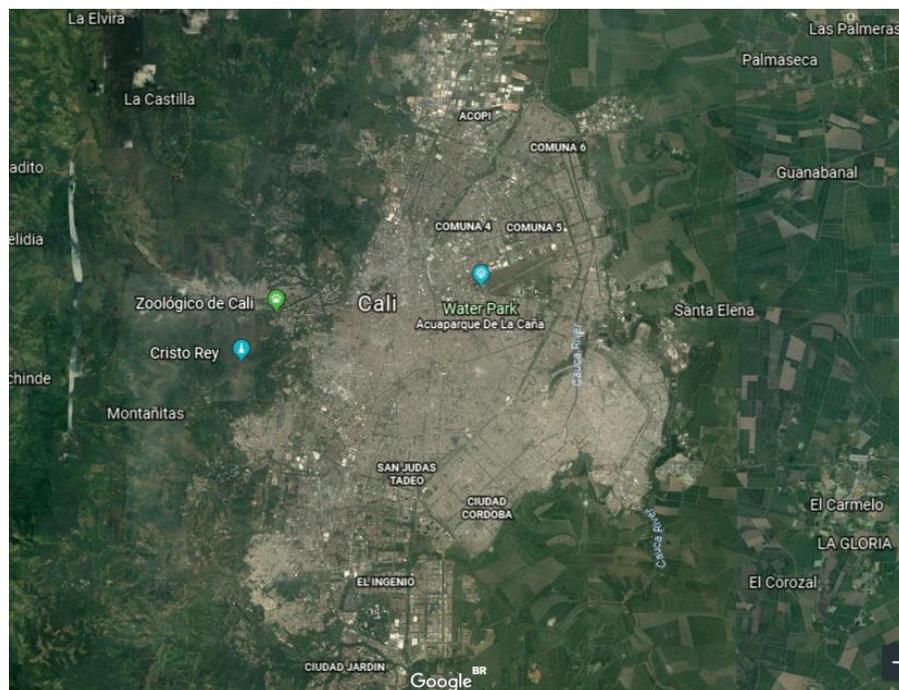
Fonte: IWEC2.

Figura 21: Localização de Cali no território colombiano.



Fonte: Google Earth. Disponível em: <<https://earth.google.com>>. Acesso em: 25 de set. de 2018.

Figura 22: Vista aérea da cidade de Cali.



. Fonte: Google Earth. Disponível em: <<https://earth.google.com>>. Acesso em: 25 de set. de 2018.

5.2.Cálculo da área coletora e volume de armazenamento

A Norma NBR 15569 (2008) fornece um direcionamento prático para os cálculos envolvendo o dimensionamento do sistema de aquecimento. As etapas para o dimensionamento do sistema de aquecimento são as seguintes:

- 1) Caracterização da demanda (volume de consumo) para atendimento dos vários pontos de utilização, levando-se em consideração a vazão das peças de utilização, tempo de utilização e frequência de uso;
- 2) Calcular o volume do sistema de armazenamento (*boiler*);
- 3) Calcular a demanda de energia útil;
- 4) Calcular a área coletora.

Cada um dos passos e seus respectivos resultados serão detalhados em seguida.

5.2.1. Caracterização da demanda

A caracterização da demanda de água quente utilizou a tabela de recomendações da NBR 15569 (2008) (Tabela 4), juntamente com a seguinte equação:

$$V_{consumo} = \sum(Q_{pu} \times T_u \times f) \quad (45)$$

Onde Q_{pu} é a vazão da peça, T_u o tempo médio de utilização e f o número de usos. Aqui, os valores mínimos para a quantidade de utilizações diárias foram adotados, segundo as razões:

- A água será armazenada a uma temperatura de 45°C, o que inviabiliza o seu consumo direto. O chuveiro, o tanque e a pia da cozinha farão uso de misturadores, o que permite ao usuário regular manualmente a temperatura de saída da mistura de água fria mais água quente. A máquina de lavar, por sua vez, utilizará a água em sua temperatura máxima, sem mistura.
- A competição Solar Decathlon estabelece que o consumo máximo permitido dentro da premissa de consumo consciente de água potável é de 1550 l durante toda a semana de provas, sendo esse consumo monitorado pelo júri. Nesse caso, consumir todo o estoque de água quente armazenado diariamente ocasionaria um consumo bem superior ao estipulado.

Tabela 4: Demanda de água quente para 3 habitantes.

Peças de utilização		Mín	Máx	Valor real	
Chuveiro	Q_{pu}	Vazão da peça de utilização (m^3/s)	0,00005	0,00025	0,00013
	T_u	Tempo médio de utilização da peça (s)	600	-	-
	f	Número total de utilizações por dia	3	6	-
Pia de cozinha	Q_{pu}	Vazão da peça de utilização (m^3/s)	0,00004	0,00012	-
	T_u	Tempo médio de utilização da peça (s)	180	360	-
	f	Número total de utilizações por dia	3	6	-
Pia do banheiro	Q_{pu}	Vazão da peça de utilização (m^3/s)	0,00005	0,00008	0,000065
	T_u	Tempo médio de utilização da peça (s)	120	-	120
	f	Número total de utilizações por dia	3	6	4,5
Máquina de lavar	-	Volume de água/ciclo (m^3)	0,09	0,2	0,136
	-				
	f	Número total de utilizações por dia	0,143	-	-

Fonte: Próprio autor.

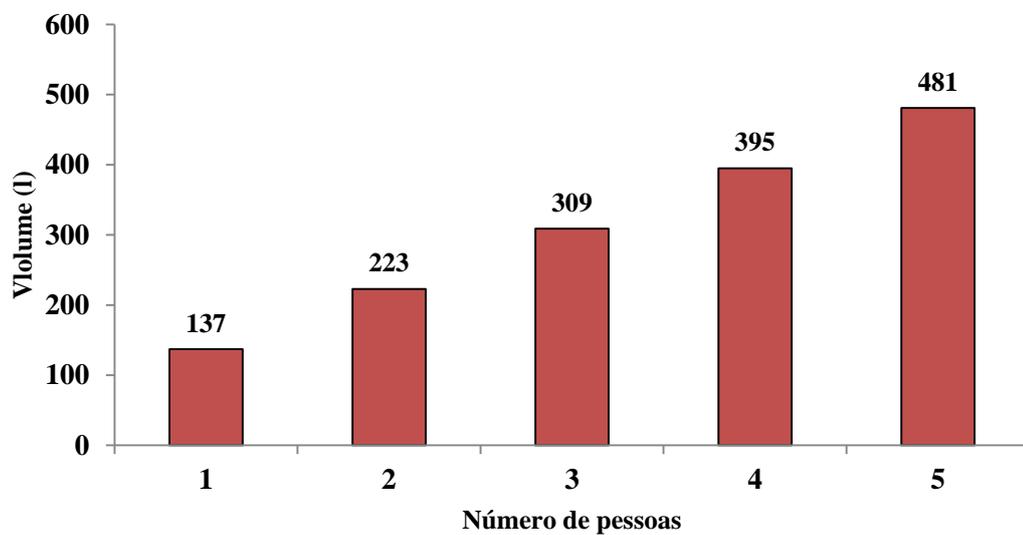
Algumas observações adicionais são necessárias:

- A tabela mostra apenas os dados para as peças a serem utilizadas na CASA NORDESTE 1.0 (para a versão completa, ver ANEXO B).
- As vazões são comumente baseadas em dados gerais, o que não necessariamente proporciona uma caracterização precisa para componentes específicos, mas são úteis e suficientes para uma aproximação. Os valores reais são baseados na escolha de modelos comerciais de chuveiro e máquina de lavar.
- Para as torneiras da cozinha e do banheiro, não é comum os fabricantes especificarem a vazão precisa e, portanto, optou-se pelo uso da recomendação normatizada.
- O volume de água quente utilizado na máquina de lavar foi estipulado com base em um modelo de 11 kg, cujo ciclo consome 136 l – para esse caso, o valor máximo foi utilizado. Nesse sentido, ao invés da vazão, foi quantificado um valor médio diário, assumindo uma lavagem semanal (1/7 dia). Esse valor foi multiplicado pelo volume consumido em uma lavagem para a obtenção de um volume final. Naturalmente, tal escolha gera um pico de consumo em um

dia específico da semana (34 % do total armazenado), o que induz a necessidade de racionamento nos dias de lavagem.

Por último, a CASA NORDESTE 1.0 é projetada para até 5 habitantes, devido ao seu caráter evolutivo. Dessa forma, a demanda varia dentro desse limite, e é apresentada na Figura 23.

Figura 23: Demanda média diária de água quente para 1-5 habitantes.



Fonte: Próprio autor.

5.2.2. Cálculo do volume de armazenamento

Em função da demanda calculada, a norma propõe que se calcule o volume de armazenamento adequado, que é função das temperaturas ambiente e de armazenamento estipuladas pelas condições de projeto - Equação (46).

$$V_{armaz} = \frac{V_{consumo} \times (T_{consumo} - T_{ambiente})}{(T_{armaz} - T_{ambiente})} \quad (46)$$

A competição do Solar Decathlon estabelece que o sistema de aquecimento de água deve ser capaz de fornecer água quente dentro do intervalo 37- 43 °C. Nesse sentido, a temperatura admitida para o ponto de consumo ($T_{consumo}$) foi de 40 °C.

O software Microsoft Excel foi utilizado para plotar os volumes de armazenamento necessários para número variável de habitantes, mostrados mais adiante no Capítulo 6. Além disso, um estudo acerca das possibilidades de volume para armazenamento em função da temperatura da água foi desenvolvido com o mesmo software.

5.2.3. Cálculo da energia útil

O cálculo da parcela de energia útil é traduzido como a quantidade de energia, em kWh, necessária para aquecer o volume de armazenamento calculado pela Equação (46). A NBR 15569 (2008) recomenda que:

$$E_{\text{útil}} = \frac{V_{\text{armaz}} \times \rho \times c_p \times (T_{\text{armaz}} - T_{\text{ambiente}})}{3600} \quad (47)$$

Onde ρ é a massa específica da água (kg/m^3) c_p , o seu calor específico (kJ/kg.K). Novamente, o Excel foi utilizado para plotar o valor da energia útil, mostrado no Capítulo 6.

5.2.4. Cálculo da área coletora

A área coletora necessária é função do posicionamento do coletor em relação ao sol, e a NBR 15569 (2008) recomenda um conjunto de equações que faz uso de diversos parâmetros mostrados no Capítulo 4. Com uso do Excel™, os parâmetros foram inseridos na ordem que se segue.

Inicialmente, a quantificação das perdas foi assumida pela relação simplificada – porém recomendada para usos gerais - a seguir:

$$E_{\text{perda}} = 0,15E_{\text{útil}} \quad (48)$$

A produção média diária de energia específica (*PMDEE*) foi calculada em função dos fatores de projeto do coletor solar:

$$PMDEE = 4,901[Fr(\tau\alpha)_N - 0,0249FrU_L] \quad (49)$$

Onde $Fr(\tau\alpha)_N$ e FrU_L são parâmetros de projeto dos coletores, usualmente informados pelo fabricante para os diferentes modelos.

O fato de a radiação solar direta variar seu ângulo de incidência sobre o coletor exigiu o cálculo de um fator de correção:

$$FC_{instal} = \frac{1}{1 - [1,2 \times 10^{-4} \times (\beta - \beta_{ótimo})^2 + 3,5 \times 10^{-5} \times \gamma^2]} \quad (50)$$

Na Equação (50), β é o ângulo do coletor em relação ao plano horizontal em graus, $\beta_{ótimo}$ é o valor recomendado para a inclinação – recomenda-se que $\beta_{ótimo} = \text{Latitude local } (\varphi) + 10^\circ$ - e γ é o azimute da superfície do coletor em graus.

De posse dos valores calculados pelas Equações (47), (48), (49) e (50), a área coletora foi, então, estimada:

$$A_{coletora} = \frac{(E_{útil} + E_{perda}) \times FC_{instal} \times 4,901}{PMDEE \times I_g} \quad (51)$$

O valor utilizado para I_g foi a média dos 12 valores das radiações globais diárias médias para os 12 meses do ano (ver seção 5.1).

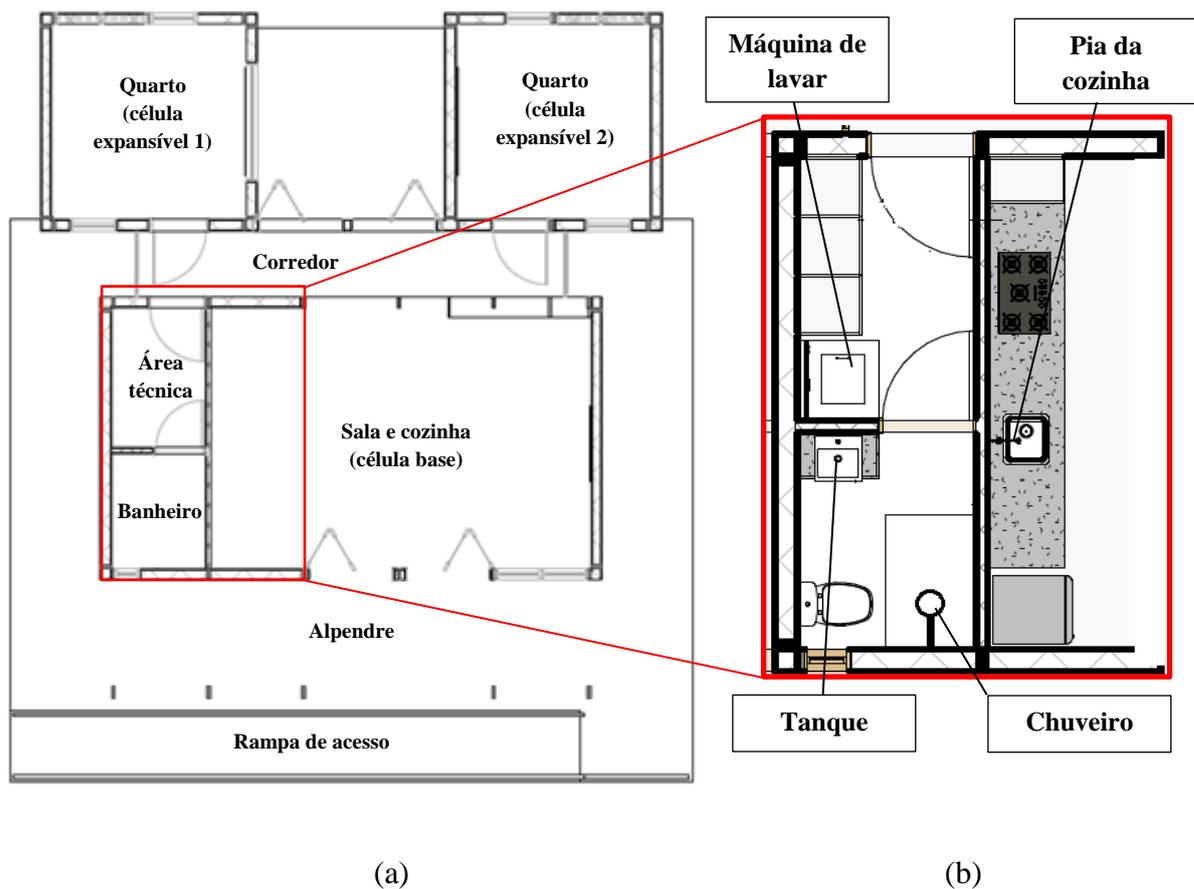
O valor da área coletora foi então comparado com a área nominal do coletor comercial da empresa Heliotek™, cujas características serão mostradas no Capítulo 6. Foi estudada

ainda a flexibilidade da área escolhida em função do ângulo azimutal da superfície coletora, alocada sobre o telhado.

