



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MARCELO DALMÉDICO IORIS

**VIABILIDADE ECONÔMICA DE SISTEMA PARA REDUÇÃO DO DESPERDÍCIO
DE ÁGUA EM SISTEMAS PREDIAIS DE ÁGUA QUENTE: UM ESTUDO DE CASO
EM EDIFICAÇÕES MULTIFAMILIARES**

FLORIANÓPOLIS

2021

MARCELO DALMÉDICO IORIS

**VIABILIDADE ECONÔMICA DE SISTEMA PARA REDUÇÃO DO DESPERDÍCIO
DE ÁGUA EM SISTEMAS PREDIAIS DE ÁGUA QUENTE: UM ESTUDO DE CASO
EM EDIFICAÇÕES MULTIFAMILIARES**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Eneir Ghisi, PhD

FLORIANÓPOLIS

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Ioris, Marcelo Dalmédico
VIABILIDADE ECONÔMICA DE SISTEMA PARA REDUÇÃO DO
DESPERDÍCIO DE ÁGUA EM SISTEMAS PREDIAIS DE ÁGUA QUENTE :
UM ESTUDO DE CASO EM EDIFICAÇÕES MULTIFAMILIARES / Marcelo
Dalmédico Ioris ; orientador, EneDir Ghisi, 2021.
201 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Aquecedor de passagem a gás. 3.
Economia de água. 4. Água fria. 5. Água quente. I. Ghisi,
EneDir. II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Marcelo Dalmédico Ioris

Viabilidade econômica de sistema para redução do desperdício de água em sistemas prediais de água quente: um estudo de caso em edificações multifamiliares

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof^a Andreza Kalbusch, Dr^a
Universidade do Estado de Santa Catarina

Prof. Orestes Marraccini Gonçalves, Dr.
Universidade de São Paulo

Prof. Saulo Gúths, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Prof. Philippe Jean Paul Gleize, Dr.
Coordenador do Programa

Prof. Enedir Ghisi, PhD.
Orientador

Florianópolis, 09 de julho de 2021

AGRADECIMENTOS

Ao professor Enedir Ghisi, por ter me conduzido e orientado ao longo destes dois anos e, durante este período, ter paciência, compreensão e disposição para sanar todos os questionamentos e desafios deste trabalho.

Aos professores participantes da banca de defesa deste trabalho, que enriqueceram o conteúdo da pesquisa.

Aos profissionais Leonardo Winter Pereira, Jonas Ariel Berner, Ricardo Felipe Junckes, Matheus Körbes Bracht, Victor Leibnitz Hipólito, por prestarem auxílio na utilização de *softwares* de grande importância para a elaboração deste trabalho.

Ao professor Gustavo Jorge dos Santos, por ter concedido acesso a laboratórios e equipamentos para condução de experimentos.

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil.

Aos meus pais, Ivan e Magali, por me proporcionarem condições para que eu sempre tivesse uma educação de qualidade e por sempre me apoiarem em todas as decisões que tomei ao longo da minha formação pessoal e acadêmica.

Aos meus irmãos, Matheus e Lisiane, que por maior que fosse a distância entre nós, sempre se fizeram presentes em minha vida.

A todos aqueles que colaboraram com as pesquisas *in loco*.

E, finalmente, a Evelyn e a todos que me incentivaram na realização deste trabalho e apostaram na ideia proposta neste trabalho.

RESUMO

Em residências que possuem aquecedores de passagem a gás para o aquecimento da água, há desperdício de água no início da utilização dos aparelhos sanitários. O objetivo geral deste trabalho é verificar a viabilidade econômica ao implementar um sistema automatizado nos pontos de consumo de água quente das edificações que reduz o desperdício de água dos instantes iniciais de uso. Para quantificar este desperdício foram realizadas medições *in loco* em catorze residências. A conformação e funcionamento do sistema baseiam-se nas características dos sistemas prediais elaborados conforme as normas brasileiras. Para verificar o funcionamento do sistema, um protótipo foi construído. Dos resultados das medições foi estimado o potencial de economia de água que seria desperdiçada. E a partir da construção do protótipo estimaram-se os custos com componentes hidráulicos e eletrônicos. Ambas as estimativas fundamentam uma análise econômica comparativa entre a instalação do sistema automatizado proposto e de um sistema de recirculação individual em um estudo de caso para um edifício multifamiliar. Foram realizadas nove análises econômicas diferentes variando-se o potencial de economia de água e o tipo de sistema para obter o Valor Presente Líquido, a Taxa Interna de Retorno e o *payback* descontado. Verificou-se que para variar significativamente a temperatura da água que sai dos aparelhos desperdiça-se, em média, 4 litros de água. Por meio do protótipo foi validado o algoritmo do sistema e constatado redução no desperdício ao redirecionar a água fria antes do consumo de água quente. As análises comprovaram que o sistema proposto é mais viável que os sistemas de recirculação individual usualmente empregados. O sistema proposto reduz o desperdício de água se mostrando viável ao proporcionar um potencial diário de economia de água de pelo menos 5,3%. O emprego do sistema é fortemente dependente dos pré-requisitos observados na edificação onde será instalado. Custos de instalação devem ser cautelosamente orçados para que o sistema se mostre viável economicamente. Os resultados desta pesquisa servem como guia para realização de análise econômica de sistemas de recirculação e elaboração do sistema proposto em edificações multifamiliares com diferentes *layouts* arquitetônico e estrutural.

Palavras-chave: Aquecedor de passagem a gás. Economia de água. Reservatório inferior de água potável. Água fria. Água quente. Viabilidade econômica.

ABSTRACT

In homes that have instantaneous gas heaters to heat water, cold water is wasted in the first seconds of using hot water fixtures. The main objective of this work is to verify the economic feasibility of implementing an automated system integrated to the hot water fixtures of buildings that reduces the waste of water from the initial moments of use. In order to quantify such waste of water, measurements were carried out in fourteen homes. The conformation of the system was suggested based on the characteristics of the water building systems designed according to Brazilian standards. In order to verify the functioning of the proposed automated system, a prototype was built. From the results of the measurements, it was possible to estimate the potential for saving water that would be wasted. And from the construction of the prototype, it was possible to estimate the costs with piping and electronic components. Both estimates were used to perform a comparative economic analysis between the installation of the proposed automated system and an individual recirculation system in a case study for a multifamily building. Altogether nine different economic analyses were carried out, varying the water saving potential and the type of recirculation system to obtain the Net Present Value, Internal Rate of Return and discounted payback. In order to have a significant variation in the temperature of the water that flows out the water fixtures it was verified that, on average, 4 litres of water is wasted. By using the prototype, it was possible to validate the algorithm of the automated system and verify a reduction in water waste by redirecting cold water before hot water consumption. It was verified in all analyses that the proposed system is more viable than the traditionally used individual recirculation system. The proposed system reduces waste of water in domestic hot water systems, proving viable by providing a daily water savings potential of at least 5.3%. The use of the system is strongly dependent on requirements observed in the building where it would be installed. Costs for installation-related services must be carefully budgeted for the system to be economically feasible. The results of this research serve as a guide to carry out an economic analysis of recirculation systems and development of the proposed system in multifamily buildings with different architectural and structural layouts.

Keywords: Instantaneous gas heater. Water savings. Potable water storage tank. Cold water. Hot water. Economic feasibility.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Usos finais de água (em porcentagem e em litros/hab.dia) nas residências dos países da América do Norte.	20
Figura 1.2 - Distribuição dos tipos de aquecimento de água para residências brasileiras em 2015 e uma previsão para 2024.....	20
Figura 1.3 - Distribuição dos tipos de fonte energética utilizadas para o aquecimento de água residencial nos Estados Unidos.	22
Figura 1.4 – Curva de carga horária.....	23
Figura 1.5 – Consumo de energia elétrica por equipamento residencial em 2019 e previsão para 2030.....	23
Figura 2.1 - Uso de energia das composições de estratégias simuladas.....	37
Figura 2.2 - Consumo de energia em função da vazão no banho.....	37
Figura 2.3 - Configuração típica de sistema em tronco e ramais.	40
Figura 2.4 - Traços de vazões identificados em um período de duas horas.	42
Figura 2.5 - Identificação das perdas no evento de um banho.....	43
Figura 2.6 - Evento de um banho com dados de vazão e temperatura ao longo do tempo.	43
Figura 2.7 - Histograma da distribuição de desperdício nos banhos.....	45
Figura 2.8 - Desperdício estrutural e comportamental.	47
Figura 2.9 - Distribuição dos eventos ShowerStart (N=574).	48
Figura 2.10 - Preenchimento da tubulação com água quente conforme a vazão.....	49
Figura 2.11 - Configuração da instalação do sistema Taco Genie.	55
Figura 2.12 - Componentes do sistema Chilipepper CP2011.....	56
Figura 2.13 - Válvula evolve ShowerStart TSV ³	57
Figura 2.14 – Sistema recirculador Smartstart.	57
Figura 2.15 - Coletor Ecobanho FORTLEV.....	58
Figura 2.16 - Kit Rewatt.....	59

Figura 3.1 - Fluxograma dos métodos.....	64
Figura 3.2 – Sensor de temperatura DS18B20.	65
Figura 3.3 – Equipamentos utilizados para os ensaios.	66
Figura 3.4 – Medição da temperatura da água na saída do aparelho sanitário por meio do sensor DS18B20.	70
Figura 3.5 - Fluxograma da pesquisa de campo.	71
Figura 3.6 - Planta baixa de sistema predial de água fria e água quente usual.	73
Figura 3.7 - Esquema vertical de sistema predial de água fria e água quente usual.	73
Figura 3.8 - Conexão da tubulação que coleta água fria dos pontos de consumo de água quente no reservatório inferior de água potável da edificação.	75
Figura 3.9 – Curva de vazão de um chuveiro.....	77
Figura 3.10 - Circuito eletrônico da ideia proposta.	79
Figura 3.11 - Esquema da conformação hidráulica do protótipo do sistema automatizado proposto.	81
Figura 3.12 - Esquema da conformação eletrônica do protótipo do sistema automatizado proposto.	82
Figura 3.13 – Esquema dos fluxos de caixa.....	84
Figura 3.14 – Vista tridimensional do Edifício Palmas Central.	85
Figura 3.15 – Vista tridimensional do projeto hidráulico do Edifício Palmas Central.	86
Figura 3.16 – Vista tridimensional do projeto hidráulico do modelo arquitetônico 1.	87
Figura 3.17 – Vista tridimensional do projeto hidráulico do modelo arquitetônico 2.	87
Figura 3.18 – Vista tridimensional do projeto hidráulico do modelo arquitetônico 3.	88
Figura 3.19 – Fluxograma dos métodos.....	104
Figura 4.1 – Crescimento da temperatura medida pelos sensores DS18B20 ao longo do tempo.	105
Figura 4.2 – Temperatura e volume de água desperdiçado ao longo do tempo após o acionamento da torneira do tanque do apartamento 1.....	109

Figura 4.3 - Temperatura e volume de água desperdiçado ao longo do tempo após o acionamento da torneira do tanque do apartamento 4.....	111
Figura 4.4 - Temperatura e volume de água desperdiçado ao longo do tempo após o acionamento da torneira do banheiro da casa 1.	112
Figura 4.5 - Temperatura e volume de água desperdiçado ao longo do tempo após o acionamento da torneira do tanque da casa 1.	113
Figura 4.6 - Planta baixa do sistema predial de água fria e água quente da ideia proposta.	114
Figura 4.7 - Esquema vertical do sistema predial de água fria e água quente da ideia proposta.	114
Figura 4.8 - Esquema do sistema predial da ideia proposta.	116
Figura 4.9 – Instalação hidráulica do protótipo.....	117
Figura 4.10 – Instalação eletrônica do protótipo.....	117
Figura 4.11 – Aumento e diminuição da temperatura nos pontos de consumo do protótipo (Medição 1).	118
Figura 4.12 – Variação da temperatura nos pontos de consumo do protótipo (Medição 1).	119
Figura 4.13 – Volume de água liberado para a temperatura da água no ponto de consumo atingir 30°C.	120
Figura 4.14 – Variação da temperatura no ponto de consumo 1 do protótipo.....	121
Figura 4.15 – Variação da temperatura na saída do ponto de consumo 1 do protótipo.	121
Figura 4.16 – Planta isométrica indicando a tubulação de retorno e o ponto de instalação do painel de comando do sistema de recirculação individual para o Modelo 1.....	124
Figura 4.17 – Planta isométrica com adaptação do sistema automatizado proposto para o modelo arquitetônico 1.	127
Figura 4.18 – Temperatura da água de um trecho vertical conectado a um trecho horizontal com fluxo de água quente.....	134

Figura 4.19 – Instalação eletrônica para verificação do consumo energético do protótipo.	136
Figura 4.20 – Relação entre VPL e potencial de economia de água.....	143
Figura 4.21 – Despesas do sistema de recirculação individual (manutenção a cada seis meses).	144
Figura 4.22 – Despesas do sistema de recirculação individual (manutenção a cada doze meses).....	144
Figura 4.23 – Despesas do sistema de recirculação proposto (manutenção a cada seis meses).	145

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Domicílios que aquecem água com gás.....	26
Tabela 2.1 - Consumo de água per capita em Florianópolis.	32
Tabela 2.2 - Uso final de água tratada para consumo.....	33
Tabela 2.3 - Uso final de água tratada para consumo doméstico em duas residências unifamiliares localizadas no município de Palhoça/SC.	34
Tabela 2.4 - Consumo anual de energia no setor de água da Holanda.	35
Tabela 2.5 - Consumo de energia para aquecimento de água.....	39
Tabela 2.6 - Uso e desperdício de água em cinco banhos analisados.	45
Tabela 2.7 - Desperdício comportamental em função da vazão do chuveiro.	46
Tabela 2.8 - Economia de água estimada para cada residência de Palo Alto - Califórnia.	50
Tabela 2.9 - Comparação do volume de água desperdiçado mensurado em planta e medido <i>in loco</i>	51
Tabela 2.10 - Uso e desperdício de energia em cinco banhos analisados.	53
Tabela 2.11 - Economia de energia elétrica por meio da utilização da válvula <i>evolve ShowerStart</i>	54
Tabela 3.1 – Características dos modelos arquitetônicos do Edifício Palmas Central.	85
Tabela 3.2 – Ciclo diário de consumo de água quente em cada aparelho sanitário.	98
Tabela 3.3 - Característica das análises econômicas.	103
Tabela 4.1 – Dados obtidos com ensaio de precisão para os sensores.	106
Tabela 4.2 - Volume de água fria desperdiçada nas medições <i>in loco</i>	107
Tabela 4.3 – Quantitativo para instalação do sistema de recirculação individual para cada modelo arquitetônico.	125
Tabela 4.4 – Quantitativo para instalação do sistema de recirculação individual para o Edifício Palmas Central.	126

Tabela 4.5 – Orçamento dos custos com mão de obra.....	126
Tabela 4.6 – Quantitativo para instalação do sistema de recirculação proposto para cada modelo arquitetônico.	128
Tabela 4.7 – Quantitativo de tubulação adicional externa.....	129
Tabela 4.8 – Quantitativo para instalação do sistema de recirculação proposto para o Edifício Palmas Central.	129
Tabela 4.9 – Reajustes aplicados nos valores de tarifa cobrados pela CELESC (2013-2020).....	131
Tabela 4.10 – Custo do quilowatt-hora para cada ano da análise econômica.	132
Tabela 4.11 – Custo semestral com manutenção.	132
Tabela 4.12 – Consumo energético do sistema de recirculação individual por apartamento.	135
Tabela 4.13 – Nova estrutura tarifária da CASAN.....	137
Tabela 4.14 – Reajustes aplicados nos valores de tarifa cobrados pela CASAN (2013-2019).....	137
Tabela 4.15 – TFDI e tarifa de água para cada ano da análise econômica.	138
Tabela 4.16 – Volume de água no trecho de tubulação entre o aquecedor e os pontos de consumo.	139
Tabela 4.17 – Volume de água economizado por aparelho sanitário.....	140
Tabela 4.18 – Potencial de economia diário de água para os três cenários de economia.....	140
Tabela 4.19 – Indicadores da análise econômica.	141

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Característica dos equipamentos de economia de água e energia relacionados ao banho.	61
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABAGAS	Associação Brasileira de Aquecimento a Gás
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CASAN	Companhia Catarinense de Águas e Saneamento
CIRRA	Centro Internacional de Referência em Reuso de Água
COFINS	Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
DWHR	<i>Drain Water Heat Recovery</i>
EPA	<i>U.S. Environmental Protection Agency</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
IPCA	Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo
LBNL	<i>Lawrence Berkeley National Laboratory</i>
PIS	Programa de Integração Social
PPH	Pesquisa de Posse e Hábitos de Consumo de Energia
Procel	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
RPI	Revista de Propriedade Industrial
RTQ-R	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
TCU	Tribunal de Contas da União
TFDI	Tarifa Fixa de Disponibilidade de Infraestrutura
T _{ext}	Temperatura externa
USP	Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1. Introdução.....	19
1.1. Contextualização.....	19
1.2. Justificativa.....	24
1.3. Objetivos	29
1.3.1. <i>Objetivo Geral</i>	29
1.3.2. <i>Objetivos Específicos</i>	29
1.4. Estrutura do Trabalho	30
2. Revisão de literatura	32
2.1. Consumo de água nas edificações	32
2.2. Uso de energia ligado ao consumo de água quente	35
2.3. Distribuição de água quente	39
2.4. Desperdício de água na distribuição de água quente nas residências	41
2.5. Perda de energia na distribuição de água quente.....	51
2.6. Projetos e iniciativas de racionalização do uso de água e energia	55
2.7. Síntese da revisão de literatura.....	63
3. Materiais e métodos.....	64
3.1. Calibração dos sensores de temperatura	65
3.1.1. <i>Tempo de resposta dos sensores de temperatura DS18B20</i>	65
3.1.2. <i>Precisão dos sensores de temperatura DS18B20</i>	67
3.2. Pesquisa de campo.....	68
3.3. Conformação e funcionamento do sistema.....	72
3.4. Protótipo do sistema automatizado proposto	80
3.4.1. <i>Conformação hidráulica e eletrônica do protótipo</i>	80
3.4.2. <i>Funcionamento do protótipo</i>	82
3.5. Análise econômica	84

3.5.1. Custos iniciais com instalação hidráulica e elétrica	88
3.5.1.1. Sistema de recirculação individual	88
3.5.1.2. Sistema de recirculação proposto	89
3.5.2. Custos com operação e manutenção	91
3.5.2.1. Sistema de recirculação individual	91
3.5.2.2. Sistema de recirculação proposto	93
3.5.3. Economia de água	95
3.5.4. Indicadores econômicos	101
4. Resultados	105
4.1. Calibração dos sensores de temperatura	105
4.1.1. Tempo de resposta dos sensores de temperatura DS18B20	105
4.1.2. Precisão dos sensores de temperatura DS18B20	106
4.2. Pesquisa de campo	107
4.3. Conformação e funcionamento do sistema automatizado	113
4.4. Protótipo do sistema automatizado proposto	116
4.5. Análise econômica	122
4.5.1. Custos iniciais com instalação hidráulica e elétrica	122
4.5.1.1. Sistema de recirculação individual	123
4.5.1.2. Sistema de recirculação proposto	126
4.5.2. Custos com operação e manutenção	131
4.5.2.1. Sistema de recirculação individual	133
4.5.2.2. Sistema de recirculação proposto	135
4.5.3. Economia de água	137
4.5.4. Indicadores econômicos	141
5. Conclusões	146
5.1. Limitações	149
5.2. Sugestões para trabalhos futuros	150

REFERÊNCIAS.....	152
APÊNDICES	167
Apêndice A.....	167
Apêndice B.....	171
Apêndice C.....	173
Apêndice D.....	176
Apêndice E.....	183
Apêndice F	185
Apêndice G.....	187
Apêndice H.....	188
Apêndice I	191
Apêndice J.....	192
Apêndice K.....	197

1. Introdução

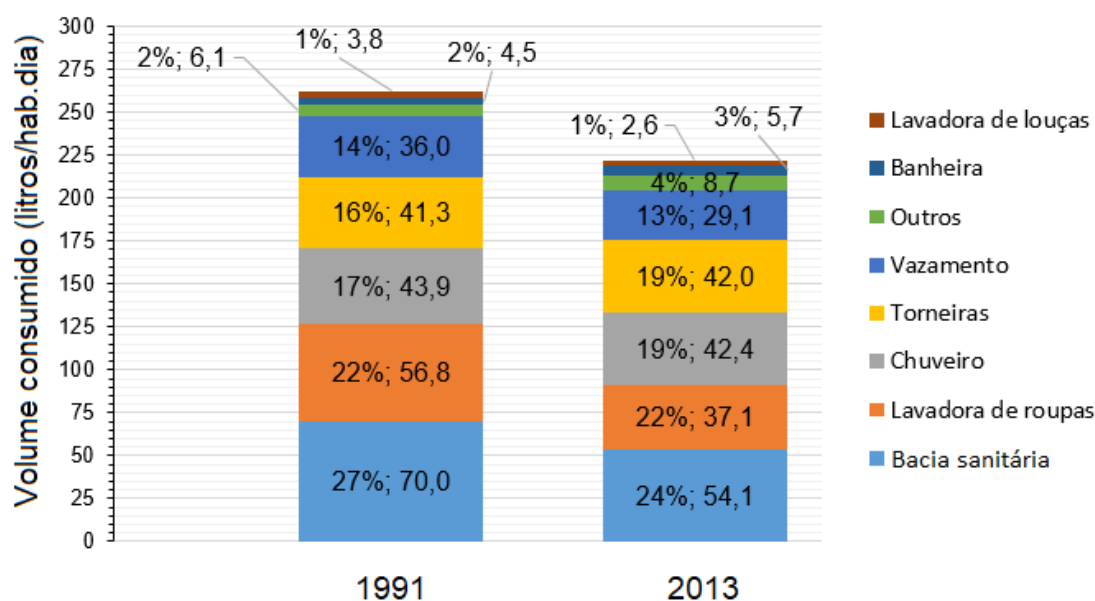
Em residências que possuem aquecedores de passagem a gás para o aquecimento da água sem apoio de sistemas de recirculação, há desperdício de água nos segundos iniciais da utilização dos aparelhos sanitários. A NBR 5626 (ABNT, 2020a) orienta que o projeto hidráulico de distribuição de água quente deve ser dimensionado reduzindo-se ao máximo o tempo de chegada de água quente do ponto de aquecimento até o aparelho sanitário mais distante com consumo de água quente. A NBR 13103 (ABNT, 2020b) recomenda que a instalação dos aparelhos convencionais de aquecimento a gás seja feita em locais com adequada ventilação. Esta recomendação faz com que as residências sejam projetadas de modo que os aparelhos sejam instalados nas áreas de serviço ou externamente às edificações. Consequentemente, esta conformação comumente estabelece grandes comprimentos de tubulação de água quente entre a fonte aquecedora e os aparelhos sanitários.

Quando comparados ao chuveiro elétrico, sistema mais utilizado no Brasil atualmente como forma de aquecimento da água, os sistemas residenciais de aquecimento de água a gás possuem elevado custo inicial de instalação. Deste modo, para que estes sistemas não acarretem em despesas e sejam eficazes ao fornecer água quente é de grande importância que haja um sistema integrado de recirculação de água, associado ou não com isolamento térmico das tubulações, que seja viável economicamente.

1.1. Contextualização

Em estudo sobre o perfil do consumo residencial e usos finais da água, identificou-se que na cidade de São Paulo, aproximadamente 14% do consumo total de água de uma residência é destinado para o chuveiro (BARRETO, 2008). Para a região de Florianópolis, no trabalho de Ghisi e Oliveira (2007), o chuveiro correspondeu a 39% do consumo total de água. DeOreo e Mayer (2014), no último relatório sobre uso final de água nas residências para os países da América do Norte (*Residential End Uses of Water Study - REUWS*), identificaram que 17% do consumo total de água de um habitante em 1991 era por meio do chuveiro e em pesquisa mais atual, este valor aumentou para 19%, conforme ilustra a Figura 1.1.

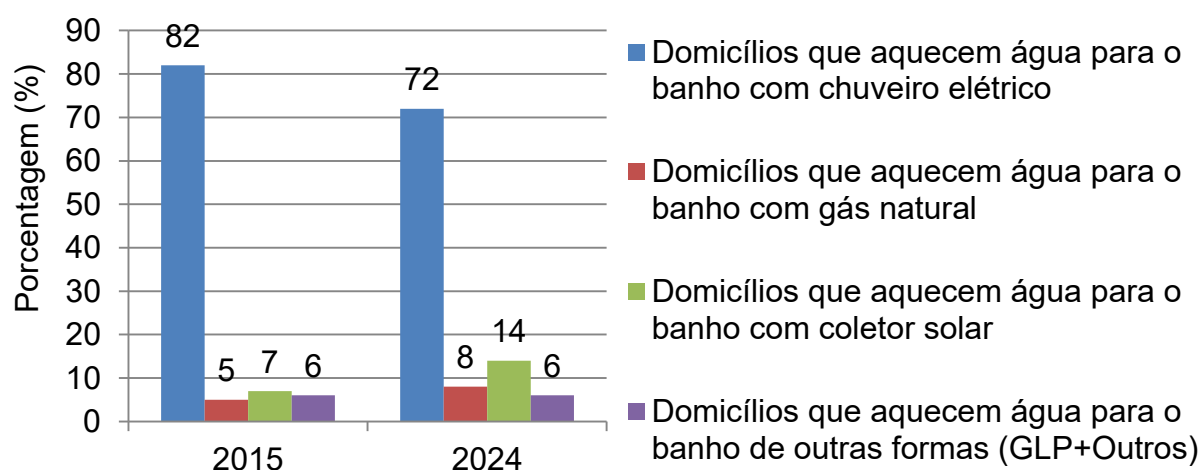
Figura 1.1 - Usos finais de água (em percentagem e em litros/hab.dia) nas residências dos países da América do Norte.



Fonte: DeOreo e Mayer (2014).

Em pesquisa de distribuição energética realizada pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), verifica-se, por meio da Figura 1.2, que 5,0% das residências brasileiras aquecem água do banho por meio de gás natural (ELETROBRAS, 2016). A Figura 1.2 também ilustra uma previsão de como será o aquecimento de água nos próximos anos no Brasil.

Figura 1.2 - Distribuição dos tipos de aquecimento de água para residências brasileiras em 2015 e uma previsão para 2024.

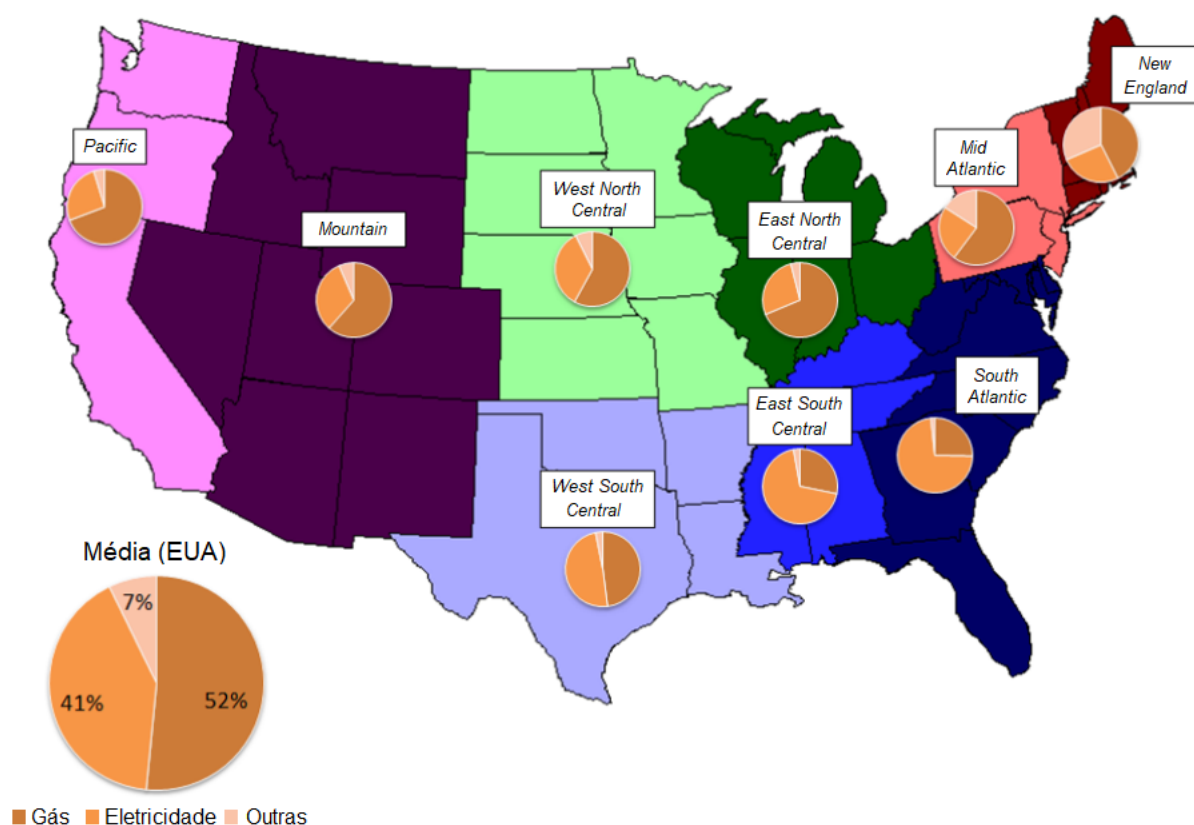


Fonte: Eletrobras (2016).

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), na Pesquisa de Orçamentos Familiares do período 2008-2009, 4,2% dos domicílios possuem o gás como fonte de aquecimento da água (IBGE, 2011). Observa-se na mesma pesquisa que para as regiões sul e sudeste são encontradas as maiores porcentagens de moradias que possuem aquecimento de água por meio de gás com, em média, 1,1% e 1,9%, respectivamente. De acordo com o relatório técnico Pesquisa de Posse e Hábitos de Uso de Equipamentos Elétricos na Classe Residencial (PPH) (2019) publicado pelo Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel), 57,0% dos domicílios brasileiros não possuem água aquecida e 42,5% aquecem água em algum aparelho sanitário (chuveiro, ducha ou torneira). Deste total de domicílios com água aquecida, 40,9% aquecem a água por meio de energia elétrica. Diferentemente das pesquisas realizadas pela EPE e pelo IBGE, constata-se também no relatório que a utilização de aquecimento a gás, em média, está presente em apenas 0,5% das moradias do Brasil. O relatório indica que 39,1% dos domicílios tem chuveiro com água aquecida. Deste total, 96,0% dos domicílios aquecem a água do chuveiro por meio de eletricidade (ELETROBRAS, 2019).

Diferentemente do Brasil, há países onde o gás natural tem importância muito maior em termos de aquecimento de água residencial. Nos Estados Unidos, por exemplo, 52% das residências utilizam gás natural e 41% utilizam energia elétrica para o aquecimento de água, conforme ilustra a Figura 1.3. De acordo com Palmgren et al. (2010), 49% das residências da Califórnia utilizam o gás natural como fonte de aquecimento da água. O clima da região e a vasta rede de gás natural contribuem para a maior adoção desta fonte energética. Além disso, o uso primário de gás é utilizado para aquecimento do ambiente das edificações e usos adicionais contribuem para a viabilidade econômica dos sistemas (EIA, 2018; EIA, 2021).

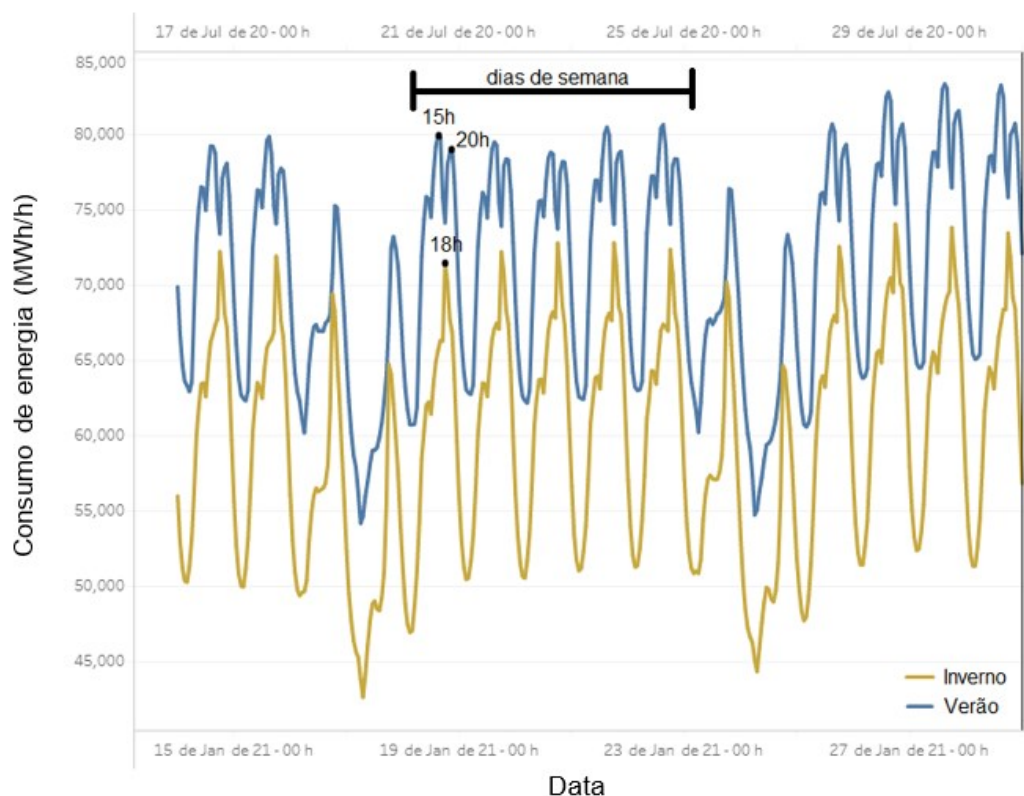
Figura 1.3 - Distribuição dos tipos de fonte energética utilizadas para o aquecimento de água residencial nos Estados Unidos.



Fonte: Maguire, Fang e Wilson (2013).

A geração de água quente, pelos métodos convencionais, utilizando energia elétrica, acarreta em sobrecarga no sistema de geração, transporte e distribuição de energia elétrica (CONEJERO; CALIA; SAUAIA, 2015; PALMIERI, 2013). Nos últimos anos a curva de carga horária tem obtido uma nova configuração por conta da implementação cada vez maior de aparelhos de ar-condicionado nas edificações residenciais e comerciais brasileiras, conforme ilustra a Figura 1.4. A utilização desses aparelhos em edificações residenciais se concentra no horário de ponta regulatória (17h às 22h). E em edificações comerciais e industriais, a participação contribui para formação de ponta entre as 14h e 17h, sobretudo, nas estações mais quentes (EPE, 2018). Observa-se na Figura 1.4, que apesar da formação de um novo pico de consumo nos meses de verão no período vespertino, ainda predomina horário de pico no período das 17h às 22h em ambas as estações (ONS, 2021).

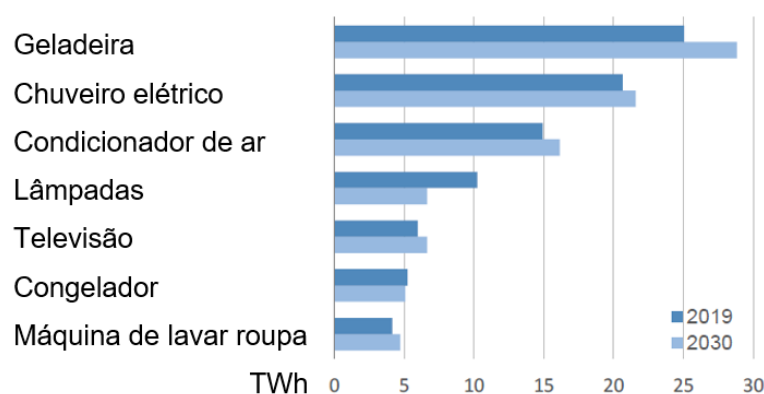
Figura 1.4 – Curva de carga horária.



Fonte: ONS (2021).

Portanto, o uso da eletricidade para o aquecimento da água do banho normalmente feito nos horários de ponta, afeta os custos com energia elétrica para o consumidor final. Como se pode identificar na Figura 1.5, o chuveiro elétrico é um dos principais usos finais de energia elétrica nas residências brasileiras.

Figura 1.5 – Consumo de energia elétrica por equipamento residencial em 2019 e previsão para 2030.



Fonte: adaptado de EPE (2020).

A previsão para 2030 é que o chuveiro continue sendo o segundo equipamento residencial que mais consome energia elétrica nas residências. Santos (2002) afirma que um dos motivos, além do custo reduzido de aquisição e instalação é que antigamente a eletrotermia era bastante incentivada no Brasil devido à abundância de geração hidroelétrica. Atualmente o conceito representa ônus para o setor elétrico.

Hoeschele e Springer (2008) realizaram uma comparação direta entre aquecedores de passagem e aquecedores com tanques de armazenamento. Os autores encontraram eficiências da ordem de 0,8 para aquecedores de passagem e 0,7 para aquecedores de acumulação.

Segundo dados aproximados de levantamento interno feito pela Associação Brasileira de Aquecimento a Gás (ABAGAS), nos últimos sete anos mais de seis milhões de brasileiros passaram a instalar e utilizar aquecedores a gás. Comparando-se com países que utilizam historicamente a tecnologia, como Chile e Argentina, o Brasil possui potencial de crescimento. No ano de 2015 foram vendidos no Brasil 300 mil aquecedores, na Argentina 900 mil e no Chile 600 mil (ABAGAS, 2016).

1.2. Justificativa

O principal fator que acarreta grande desperdício de água fria no consumo de água quente das residências com aquecimento a gás é a distância existente entre o aquecedor e os pontos de consumo. O guia para sistema eficiente de distribuição de água quente (*Guide for Efficient Hot Water Delivery System*) da *U.S Environmental Protection Agency* (EPA) orienta que o volume de água em repouso nas tubulações entre a fonte aquecedora e os aparelhos sanitários com consumo de água quente deve ser inferior a 2,0 litros. Além disso, a quantidade de água fria que deve ser removida das tubulações antes da chegada de água quente provinda dos aquecedores não pode ser superior a 2,3 litros. Segundo Zhang et al. (2014), na Dinamarca, onde predomina um dos melhores sistemas de aquecimento urbano do mundo, as normas estipulam que o sistema de distribuição de água quente residencial deve ser concebido de modo que a água quente atinja os pontos de consumo em no máximo dez segundos.

Além disso, o aumento no tamanho das edificações residenciais faz com que haja aumento no número de pontos de consumo de água nas residências. Logo, necessitam-se diâmetros maiores para as tubulações para suprir maiores demandas. De acordo com Klein (2004), este aumento no diâmetro pode triplicar o volume de água que fica em repouso nas tubulações após o consumo. Klein (2004) também verificou uma tendência no aumento da área das edificações residenciais nos Estados Unidos a partir do ano de 1970. Estima-se que o comprimento de tubulação adotado nas residências atuais é o dobro do que era utilizado nas residências que foram construídas antes de 1970. Esse aumento no tamanho das residências é verificado não somente nos Estados Unidos, como na Finlândia, Áustria, Espanha, Alemanha, França, Holanda, Bélgica, Grécia, Dinamarca, Japão, Nova Zelândia, etc. (EVANS; HARTWICH, 2005; STATISTICS BUREAU OF JAPAN, 2021; U.S. CENSUS BUREAU, 2017). Estas modificações nas tubulações de água quente favorecem as perdas térmicas para o ambiente, comprometendo, portanto, a eficiência do sistema. Além do desperdício de água, tem-se o inconveniente tempo de espera pela chegada da água quente que vem dos aquecedores. Klein (2004) afirma que o uso de novos aparelhos com redutores de pressão e a redução da pressão de abastecimento por parte das concessionárias são fatores que colaboram com o aumento do tempo de espera pela chegada da água quente nos pontos de consumo das residências.

De acordo com o IBGE (2021), o maior percentual de domicílios que aquecem água por meio de gás localiza-se nas regiões sul e sudeste do Brasil. A última PPH, realizada pela Eletrobras em parceria com o Procel, também indica maior concentração destes sistemas nas regiões sul e sudeste. A Tabela 1.1 ilustra uma comparação entre as duas pesquisas por estado das regiões sul e sudeste. A diferença constatada entre uma pesquisa e outra pode ser explicada pela amostragem. Na maioria dos estados, a amostragem da pesquisa realizada pelo IBGE teve no mínimo o dobro de domicílios entrevistados em comparação com a PPH.

Tabela 1.1 – Domicílios que aquecem água com gás.

Estados	Domicílios que aquecem água por meio de gás (%)	
	IBGE	Eletrobras/Procel
São Paulo	1,7	1,0
Minas Gerais	2,7	0,3
Santa Catarina	3,0	0,8
Espírito Santo	3,3	0,5
Paraná	4,3	1,0
Rio Grande do Sul	8,1	1,6
Rio de Janeiro	8,7	5,2

Fonte: IBGE (2021); ELETROBRAS (2019).

Estima-se que o volume de água desperdiçado no banho por conta de sistemas de aquecimento mal projetados é de 30% do volume total do banho (LUTZ, 2011). Considerando-se uma média de dez minutos no tempo de banho; vazão de 10 litros/minuto nos chuveiros; 70 milhões de domicílios no Brasil; e a previsão da Eletrobras de que 8% das residências podem possuir aquecimento de água a gás em 2024; estima-se que 183 milhões de metros cúbicos de água podem ser desperdiçados por ano por conta deste problema encontrado nas residências.

O custo da energia elétrica residencial quase dobrou de 2013 (300,2 R\$/MWh) para 2021 (589,1 R\$/MWh) (ANEEL, 2021). O expressivo aumento na tarifa acarreta em aumento na busca por alternativas atrativas de sistemas de aquecimento de água, tendo em vista que o chuveiro elétrico é o segundo equipamento que mais consome energia nas residências brasileiras (EPE, 2020). A mudança para o aquecimento de água por meio de gás faz com que haja diminuição direta do custo com energia elétrica e diminuição nos tributos, pelo fato da alíquota do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) incidir com base no consumo mensal de energia.

Do ponto de vista da eficiência energética, analisando-se a cadeia de geração, transmissão e distribuição de energia, os aquecedores a gás são mais eficientes que os chuveiros elétricos (Santos, 2011). O autor indica que o sistema que demanda menos energia primária para a produção de 100 unidades energéticas é o aquecedor a gás de passagem (130,7 unidades energéticas). O chuveiro elétrico necessita 151,2 unidades energéticas para a produção de 100 unidades energéticas. Johann, Simões e Rego (2017), encontraram, por meio de uma análise comparativa entre eletricidade e gás para aquecimento de água no setor residencial, uma economia de 40% ao longo de vinte anos ao se optar por aquecimento a gás ao invés de chuveiro elétrico, considerando-se custos de infraestrutura e operação. Apesar de o sistema de aquecimento a gás individual ser classificado com nível A pelo Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais (RTQ-R) (INMETRO, 2012), Sangoi (2015) concluiu que o sistema é o que leva ao maior consumo de energia primária, pois o consumo de energia primária também está relacionado com o gasto de energia final, que se torna significativo quando são aplicados chuveiros com alta vazão e sistemas de aquecimento a gás sem o apoio de sistemas de aquecimento solar.