5.3. Alocação do sistema

O projeto CASA NORDESTE 1.0 propõe um design arquitetônico cuja característica central é a capacidade de expansão e contração. Tal dinâmica é possibilitada por dois mecanismos: o acréscimo de novas células e a extensão lateral da célula principal. (Figura 24) Em síntese, a observação espaço físico contemplou os seguintes aspectos:

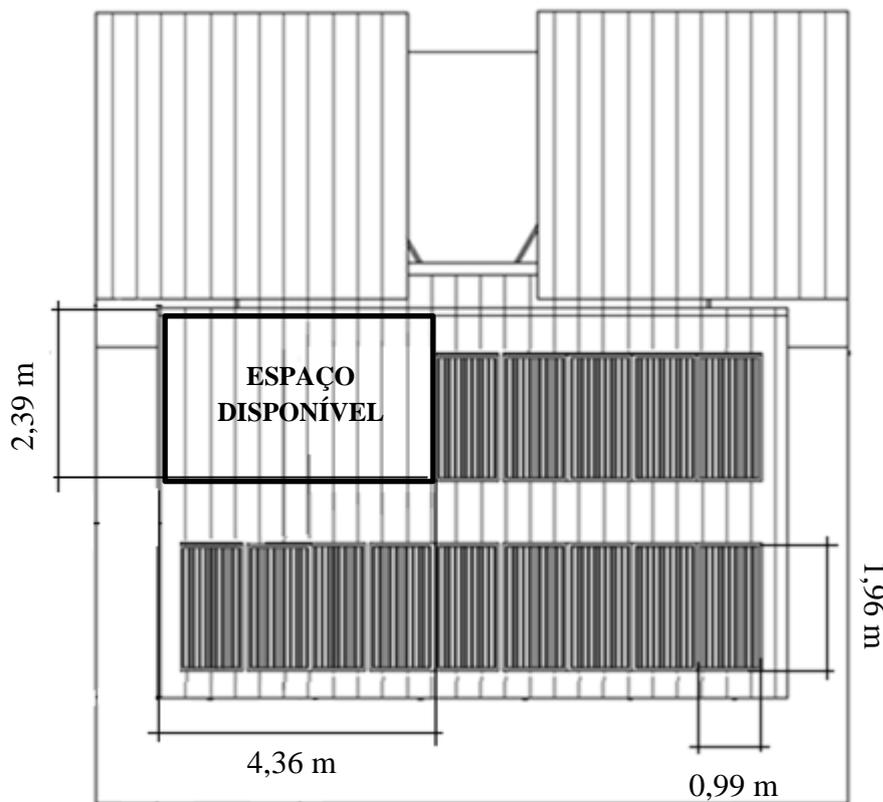
Figura 24: (a) Planta baixa da Casa Nordeste 1.0; (b) Detalhe dos pontos de consumo.



Fonte: Próprio autor.

- A área técnica, o banheiro e a cozinha compõem a área molhada da casa. Isto implica que todos os equipamentos de abastecimento e hidros sanitários estão posicionados nesses ambientes. Nesse sentido, os 4 pontos de consumo de água quente estão representados no detalhe (Figura 24-b). Por consequência, reservatório térmico deve ser posicionado preferencialmente nesta área.
- O telhado do módulo principal possui dimensões de 5,98 x 9,60 m, totalizando uma área de 57,5 m². Ressalta-se que os coletores solares devem dividir espaço com 14 painéis fotovoltaicos – equipamento obrigatório para a CASA NORDESTE 1.0 por especificação do Solar Decathlon (Figura 25). O espaço bruto que este conjunto ocupa é de 27,16 m², entretanto, são reservados os espaços adjacentes para manutenção dos mesmos, o que conduz a uma área de uso de aproximadamente 44,69 m² para painéis fotovoltaicos. Em função de tal restrição, uma área bruta de aproximadamente 12,82 m² é reservada aos coletores.

Figura 25: Vista superior do telhado da CASA NORDESTE 1.0.



Fonte: Próprio autor.

5.4. Dimensionamento das tubulações

Nesta seção, serão detalhadas as equações e valores de referência utilizados para o dimensionamento das tubulações entre os *boilers* e os pontos de consumo, bem como o material adotado. Segundo a NBR 15569 (2008), o dimensionamento de tubulações de água quente pode ser feito a partir da metodologia tradicional aplicável ao dimensionamento de instalações prediais de água fria (NBR 5626, 1998). A segunda norma citada compila algumas equações úteis para tal procedimento. Ela condensa diversos tópicos de mecânica dos fluidos (seção 4.2) em uma planilha padronizada, que contempla a seguinte metodologia efetuada para cada trecho do sistema hidráulico:

5.4.1. Seleção do material

Existem diversas opções para tubulações de água quente no mercado. A escolha foi realizada mediante os seguintes critérios:

- Facilidade de manuseio e instalação;
- Baixas perdas de calor por unidade de comprimento;
- Custo;

De acordo com a Tigre™ (2011), tubulações de CPVC da linha AQUATHERM™ são projetados para suportar pressões de 60 m.c.a. quando aquecidos a 80°C, e pressões de até 240 m.c.a. a temperatura de 20°C – em suma, são projetados visando grandes elevações em instalações prediais. Tomando esse valor como referência, a resistência mecânica das tubulações não foi utilizada como critério principal, devido ao espaço da instalação - que não exige a utilização de uma grande quantidade de vãos - e a utilização a baixas pressões, em geral, muito abaixo do limite suportado pelos materiais comerciais.

5.4.2. Pesos dos equipamentos

Macintyre (1990) recomenda a utilização de pesos padronizados. Seus valores estão expostos na Tabela 5, e são adimensionais.

Tabela 5: Pesos das peças de utilizações comuns

Peça de utilização	Peso
Banheira	1,0
Bidê	0,1
Chuveiro	0,5
Lavatório	0,5
Pia da cozinha	0,7
Pia de despejo	1,0
Lavadora de roupa	1,0

. Fonte: Adaptado de Macintyre (1990).

5.4.3. Vazão estimada

Ainda de acordo com Macintyre (1990), uma aproximação razoável para a vazão em um determinado trecho envolve os pesos da Tabela 5, pela equação:

$$Q = C\sqrt{\sum P} \quad (52)$$

Onde C corresponde ao coeficiente de descarga (l/s), e usualmente assume o valor 0,3 (MACINTYRE, 1990).

5.4.4. Diâmetro nominal estimado

Com base nas vazões calculadas, uma equação simples para a estimativa cálculo do diâmetro é:

$$D' = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v}} \quad (53)$$

Onde v é a velocidade de escoamento, que inicialmente foi assumida como 2 m/s, como base na NBR 5626 (1998), na qual v deve ser inferior a 3 m/s para instalações hidráulicas prediais, a fim de se reduzir as perdas de carga. Os valores encontrados para D' foram aproximados dos valores comerciais, expostos na Tabela 6.

Tabela 6: Velocidades e vazões máximas para água quente.

Diâmetro		Vel. Max.	Vazão max.
(mm)	(pol)	(m/s)	(L/s)
15	1/2	1,60	0,20
20	3/4	1,95	0,55
25	1	2,25	1,15
32	1 1/4	2,50	2,00
40	1 1/2	2,75	3,10
50	2	3,15	6,40
65	2 1/2	3,55	11,20
80	3	3,85	17,60
100	4	4,00	32,50

Fonte: Macintyre (1990).

5.4.5. Velocidade de escoamento

A partir do diâmetro comercial aproximado, a velocidade real foi estimada, pelo isolamento de v na Equação (53). Os valores obtidos foram comparados com as velocidades máximas estipuladas na Tabela 6.

5.4.6. Perda de carga unitária

A perda de carga por unidade de comprimento pode ser calculada por equações empíricas, conforme mostrado na seção 4.2. A NBR 5626 traz duas equações empíricas, uma para tubos metálicos rugosos como aço galvanizado e aço carbono - Equação (54) - e outra para tubos lisos como PVC, CPVC e cobre - Equação (55).

$$J = 20,2(10^8)Q^{1,88}D^{-4,88} \quad (54)$$

$$J = 8,69(10^6)Q^{1,75}D^{-4,75} \quad (55)$$

Onde J é a perda de carga (kPa/m), Q a vazão (l/s) e D , o diâmetro interno (mm).

5.4.7. Diferença de cotas entre entrada e saída do trecho

Nesse ponto, a diferença de altura foi calculada com base na isométrica do sistema, desenvolvida com uso do software AutoCAD Mechanical 2016™.

5.4.8. Pressão disponível na entrada

O cálculo da pressão disponível na entrada de cada trecho foi efetuado pela equação:

$$P_{disp} = P_{anterior} + \gamma_{\text{água}}(z_2 - z_1) \quad (56)$$

Onde $P_{anterior}$ é a pressão disponível no trecho anterior ao considerado (kPa), $(z_2 - z_1)$ é a diferença de cotas calculada no item 5.4.6 (m), e $\gamma_{\text{água}}$ é o peso específico da água (kN/m^3).

5.4.9. Comprimentos reais e equivalentes

A partir do espaço físico da CASA NORDESTE 1.0, foi avaliada a necessidade tubulações retilíneas e peças de conexão. O comprimento equivalente foi, então, calculado pela Equação (34), e utilizando a tabela do ANEXO C.

5.4.10. Perdas de carga totais

As perdas totais nas tubulações foram obtidas pelo seguinte produto:

$$\Delta P = J l_{eq} \quad (57)$$

5.4.11. Pressão disponível residual

A pressão disponível residual foi estimada pela diferença entre a pressão disponível calculada no item 5.4.8 e as perdas totais calculadas no item 5.4.10.

5.4.12. Pressão disponível no ponto de utilização

Algumas peças de utilização necessitam de pressões mínimas em escoamento para funcionarem corretamente. Macintyre (1990) recomenda, para chuveiros, valores mínimos de pressão de serviço de 5 kPa, e, para torneiras, 10 kPa. Nesse sentido, o valor da pressão residual foi comparado com tais valores.

5.5. Seleção do sistema de controle

Conforme exposto na seção 4.3.1.2, o controlador diferencial de temperatura é um item obrigatório para sistemas de circulação forçada. Ele é ligado a, no mínimo, dois sensores de temperatura, que devem ser inseridos na tubulação para aferir duas temperaturas: a de saída dos coletores para o *boiler*, e a de retorno do boiler para os coletores. O sistema eletrônico, então, subtrai os dois valores e compara essa diferença com o valor inserido pelo usuário em configuração prévia. Se tais valores forem iguais, o controlador envia um sinal para o relé acoplado ao acionamento da bomba centrífuga, o que permite a parada temporária até que um maior diferencial de temperatura seja reestabelecido (FULL GAUGE™, 2013).

Existem diversos controladores comerciais que se destinam especificamente para a aplicação em sistemas de aquecimento solar residencial. Nesse sentido, buscou-se um sistema cujo custo de aquisição tivesse valor razoável. A seleção dos sensores se deu a partir do tipo especificado para a aplicação, e o comprimento de fio necessário à instalação do projeto.

5.6. Análise financeira

A análise financeira foi realizada a partir do levantamento de preços dos componentes em lojas virtuais, e aplicação dos métodos de análise mencionados na seção 4.4 deste trabalho. A análise foi realizada inicialmente para duas tarifas mensais de energia elétrica diferentes, de forma a avaliar o tempo de retorno do investimento para ambas. Por último, uma terceira análise foi efetuada com uso de um valor médio para a taxa mínima de atratividade vigente nos últimos 5 anos.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Seleção do reservatório térmico

A partir da temperatura média já exposta na caracterização climática e tomando como base a temperatura de armazenamento para a mistura, os valores utilizados no cálculo estão expostos na Tabela 7, e fazem uso do volume de consumo calculado para três habitantes.

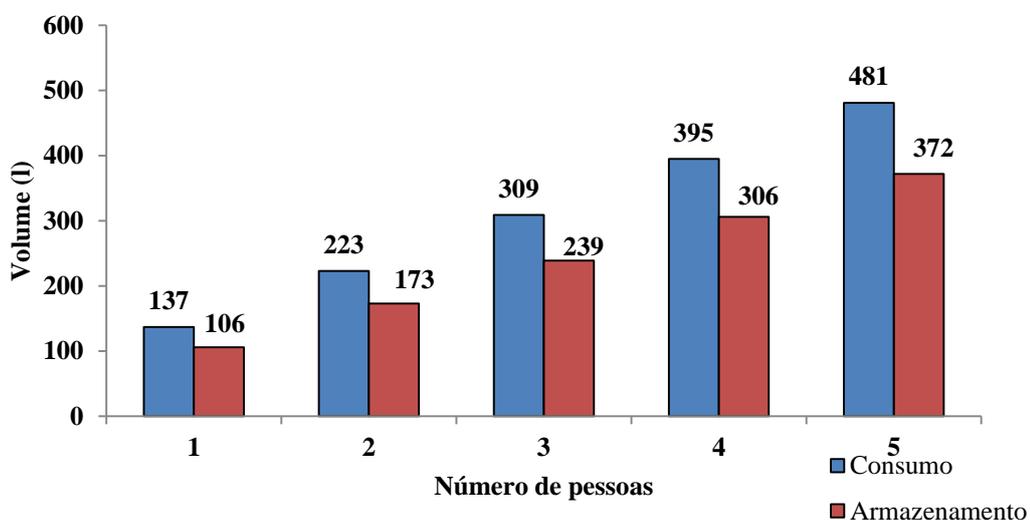
Tabela 7: Volume de armazenamento estimado para 3 habitantes.

Variável	Valor
Volume de consumo (m ³)	0,309
Temperatura de consumo (°C)	40
Temperatura de armazenamento (°C)	45
Temperatura ambiente (°C)	22,8
Volume de armazenamento (l)	239

Fonte: Próprio autor.

Naturalmente, foi necessário projetar a expansão da CASA NORDESTE 1.0 para 5 habitantes, utilizando os mesmos dados de entrada. Os valores necessários para o armazenamento estão mostrados na Figura 26 juntamente com os volumes de consumo.

Figura 26: Consumo e armazenamento de água quente para 1-5 habitantes.



Fonte: Próprio autor.

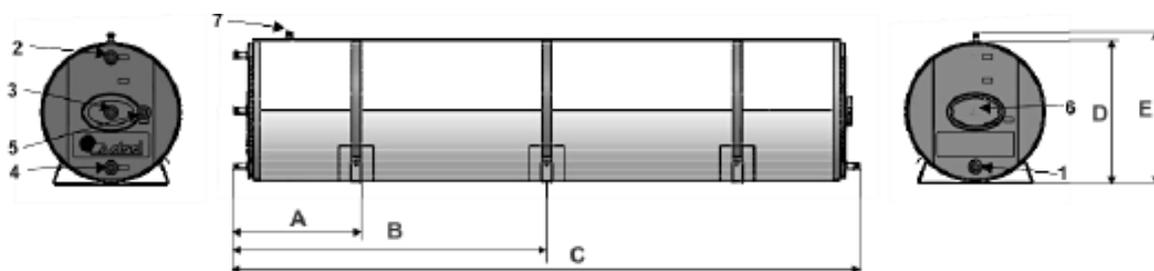
Observa-se que o valor armazenado é, em geral, inferior ao volume de consumo diário estimado, devido à característica de constante reabastecimento de água fria. No entanto, tais valores diferem dos casos usuais frisados pela Norma - a NBR 15569 (2008) recomenda que o volume de armazenamento seja de no mínimo 75 % do volume consumido, critério este que é obedecido para qualquer das situações ilustradas na Figura 26. O percentual obtido é de aproximadamente 77,5 %

Existem diversas opções de reservatórios térmicos no mercado nacional. A empresa A Atual™ produz e comercializa modelos de *boiler* para variados volumes, e foi escolhida como referência para a análise de alguns modelos (ver Figura 27 e Tabela 8).

Em função do volume máximo obtido (372 l para 5 habitantes), optou-se pelo uso de 400 l totais. Em concordância com a proposta *casa evolutiva* da CASA NORDESTE 1.0 e com o espaço disponível na área técnica, optou-se pelo uso de dois boilers de 200 l sem apoio elétrico, com ligações hidráulicas em paralelo. Tal solução permite ao usuário a ativação ou desativação de um dos reservatórios térmicos em função do número de habitantes – e consequentemente, da demanda de armazenamento. Mais detalhes sobre o aspecto evolutivo geral serão mostrados no Capítulo 6.

As vistas isométricas e explodidas (apenas ilustrativa) do modelo oferecido pela empresa para o armazenamento de 200 l de água quente está exposta nas Figuras 28 e 29, produzido em SolidWorks 2014™. Algumas especificações técnicas dos componentes do *boiler* seguem no Quadro 1.

Figura 27: Vistas do *boiler*.

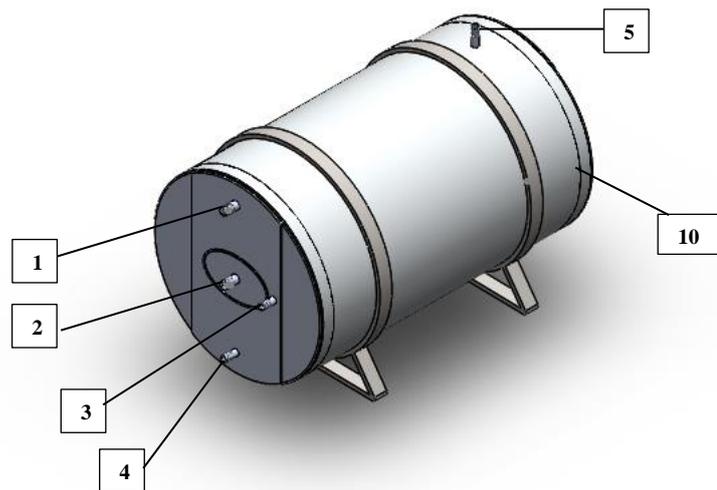


Fonte: A Atual™ (2017).

Tabela 8: Modelos de *boiler* para volumes variados.

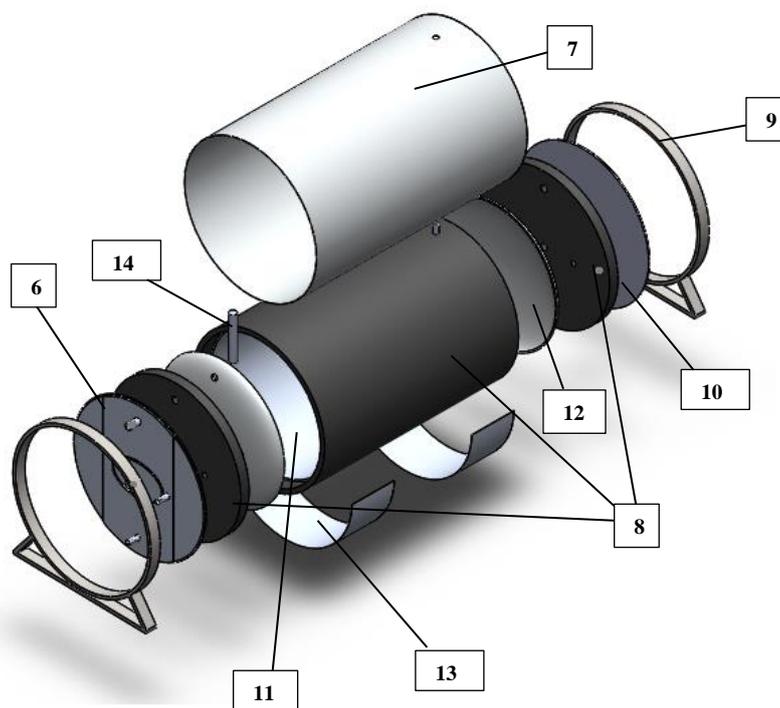
DIMENSÕES	Volumes				
	200 l	300 l	400 l	500 l	600 l
A (mm)	200	450	450	450	450
B (mm)	-	-	-	-	-
C (mm)	1120	1553	1920	2320	2740
D (mm)	625	625	625	625	625
E (mm)	675	675	675	675	675
Voltagem bifásica (V)	220	220	220	220	220
Potência (W)	2500	2500	2500	2500	2500
Corrente (A)	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4
Peso Baixa Pressão (kg)	21,0	26,0	31,0	35,5	47,0
Peso Baixa Pressão max. (kg)	25,0	30,5	36,0	41,0	50,0
Peso alta pressão (kg)	28,5	35	42	48	58

Fonte: A Atual™ (2017)

Figura 28: Vista isométrica do *boiler* de 200 l.

Fonte: Próprio autor.

Figura 29: Vista explodida do boiler de 200 l.



Fonte: Próprio autor.

Quadro 1: Lista de componentes do reservatório térmico de 200 l.

Componente
1) Rosca Macho, BSP de 1" - Consumo de água quente afogado
2) Rosca Macho, BSP de 1" - Consumo de água quente nível
3) Rosca Macho, BSP de 3/4" - Retorno dos coletores
4) Rosca Macho, BSP de 3/4" - Alimentação dos coletores
5) Rosca Macho, BSP de 1/4" – Respiro
6) Tampas de alumínio para proteção e acabamento das extremidades
7) Capa de alumínio para proteção e acabamento
8) Isolamento térmico em poliuretano pré-expandido
9) Suporte de apoio em aço carbono com pintura eletrostática
10) Rosca Macho, BSP de 1" - Alimentação de água fria e/ou coletores (não visível)
11) Corpo interno em aço inox AISI 304 ou 316 L
12) Calotas internas em aço inox AISI 304 ou 316
13) Chapa em galvalume para proteção da capa de alumínio
14) Pescador fixo para trabalho em desnível e/ou nível

Fonte: A Atual™ (2017).

6.2. Seleção do coletor solar

A Tabela 9 mostra os dados de entrada requisitados pelas Equações (49) a (51) apresentadas na seção 5.2.4.

Tabela 9: Cálculo da área coletora.

Dados		
Irradiação global média anual (kWh/m ² .dia)	I_g	5,870
Perdas térmicas nos circuitos (kWh/dia)	E_{perda}	1,691
Latitude local (°)	φ	3,55
Azimute de superfície (°)	γ	0
Inclinação do coletor em relação ao plano horizontal (°)	β	15,00
Inclinação ótima recomendada (°)	$\beta_{ótimo}$	13,55
Coefficiente de ganho do coletor (adimensional)	$Fr(\tau\alpha)_N^*$	0,739
Coefficiente de perda do coletor solar (adimensional)	FrU_L^*	5,051
Fator de correção de inclinação e orientação	FC_{instal}	1,014
Produção média diária de energia específica (kWh/m ²)	$PMDEE$	3,005
Área coletora (m²)	A_{col}	3,07

Fonte: Próprio autor.

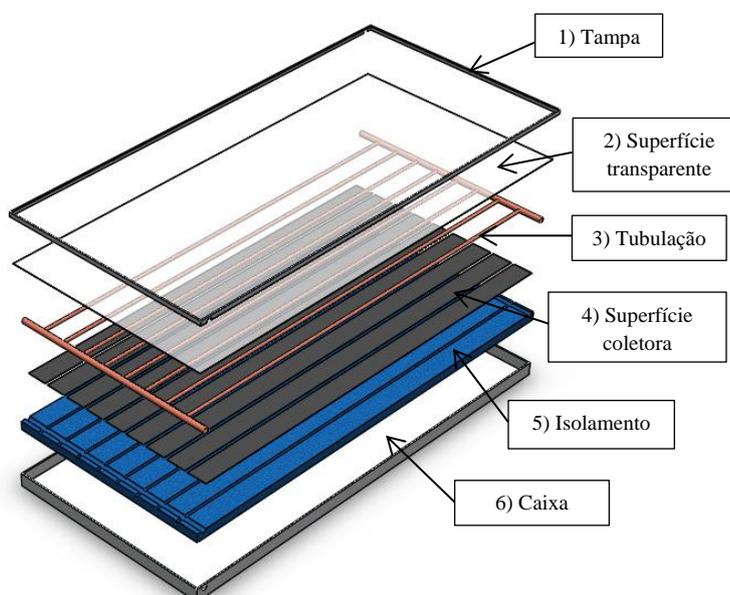
*Dados do modelo escolhido, avaliados pelo INMETRO (2018).

O azimute de superfície foi adotado como nulo em função da recomendação da NBR 15569 (2008), que salienta a importância da instalação dos coletores de forma se reduzir o ângulo azimutal ($-30^\circ < \gamma < 30^\circ$) e, conseqüentemente, o fator de correção FC_{instal} .

O espaço físico do telhado sugere o uso de coletores solares em forma retangular, em prol do uso de menos peças de tubulação e do aspecto estético da construção como um todo. Dessa forma, optou-se pelo uso de dois coletores solares com área coletora de 1,80 m², pois estes atendem aos requisitos anteriores e são operacionalmente capazes de suprir a necessidade energética calculada – a demanda diária, representada na Tabela 9 pelo valor de $PMDEE$. Por último, o ângulo β de inclinação da superfície coletora é o valor mínimo recomendado pela NBR 15569 (2008). Esse limite existe para evitar o acúmulo excessivo de poeira sobre o vidro do coletor solar, o que pode prejudicar a absorção da radiação solar.

O modelo de coletor solar adotado é comercializado pela empresa Heliotek™. Trata-se de uma fabricante do grupo BOSCH, de equipamentos destinados à tecnologia de aquecimento solar desde 1990, situada em São Paulo-SP. Algumas especificações técnicas podem ser encontradas no manual do site do fabricante. A partir dessas informações, uma vista explodida do coletor **MC18 HIS** foi elaborada através do software SolidWorks 2014™ (Figura 30), e informações adicionais sobre cada peça estão mostradas no Quadro 2. Algumas características do modelo, por sua vez, são dispostas na Tabela 10.

Figura 30: Vista explodida do coletor.



Fonte: Próprio autor.

Quadro 2: Detalhes sobre as partes do coletor solar.

Componentes	Detalhes
1) Tampa	Perfil em alumínio
2) Superfície transparente	Vidro temperado
3) Tubulação	Cobre
4) Superfície coletora	Alumínio com <i>black paint</i>
5) Isolamento	Lã de PET
6) Caixa	Perfil e chapa de fundo em alumínio

Fonte: Heliotek™ (2018).

Tabela 10: Especificações técnicas do coletor solar MC18 HIS.

Especificações técnicas	
Largura (mm)	1000
Comprimento (mm)	1800
Altura (mm)	69
Área coletora (m ²)	1,8
Peso vazio (kg)	22,5
Pressão de trabalho (kPa/m.c.a)	400/40
Eficiência (%)	60,78
Vazão de água recomendada (L/h/coletor)	63
Produção mensal de energia por coletor (kWh/mês)	152,6

Fonte: Heliotek™ (2018).

A superfície absorvedora em alumínio esmaltado (*black paint*) foi projetada para oferecer um melhor contato térmico com os tubos de cobre, como uma diretriz para aumento de eficiência. A certificação do INMETRO especifica, ainda, os parâmetros associados à eficiência do modelo (Tabela 11).

Tabela 11: Parâmetros de eficiência do modelo M18 HIS.

Parâmetros de eficiência do modelo M18 HIS	
Fr($\tau\alpha$)	0,739
FrU _L	5,051
Desempenho	Classe A

Fonte: INMETRO (2018).

6.3. Seleção de material para tubulações

Alguns materiais comerciais e suas características são descritos pela empresa SOLARTHERM™ (Quadro 3), e foram comparados para a presente aplicação.

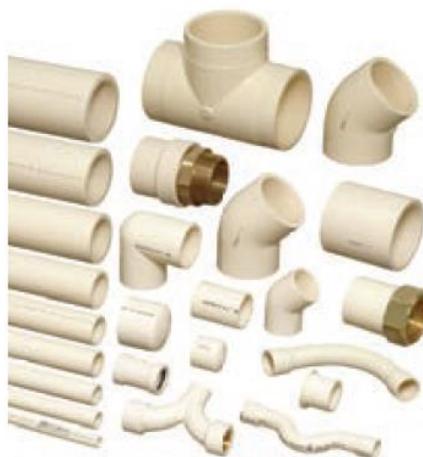
Quadro 3: Materiais de uso comum em tubulações de água quente.

Material	Características
PPR	Resistente a altas pressões; Temperaturas de até 95° C; Diâmetros disponíveis (20-110 mm). Desvantagem: Necessita de equipamento específico para instalação.
Cobre	Resistente a altas pressão e às maiores temperaturas (acima de 100°C); Alta resistência mecânica (poucos suportes necessários). Diâmetros disponíveis (15-104 mm). Desvantagens: Susceptíveis à corrosão, altas dilatações térmicas, necessitam de isolamento térmico e instalação por solda.
CPVC	Resistentes à pressões elevadas e temperaturas de 70-80°C. Não exige isolamento térmico adicional para 20 m ou menos; Instalação simples, por adesivo especial ou rosca. Diâmetros disponíveis (15-104 mm). Desvantagem: não apresenta tanta resistência mecânica quanto o cobre.
PEX	Resistentes a temperaturas de até 95°C; Flexíveis até curvatura limite; Diâmetros disponíveis (16-32 mm). Desvantagens: Necessitam de isolamento adicional, necessitam de muitas abraçadeiras de suporte.

Fonte: SOLAREM™. Disponível em: < <http://www.aquecedorsolaragua.com.br>>. Acesso em: 21 de out. de 2018.

O material escolhido para as tubulações dos circuitos primário e secundário foi o CPVC. Este apresenta baixa condutividade térmica, o que dispensou o uso de isolantes adicionais em todos os trechos. Além disso, demanda uma mão-de-obra menos especializada que o cobre, cujas conexões exigem processos de soldagem específicos. Além disso, são tubos lisos (baixo fator de atrito) e são livres de corrosão (TIGRE™, 2011). Os modelos de tubos e conexões escolhidos fazem parte da linha AQUATHERM™, da empresa Tigre™. Essa linha oferece uma quantidade apreciável de peças, como pode ser visto na Figura 31: tês, joelhos, curvas, luvas de transição e misturadores – algumas dessas peças com e sem a presença de rosca em latão.

Figura 31: Peças da linha AQUATHERM™.