Uma maneira eficiente de entregar água quente rapidamente aos pontos de consumo é por meio da instalação de aquecedores de passagem com fluxo balanceado. Estes aparelhos podem ser instalados próximos aos pontos de consumo, quando utilizado sistema de chaminé de fluxo balanceado, e não necessariamente necessitar de boa ventilação nos locais de instalação, pois são capazes de forçar a entrada do ar presente no ambiente para a queima do combustível e ao mesmo tempo expelir os gases gerados para fora da edificação (KOMEKO, 2018). Entretanto, o custo destes aparelhos é, aproximadamente, cinco vezes maior que o custo dos aparelhos convencionais. E quanto aos pré-requisitos do RTQ-R nos sistemas prediais de água quente, a única orientação feita é a respeito da espessura mínima de isolamento térmico (INMETRO, 2012). Sangoi (2015) verificou que ao isolar termicamente as tubulações para a distribuição de água quente, a diferença de temperatura que a água chega no último ponto de consumo de uma residência comparada a uma tubulação não isolada varia em apenas 0,3°C. Conclui-se que o isolamento térmico só é eficaz para manter a temperatura da água quente no interior da tubulação para usos em sequência com intervalos de tempo reduzido, por exemplo, entre dois banhos.

Além de orientações mais específicas por meio de normas, alguns países contam com os esforços de algumas empresas no desenvolvimento de acessórios para os sistemas prediais para evitar perdas causadas pelos usuários e pelos aparelhos sanitários. A empresa canadense Taco desenvolveu um sistema composto por uma bomba recirculadora e uma válvula que faz a união do sistema predial de água fria com o de água quente da edificação normalmente no ponto de consumo de água mais afastado do aquecedor (TACOCOMFORT, 2021). Outro componente bastante semelhante ao sistema Taco, denominado *ACT Metlund D'MAND © system* assegura que o sistema pode bombear a água em uma vazão de aproximadamente 11,0 litros/segundo. A válvula *ShowerStart TSV³ (Thermostatic Shut-off Valve)* desenvolvida pela empresa Evolve (THINKEVOLVE, 2020) foi concebida unicamente para a utilização em chuveiros. A instalação é feita próxima ao equipamento sanitário e tem como função apenas evitar as perdas que ocorrem quando o usuário do banho utiliza seu tempo para fazer outras atividades enquanto espera que a água atinja temperaturas mais elevadas. Esta válvula identifica quando a temperatura da água que passa pelo chuveiro atinge 35°C, interrompendo então o fluxo. Para reiniciar o fluxo de água, o usuário deve simplesmente puxar uma corda que vem junto ao equipamento.

As tecnologias utilizadas para evitar o desperdício podem parecer mais indicadas para países com climas mais frios. De acordo com o levantamento interno da ABAGAS, até 2016 o Brasil possuía apenas 2,8 milhões de aquecedores a gás instalados. E segundo as últimas edições da Pesquisa Industrial Anual, publicada pelo IBGE, foram produzidos e vendidos aproximadamente 309 mil aquecedores de água instantâneo a gás ou acumulação entre 2016 e 2018 (IBGE, 2021). Além disso, as projeções dos institutos brasileiros de pesquisas voltadas para consumo energético indicam aumento pela procura de sistemas de aquecimento de água residencial a gás, apesar da existência de sistemas mais eficientes como aquecimento solar com apoio de chuveiro elétrico, demonstrado por Sangoi (2015). Se isto de fato ocorrer, as normas devem ser revisadas para implementar medidas de redução do desperdício de água fria que estes sistemas acarretam, como por exemplo, a integração de sistemas de recirculação da água, principalmente para regiões mais propensas a adotar sistemas de aquecimento a gás.

A instalação de dispositivos e sistemas atuais para evitar desperdício de água fria no consumo de água quente resolve parcialmente o problema do desperdício mencionado, como por exemplo, a válvula *Showerstart*, ou exigem investimento inicial bastante elevado, conforme será observado neste trabalho. Assim sendo, este trabalho propõe a instalação de um sistema automatizado de baixo custo que direcione para outro destino a água fria presente nas tubulações e que seria desperdiçada, envolvendo o mínimo de interação entre o sistema e o usuário. Esse sistema automatizado pode ser implementado em um sistema predial existente ou em um novo projeto de residência unifamiliar ou multifamiliar. Este trabalho trata da análise do sistema automatizado apenas para novos projetos e apenas para sistemas prediais de água quente que possuam aquecedores de passagem a gás como fonte principal de aquecimento. A análise restringiu-se a estes sistemas devido à maior abrangência na região sul do Brasil em comparação com sistemas solares e seus respectivos sistemas auxiliares (ELETROBRAS, 2019).

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é verificar a viabilidade econômica da implementação de um sistema automatizado integrado aos pontos de consumo de água quente das edificações que elimine o desperdício de água fria dos instantes iniciais de uso.

1.3.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos na realização deste trabalho são:

- Estimar a quantidade de água desperdiçada nos segundos iniciais da utilização de aparelhos sanitários em sistemas que possuam aquecimento de água por meio de aquecedores de passagem a gás;
- Definir possíveis conformações do sistema automatizado de direcionamento da água fria para residências multifamiliares e validar seu funcionamento por meio de um protótipo;

- Verificar a viabilidade econômica por meio de uma análise comparativa entre a instalação de um sistema de recirculação individual e a instalação do sistema de recirculação proposto neste trabalho.

1.4. Estrutura do Trabalho

Este trabalho apresenta-se em cinco capítulos. O capítulo inicial traz uma breve introdução a respeito do problema analisado de desperdício de água fria nos sistemas prediais de água quente. Na sequência, contextualiza a respeito da destinação do consumo de água para o banho e utilização da energia para o aquecimento de água. O capítulo também apresenta, na justificativa, informações do problema analisado de desperdício de água no banho e nos demais pontos de consumo de água quente, como as normas se posicionam a respeito deste problema e algumas soluções existentes para evitá-lo. Além disso, o capítulo apresenta os objetivos geral e específicos e a estrutura do trabalho.

No segundo capítulo é apresentada a revisão bibliográfica utilizada como embasamento para a realização do trabalho. Fundamentada por normas e artigos científicos, apresenta o consumo de água e energia nas edificações, nos pontos de consumo de água quente, distribuição de água quente, resultados de pesquisas que quantificam o desperdício de água e perda de energia na distribuição residencial de água quente, projetos para racionalizar o uso de água e energia e, por último, uma síntese da revisão bibliográfica.

O capítulo três apresenta o método para a calibração dos sensores de temperatura utilizados nos experimentos deste trabalho. O capítulo também descreve o método para estimar a quantidade de água desperdiçada nos pontos de consumo de água quente, os materiais utilizados para a concepção de um protótipo para automatizar o redirecionamento da água que seria desperdiçada, sua conformação e seu funcionamento. Por fim, o capítulo aborda o método para a análise econômica do sistema de recirculação proposto.

O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos na calibração dos sensores de temperatura e na pesquisa de campo. Na sequência, apresenta a conformação e

funcionamento do sistema proposto em edificações existentes. Por último apresenta o resultado principal da pesquisa, que é a análise econômica do sistema proposto por meio de um estudo de caso.

O último capítulo apresenta as conclusões do trabalho, limitações e sugestões para trabalhos futuros.

2. Revisão de literatura

Este capítulo apresenta uma revisão de literatura quanto ao consumo de água no setor residencial, consumo de energia relacionado ao consumo de água e distribuição de água quente nas edificações. Além disso, apresenta o desperdício de água nas residências, perdas energéticas na distribuição de água quente e projetos e iniciativas para reduzir este desperdício. Por fim, é apresentada uma síntese da revisão de literatura.

2.1. Consumo de água nas edificações

De acordo com diagnóstico do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) (2019), cada cidadão brasileiro utiliza em média 150 litros de água por dia distribuída pelas companhias de água e esgoto locais. Rio de Janeiro é o estado com maior consumo de água, com média de 206 litros/hab.dia. Amazonas é o estado que possui a menor média, ou seja, 92 litros/hab.dia. A região Sudeste é a que possui o maior índice de consumo per capita diário, com média de 170 litros/hab.dia (SNIS, 2019).

Para o estado de Santa Catarina o consumo médio per capita de água, de acordo com diagnóstico do SNIS (2019), é de 154 litros/hab.dia. Nas pesquisas de Ghisi e Oliveira (2007), encontrou-se consumo médio para edificações unifamiliares localizadas na cidade de Palhoça de aproximadamente 175 litros/hab.dia, valor bastante próximo da média de consumo do ano de 2017, de 184 litros/hab.dia. Para edificações multifamiliares, na pesquisa de Ghisi e Ferreira (2007), encontrou-se consumo médio de água de 151,3 litros/hab.dia em Florianópolis, que se assemelha bastante com os valores divulgados pelo SNIS (2019) para os anos em que os trabalhos foram elaborados. Na Tabela 2.1 encontra-se a série histórica do consumo médio de água per capita de 2010 a 2019 da cidade de Florianópolis.

Tabela 2.1 - Consumo de água per capita em Florianópolis.

Ano	Consumo médio per capita (litros/hab.dia)
2019	174,7

Tabela 2.1 - Consumo de água per capita em Florianópolis (continuação).

Ano	Consumo médio per capita (litros/hab.dia)
2018	174,2
2017	178,3
2016	179,8
2015	172,2
2014	184,0
2013	173,1
2012	195,9
2011	202,5
2010	209,9

Fonte: SNIS (2019).

Dados como a população, o clima, a estação do ano, o dia da semana e a edificação são de suma importância para determinar o perfil de uso de água (ZHOU et al., 2002). A Tabela 2.2 mostra que, independentemente da localização, o chuveiro é um dos principais usos finais de água nas edificações residenciais.

Tabela 2.2 - Uso final de água tratada para consumo.

Ponto de consumo	Uso final (percentagem (litros/hab.dia))				
	Dinamarca¹	Estados Unidos²	Palhoça, Brasil³	Melbourne, Austrália⁴	Queenslândia, Austrália⁵
Banho	20,0 (40,0)	19,1 (42,4)	39,2 (59,2)	31,0 (-)	29,9 (41,8)
Bacia sanitária	20,0 (40,0)	24,4 (54,1)	28,0 (44,7)	19,0 (-)	17,9 (25,0)
Lavagem de roupas	15,0 (30,0)	16,7 (37,1)	7,2 (10,9)	26,0 (-)	20,7 (29,0)
Lavagem de louças	20,0 (40,0)	1,2 (2,6)	20,8 (35,1)	-	1,4 (2,0)

Tabela 2.2 - Uso final de água tratada para consumo (continuação).

Ponto de consumo	Uso final (percentagem (litros/hab.dia))				
	Dinamarca ¹	Estados Unidos ²	Palhoça, Brasil ³	Melbourne, Austrália ⁴	Queenslândia, Austrália ⁵
Outros	25,0 (50,0)	38,6 (85,5)	4,8 (6,8)	24,0 (-)	30,1 (42,14)
Total	100 (200,0)	100 (221,8)	100 (156,7)	100 (-)	100 (139,9)

Fonte: ¹ Tomaz (2001); ² DeOreo e Mayer (2014); ³ Ghisi e Oliveira (2007); ⁴ Gato-Trindad, Jayasurlyya e Roberts (2011); ⁵ Beal e Stewart (2011).

Em estudo realizado por Ghisi e Oliveira (2007) para verificar os usos finais de água, tomou-se duas residências unifamiliares localizadas no município de Palhoça, Santa Catarina. Na Tabela 2.3 verifica-se que, em média, 39,2% da água é destinada para o chuveiro.

Tabela 2.3 - Uso final de água tratada para consumo doméstico em duas residências unifamiliares localizadas no município de Palhoça/SC.

Ponto de consumo	Uso final (%)	
	Residência A	Residência B
Bacia sanitária	30,4	25,6
Pia da cozinha	28,0	13,5
Chuveiro	32,8	45,6
Lavatório	1,9	2,6
Barba	0,8	4,4
Lavagem de roupa	6,2	8,2
Total	100	100

Fonte: Ghisi e Oliveira (2007).

Observa-se, portanto, que o uso final da água nas residências de outros países, assim como no Brasil, tem o banho como um dos principais destinos. Considerando-se que apenas a bacia sanitária é o aparelho onde não há consumo de água quente, da Tabela 2.2 tem-se que, em média, 78,6% da água é consumida em aparelhos onde se pode fazer uso de água quente. É considerável, portanto, propor medidas para reduzir o consumo de água para estes fins ou eliminar desperdícios recorrentes no mau uso dos aparelhos.

2.2. Uso de energia ligado ao consumo de água quente

O crescimento populacional, as mudanças climáticas e o aumento do descarte na água de substâncias com maior potencial de contaminação (hormônios e resíduos medicinais) são fatores que colaboram com o aumento de consumo de energia para disponibilizar água potável às residências (FRIJNS; HOFMAN; NEDERLOF, 2013). Entretanto, observa-se nas pesquisas de Frijns, Mulder e Roorda (2009) que o aquecimento da água no uso final corresponde à maior parcela de consumo de energia ligado ao ciclo de consumo da água. Na Tabela 2.4, verifica-se que mais de 88% da energia consumida no ciclo da indústria da água (captação, tratamento da água, distribuição, uso e tratamento dos efluentes) na Holanda é usada para o aquecimento da água nas residências.

Tabela 2.4 - Consumo anual de energia no setor de água da Holanda.

Fase do ciclo da indústria da água	Consumo de energia (TJ/ano)	Consumo de energia por habitante (GJ/ano)	Consumo de energia por residência (GJ/ano)
Aquecimento de água nas residências	105700	6,4	14,3
Tratamento dos efluentes	8150	0,5	1,1
Produção e distribuição de água potável	3550	0,2	0,5
Rede de esgoto	1910	0,1	0,3

Fonte: Adaptado de Frijns, Mulder e Roorda (2009).

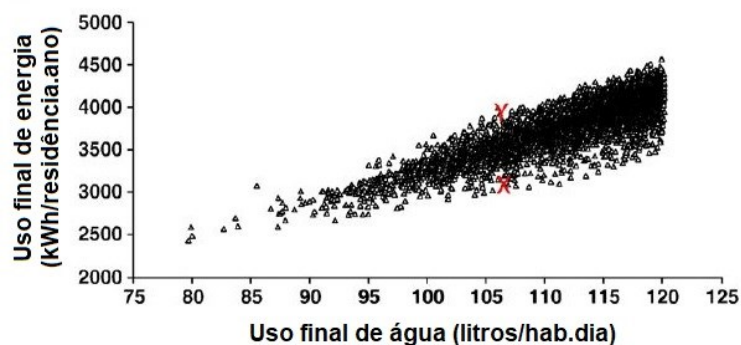
Reffold et al. (2008) estimam que 11% do total das emissões de carbono relacionadas ao uso da água estão na etapa de tratamento e distribuição. O restante das emissões é proveniente da energia consumida no uso final da água nas edificações. Portanto, a estreita relação que há entre o consumo de água nas edificações e as emissões de carbono ressalta a importância em racionalizar o uso da água no sentido não apenas de economia de água, mas também de economia de energia.

Um dos métodos para redução da demanda de energia entre consumidores individuais consiste na redução do consumo de energia para o aquecimento de água residencial (BERTRAND et al., 2017). Manouchehri e Collins (2016) confirmam o aumento global do consumo de energia e apontam a conservação de energia como medida para atender demandas futuras, dando ênfase à energia destinada para o aquecimento residencial de água.

Uma maneira eficaz de diminuição do uso da água nas edificações sem que haja a necessidade de interferir nos hábitos e comportamentos dos usuários é investir na substituição dos aparelhos sanitários (chuveiro, torneira, bacia sanitária, lavadora de roupas, lavadora de louças, etc.) por aparelhos mais eficientes. Fidar, Memon e Butler (2010), entretanto, simulando as mais variadas composições de diferentes aparelhos para um determinado consumo final de água, demonstram que a diferença de consumo de energia para um mesmo consumo diário de água por habitante pode ser bastante elevada.

Na Figura 2.1 é possível identificar estas diferenças. Para um uso final de 105,0 litros/hab.dia o consumo de energia pode variar de 3000 a 3600 kWh/residência.dia, e para um uso final de 120,0 litros/hab.dia pode variar de 3500 a 4600 kWh/residência.ano.

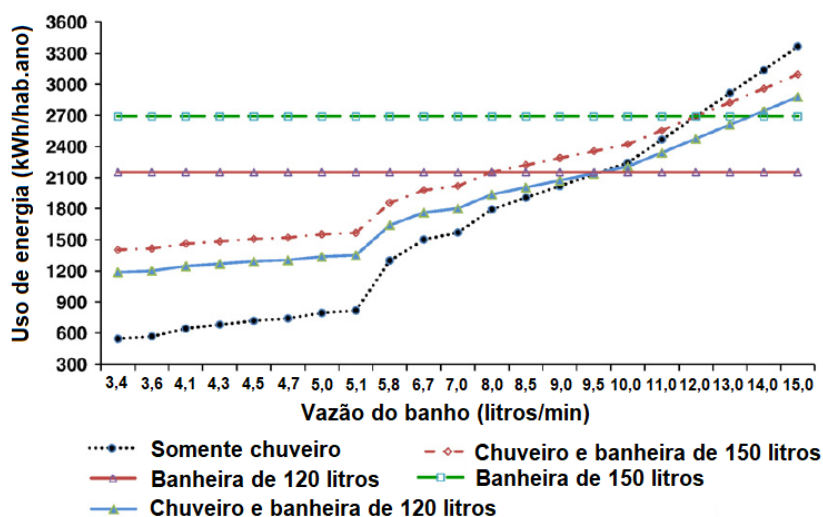
Figura 2.1 - Uso de energia das composições de estratégias simuladas.



Fonte: adaptado de Fidar, Memon e Butler (2010).

Clarke, Grant e Thornton (2009) identificaram que a substituição de bacias sanitárias de caixa acoplada de seis litros por um de quatro litros pode trazer significativas economias de água. Entretanto, os usuários que adotam esta estratégia tendem a adquirir chuveiros com maiores vazões. Tendo em vista que na substituição dos tipos de bacia sanitária não ocorre economia de energia e que o consumo de energia dos chuveiros está fortemente relacionado com a vazão do aparelho, conforme ilustra a Figura 2.2, os autores concluem que esta substituição dos aparelhos resulta em aumento no consumo global de energia da edificação. Este é um exemplo bastante simples que demonstra a necessidade de um estudo prévio na substituição de aparelhos de determinada edificação por aparelhos teoricamente mais eficientes.

Figura 2.2 - Consumo de energia em função da vazão no banho.



Fonte: adaptado de Clarke, Grant e Thornton (2009).

A mínima temperatura aceitável para água quente nas edificações vai depender do uso a que se destina. Para maior controle da temperatura, os sistemas prediais são projetados de modo que possa ocorrer a mistura entre água quente e fria, adequando-se aos níveis de conforto dos usuários. De acordo com Macintyre (1998), a temperatura relacionada ao uso pessoal e banhos varia entre 40°C e 50°C. A NBR 15569 (ABNT, 2020c) considera que o uso de água quente no banho, lavatórios e pias varia entre 39° e 40°C. Nos países norte-americanos a temperatura de uso de água quente pode variar entre 45°C e 50°C (BURCH; THORNTON, 2012; GEORGE; PEARRE; SWAN, 2015).

A massa térmica das edificações é um dos fatores que pode influenciar a temperatura em que a água é fornecida a cada edificação. Wong, Mui e Guan (2010) estimaram por meio de uma correlação, a temperatura em que a água sai dos aparelhos em função do valor da temperatura ambiente externa. Em seus estudos, verificou-se que em média a temperatura que sai dos chuveiros é de 40,9°C. Em diversos estudos que analisam o potencial de recuperação de calor da água descartada no banho considera-se que a água normalmente é descartada a temperaturas que variam entre 38° e 40°C (MANOUCHEHRI; BANISTER; COLLINS, 2015; RAMADAN; IEMENAND; KHALED, 2016; POCHWAT et al., 2019). Portanto, é razoável assumir que o banho é tomado em temperaturas que variam de 38° a 40°C, em média.

Para a água atingir estes níveis de temperatura, grande quantidade de energia é necessária. Ressalta-se que apesar do banho ser tomado a temperaturas de 40°C, muitas vezes a temperatura que a água sai dos aquecedores é muito superior a este valor, pois esta água será misturada com água fria nos misturadores dos aparelhos sanitários. Na Tabela 2.5 é possível verificar a energia que é destinada para o setor residencial em diversos países e o quanto desta energia é destinado para o aquecimento de água. Percebe-se que mais de um quinto da energia consumida por países, como Reino Unido, Estados Unidos e Polônia, é destinado para o setor residencial.

Tabela 2.5 - Consumo de energia para aquecimento de água.

Localidade	Energia destinada ao setor residencial (%)	Energia para o aquecimento da água (%)
Hong Kong	17,0 ¹	20,0 ²
Reino Unido	23,0 ³	26,0 ⁴
Canadá	20,0 ⁵	16,7 ⁵
Estados Unidos	26,0 ⁶	18,0 ⁶
Polônia	32,0 ⁷	50,0 ⁸

Fonte: ¹HKEMSD (2007); ²Wong, Mui e Guan (2010); ³Johnson (2005); ⁴UKDECC (2009); ⁵NRC (2012); ⁶DOE (2011); ⁷CSO (2012); ⁸ Meggers e Leibundgut (2011).

2.3. Distribuição de água quente

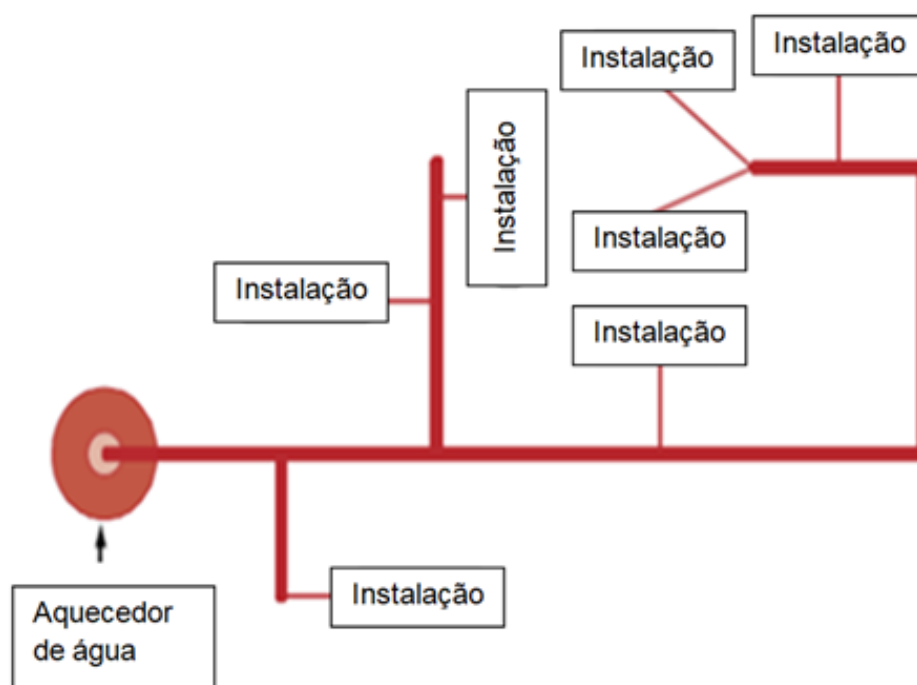
Conforme a característica do sistema de aquecimento empregado, entende-se por distribuição de água quente, o fornecimento de água fria para os aquecedores e a distribuição de água quente para os pontos de utilização (CHAGURI JUNIOR, 2009). Uma vez aquecida, a água quente deve ser distribuída para os pontos de consumo da residência. Vários fatores têm influência na distribuição e podem desempenhar um papel importante para a eficiência do sistema, como, por exemplo: comprimento da tubulação entre a fonte aquecedora e os aparelhos sanitários, o diâmetro interno e material das tubulações, se a tubulação possui ou não isolamento e consciência dos usuários na regulagem da vazão (EPA, 2014; ALLY; TOMLINSON, 2002). Com exceção dos sistemas individuais de aquecimento, todos os outros sistemas de aquecimento devem possuir um sistema de distribuição de água quente.

Como forma de minimizar o desperdício inicial de água fria existente na operação de sistemas de distribuição de água quente residencial, a EPA elaborou um guia para sistema eficiente de distribuição de água quente (*Guide for Efficient Hot Water Delivery System*). A EPA (2014) sugere em seu guia quatro maneiras para a configuração da distribuição das tubulações a partir da fonte aquecedora até os pontos de consumo de água quente:

- Sistema em tronco e ramais;
- Sistema em núcleo;
- Sistema de tubulações paralelas;
- Sistema de recirculação por demanda.

O sistema em tronco e ramais é um dos sistemas mais empregados nas residências do Brasil e o de maior importância para este trabalho. Consiste em uma tubulação principal que percorre do aquecedor até o ponto mais afastado da residência que faz o uso de água quente. Desta tubulação principal partem os ramais para atender as várias áreas da residência e destes ramais, originam-se os sub-ramais para prover água quente aos pontos de consumo individualmente, conforme a Figura 2.3.

Figura 2.3 - Configuração típica de sistema em tronco e ramais.



Fonte: adaptado de EPA (2014).

Esta configuração pode ser adotada em residências uni e multifamiliares. O sistema em troncos e ramais é o sistema com maior potencial de ineficiência se não buscar uma centralização na instalação dos pontos de consumo para minimizar os comprimentos de tubulação (EPA, 2014).

O guia elaborado pela EPA salienta também que em residências uni e multifamiliares não se deve haver quantidade superior a 1,9 litros de água em repouso nas tubulações entre a fonte aquecedora e os aparelhos sanitários. A quantidade de água fria que deve ser removida das tubulações antes da chegada de água quente provinda dos aquecedores não pode ser superior a 2,3 litros. Por último, quanto aos sistemas de recirculação, estes devem ser do tipo "iniciado por demanda", ou seja, não podem ser unicamente baseados no tempo ou temperatura.

2.4. Desperdício de água na distribuição de água quente nas residências

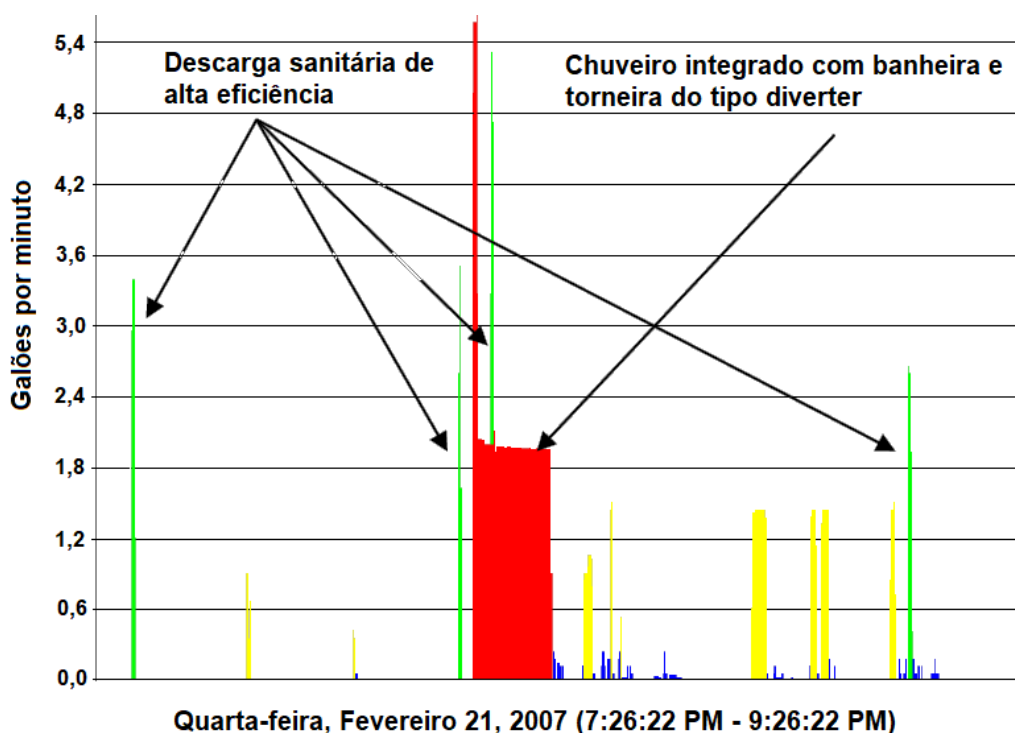
Desconsiderando-se as perdas por vazamento, Lutz (2005) descreve três tipos de perdas que ocorrem nos sistemas de distribuição de água quente. Primeiramente ocorre a perda de água fria enquanto o usuário espera pela chegada de água quente no ponto de consumo. Decorrido o consumo desta água quente, parte dela fica em repouso na tubulação com conseqüente perda de calor se o próximo uso dos aparelhos ocorrer em um intervalo de tempo suficientemente grande. Por último, ocorre perda de energia para aquecer a água que foi aquecida anteriormente para alcançar níveis desejáveis de temperatura, por exemplo, no caso de lavadoras de roupa e louças. Do ponto de vista do tratamento de água, outras perdas deveriam ser computadas pelo fato desta água desperdiçada estar sendo tratada duas vezes, sem ter fornecido qualquer utilidade aos usuários (LUTZ, 2005).

Lutz (2011) e Klein (2005) definem duas perdas para os casos de desperdício de água no banho. A água fria que se localiza na tubulação de água quente entre o aquecedor e os pontos de consumo e que é desperdiçada após um consumo de água quente representa as perdas estruturais. A água que está quente o suficiente, mas continua fluindo para o ralo antes que o usuário comece a utilizar o chuveiro, representa as perdas comportamentais. Esta perda está relacionada às atividades executadas pelo usuário enquanto ele espera que a água quente atinja o aparelho sanitário, tais como, escovar os dentes, fazer a barba, despir-se, etc. Sherman (2014) indica que é mais apropriado expressar o desperdício comportamental pela unidade de tempo. Para se quantificar a quantidade de água desse desperdício comportamental deve-se converter esse tempo de espera para litros de água, levando-se em consideração a vazão do chuveiro. Mensurar o desperdício de água quente nas residências é uma

tarefa difícil e os poucos estudos existentes até então, que serão abordados na sequência, realizaram medições em uma pequena quantidade de residências.

Há duas formas de mensurar os desperdícios de água e energia que decorrem da utilização de água quente nas residências. Uma das formas consiste em analisar traços de vazão dos aparelhos sanitários. Nos últimos dois relatórios a respeito do uso final de água nas residências para os países da América do Norte (REUWS), Mayer et al. (1999) e DeOreo e Mayer (2014) descrevem como se obtém os traços de vazão para cada aparelho sanitário de uma residência. A Figura 2.4 ilustra um exemplo de um traço de fluxo de água do relatório.

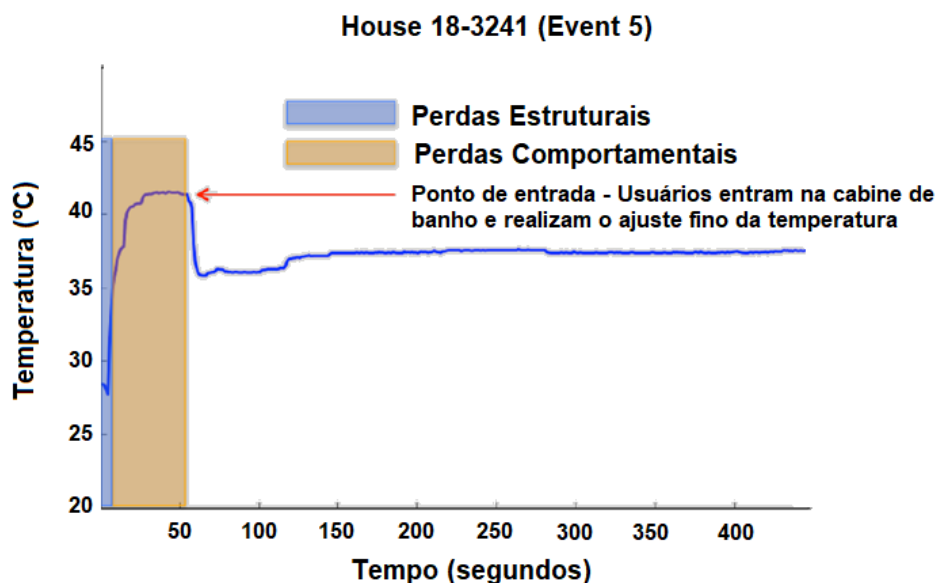
Figura 2.4 - Traços de vazões identificados em um período de duas horas.



Fonte: DeOreo e Mayer (2014).

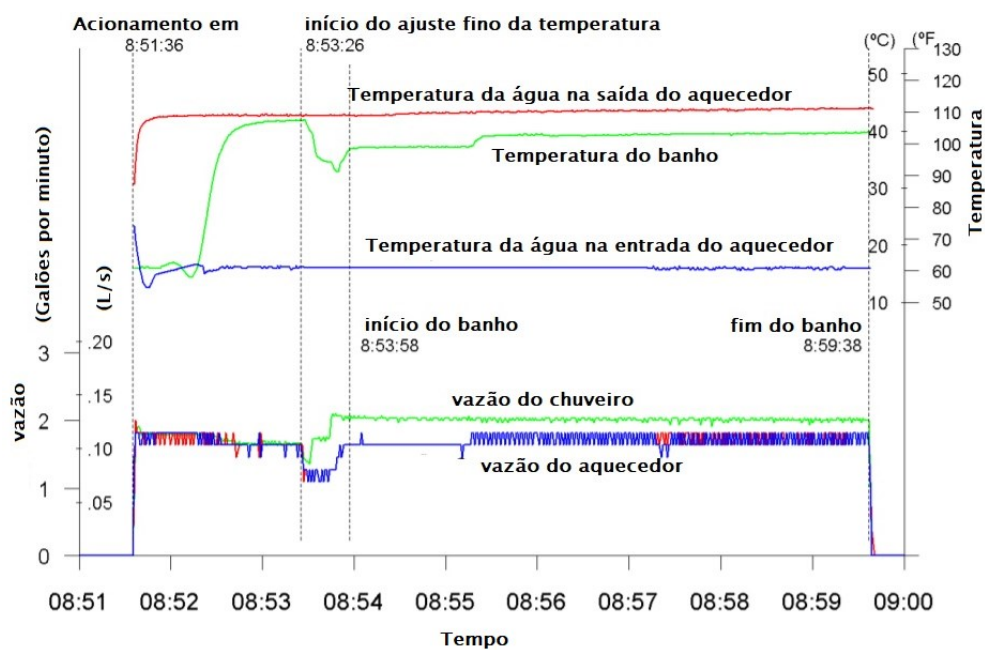
Analisando estes traços conforme Lutz (2011) e Sherman (2014) sugerem, é possível distinguir, por exemplo, no evento de um banho o momento em que ocorrem perdas estruturais e perdas comportamentais, conforme ilustram as Figuras 2.5 e 2.6.

Figura 2.5 - Identificação das perdas no evento de um banho.



Fonte: adaptado de Sherman (2014).

Figura 2.6 - Evento de um banho com dados de vazão e temperatura ao longo do tempo.



Fonte: Lutz (2011).

Esta distinção é possível pelo fato de que o total de água consumido em um banho pode ser segregado em duas intensidades de vazão. A primeira vazão durante o evento de um banho é caracterizada por ser máxima, de modo que o usuário elimine

rapidamente a água fria que estava em repouso nas tubulações. Esta vazão máxima é acompanhada de um aumento gradual da temperatura. Quando o usuário considera que a água do chuveiro está com uma temperatura ideal para o uso, o fluxo de água é reduzido e ocorre a adição de água fria por meio do misturador, ocorrendo um aumento da vazão conjunta, composta por água fria e água quente. A segunda vazão característica é relativa ao momento em que o banho em si é tomado, representado por vazão e temperatura constantes até o final do evento (LUTZ, 2005).

Por meio desta análise, um modelo simplificado para identificar as perdas pode ser adotado. O primeiro volume de água representativo da primeira vazão identificada é o volume de água que estava na tubulação e que havia sido aquecida em um evento de consumo anterior. Uma parte deste volume também pode ser desperdício de água quente por perdas comportamentais. Na Figura 2.6 estes desperdícios são verificados no intervalo de tempo de 8:51:36 a 8:53:26.

Da base de dados do REUWS foi possível extrair mais de 26000 eventos de banho com esta configuração nos traços de vazão. Para cada evento, está registrado na base de dados o volume de água total consumido, a duração total do consumo de água, o fluxo de pico e o fluxo preponderante. Desta análise o autor concluiu que, em média, 13,2 litros de água (3,5 galões) são desperdiçados por banho (LUTZ, 2005). Dependendo da idade da construção estes valores de desperdícios podem ser ainda maiores (KLEIN, 2004). Para a análise de desperdício por meio das torneiras, Lutz (2005) verificou que, em média, 4,3 litros de água fria são desperdiçados em eventos de longo consumo.

A outra maneira, mais confiável, de verificar a quantidade de água fria que é desperdiçada nos pontos de consumo de água quente é realizar medições individualizadas para cada aparelho sanitário. Identificando-se a vazão do aparelho e por meio de um sensor de temperatura à prova d'água, que registra medições de temperatura a cada segundo, é possível mensurar a quantidade de água fria que é desperdiçada até a água quente proveniente do aquecedor atingir o aparelho. Lutz (2011) foi um dos primeiros pesquisadores a coletar os dados de desperdício diretamente no local de uso de água quente. Por meio de um monitoramento de fluxo e temperatura durante eventos de banho em três residências unifamiliares o autor verificou que 30% de água é desperdiçada, conforme ilustra a Tabela 2.6.

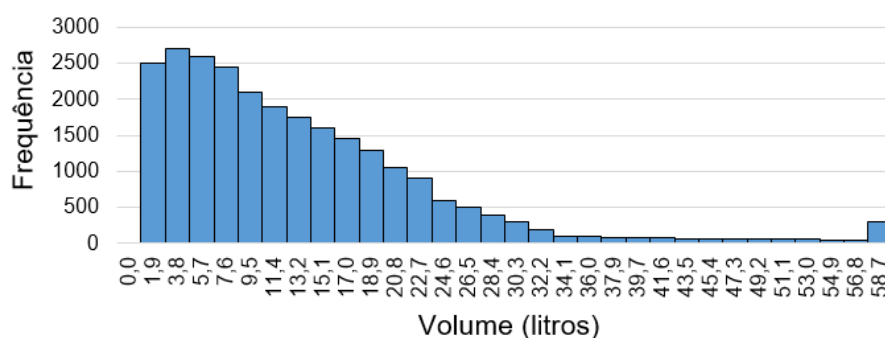
Tabela 2.6 - Uso e desperdício de água em cinco banhos analisados.

Data	Consumo total de água (litros)	Volume de água desperdiçada (litros)	Porcentagem de água desperdiçada (%)
07/01/2009	47,2	7,8	19,9
27/02/2009	39,7	9,4	31,2
20/03/2009	44,0	12,3	39,0
21/03/2009	43,8	9,0	26,0
22/03/2009	58,9	15,5	35,7
Média	46,7	10,8	30,2

Fonte: adaptado de Lutz (2011).

Outros estudos também utilizaram análise de fluxo para identificar os usos finais de água quente (LOWENSTEIN; HILLER, 1996; LOWENSTEIN; HILLER, 1998). Wehl e Kempton (1985) e Bohac et al. (2010) em seus trabalhos realizaram medições locais para obter o consumo de água quente nas residências. Em outra pesquisa de Kempton (1988) foi analisada a eficiência energética da distribuição de água quente por meio das tubulações. O isolamento das tubulações e perdas energéticas será melhor abordado na próxima seção.

A Figura 2.7 ilustra um histograma de desperdício de água no banho. É possível verificar que elevados desperdícios podem ser identificados nas residências dos Estados Unidos conforme analisado por Lutz (2005).

Figura 2.7 - Histograma da distribuição de desperdício nos banhos.

Fonte: Lutz (2005).

Sherman (2014) obteve permissão por parte do *Lawrence Berkeley National Laboratory* (LBNL) para analisar a base de dados de eventos de banhos monitorados no mês de dezembro de 2013 das pesquisas de Lutz. O objetivo principal da pesquisa de Sherman foi identificar os desperdícios comportamentais, conforme observa-se na Figura 2.5. Com o método utilizado pelo autor foi possível identificar a mesma configuração da Figura 2.5 em 283 eventos de banho de um total de 528 monitorados pelo LBNL. Identificou-se que o desperdício comportamental é de 47 segundos, em média. Entretanto, para países que possuem chuveiros combinados com banheiras dotadas de torneira do modo *diverter* um fator de 2,31 (*Tub Spout*) deve ser acrescido para o cálculo do desperdício comportamental total. A Tabela 2.7 ilustra o volume de desperdício comportamental em função da vazão do chuveiro. Para o Brasil, onde as cabines de banho normalmente não possuem banheira nem torneiras do tipo *diverter*, o fator de 2,31 deve ser desconsiderado.

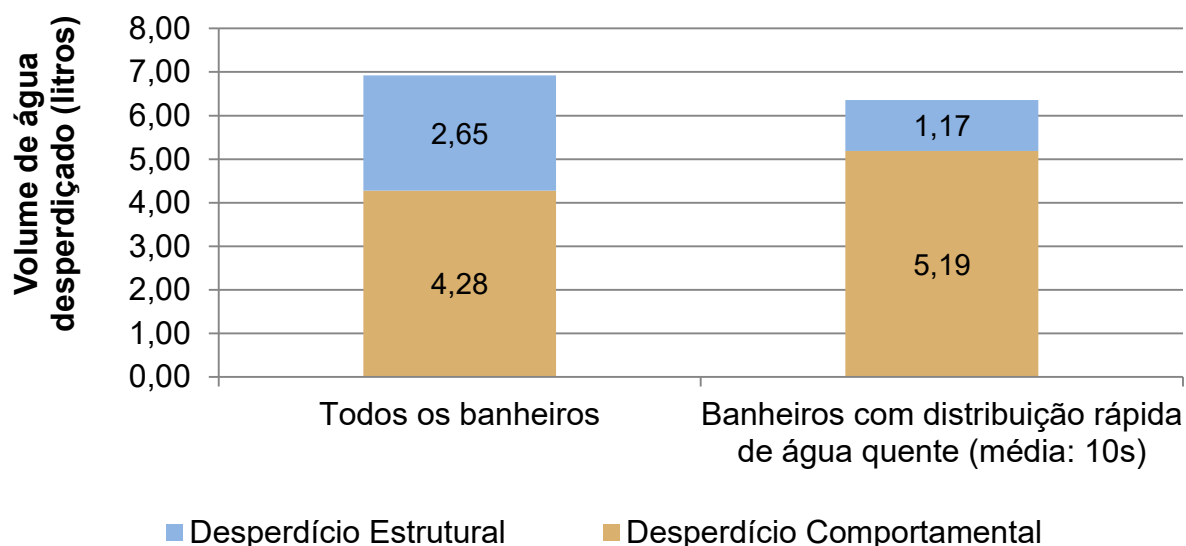
Tabela 2.7 - Desperdício comportamental em função da vazão do chuveiro.

Vazão (litros/seg.)	Desperdício comportamental no banho (litros)	Fator <i>Tub Spout</i> (litros)	Desperdício comportamental total (litros)
0,16	7,57	2,31	9,84
0,14	6,81	2,31	9,08
0,13	6,05	2,31	8,33
0,11	5,30	2,31	7,57
0,09	4,54	2,31	6,81

Fonte: Sherman (2014).