Fonte: Tigre.™ (2011)

6.4. Alocação dos boilers e coletores

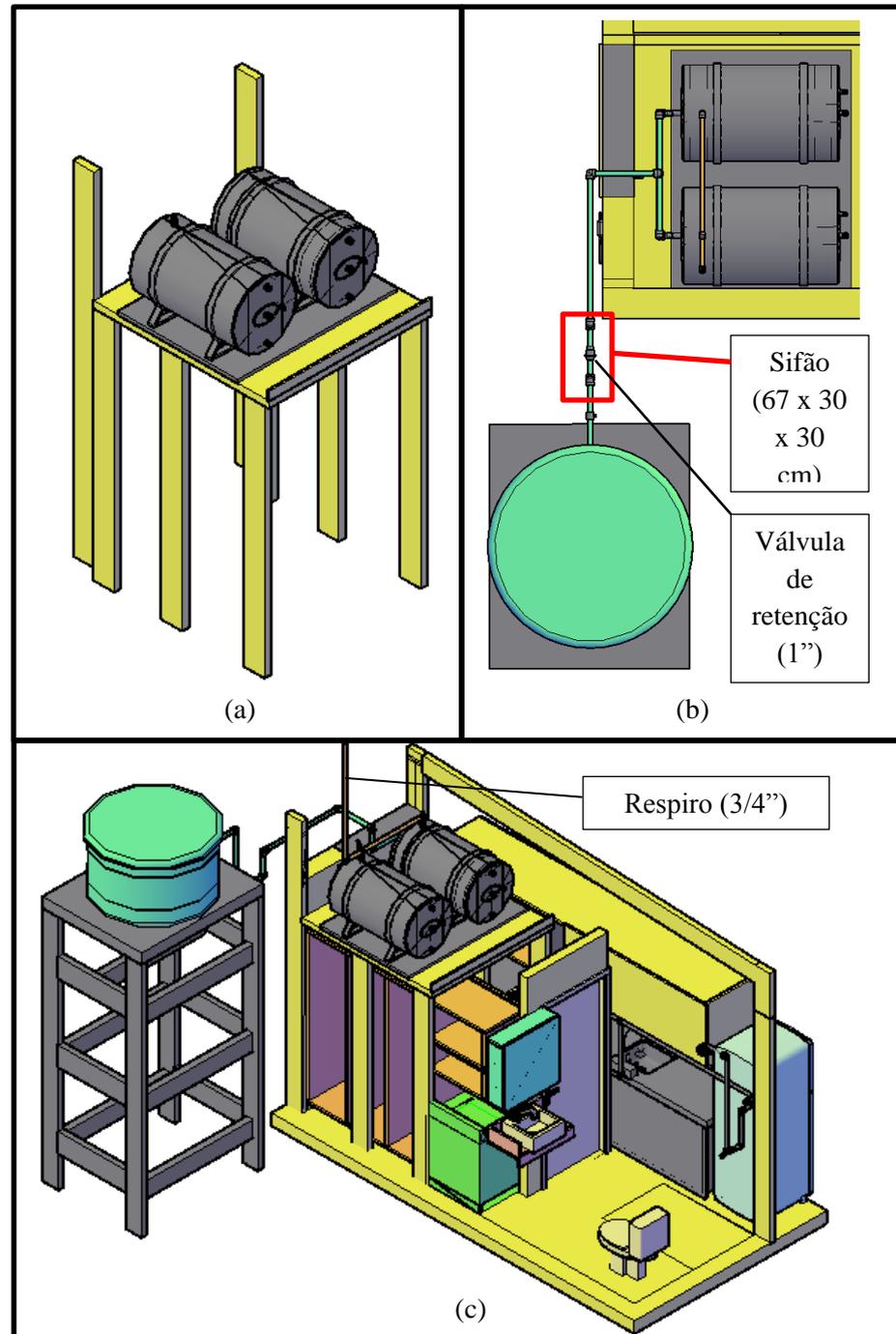
A análise do espaço físico mencionada na seção 5.3 possibilitou o desenvolvimento de um modelo 3D em AutoCAD Mechanical 2016™. Os reservatórios e coletores solares foram, então, posicionados em função do espaço disponível, com cotas aos modelos reais oferecidos pelos fabricantes.

6.4.1. Boilers e alimentação de água fria

A empresa A Atual™ (2017) recomenda que os *boilers* sejam instalados o mais próximo possível dos pontos de utilização, a fim de evitar o uso demorado de tubulações. O objetivo de tal proposição é a redução de perdas de pressão e calor nas linhas. Conforme mostrado na planta baixa da CASA NORDESTE 1.0, área técnica é adjacente ao banheiro e à cozinha, cômodos onde se localizam os 4 pontos de utilização. A necessidade de alocação do sistema de armazenamento – cuja massa total ultrapassa 600 kg quando se consideram cheios os dois reservatórios - motivou o desenvolvimento de uma estrutura a parte, acoplada à estrutura principal (pórticos baseados no modelo WikiHouse).

A estrutura de apoio é composta de compensado naval, e dispõe de 6 pilares. A carga dos *boilers* é distribuída sobre a superfície impermeável em forma de bandeja, conforme recomenda a empresa A Atual™ (2017) (Figura 32-a).

Figura 32: Estrutura de alocação dos *boilers*. (a) Isométrica dos *boilers* sobre a estrutura; (b) vista superior da alimentação e água fria na parte traseira dos *boilers*; (c) vista isométrica do sistema sobre a área técnica.



Fonte: Próprio autor.

De acordo com a NBR 15569 (2008), o uso de um sifão com no mínimo 30 cm de altura é necessário entre o reservatório de água quente e a caixa de água fria, além de uma

válvula de retenção (Figura 32-b). O objetivo é evitar correntes de convecção natural que, em geral, são responsáveis por uma parcela razoável de perdas de calor no *boiler*. Além disso, a mesma norma recomenda o uso de um diâmetro para água fria igual ou superior ao de distribuição de água quente, o que motivou o uso de uma tubulação de CPVC de 1 polegada, sem isolamento.

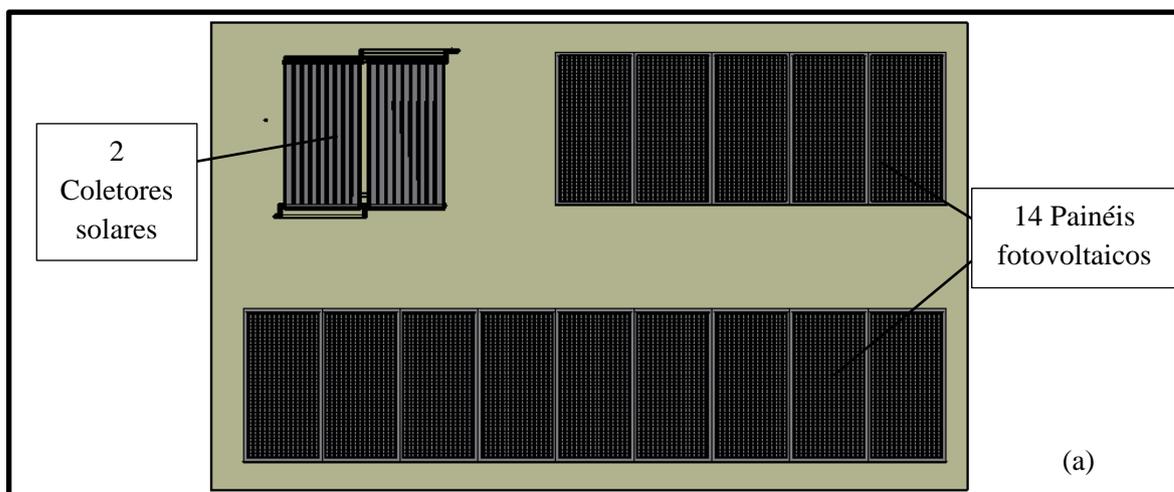
A fim de evitar perdas de carga desproporcionais, todos os trechos com ligação hidráulica em paralelo foram concebidos com simetria, com exceção do respiro de $\frac{3}{4}$ de polegadas conectado a ambos os *boilers* – limitação resultante da falta de espaço para furação adequada no telhado, que entraria em conflito com os coletores. Segundo a norma, o respiro deve apresentar no mínimo 50 cm de altura em relação ao nível da caixa d'água, e livre de válvulas e obstruções, conforme a Figura 32-c.

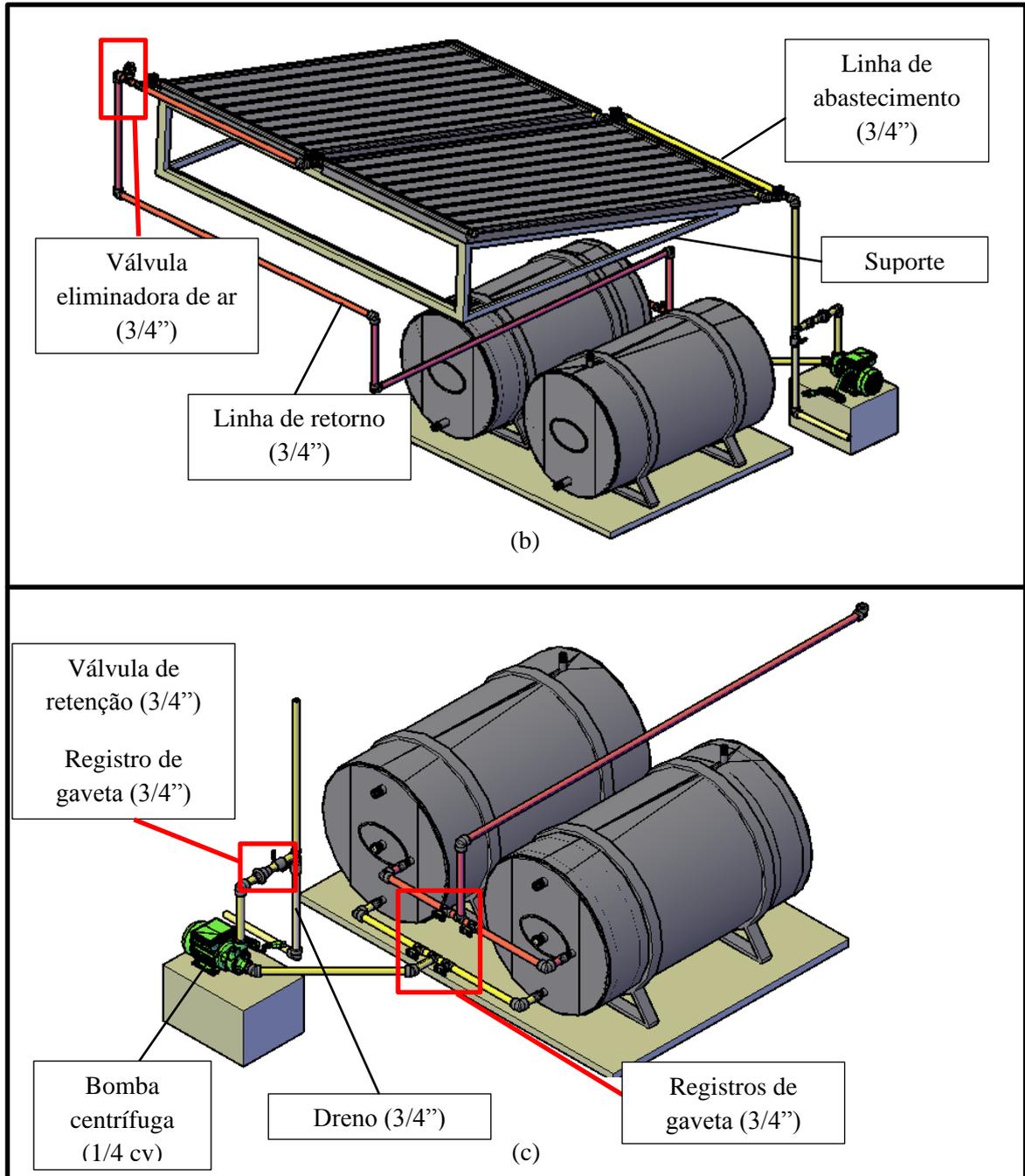
Em relação à alimentação de água fria, o sistema é do tipo afogado (nível de água superior dos boilers está abaixo do nível inferior da caixa d'água). Além disso, a coluna d'água envolvida nesse escoamento é de 1,54 m.c.a, acima do mínimo de 0,1 m.c.a. recomendado pela A Atual™ (2017).

6.4.2. Coletores solares e circuitos

A Figura 33-a mostra a alocação dos coletores e painéis fotovoltaicos sobre o telhado.

Figura 33: Coletores e tubulações. (a) Vista superior do telhado; (b) Isométrica das conexões entre coletores e reservatórios; (c) Isométrica com detalhes das linhas de abastecimento e retorno, bomba e dreno.





Fonte: Próprio autor.

Na Figura 33-b, a válvula eliminadora de ar pode ser visualizada no trecho mais alto da tubulação. Tanto a NBR 15569 (2008) quanto os fabricantes recomendam o uso da mesma, a fim de eliminar bolhas de ar que tendem a se acumular nos pontos mais elevados de tubulações de água quente.

Ambas as linhas, de abastecimento dos coletores (em amarelo) e retorno ao *boiler* (em vermelho) são compostas por CPVC. A fim de evitar perdas de temperatura, a linha vermelha

(linha de retorno de água quente para o *boiler*) utiliza um isolamento adicional (não mostrado na Figura 33-c). Isolamentos da linha TUBEX™, marca EPEX™, estão disponíveis em vários diâmetros, e foram adotados como referência. São compostos de polipropileno expandido, um material polimérico não inflamável, ideal para sistemas de aquecimento, refrigeração e ar condicionados (Figura 34) (EPEX™, 2018). O isolamento também é aplicado ao trecho da linha amarela que se encontra sobre o telhado, pois, segundo a recomendação da Tigre™(2011), tubos em CPVC não devem ser expostos diretamente à radiação solar.

Figura 34: Isolamentos para tubos em polietileno expandido.



Fonte: EPEX™ (2018).

Conforme exposto na seção 4.4.1.2, a bomba centrífuga é um item necessário para a recirculação da água, uma vez que os coletores estão posicionados sobre os *boilers*. A tubulação associada ao recalque da bomba deve dispor de um registro de gaveta, e de uma válvula de retenção, para situações de manutenção e drenagem, respectivamente.

A NBR 15569 (2008) salienta a necessidade de instalação de um dreno que esteja conectado à tubulação que abastece os coletores, com a função de extrair a água residual acumulada no fundo dos coletores, quando estes precisarem ser desativados. O dreno mostrado na Figura 33-c desempenha tal função, e conduz a água quente para o exterior da área técnica, evitando assim o risco de queimaduras aos usuários.

Os registros de gaveta presentes nas linhas são recursos associados ao aspecto evolutivo do sistema, e serão detalhados posteriormente (seção 6.7)

6.5. Dimensionamento das tubulações

Em função da planilha recomendada pela NBR 5626 (1998), os diâmetros das tubulações do circuito secundário foram dimensionados (Tabela 12).

O valor da pressão requerida mínima foi consultado para o modelo de máquina de lavar *Fontal Load Brastemp™*, 11 kg. A metodologia mostra que todos os pontos de utilização obedecem ao requisito de pressão mínima (maior que 5 kPa para o chuveiro, e maior que 10 kPa para as torneiras da pia da cozinha e banheiro).

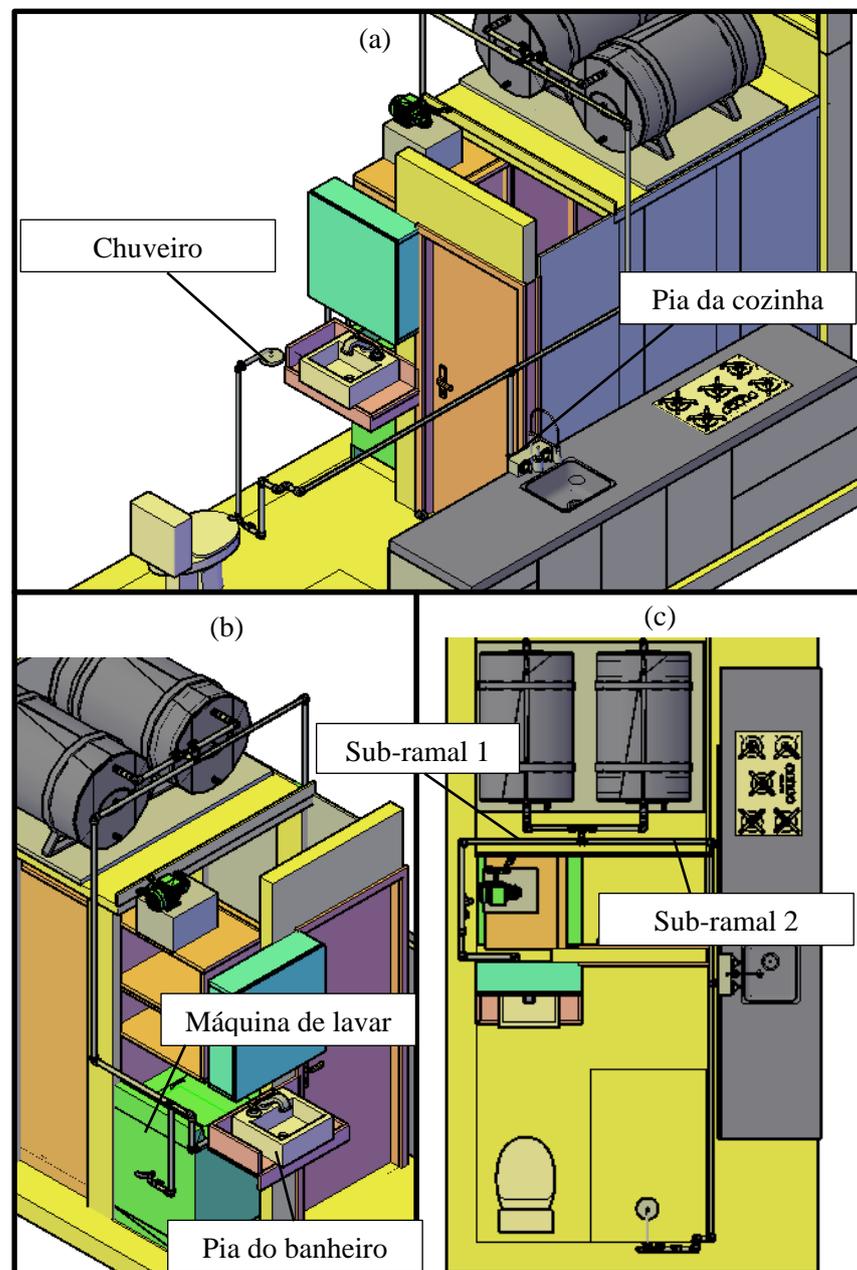
Tabela 12: Planilha para dimensionamento de tubulações.

Trecho	Soma dos pesos	Vazão estimada	Diâmetro	Velocidade	Perda de carga unitária	Diferença de cota	Pressão disponível
		L/s	mm	m/s	kPa/m	m	kPa
Sub-ramal 1	1,5	0,367	22	1,44	0,990	1,682	18,16
Máquina	1,0	0,300	22	1,18	0,677	0,620	24,36
Tanque	0,5	0,212	22	0,83	0,353	0,000	18,16
Sub-ramal 2	1,2	0,329	22	1,29	0,803	1,294	14,28
Pia da cozinha	0,7	0,251	22	0,99	0,484	0,150	15,78
Chuveiro	0,5	0,212	22	0,83	0,353	-0,182	12,46
Trecho	Comprimento da tubulação		Perda de carga			Pressão disponível residual	Pressão requerida no ponto de utilização
	Real m	Equiv. m	Tubulação kPa	Registros e outros kPa	Total kPa		
Sub-ramal 1	3,044	6,244	6,184	0	6,184	11,976	n/a
Máquina	0,734	4,834	3,270	0	3,270	21,090	20,000
Tanque	0,675	4,275	1,507	0	1,507	16,653	10,000
Sub-ramal 2	3,038	6,238	5,009	0	5,009	9,271	n/a
Pia da cozinha	0,700	4,300	2,080	0	2,080	13,700	10,000
Chuveiro	3,453	9,953	3,510	0	3,510	8,950	5,000

Fonte: Próprio autor.

A Figura 35 mostra os quatro pontos de utilização, sendo dois deles no banheiro (pia e chuveiro, Figuras 35-b e 35-a, respectivamente), um na cozinha (pia, Figura 35-a) e um na área técnica (máquina de lavar, Figura 35-b). As tubulações estão fixadas entre dois painéis de compensado que compõem a parede (não visíveis na Figura 35).

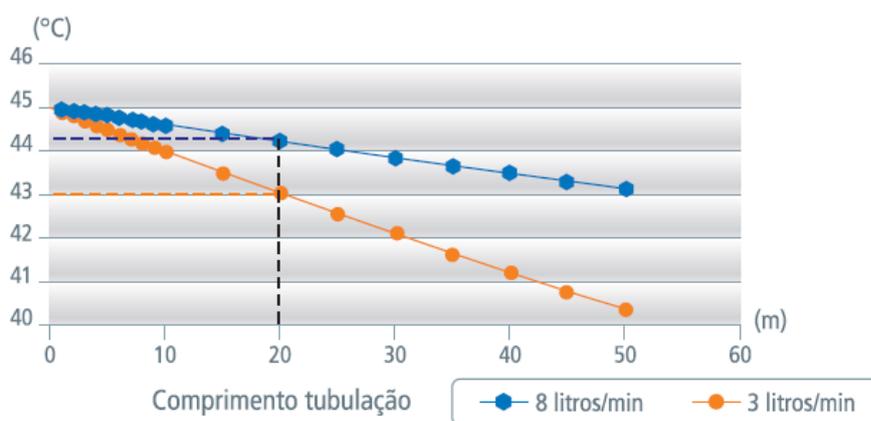
Figura 35: Tubulações de distribuição para os pontos de consumo. (a) Isométrica dos trechos da pia da cozinha e chuveiro (sub-ramal 2); (b) Isométrica dos trechos para máquina de lavar e pia do banheiro (sub-ramal 1); (c) Vista superior das tubulações.



Fonte: Próprio autor.

De acordo com a Tigre™ (2011), o uso do CPVC em residências não necessariamente demanda a aplicação de isolamento térmico adicional. Testes realizados pelo fabricante mostram que a perda de temperatura só se torna significativa a partir de 20 m de comprimento, ou em situações excepcionais, como a necessidade de passagem por câmaras de refrigeração. Em situações comuns, a perda esperada é de apenas 0,7° C a cada 20 m. A Figura 38 mostra a queda de temperatura esperada para duas vazões diferentes (8 l/min e 3 l/min). Com base nesses resultados, optou-se pela não adoção do polietileno expandido nas tubulações do circuito secundário.

Figura 36: Perdas de temperatura esperadas em CPVC .



Fonte: Tigre™ (2011).

6.6. Seleção de componentes auxiliares

A seguir, algumas características do modelo comercial de controlador diferencial de temperatura, seus respectivos sensores, e informações sobre a instalação dos mesmos.

6.6.1. Controlador diferencial de temperatura

O controlador diferencial de temperatura MICROSOL™ é um sistema compacto de controle responsável pela comparação entre as temperaturas de saída do coletor e a temperatura de armazenamento do sistema de aquecimento. Em geral, sua aplicação se expande também a aquecimento de piscinas, devido à simplicidade e flexibilidade deste equipamento. Ele fornece constantemente a diferença entre as duas temperaturas em questão, e envia um sinal para a bomba quando essa variável atinge o valor especificado pelo usuário,

conforme visto anteriormente. O aparelho controlador está mostrado em detalhes na Figura 37 e algumas de suas especificações técnicas, mostradas no Quadro 4, obtidas diretamente do site da fabricante Full Gauge Controladores™.

Figura 37: Controlador MICROSOL™.



Fonte: Full Gauge™ (2013).

Quadro 4: Especificações técnicas do controlador MICROSOL™.

Especificações técnicas	
Alimentação	230 Vac±10% (50/60Hz) ou na versão 115 Vc±10%(50/60Hz)
Temperatura de operação	0 a 50 °C
Umidade de operação	10 a 90%UR (sem condensação)
Temperatura de controle	Sensor T1:-50 a 200°C-58 a 392°F
	Sensor T2:-50 a 105°C/-58 a 221°F
Resolução	0,1°C entre -10 e 100°C e 1°C no restante da faixa
Saída de controle	O MICROSOL SWP Advanced possui uma saída e relé PUMP - saída de relé, máx. 1HP em 220 Vca (1/2 HP em 127Vca)
Dimensões	104 x 148 x 32 mm
Display	LCD 2.75" com backlight

Fonte: Full Gauge™ (2013)

6.6.2. Sensores de temperatura

Os sensores de temperatura acompanham o sistema de controle, e são do tipo NTC, ou seja, termistores com coeficiente de temperatura negativo. Em outros termos, são compostos por um material semicondutor cerâmico, cuja resistência elétrica varia inversamente com a temperatura (ASSIS, 2018). Algumas das vantagens desses dispositivos incluem:

- Tamanho reduzido;
- Alto grau de estabilidade
- Alta precisão;
- Alta durabilidade;

Algumas desvantagens:

- Não linearidade;
- Inadequação em temperaturas extremas.

Quadro 5: Detalhe dos sensores de temperatura.

Especificações técnicas		
Sensor T1 (Coletor solar)	Sensor SB59, ponta metálica, silicone.	Figura 38: SB59 
Sensor T2 (Reservatório térmico)	Sensor SB41, ponta plástica.	Figura 39: SB41 

Fonte: Full Gauge™ (2013).

Como se pode verificar no Quadro 4, existe não linearidade de medição para um faixa de temperaturas elevadas. No entanto, as temperaturas de trabalho não excedem esses limites,

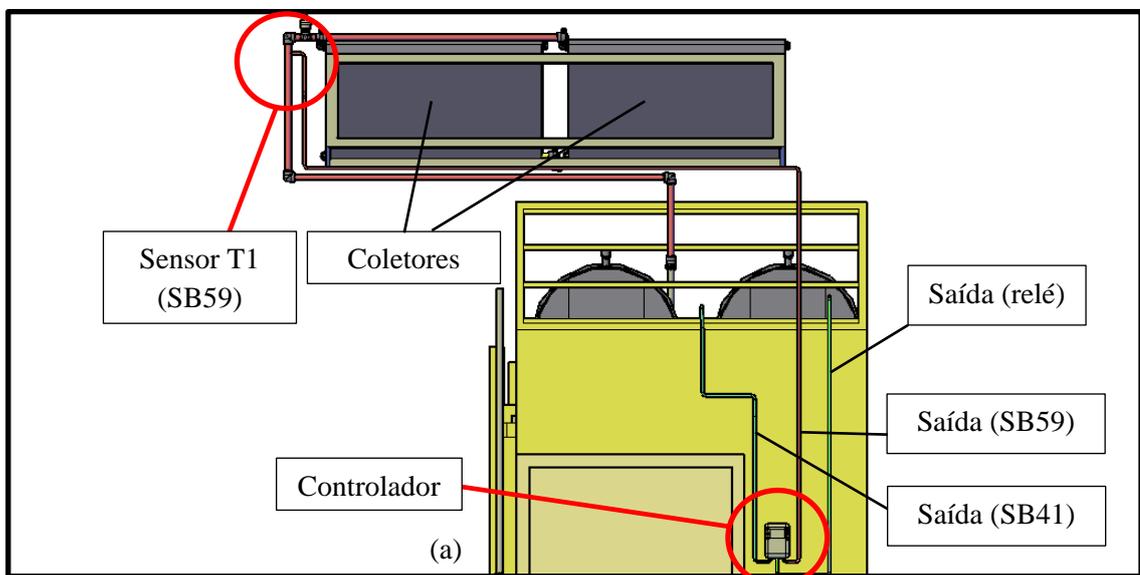
fato que elimina, dentro da aplicação em questão, as desvantagens apontadas. No Quadro 5 são mostradas algumas informações sobre os modelos SB41 (Figura 38) e SB59 (Figura 39), utilizados no reservatório térmico e na saída do coletor, respectivamente.

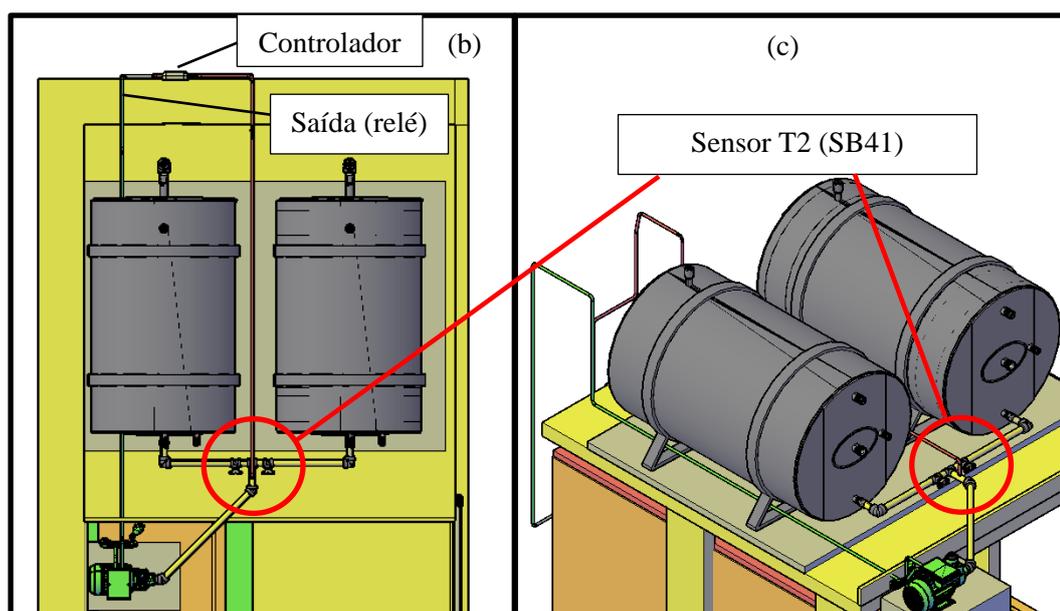
6.6.3. Instalação do sistema de controle

As vistas da Figura 40 mostram detalhes da instalação do sistema de controle. O fabricante Full Gauge™(2013) recomenda que o sistema de controle seja posicionado de forma a permitir fácil acesso às configurações, além de não estar exposto à umidade e permitir a ventilação natural. Nesse sentido, foi necessário posicioná-lo na parede interna entre a área técnica e o corredor, a fim de atender os requisitos mencionados e ainda facilitar a instalação dos sensores e comando da bomba. O sensor SB59 (Figura 40-a) foi posicionado o mais próximo possível da saída dos coletores para os *boilers*, a fim de evitar imprecisão na medição. O sensor SB41 (Figura 40-b e 40-c) foi posicionado na saída da aspiração, com mesmo objetivo.

A conexão dos sensores nas tubulações de CPVC deve ser efetuada pelo encaixe de poços termométricos. Trata-se de pequenas peças metálicas que abrigam a ponta do sensor, fixando-a na tubulação através de uma rosca (diversos modelos podem ser encontrados no mercado). O fabricante do controlador MICROSOL™ informa que se deve observar bem o encaixe dos poços, para garantir uma leitura correta.

Figura 40: Posicionamento do sistema de controle; (a) Vista traseira; (b) Vista superior; (c) Isométrica.