Na mesma pesquisa, Sherman (2014) identificou que não há relação entre o desperdício comportamental e estrutural. Ou seja, os usuários estão habituados a realizar o acionamento do chuveiro saindo da cabine de banho para realizar outras atividades, mesmo que o intervalo de tempo relativo ao desperdício estrutural seja baixo (menor que vinte segundos). Portanto, como ilustrado na Figura 2.8, ocorre um aumento do desperdício comportamental.

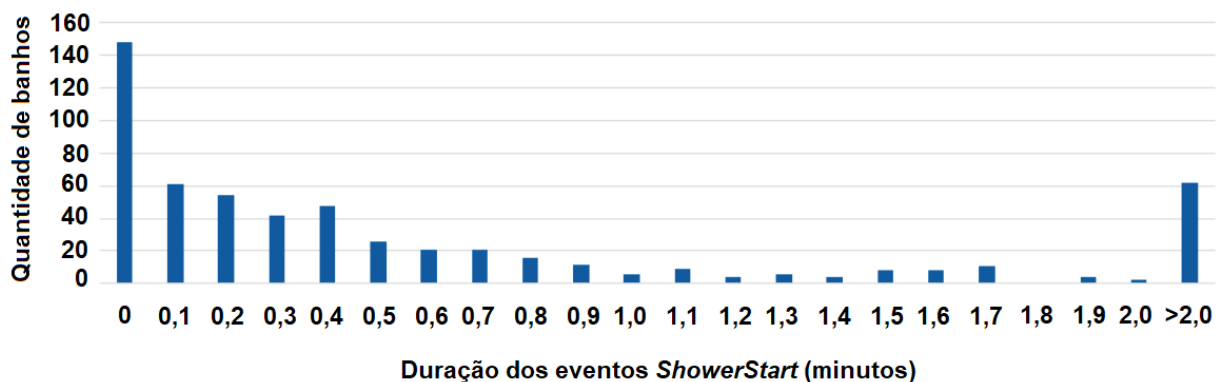
Figura 2.8 - Desperdício estrutural e comportamental.



Fonte: adaptado de Sherman (2014).

Com o intuito de evitar este desperdício comportamental teve-se o desenvolvimento da válvula *evolve ShowerStart*. Classificada como uma válvula de restrição termostática, Wood e D'Acquisto (2015) verificaram a eficiência energética do dispositivo e a satisfação dos usuários em dezoito residências, onde o produto foi instalado. De uma amostra de 574 banhos, aproximadamente, 80% dos banhos obtiveram o funcionamento da válvula no intervalo entre zero e um minuto, como ilustra a Figura 2.9. Observa-se também que em aproximadamente 60 eventos de banho o dispositivo foi capaz de economizar um volume de água equivalente a pelo menos dois minutos na vazão dos respectivos chuveiros analisados. O desperdício comportamental foi, em média, de 59 segundos e o desperdício estrutural foi, em média, de 64 segundos. Para uma edificação unifamiliar, para um chuveiro com vazão média de 0,16 litros/segundo, a economia anual de água pode ser de aproximadamente 3774 litros.

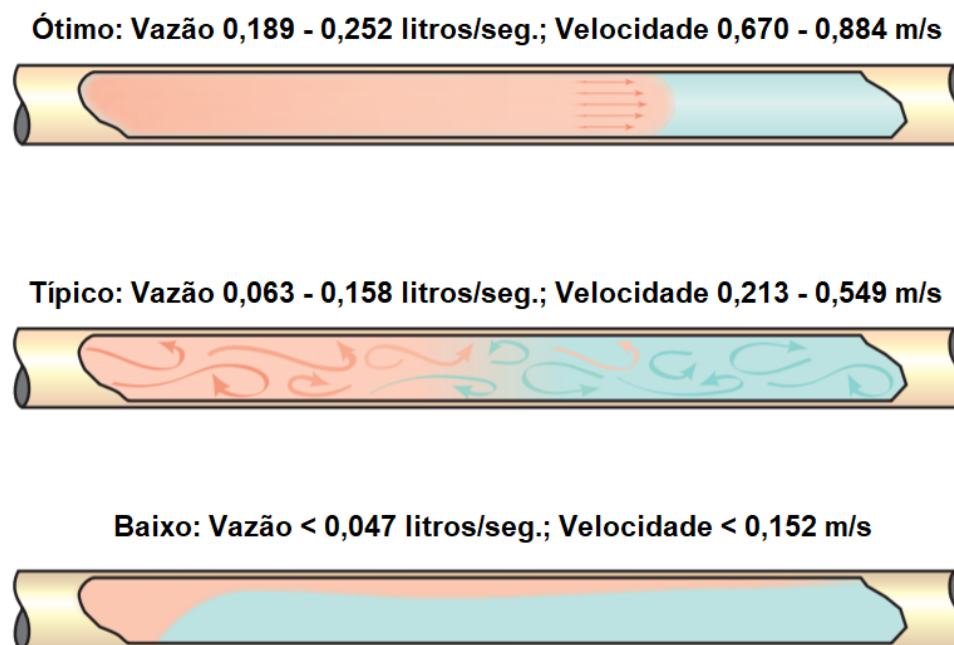
Figura 2.9 - Distribuição dos eventos ShowerStart (N=574).



Fonte: adaptado de Wood e D'Acquisto (2015).

Klein (2005) verificou em seus estudos que o desperdício estrutural depende da vazão dos aparelhos sanitários. Considera-se que ao acionar um aparelho sanitário a água quente oriunda do aquecedor a gás simplesmente força a saída da água fria da tubulação. Entretanto, o autor identificou que para baixas vazões, a água quente, por ser menos viscosa que a água fria, ocupa a porção superior da tubulação e mistura-se com a água fria antes de alcançar algum aparelho sanitário. A grande área de contato com a superfície superior da tubulação e com a água fria em repouso colabora com a transferência de calor da água quente para a água fria e para a vizinhança. Este fenômeno faz com que o desperdício de água, que não está com temperatura adequada para o banho, seja de até o dobro do volume de água que estava em repouso na tubulação. A Figura 2.10 ilustra como se procede o preenchimento da tubulação com água quente conforme a vazão. Para vazões entre 0,063 e 0,158 litros/segundo ocorre certa turbulência na tubulação e o volume de água fria que sai do aparelho antes da chegada da água quente pode ser de até 50% a mais que o volume de água que estava em repouso na tubulação. Para vazões acima de 0,189 litros/segundo o preenchimento da tubulação com água quente é da forma desejada e resulta em um desperdício de 10% a mais que o volume de água que estava em repouso na tubulação. Klein (2005) também ressalta que as conexões das tubulações com formato perpendicular tendem a causar aumento da turbulência, da perda de calor e conseqüente perda de água fria.

Figura 2.10 - Preenchimento da tubulação com água quente conforme a vazão.



Fonte: adaptado de Klein (2013).

Ally e Tomlinson (2002) realizaram um estudo em cinco residências do município de Palo Alto no estado da Califórnia para verificar a eficiência do sistema de recirculação de água por meio da tecnologia *Metlund D'MAND © system*. Maiores detalhes deste sistema de recirculação serão abordados na seção 2.6. Os autores estimaram a economia anual de água especificamente para um ponto de consumo de água quente, conforme ilustra a Tabela 2.8. Por meio de um contador de fluxo de água foi possível extrair o volume de água que foi recirculado anteriormente ao consumo de água quente e assim obter uma estimativa de economia. Os autores, assim como Klein (2005), também verificaram por meio de um teste, que o desperdício de água fria era maior em aparelhos com baixas vazões. O teste consistiu em coletar e quantificar a água de uma torneira até que a água saísse na temperatura de 80°F (26,6°C). Observou-se que para o mesmo ponto de consumo, porém com uma torneira dotada de um dispositivo para restringir o fluxo, o desperdício de água fria aumenta em 29%. É importante notar que as economias não são por residência, mas por um único ponto de consumo de água. Para cada residência, economias típicas poderiam ser maiores.

Tabela 2.8 - Economia de água estimada para cada residência de Palo Alto - Califórnia.

Localização	Economia de água estimada (litros/ano)	Ponto de uso	Comentários
Washington Avenue	11499	Torneira do banheiro	-
Guinda Street	7738	Torneira da cozinha	-
Josina Avenue	9896	Torneira do banheiro de visitas	problemas com os termopares
Matadero Avenue	4657	Torneira da suíte principal	-
Homer Avenue	3376	Torneira do banheiro (pavimento superior)	Dificuldade em ler os dígitos do painel

Fonte: Ally e Tomlinson (2002).

Quanto às pesquisas a nível nacional, Gonçalves et al. (1989), em uma análise específica em um determinado estudo de caso, obtiveram um tempo de 70 segundos para que a água percorresse a tubulação entre o aquecedor e o ponto de consumo mais distante da residência, desperdiçando aproximadamente 13,0 litros de água. Chaguri Junior (2009) realizou semelhante estudo de caso em apartamento situado na cidade de Ribeirão Preto (SP) e identificou um tempo de 76 segundos, desperdiçando 10,0 litros de água que estava em repouso na rede.

O CIRRA, entidade vinculada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP) realizou um estudo para analisar os diferentes sistemas de aquecimento de água para o banho (CIRRA, 2009). Para o estudo, seis pontos de banho foram instalados no vestiário dos funcionários da USP: dois pontos com chuveiro elétrico, um ponto com aquecedor a gás, um ponto alimentado por sistema solar, um ponto híbrido (solar de baixo custo com chuveiro elétrico), e um aquecedor de acumulação elétrico (boiler).

Para os pontos onde o aquecimento não era do tipo instantâneo, o desperdício de água até atingir a temperatura ideal de banho foi de 5,0 litros/banho para os sistemas de aquecimento solar e híbrido, e de 4,5 litros/banho para o sistema de aquecimento a gás.

Ioris e Ghisi (2021) verificaram o desperdício de água fria que ocorre antes da chegada de água quente em sete chuveiros de três edificações diferentes. Foi realizada uma comparação entre os desperdícios estimados encontrados por meio das plantas baixas dos projetos hidráulicos e desperdícios encontrados por meio de medições *in loco*, conforme ilustra a Tabela 2.9. Para os apartamentos analisados, a média encontrada para desperdício de água até que a água que sai do chuveiro sofresse alguma variação na temperatura foi 6,3 litros. E para a água sair do chuveiro a uma temperatura de 30°C, ocorre em média desperdício de 9,3 litros de água.

Tabela 2.9 - Comparação do volume de água desperdiçado mensurado em planta e medido *in loco*.

Condomínio	Desperdício em planta (litros)	Desperdício <i>in loco</i> (litros)	
		Na variação de temperatura da água	Ao atingir 30°C
Ilha Ventura (2 Quartos)	9,5	7,8	11,1
Ilha Ventura (3 Quartos)	-	7,9	10,3
Villa Vitória (2 Quartos)	7,7	5,6	10,3
Villa Vitória (3 Quartos)	6,8	5,0	8,6
Villa Vitória (4 Quartos)	-	5,6	8,3
Saint Tropez (WC)	3,9	4,7	7,5
Saint Tropez (WC Suíte)	5,3	7,7	8,9

Fonte: Ioris e Ghisi (2021).

2.5. Perda de energia na distribuição de água quente

A otimização e aperfeiçoamento do *layout* do sistema de distribuição de água quente pode acarretar em grande economia de energia e água em sistemas de aquecimento

(GU, 2007). Segundo o autor, a condutividade térmica do material utilizado para as tubulações, bem como, o ambiente no qual a tubulação é instalada desempenham um importante papel na redução das perdas térmicas. O intervalo de tempo entre dois consumos de água quente em um determinado ponto de consumo também influencia na quantidade de água e energia desperdiçada. Klein (2013) estima que um intervalo de tempo de 45 minutos é suficiente para não haver mais traços de água quente nas tubulações, ou seja, todo o calor contido na água foi transferido para a vizinhança.

Este trabalho considera que o usuário esteja fazendo o acionamento do chuveiro e permanecendo na cabine de banho para realizar o ajuste fino da temperatura. Considerando-se, entretanto, que os usuários acionam o registro de água quente no seu fluxo máximo para atingir temperaturas mais elevadas de forma mais rápida e ausentam-se da cabine para realização de outras atividades e posteriormente voltam para tomar o banho em si, deve-se também considerar o desperdício enquanto se dá o ajuste fino para reduzir a temperatura que provavelmente excedeu os 40°C, temperatura na qual os banhos normalmente são tomados.

As perdas térmicas podem ocorrer por condução entre a água quente e o ambiente, por convecção entre a água quente e as partes internas da tubulação, ou ainda pelo ambiente e a parede externa da tubulação (ou do isolamento térmico, quando existente) (CHAGURI JUNIOR, 2009). Chaguri Junior (2009) analisou as diferenças de perda térmica obtidas em tubulações de diferentes materiais com ou sem isolamento térmico. Para tubulações de cobre sem isolamento, obteve perdas térmicas por metro linear de tubulação de aproximadamente 584000 kcal/h.m. Com isolamento de espessura de 0,10 m as perdas reduzem para 0,31 kcal/h.m. Para tubulações de CPVC sem isolamento a perda térmica é de 63,76 kcal/h.m e com isolamento de espessura de 0,10 m a perda térmica é de 0,26 kcal/h.m. Sangoi (2015) salienta que essa diferença tão significativa obtida por Chaguri Junior (2009) é explicada pelo valor de espessura adotado pelo autor, que é maior do que os comumente empregados no mercado.

Nos estudos de Lutz (2005) foram identificadas perdas energéticas independentemente do tipo de aparelho sanitário de consumo final. Para o chuveiro e torneira ocorrem perdas energéticas após o consumo de água quente por estes aparelhos. Ou seja, a água quente que preencheu a tubulação ficará em repouso nas

tubulações perdendo calor para a vizinhança, caso não haja nova utilização dos aparelhos em um curto período de tempo. Para a torneira também haverá perda de energia nos eventos de baixo consumo de água em que o usuário faz o uso apenas da água fria, que estava em repouso na tubulação. Ao se acionar o registro de água quente, o aquecedor de passagem identifica mudança no fluxo de água e aciona a chama de aquecimento, desperdiçando assim energia para aquecer um volume de água que não será utilizado e que apenas permanecerá no interior da tubulação, perdendo calor posteriormente. Para lavadoras de louça e lavadoras de roupa desperdícios semelhantes aos anteriores ocorrem. Perde-se energia por meio da água quente que restará na tubulação após o consumo e também se exige mais energia dos aparelhos para aquecer a água fria que vem da tubulação para os níveis estabelecidos nos ciclos de lavagem.

Bøhm (2013) verificou que as perdas térmicas na circulação de água quente representam 23 a 70% do consumo de energia para o aquecimento de água. O autor ressalta a necessidade de avaliar a edificação para adotar a melhor solução para reduzir as perdas térmicas no sistema de distribuição, tais como, isolamento térmico, recirculação da água, localização dos aquecedores e distância até os pontos de consumo. Lutz (2011) identificou desperdício de 41% de energia nos cinco banhos analisados em três residências unifamiliares, conforme ilustra a Tabela 2.10.

Tabela 2.10 - Uso e desperdício de energia em cinco banhos analisados.

Data	Energia total consumida pelo aquecedor de água (MJ)	Energia utilizada no banho (MJ)	Energia desperdiçada (MJ)	Energia desperdiçada (%)
07/01/2009	5,45	4,34	1,11	25,7
27/02/2009	4,57	2,70	1,88	69,7
20/03/2009	4,38	3,00	1,38	45,8
21/03/2009	4,42	3,29	1,13	34,3
22/03/2009	5,80	4,12	1,68	40,9
Média	4,93	3,49	1,44	41,1

Fonte: adaptado de Lutz (2011).

A válvula *ShowerStart* é um dispositivo que foi lançado nos países norte-americanos com o intuito de eliminar o desperdício comportamental que ocorre nos banhos. Wood e D'Acquisto (2015) utilizaram esta válvula para identificar a economia de energia anual que o dispositivo consegue fornecer para as residências. Na pesquisa encontram-se os resultados da pesquisa piloto e também de medições feitas pelo *Pennsylvania Technical Reference Manual (PA TRM)*, conforme ilustra a Tabela 2.11. O estudo analisou também a aceitação do usuário quanto à instalação do dispositivo. A tecnologia satisfaz a grande maioria dos entrevistados.

Tabela 2.11 - Economia de energia elétrica por meio da utilização da válvula *evolve ShowerStart*.

Tipo de edificação	Economia de energia (kWh/unidade/ano)	
	PA TRM (2015)	Estudo Piloto (2014)
Unifamiliar	105,8	120,9
Multifamiliar	99,0	113,1
Desconhecida/Habitação padrão	114,6	131,0

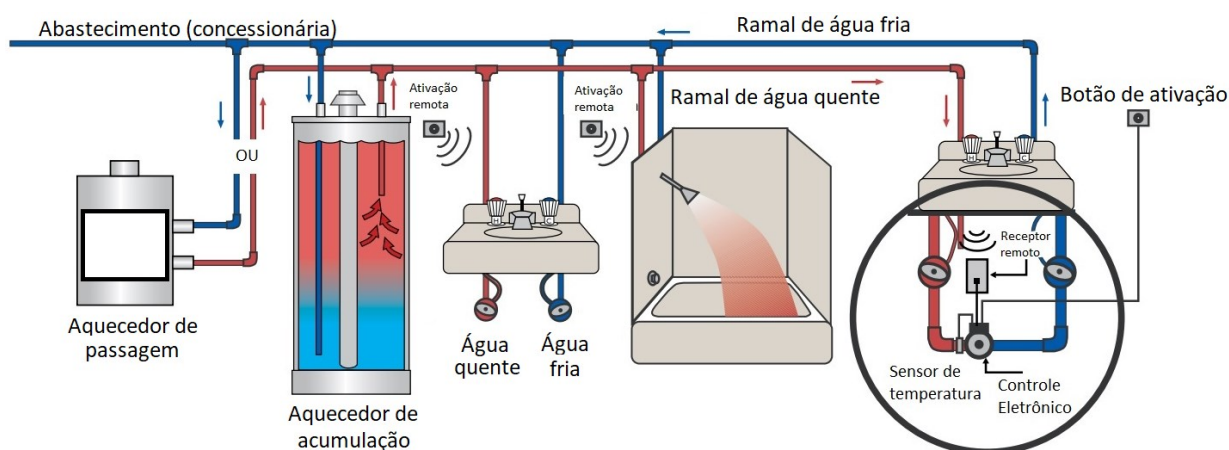
Fonte: Wood e D'Acquisto (2015).

Por meio de uma solução numérica é possível prever o decaimento da temperatura da água que passa por uma tubulação levando em conta a variação das propriedades termofísicas (SELEGHIM JUNIOR, 2018). Hiller (2008a) indica a análise do coeficiente global de transferência de calor nas tubulações como ferramenta para encontrar o comprimento crítico das tubulações que entrega água ao ponto final de consumo a uma temperatura mínima desejada em função da vazão e da temperatura inicial de saída de água do aquecedor. Essa análise é de grande importância para identificar o efeito do isolamento térmico nas tubulações, prever a quantidade de energia que está sendo perdida nos sistemas de distribuição de água quente e dimensionar corretamente os sistemas de distribuição de água quente.

2.6. Projetos e iniciativas de racionalização do uso de água e energia

Como forma de minimizar ou evitar perdas causadas pelos usuários e pelos aparelhos sanitários, algumas empresas têm desenvolvido acessórios componentes para os sistemas prediais. A empresa Taco, com sede no Canadá, desenvolveu um sistema (*Taco Genie*[®]) composto por uma bomba recirculadora e uma válvula que faz a união do sistema predial de água fria com o de água quente da edificação. Portanto, não há a necessidade de um ramal adicional para recircular a água. A válvula, que pode ser programada para funcionar nos horários de maior consumo de água quente, normalmente é instalada no ponto de consumo de água mais afastado do aquecedor, conforme observa-se na Figura 2.11. O usuário também pode optar pelas versões que funcionam por ativação remota ou sensores de presença. De acordo com a empresa, a válvula é de fácil instalação nos sistemas prediais existentes e pode promover economia considerável de água (TACOCOMFORT, 2021).

Figura 2.11 - Configuração da instalação do sistema Taco Genie.



Fonte: Tacocomfort (2021).

Um componente bastante semelhante ao sistema *Taco Genie* foi desenvolvido nos Estados Unidos. Primeiramente nomeado por *ACT Metlund D'MAND © system*, atualmente os produtores desenvolvem a própria bomba recirculadora destinada especificamente para esta função e o produto é designado por *Chilipepper CP2011*. O fabricante assegura que o sistema pode bombear a água em uma vazão de aproximadamente 11,0 litros/segundo. O seu funcionamento pode ser iniciado por modo *Wi-fi* ou simplesmente pelo acionamento de um botão remoto, conforme ilustra

a Figura 2.12. O preço sugerido pelo site do fabricante é de US\$ 230. Conforme relata o fabricante, o diferencial deste produto para o anterior está na velocidade com que o sistema irá fornecer a água quente. Este é o principal motivo que leva os consumidores a desejarem um produto deste gênero e não propriamente a economia de água que o sistema proporciona (CHILIPEPPER, 2021).

Figura 2.12 - Componentes do sistema Chilipepper CP2011.



Fonte: Chilipepper (2021).

Outro componente existente no mercado, é a válvula *ShowerStart TSV³* (*Thermostatic Shut-off Valve*) desenvolvida pela empresa Evolve (THINKEVOLVE, 2021). Diferentemente do sistema *Taco Genie[®]*, esta válvula foi concebida unicamente para a utilização em chuveiros. A instalação também é feita próxima ao equipamento sanitário e tem como função apenas evitar as perdas comportamentais. Estas perdas ocorrem quando o usuário do banho utiliza seu tempo para fazer outras atividades enquanto espera que a água atinja temperaturas mais elevadas. Esta válvula identifica quando a temperatura da água que passa pelo chuveiro atinge 35°C, interrompendo então o fluxo. Para reiniciar o fluxo de água, o usuário deve simplesmente puxar uma corda, ilustrada na Figura 2.13, que vem junto ao equipamento. O funcionamento para o próximo uso é reiniciado automaticamente pela válvula.

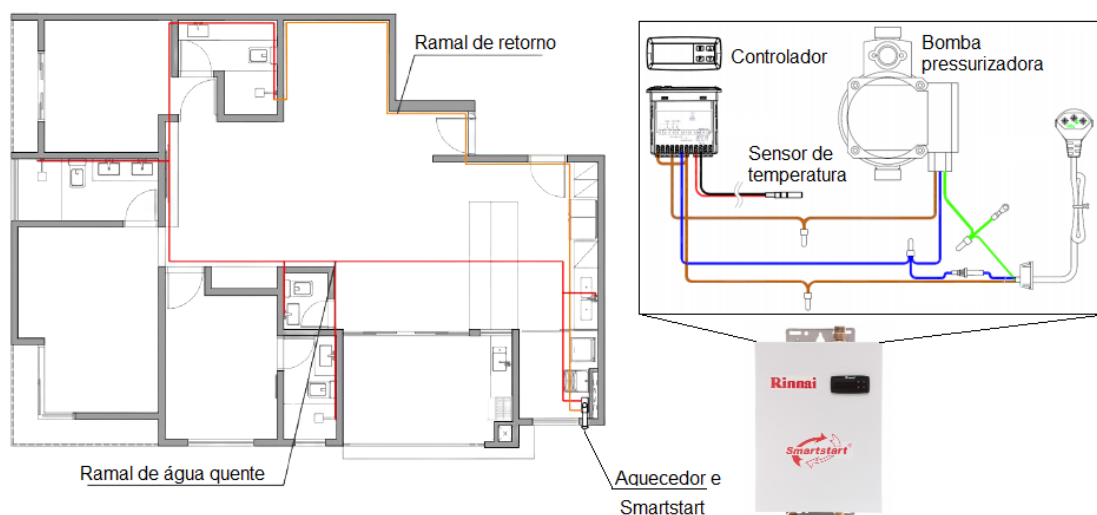
Figura 2.13 - Válvula evolve ShowerStart TSV³.



Fonte: Thinkevolve (2021).

A fabricante de aquecedores de passagem a gás Rinnai produz também o sistema de recirculação individual de água quente para aquecedores de passagem a gás RCS-9 BRV-Smartstart. O sistema é composto por um controlador que identifica por meio de um sensor de temperatura instalado na tubulação a temperatura da água no interior da tubulação. Por acionamento manual ou automaticamente pré-programado, a bomba pressurizadora entra em funcionamento quando a água estiver com temperatura abaixo da temperatura programada para utilização da água quente. A recirculação é feita por meio de um ramal de retorno instalado do último ponto de consumo de água quente até o aquecedor de passagem (RINNAI, 2021). Um exemplo de configuração para uma residência e os componentes do sistema Smartstart estão ilustrados na Figura 2.14.

Figura 2.14 – Sistema recirculador Smartstart.



Fonte: adaptado de Rinnai (2021).

Outra alternativa para evitar este desperdício de água fria no banho proposta pela empresa FORTLEV é o coletor Ecobanho FORTLEV. Este coletor, conforme ilustra a Figura 2.15, é um recipiente com capacidade para seis litros de água que deve ser posicionado abaixo do chuveiro. Realizada a coleta de água fria do banho, o coletor possui um formato anatômico favorável para destinar a água coletada para atividades como: lavar carros, regar plantas, usar na bacia sanitária, etc. (FORTLEV, 2018).

Figura 2.15 - Coletor Ecobanho FORTLEV.



Fonte: Fortlev (2018).

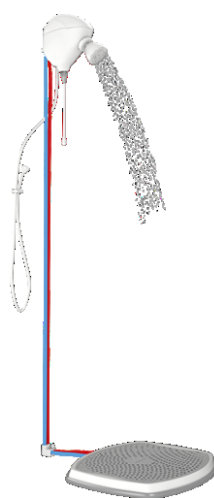
Algumas tecnologias podem ser utilizadas para evitar impactos associados ao consumo de combustíveis fósseis para o aquecimento de água. Um exemplo disto são as bombas de calor. Bianco et al. (2018) indicam que a utilização de bombas de calor para o aquecimento residencial pode contribuir para a redução do consumo de energia primária e redução da emissão de poluentes. Fan et al. (2021) investigaram um sistema de bomba de calor com apoio de energia que possui um COP (Coeficiente de desempenho) 30% maior que os sistemas empregados atualmente. O sistema é capaz de alcançar de 8 a 15% de eficiência solar. Apesar da existência de tecnologias mais ecológicas e com maior eficiência energética para a obtenção do aquecimento da água, em grande parte dos países desenvolvidos predomina a utilização de sistemas de aquecimento a gás. Na Holanda, por exemplo, a venda anual de aquecedores a gás é dezesseis vezes maior do que a venda de bombas de calor (KIEFT; HARMSSEN; HEKKERT, 2021).

Quanto ao desenvolvimento de alternativas a nível nacional para evitar o desperdício de água e energia, Pasetti (2014) elaborou um protótipo para automatizar uma

unidade de aquecimento solar doméstica. O autor propõe um sistema de aquecimento híbrido que utiliza energia solar e elétrica como fontes de energia. O sistema é composto por coletores solares, um tanque de armazenamento, um chuveiro elétrico, e os equipamentos eletrônicos que possibilitam a automatização do sistema. O sistema, por meio de testes e simulações, se mostrou viável, promovendo redução no consumo de energia elétrica em mais de 78% e evitando desperdício do volume de água que fica acumulado entre o boiler e o chuveiro.

Outro projeto brasileiro que visa economizar o uso de energia no banho é o produto desenvolvido pela empresa Rewatt Ecológica. A tecnologia consiste em uma serpentina que é disposta em uma base abaixo do chuveiro elétrico, conforme ilustra a Figura 2.16. Antes de se conectar ao chuveiro, a tubulação de água fria é conectada na serpentina da base. Ao cair água quente oriunda do chuveiro elétrico nesta base, a água fria que vem do reservatório é pré-aquecida antes de se direcionar para o chuveiro elétrico. Este ganho prévio de calor gera acréscimo no valor de temperatura da água que entra no chuveiro. Portanto, o sistema economiza energia elétrica devido ao menor consumo de energia que é solicitado do chuveiro elétrico para atingir determinada temperatura (REWATT, 2020).

Figura 2.16 - Kit Rewatt.



Fonte: Rewatt (2020).

Tratando-se ainda de economia de energia desperdiçada no banho, uma série de estudos analisa a eficiência energética de trocadores de calor que estão sendo

instalados em países como Irlanda, Canadá, Polônia, China (HEWITT; HENDERSON, 2001; POCHWAT et al., 2019; WONG; MUI; GUAN, 2010; ZALOUM; GUSDORF; PAREKH, 2007; ZALOUM; LAFRANCE; GUSDORF, 2007).

Os sistemas recuperadores de calor, indicados nos artigos pela sigla DWHR (*Drain Water Heat Recovery Systems*), são sistemas capazes de recuperar a energia térmica agregada na água aquecida nas edificações. Muita energia consumida no aquecimento de água residencial é desperdiçada. Por exemplo, uma lavadora de louças irá aquecer a água a 80°C e realizar o descarte a uma temperatura muito próxima de 80°C após a realização de um ciclo. Com uma lavadora de roupas ocorre semelhante desperdício, porém, em temperaturas na ordem de 60°C. O chuveiro oferece a água na temperatura de 40°C e esta mesma água atinge o ralo com temperaturas de 30-38°C (WONG; MUI; GUAN, 2010). O sistema recuperador de calor é composto por uma tubulação em espiral que circunda a tubulação do ralo dos chuveiros ou de outros pontos de consumo. Por esta tubulação ocorre a passagem da água fria que vai em direção ao chuveiro. Portanto, de maneira semelhante ao sistema Rewatt, a água atinge o chuveiro com uma temperatura um pouco mais elevada que a temperatura ambiente, exigindo menos consumo de energia do chuveiro ou dos próprios sistemas aquecedores.

Pesquisas realizadas na Irlanda do Norte identificaram eficiência de recuperação de calor de aproximadamente 67% (HEWITT; HENDERSON, 2001). Para que haja eficiências desta magnitude, tais sistemas devem ser instalados preferencialmente na posição vertical. Entretanto, devido às limitações espaciais e de compatibilização com as estruturas existentes, a única alternativa de instalação muitas vezes é na posição horizontal, reduzindo, deste modo, a eficiência dos sistemas e conseqüentemente a viabilidade econômica.

Na pesquisa de Boait et al. (2012), os autores analisaram a eficiência em termos de uso de energia e emissões de carbono de cinco diferentes tipos de sistemas de aquecimento residencial de água. Concluiu-se que a produção instantânea de água quente é muito mais eficiente do que sistemas com armazenamento ou de passagem a gás. Este modo de aquecimento da água é uma alternativa viável para países onde a matriz energética é bem estruturada e preparada para altas demandas de energia nos horários de pico.

Em Revista de Propriedade Industrial (RPI) identificou-se uma patente da autoria de Camila Bruch Souza (1994) que trata de uma válvula monocomando instalada próxima à entrada de água quente e fria do chuveiro. Essa válvula é responsável por identificar a temperatura da água provinda do aquecedor de passagem, redirecionando-a para uma cisterna de captação caso a temperatura seja inferior a ideal para o conforto do usuário. Para fazer com que a água circule novamente pelo chuveiro, um dispositivo sonoro emite um sinal quando a água se encontra na temperatura ótima, indicando assim ao usuário que deve ser feito o acionamento manual da válvula monocomando, fechando o desvio para a cisterna e abrindo a saída unicamente para o chuveiro (JUSBRASIL, 2015).

O Quadro 2.1 resume as características dos principais equipamentos disponíveis atualmente para economizar água e energia relacionados ao banho nas edificações residenciais.

Quadro 2.1 – Característica dos equipamentos de economia de água e energia relacionados ao banho.

Equipamento	Benefícios	Limitações	Potencial de economia de água	Potencial de economia de energia
<i>Sistema Taco Genie®</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil instalação • Pouca interferência na edificação • Recirculação programável • Ativação remota 	<ul style="list-style-type: none"> • Custo elevado • Não indicado para sistemas de distribuição em núcleo 	Sim	Não
<i>Chilipepper CP2011</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil instalação • Pouca interferência na edificação • Recirculação programável • Ativação <i>Wi-fi</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Custo elevado • Não indicado para sistemas de distribuição em núcleo 	Sim	Não
<i>ShowerStart TSV³</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil instalação • Interferência mínima na edificação • Baixo custo 	<ul style="list-style-type: none"> • Evita apenas desperdício comportamental 	Sim	Não

Quadro 2.1 – Característica dos equipamentos de economia de água e energia relacionados ao banho (continuação).

RCS-9 BRV- <i>Smartstart</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Recirculação programável • Ativação remota 	<ul style="list-style-type: none"> • Custo elevado • Não indicado para sistemas de distribuição em núcleo • Grande interferência na edificação 	Sim	Não
Ecobanho FORTLEV	<ul style="list-style-type: none"> • Baixo custo 	<ul style="list-style-type: none"> • Dependente da iniciativa do usuário 	Sim	Não
Rewatt Ecológica	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil adaptação • Aplicável para chuveiros elétricos e aquecimento elétrico com boiler 	<ul style="list-style-type: none"> • Estética 	Não	Sim
DWHR <i>Systems</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicável a todos os sistemas • Grande número de pesquisas confirmando a eficiência • Sem consumo de energia para funcionamento 	<ul style="list-style-type: none"> • Pouco espaço para instalação em edificações multifamiliares • Manutenção frequente 	Não	Sim
Válvula monocomando	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil adaptação • Pouca intervenção no ponto de utilização • Sem consumo de energia para funcionamento 	<ul style="list-style-type: none"> • Um componente por aparelho sanitário • Pouco difundida • Dependente de sistema de armazenamento 	Sim	Não

Outra iniciativa interessante voltada para a economia de água é a identificação dos produtos que atendam critérios de eficiência e performance por meio de selos, como vem sendo feito nos Estados Unidos. A válvula *evolve StartShower*, por exemplo, é um dispositivo que se enquadra nas especificações da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos. Os selos *WaterSense* certificam os produtos e serviços por

usarem pelo menos 20% menos água, energia ou funcionarem tão bem quanto ou melhor, do que modelos regulares existentes no mercado (EPA, 2019).

2.7. Síntese da revisão de literatura

Apesar da importância em se economizar água e energia destinadas para o aquecimento e uso de água quente, poucos são os estudos atuais que abordam este desperdício e soluções para contornar este problema.

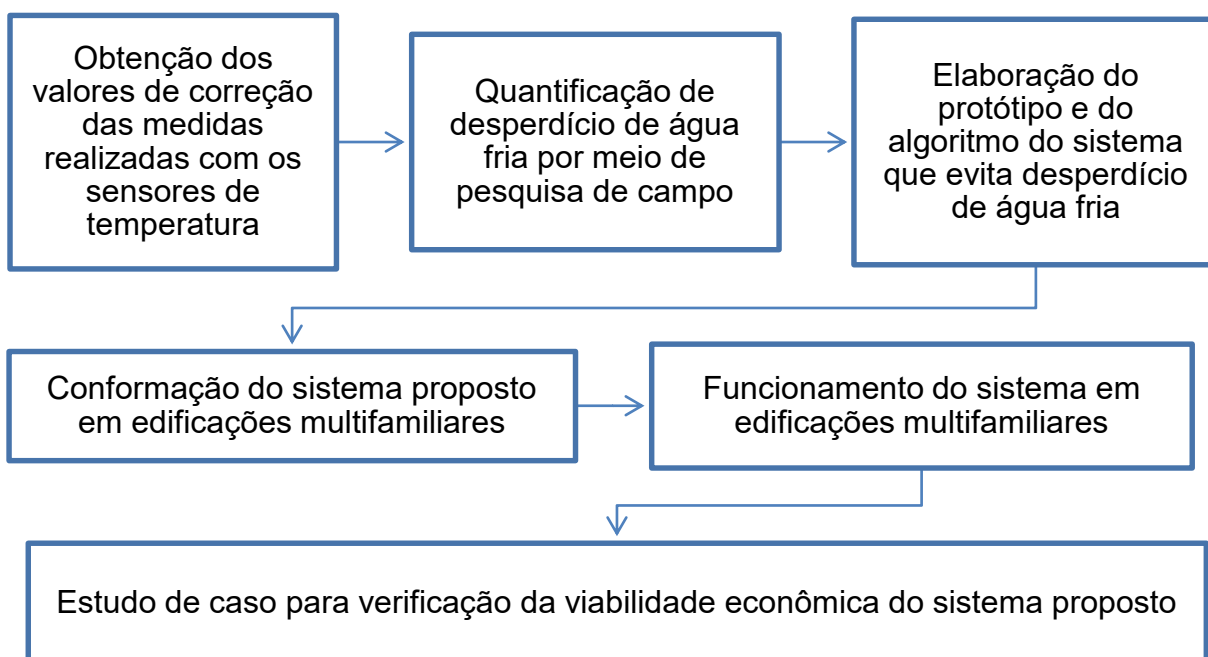
Entre as formas de se reduzir o desperdício de água potável nas residências está a intervenção no modo como os sistemas prediais atualmente são projetados e concebidos. Em estudos realizados por outros autores, constata-se que a quantidade de água que sofre perdas térmicas e é desperdiçada no banho é bastante elevada, justificando, portanto, a elaboração de componentes e tecnologias voltadas para a redução ou eliminação destas perdas.

Em países como Alemanha e Estados Unidos, por exemplo, o gás é uma das opções mais importantes para o aquecimento da água. Apesar de um número reduzido de residências no Brasil adotarem o sistema de aquecimento da água por meio de gás, o desperdício de água típico destes sistemas é conhecido e existente. As tecnologias desenvolvidas no exterior ou não eliminam o desperdício na sua totalidade e são específicas para os sistemas de aquecimento e distribuição de água existentes no próprio país ou são de custo muito elevado, de forma que não é tão atrativo o investimento para o consumidor final. Portanto, a proposta deste trabalho é elaborar um sistema automatizado para os pontos de consumo de água quente de edificações com aquecimento principal por meio de aquecedores de passagem a gás. Pretende-se que o sistema seja de baixo custo em relação aos sistemas de recirculação atualmente empregados no Brasil, que cause pequenas intervenções no modo como os sistemas prediais usuais são projetados e que se adapte às técnicas hidrossanitárias utilizadas no país. Ressalta-se que a conformação e instalação da tecnologia proposta neste trabalho é para a fase de projeto de uma edificação. Ou seja, não será considerada a possibilidade de instalação da tecnologia em edificações residenciais existentes.

3. Materiais e métodos

Este capítulo inicia-se com a abordagem do método e materiais utilizados para calibrar e obter valores de correções para os sensores de temperatura, equipamento de grande importância para todas as medições realizadas neste trabalho. A seção seguinte trata da quantificação do montante de água fria que é desperdiçado nos segundos iniciais de uso de um aparelho sanitário. A quantificação foi realizada em residências uni e multifamiliares que possuem aquecedores de passagem a gás como fonte principal de aquecimento da água. Na sequência, o capítulo aborda informações a respeito da localização, operação e materiais necessários para a elaboração do protótipo que tem a finalidade de validar e comprovar o funcionamento da tecnologia proposta. Este capítulo também explica como é proposta a instalação do sistema automatizado em edificações multifamiliares e as instalações e compatibilizações adicionais aos sistemas prediais usuais para o seu correto funcionamento. Por fim, o capítulo explica como foi estruturada a análise econômica do estudo de caso da tecnologia proposta. A Figura 3.1 apresenta um fluxograma dos métodos para se atingir os objetivos deste trabalho.

Figura 3.1 - Fluxograma dos métodos.



3.1. Calibração dos sensores de temperatura

As medições de temperatura da água de todos os experimentos deste trabalho foram realizadas por meio do sensor digital DS18B20 da marca Maxim Integrated, ilustrado na Figura 3.2. A facilidade de obtenção, reposição, baixo custo e a característica de ser à prova d'água foram os motivos por adotar este sensor na condução dos experimentos. De acordo com o manual do fabricante, o sensor é capaz de medir um intervalo de temperatura entre -55°C e 125°C com precisão de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

Figura 3.2 – Sensor de temperatura DS18B20.



Além da precisão, o tempo de resposta do termômetro é de grande importância para a confiabilidade dos resultados pretendidos por meio das medições. Por este motivo, foram realizados ensaios em laboratório por meio de banho-maria, termômetro digital e termômetro de mercúrio para conferir a precisão e tempo de resposta de todos os sensores DS18B20 utilizados neste trabalho.

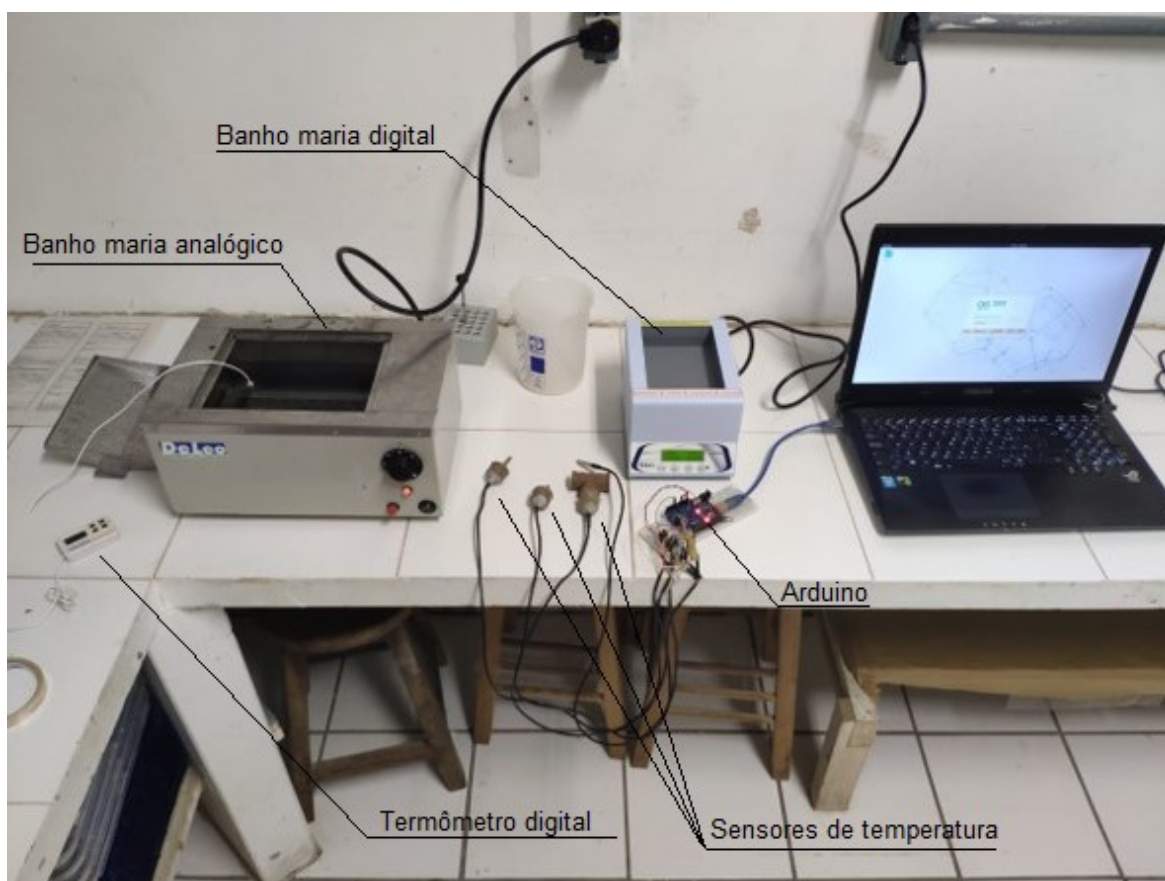
3.1.1. Tempo de resposta dos sensores de temperatura DS18B20

O primeiro ensaio consistiu em caracterizar o tempo de resposta dos sensores de temperatura. As medições de temperatura conduzidas neste trabalho consistem em identificar o tempo decorrido para que haja mudança de temperatura da água, em determinado ponto de uma tubulação distante de sua fonte aquecedora, após iniciar fluxo de água por este ponto.

A Figura 3.3 mostra os equipamentos utilizados para os ensaios. Para identificar este tempo de resposta foram utilizados os seguintes equipamentos:

- 1 aparelho de banho-maria analógico da marca DeLeo;
- 1 aparelho de banho-maria digital da marca Kasvi;
- 1 termômetro digital com visor LCD;
- 1 termômetro de mercúrio;
- 4 sensores DS18B20;
- 1 Placa Arduino UNO e notebook.

Figura 3.3 – Equipamentos utilizados para os ensaios.



A grande maioria das medições de temperatura da água que foram realizadas neste trabalho identificam variações de temperatura entre o intervalo de 18°C e 42°C. No aparelho de banho-maria analógico foi regulada a temperatura próxima de 40°C. Neste mesmo aparelho foram inseridos o termômetro digital e o termômetro de mercúrio como alternativas para certificar-se que a temperatura estava regulada

próxima dos 40°C. No outro aparelho de banho-maria foram regulados digitalmente valores de temperatura entre 17 e 19°C. Ambos os aparelhos de banho-maria não possuíam agitação mecânica.

O ensaio consistiu em acomodar os sensores de temperatura à prova d'água DS18B20 primeiramente no aparelho de banho-maria com temperatura mais baixa e depois transferir imediatamente os sensores para o aparelho de banho-maria com temperatura mais elevada. Este procedimento foi realizado com três temperaturas iniciais diferentes marcadas pelo termômetro do banho-maria digital: 17,6°C, 18,7°C e 19,4°C. Os sensores de temperatura foram acomodados no banho-maria digital durante o intervalo de tempo de um minuto, ou até que as medições dos sensores transmitidas pelo Arduino e verificadas por meio do notebook se estabilizassem. Decorrido o tempo de estabilização da temperatura, todos os sensores eram transferidos imediatamente para o aparelho de banho-maria com temperatura mais elevada (40°C). Acompanhando as medições dos sensores de temperatura por meio do notebook foi possível transferir os dados para uma planilha para gerar gráficos e identificar o tempo de resposta para iniciar mudança na temperatura medida e identificar o tempo que demora para o sensor variar o seu valor da temperatura inicial até a temperatura final de 40°C.

3.1.2. Precisão dos sensores de temperatura DS18B20

Durante as medições de temperatura por meio dos sensores DS18B20 verificou-se que ao aferir a temperatura de um meio com os diferentes sensores, o valor da medição de um sensor para outro tinha diferenças significativas. O segundo ensaio consistiu em identificar se a precisão dos sensores de temperatura DS18B20 tinha valor semelhante ao indicado pelo fabricante, de $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

Para este ensaio foram utilizados os seguintes equipamentos:

- 1 aparelho de banho-maria digital da marca Kasvi;
- 4 sensores DS18B20;
- 1 Placa Arduino UNO e notebook.

No aparelho de banho-maria digital foi regulada a temperatura de 31°C para não ter variações ocasionadas pela temperatura ambiente do laboratório que era de 18°C. Os sensores de temperatura DS18B20 foram então imergidos no banho-maria e deixados em repouso por intervalo de dez minutos. Durante este intervalo os sensores transmitiam, por meio do Arduino, os valores de temperatura aferidos a cada segundo para o notebook.

As medições foram enviadas para uma planilha e dos valores de medição de cada sensor extraiu-se o valor da moda das temperaturas aferidas. Cada sensor de temperatura apresenta uma diferença entre o valor da moda e a temperatura pré-fixada no banho-maria. O sensor de temperatura que apresentou a maior diferença entre o valor da moda de temperatura aferida e a temperatura pré-fixada foi o sensor de referência para a precisão.

3.2. Pesquisa de campo

A quantidade de água fria desperdiçada nos aparelhos sanitários nos sistemas usuais de edificações residenciais que usam aquecedores de passagem varia em função:

- do diâmetro da tubulação desde o aquecedor até os pontos de consumo;
- do comprimento da tubulação;
- da vazão do aparelho sanitário;
- da eficiência do aquecedor de passagem;
- do intervalo de tempo entre dois consumos de água em pontos de consumo que utilizam o mesmo ramal de tubulação ou parte dele;
- do material da tubulação e do isolamento, caso existente.

Para quantificar a quantidade de água fria que é desperdiçada nos segundos iniciais da utilização dos pontos de consumo de água quente considerou-se o acionamento imediato do aquecedor de passagem assim que houvesse demanda de água quente por meio de um aparelho sanitário.

Para comprovar que a água fria desperdiçada nos segundos iniciais da utilização dos pontos de consumo de água quente, em parte, é a água que fica em repouso nas

tubulações entre o aquecedor e estes pontos, foram realizadas medições *in loco* em catorze residências situadas no sul do Brasil. Uma residência multifamiliar no município de Criciúma – SC, seis residências multifamiliares no município de Florianópolis – SC, uma residência unifamiliar no município de São Lourenço do Oeste – SC, uma residência multifamiliar no município de Pato Branco – PR, duas residências multifamiliares no município de São José – SC, uma residência multifamiliar em Porto Alegre – RS, uma residência unifamiliar no município de Tubarão – SC e uma residência unifamiliar em Curitiba – PR foram monitoradas. Destas catorze residências, foram obtidos dados de desperdício de água fria de dezesseis torneiras e um chuveiro que são abastecidos por água quente. O número de residências analisadas é baixo pela dificuldade de encontrar residências com aquecimento a gás, pelo inconveniente de solicitar a autorização e presença dos proprietários para realizar as medições *in loco*, e pelas medidas de segurança decretadas no período da pandemia de Covid-19.

Para cada residência, foram levantados dados como:

- município onde a residência se situa;
- área total da unidade residencial;
- quantidade de pontos de consumo de água quente;
- o ponto de consumo mais próximo e mais afastado do aquecedor ou reservatório de água quente da residência;
- data em que a medição foi realizada;
- temperatura ambiente na data da medição.

Primeiramente, os moradores das unidades foram questionados se houve consumo de água quente nos instantes precedentes às medições. Para confirmar, a temperatura da água dos pontos de consumo de água quente foi previamente medida para verificar em que faixa de temperatura se encontrava e que realmente não havia ocorrido consumo.

Na pesquisa de campo optou-se por fazer as medições de desperdício de água fria com o aquecedor de passagem no nível de aquecimento vigente, ou seja, com a temperatura que o usuário estava acostumado e confortável no período da medição.

Antes de começar as medições de temperatura, verificava-se a vazão dos aparelhos com o acionamento do registro de água quente, porém, com o aquecedor de passagem a gás desligado. Com o auxílio de um recipiente com graduação em mililitros, três coletas de água dos aparelhos acionados na vazão mais alta eram efetuadas, com acionamento simultâneo de um cronômetro. Lutz (2005), ao analisar o desperdício de água fria no consumo de água quente, também considera que primeiramente o usuário aciona o aparelho na vazão mais alta para que o mesmo obtenha água quente mais rapidamente. A razão do volume coletado pelo tempo de coleta caracteriza a vazão mais elevada do aparelho. Para obter um valor mais confiável para a vazão máxima, foi realizada a média das três medições de vazão.

Na sequência, o aquecedor a gás era ligado e o registro de pressão de água quente do aparelho a ser analisado era aberto na sua vazão máxima. Procedia-se então com a coleta da água com um recipiente (para posterior reutilização) e media-se a temperatura da água logo na saída do aparelho com um termômetro à prova de água, conforme mostra a Figura 3.4.

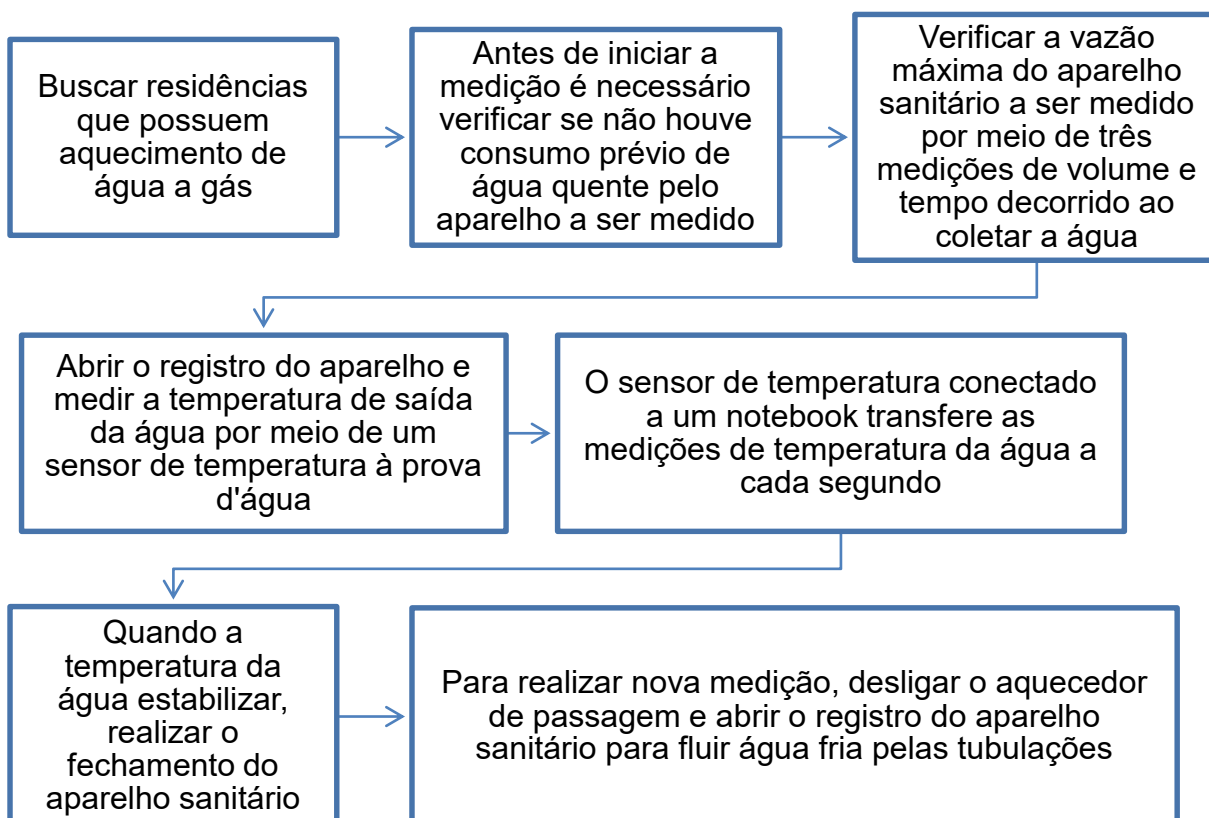
Figura 3.4 – Medição da temperatura da água na saída do aparelho sanitário por meio do sensor DS18B20.



O termômetro conectado a um notebook estava programado para receber e registrar medições de temperaturas a cada segundo. As medições de temperaturas eram monitoradas simultaneamente à coleta de água e quando a temperatura da água apresentava comportamento estável sem variar positivamente o seu valor, procedia-se com o fechamento do registro de pressão. Multiplicando-se a vazão encontrada pelos valores de tempo associados a cada temperatura medida, obtêm-se o volume de água desperdiçado para que a água atinja determinada temperatura.

Em cada residência eram realizadas três medições de desperdício para cada aparelho sanitário analisado. Para proceder com nova coleta de água com medição de temperatura, o registro de gás do aquecedor de passagem era fechado, de modo que ao se realizar a abertura do registro de pressão de água quente do aparelho a ser analisado, fluía água fria. Este procedimento fazia com que a tubulação e todo o sistema resfriassem de forma que fosse possível simular novamente uma situação usual de utilização do aparelho. A Figura 3.5 ilustra o fluxograma do método da pesquisa de campo.

Figura 3.5 - Fluxograma da pesquisa de campo.



Em uma residência, onde foi possível despende mais horas de medição e houve facilidade de acesso, foi possível realizar duas medições complementares para comprovar a hipótese de que a água quente atinge os pontos de consumo mais próximos do aquecedor mais rapidamente do que os pontos mais afastados. A residência analisada não possui *as built*, portanto não foi possível afirmar que o ponto de consumo mais próximo do aquecedor realmente possui menor comprimento de tubulação para atingi-lo.

Encerrada a medição de desperdício de água fria do ponto visualmente mais próximo do aquecedor, foi realizada a medição de desperdício de água fria do ponto visualmente mais afastado. De modo semelhante, foi realizada a medição de desperdício de água fria do ponto mais próximo após ter sido realizada a medição do ponto mais afastado.

3.3. Conformação e funcionamento do sistema

O funcionamento do sistema automatizado para evitar desperdício de água fria nos instantes iniciais da utilização de água quente resume-se na abertura de uma válvula solenoide localizada no final do ramal do sistema predial de água quente da residência. Esta válvula tem a função de direcionar a quantidade aproximada de água fria que seria desperdiçada por um determinado aparelho para um reservatório para posterior utilização. Por meio de um sinal de radiofrequência enviado ao se acionar um botão próximo ao ponto de consumo de água quente desejado, o sistema reconhece qual ponto de consumo foi acionado e a quantidade aproximada de água fria que deve liberar por meio da válvula até que ocorra a chegada da água quente do aquecedor.

A Figura 3.6 ilustra a planta baixa de um sistema predial de água fria e água quente usual. A Figura 3.7 mostra um esquema vertical do sistema predial de água fria e água quente na região do apartamento, ilustrado na Figura 3.6, onde se encontram os banheiros. Em edificações multifamiliares com aquecimento da água por meio de aquecedores de passagem a gás, normalmente os pontos são abastecidos por um sub-ramal de água fria conectado ao reservatório da edificação, e outro sub-ramal de água quente conectado ao aquecedor de passagem.

Figura 3.6 - Planta baixa de sistema predial de água fria e água quente usual.

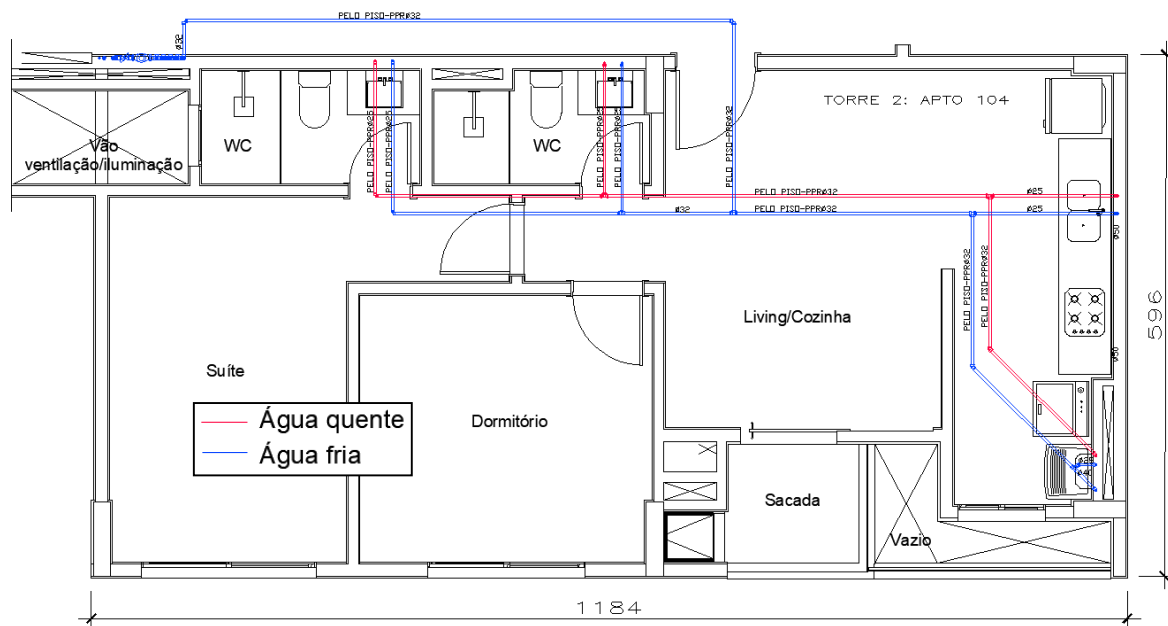
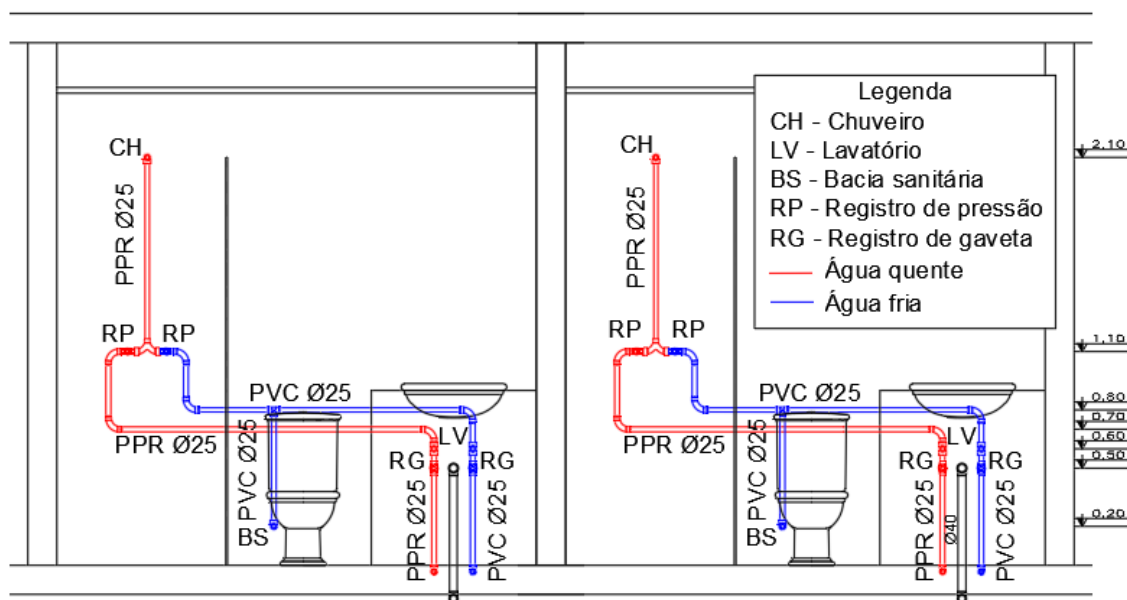


Figura 3.7 - Esquema vertical de sistema predial de água fria e água quente usual.



São necessários registros de gaveta nos sub-ramais para interromper o fluxo de água no caso de eventuais reparos e também registros de pressão para o ajuste fino da vazão da água fria e água quente. Por fim, a água circula pelo misturador, onde a água fria e a água quente se misturam, e seguem para o chuveiro ou para a torneira.

Para o sistema automatizado proposto são necessárias algumas modificações na conformação das tubulações do sub-ramal de água quente. Para aumentar a eficiência do sistema, o ramal principal do sub-ramal de água quente deve passar o mais próximo possível dos pontos de consumo de água quente.

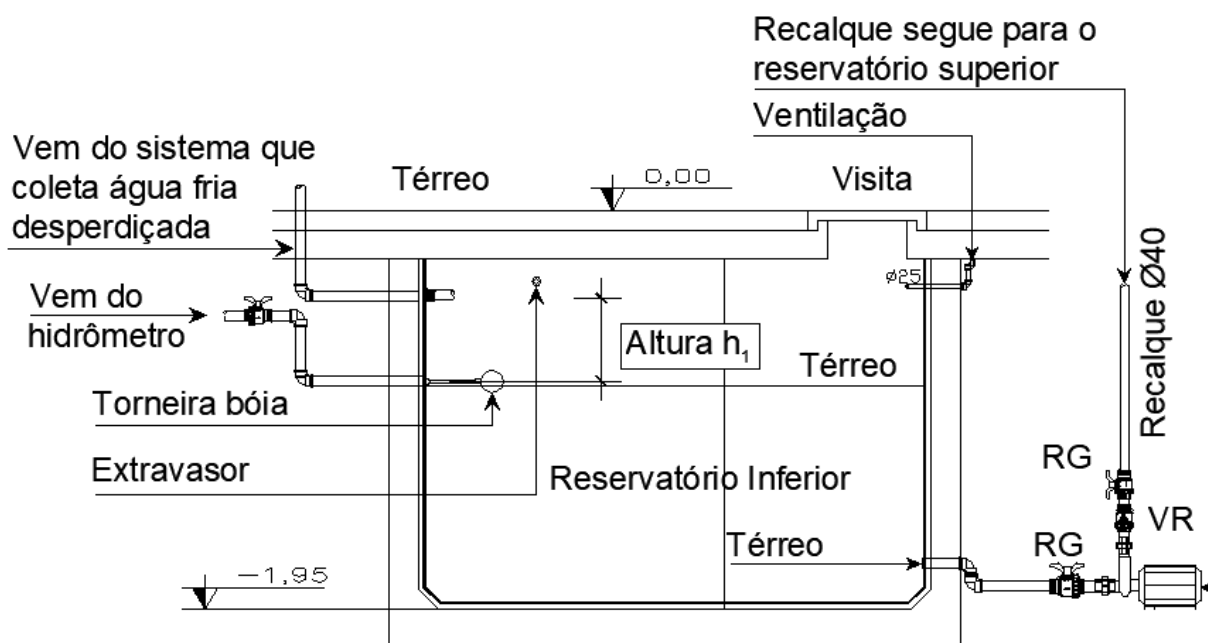
Os botões de acionamento que enviam o sinal de radiofrequência devem ser instalados próximos aos registros de pressão de água quente. Além disso, próximo ao ponto de consumo de água quente mais afastado do aquecedor, o sistema deve possuir uma válvula solenoide. Por último, deve haver o sistema de coleta de água dos pontos de consumo da residência, que será análogo aos componentes de um sistema predial de esgoto sanitário. Primeiro deve haver uma tubulação análoga aos ramais de descarga, que coleta a água que passa pela válvula solenoide. Esta tubulação será de mesmo diâmetro da tubulação do sub-ramal. Em seguida esta tubulação será conectada a uma tubulação vertical, responsável por coletar a água de todas as unidades habitacionais e direcioná-la ao reservatório inferior de água potável da edificação com o auxílio de tubulações de maiores diâmetros, quando necessário.

Os diâmetros das tubulações que direcionam a água para o reservatório inferior de água potável dependerão da quantidade de pontos de consumo de água quente da edificação e serão determinados por meio do método da soma dos pesos que é abordado na NBR 5626 (ABNT, 1998). Todas as demais recomendações feitas pela NBR 5626 (ABNT, 2020a) para o funcionamento correto do sistema predial de distribuição devem ser seguidas para a instalação do sistema de coleta de água do sistema automatizado proposto.

Para facilitar as instalações, portanto, é possível haver mais de uma tubulação vertical que colete a água das diferentes regiões dos pavimentos tipo da edificação. Estas tubulações verticais podem ser instaladas nos *shafts* com as tubulações de água quente, água fria e esgoto. Por fim, estas tubulações verticais, conectam-se às tubulações de maiores diâmetros no subsolo, que destinam a água para o reservatório inferior de água potável da edificação.

A conexão destas tubulações com o reservatório inferior de água potável deve ocorrer a uma altura h_1 acima da entrada de água da concessionária, conforme ilustra a Figura 3.8.

Figura 3.8 - Conexão da tubulação que coleta água fria dos pontos de consumo de água quente no reservatório inferior de água potável da edificação.



Esta altura varia conforme o volume de água estimado que será coletado na pior situação, ou seja, no uso simultâneo de todos os pontos mais afastados dos aquecedores de cada unidade habitacional. Este volume é, portanto, a quantidade total de água que fica em repouso em todos os ramais de água quente das unidades habitacionais da edificação.

O volume de água no interior das tubulações de água quente de uma unidade habitacional é calculado por meio da Equação 1. Ressalta-se que a variável comprimento de tubulação deve ser medida entre o aquecedor e o ponto de água quente mais afastado que é alimentado por este aquecedor.

$$V_1 = \frac{10^{-3}\pi}{4} (D_1^2 c_1 + D_2^2 c_2 + D_3^2 c_3 + \dots + D_n^2 c_n) \times i \quad (1)$$

Onde:

V_1 é o volume de água no interior da tubulação de água quente de um apartamento (litros);

D_n é o diâmetro interno dos trechos de tubulação (mm);

c_n é o comprimento dos trechos de tubulação entre aquecedor e o ponto mais afastado de consumo de água quente, onde se localiza a válvula solenoide (m);

n é o número de trechos do ramal principal entre o aquecedor e a válvula solenoide que possuam diâmetros diferentes;

i é o fator de correção do volume.

O valor da altura do reservatório que deve ser reservado para o volume de água coletado dos apartamentos da edificação será obtido por meio da Equação 2.

$$h = \frac{V_2}{10A_b} \quad (2)$$

Onde:

h é a altura do reservatório inferior de água potável que deve ser reservada para o volume de água coletado dos apartamentos (cm);

V_2 é o volume de água do reservatório inferior de água potável destinado para armazenar a água dos apartamentos (litros);

A_b é a área da base do reservatório inferior de água potável (m²).

Para situações em que o volume coletado de água de todos os ramais for muito grande, por exemplo, em edifícios altos, a ponto de inviabilizar a compatibilização proposta na Figura 3.8 deve ser previsto um reservatório inferior de água potável adicional conectado com o reservatório inferior de água potável usual.

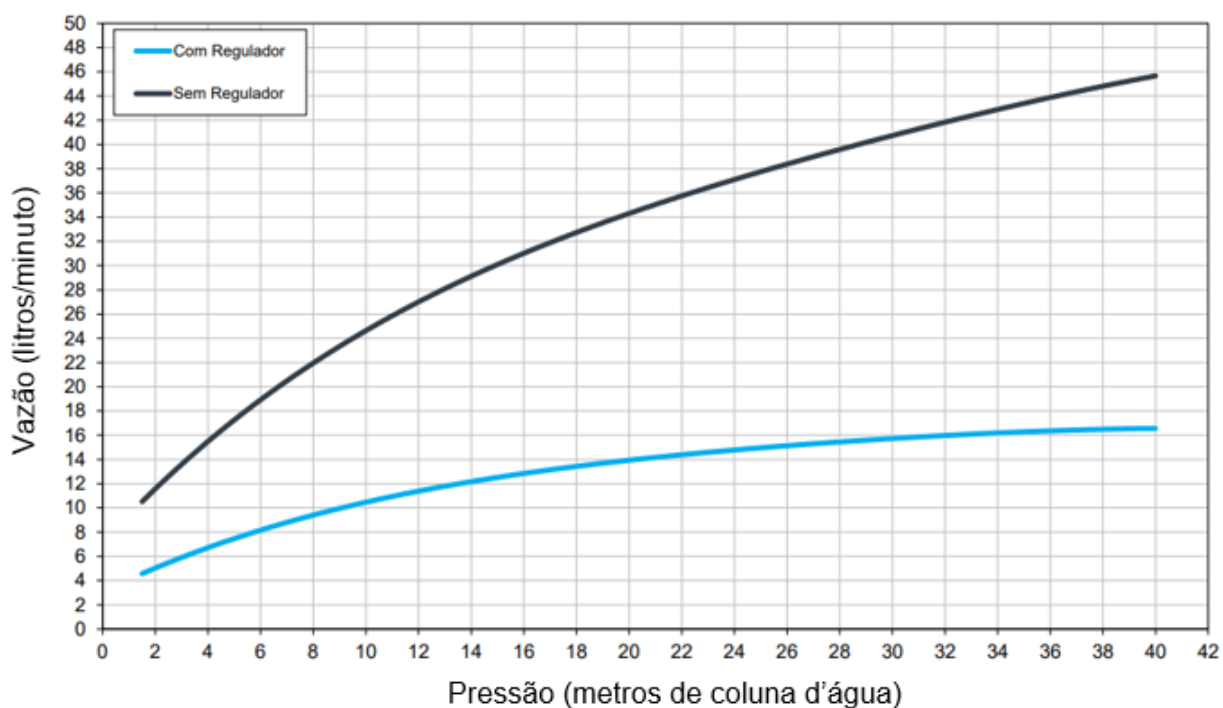
O funcionamento do sistema automatizado resume-se ao acionamento de um botão para direcionar quantidade específica de água fria de cada aparelho sanitário, abastecido por água quente, para o seu devido fim. A válvula solenoide acoplada no final do ramal de água quente da residência é do tipo normalmente fechada, ou seja, sua abertura será apenas efetuada com o recebimento de um sinal elétrico.

Portanto, para cada ponto de consumo de água quente da residência, é realizado um cálculo estimado do volume de água presente no trecho da tubulação do aquecedor até este ponto. A partir do valor da vazão da válvula solenoide é possível identificar o tempo necessário para eliminar esta quantidade de água fria que fica em repouso na tubulação por meio do sistema proposto. A cada aparelho da residência, conforme a

distância e vazão da válvula solenoide, está associado um tempo necessário para eliminar a água fria da tubulação de água quente. Este tempo característico de cada aparelho é programado individualmente para cada botão próximo aos aparelhos. Ao realizar o acionamento deste botão, o sistema reconhece o tempo que a válvula solenoide no final do ramal principal necessita ficar aberta para que a água quente atinja as proximidades do ponto de consumo desejado.

Os pontos de consumo de água quente com maior vazão nas residências são os chuveiros. Para fins de projeto a antiga norma NBR 5626 (ABNT, 1998) recomenda vazões de 0,2 litros/segundo para chuveiros e duchas. Os catálogos de fabricante de duchas geralmente apresentam curvas características de vazão para cada modelo. A vazão dos chuveiros é função da pressão em metros de coluna d'água (m.c.a.) existente no ponto de instalação do aparelho, conforme ilustra o exemplo da Figura 3.9.

Figura 3.9 – Curva de vazão de um chuveiro.



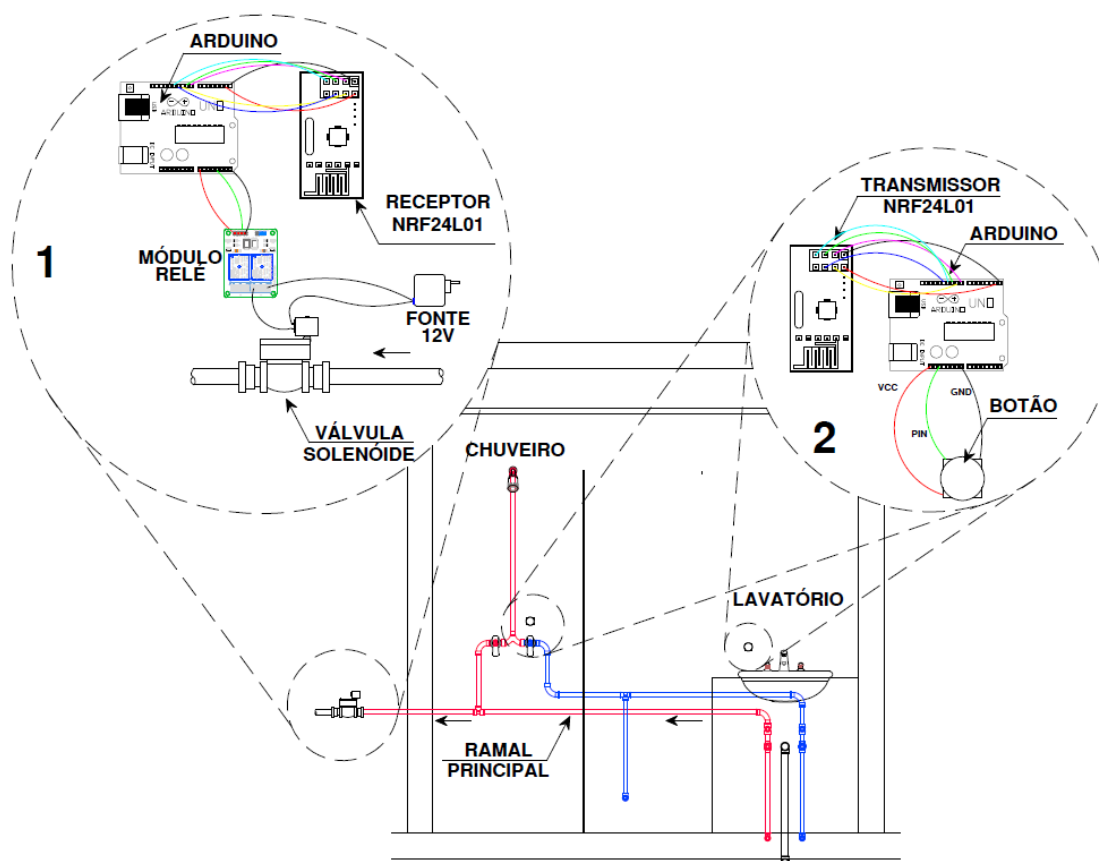
Fonte: DOCOL (2021).

Para que a válvula solenoide instalada consiga liberar a água fria em repouso na tubulação do ramal principal de água quente, a saída de água quente do aquecedor

de passagem e a válvula solenoide devem possuir níveis adequados de vazão. Geralmente os aquecedores de passagem são escolhidos conforme a simultaneidade de utilização dos pontos de consumo para utilização de dois chuveiros ou um chuveiro e uma torneira ao mesmo tempo, dependendo das características da residência. Os fabricantes de aquecedores categorizam os aquecedores conforme um valor de vazão fixo para elevar a temperatura da água em 20°C nas condições padrões. Entretanto, assim como todos os acessórios hidráulicos, os aquecedores causam perdas de carga na água que circula pela serpentina e nos acessórios adicionais para instalação do aquecedor. Deste modo, a vazão fornecida pelo aquecedor vai estar em função da vazão de entrada de água fria no aquecedor e da perda de carga promovida pelo aquecedor. Kapp (2018) analisou a perda de carga de dois modelos de aquecedores de passagem a gás calculada experimentalmente e por meio das equações de Darcy-Weisbach e Fair-Whipple-Hsiao. Conforme a vazão de entrada da água fria no aquecedor a perda de carga pode variar de 2 a 22 m.c.a.. Portanto, considerar a perda de carga dos aparelhos de aquecimento é importante não apenas para o dimensionamento correto do sistema de distribuição de água quente, como também para o funcionamento correto da recirculação proposta. As válvulas solenoides possuem vazões que variam entre 7 e 40 litros/minuto. Portanto, para que o sistema seja eficaz, o valor de vazão da válvula solenoide deve ser suficiente para que a água seja direcionada para o reservatório o mais rápido possível, atentando-se aos valores máximos de velocidade e pressão da água nas tubulações conforme estabelecido pela norma. Caso necessário, o sistema deve contar com apoio de sistemas de pressurização da água.

A Figura 3.10 ilustra um esquema sem escala dos circuitos eletrônicos que ficariam embutidos na alvenaria. O botão próximo ao aparelho de consumo de água quente é conectado a um microcontrolador Arduino que se conecta a um transmissor do módulo de radiofrequência. O transmissor, portanto, envia a informação de tempo de abertura da válvula solenoide para o receptor que está conectado a outro microcontrolador Arduino que está conectado também com a válvula solenoide. O receptor recebe o pacote de informações do transmissor, transfere as informações para o Arduino, que por sua vez comanda a abertura da válvula solenoide.

Figura 3.10 - Circuito eletrônico da ideia proposta.



Para sinalizar ao usuário que se deve iniciar a abertura do registro de água quente, o Arduino acionará uma lâmpada LED vermelha que indicará que toda a água fria foi escoada da tubulação em direção ao reservatório inferior. Outra opção seria instalar um botão que retorna para o seu estado inicial após decorrido o tempo que está programado para a válvula ficar no estado aberto. Maiores informações a respeito dos componentes eletrônicos utilizados no sistema encontram-se no Apêndice A.

Os sensores de radiofrequência sugeridos são do modelo NRF24L01. Estes sensores são de baixo custo e possuem um alcance na transmissão do sinal em campo aberto acima de 100 metros. Pelo fato de estar sendo proposta a utilização dos componentes em locais com grande quantidade de barreiras físicas, que possam prejudicar a transferência do sinal, para alguns casos seria interessante optar pela transferência do sinal via fios elétricos. Residências com várias áreas molhadas com consumo de água quente, além de possuírem uma grande quantidade de barreiras físicas, necessitam da instalação de um microcontrolador Arduino para cada área molhada,

umentando os custos com o projeto de automação. Este seria um caso onde a transmissão via fios elétricos poderia ser mais vantajosa economicamente.

3.4. Protótipo do sistema automatizado proposto

Com a finalidade de validar e testar a ideia proposta para evitar desperdício inicial de água fria no consumo de água quente, um protótipo da instalação hidráulica e eletrônica foi realizado. A instalação localizou-se em uma residência unifamiliar de dois pavimentos no bairro Córrego Grande em Florianópolis. Por meio do protótipo, pretende-se analisar o funcionamento do algoritmo em conjunto com os componentes eletrônicos e também confirmar na prática o redirecionamento da água fria.

3.4.1. Conformação hidráulica e eletrônica do protótipo

O protótipo deve simular a conformação de um sistema predial de água quente que possui aquecedor de passagem a gás como meio de aquecimento da água. Ou seja, deve conter um ponto em que a fonte aquecedora é alimentada por água fria e a partir dela deve-se percorrer uma tubulação para abastecer os pontos de consumo com água quente. Com o propósito de viabilizar economicamente o protótipo, ao invés de utilizar o aquecimento de água por meio de um aquecedor de passagem a gás, utilizou-se uma torneira elétrica conectada a um ponto de água fria de um banheiro localizado no térreo da residência. Como a instalação do protótipo é composta por uma série de válvulas, conectores e trechos de tubulação que acarretam em perda de carga, foi necessário atentar para que a pressão estática do ponto a ser instalada a torneira elétrica fosse alta o suficiente para que os novos pontos de consumo tivessem vazões adequadas para a análise e a validação do sistema.

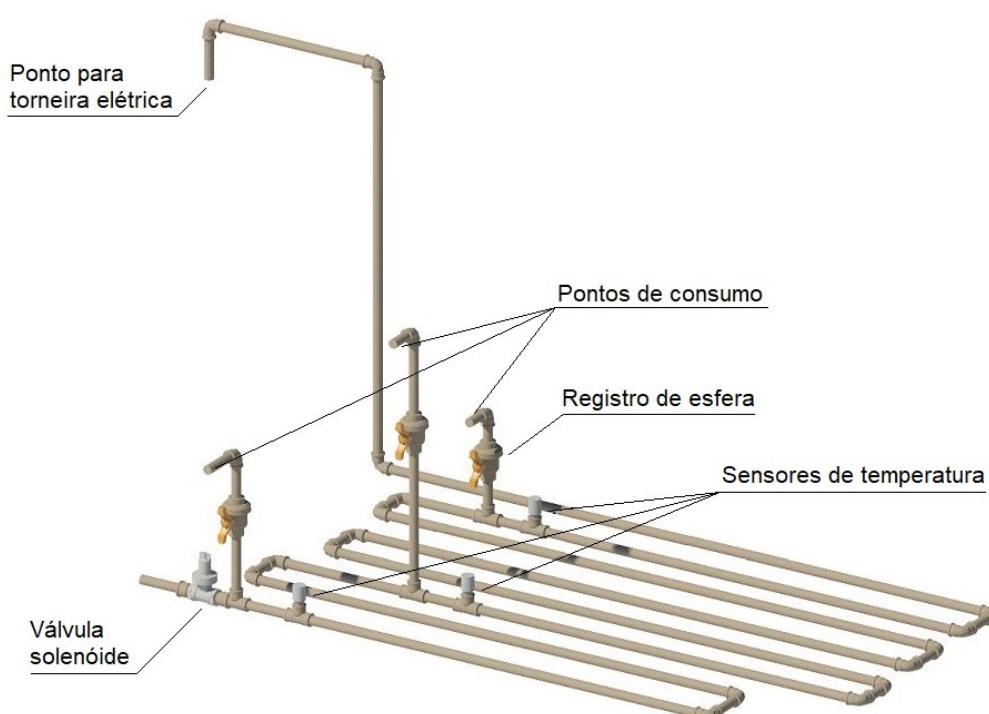
Por motivos econômicos, optou-se por ignorar as recomendações da NBR 15813-1 (ABNT, 2018) e adaptar tubulação de PVC, ao invés de PPR ou cobre para a tubulação de água quente, uma vez que a instalação foi apenas utilizada para teste e não necessitava de integridade e vida útil que as instalações corriqueiras normalmente exigem. Segundo Maehara (2008), a temperatura de amolecimento Vicat do PVC é de 80°C. A temperatura máxima da água da torneira elétrica não supera o valor de

40°C, portanto, não houve comprometimento da integridade física da tubulação de PVC causado pela água quente que foi utilizada para testar o protótipo.

Para simular o que acontece nas tubulações de água quente entre o aquecedor de passagem e os pontos de consumo de água quente existentes nas residências, foi disposta, portanto, uma tubulação de PVC de 20 mm de diâmetro e comprimento suficiente para armazenar certa quantidade de água no interior da tubulação. A tubulação inicia-se na torneira elétrica, abastecendo três pontos de consumo de água quente, um após percorrer 6,4 metros lineares de tubulação, outro após 12,0 metros lineares de tubulação e outro após 14,5 metros lineares de tubulação. A Figura 3.11 ilustra um esquema da disposição da instalação hidráulica do protótipo.

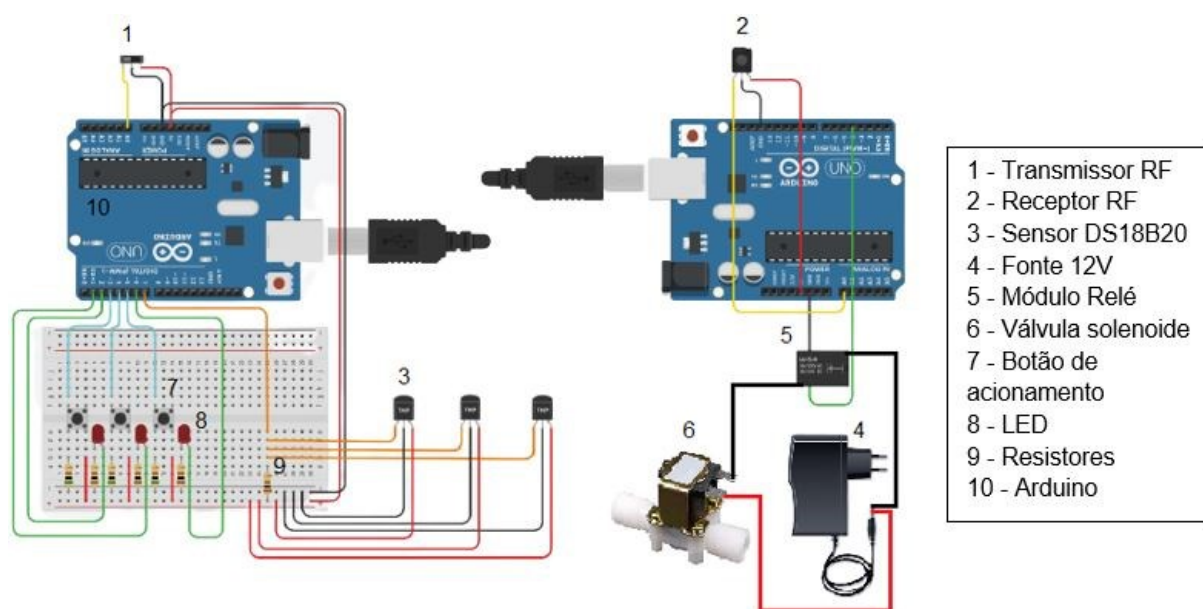
Os pontos de consumo devem possuir registros de esfera para a liberação da água e os botões para o acionamento do sistema. No final do ramal da tubulação foi instalada a válvula solenoide e outra ramificação, que funcionará como ponto de consumo e local por onde será possível liberar a água por meio de um registro de esfera. O direcionamento da água para verificação do desperdício de água fria pôde ser feito, portanto, manualmente ou por meio do sistema implementado com o algoritmo.