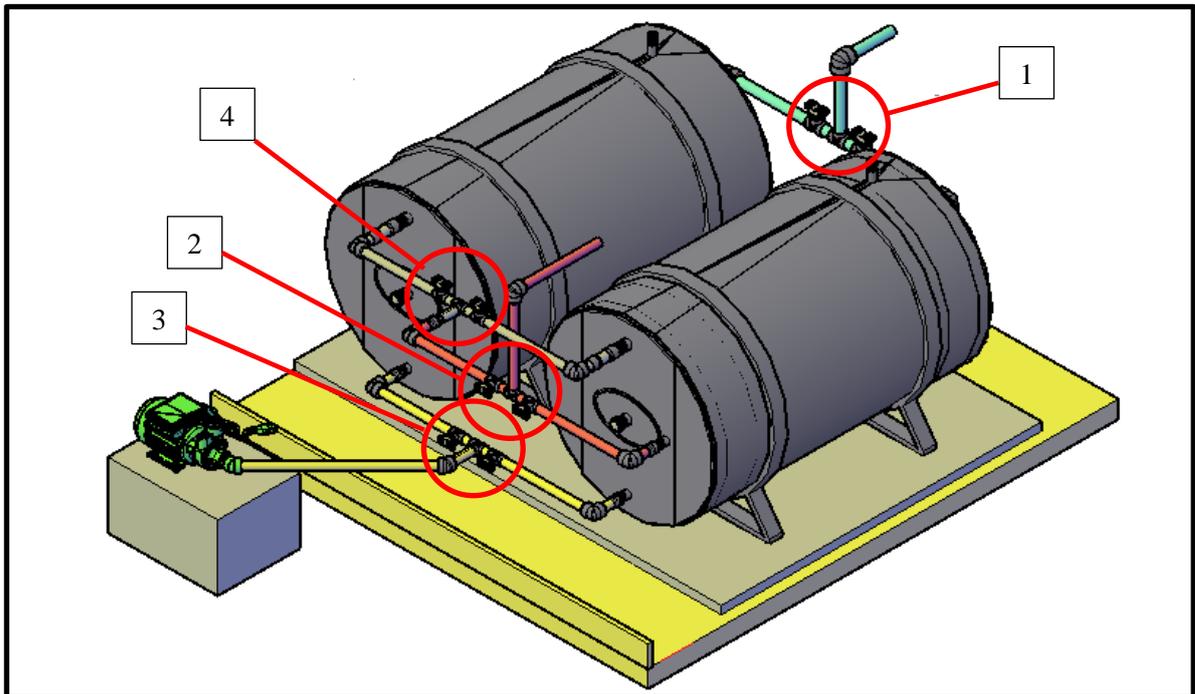
Fonte: Próprio autor.

6.7. Aspectos evolutivos do sistema

A CASA NORDESTE 1.0 busca apresentar protótipos cuja característica seja variável com o tempo, ou seja, através da previsão de aumento ou diminuição do núcleo familiar. Tal característica deve ser associada a todos os subprojetos passíveis de avaliação, desde o design arquitetônico até os sistemas de engenharia e construção.

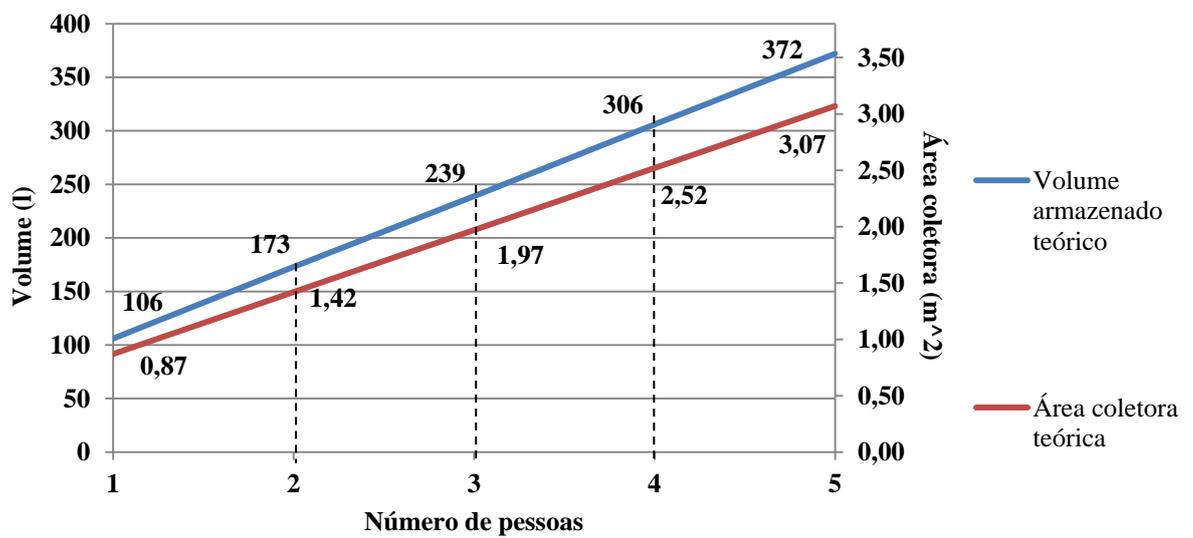
A adoção de sistemas em paralelo é a principal característica que tange a proposta evolutiva. Conforme o gráfico exposto na seção 6.1 (Figura 26), a demanda por água quente para uma situação com apenas 2 habitantes é inferior a 200 l. Dessa forma, existe a possibilidade de desativar um dos *boilers* instalados, pelo simples desligamento dos registros (Figura 41), localizados na alimentação de água fria (1), chegada dos coletores (2), realimentação dos coletores (3), e saída para os pontos de consumo (4). O recurso permite também o uso de qualquer dos dois equipamentos sem prioridade estabelecida, o que possibilita a desativação temporária de uma das unidades para manutenção.

A partir do Excel™, foi também avaliada a possibilidade de redução da área coletora em função do volume de água aquecido, uma vez que essas variáveis são proporcionais para uma dada condição de operação (Figura 42).

Figura 41: Registros para ativação/desativação dos *boilers*.

Fonte: Próprio autor.

Figura 42: Volume de armazenamento e área coletora para 1-5 habitantes.

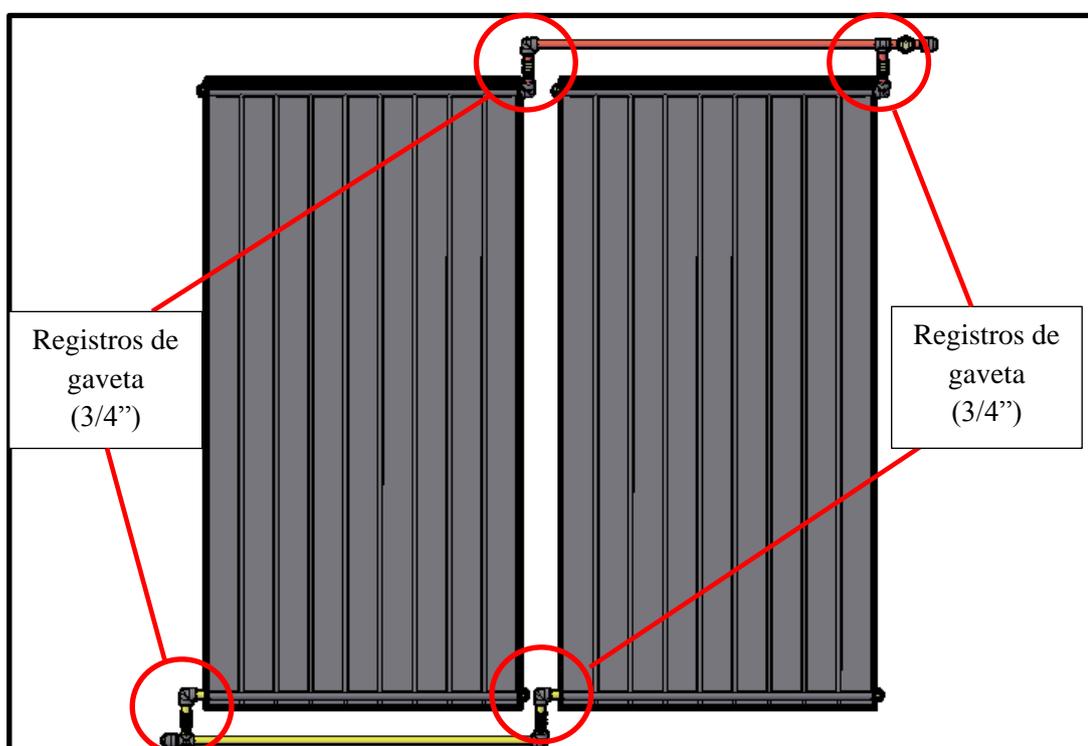


Fonte: Próprio autor.

Foi verificado que o espaço físico permite a alocação satisfatória de até 3 coletores. Tomando como referência o modelo da Heliotek™ apresentado na seção 6.2 – cuja área coletora é de $1,80 \text{ m}^2$ – existe a possibilidade de desativação de 1 coletor, caso a família se reduza para 1 ou 2 membros. Nesse sentido, os coletores podem ser mantidos temporariamente sobre o telhado, ou até removidos do espaço caso a redução da população se mantenha a médio ou longo prazo. A Heliotek™(2018) recomenda que coletores solares temporariamente desativados sejam cobertos por lona opaca, uma vez que sua exposição à radiação sem fluxo de água pode elevar a temperatura do equipamento a até 130°C . No caso da desativação permanente, o coletor deve ser realmente removido do telhado e armazenado em local adequado.

A Figura 43 mostra os registros que permitem a ativação ou desativação de qualquer dos dois coletores, possibilitadas pelo arranjo – em paralelo – escolhido para as conexões.

Figura 43: Posição dos registros para ativação/desativação dos coletores.



Fonte: Próprio autor.

6.8. Considerações sobre instalação

Os fabricantes fornecem algumas recomendações no tocante à instalação dos componentes maiores (*boilers* e coletores).

6.8.1. Considerações sobre instalação do boiler

A empresa A Atual™(2017) recomenda que:

- Os reservatórios sejam instalados em local que permita o acesso para manutenção e eventuais limpezas dos equipamentos.
- Ambos devem ser nivelados com uso de uma bolha de nível, para evitar solicitações mecânicas não uniformes nas paredes internas.
- A superfície de apoio deverá ser impermeável, a fim de evitar danos sobre a construção.

6.8.2. Considerações sobre a instalação dos coletores

A empresa Heliotek™(2018) recomenda que:

- Os coletores só devem ser instalados sobre estruturas que suportem o peso dos mesmos, juntamente com os itens adicionais.
- As características da água utilizada devem obedecer aos seguintes padrões: Dureza inferior a 500 mg/l, pH 7,0-9,0, concentração iônica de sulfito menor que 1,5.
- Jamais instalar os coletores voltados para o sul, e evitar sombreamentos de edifícios;
- A amarração dos mesmos ao telhado pode ser feita com fitas de aço inox ou fios de cobre.

6.9. Considerações sobre manutenção

O projeto foi concebido para, dentro das limitações de espaço a que está sujeito, oferecer o acesso necessário para substituição de equipamentos e troca de peças hidráulicas em geral. A instalação permite três pontos de acesso:

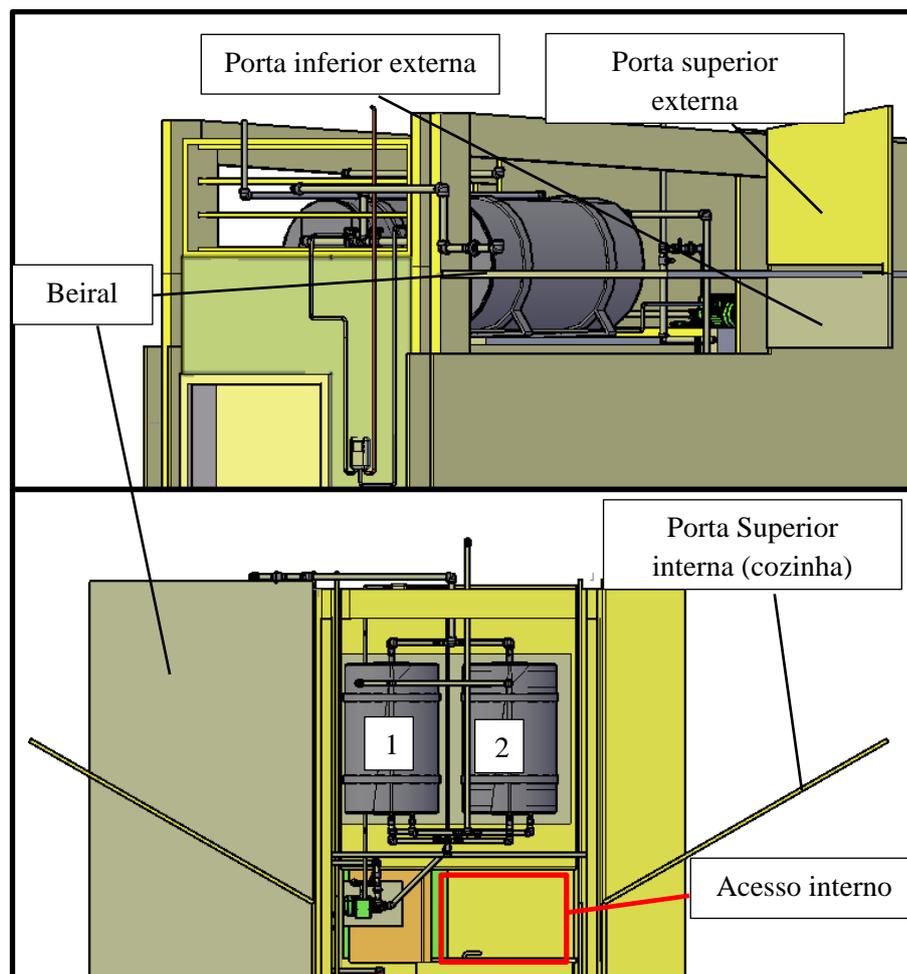
- 1) A partir da própria área técnica, para manutenção das tubulações fixadas na parte frontal dos *boilers*;
- 2) Pela parede interna, através da cozinha. A envoltória da CASA NORDESTE 1.0 foi concebida em duas camadas de compensado naval, juntamente com uma

camada de ar. Nesse sentido, propõe-se a inserção de uma articulação que permita a abertura da parede, e fechamento mediante travamento mecânico. As tubulações de alimentação de água fria do *boiler* (2) (Figura 44) podem, dessa forma, ser acessadas. A remoção dos equipamentos também pode ser efetuada através desta passagem.

- 3) Pela parede externa, com duas portas acima e abaixo do beiral. A porta inferior permite o acesso às tubulações de alimentação de água fria do *boiler* (1). A superior, para eventual manutenção no tubo de respiro.

A manutenção dos coletores solares, por sua vez, exige acesso ao topo do telhado, e seguem a mesma lógica do sistema fotovoltaico. O espaço destinado a esta operação pode ser visualizado na Figura 35-a.

Figura 44: Aberturas para manutenção do sistema de armazenamento.



Fonte: Próprio autor.

6.10. Análise financeira

O preço de mercado para todos os itens foi levantado, a fim de avaliar o investimento total do sistema evolutivo de água quente da CASA NORDESTE 1.0, do ponto de vista da adesão do projeto ao mercado nacional – especificamente ao contexto nordestino, para o qual se destina. A Tabela 13 traz os valores comerciais totais para cada subsistema (para a versão completa do orçamento, ver APÊNDICE A).

Tabela 13: Valor total do investimento.

Item	Valor (R\$)
Tubulações e acessórios	1756,95
<i>Boilers</i>	3000,00
Coletores	2164,30
Sistemas auxiliares (bomba, controlador)	543,00
TOTAL	7464,25

Fonte: Próprio autor.

Inicialmente, o valor utilizado como referência para a tarifa por quilowatt-hora consumido foi o valor R\$ 0,83, fornecido pela empresa ENERGISA™ - para unidade de consumo de até 220 kWh. A quantidade de quilowatts-hora produzidos é conseguida pelo somatório da produção mensal dos três coletores. O valor obtido foi, então, multiplicado pelo preço unitário do quilowatt-hora, e tal produto passa a representar a economia mensal associada ao uso da energia solar. O método de *payback* simples forneceu o resultado mostrado na Tabela 16.