Figura 3.11 - Esquema da conformação hidráulica do protótipo do sistema automatizado proposto.



O sistema eletrônico do protótipo era composto por dois microcontroladores Arduino UNO. Um responsável por obter os dados de medição de temperatura e outro responsável pela abertura da válvula solenoide. Em cada ponto que simula um ponto de consumo de água quente foi instalado um sensor de temperatura DS18B20 na tubulação. Além destes, outros dois sensores (DS18B20 e DHT11) foram utilizados para extrair os valores de temperatura ambiente. Cada ponto de consumo tinha um botão do tipo *push-button* e uma lâmpada LED associados. Os microcontroladores se comunicam por meio de sensores de radiofrequência do tipo NRF24L01, que atuam como transmissor e receptor. Para a correta ligação da válvula solenoide com o Arduino foi necessário o fechamento de um circuito elétrico por meio de um módulo relé e uma fonte 12 V que foi conectada na rede elétrica da residência. A Figura 3.12 ilustra um esquema da instalação eletrônica do protótipo.

Figura 3.12 - Esquema da conformação eletrônica do protótipo do sistema automatizado proposto.



3.4.2. Funcionamento do protótipo

O protótipo teve como finalidade simular o sistema automatizado proposto instalado em um sistema predial de água quente. A primeira parte da simulação consistiu em identificar as curvas de crescimento da temperatura da água que atinge os três diferentes pontos de consumo. Por meio das curvas de crescimento da temperatura,

obtém-se o tempo necessário para a chegada de água quente em cada um dos pontos de consumo.

Na segunda parte da simulação, os tempos correspondentes para cada ponto de consumo foram implementados no algoritmo e novas medições de temperatura foram realizadas para verificar se a água quente estava atingindo os pontos de consumo após a recirculação por meio do acionamento do sistema.

Na primeira parte das simulações a válvula solenoide foi programada para abrir a cada duas horas permanecendo aberta por um período de dois minutos. Deste modo, ciclos de acionamento do sistema foram simulados ao longo do dia com diferentes temperaturas ambiente. A abertura da válvula solenoide simula o acionamento do sistema, fazendo com que a água da torneira elétrica seja liberada para o sistema de distribuição, assim como um aquecedor de passagem opera.

A água quente com origem na torneira elétrica desloca a água fria presente na tubulação de distribuição do protótipo para o final do ramal onde encontrava-se a válvula solenoide. Enquanto isso, os sensores de temperatura registravam o crescimento da temperatura da água próximo aos pontos de consumo.

Por meio dos gráficos de crescimento da temperatura foi possível extrair o tempo necessário para a água quente atingir cada um dos pontos de consumo. A potência da torneira elétrica nas condições de vazão no ponto em que foi instalada forneceu temperaturas de no máximo 35°C no primeiro ponto de consumo e 32°C no terceiro ponto de consumo. Portanto, a temperatura de referência para analisar se a água quente atinge os pontos de consumo será de 30°C para englobar todas as medições. A média do tempo necessário para a água atingir a temperatura de 30°C em cada um dos pontos de consumo foi utilizada para reprogramar o algoritmo. Assim, acionando-se o botão correspondente a cada ponto de consumo, a válvula abrirá durante o período de tempo necessário para expulsar a água fria da tubulação entre a torneira e o ponto de consumo. Na segunda parte da simulação, para verificar a temperatura da água no ponto de consumo após a abertura e fechamento da válvula solenoide, o registro de esfera do ponto de consumo era aberto e a temperatura da água diretamente no ponto de saída era aferida por meio de um sensor de temperatura DS18B20.

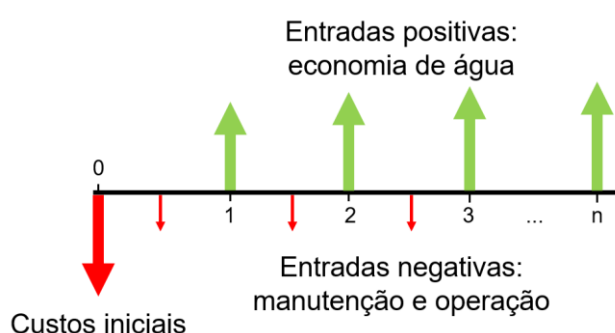
3.5. Análise econômica

Por fim, foi avaliada a viabilidade econômica do sistema automatizado proposto para os sistemas prediais. Portanto, foi realizada uma análise comparativa de viabilidade econômica entre a instalação de um sistema de recirculação individual e a instalação do sistema de recirculação proposto neste trabalho. Ambas as instalações foram configuradas, como estudo de caso, para o mesmo edifício multifamiliar, entretanto, em projetos separados. A análise é composta pelo investimento inicial da implantação dos sistemas, custos com manutenção e operação e receita total com a economia de água que os sistemas proporcionam durante um determinado horizonte de tempo.

Na fase de projeto de uma edificação deve-se verificar se os pré-requisitos para a instalação dos sistemas são atendidos. A forma principal de aquecimento de água para os apartamentos deve ser por meio de aquecedores de passagem a gás. Para o sistema proposto neste trabalho, a edificação deve apresentar também um reservatório inferior de água potável onde é possível prever a conexão das tubulações que vêm dos pontos de consumo de água quente de toda a edificação.

Todos os fluxos de caixas foram simulados com os custos iniciais, como materiais e mão de obra para a instalação do sistema. A economia de água fornecida pelos sistemas ocasiona menores custos nos gastos mensais de água de um edifício. Portanto, estas economias são as entradas positivas mensais do fluxo de caixa. Os custos com manutenção e operação são as entradas negativas do fluxo de caixa. Com os fluxos de caixa é possível realizar a análise de viabilidade econômica por meio de indicadores econômicos para a tomada de decisão. A Figura 3.13 ilustra um esquema do fluxo de caixa para as análises.

Figura 3.13 – Esquema dos fluxos de caixa.



Para prever os custos iniciais com instalações hidráulicas para todo o sistema em uma edificação, foram utilizados como base os projetos arquitetônico e hidrossanitário multifamiliar do Edifício Palmas Central fornecido por um escritório de engenharia de Florianópolis especializado na metodologia BIM (*Building Information Model*). O empreendimento é composto por um pavimento térreo e dois pavimentos tipo. Ao todo, o Edifício Palmas Central possui vinte apartamentos com três modelos de *layout* arquitetônicos diferentes. São doze apartamentos de dois dormitórios do modelo 1 localizados na porção central do edifício, seis apartamentos de dois dormitórios do modelo 2 orientados a norte e dois apartamentos de três dormitórios do modelo 3 orientados a sul. A Figura 3.14 ilustra uma vista tridimensional do edifício que foi utilizado como estudo de caso. A Tabela 3.1 resume características de cada modelo arquitetônico relevantes para a análise econômica.

Figura 3.14 – Vista tridimensional do Edifício Palmas Central.

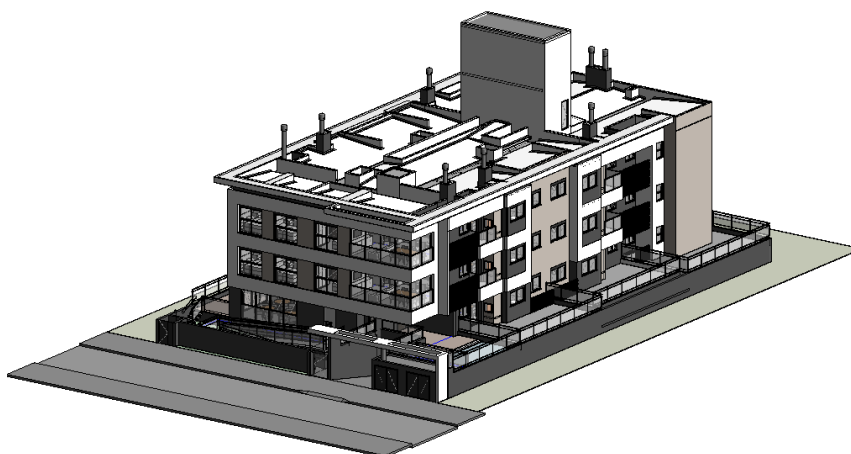


Tabela 3.1 – Características dos modelos arquitetônicos do Edifício Palmas Central.

Características	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Quantidade de apartamentos	12	6	2
Quantidade de dormitórios por apartamento	2	2	3
Área dormitório 1 (m ²)	9,10	9,29	9,01

Tabela 3.1 – Características dos modelos arquitetônicos do Edifício Palmas Central (continuação).

Características	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Área dormitório 2 (m ²)	-	-	7,95
Área suíte (m ²)	11,73	12,00	14,12
Quantidade de torneiras por apartamento	3	3	3
Quantidade de chuveiros por apartamento	2	2	2

O sistema de aquecimento da água foi projetado para ser por meio de aquecedores de passagem a gás e o projeto prevê dois reservatórios inferiores e dois reservatórios superiores para o sistema de armazenamento de água. A Figura 3.15 ilustra o projeto hidráulico do edifício. As Figuras 3.16, 3.17 e 3.18 ilustram, respectivamente, o projeto hidráulico dos modelos arquitetônicos 1, 2 e 3.

Figura 3.15 – Vista tridimensional do projeto hidráulico do Edifício Palmas Central.

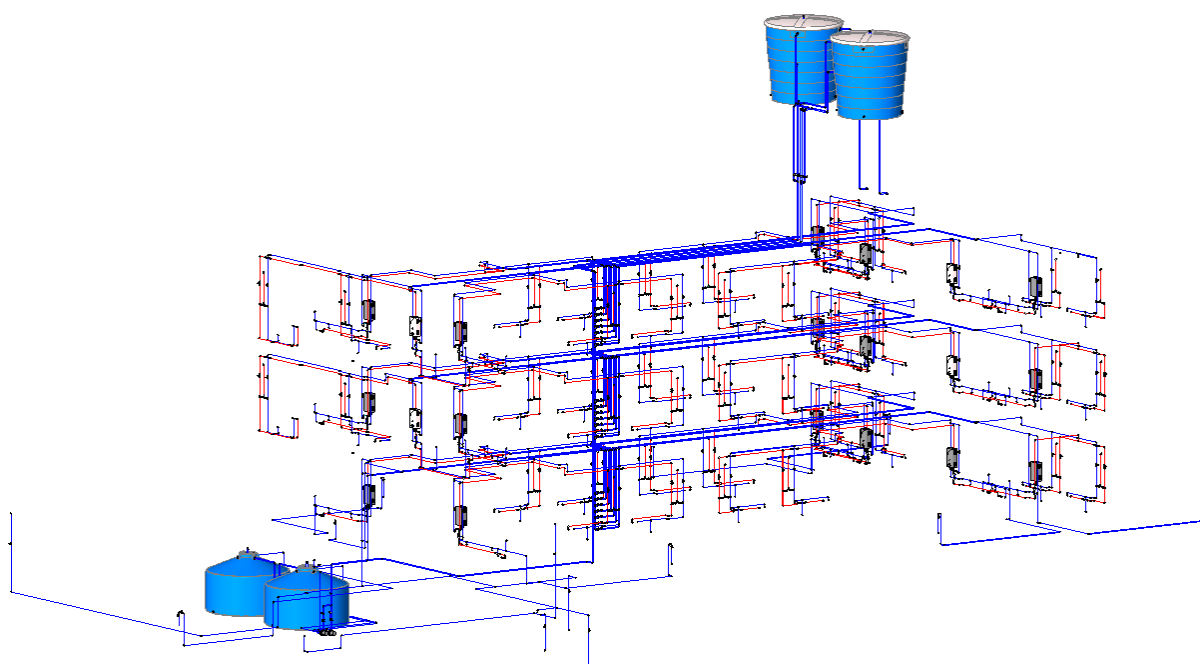


Figura 3.16 – Vista tridimensional do projeto hidráulico do modelo arquitetônico 1.

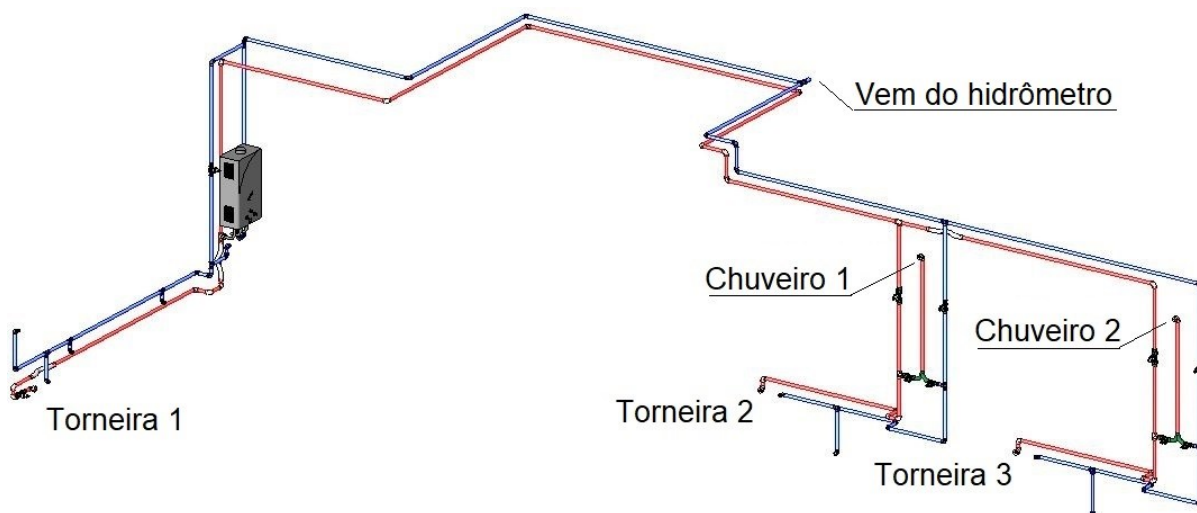


Figura 3.17 – Vista tridimensional do projeto hidráulico do modelo arquitetônico 2.

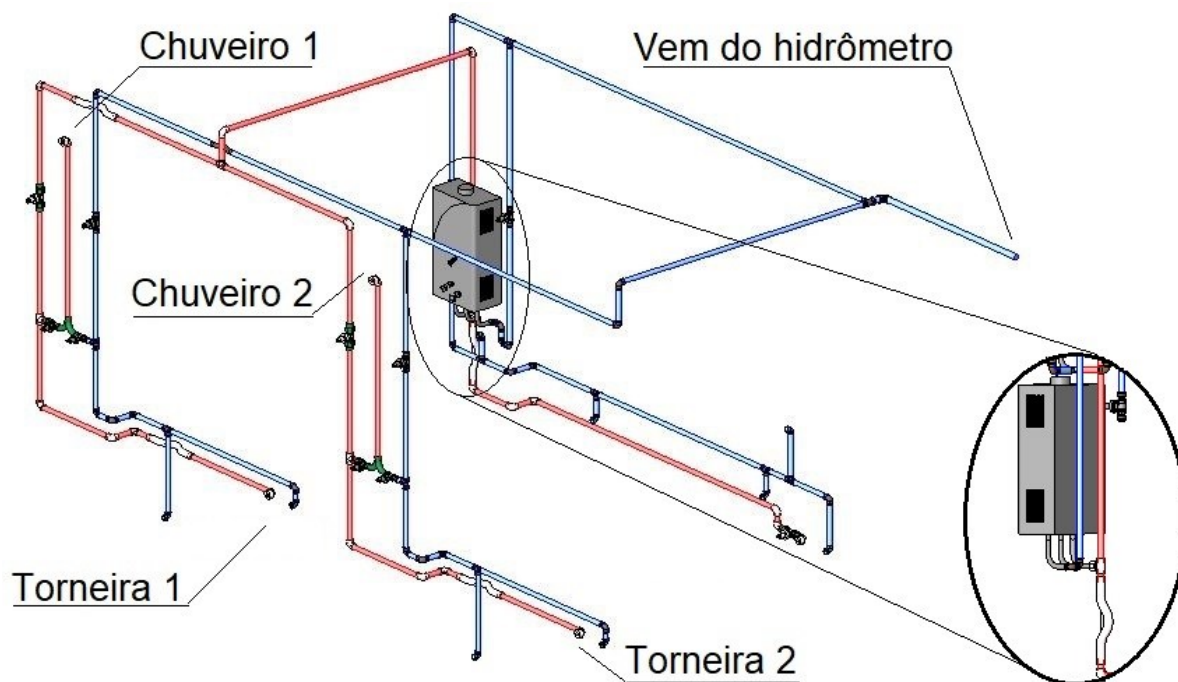
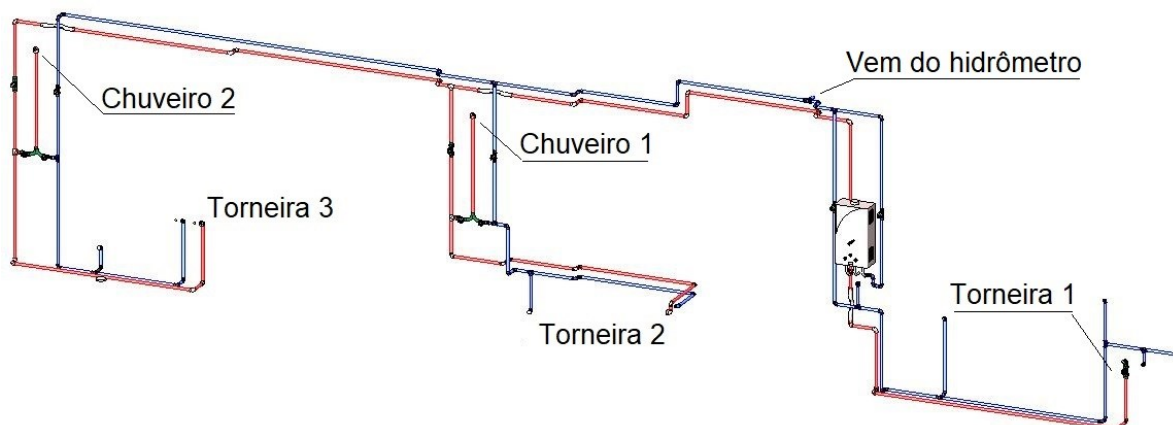


Figura 3.18 – Vista tridimensional do projeto hidráulico do modelo arquitetônico 3.



Com a utilização do *software* Revit foram verificadas, por meio do projeto, todas as modificações e compatibilizações necessárias para a implementação dos sistemas de recirculação. Além disso, o *software* auxiliou na quantificação dos componentes hidráulicos, elétricos e eletrônicos para compor o orçamento da instalação dos sistemas de recirculação.

3.5.1. Custos iniciais com instalação hidráulica e elétrica

Ambos os sistemas exigem modificações nas instalações hidráulicas e elétricas convencionais. Esta seção aborda de que forma estas modificações impactaram nos custos dos sistemas prediais de água fria e água quente. Estes foram os custos iniciais projetados para os fluxos de caixa da análise econômica para cada sistema de recirculação.

3.5.1.1. Sistema de recirculação individual

O sistema de recirculação individual é caracterizado por possuir uma tubulação de retorno que conecta o final do ramal principal do sub-ramal de água quente de volta ao aquecedor de passagem da unidade habitacional. Os fabricantes destes sistemas de recirculação recomendam o isolamento das tubulações de água quente. Para a água recircular nesta tubulação de retorno é necessária uma bomba de recirculação. Esta recirculação pode ser programada por meio de um painel de comando digital

conectado a um termômetro que mede a temperatura da água que está na tubulação de retorno. A programação pode ser feita para que a bomba recirculadora funcione no instante precedente à utilização dos aparelhos sanitários de água quente da unidade habitacional.

Portanto, para cada apartamento do Edifício Palmas Central foram necessários:

- Tubulação e conexões PPR adicionais para retornar o ramal principal de água quente ao aquecedor de passagem;
- Isolamento da tubulação de água quente;
- 1 eletrobomba de recirculação;
- 1 painel de comando digital com termostato.

Os custos da tubulação e dos componentes adicionais foram orçados na cidade de Florianópolis em pelo menos três fornecedores. O orçamento final foi composto pelos itens mais baratos entre os três orçamentos. Quando algum item não foi encontrado na localidade ou não foi encontrado em pelo menos três fornecedores, o orçamento deste item foi feito em lojas virtuais que realizam entrega do produto para a região.

O custo com a mão de obra para a instalação do sistema foi orçado com pelo menos três empresas especializadas na instalação do sistema. O orçamento final foi composto pelo menor dos custos de mão de obra entre as três empresas.

O custo inicial total para a instalação do sistema de recirculação individual em todo o edifício é a soma do custo total com materiais e do custo total com mão de obra acrescido de 25% de BDI (Benefícios e Despesas Indiretas). Este valor do BDI, já considerando as parcelas de riscos e incertezas, baseia-se nas orientações do acórdão N° 2622/2013 do Tribunal de Contas da União (TCU), que dita especificações para orçamentação de obras públicas (BRASIL, 2013).

3.5.1.2. Sistema de recirculação proposto

Como abordado na seção 3.3, o sistema de recirculação proposto neste trabalho possui uma tubulação adicional que conecta o final do ramal principal do sub-ramal

de água quente de cada unidade habitacional para uma prumada vertical que encaminha a água fria para o reservatório inferior da edificação. O sistema terá um custo inicial reduzido se este se aproveitar da estrutura de reservação inferior e de recalque, por meio de bombas, já previsto para a edificação.

Além da tubulação e conexões adicionais, para cada unidade habitacional, o sistema necessita uma válvula solenoide, conectada a uma central de controle da recirculação, composta por um microcontrolador, botões, módulo relé, fonte 12 V, fios condutores e sensores de radiofrequência, caso o sistema seja por acionamento remoto. No sistema proposto optou-se por desconsiderar os custos com isolamento da tubulação, pois o objetivo do sistema é operar pela demanda e frequência de utilização dos aparelhos sanitários.

Portanto, para cada apartamento do Edifício Palmas Central foram necessários:

- Tubulação e conexões PPR adicionais para encaminhar a água fria, que seria desperdiçada, para o reservatório inferior da edificação;
- 1 válvula solenoide;
- 1 microcontrolador;
- 1 botão de acionamento para cada aparelho sanitário;
- 1 módulo relé;
- 1 fonte 12V;
- Fios condutores;
- 1 receptor de radiofrequência;
- 1 transmissor de radiofrequência por cômodo com consumo de água quente.

O orçamento final com os equipamentos hidráulicos e eletrônicos seguiu o mesmo critério de seleção utilizado para o sistema de recirculação individual. Como discutido na seção 3.3, os sensores de radiofrequência são de baixo custo e apresentam falhas na transmissão do sinal quando há a existência de muitas barreiras físicas entre o receptor e transmissor. Por este motivo foram consideradas análises adicionais substituindo a transmissão por radiofrequência por uma transmissão via fios. Para isto, custos adicionais com fios, conduítes e instalações elétricas foram considerados.

O custo com a mão de obra para a instalação do sistema proposto foi estimado por meio do orçamento do custo de mão de obra obtido para o sistema de recirculação individual. O custo inicial total para a instalação do sistema de recirculação proposto em todo o edifício é a soma do custo total com materiais e do custo total com mão de obra acrescido de 25% de BDI.

3.5.2. Custos com operação e manutenção

O custo de operação dos sistemas consiste em estimar o consumo energético dos sistemas em modo de espera e, principalmente, quando encontram-se em funcionamento promovendo a recirculação da água.

Para obter o custo com a operação dos sistemas de recirculação deve-se multiplicar o consumo energético mensal pela tarifa praticada pela CELESC (Centrais Elétricas de Santa Catarina) no mês analisado. Anualmente a tarifa elétrica sofre reajustes anunciados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Portanto, o valor da mediana dos últimos cinco reajustes praticados foi utilizado para estimar o custo do quilowatt-hora para os anos seguintes do horizonte de análise econômica. Os impostos e tributos da tarifa elétrica também foram estimados para os anos seguintes do horizonte de análise com base nos históricos de taxaço. Os custos com manutenção englobam os gastos ao longo do horizonte de análise para manter os sistemas íntegros e em pleno funcionamento.

3.5.2.1. Sistema de recirculação individual

Para o sistema de recirculação individual, o consumo energético no modo de espera é o consumo do painel de comando digital com termostato. Este painel precisa constantemente monitorar a temperatura da água na tubulação de retorno, e para isso, necessita estar ligado a uma fonte energética, podendo ser bateria ou a própria rede elétrica. O consumo no modo de espera foi estimado multiplicando-se a potência do equipamento no modo de espera pelas horas que o aparelho ficou conectado na rede elétrica para cada mês do horizonte de tempo da análise.

Além do consumo energético do painel de comando digital no modo de espera, tem-se o consumo energético da própria bomba de recirculação quando ativada. O ciclo de recirculação adotado foi baseado no hábito de consumo mais comum encontrado nas residências, ou seja, considerando picos de demanda por água quente no período matutino e noturno após a rotina de trabalho (FAIREY; PARKER, 2004). O último relatório da Pesquisa de Posse e Hábitos de Uso de Equipamentos Elétricos na Classe Residencial (ELETROBRAS, 2019) indica também que o horário de maior utilização do chuveiro elétrico é no período entre 6h00 e 8h00 e no período entre 18h00 e 20h00. Portanto, a recirculação seria programada com um acionamento no período matutino e outro no período noturno. Esse modo de recirculação é o mais indicado pelos fabricantes de sistemas de recirculação de água.

A duração da recirculação será estimada por meio do *software* Ansys Fluent. Para cada modelo arquitetônico será simulada uma recirculação pela tubulação de retorno com a vazão máxima operada pela bomba de recirculação. O tempo que leva para a temperatura de todos os pontos de consumo igualar com a temperatura que a água sai do aquecedor será o tempo utilizado para o cálculo do consumo energético.

O consumo energético em funcionamento para cada mês, portanto, será a multiplicação da potência da bomba de recirculação adotada pelo tempo total de acionamentos durante o mês. O custo mensal com operação do sistema de recirculação individual para uma unidade habitacional foi calculado por meio da Equação 3.

$$C_{ri,n} = (P_p \times h_{me} + P_b \times h_f) \times d_n \times C_{KWh,n} \quad (3)$$

Onde:

$C_{ri,n}$ é o custo mensal para a operação do sistema de recirculação individual no mês n (R\$);

P_p é a potência do painel de comando digital (kW);

h_{me} é a quantidade de horas diária que o sistema esteve em modo de espera (horas);

P_b é a potência da bomba recirculadora (kW);

h_f é a quantidade de horas diária que o sistema esteve em funcionamento (horas);

d_n é a quantidade de dias do mês n (dias);

$C_{KWh,n}$ é a tarifa de energia no mês n (R\$).

Os fabricantes do sistema de recirculação individual sugerem que a manutenção do sistema seja realizada a cada seis meses. O custo com as manutenções semestrais foi orçado com três empresas especializadas localizadas na região de Florianópolis. O valor mínimo entre os três orçamentos compõe o custo de manutenção do sistema para a análise econômica. Para os anos seguintes do fluxo de caixa este valor foi corrigido por meio de uma estimativa da taxa de inflação.

Portanto, o fluxo de caixa da análise econômica é composto pelos custos com operação sendo entradas negativas mensais e pelos custos com manutenção sendo entradas negativas semestrais.

3.5.2.2. Sistema de recirculação proposto

Para estimar o consumo energético do sistema proposto foi utilizado o medidor de energia Ciber CEM1000. O protótipo do sistema foi montado com os seguintes componentes:

- 1 válvula solenoide;
- 2 microcontroladores Arduino;
- 3 *push-buttons*;
- 3 LEDs;
- 1 módulo relé;
- 1 fonte 12V;
- 2 fontes 9V;
- Jumpers condutores;
- 1 receptor de radiofrequência;
- 1 transmissor de radiofrequência.

Para o teste de consumo energético foi montado apenas o circuito eletrônico do sistema. O sistema encontra-se em modo de espera quando não ocorre acionamento do módulo relé e, conseqüentemente, da válvula solenoide que está energizada pela fonte 12 V. O modo de espera necessita energia apenas para manter o

microcontrolador funcionando com o algoritmo do sistema. Portanto, duas medições com duração de oito horas foram realizadas para verificar o consumo energético do protótipo. Para que o medidor pudesse medir a energia de todo o sistema, as três fontes de energia foram conectadas a um filtro de linha com quatro tomadas, que por último, foi conectado ao medidor de energia.

A primeira medição foi realizada sem que o algoritmo identificasse acionamento da válvula solenoide. Esta medição tem por finalidade identificar o consumo energético do modo de espera. A segunda medição foi realizada com o algoritmo programado para a válvula solenoide funcionar de modo intermitente. Deste modo, foi possível identificar a parcela de consumo energético para cada caso.

O modo de recirculação adotado para o sistema proposto será por demanda, pois o sistema foi desenvolvido para expulsar apenas a quantidade de água fria do trecho da tubulação entre o aquecedor e o ponto de consumo de água desejado. Deste modo, por meio de uma estimativa de frequência de consumo de água quente foram calculados os gastos energéticos para a recirculação. Esta estimativa de demanda por água quente, principalmente para torneiras, baseou-se no relatório de uso final de água nas residências para os países da América do Norte e na NBR15569 (ABNT, 2020c).

Portanto, o tempo destinado para a recirculação do sistema foi calculado por meio da Equação 4.

$$h_f = \frac{(h_{ch} \times f_b + h_t \times f_{tld}) \times p}{3600} \quad (4)$$

Onde:

h_f é a quantidade de horas que o sistema esteve em funcionamento no mês (horas);
 h_{ch} é o tempo que o sistema leva para liberar água quente pelo chuveiro (segundo);
 f_b é a frequência de banhos diários em uma residência por pessoa (banho/pessoa.dia);
 h_t é o tempo que o sistema leva para liberar água quente pela torneira (segundo);
 f_{tld} é a frequência diária de eventos de longa duração do uso de torneiras em uma residência por pessoa (torneira longa duração/pessoa.dia);
 p é o número de habitantes da residência (pessoas).

Igualmente ao sistema de recirculação individual, o custo mensal com a operação do sistema proposto foi obtido multiplicando-se o consumo energético pela tarifa de energia elétrica, com os devidos reajustes tributários anuais. Assim, o custo mensal com operação do sistema proposto para uma unidade habitacional foi calculado por meio da Equação 5.

$$C_{rp,n} = (P_{a,me} \times h_{me} + P_{a,f} \times h_f) \times C_{KWh,n} \quad (5)$$

Onde:

$C_{rp,n}$ é o custo mensal para a operação do sistema de recirculação proposto no mês n (R\$);

$P_{a,me}$ é a potência ativa no modo de espera (kW);

h_{me} é a quantidade de horas que o sistema esteve em modo de espera no mês n (horas);

$P_{a,f}$ é a potência ativa com o sistema em recirculação (kW);

h_f é a quantidade de horas que o sistema esteve em funcionamento no mês (horas);

$C_{KWh,n}$ é a tarifa de energia no mês n (R\$).

Por se tratar de um sistema novo, a manutenção sugerida foi semelhante ao sistema de recirculação individual, tendo periodicidade de seis meses. O procedimento para obter o custo com as manutenções para o sistema proposto seguiu o mesmo critério realizado para obtenção dos custos de manutenção do sistema de recirculação individual. Semelhante ao sistema de recirculação individual, o fluxo de caixa da análise econômica é composto pelos custos com operação sendo entradas negativas mensais e pelos custos com manutenção sendo entradas negativas semestrais.

3.5.3. Economia de água

As entradas positivas dos fluxos de caixa são representadas pela economia financeira proporcionada pela redução do consumo de água por meio dos sistemas de recirculação. Portanto, primeiramente é necessário estimar qual seria o gasto com água de todo o edifício sem os sistemas de recirculação e depois estimar o volume de

água que os sistemas estariam economizando. Com isso, é possível converter este valor de economia de água em economia financeira nas tarifas mensais de água.

O edifício Palmas Central será localizado no estado de Santa Catarina, portanto, os valores de tarifa para a análise econômica foram obtidos da estrutura tarifária da Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN). É importante ressaltar que a CASAN aplica um reajuste tributário na tarifa de água a cada doze meses. Portanto, para o primeiro ano da análise econômica foram considerados os valores vigentes no ano de 2021 e na projeção do fluxo de caixa para os anos futuros foram considerados os valores vigentes em 2021 com acréscimo de um valor de reajuste estimado. Este valor de reajuste foi estimado por meio da mediana obtida dos últimos reajustes praticados e disponibilizados pela CASAN de 2013 a 2019.

O projeto hidrossanitário do edifício Palmas Central prevê conexão com a rede de esgoto. A CASAN realiza a cobrança da tarifa de esgoto acrescentando 100% da tarifa sobre a tarifa de água faturada. Portanto, no valor da fatura mensal cobrada pela CASAN tanto a Tarifa Fixa de Disponibilidade de Infraestrutura quanto o custo total com água foram multiplicados por dois para compor o valor total faturado com despesa de água e esgoto para o condomínio.

A partir do mês de julho de 2021 entrou em vigor a lei nº 13.312 (BRASIL, 2016), que torna obrigatória a medição individualizada do consumo hídrico nas novas edificações condominiais. Portanto, neste novo modelo, a cobrança de água para cada unidade habitacional de um edifício engloba a quantidade de água consumida registrada no hidrômetro individual somada ao rateio por fração ideal do consumo de água que o condomínio teve com operação (usos comuns a todos os moradores ou usos destinados aos funcionários do condomínio). O rateio por fração ideal é proporcional à área de cada unidade habitacional.

Uma das formas de cobrança condominial mais recomendada atualmente é por meio do modelo de taxa fixa. Neste modelo, o gestor do condomínio apresenta uma previsão orçamentária contemplando todos os gastos possíveis e previsíveis para o ano seguinte. Esta previsão abrange despesas correntes, salários, encargos sociais, materiais diversos, despesas previstas com manutenção, energia e inclusive despesas com consumo de água (CASTELO NETO, 2008). Aprovada esta previsão

em assembleia geral, define-se um valor fixo de taxa de condomínio a ser pago por cada unidade habitacional, considerando a proporcionalidade da fração ideal.

O sistema de recirculação individual diminui diretamente o consumo de água no hidrômetro de cada unidade. O sistema de recirculação proposto diminui o consumo de água no hidrômetro principal do condomínio. Portanto, para o caso do sistema de recirculação proposto, mesmo que o sistema não reduza diretamente o valor cobrado individualmente para cada unidade habitacional, este garante uma economia global para o condomínio, diminuindo assim, o custo com consumo de água para as previsões orçamentárias futuras. Deste modo, a economia financeira com a redução do consumo de água está atrelada a uma possível redução das taxas condominiais futuras.

A estimativa de consumo de água do edifício foi feita com base na orientação do código de obras da Prefeitura Municipal de Florianópolis e nos dados de consumo médio de água per capita obtidos da última coleta de dados do SNIS para Florianópolis. Para ocupação residencial, o código de obras de Florianópolis orienta como estimativa de consumo diário de água o valor de 200 litros/pessoa (FLORIANÓPOLIS, 2000).

Os potenciais de economia de água por meio dos sistemas de recirculação foram calculados conforme a demanda por recirculação. A demanda por recirculação foi estimada por meio do ciclo diário e da frequência de uso de água quente por meio dos aparelhos sanitários. A Tabela 3.2 ilustra as recomendações sugeridas pela NBR 15569 (ABNT, 2020c), considerando uso racional de água, para os valores de ciclo diário de consumo para cada aparelho sanitário.

Como a recomendação de ciclo diário sugere valores de uso superior ao tempo que a água quente geralmente leva para atingir estes pontos de consumo (conforme observado nos estudos apresentados na seção 2.4), conclui-se que em todos os usos de água quente por meio das torneiras de lavatório e pia de cozinha haveria economia de água com a recirculação da água.

Tabela 3.2 – Ciclo diário de consumo de água quente em cada aparelho sanitário.

Aparelho sanitário	Ciclo diário (minutos/pessoa)
Ducha de banho	10
Lavatório	2
Ducha higiênica	2
Pia de cozinha	3

Fonte: adaptado de NBR 15569 (ABNT, 2020c).

A frequência de uso de água quente, principalmente para torneiras, baseou-se no relatório de uso final de água nas residências para os países da América do Norte (REUWS). Os relatórios realizados no Brasil geralmente não especificam a frequência de uso dos aparelhos sanitários nem se a utilização é de água fria ou água quente. Apesar do relatório ser originário de países com temperaturas ambiente médias bem abaixo da temperatura ambiente média do sul do Brasil, acredita-se que esta seja uma referência razoável para estimar os valores de frequência de uso.

De acordo com o relatório de uso final de água nas residências para os países da América do Norte, 13% dos eventos de consumo de água por meio de torneiras são realizados com água quente. O relatório também indica que há uma frequência de vinte usos de torneira/pessoa.dia, portanto, a frequência de utilização para o cálculo de economia de água por meio de torneiras será de 2,6 usos de torneira com água quente por pessoa por dia. O último relatório da Pesquisa de Posse e Hábitos de Uso de Equipamentos Elétricos na Classe Residencial (ELETROBRAS, 2019) indica que em média as residências brasileiras possuem 3,5 habitantes e que a média do número de vezes por dia que o chuveiro é utilizado é de 3,95. Portanto, para a utilização de água quente por meio do banho foi considerada uma frequência de um banho por pessoa por dia.

Cada ponto de utilização de água quente nas unidades habitacionais tem comprimentos de tubulação diferentes até o aquecedor. Portanto, cada ponto de consumo de água quente possui um volume específico de água economizado quando

há a recirculação. Geralmente o volume de água fria desperdiçado até a chegada de água quente no ponto de consumo é maior que o volume de água que está em repouso na tubulação entre o aquecedor e o ponto de consumo (KLEIN, 2005). Por este motivo, uma taxa de correção, com base na literatura, foi aplicada para estimar o volume real de água fria que seria desperdiçada até a chegada de água quente.

Para vazões típicas (0,063 – 0,158 litros/segundo), Klein (2005) sugere que o volume de água fria que sai do aparelho sanitário antes da chegada da água quente pode ser de até 50% a mais que o volume de água que estava em repouso na tubulação. Hiller (2008b) verificou que este volume desperdiçado varia não apenas conforme a vazão, mas também, conforme a temperatura inicial de saída da água quente do aquecedor, a temperatura da tubulação, a temperatura do ar, o material da tubulação e o comprimento total a ser percorrido pela água. Portanto, como este fator de correção é dependente destas variáveis, é difícil estabelecer um valor de correção específico para o estudo de caso em questão. Deste modo, três cenários de potencial de economia foram considerados com base nas taxas encontradas no estudo de Hiller (2005): o primeiro cenário considerando o potencial de economia como sendo o próprio volume de água encontrado na tubulação, no segundo cenário o potencial de economia foi o volume de água encontrado na tubulação multiplicado por um fator de 1,25, e o terceiro cenário considerou o potencial de economia como sendo o volume de água encontrado na tubulação multiplicado por um fator de 1,5.

Cada aparelho sanitário possui um volume específico de água fria economizado por conta da recirculação. Não é possível identificar em uma unidade habitacional qual das torneiras ou chuveiros são utilizados mais frequentemente. Para facilitar o cálculo da estimativa do volume de água economizado em cada tipo de aparelho sanitário, para cada modelo arquitetônico foi utilizado o valor médio do volume de água encontrado na tubulação entre o aquecedor e o aparelho sanitário analisado. Este volume específico de água fria economizado foi calculado por meio da Equação 6.

$$V_{1,a} = \frac{\sum_1^n \left(\frac{10^{-3}\pi}{4} (D_1^2 c_1 + D_2^2 c_2 + D_3^2 c_3 + \dots + D_m^2 c_m) \right)}{n} \times i \quad (6)$$

Onde:

$V_{1,a}$ é o volume de água economizado para o aparelho sanitário a analisado (litros);
 n é o número de aparelhos sanitários de mesmo tipo no modelo arquitetônico analisado;

D_n é o diâmetro interno dos trechos de tubulação (mm);

c_m é o comprimento dos trechos de tubulação entre aquecedor e o aparelho sanitário analisado (m);

m é o número de trechos do ramal principal entre o aquecedor e a válvula solenoide que possuam diâmetros diferentes;

i é o fator de correção do volume.

Assim, o volume de água economizado diariamente por unidade habitacional por meio dos sistemas de recirculação foi calculado por meio da Equação 7.

$$E_{r,n} = p \times (f_t \times V_{1,t} + f_{ch} \times V_{1,ch}) \quad (7)$$

Onde:

$E_{r,n}$ é o volume de água economizado no mês n por meio do sistema de recirculação (litros);

p é o número de habitantes da residência (pessoas);

f_t é a frequência de utilização das torneiras por pessoa;

$V_{1,t}$ é o volume médio de água economizado no acionamento da recirculação para as torneiras calculado por meio da Equação 6 (litros);

f_{ch} é a frequência de utilização do chuveiro por pessoa;

$V_{1,ch}$ é volume médio de água economizado no acionamento da recirculação para os chuveiros calculado por meio da Equação 6 (litros).

A estimativa do potencial de economia de água desconsidera que ocorram usos em sequência dos aparelhos sanitários por diferentes usuários. Além disso, o potencial de economia de água é calculado com base no *layout* hidráulico do projeto original. Para a análise econômica dos dois sistemas de recirculação este potencial de economia de água que foi levado em conta. O sistema de recirculação proposto requer modificação no *layout* da tubulação de água quente. Apesar desta modificação alterar o quanto seria economizado de água, para a análise econômica a alteração do *layout*

hidráulico só irá impactar nos custos com tubulações e conexões. Portanto, na análise econômica de ambos os sistemas, o potencial de economia de água considerado foi o mesmo, entretanto, os custos iniciais e custos com operação são diferentes.

3.5.4. Indicadores econômicos

Para a análise econômica comparativa entre o sistema de recirculação individual e o sistema de recirculação proposto foram utilizados três indicadores: Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e o Período de retorno do investimento (*Payback* descontado).

O Valor Presente Líquido é um dos métodos mais utilizados para a tomada de decisão na análise econômica de investimentos (OSBORNE, 2010). O método consiste em determinar o valor atual do projeto com base nos fluxos de caixa líquidos previstos. O VPL foi calculado por meio da Equação 8 e o projeto/investimento será considerado aceitável quando o VPL for maior que zero.

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+j)^t} \quad (8)$$

Onde:

VPL é o valor presente líquido de um fluxo de caixa (R\$);

t é o número de meses envolvidos em cada elemento da série de receitas e despesas do fluxo de caixa durante o período de análise n (meses);

j é a taxa mínima de atratividade (TMA) (% ao mês);

F_t é a soma dos investimentos realizados, com as economias obtidas e custos de manutenção e operação em um dado mês (R\$).

A taxa mínima de atratividade (TMA) é a taxa de juros equivalente à rentabilidade do investimento em aplicações correntes consideradas sem risco. A taxa mínima de atratividade adotada foi o valor encontrado para a taxa Selic no mês de maio de 2021.

A TIR é a taxa de desconto que iguala o valor presente líquido de um fluxo de caixa a zero. Para que o investimento seja considerado viável, a TIR deve ser superior à TMA. O cálculo deste indicador econômico foi calculado por meio da Equação 9.