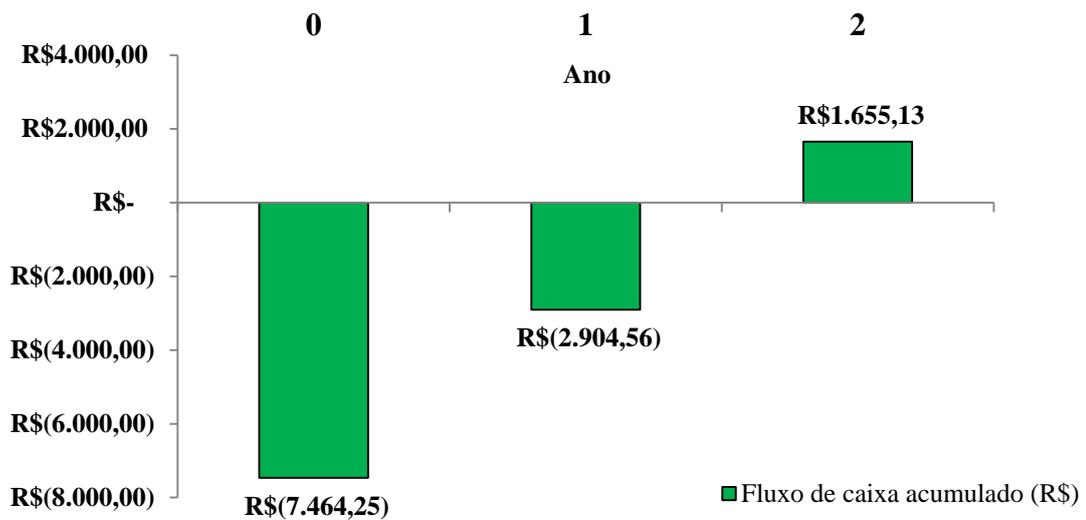
Tabela 14: Análise de viabilidade econômica por *payback* simples.

Análise de viabilidade econômica	
Produção média mensal dos coletores (kWh/mês)	457,8
Preço do kWh (R\$)	0,83
Economia mensal (R\$)	379,97
Investimento inicial (R\$)	7464,25
Payback simples (meses)	19,64
Payback simples (anos)	1,64

Fonte: Próprio autor.

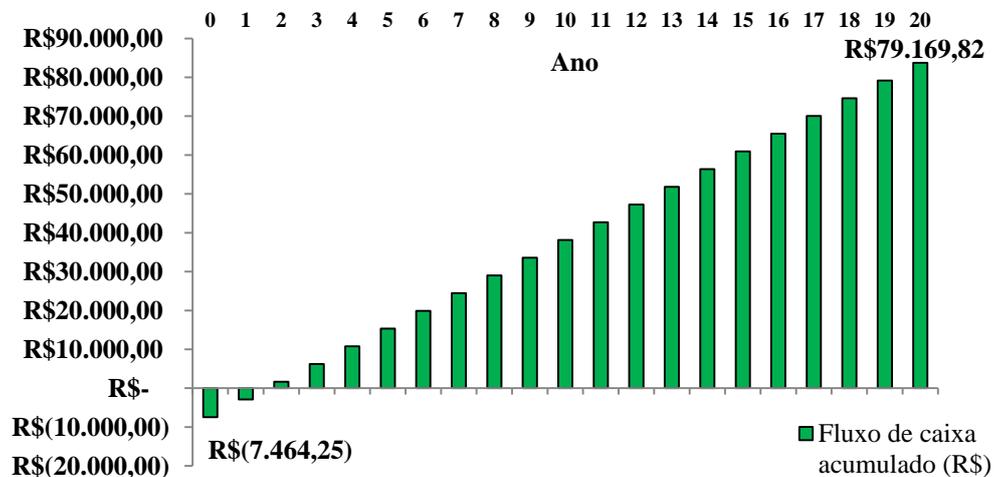
O resultado obtido implica que o investimento inicial pode ser pago em 1,64 anos para o valor de tarifa comum adotado (Figura 45). Com base no fabricante SOLAREM™ (2018), o tempo de vida útil de um sistema de aquecimento solar é, em média, 20 anos. Dessa forma, o fluxo de caixa acumulado foi projetado para esse intervalo de tempo (Figura 46).

Figura 45: Fluxo de caixa acumulado após o tempo de *payback*.



Fonte: Próprio autor.

Figura 46: Fluxo de caixa acumulado ao longo do tempo de investimento.

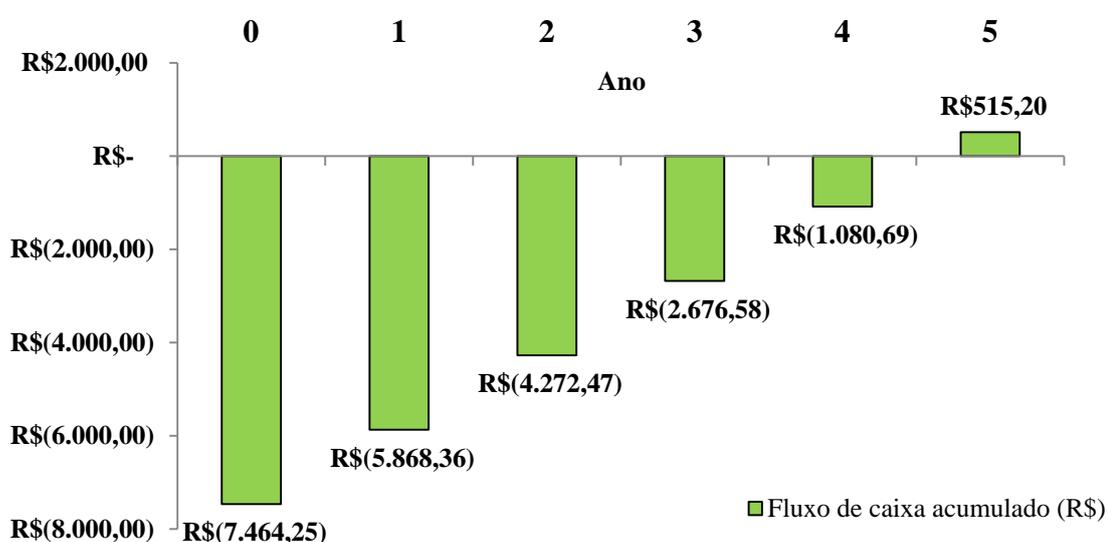


Fonte: Próprio autor.

Para o cálculo do valor presente líquido e TIR, foi utilizada a taxa Selic em vigor no ano de 2018, calculada pelo Copom (Comitê de Política Monetária) – 6,5% - como valor de referência para a taxa mínima de atratividade. O resultado, para as condições mostradas, é um VPL de R\$ 42.776,71 no vigésimo ano, e um TIR de 61 %. O primeiro valor é maior que zero, fato que, dentro da análise de VPL, classifica o investimento como atrativo. O índice TIR, por sua vez, significa o percentual de ganho, a cada ano, de que dispõe o investidor, concomitantemente à recuperação do investimento inicial. Uma vez que esse índice é superior à taxa mínima de atratividade, o retorno financeiro do projeto mostra-se atrativo para as condições estabelecidas.

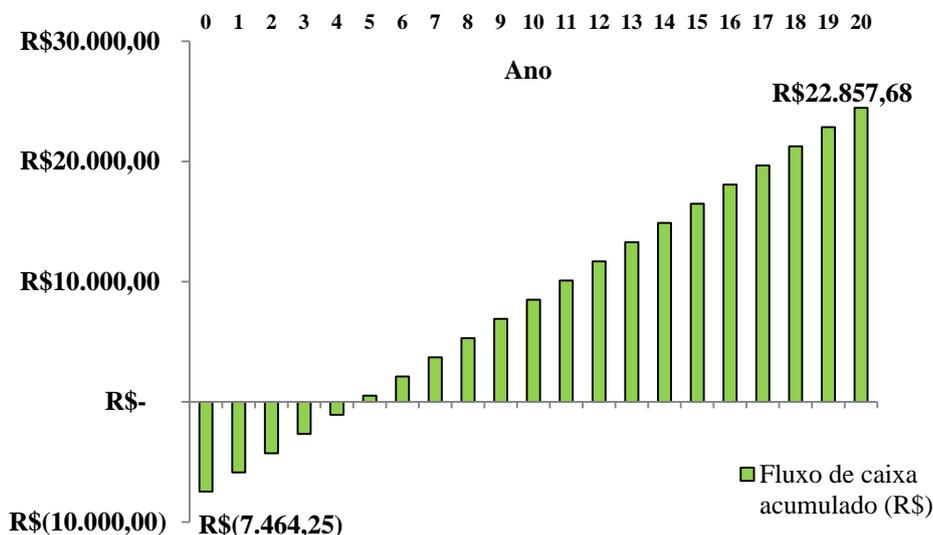
Uma vez que a CASA NORDESTE 1.0 visa atender as necessidades de uma população predominantemente em situação de baixa renda, a análise anterior foi replicada para uma situação na qual os consumidores fazem uso da tarifa popular oferecida pela ENERGISA™. Para zonas rurais e locais de maior vulnerabilidade socioeconômica, a empresa oferece descontos entre 10-65% na tarifa comum para usuários de até 220 kWh mensais. O caso extremo inferior foi tomado como referência, o que implica em uma tarifa reajustada de R\$ 0,29. Os gráficos de fluxo de caixa acumulado para essa condição estão mostrados nas Figuras 47 e 48.

Figura 47: Fluxo de caixa acumulado para tarifa popular de energia.



Fonte: Próprio autor.

Figura 48: Fluxo de caixa acumulado para tarifa popular de energia ao longo do tempo.

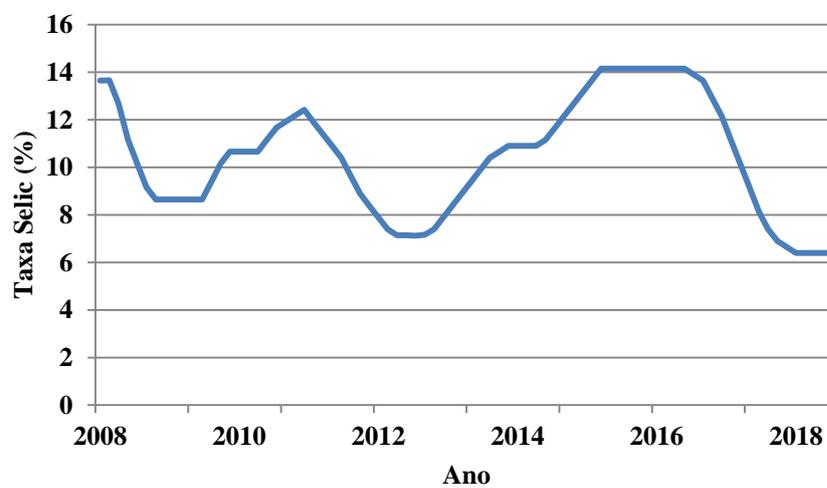


Fonte: Próprio autor.

Os valores de VPL e TIR calculados foram, respectivamente, R\$ 10.120,08 e 21 %. Observa-se que, no caso de tarifa para baixa renda, o investimento demora aproximadamente o triplo do tempo para ser pago em relação ao caso de tarifa comum, ou seja, 4,68 anos. Esse resultado é esperado, que o consumidor de baixa renda paga um valor mensal de energia de apenas 35% do valor comum e, portanto, o investimento em uma tecnologia capaz de reduzir ainda mais esse custo torna-se menos atrativa. Vale salientar que, ainda que o tempo de *payback* para o segundo caso seja estendido, ele ainda pode gerar um fluxo de caixa acumulado positivo por 13 anos, com base no tempo de vida médio do sistema.

É possível adotar uma taxa Selic média entre os anos de 2008 e 2018, a fim de amenizar flutuações econômicas. A Figura 49 mostra as flutuações da taxa Selic nos últimos 10 anos, de acordo com o Banco Central do Brasil (2018). O valor médio para este período é de 10,45%. Dessa forma, o novo cálculo do VPL fornece, ao fim do período de investimento, o valor de R\$ 30.191,84 para a tarifa de R\$ 0,83, e R\$ 5.715,38 para a tarifa de baixa renda, R\$ 0,29. Verifica-se que estes valores de VPL são indicativos de atratividade do investimento para ambos os casos.

Figura 49: Flutuação da taxa Selic.



Fonte: Banco Central do Brasil (2018). Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/pt-br/#!/c/COPOMJUROS/>>.

Acesso em: 8 de nov. de 2018.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O dimensionamento do sistema de aquecimento solar foi realizado, especialmente, com base na nas Normas NBR 15569 (2008) e NBR 5626 (1998), cujas especificações técnicas são resultado do trabalho de muitos profissionais da Engenharia. Do ponto de vista térmico, o sistema se mostrou adaptativo em relação ao posicionamento dos coletores, fato que viabiliza sua aplicação nas possíveis condições de construção da CASA NORDESTE 1.0 no Solar Decathlon Latin and Caribbean 2019.

A alocação dos coletores foi executada com bastante facilidade, sem a necessidade de grandes adaptações. Já a alocação dos reservatórios térmicos exigiu maior cautela, uma vez que o espaço disponível – para o sistema e para a construção da casa em geral – apresenta limitações. De fato, o uso de tubulações pode se tornar mais eficiente quando se dispõe de maior grau de liberdade na estrutura de apoio. A altura manométrica dos reservatórios, por sua vez, mostrou apresentar pressões estáticas suficientes nos pontos de consumo, embora uma avaliação mais profunda do ramal de entrada seja necessária – suas perdas de carga e alocação de curvas. Tal procedimento pode ser passível de análise experimental e fica como proposta de trabalho aos estudantes membros da equipe Casa Nordeste.

A alocação das tubulações exigiu o uso de, no máximo, 2,4 metros sem curvas. Embora as curvas sejam, capazes de absorver dilatações térmicas, é importante que seja realizado um estudo mais aprofundado dessas dilatações no CPVC, a fim se aplicar juntas de expansão – se necessário – em alguns pontos, ou mesmo ter uma caracterização mais precisa dos elementos de conexão da tubulação com a estrutura da CASA NORDESTE 1.0.

Durante a execução deste projeto, não foi possível avaliar, a partir de uma base teórica firme, a viabilidade de um modelo específico de bomba centrífuga para a recirculação da água. Apesar de modelos de bombas de baixa potência (entre $\frac{1}{4}$ e 1 cv) serem observados na prática, a avaliação precisa do ponto de funcionamento e eficiência desse equipamento exige um conhecimento aprofundado da natureza das perdas de carga nos circuitos de aspiração e recalque. Uma modelagem - analítica ou numérica - para este e outros casos que envolvam a queda de pressão em variados modelos de coletores solares ligados em paralelo é uma proposta para trabalhos futuros.

A avaliação das perdas térmicas nos coletores e circuitos de recirculação de água também foi simplificada pela recomendação da NBR 15569 (2008), na qual as perdas

representam 15 % da energia útil produzida pelo coletor. É possível desenvolver modelos matemáticos para estimativas mais precisas. O ponto de funcionamento do coletor solar – em termos de eficiência – foi considerado como o ponto médio, o que pode divergir do valor real em função das características de funcionamento (como a temperatura de entrada da água).

O presente trabalho foi capaz de assentar os equipamentos do sistema de aquecimento solar, e embasar decisões importantes acerca dos materiais das tubulações, marcas e características dos *boilers* e coletores, além de trazer uma proposta para um sistema de aquecimento residencial que apresenta características evolutivas. A rentabilidade do investimento para duas situações de renda foi também comprovada.

REFERÊNCIAS

A ATUAL. **Manual de instalação e uso: Sistema de aquecimento solar.** Disponível em: <<http://aactual.com.br/manual-de-instalacao-e-uso/>>. Acesso em: 28 ago. de 2018.