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+TIR)^t} \quad (9)$$

Onde:

n é o número total de meses da análise econômica;

t é o número de meses envolvidos em cada elemento da série de receitas e despesas do fluxo de caixa durante o período de análise (meses);

TIR é a taxa interna de retorno (TIR) (% ao mês);

F_t é a soma dos investimentos realizados, com as economias obtidas e custos de manutenção e operação em um dado mês (R\$).

A vida útil das instalações hidráulicas, bem como das instalações eletrônicas do sistema automatizado, costuma ser superior a dez anos, portanto, o período de análise do projeto adotado foi de dez anos.

Portanto, será realizado um cálculo de VPL para o sistema de recirculação individual e outro cálculo de VPL para o sistema de recirculação proposto. Assim, realizados os cálculos considerando o mesmo período t e a mesma taxa mínima de atratividade i , entre os dois valores encontrados, aquele que possui o maior VPL é o sistema mais rentável.

A fim de obter uma melhor interpretação da análise econômica, foi determinado outro indicador econômico. O *payback* descontado é um dos métodos dinâmicos de avaliação da rentabilidade de projetos de investimento. O indicador define o tempo decorrido para que as entradas positivas cubram os investimentos iniciais empregados e, conseqüentemente, o ponto no horizonte de análise no qual o investimento é recuperado. Entre os valores de *payback* descontado encontrado para a análise do sistema de recirculação individual e para a análise do sistema de recirculação proposto, aquele que possui o menor valor de *payback* descontado, é o sistema mais interessante do ponto de vista econômico.

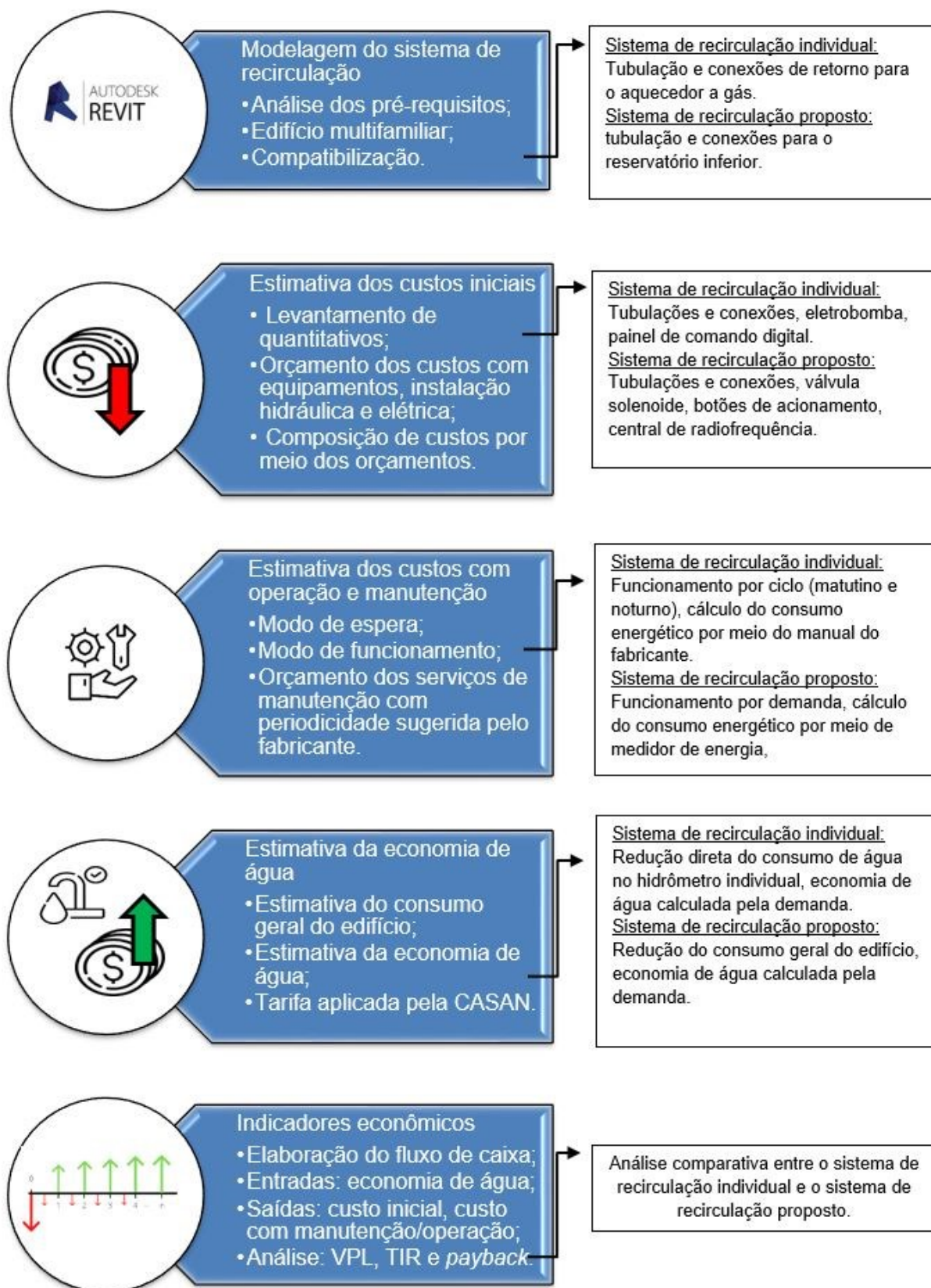
A Tabela 3.3 ilustra um resumo de todas as análises econômicas que foram realizadas neste trabalho. Todos os indicadores econômicos foram calculados por meio de planilhas Excel.

Tabela 3.3 - Característica das análises econômicas.

Análise	Potencial de economia de água	Sistema
1	1	Recirculação individual
2		Recirculação proposto - Radiofrequência
3		Recirculação proposto - Fios
4	2	Recirculação individual
5		Recirculação proposto - Radiofrequência
6		Recirculação proposto - Fios
7	3	Recirculação individual
8		Recirculação proposto - Radiofrequência
9		Recirculação proposto - Fios

A Figura 3.19 ilustra o fluxograma que resume os métodos para a obtenção dos dados para realizar as análises econômicas para o sistema de recirculação individual e o sistema de recirculação proposto.

Figura 3.19 – Fluxograma dos métodos.



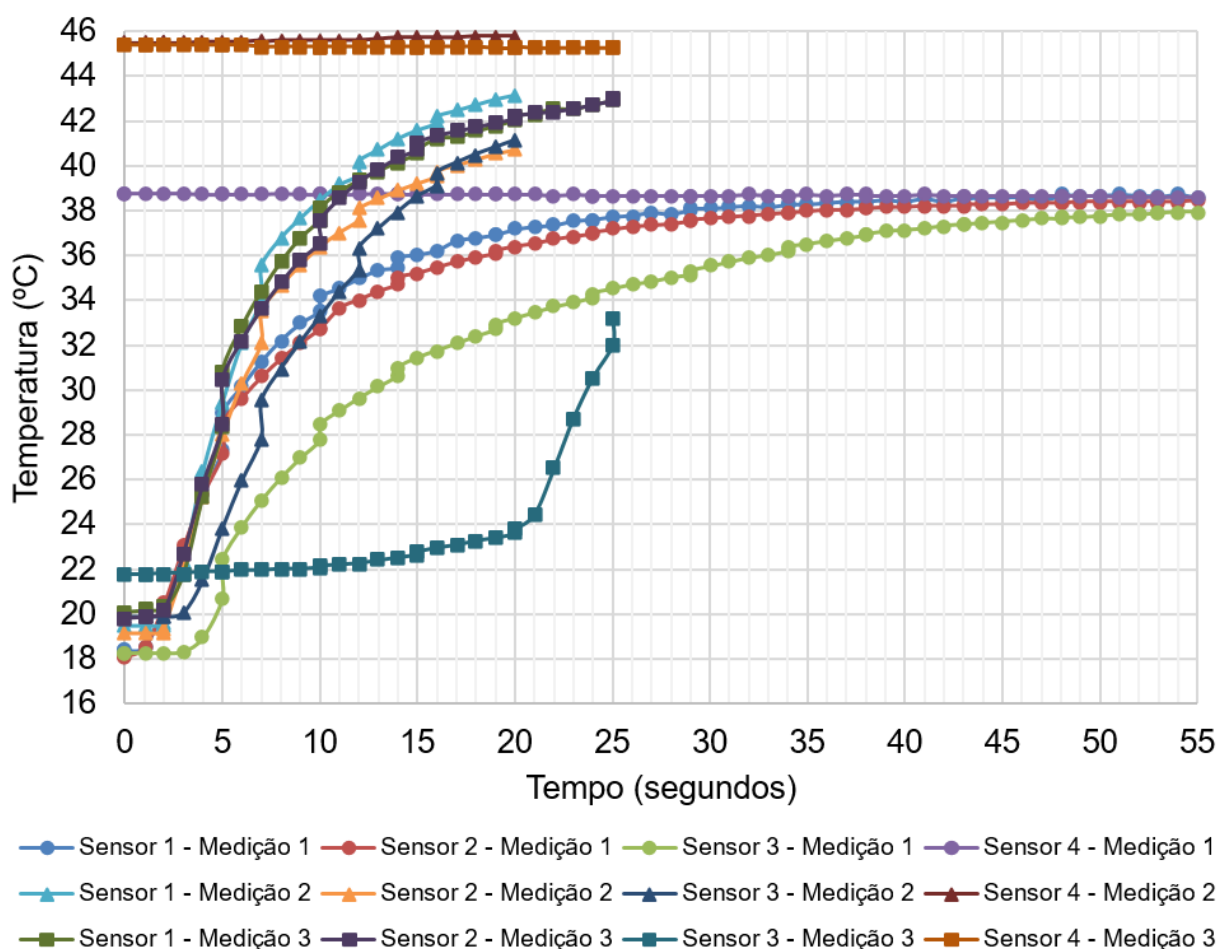
4. Resultados

4.1. Calibração dos sensores de temperatura

4.1.1. Tempo de resposta dos sensores de temperatura DS18B20

A Figura 4.1 mostra a variação da temperatura ao longo do tempo para os sensores de temperatura agrupando as três medições realizadas. Verifica-se que para as medições 2 e 3, as quais a temperatura do banho-maria analógico era maior, o tempo de resposta foi mais rápido. Na medição 3 foi possível identificar que o sensor de temperatura 3 não tem comportamento regular no tempo de resposta. Após inserido no banho-maria analógico, com temperatura média de 45,4°C, o sensor permanece na temperatura de 22°C por, aproximadamente, dez segundos.

Figura 4.1 – Crescimento da temperatura medida pelos sensores DS18B20 ao longo do tempo.



Ressalta-se que o experimento foi realizado com as medições em fluxo parado. Nas medições de temperatura realizadas na pesquisa de campo tem-se medições de uma corrente de água com vazão constante. Portanto, o valor da constante de tempo encontrado no experimento pode diferir do valor da constante de tempo presente nas medições. Entretanto, tendo em vista que o tempo de resposta dos sensores de temperatura não possui regularidade e que depende da temperatura a qual o sensor está sendo exposto, não foi utilizado um valor de correção para o tempo de resposta das medições realizadas neste trabalho. Para minimizar os erros de medição, foi considerado que variações positivas superiores a 0,5% no valor da temperatura aferida é indicativo de que a água quente com a temperatura que vem do aquecedor atingiu o ponto de consumo analisado. Para isto, considerou-se também comportamento ótimo do fluxo da água quente, conforme ilustra a Figura 2.10. As medições 1, 2 e 3 estão detalhadamente ilustradas no Apêndice B.

4.1.2. Precisão dos sensores de temperatura DS18B20

A Tabela 4.1 apresenta os valores das modas das temperaturas medidas durante os dez minutos que os quatro sensores estiveram no banho-maria a 31°C. A Tabela 4.1 ilustra também a diferença entre o valor da moda e a temperatura pré-fixada. A maior diferença obtida foi 1,8°C, portanto, este foi o valor de precisão considerado para todas as medições realizadas neste trabalho. A diferença significativa da medição da temperatura verificada entre os sensores pode estar relacionada com o fato dos aparelhos de banho-maria não possuírem agitação mecânica para evitar a formação de gradiente de temperatura no meio aquoso, no qual os sensores estavam inseridos.

Tabela 4.1 – Dados obtidos com ensaio de precisão para os sensores.

Sensor	Moda (°C)	Diferença (°C)
1	29,2	1,8
2	31,2	- 0,2
3	30,8	0,2
4	32,3	- 1,2

4.2. Pesquisa de campo

As medições de desperdício de água fria foram analisadas em catorze residências de oito cidades diferentes: Criciúma, São Lourenço do Oeste, Pato Branco, São José, Florianópolis, Tubarão, Porto Alegre e Curitiba. Nas medições de desperdício *in loco* foram identificadas as vazões dos aparelhos. A partir dos dados de temperatura da água durante cada segundo da coleta, foi possível construir gráficos do crescimento da temperatura ao longo do tempo. Portanto, é possível estimar o volume de água que será desperdiçado até a água sair do aparelho a uma determinada temperatura. Os dados característicos para cada residência onde foram realizadas as medições estão reunidos no Apêndice C.

A Tabela 4.2 ilustra os dados para cada medição, onde é possível verificar um resumo da média de volume de água desperdiçada para as três medições realizadas para cada aparelho sanitário de cada residência. O desperdício está representado como sendo o volume de água desperdiçado até que a água sofra variações positivas de pelo menos 0,5% no valor da temperatura. Para facilitar e agilizar a obtenção dos dados, priorizou-se em medir os aparelhos de consumo de água quente que estavam mais próximos do aquecedor de passagem a gás. Para o apartamento 2, casa 1 e apartamento 11 foi possível obter medições em mais de um ponto de consumo de água quente.

Tabela 4.2 - Volume de água fria desperdiçada nas medições *in loco*.

Local da medição	Data	Temperatura ambiente (°C)	Desperdício <i>in loco</i> (litros)
Torneira da área de serviço no apartamento 1 em Criciúma	27/06/2019	20,0	6,3
Torneira da cozinha no apartamento 2 em Florianópolis	18/07/2019	19,7	3,1
Torneira do banheiro no apartamento 2 em Florianópolis	18/07/2019	19,7	3,2
Torneira da área de serviço na casa 1 em São Lourenço do Oeste	02/08/2019	16,7	5,9

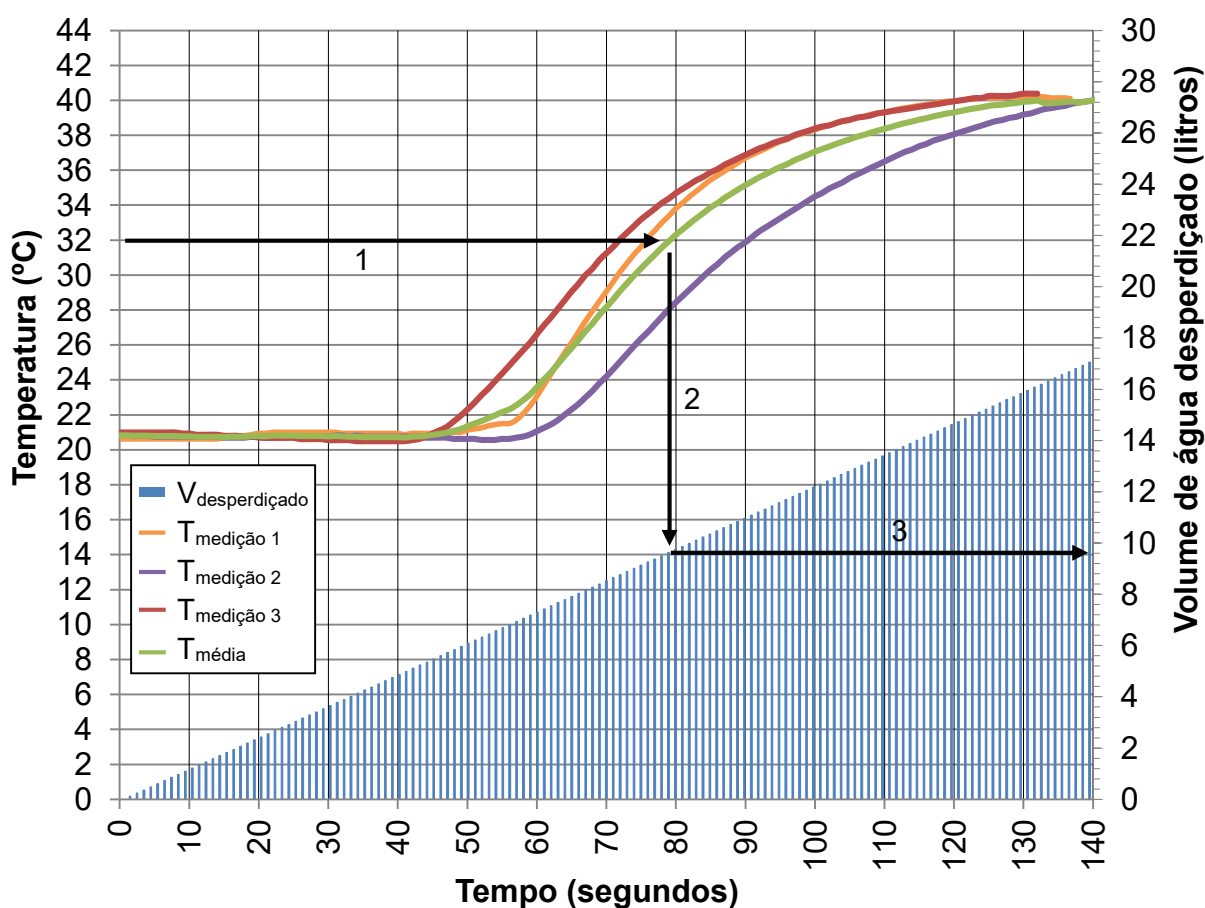
Tabela 4.2 - Volume de água fria desperdiçada nas medições in loco (continuação).

Local da medição	Data	Temperatura ambiente (°C)	Desperdício <i>in loco</i> (litros)
Torneira do banheiro na casa 1 em São Lourenço do Oeste	02/08/2019	16,7	6,9
Torneira da área de serviço no apartamento 3 em Pato Branco	03/08/2019	16,0	4,1
Torneira da área de serviço no apartamento 4 em São José	16/08/2019	14,9	2,4
Torneira da cozinha no apartamento 5 em Florianópolis	27/08/2019	22,1	5,3
Torneira da cozinha no apartamento 6 em Florianópolis	30/08/2019	16,6	4,3
Torneira da cozinha no apartamento 7 em Florianópolis	11/09/2019	23,0	4,4
Torneira do banheiro no apartamento 8 em Florianópolis	18/10/2019	21,5	7,2
Torneira da cozinha no apartamento 9 em Porto Alegre	01/12/2019	25,4	2,1
Chuveiro do banheiro na casa 2 em Curitiba	08/12/2019	23,8	3,6
Torneira da cozinha no apartamento 10 em Florianópolis	16/12/2019	23,0	2,4
Torneira da área de serviço na casa 3 em Tubarão	30/10/2020	20,4	3,7
Torneira da cozinha no apartamento 11 em São José	20/05/2021	23,2	2,6
Torneira da suíte no apartamento 11 em São José	20/05/2021	23,2	3,9
Média			4,2

Para as residências analisadas, para que haja variação significativa na temperatura da água que sai dos aparelhos, em média, ocorre um desperdício de 4,2 litros.

Para analisar a forma como o desperdício de água acontece, a Figura 4.2 mostra três medições *in loco* realizadas para a torneira do tanque do apartamento 1. Para identificar, por exemplo, o desperdício de água fria que haveria ao se fazer o consumo por meio desta torneira apenas quando a temperatura da água estiver a 32°C: deve-se traçar uma reta do valor de 32°C no eixo da esquerda até a curva na cor verde ($T_{\text{média}}$) que representa a média das três medições (1), da intersecção desta reta com a curva $T_{\text{média}}$ traça-se outra reta vertical com sentido para baixo até as colunas que representam o volume de água desperdiçado (2). O volume de água desperdiçado pode ser lido no eixo da direita (3), que para este exemplo, seria de 9,6 litros.

Figura 4.2 – Temperatura e volume de água desperdiçado ao longo do tempo após o acionamento da torneira do tanque do apartamento 1.



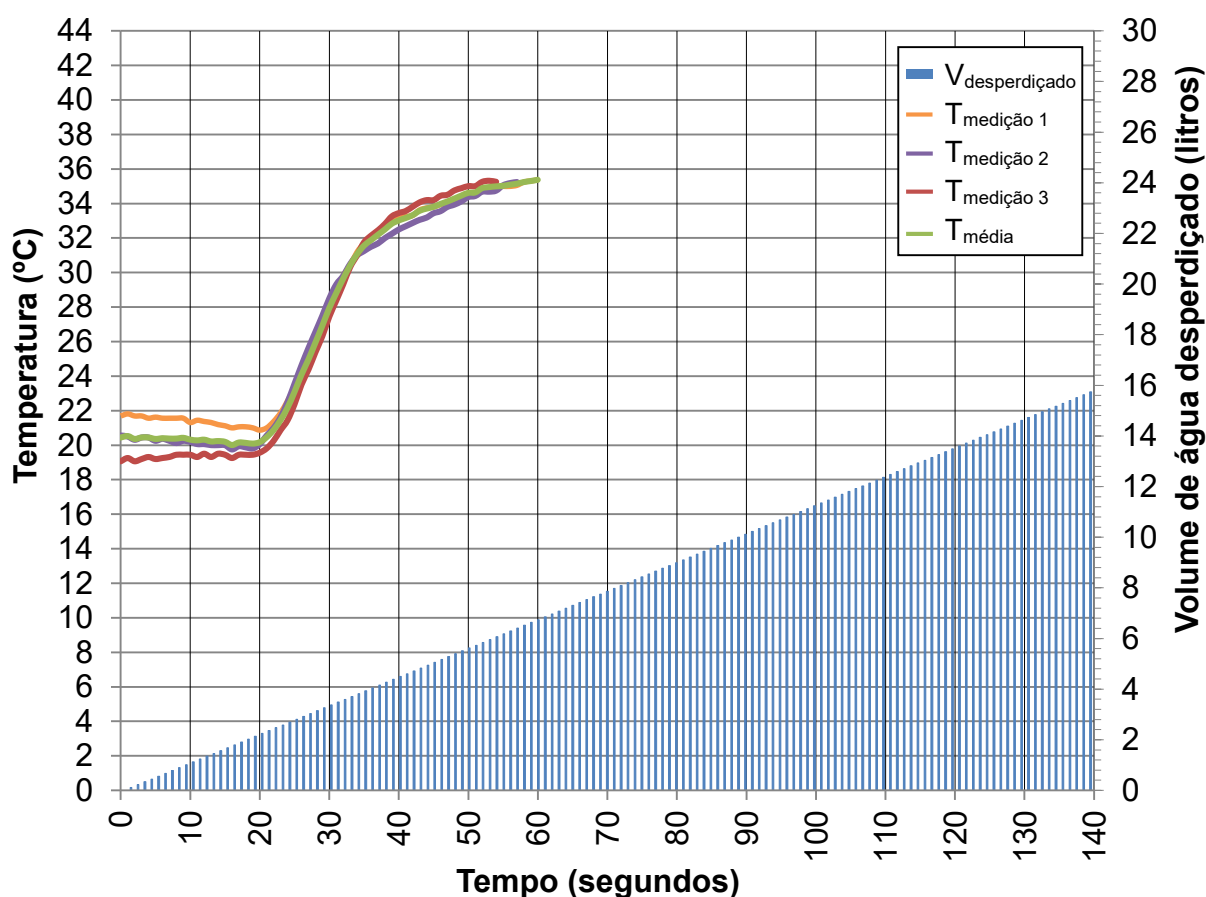
Para a medição 1 foi verificado com o morador do apartamento qual era o registro de pressão de água quente desta torneira e confirmado que o aparelho não tinha sido utilizado nas horas precedentes à medição. Na sequência realizou-se a verificação da

vazão máxima da torneira e as medições do crescimento da temperatura. Obtidos os valores de volume de água coletado e do crescimento da temperatura da água da saída da torneira, desligou-se o aquecedor de passagem para fazer com que a água fria circulasse pela tubulação de água quente. Deste modo, foi possível realizar as medições 2 e 3 para simular o início de novas utilizações deste ponto e comparar os dados obtidos com os dados da medição 1.

Com a análise da Figura 4.2 pode-se obter o volume de água desperdiçado até a temperatura da água atingir um determinado valor. Na medição 1, identifica-se que a temperatura começa a aumentar após aproximadamente 50 segundos, ou seja, após ter escoado aproximadamente 6,2 litros de água fria. Ressalta-se que a medição 1 é a que melhor representa a realidade, tendo em vista que para as medições 2 e 3 o resfriamento da tubulação foi forçado, podendo não representar a temperatura ambiente em que a água da tubulação se encontra normalmente nas suas condições de isolamento. Para as medições 2 e 3 o volume de água coletado da torneira até a temperatura da água começar a variar foi de, respectivamente, 7,3 e 5,5 litros, resultando na média de aproximadamente 6,3 litros para o apartamento 1 em Criciúma, apresentada na Tabela 4.2.

Para se obter o valor que realmente será desperdiçado deve-se considerar o tempo que a água necessita para atingir temperaturas confortáveis ao usuário. No exemplo dado para a interpretação da Figura 4.2, o desperdício decorrente do tempo de espera para que a água aqueça representou um volume de aproximadamente 33% do total desperdiçado. Para este apartamento, o aquecedor de passagem localiza-se a uma distância inferior a 3,0 metros lineares da torneira medida. Dentre as residências analisadas, foi a residência que apresentou o segundo maior desperdício de água fria. Para o apartamento 4, a residência que se obteve um dos menores desperdícios de água fria, semelhante procedimento foi realizado e as medições de temperatura e desperdício de água fria podem ser verificadas na Figura 4.3.

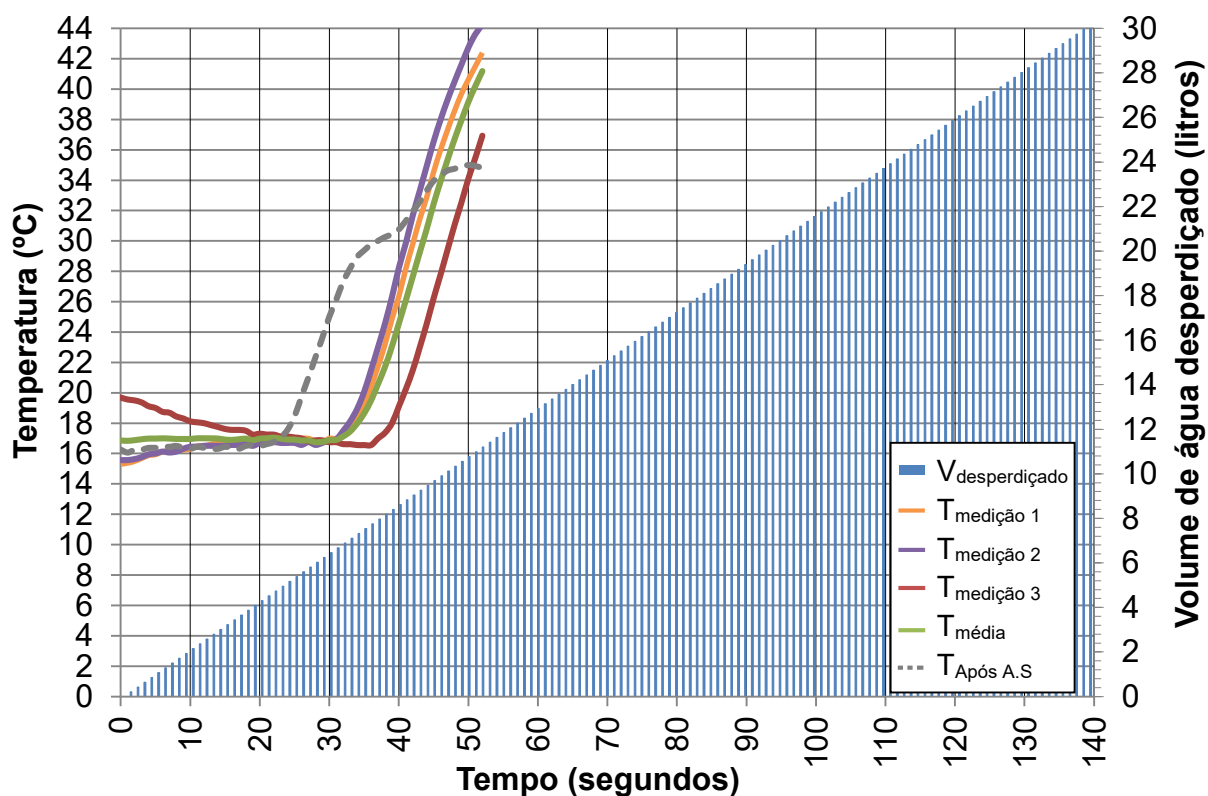
Figura 4.3 - Temperatura e volume de água desperdiçado ao longo do tempo após o acionamento da torneira do tanque do apartamento 4.



Na medição 1, identifica-se que a temperatura começa a aumentar após ter escoado aproximadamente 2,4 litros de água fria. Para as medições 2 e 3, o volume de água coletado da torneira até a temperatura da água começar a variar foi de, respectivamente, 2,4 e 2,5 litros, resultando na média de aproximadamente 2,4 litros apresentada na Tabela 4.2.

Na residência de São Lourenço do Oeste foi possível obter os valores de desperdício da torneira do tanque, que é o ponto de consumo de água quente mais próximo do aquecedor, e também da torneira do banheiro, que é o ponto de consumo de água quente mais afastado do aquecedor. Esta informação pode ser confirmada ao se analisar o comportamento da temperatura de um ponto de consumo mais afastado do aquecedor após a utilização de outro ponto de consumo mais próximo do aquecedor. As Figuras 4.4 e 4.5 ilustram exatamente este comportamento.

Figura 4.4 - Temperatura e volume de água desperdiçado ao longo do tempo após o acionamento da torneira do banheiro a 1.

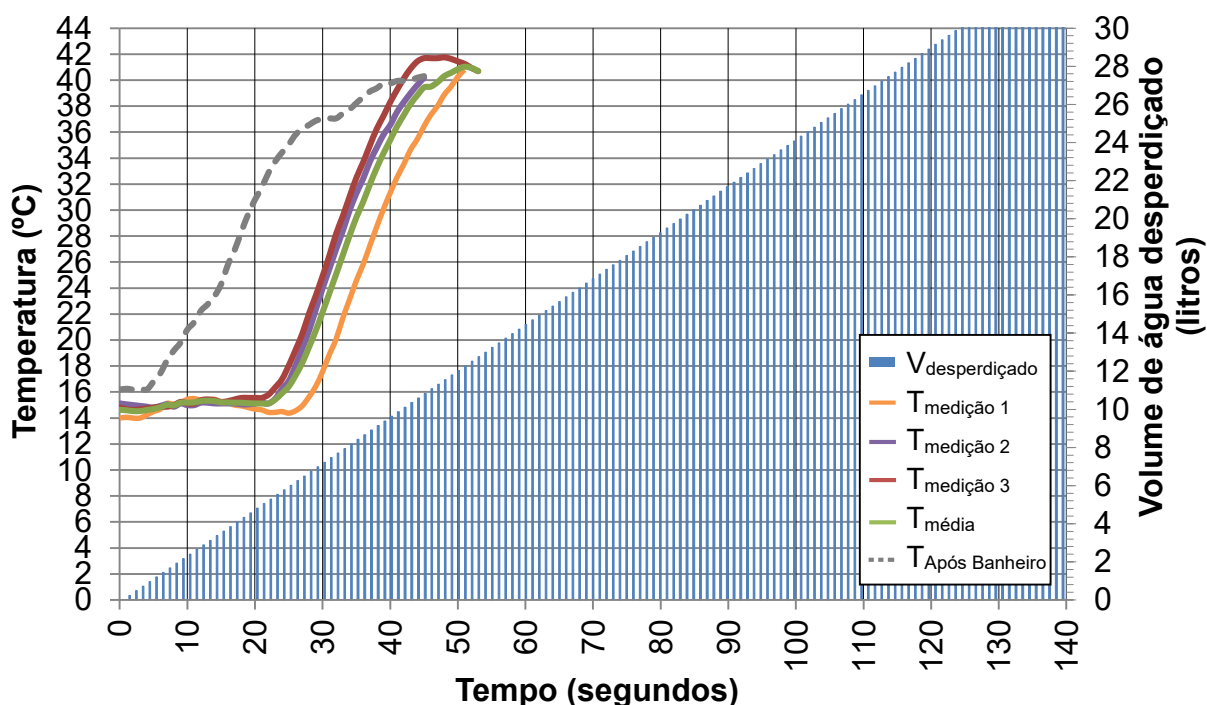


Na Figura 4.4 é possível verificar pela linha tracejada que o desperdício de água fria no banheiro, que é o ponto mais afastado do aquecedor de água, reduz caso o ponto de consumo da torneira do tanque, que é o ponto mais próximo do aquecedor, tenha sido utilizado previamente. Imediatamente depois do uso de água quente da torneira do tanque, para a água sair da torneira do banheiro com um valor de temperatura entre 17°C e 18°C, por exemplo, ocorre um desperdício de aproximadamente 1,5 litros a menos do que a média de desperdício encontrada sem utilização prévia de um ponto de consumo mais próximo do aquecedor.

Na Figura 4.5 é possível visualizar o mesmo efeito do caso anterior, porém, com um desperdício ainda menor de água fria caso ocorra a utilização de um ponto de consumo de água quente mais afastado do aquecedor previamente ao uso de um ponto mais próximo do aquecedor. Neste exemplo as medições de temperatura são tomadas da torneira do tanque após ter feito uso da torneira do banheiro, que é o ponto de consumo de água quente mais afastado do aquecedor de passagem a gás.

Verifica-se que para a água apresentar variações positivas na temperatura ocorre um desperdício de apenas 1,25 litros de água fria.

Figura 4.5 - Temperatura e volume de água desperdiçado ao longo do tempo após o acionamento da torneira do tanque da casa 1.



Com esta análise é possível concluir, mesmo sem a verificação do projeto hidráulico ou *as built*, que o ponto de consumo de água quente do tanque é o ponto mais próximo do aquecedor de passagem. Deste modo, aceita-se a premissa de instalar um sistema que libera a água fria contida na tubulação por meio de uma válvula no final do ramal principal do sub-ramal de água quente, conforme a ideia proposta por este trabalho.

As medições de temperaturas e desperdícios de água fria para os três testes realizados para os aparelhos sanitários para as demais residências que não foram analisadas detalhadamente neste capítulo encontram-se no Apêndice D.

4.3. Conformação e funcionamento do sistema automatizado

Conforme descrito no método, para uma melhor eficiência, a conformação do sistema automatizado em uma residência deve ser realizada de modo que as tubulações de

água quente passem o mais próximo possível dos pontos de consumo de água. A Figura 4.6 ilustra como deveria ser a disposição das tubulações para a planta baixa dos sistemas prediais de água fria e água quente apresentados na seção 3.3. A Figura 4.7 ilustra uma sugestão para o esquema vertical dos sistemas prediais de água fria e água quente para a região onde se encontram os banheiros da Figura 4.6.

Figura 4.6 - Planta baixa do sistema predial de água fria e água quente da ideia proposta.

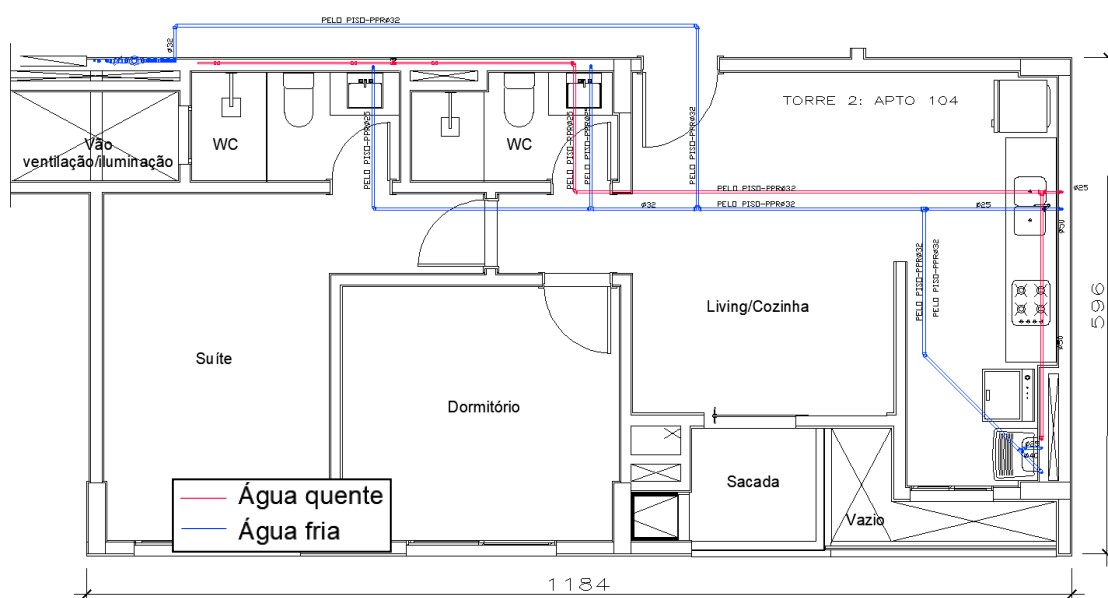
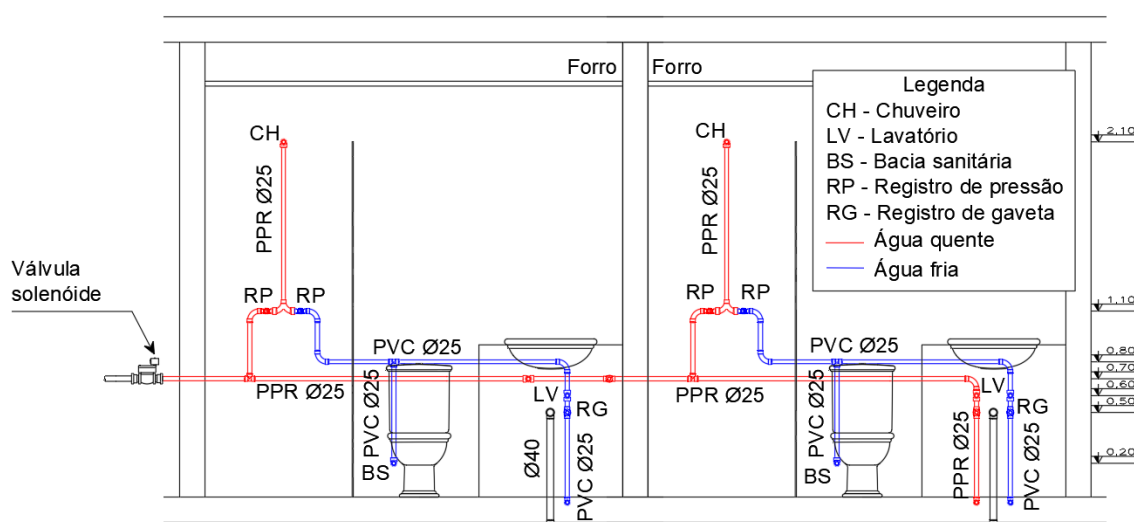


Figura 4.7 - Esquema vertical do sistema predial de água fria e água quente da ideia proposta.



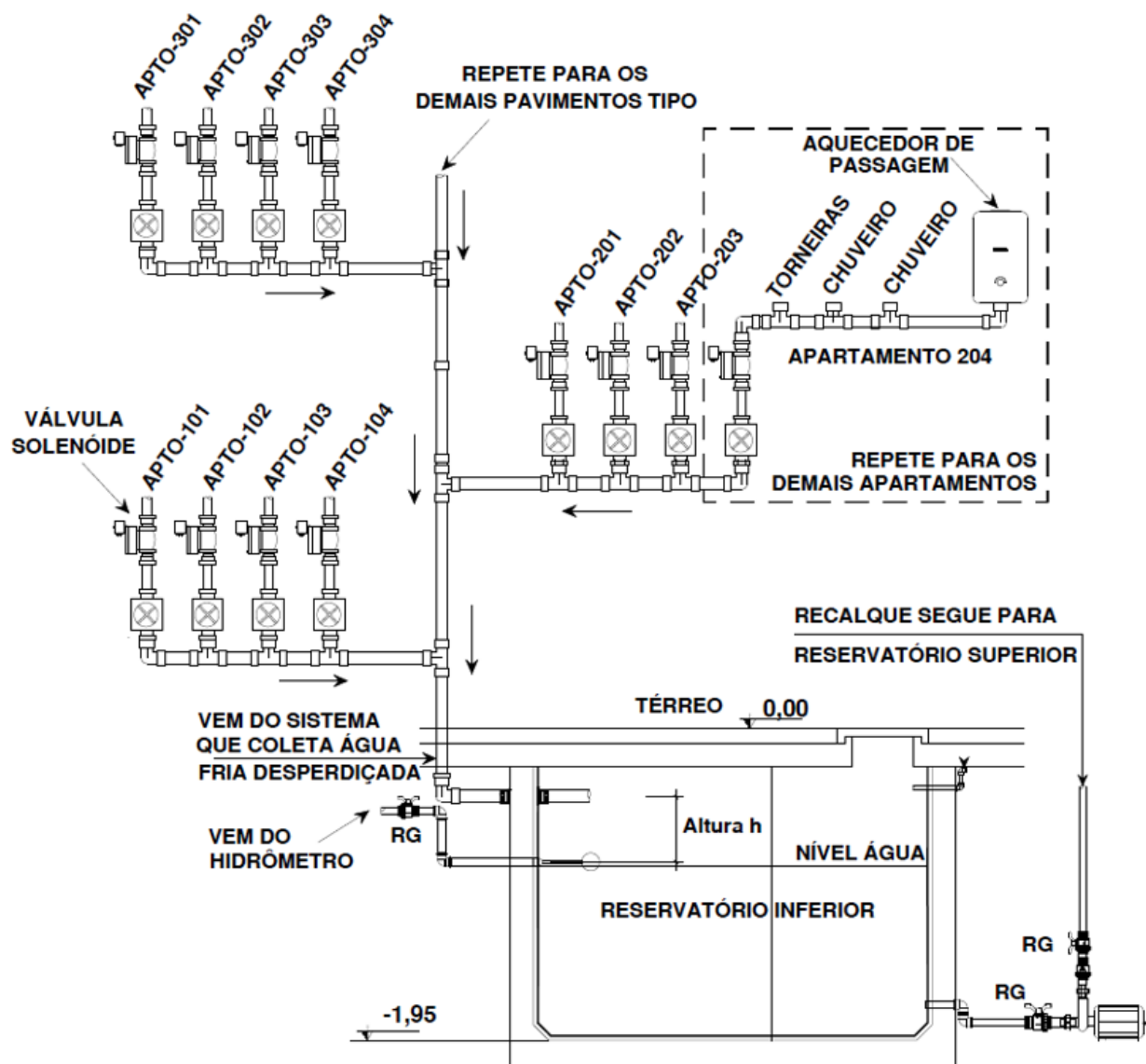
Neste exemplo, verifica-se que seria possível instalar a válvula solenoide próxima ao ponto de consumo mais afastado do aquecedor, pois há a presença de um vão de iluminação e ventilação na proximidade que poderia servir como o espaço para as tubulações de descida conduzirem a água fria, que seria desperdiçada, para o reservatório inferior da edificação.

O reservatório inferior pode ser um reservatório de coleta de água pluvial previsto em projeto para a edificação ou um reservatório de contenção de água pluvial. Algumas cidades preveem em seus códigos de obra a possibilidade de execução de um reservatório de contenção de água pluvial para lotes em que a taxa de permeabilidade é menor que os limites preestabelecidos, como é verificado para o município de Joinville - SC (JOINVILLE, 2017). A água fria proveniente do sistema proposto poderia ser direcionada para estes reservatórios e ser utilizada em descargas de bacias sanitárias, por exemplo. Outros reservatórios inferiores possíveis de serem adaptados ao sistema proposto são os reservatórios de edificações multifamiliares localizadas em pontos dos municípios onde o abastecimento de água é de baixa pressão. Para que o reservatório principal seja abastecido é necessário um reservatório inferior interligado por meio de bombas de recalque. Esta configuração, por exemplo, é obrigatoriedade prevista no código de obras de algumas cidades do sul do Brasil (FLORIANÓPOLIS, 2000; GASPAR, 1988; PORTO ALEGRE, 1992; SÃO JOAQUIM, 1987).

A Figura 4.8 ilustra um esquema de como seria o sistema predial, desde a coleta da água pelo sistema automatizado dos pontos de consumo de água quente de todos os apartamentos até a destinação desta água, que seria o reservatório inferior de água potável da edificação.

Ressalta-se que a utilização do reservatório principal de água potável como destino da água do sistema proposto de recirculação deve ser avaliada quanto aos quesitos de qualidade da água. Dada a impossibilidade de conexão do sistema coletor neste reservatório, custos adicionais com reservatório e sistema único de distribuição da água para usos não potáveis devem ser incluídos nos custos iniciais da análise econômica.

Figura 4.8 - Esquema do sistema predial da ideia proposta.



4.4. Protótipo do sistema automatizado proposto

A Figura 4.9 mostra a instalação do protótipo com os componentes hidráulicos. A tubulação do protótipo foi apoiada em dois suportes para não haver troca de calor da superfície externa da tubulação com o piso do local.

A Figura 4.10 ilustra a montagem dos componentes eletrônicos do protótipo em uma bancada antes de ser transferido para o local onde os componentes hidráulicos estavam.

Figura 4.9 – Instalação hidráulica do protótipo.

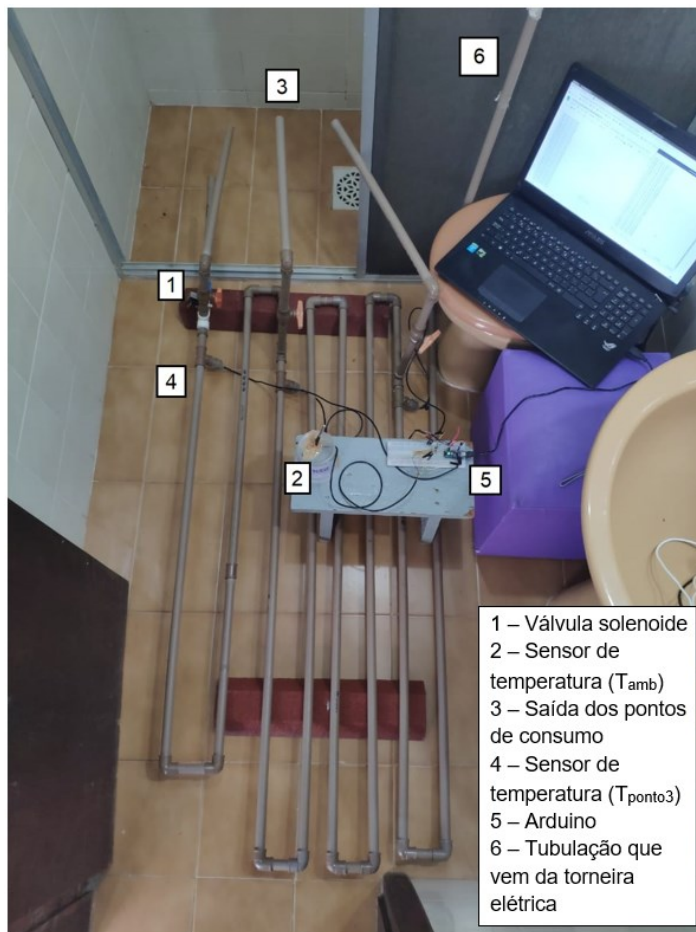
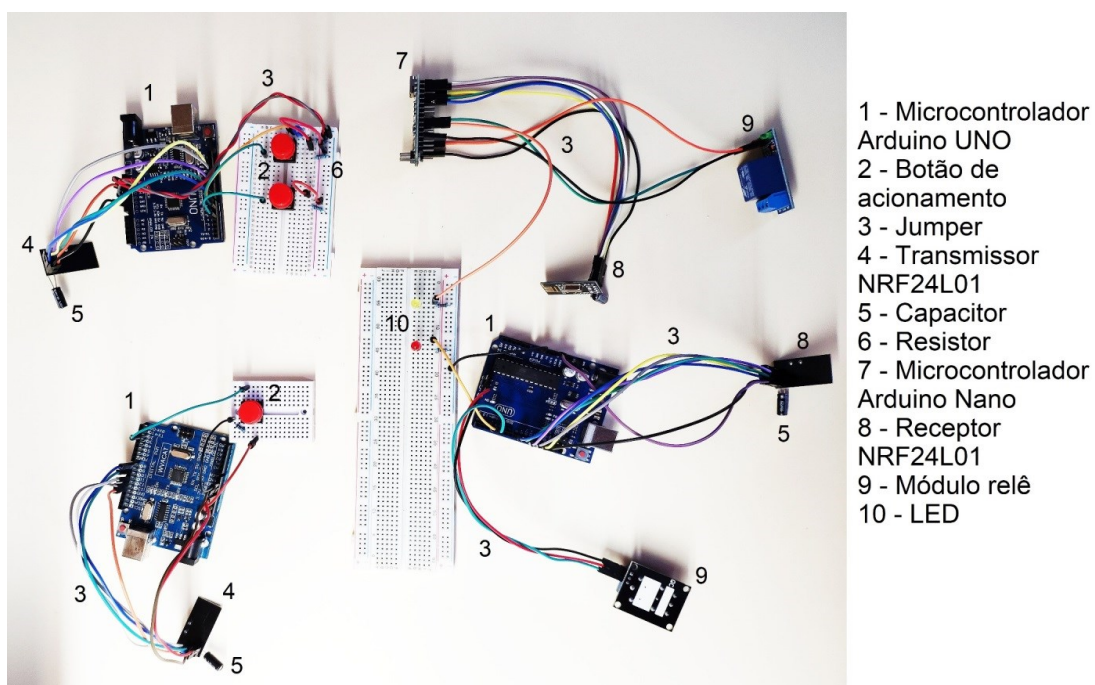
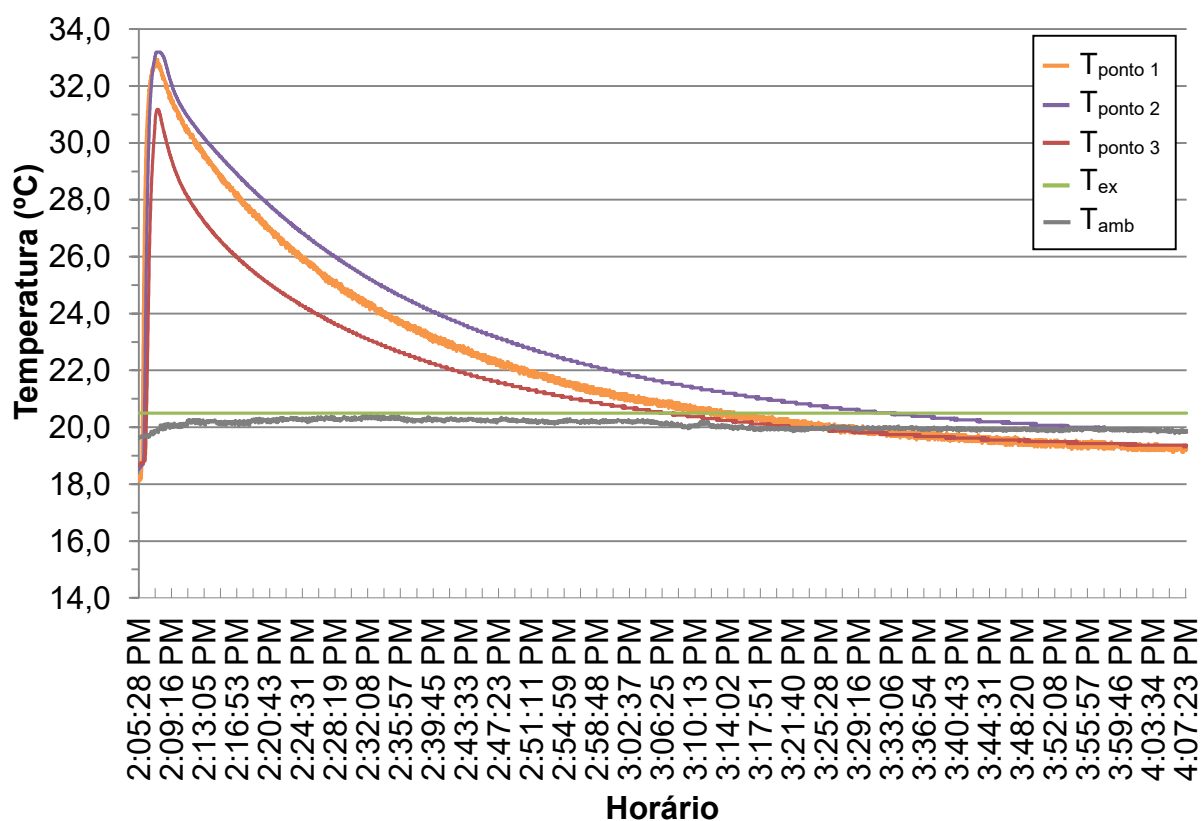


Figura 4.10 – Instalação eletrônica do protótipo.



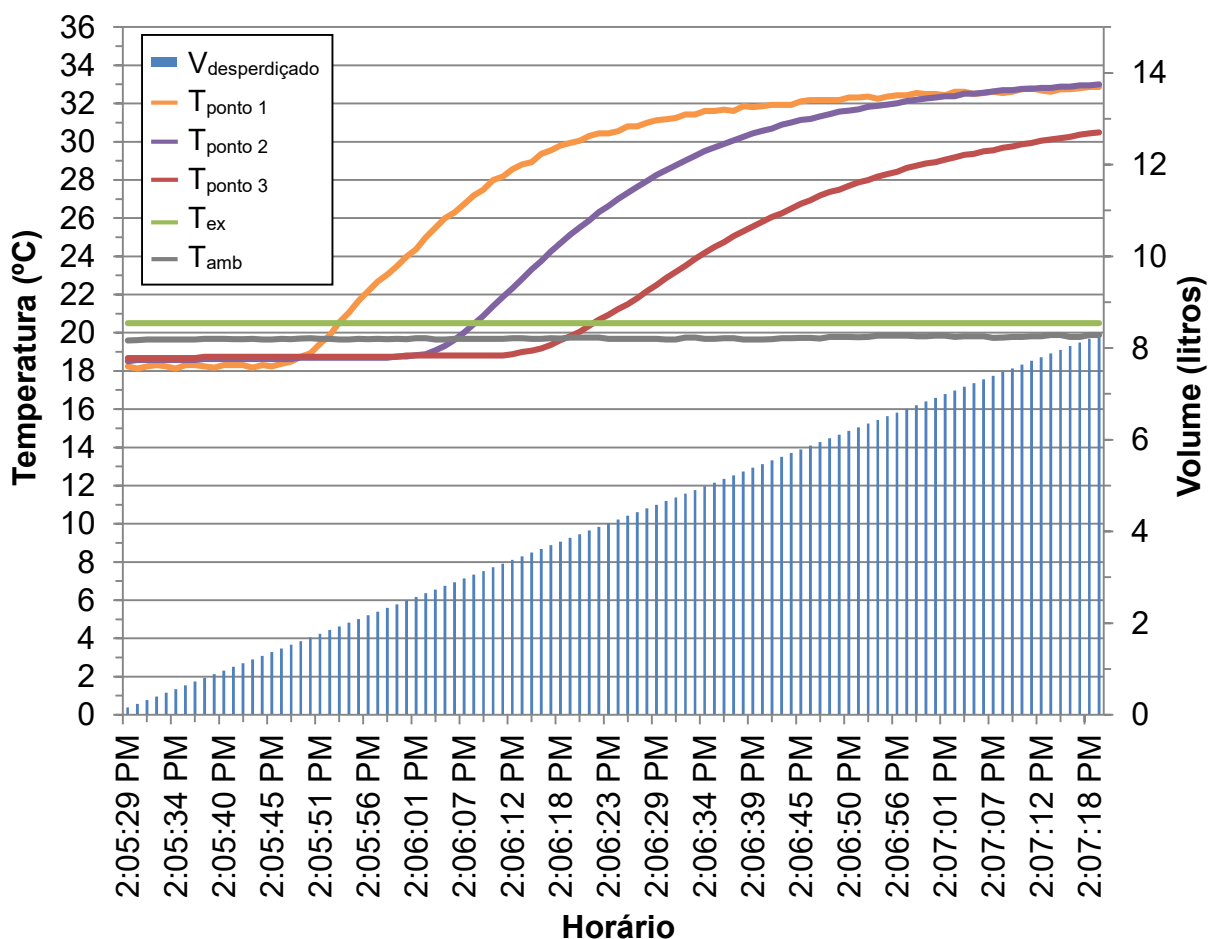
A primeira parte da simulação consistiu em monitorar a temperatura da água próxima aos pontos de consumo ao acionar o sistema e direcionar a água da tubulação por meio da válvula solenoide, que se encontrava no final do ramal principal. O ciclo de acionamento era com intervalo de dois minutos para abertura da válvula, com consequente liberação da água fria em repouso na tubulação e chegada da água quente que vem da torneira elétrica. Após a abertura e fechamento da válvula solenoide, o sistema ficava em repouso por duas horas. Deste modo, era possível monitorar a diminuição da temperatura da água nos pontos de consumo e equilibrar a temperatura de todo o sistema com a temperatura ambiente. Assim, era possível reiniciar outro ciclo de medições em função da temperatura ambiente. Ao todo foi possível realizar 57 medições de aumento e diminuição da temperatura nos pontos de consumo com temperatura ambiente na faixa de 19,3°C a 22,3°C. A Figura 4.11 ilustra o aumento e diminuição da temperatura para os três pontos de consumo para a primeira medição realizada no protótipo. A medição foi feita em 23/09/2020 com início às 14:05:28 e término às 16:07:23.

Figura 4.11 – Aumento e diminuição da temperatura nos pontos de consumo do protótipo (Medição 1).



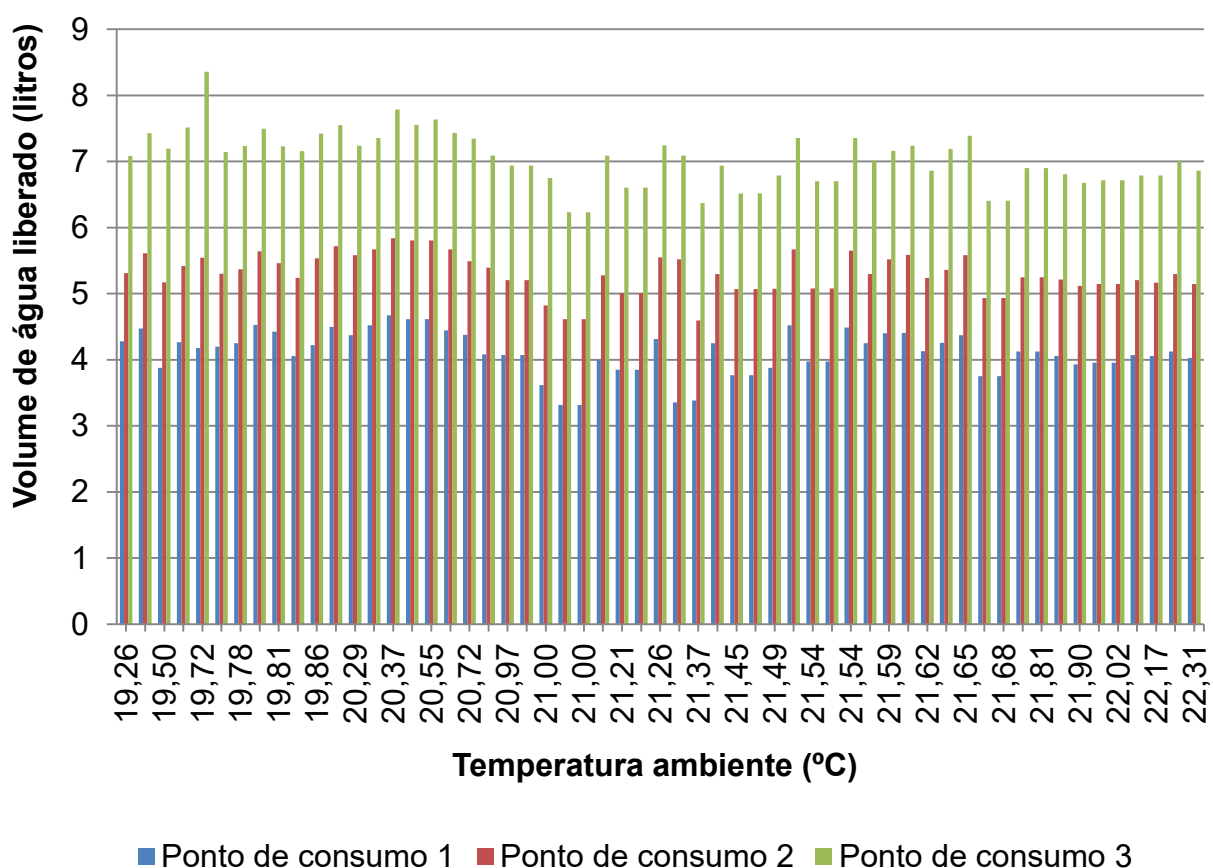
Nota-se que quanto mais afastado o ponto de consumo da torneira elétrica, menor é o valor da temperatura que a água atinge neste ponto. Quanto à diminuição da temperatura, nota-se que quanto menor a temperatura inicial, mais rapidamente a temperatura da água atinge os valores da temperatura ambiente. Observa-se também que o intervalo de, aproximadamente, duas horas foi suficiente para a temperatura da água nas tubulações se aproximar da temperatura ambiente. A Figura 4.12 ilustra o intervalo das 14:05:28 às 14:07:16 da mesma medição da Figura 4.11. É possível observar que para as temperaturas ambientes e externa próximas a 20°C, para a água no primeiro, segundo e terceiro ponto de consumo atingir a temperatura de 30°C, devem ser liberados, respectivamente, 4,3, 5,4 e 7,5 litros de água pela válvula solenoide. Dada a vazão de 0,076 litros/segundo da válvula solenoide, o tempo de abertura da válvula para o primeiro, segundo e terceiro ponto de consumo é de, respectivamente, 56, 71 e 99 segundos.

Figura 4.12 – Variação da temperatura nos pontos de consumo do protótipo (Medição 1).

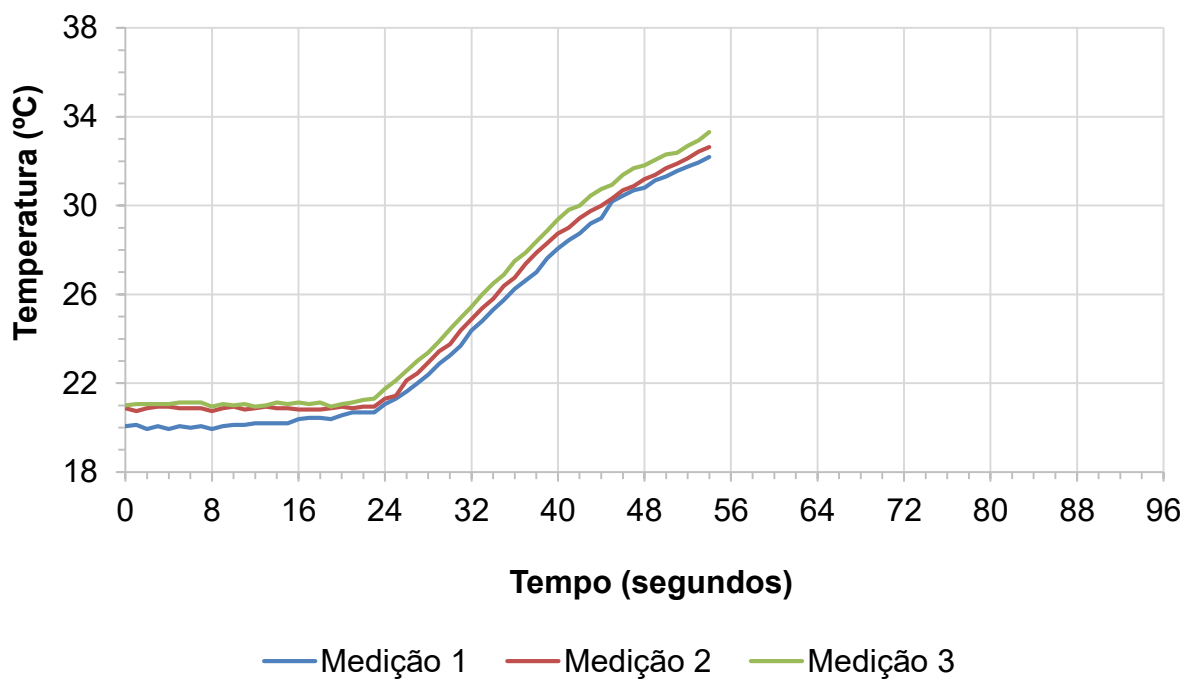
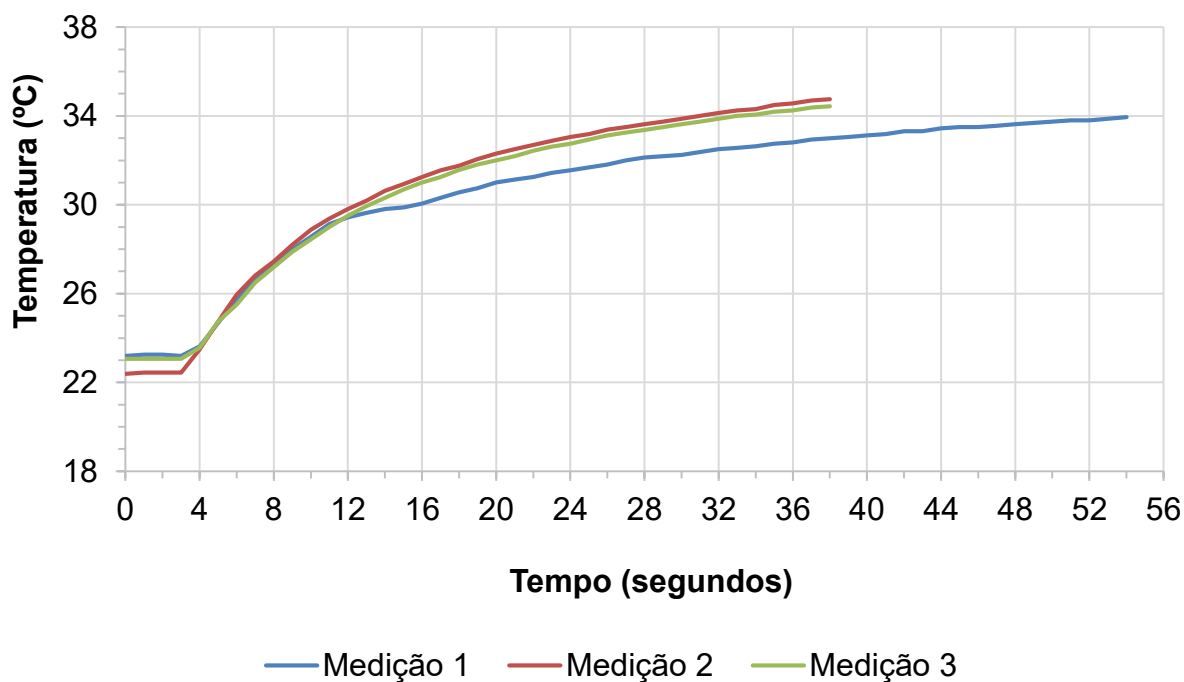


A Figura 4.13 indica, para todas as simulações realizadas, o volume de água que a válvula solenoide deve liberar para que a água com temperatura de 30°C atinja cada um dos pontos de consumo. Considerando a vazão de 0,076 litros/segundo da válvula solenoide, o tempo médio de abertura da válvula para a água quente atingir os pontos de consumo 1, 2 e 3 é de, respectivamente, 54, 70 e 93 segundos.

Figura 4.13 – Volume de água liberado para a temperatura da água no ponto de consumo atingir 30°C.



Na segunda parte da simulação do funcionamento do sistema, três medições foram realizadas para cada ponto de consumo. Para o botão do ponto de consumo 1 foi ajustado o comando para a abertura da válvula solenoide por 54 segundos. A Figura 4.14 ilustra três medições em instantes diferentes do aumento da temperatura após o acionamento do botão. Após o intervalo de tempo do acionamento foi verificada a temperatura na saída de água do ponto 1. A Figura 4.15 ilustra as três medições de temperatura na saída de água no ponto de consumo 1 após os respectivos acionamentos.

Figura 4.14 – Variação da temperatura no ponto de consumo 1 do protótipo.**Figura 4.15 – Variação da temperatura na saída do ponto de consumo 1 do protótipo.**

Verifica-se, portanto, que ao acionar o aparelho sanitário, após quatro segundos a temperatura da água já começa a ter variações positivas. Após catorze segundos do acionamento do aparelho sanitário, a água já apresenta temperatura de 30°C.

Para os botões dos pontos de consumo 2 e 3 foram ajustados o comando para a abertura da válvula solenoide por, respectivamente 70 e 93 segundos. Para ambos, após quatro segundos a temperatura da água começou a ter variações positivas. Para o ponto de consumo 2, em catorze segundos do acionamento do aparelho sanitário, a água apresentou temperatura de 30°C. Para o ponto de consumo 3 verificou-se temperatura de 30°C após seis segundos do acionamento do aparelho sanitário. As medições do ponto de consumo 2 e 3 encontram-se no Apêndice E.

O atraso de quatro segundos para a água quente atingir a saída dos pontos de consumo é referente ao trecho de tubulação que há entre o sensor de temperatura, passando pelo registro de gaveta, até o fim da tubulação.

4.5. Análise econômica

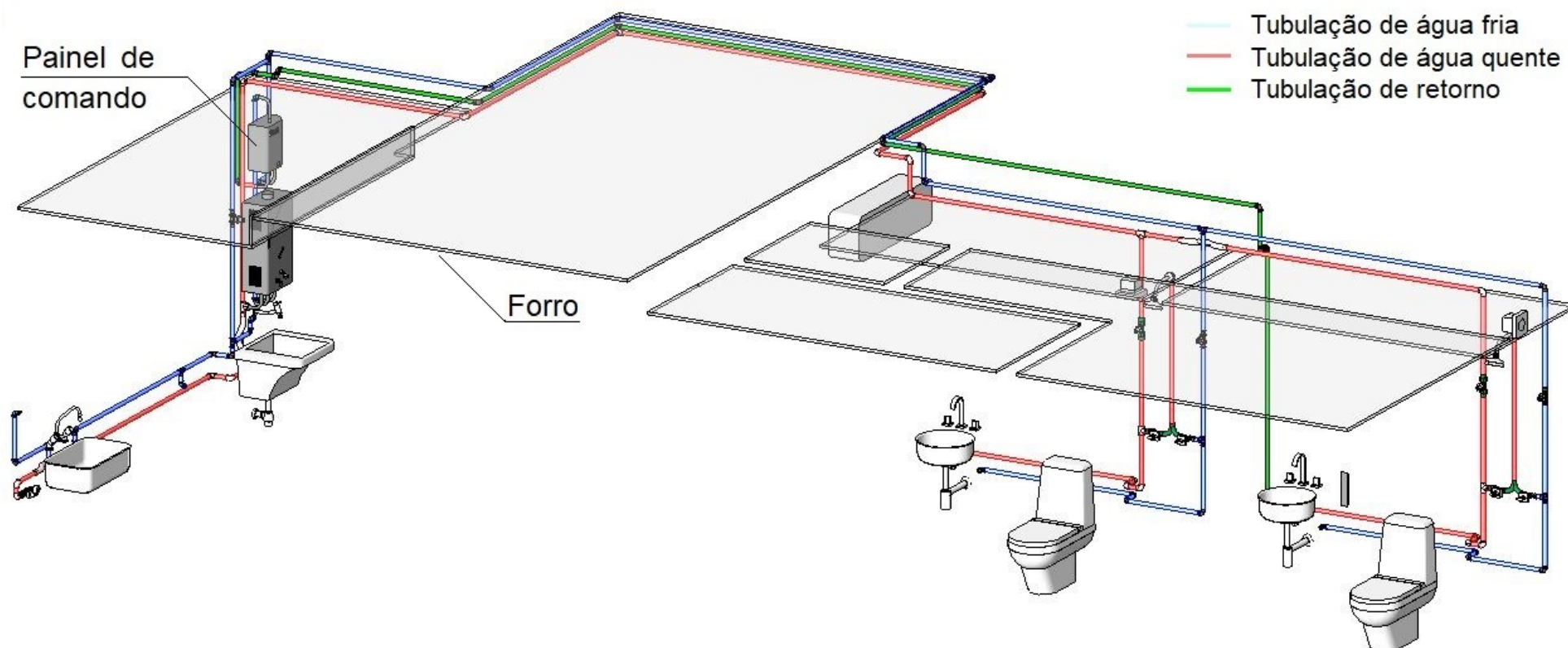
4.5.1. Custos iniciais com instalação hidráulica e elétrica

Tanto para o sistema de recirculação individual quanto para o sistema de recirculação proposto, os custos iniciais com instalação hidráulica e elétrica serão apresentados nesta seção separadamente para cada modelo arquitetônico de apartamento do Edifício Palmas Central. Para o sistema de recirculação proposto será apresentado também o custo inicial com tubulações e conexões externas aos apartamentos, que se conectam com o reservatório inferior. Os custos com tubulações e conexões são custos com materiais adicionais ao quantitativo já existente do projeto hidráulico de água quente. Se o novo *layout* hidráulico resultar em menor quantidade de tubulação e/ou conexões de água quente, estes custos serão reduzidos do custo inicial de instalação dos sistemas de recirculação. Caso haja redução no quantitativo de materiais do projeto hidráulico de água fria, o custo relativo a esta redução não será descontado do custo inicial de instalação dos sistemas de recirculação.

4.5.1.1. Sistema de recirculação individual

Conforme apresentado na seção 2.6, os sistemas de recirculação de água operam por meio de um ramal de retorno instalado do último ponto de consumo de água quente até o aquecedor de passagem. O sistema de recirculação Smartstart da marca Rinnai é um dos mais difundidos no país. Este será o sistema adotado para a análise econômica comparativa. Em todos os apartamentos o aquecedor de passagem a gás encontra-se na área de serviço. Portanto, a tubulação de retorno parte do ponto da tubulação mais afastado do aquecedor até a área de serviço, retornando ao aquecedor. No modelo arquitetônico 1 e 3 o ponto mais afastado é após a torneira do banheiro da suíte. No modelo arquitetônico 2 o ponto mais afastado é após a torneira do banheiro comum. As bombas do sistema de recirculação residencial de água quente Smartstart, geralmente, são de 147 W de potência. Todas as centrais de comando foram projetadas para serem instaladas na proximidade do aquecedor de passagem. A Figura 4.16 ilustra um exemplo do trajeto da tubulação de retorno e do local de instalação do painel de comando para o modelo arquitetônico 1. No Apêndice F encontram-se as plantas isométricas da implementação do sistema para os demais modelos.

Figura 4.16 – Planta isométrica indicando a tubulação de retorno e o ponto de instalação do painel de comando do sistema de recirculação individual para o Modelo 1.



A Tabela 4.3 ilustra o quantitativo necessário para implementação do sistema de recirculação individual para cada modelo arquitetônico de apartamento do Edifício Palmas Central.

Tabela 4.3 – Quantitativo para instalação do sistema de recirculação individual para cada modelo arquitetônico.

Item	Quantidade		
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Tubulação (25 mm) (m)	14,8	9,9	11,7
Tê (25 mm)	1	1	1
Joelho (25 mm)	14	5	11
Curva (25 mm)	0	1	0
Isolante térmico (m)	14,8	9,9	11,7
Sistema Smartstart	1	1	1

O orçamento detalhado dos materiais com as três opções de fornecedores encontra-se no Apêndice G. A Tabela 4.4 resume o quantitativo de materiais para a instalação do sistema de recirculação individual para todo edifício com os respectivos custos unitários dos materiais. O custo total com materiais para a instalação do sistema de recirculação individual em todo o edifício foi de R\$ 37.244,30.

A Tabela 4.5 ilustra os custos de mão de obra orçados para realizar a instalação do sistema de recirculação individual em uma residência. O custo total com mão de obra considerado para todo o edifício, portanto, foi de R\$ 11.566,72.

O custo inicial total para a instalação do sistema de recirculação individual em todo o Edifício Palmas Central foi de R\$ 61.013,78.

Tabela 4.4 – Quantitativo para instalação do sistema de recirculação individual para o Edifício Palmas Central.

Item	Quantidade	Custo unitário (R\$)	Custo total (R\$)
Tubulação (25 mm) (m)	260,45	10,80	2.812,89
Tê (25 mm)	20	3,20	64,00
Joelho (25 mm)	220	1,90	418,00
Curva (25 mm)	6	9,90	59,40
Isolante térmico (m)	260,45	1,35	351,61
Sistema Smartstart	20	1.676,92	33.538,40
Total			37.244,30

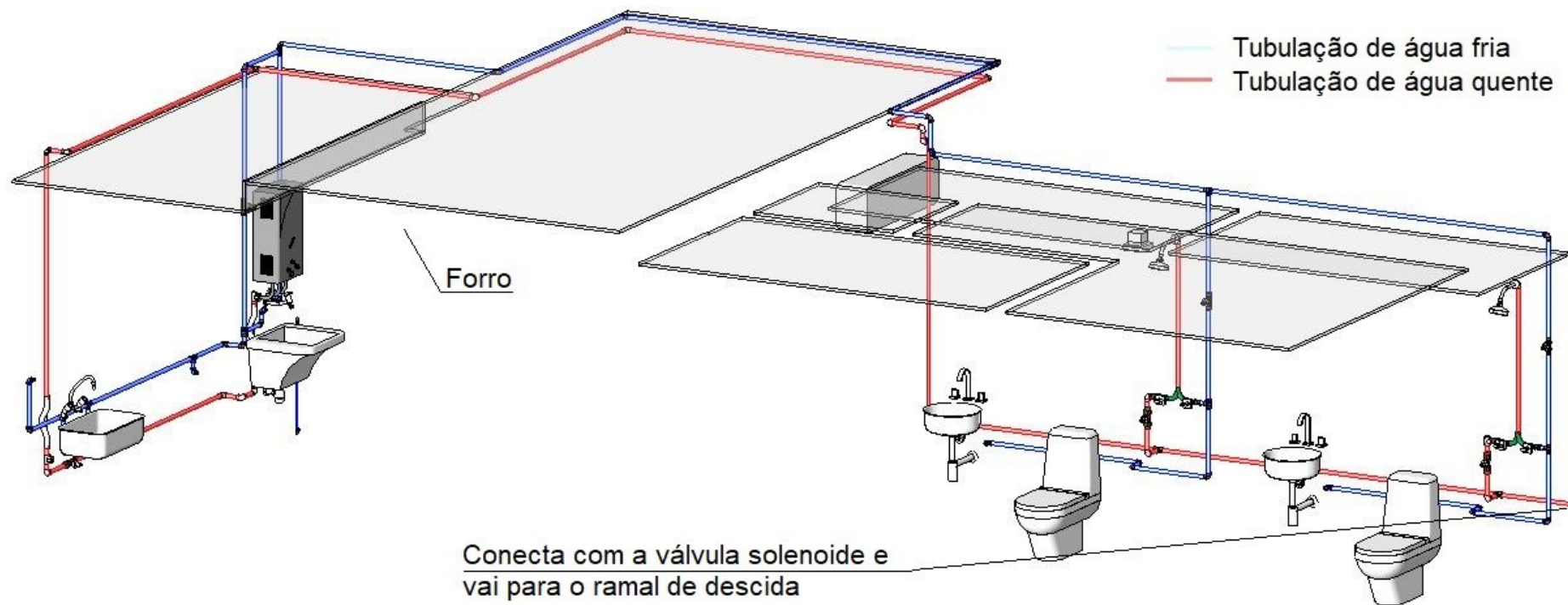
Tabela 4.5 – Orçamento dos custos com mão de obra.

Empresa	Custo de instalação	
	Recirculador (R\$)	Tubulações e conexões (R\$/m)
1	500,00	25,21
2	250,00	28,33
3	450,00	50,99

4.5.1.2. Sistema de recirculação proposto

No subsolo encontram-se, junto à garagem, os dois reservatórios inferiores de água potável. Ao todo foram projetadas cinco prumadas verticais que conectam os sistemas dos apartamentos com os reservatórios inferiores. Na Figura 4.17 é possível verificar um exemplo de adaptação do sistema de recirculação proposto para o modelo arquitetônico 1. No Apêndice H encontra-se as plantas isométricas da implementação do sistema para os outros dois modelos arquitetônicos e um esquema demonstrando as prumadas verticais que se conectam com o reservatório.

Figura 4.17 – Planta isométrica com adaptação do sistema automatizado proposto para o modelo arquitetônico 1.



A Tabela 4.6 mostra o quantitativo necessário para implementação do sistema de recirculação proposto no modo de transmissão por radiofrequência para cada modelo arquitetônico de apartamento do Edifício Palmas Central.

Tabela 4.6 – Quantitativo para instalação do sistema de recirculação proposto para cada modelo arquitetônico.

Item	Quantidade		
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Tubulação PPR (25 mm) (m)	0,74	- 0,31	- 2,34
Tê PPR (25 mm)	1	0	-2
Joelho PPR (25 mm)	0	2	-7
Curva PPR (25 mm)	- 1	1	-2
Válvula solenoide	1	1	1
Microcontrolador	4	4	4
Resistor 1 k Ω	10	10	10
Botões de acionamento	5	5	5
Lâmpada LED	5	5	5
Módulos relê	1	1	1
Fonte 9 V	4	4	4
Fonte 12 V	1	1	1
Fiação (m)	1	1	1
Receptor radiofrequência	1	1	1
Transmissor radiofrequência	3	3	3
Capacitor 100 μ F 25 V	4	4	4

Além do quantitativo para cada apartamento, há também o quantitativo de tubulação e conexões adicionais externas que encaminham a água das unidades para o reservatório inferior. Esta tubulação encaminha apenas água fria para o reservatório, portanto não há necessidade de ser de material PPR. A Tabela 4.7 mostra o quantitativo referente a estas tubulações e conexões externas adicionais de PVC.

Tabela 4.7 – Quantitativo de tubulação adicional externa.

Item	Quantidade
Tubulação (32mm) (m)	10,09
Tubulação (25mm) (m)	112,45
Tê (32mm)	3
Tê (25mm)	36
Joelho (32mm)	3
Joelho (25mm)	18
Bucha de redução 32/25 mm	4

O orçamento detalhado dos materiais com as três opções de fornecedores encontra-se no Apêndice I. A Tabela 4.8 resume o quantitativo de materiais para a instalação do sistema de recirculação proposto para todo edifício com os respectivos custos unitários dos materiais. O custo total com materiais para todo o edifício foi de R\$ 6.962,72.

Tabela 4.8 – Quantitativo para instalação do sistema de recirculação proposto para o Edifício Palmas Central.

Item	Quantidade	Custo unitário (R\$)	Custo total (R\$)
Tubulação PPR (25mm) (m)	2,29	10,80	24,77
Tê PPR (25mm)	8	3,20	25,60

Tabela 4.8 – Quantitativo para instalação do sistema de recirculação proposto para o Edifício Palmas Central (continuação).

Item	Quantidade	Custo unitário (R\$)	Custo total (R\$)
Joelho PPR (25mm)	- 2	1,90	- 3,80
Curva PPR (25mm)	- 10	9,90	- 99,00
Tubulação PVC (32mm) (m)	10,09	9,13	92,17
Tubulação PVC (25mm) (m)	112,45	4,00	449,78
Tê PVC (32mm)	3	2,10	6,30
Tê PVC (25mm)	36	1,10	39,60
Joelho PVC (32mm)	3	2,50	7,50
Joelho PVC (25mm)	18	0,75	13,50
Bucha de redução 32/25 mm	4	1,00	4,00
Válvula solenoide	20	41,54	830,80
Microcontrolador Arduino	80	33,50	2.680,00
Resistor 1kΩ	200	0,03	6,00
Botões de acionamento	100	0,12	12,00
Lâmpada LED	100	0,43	43,00
Módulos relê	20	9,23	184,60
Fonte 9V	80	19,90	1.592,00
Fonte 12V	20	10,67	213,40
Fiação (m)	20	0,22	4,49
Receptor radiofrequência	20	10,30	206,00
Transmissor radiofrequência	60	10,30	618,00
Capacitor 100µF 25V	80	0,15	12,00
Total			6.962,72

O custo com mão de obra foi estimado conforme o custo considerado para instalação do sistema de recirculação individual. Para as tubulações e conexões foi estimado um custo por metro de tubulação. Portanto, o custo inicial total para a instalação do sistema de recirculação proposto em todo o Edifício Palmas Central foi de R\$ 18.887,57. Para a análise adicional substituindo a transmissão por radiofrequência por uma transmissão por meio de fios o custo inicial total para a instalação do sistema de recirculação para todo o Edifício Palmas Central reduziu para R\$ 14.618,35.

4.5.2. Custos com operação e manutenção

A tarifa cobrada pela CELESC é composta pelo custo do quilowatt-hora, imposto (ICMS) e tributos, como o Programa de Integração Social (PIS) e Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social (COFINS). O custo do quilowatt-hora do subgrupo B1 (Classificação Residencial Normal) vigente no período de 22 de agosto de 2020 a 21 de agosto de 2021 era de R\$0,51. A Tabela 4.9 ilustra os valores dos últimos reajustes praticados e disponibilizados pela CELESC de 2013 a 2020. A mediana dos valores de reajustes é de 7,15% ao ano. Este foi o valor de reajuste utilizado para os anos futuros da análise econômica.

Tabela 4.9 – Reajustes aplicados nos valores de tarifa cobrados pela CELESC (2013-2020).

Ano	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Reajuste (%)	-8,01	22,45	25,71	-2,91	6,59	13,19	-9,74	7,71

Fonte: CELESC (2020).

A incidência de ICMS na tarifa varia conforme a faixa de consumo. Para um consumo de até 150 kWh, incide ICMS de 12%. Para consumo acima de 150 kWh, incide ICMS de 25%. Para o estudo de caso será considerada a incidência de 12% de ICMS. As contribuições PIS e COFINS variam seus valores de mês a mês. Para a análise econômica será considerada a mediana dos valores encontrados entre 01/2019 e 04/2021, de 0,89% para o PIS e 4,11% para a COFINS. A Tabela 4.10 ilustra o custo

do quilowatt-hora, considerando os impostos e tributos, para cada ano da análise econômica.

Tabela 4.10 – Custo do quilowatt-hora para cada ano da análise econômica.