ALCINES, C.; KRENZINGER, L.; SOARES, L.; **Comparação entre o desempenho de um coletor híbrido térmico fotovoltaico com um coletor plano e um módulo fotovoltaico convencional.** Laboratório de Energia Solar, Escola de Engenharia da Universidade do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, 2016. 230 p.

ARCHITECTURE 00. **Wikihouse at NYC Maker Faire.** Disponível em: <<http://www.architecture00.net/news/3251>>. Acesso em: 28 ago. de 2018.

ARRUDA, Laerte Bernardes. **Operação de sistemas de aquecimento solar com controle de vazão em coletores planos.** Tese (doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Civil e Construção. São Paulo, SP, 2004. 250p.

ASSIS, Rafael Ferreira Alves de. **Projeto de um Anemômetro Térmico Baseado em Termistor NTC com Modelo Linearizado por Realimentação.** Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação. Natal, RN, 2018. 73p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15569: **Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto** – Projeto e instalação. Rio de Janeiro, 2008. 36p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5626: **Instalação predial de água fria.** Rio de Janeiro, 1998. 41p.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Taxa Selic: Meta.** Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/htms/copom/not20180801216.pdf>>. Acesso em: 24 out. de 2018.

BANCO CENTRAL DO BRASIL.. **Histórico da taxa Selic.** Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/pt-br/#!/c/COPOMJUROS/>>. Acesso em: 8 de nov. de 2018.

BAPTISTA, Alessandra Sleman Cardorso. **Análise de viabilidade econômica da utilização de aquecedores solares de água em resorts no Nordeste do Brasil.** Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2006. 171 p.

ÇENGEL, Yunus A. **Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações**. 4 ed. Porto Alegre: Editora AMGH Ltda., 2011.

ÇENGEL, Yunus A. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. 3 ed. Porto Alegre: Editora AMGH Ltda., 2015.

CITISYSTEMS. **Sensores de temperatura**. Disponível em: < <https://www.citisystems.com.br/sensor-de-temperatura/>>. Acesso em: 18 set. de 2018.

DANCOR. **Catálogo geral de produtos**. Disponível em:< http://www.dancor.com.br/dancor-site-novo/public/uploads/catalogo_geral/catalogo_geraleral-2014.pdf>. Acesso em: 14 out. de 2018.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, J. **Solar engineering of termal processes**. 3 ed. John Wilay & Sons, 2006.

ENERGY DESIGN TOOLS. **New non-residential energy tool SBEED 1.0 released**. Disponível em: < <http://www.energy-design-tools.aud.ucla.edu/>>. Acesso em: 7 set. de 2018.

EPEX. **Tubo em polietileno expandido**. Disponível em: < <http://www.epexind.com.br/produtos/isolamento-termico/tubex/>>. Acesso em: 12 out. de 2018.

FULL GAUGE. **Termostato diferencial para aquecimento solar**. Disponível em: , <http://www.fullgauge.com.br/produto-microsol>>. Acesso em: 17 set. de 2018.

HIBBELER, Russel Charles. **Mecânica dos fluidos**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.

INCROPERA, Frank P. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 6 ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2008.

INMETRO. **PBE - Coletor solar aplicação em banho e piscina**. Disponível em: < <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/coletores-solares-banho-e-piscina.pdf>>. Aceso em: 10 out. de 2018.

INMETRO. **Sistemas e equipamentos para aquecimento solar de água**. Disponível em: < http://www.inmetro.gov.br/consumidor/produtosPBE/regulamentos/SistemasSolarPBE_rev07.pdf>. Acesso em: 8 out. de 2018.

INTERACADEMY COUNCIL. **Lighting the way: toward a sustainable energy future**. Copyright InterAcademy Council, 2007.

KLUPPEL, Rogério Pinheiro. **Curso de conversão Térmica da Energia Solar**. João Pessoa, 2016.

KREITH, Frank. **Principles of Heat Transfer**, 7 ed. Stanford: Cengage Learning, 2011.

MACINTYRE, Joseph A. **Manual de instalações hidráulicas e sanitárias**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan S.A., 1990.

ROSA, Aldo Vieira da. **Processos de energias renováveis**, 3 ed. Rio de Janeiro: Editora Elsevier, 2015.

SOARES, Thiago Costa; LOPES, Lucas Sabioni; CUNHA, Dênis Antônio. **A eficiência do consumo residencial de energia elétrica no Brasil**. *Revista Economia Aplicada*, v.29, n.3, 2017, p.503-523.

SOLAR DECATHLON 2017. **Solar Decathlon Contests**. Disponível em: <<https://www.solardecathlon.gov/2017/competition-contests.html>>. Acesso em: 22 ago. de 2018.

SOLAREM. **Qual a tubulação ideal para um sistema de aquecimento solar?** Disponível em: <<http://www.aquecedorsolaragua.com.br/blog/qual-e-a-tubulacao-ideal-para-sistema-de-aquecimento-solar/>>. Acesso em: 19 out. de 2018.

SOLETROL. **Como funciona o aquecedor solar de água Soletrol**. Disponível em: <<http://www.soletrol.com.br/extras/como-funciona-o-aquecedor-solar-soletrol/>>. Acesso em: 2 set. de 2018.

TIGRE. **AQUATHERM: Catálogo técnico**. Disponível em: <<https://www.tigre.com.br/themes/tigre2016/downloads/catalogos-tecnicos/ct-aquaterm.pdf>>. Acesso em: 2 out. de 2018.

WHITEBOX TECHNOLOGIES. **Wheater data for energy calculations**. Disponível em: <<http://weather.whiteboxtechnologies.com/>>. Acesso em: 2 set. de 2018.

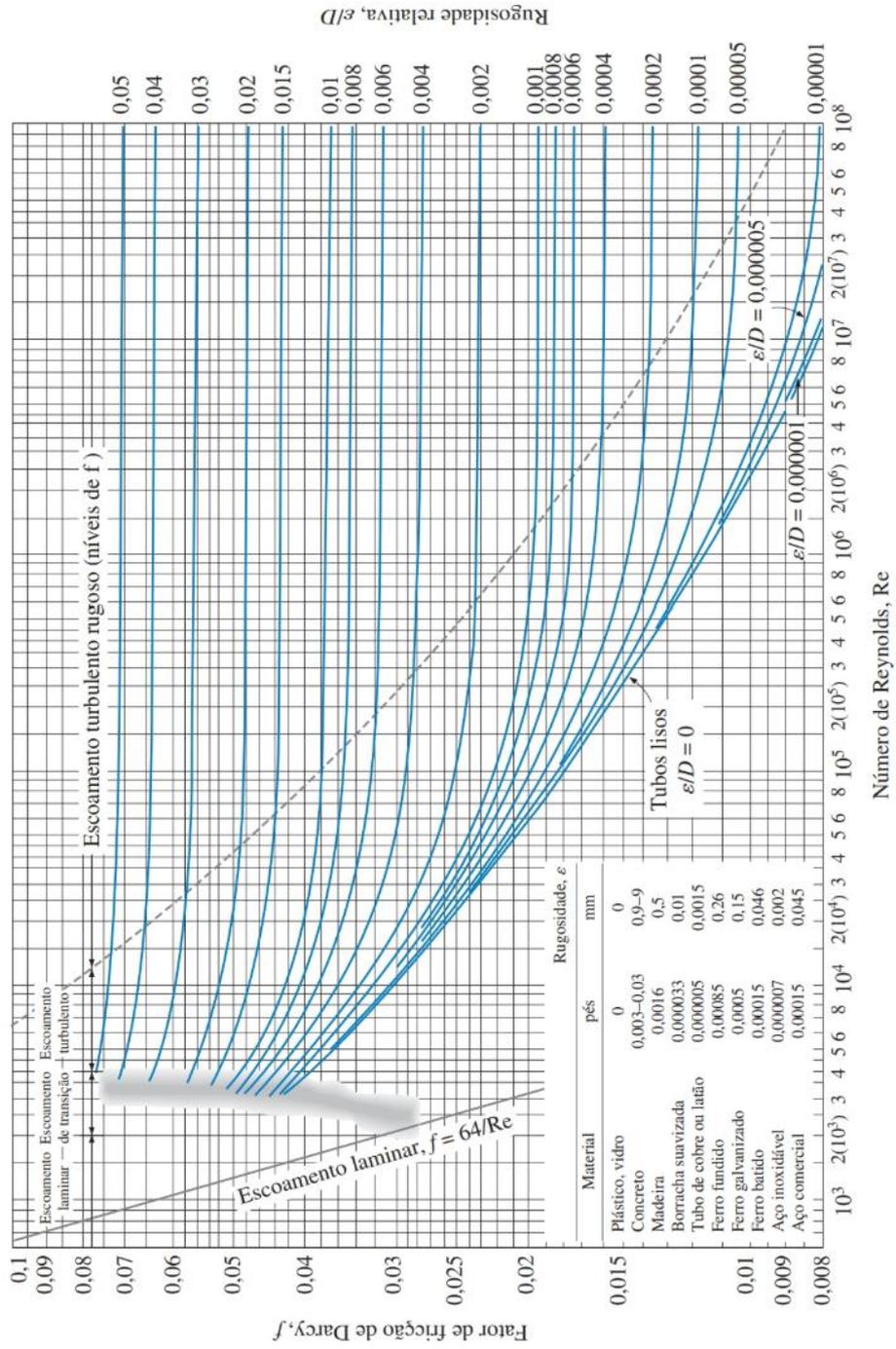
APÊNDICES

APÊNDICE A - Orçamento do projeto

Item	Material	Quantidade	Marca	Preço (unid.)	TOTAL
Tê misturador aquatherm (3/4")	CPVC	2	TIGRE	20,90	41,80
Registro de gaveta para CPVC (28 mm)	Cromo	3	DECA	64,00	192,00
Registro de gaveta para CPVC (22 mm)	Cromo	12	DECA	37,70	452,40
Válvula de retenção vertical (3/4")	Latão/inox	1	WOG	31,90	31,90
Válvula de retenção (1")/(28 mm)	PVC	1	TIGRE	32,20	32,20
Conector roscável (3/4")	CPVC	2	TIGRE	18,90	37,80
Luva de transição roscável (1"x28 mm)	CPVC	4	TIGRE	15,10	60,40
Luva de transição roscável (3/4"x22 mm)	CPVC	6	TIGRE	9,10	54,60
Joelho 90° (28 mm)/(1")	CPVC	10	TIGRE	7,60	76,00
Joelho 90° (22 mm)/(3/4")	CPVC	28	TIGRE	3,30	92,40
Joelho 45° (22 mm)/(3/4")	CPVC	2	TIGRE	3,65	7,30
Registro de chuveiro para misturador (3/4")	CPVC	1	TIGRE	39,90	39,90
Tê (28 mm)/(1")	CPVC	1	TIGRE	7,50	7,50
Tê (22 mm)/(3/4")	CPVC	12	TIGRE	3,80	45,60
Joelho 90° de transição roscável (22 mm)/(3/4")	CPVC	4	TIGRE	10,00	40,00
Tubo (28 mm)/(1")	CPVC	4,758	TIGRE	54,90	109,80
Tubo (22 mm)/(3/4")	CPVC	26,274	TIGRE	30,90	278,10
Adaptador de caixa d'água (1")	CPVC	1	TIGRE	17,25	17,25
Isolamento para tubo (22 mm)	EPE	8,492	EPEX	12,00	60,00
Válvula eliminadora de ar (3/4")	n/a	1	EMMETI	80,00	80,00
Boiler 200 l	Inox 304	2	A ATUAL	1500,00	3000,00
Coletor solar 1,80 m2	Alumínio	2	HELIOTEK	1065,00	2130,00
Fita de fixação	Inox	1	ALL AÇO	34,30	34,30
Controlador MICROSOL	-	1	FULL GAUGE	225,00	225,00
Sensor SB59	-	1	NTC	70,00	70,00
Sensor SB41	-	1	NTC	27,00	27,00
Poço termométrico	Latão	2	BSP	26,50	53,00
Tê de transição (22 mm-1/2")	CPVC	2	TIGRE	9,00	18,00
Bomba centrífuga (1/4 cv)	-	1	FERRARI	150,00	150,00
TOTAL					7464,25

ANEXOS

ANEXO A: Diagrama de Moody



ANEXO B - Valores sugeridos pela NBR 15569 para consumo diário de água quente

Peças	Consumo mínimo	Consumo máximo	Ciclo diário (minuto/pessoa)	Temperatura de consumo (°C)
Ducha de banho	3,0 L/min	15,0 L/min	10	39-40
Lavatório	3,0 L/min	4,8 L/min	2	39-40
Ducha higiênica	3,0 L/min	4,8 L/min	2	39-40
Banheira	80 L	440 L	banho	39-40
Pia de cozinha	2,4 L/min	7,2 L/min	3	39-40
Lava-louças (12 pessoas)	20 L	20 L	ciclo de lavagem	39-50
Máquina de lavar roupa	90 L	200 L	ciclo de lavagem	39-40

ANEXO C - Comprimentos equivalentes para peças de PVC ou cobre (NBR 5626)

DIÂMETRO NOMINAL	JOELHO 90°	JOELHO 45°	CURVA 90°	CURVA 45°	TÊ 90° PASSAGEM DIRETA	TÊ 90° SAÍDA DE LADO	TÊ 90° SAÍDA BILATERAL	ENTRADA NORMAL	ENTRADA DE BORDA	SAÍDA DE CANALIZ.	VÁLVULA DE PÉ E CRIVO	VALV. RETENÇÃO		REGISTRO GLOBO ABERTO	REGISTRO GAVETA ABERTO	REGISTRO ANGULO ABERTO
												TIPO LEVE	TIPO PESADO			
DN (Rø) (-)																
mm																
15 (1/2)	1,1	0,4	0,4	0,2	0,7	2,3	2,3	0,3	0,9	0,8	8,1	2,5	3,6	11,1	0,1	5,9
20 (3/4)	1,2	0,5	0,5	0,3	0,8	2,4	2,4	0,4	1,0	0,9	9,5	2,7	4,1	11,4	0,2	6,1
25 (1)	1,5	0,7	0,6	0,4	0,9	3,1	3,1	0,5	1,2	1,3	13,3	3,8	5,8	15,0	0,3	8,4
32 (1 1/4)	2,0	1,0	0,7	0,5	1,5	4,6	4,6	0,6	1,9	1,4	15,5	4,9	7,4	22,0	0,4	10,5
40 (1 1/2)	3,2	1,3	1,2	0,6	2,2	7,3	7,3	1,0	2,3	3,2	18,3	6,8	9,1	35,8	0,7	17,0
50 (2)	3,4	1,5	1,3	0,7	2,3	7,6	7,6	1,5	2,8	3,3	23,7	7,1	10,8	37,9	0,8	18,5
60 (2 1/2)	3,7	1,7	1,4	0,8	2,4	7,8	7,8	1,6	3,3	3,5	25,0	8,2	12,5	38,0	0,9	19,0
75 (3)	3,9	1,8	1,5	0,9	2,5	8,0	8,0	2,0	3,7	3,7	26,8	9,3	14,2	40,0	0,9	20,0
100 (4)	4,3	1,9	1,6	1,0	2,6	8,3	8,3	2,2	4,0	3,9	28,6	10,4	16,0	42,3	1,0	22,1
125 (5)	4,9	2,4	1,9	1,1	3,3	10,0	10,0	2,5	5,0	4,9	37,4	12,5	19,2	50,9	1,1	26,2
150 (6)	5,4	2,6	2,1	1,2	3,8	11,1	11,1	2,8	5,6	5,5	43,4	13,9	21,4	56,7	1,2	28,9

ANEXO D - Vistas renderizadas da CASA NORDESTE 1.0