Ano da análise econômica	Custo do quilowatt-hora (R\$/kWh)
1	0,63
2	0,65
3	0,70
4	0,75
5	0,80
6	0,86
7	0,92
8	0,99
9	1,06
10	1,13

A Tabela 4.11 ilustra os custos semestrais orçados com manutenção para os sistemas em todos os apartamentos do Edifício Palmas Central. O custo semestral com manutenção considerado para a análise econômica para ambos os sistemas de recirculação, portanto, foi de R\$160,00 por residência. Para os anos seguintes das análises econômicas foi acrescido ao custo de manutenção o valor do Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA), considerado a inflação oficial do país, acumulada em doze meses até abril de 2021 de 6,8%/ano.

Tabela 4.11 – Custo semestral com manutenção.

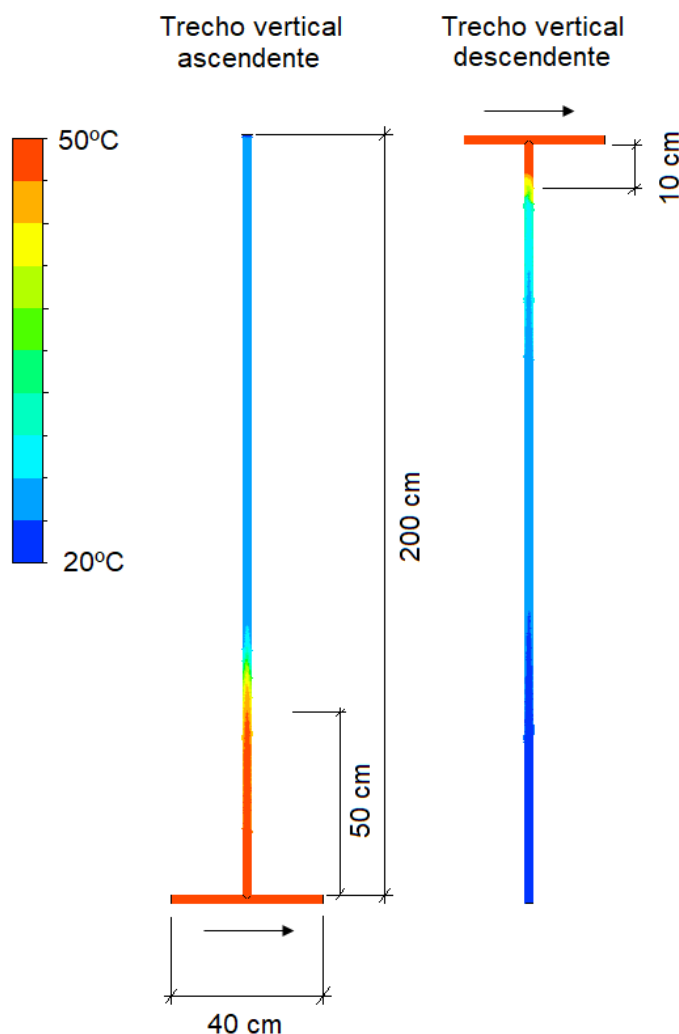
Empresa	Custo (R\$)
1	250,00
2	250,00
3	160,00

4.5.2.1. Sistema de recirculação individual

O consumo energético do painel de comando do sistema de recirculação individual foi estimado por meio da voltagem da bateria utilizada para alimentar o sistema. O painel utiliza uma bateria recarregável de lítio do modelo LIR2450. Conforme o manual do fabricante, a capacidade de carga típica da bateria é 120 mAh, a corrente de carregamento é de 50 mA e a tensão elétrica para carregamento é de 4,2 V. Portanto a energia consumida pelo painel é de, aproximadamente, 10 Wh.

Para verificar o tempo de funcionamento da bomba para garantir recirculação da água quente por todos os pontos de consumo foi utilizado o *software* Ansys Fluent. Por se tratar de uma versão estudantil, não foi possível modelar toda a instalação hidráulica de cada modelo arquitetônico. Deste modo, optou-se por simular, em regime transiente, o fluxo de água quente com temperatura de 50°C por uma tubulação horizontal conectada, por meio de um tê, a uma tubulação vertical preenchida com água na temperatura de 20°C. Esta configuração pretendeu simular um projeto hidráulico do tipo tronco e ramal. A tubulação horizontal de 40 cm é um trecho do ramal principal que está conectado à tubulação de retorno e a tubulação vertical de 200 cm é o trecho da instalação que conecta o ramal principal a um ponto de consumo. Verificou-se que quando o trecho vertical possui fluxo de água no sentido ascendente, a recirculação de água quente pelo ramal principal durante uma hora, proporcionou aumento na temperatura da água da tubulação vertical para 40°C apenas nos primeiros 50 cm de tubulação. Quando as mesmas condições foram simuladas para um trecho vertical com fluxo da água no sentido descendente, verificou-se que apenas os primeiros 10 cm do trecho vertical possuíam água na temperatura de 40°C. A Figura 4.18 ilustra as duas simulações realizadas.

Figura 4.18 – Temperatura da água de um trecho vertical conectado a um trecho horizontal com fluxo de água quente.



Portanto, recircular a água do ramal principal com intuito de aumentar a temperatura da água do interior de todos os sub-ramais da tubulação de distribuição de água quente se mostrou inviável. Para estimar o tempo de funcionamento da bomba foi utilizado o tempo necessário para a bomba recircular por uma vez o volume de água contido no ramal principal de cada modelo arquitetônico.

A bomba recirculadora de 147 W de potência possui vazão máxima de 57 litros/minuto. Portanto, a bomba teve funcionamento para o modelo arquitetônico 1, 2 e 3 de, respectivamente, 5, 3 e 4 minutos para cada período do acionamento (matutino e noturno). A Tabela 4.12 ilustra qual é o consumo energético para o funcionamento do

sistema de recirculação individual para cada mês do ano por modelo arquitetônico do condomínio Palmas Central.

Tabela 4.12 – Consumo energético do sistema de recirculação individual por apartamento.

Mês da análise econômica	Consumo energético (kWh)		
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Janeiro	8,03	7,80	7,94
Fevereiro	7,26	7,05	7,18
Março	8,03	7,80	7,94
Abril	7,77	7,55	7,69
Maio	8,03	7,80	7,94
Junho	7,77	7,55	7,69
Julho	8,03	7,80	7,94
Agosto	8,03	7,80	7,94
Setembro	7,77	7,55	7,69
Outubro	8,03	7,80	7,94
Novembro	7,77	7,55	7,69
Dezembro	8,03	7,80	7,94

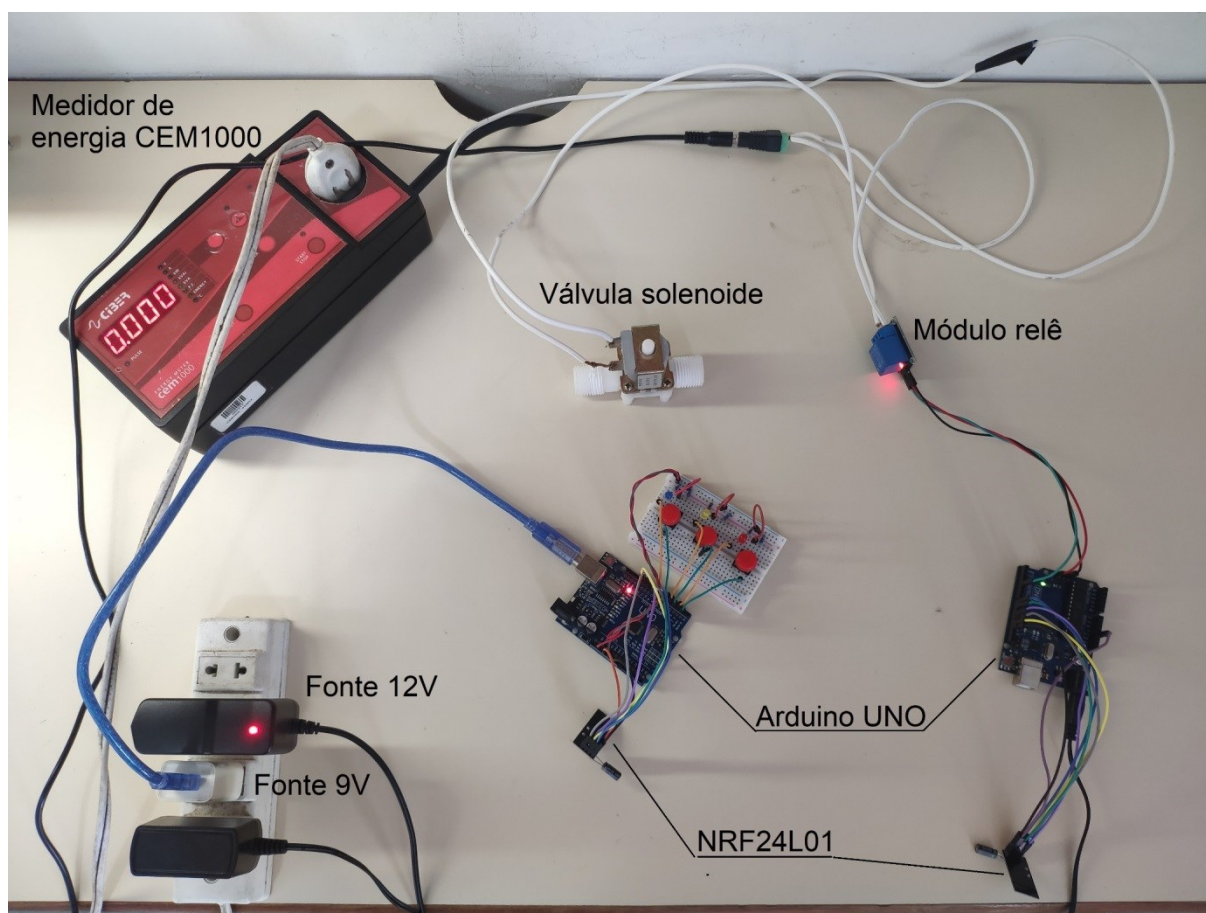
Por meio da Equação 5 obteve-se o custo mensal com operação do sistema de recirculação individual para uma unidade habitacional. O somatório dos valores encontrados por meio desta equação para cada modelo arquitetônico do edifício foi o custo global com energia elétrica que o condomínio teve com o sistema de recirculação. O Apêndice J apresenta o custo com energia elétrica para o condomínio para cada mês dos dez anos da análise econômica.

4.5.2.2. Sistema de recirculação proposto

A Figura 4.19 ilustra o protótipo de bancada utilizado para verificar o consumo energético do sistema proposto. A potência ativa do protótipo funcionando com a

recirculação operando foi de 0,079 kW. A medição do consumo do protótipo no modo de espera, sem a recirculação, não teve variação do consumo durante o período de 8h.

Figura 4.19 – Instalação eletrônica para verificação do consumo energético do protótipo.



De acordo com o último relatório de consumo mensal de energia elétrica por classe publicado pela EPE, a média de consumo de energia mensal nos últimos doze meses nas residências de Santa Catarina foi de 215,94 kWh (EPE, 2021). Com os dados obtidos no experimento, o consumo energético mensal do sistema proposto varia de 0,03 a 0,11 kWh, ou seja, aproximadamente, 0,05% do consumo energético mensal de uma residência. Portanto, optou-se por desprezar os custos energéticos da operação do sistema automatizado proposto.

4.5.3. Economia de água

No ano de 2020 a estrutura tarifária da CASAN sofreu uma modificação no modo de cobrança das faturas. O modelo antigo fazia a cobrança apenas por meio de faixas de consumo com valores progressivos conforme o volume de água consumido. No modelo atual prevalece a cobrança por faixas, entretanto, foi adicionada uma Taxa Fixa de Disponibilidade de Infraestrutura (TFDI) no valor de R\$29,49, cobrada mensalmente. Portanto, a cobrança desta taxa independe de haver consumo na unidade habitacional. A Tabela 4.13 ilustra os valores considerados para a atual estrutura tarifária, que foram os valores utilizados para os meses do primeiro ano da análise econômica.

Tabela 4.13 – Nova estrutura tarifária da CASAN.

Faixa	Volume de água consumido (m³)	Valor (R\$/m³)
1	1 a 10	1,96
2	11 a 25	9,11
3	26 a 50	12,18
4	51 a 999999	15,32

Fonte: CASAN (2020).

A Tabela 4.14 ilustra os valores dos últimos reajustes da tarifa de água praticados e disponibilizados pela CASAN de 2013 a 2019. A mediana dos valores de reajuste é de 6,8%/ano. Este foi o valor de reajuste utilizado para os anos futuros da análise econômica.

Tabela 4.14 – Reajustes aplicados nos valores de tarifa cobrados pela CASAN (2013-2019).

Ano	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Reajuste (%)	6,82	7,15	11,94	10,81	6,08	4,39	2,61

A Tabela 4.15 ilustra o valor da TFDI e das tarifas de água que seriam cobradas mensalmente para cada ano da análise econômica considerando-se o reajuste de 6,8%/ano.

Tabela 4.15 – TFDI e tarifa de água para cada ano da análise econômica.

Ano da análise econômica	TFDI (R\$)	Faixa (R\$/m ³)			
		1	2	3	4
1	29,49	1,96	9,11	12,18	15,32
2	31,50	2,09	9,73	13,01	16,36
3	33,65	2,24	10,39	13,89	17,47
4	35,94	2,39	11,10	14,84	18,66
5	38,40	2,55	11,85	15,85	19,93
6	41,01	2,72	12,66	16,92	21,29
7	43,81	2,91	13,52	18,07	22,73
8	46,80	3,11	14,44	19,30	24,28
9	49,99	3,32	15,42	20,62	25,93
10	53,40	3,54	16,47	22,02	27,69

O edifício multifamiliar Palmas Central é composto por dezoito apartamentos com dois dormitórios com áreas inferiores a 12 m² e dois apartamentos com três dormitórios (dois com áreas inferiores a 12 m² e um com área superior a 12 m²). Para o cálculo da população consideram-se duas pessoas por dormitório com até 12 m² e três pessoas por dormitório com mais de 12 m² (FLORIANÓPOLIS, 2000). Portanto, a população estimada para o edifício é de 86 pessoas.

Na Tabela 2.1 da seção 2.1 verifica-se que o consumo de água per capita em Florianópolis variou de 172,2 litros/hab./dia no ano de 2015 a 209,9 litros/hab./dia no ano de 2010. Portanto, 200 litros/pessoa/dia é um valor razoável para a estimativa do

consumo de água do edifício. Logo, o volume total estimado de consumo de água diário no Edifício Palmas Central é de 17,2 m³.

O potencial de economia de água por meio dos sistemas de recirculação foi estimado separadamente para os três modelos de *layout* arquitetônico. A Tabela 4.16 resume para cada um dos três modelos de *layout* hidráulico do projeto original o volume de água contido no interior do trecho da tubulação entre o aquecedor e os pontos de consumo de água quente dos apartamentos. As duas últimas linhas da Tabela 4.16 representam os volumes específicos de água fria economizados por meio das torneiras e chuveiros, calculados por meio da Equação 6, para o cenário 1 ($i=1,0$).

Tabela 4.16 – Volume de água no trecho de tubulação entre o aquecedor e os pontos de consumo.

Trecho de tubulação	Volume de água (litros)		
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Aquecedor – Torneira 1	0,87	0,86	1,16
Aquecedor – Torneira 2	3,70	1,92	2,61
Aquecedor – Torneira 3	4,35	1,98	4,02
Aquecedor – Chuveiro 1	3,21	1,43	1,86
Aquecedor – Chuveiro 2	3,86	1,49	3,06
Aquecedor – Torneira (média)	2,97	1,59	2,59
Aquecedor – Chuveiro (média)	3,54	1,46	2,46

A Tabela 4.17 ilustra o volume de água que seria economizado por aparelho sanitário considerando-se os três cenários de economia de água. Observa-se que os valores de economia estão condizentes com os volumes de água desperdiçada encontrados nas medições *in loco* da seção 4.2.

Tabela 4.17 – Volume de água economizado por aparelho sanitário.

Cenário de economia	Modelo	Economia de água (litros)	
		Torneira	Chuveiro
1	1	2,97	3,54
	2	1,59	1,46
	3	2,59	2,46
2	1	3,71	4,42
	2	1,98	1,83
	3	3,24	3,07
3	1	4,46	5,30
	2	2,38	2,19
	3	3,89	3,69

Considerando-se a frequência de 2,6 usos de torneira com água quente por pessoa por dia, a frequência de um banho por pessoa por dia e a população de cada apartamento (Modelo 1 = 4, Modelo 2 = 4, Modelo 3 = 7), foi possível obter o potencial de economia de água para os três cenários e para cada modelo de *layout* arquitetônico. A Tabela 4.18 ilustra o potencial de economia diário de água para os três cenários de economia e para os três modelos de *layout* arquitetônico. A Tabela 4.18 também ilustra o potencial de economia de água diário para todo o edifício conforme o cenário de economia.

Tabela 4.18 – Potencial de economia diário de água para os três cenários de economia.

Modelo de <i>layout</i>	Potencial de economia diário de água (litros)		
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
1	11,26	14,08	16,89
2	5,59	6,98	8,38
3	9,20	11,50	13,80
Edifício Palmas Central	803,51	1004,39	1205,27

O Apêndice K apresenta a economia financeira proporcionada pela economia diária de água para os três cenários de potencial de economia de água ao longo dos dez anos do horizonte de análise econômica.

4.5.4. Indicadores econômicos

A Tabela 4.19 resume os resultados encontrados para os três indicadores econômicos para cada cenário de potencial de economia de água para os diferentes sistemas de recirculação analisados.

Tabela 4.19 – Indicadores da análise econômica.

Análise	Sistema	Potencial de economia de água	VPL (R\$)	TIR (% por mês)	Payback descontado (meses)
1	Recirculação individual	1	- 69.205,24	N/A	N/A
2		2	- 50.806,58	- 4,8	N/A
3		3	- 34.460,84	- 1,0	N/A
4	Recirculação proposto - Radiofrequência	1	- 13.740,29	N/A	N/A
5		2	4.658,38	0,7	96,7
6		3	21.004,11	1,8	60,6
7	Recirculação proposto - Fios	1	- 9.471,07	N/A	N/A
8		2	8.927,59	1,2	73,8
9		3	25.273,33	2,42	48,2

Da análise dos resultados da Tabela 4.19 é possível concluir que:

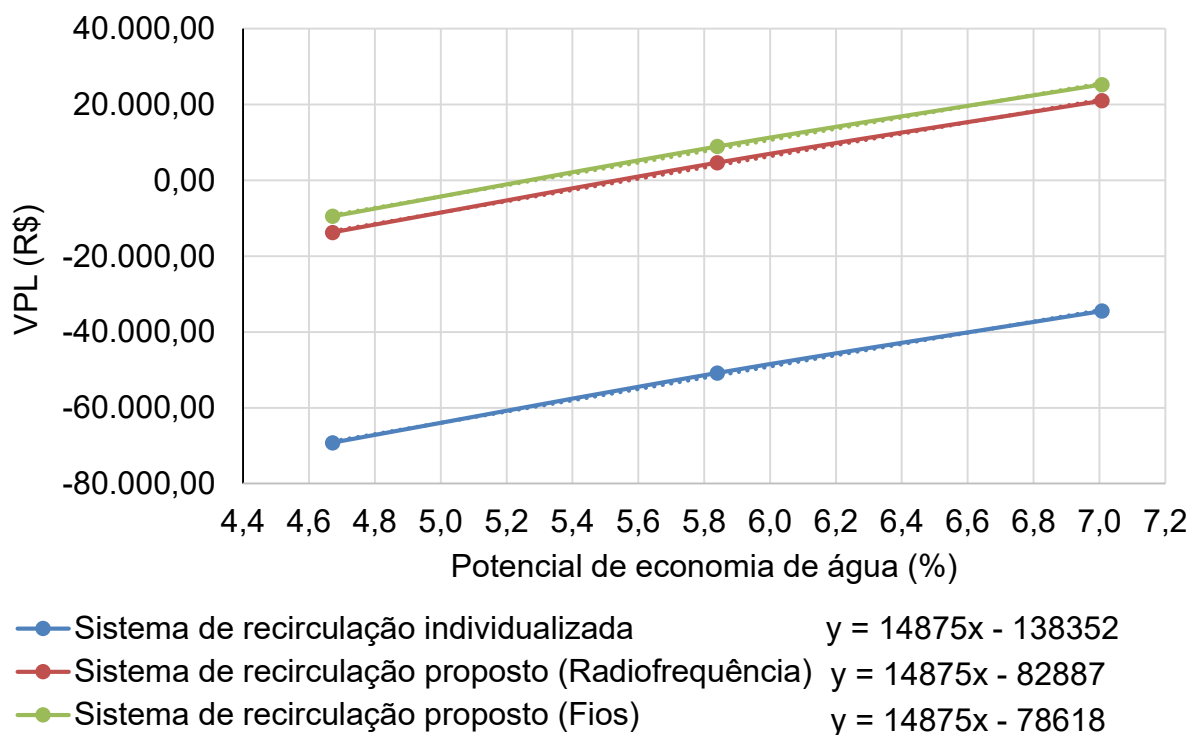
- Os sistemas de recirculação individual possuem custos iniciais elevados. Os aparelhos são caros e a manutenção periódica sugerida de 6 meses ocasiona ônus ao longo do horizonte de tempo analisado. Para o condomínio analisado, a instalação de um sistema de recirculação individual não acarreta em

economia financeira, ou seja, seria exclusivamente para melhorar o conforto na utilização dos pontos de consumo de água quente;

- O resultado da TIR é apenas encontrado pelas planilhas Excel se o valor convergir em 20 iterações. O valor da TIR não é encontrado quando a análise econômica não converge para um valor positivo de VPL, ou seja, as entradas negativas são maiores que as entradas positivas no fluxo de caixa. Conseqüentemente, o valor do *payback* também não será encontrado;
- Se o sistema de recirculação for do modo proposto por radiofrequência, o investimento só será viável caso o potencial de economia de água seja igual ou superior ao avaliado para o cenário 2. Para os cenários 2 e 3 o sistema proposto é viável, pois o VPL é maior que zero e a TIR é maior que a TMA. O sistema de recirculação proposto por meio de radiofrequência considerando o cenário 2 possui retorno do investimento após oito anos e para o cenário 3, após cinco anos;
- Observa-se que para o sistema ser no modo de radiofrequência necessita um maior número de microcontroladores e sensores de radiofrequência. Esta condição eleva o custo inicial do investimento. Ao substituir o modo de transmissão de radiofrequência por fios, observa-se retorno do investimento em menos tempo e VPL e TIR maiores, indicando que o investimento é mais viável;

Os potenciais de economia de água dos cenários 1, 2 e 3 correspondem a, respectivamente, 4,7, 5,8 e 7,0% do consumo total de água diário estimado para o condomínio Palmas Central, que é de 17,2 m³. Analisando-se o comportamento do VPL em função do potencial de economia dos sistemas de recirculação foi possível obter o mínimo potencial que os sistemas devem economizar de água nos acionamentos da recirculação de modo que o VPL seja positivo, conforme ilustra a Figura 4.20.

Figura 4.20 – Relação entre VPL e potencial de economia de água.



O mínimo potencial de economia de água para que os sistemas de recirculação individual, recirculação proposto (Radiofrequência) e recirculação proposto (fios) tenham VPL maior que zero é de, respectivamente, 9,3, 5,6 e 5,3%.

O cálculo da população para o modelo arquitetônico 3 resultou em sete pessoas por apartamento. Dificilmente uma residência de três quartos de uma edificação multifamiliar terá sete moradores. Uma população maior no apartamento não necessariamente indica maior potencial de economia de água pelo sistema. Quanto mais pessoas em uma unidade habitacional, maior a chance de os usos de água quente serem feitos em sequência. Portanto, dificilmente o potencial de economia com o sistema de recirculação individual atingiria 9,3%.

Observa-se que o custo de manutenção preventiva dos sistemas com periodicidade de seis meses representa 58,59% das despesas com o sistema ao longo dos dez anos do horizonte de análise, conforme mostra a Figura 4.21. Portanto, por maior que seja o potencial de economia proporcionado pelo sistema, o montante do retorno obtido com economia de água dificilmente supera as despesas com manutenção. Alterando-se a manutenção para uma periodicidade de um ano, a porcentagem relativa da

despesa ainda é a predominante, com 40,43%, conforme mostra a Figura 4.22. Uma possível redução nas despesas seria o ganho com escala na aquisição de materiais, principalmente dos painéis de comando Smartsart, que representam 22,43% das despesas totais.

Figura 4.21 – Despesas do sistema de recirculação individual (manutenção a cada seis meses).

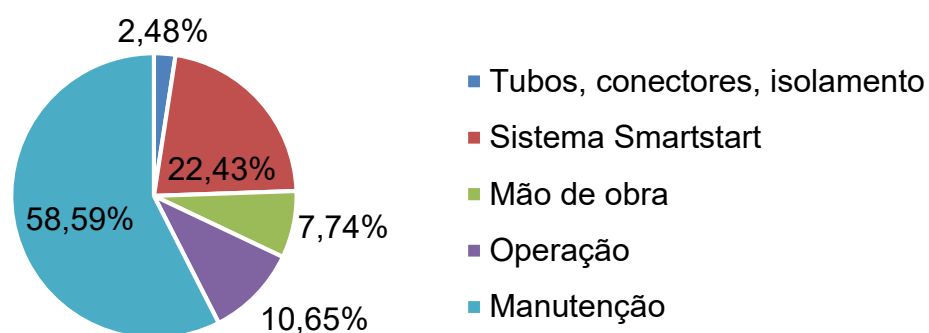
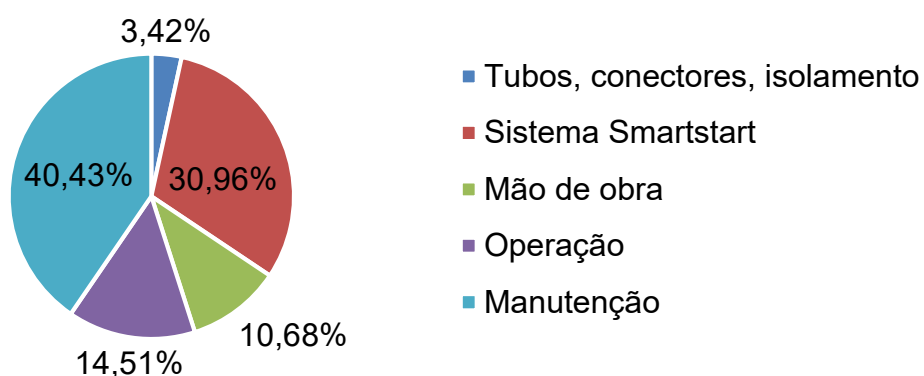


Figura 4.22 – Despesas do sistema de recirculação individual (manutenção a cada doze meses).



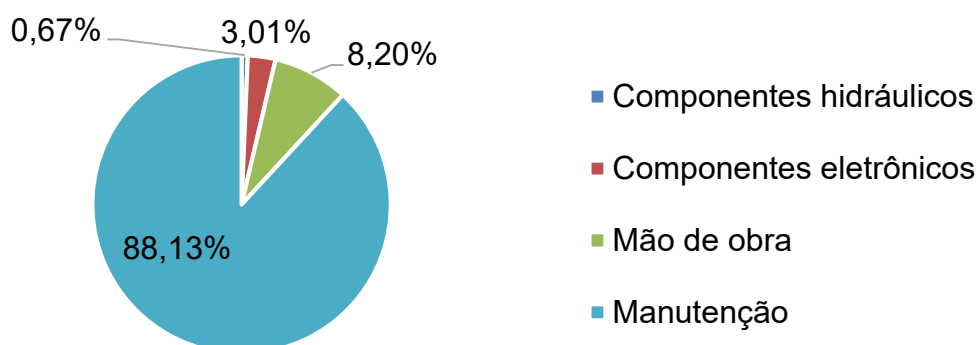
Portanto, de acordo com o estudo de caso, os sistemas recirculadores individuais são concebidos exclusivamente para sanar o problema da própria tecnologia em não fornecer água quente de modo imediato nos pontos de consumo, e não como alternativa para economia de água do ponto de vista econômico.

Deste modo, optar por investimentos como, por exemplo, sistemas de coleta e captação de águas pluviais como alternativa de economia de água pode trazer maiores benefícios não apenas ambientais, como econômicos. Ioris, Ghisi e Ramos

(2020) em uma avaliação do potencial de economia de água potável por meio do aproveitamento de água pluvial em um condomínio com dezessete apartamentos encontraram para um custo inicial de R\$ 6.407,00 um VPL de R\$ 43.301,46 e *payback* de 34 meses para uma análise econômica de vinte anos. Freitas e Ghisi (2020), para uma análise econômica de um sistema de aproveitamento de águas pluviais para uma residência unifamiliar, considerando um período de vinte anos, também encontraram resultados viáveis economicamente. No estudo de caso, os autores verificaram VPL de R\$ 1.451,00, TIR de 9,1% por mês e *payback* superior a 177 meses.

Para os sistemas de recirculação proposto, o custo de manutenção também é o custo predominante nas despesas com o sistema. Portanto, há a necessidade de avaliar se o sistema necessita de manutenção tão frequente quanto de sistemas de recirculação individual, pois estes custos impactam fortemente no resultado final da análise econômica. A Figura 4.23 mostra a porcentagem relativa a cada despesa para o sistema de recirculação proposto por meio de fios.

Figura 4.23 – Despesas do sistema de recirculação proposto (manutenção a cada seis meses).



Alterando-se a periodicidade de manutenção do sistema automatizado proposto para um ano, o sistema automatizado operado por meio de fios com potencial de economia de água de 7% possui VPL de R\$ 62.040,49, TIR de 4,6% por mês e o investimento seria recuperado após 25 meses. Por último, extrapolando a análise do sistema de recirculação proposto por meio de fios para um horizonte de vinte anos, considerando manutenções periódicas semestrais, o VPL para 240 meses seria de R\$ 80.784,03, superior ao encontrado para sistemas de aproveitamento de águas pluviais.

5. Conclusões

Por meio deste trabalho foi possível validar o funcionamento de um sistema automatizado que reduz o desperdício de água fria em sistemas prediais de água quente e verificar a viabilidade econômica de sua implementação em um edifício estudo de caso.

Algumas etapas serviram de complemento para alcançar os resultados da viabilidade econômica. Para a realização da viabilidade econômica no edifício estudo de caso foi necessário obter dados para estimar o potencial de economia de água. Esta estimativa foi obtida por meio das medições *in loco*.

Verificou-se que para que haja variação positiva no valor da temperatura da água que sai dos aparelhos sanitários, em média, ocorre um desperdício de 4,2 litros. Este desperdício, na maioria dos casos analisados, foi identificado em torneiras próximas ao aquecedor de água das unidades. Portanto, desperdícios maiores são encontrados em pontos de consumo mais afastados, como por exemplo, torneiras e chuveiros, principalmente das suítes das edificações multifamiliares. Isto foi verificado na medição realizada no apartamento 8. Para a água quente atingir a torneira do banheiro comum do apartamento, aproximadamente 7,2 litros de água fria são desperdiçados. Conclui-se também que para que a água saia dos aparelhos sanitários com temperatura de consumo confortável aos usuários, maiores desperdícios serão verificados. Quanto menor a vazão com que se pretende fazer o consumo de água quente, mais demorado é para a água quente atingir os pontos de consumo. Baixas vazões encaminham a água quente para a parte superior da tubulação que está preenchida com água fria. Isto faz com que haja intensa troca de calor e, portanto, maior desperdício é verificado até a água sair pelo aparelho sanitário com a temperatura desejada.

As medições de temperatura da água foram obtidas por meio de sensores de temperatura à prova d'água do tipo DS18B20. Identificar a variação da temperatura de um fluido em movimento é uma tarefa difícil. Como foi verificado na tentativa de obtenção de um tempo de resposta destes sensores, a resposta nem sempre é constante e as medições de um mesmo fluido com diferentes sensores apresentaram precisões diferentes da notificada pelo fabricante. Deste modo optou-se por

considerar o ponto inicial da variação da temperatura como sendo a chegada do volume de água quente que vem da fonte de aquecimento.

Além da identificação do potencial de economia do sistema automatizado proposto, foi necessário estimar os custos envolvidos com a construção e instalação do sistema em uma edificação. Por meio de um protótipo foi possível verificar estes custos e validar o funcionamento dos componentes eletrônicos e do algoritmo do sistema. Nos testes realizados no protótipo a água fria foi encaminhada conforme o tempo estimado para liberação da água fria em cada ponto de consumo e verificou-se desperdício apenas do volume de água existente entre o registro de pressão do ponto de consumo e o ponto de saída da água.

Em um estudo de caso para um edifício multifamiliar foi possível conformar o sistema automatizado proposto em três diferentes *layouts* arquitetônicos, bem como integrar o sistema em toda a edificação, ou seja, dos pontos de coleta de água nas unidades habitacionais até o reservatório inferior. A análise econômica do sistema automatizado proposto foi feita de modo comparativo com um sistema de recirculação individual tradicional. Verificou-se que para o mesmo edifício estudo de caso, o custo inicial total da instalação do sistema proposto pode ser 76% menor que o custo inicial da instalação dos sistemas de recirculação individual empregados atualmente. Isto se deve pela redução nos custos com tubulações e, principalmente, nos custos do aparelho de recirculação que possui uma bomba para cada unidade habitacional do edifício. Por ser operado por meio de uma bomba, os sistemas de recirculação individual possuem custos de operação que devem ser considerados. O sistema automatizado proposto por ser concebido com componentes eletrônicos de baixo custo, baixo consumo energético e por ter o princípio de funcionamento encaminhando a água por gravidade, teve o custo de operação desprezado. Esta redução dos custos iniciais e de operação foi fundamental para considerar o investimento no sistema automatizado proposto mais viável que o sistema de recirculação individual.

As culturas de uso de água quente em relação às culturas de projeto dos sistemas prediais de água quente podem ser bastante distintas. Determinadas premissas basearam-se em dados de consumo estrangeiro. Portanto, a precisão dos resultados para a análise de determinada edificação em determinada localidade pode não estar

coerente com a aplicação do modelo. Para minimizar o efeito da variação de determinados parâmetros quando se trata da água quente, optou-se por realizar uma análise das faixas de potencial de economia em função do VPL. Deste modo, verificou-se que o mínimo potencial de economia de água para que os sistemas de recirculação individual, recirculação proposto (radiofrequência) e recirculação proposto (fios) tenham VPL maior que zero é de, respectivamente, 9,3, 5,6 e 5,3%.

Em ambos os sistemas é verificado um alto custo com manutenção periódica. Este foi o principal fator que impossibilitou a viabilidade de instalação do sistema automatizado proposto considerando o menor potencial de economia de água de 4,7%. O sistema de recirculação individual não se mostrou viável em nenhum dos casos avaliados. Portanto, estes sistemas são concebidos exclusivamente para sanar o problema da própria tecnologia em não fornecer água quente de modo imediato nos pontos de consumo, e não como alternativa para economia de água do ponto de vista econômico.

Alterando-se a periodicidade de manutenção para um ano, o sistema automatizado operado por meio de fios com potencial de economia de água de 7%, apresentaria VPL de R\$ 62.040,49, TIR de 4,7% por mês e o investimento seria recuperado após 25 meses.

Portanto, os sistemas de recirculação propostos com transmissão via radiofrequência ou fios, são economicamente viáveis e podem ser uma alternativa para a redução de desperdício de água no setor residencial. Os sistemas propostos também se mostraram com maior viabilidade econômica quando comparados aos sistemas de recirculação individual tradicionalmente empregados.

Por fim, conclui-se que o sistema automatizado proposto é bastante específico para cada edificação, dependendo de variáveis e fatores característicos da região onde o sistema será implementado. Despesas com mão de obra e manutenção devem ser cuidadosamente orçadas para que o investimento nestes sistemas não resulte em prejuízos. Os resultados desta pesquisa servem como guia para realização da análise econômica de sistemas de recirculação e elaboração do sistema automatizado proposto em edificações multifamiliares com diferentes *layouts* arquitetônico e estrutural.

5.1. Limitações

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho foram identificadas algumas limitações para sua elaboração:

- Os sensores de temperatura DS18B20 utilizados nas medições apresentam variações nos resultados medidos. A precisão indicada de fábrica não foi observada nos aparelhos. Registrar a temperatura da água que está em fluxo em um aparelho sanitário é dificultoso por conta do atraso do tempo de resposta destes sensores. Além disso, nas pesquisas de literatura não há uma metodologia muito clara para calibrar e verificar a precisão destes sensores de temperatura à prova d'água;
- Dificuldade em obter permissão para realizar as medidas *in loco* nos apartamentos que possuem aquecedores de passagem a gás, principalmente no período da pandemia de Covid-19;
- Nas medições *in loco* também houve dificuldade em conseguir identificar se o sistema constava ou não com isolamento térmico das tubulações. Esta característica pode influenciar no tempo que a água quente leva para atingir os pontos de consumo de uma residência;
- As medições *in loco* deveriam ser tomadas em diferentes períodos do ano para avaliar se as variações da temperatura ambiente ao longo do ano interferem na temperatura da água que está em repouso nas tubulações;
- Não foi possível avaliar a eficiência do funcionamento dos aquecedores de passagem dos apartamentos e se estavam operando com melhor rendimento possível, garantindo a saída de água assim que um aparelho sanitário fosse acionado. Optou-se por regular os aquecedores na condição máxima de temperatura de funcionamento;
- Não foi possível realizar o protótipo do sistema automatizado proposto com um aquecedor de passagem a gás. As temperaturas nas medições ficaram limitadas à capacidade da torneira elétrica;
- No período da construção do protótipo, que coincidiu com o início da pandemia de Covid-19, ocorreram dificuldades na obtenção dos materiais;

- Dificuldade em encontrar mão de obra especializada na instalação de sistemas de recirculação em aquecedores de passagem para realizar os orçamentos da análise econômica;
- Dificuldade de orçar e encontrar os materiais componentes do sistema de recirculação individual em estabelecimentos locais;
- O custo de instalação e mão de obra do sistema automatizado foi considerado igual ao custo de um sistema de recirculação individual. Houve dificuldade em encontrar um profissional para colaborar com o estudo da configuração do sistema e fornecimento de um orçamento mais condizente;
- Falta de recursos e tempo para avaliar corretamente a vida útil do sistema automatizado proposto instalado em um projeto piloto;
- Escassez na literatura de dados de frequência e volume de água quente consumido nas edificações residenciais;
- Uma validação completa do sistema de recirculação proposto envolve a identificação da qualidade da água após a recirculação. Por exemplo, em outros países as normas são mais claras quanto o crescimento de bactérias do tipo *Legionella* em sistemas prediais de água quente. Ao se conectar o sistema de água quente a um reservatório para uso posterior é de extrema importância controlar a temperatura que a água está sendo direcionada para o reservatório inferior. Não foi possível construir um projeto piloto para poder avaliar os quesitos da qualidade química da água.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Ainda há poucas pesquisas voltadas para quantificar e evitar o desperdício de água fria decorrente da utilização de água quente por meio dos aparelhos sanitários. Uma maior quantidade de informações e dados é de grande importância para a obtenção de conclusões mais aprofundadas. Deste modo, seguem sugestões para continuidade deste trabalho e para trabalhos futuros que envolvem economia de água fria em sistemas prediais de água quente:

- Desenvolver uma metodologia mais eficaz de medição *in loco* de temperatura de um fluido em movimento com utilização de sensores de temperatura à prova d'água mais precisos;
- Realizar medições de desperdício de água fria no consumo de água quente em unidades de diferentes pavimentos de uma mesma edificação multifamiliar para verificar a influência da pressão da água em sistemas com fornecimento e distribuição de água por gravidade;
- Realizar um estudo semelhante ao de Hiller (2005), entretanto, avaliando tubulações de material PVC e PPR, com e sem isolamento;
- Conduzir uma pesquisa para avaliar a consideração da perda de carga por aparelhos de aquecimento a gás na fase de projeto dos sistemas de distribuição de água quente em edifícios multifamiliares. Foram verificadas nas medições *in loco* vazões baixas nos pontos de consumo de água quente, principalmente, quando dois ou mais pontos são utilizados simultaneamente;
- Avaliar a possibilidade de redução dos custos com equipamentos do sistema de recirculação proposto neste trabalho;
- Elaborar um sistema automatizado semelhante ao deste trabalho para edificações unifamiliares;
- Realizar uma análise econômica considerando a instalação de um reservatório próprio para o sistema proposto neste trabalho integrando com sistemas de utilização de água de reuso;
- O sistema tem uma baixa aplicabilidade para a maior parte do Brasil, localizada em regiões tropicais. Verificar a viabilidade da proposta em mercados com maior difusão de sistemas de aquecimento de água na maioria dos pontos de consumo de água internos das edificações.

REFERÊNCIAS

- ABAGAS - Associação Brasileira de Aquecimento a Gás. **Dados do setor**. 2016. Disponível em: <<http://www.abagas.com.br/#mercadoDados>> acesso em: 02 jun. 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5626**: Instalação predial de água fria. Rio de Janeiro, 1998. 41 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15813-1**: Sistemas de tubulações plásticas para instalações prediais de água quente e fria Parte 1: Tubos de polipropileno copolímero random PP-R e PP-RCT: Requisitos. Rio de Janeiro, 2018. 33 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5626**: Sistemas prediais de água fria e água quente: Projeto, execução, operação e manutenção. Rio de Janeiro, 2020a. 56 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13103**: Instalação de aparelhos a gás: Requisitos. Rio de Janeiro, 2020b. 67 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15569**: Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto: Requisitos de projeto e instalação. Rio de Janeiro, 2020c. 52 p.
- ALLY, M. R.; TOMLINSON, J. J. **Water and Energy Savings using Demand Hot Water Recirculating Systems in Residential Homes: A Case Study of Five Homes in Palo Alto, California**, Oak Ridge National Laboratory (ORNL), 2002. Disponível em: <http://www.osti.gov/bridge>. Acesso em: 23 mar. 2021.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Tarifa residencial**. Comparativo da tarifa residencial (R\$/MWh) com IPCA e IGP-M. 2021. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiOTY0NWQzOGItMmQ3ZS00MWUzLTllNmMtNTA5NTYxODdhYTtkzliwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOiR9&>. Acesso em: 02 maio 2021.

- BARRETO, D. Perfil do consumo residencial e usos finais da água. **Ambiente Construído**, v. 8, n. 2, p. 23-40, 2008.
- BEAL, C. D.; STEWART, R. A. **South East Queensland Residential End Use Study: Final Report**. Urban Water Security Research Alliance Technical Report nº 47, 2011.
- BERTRAND, A.; MASTRUCCI, A.; SCHULER, N.; AGGOUNE, R.; MARECHAL, F. Characterisation of domestic hot water end-uses for integrated urban thermal energy assessment and optimization. **Applied Energy**, v.186, p.152-66, 2017.
- BIANCO, V.; MARCHITTO, A.; SCARPA, F.; TAGLIAFICO, L. A. Heat pumps for buildings heating: Energy, environmental, and economic issues. **Energy and Environment**, v. 31, p. 116-129, 2018.
- BOAIT, P. J.; DIXON, D.; FAN, D.; STAFFORD, A. Production efficiency of hot water for domestic use. **Energy and Buildings**, v. 54, p. 160-168, 2012.
- BOHAC, D.; SCHOENBAUER, B.; HEWETT, M.; LOBENSTEIN, M. S.; BUTCHER, T. **Actual Savings and Performance of Natural Gas Tankless Water Heaters**. Center of Energy and Environment, Minneapolis, 2010. Disponível em: <https://www.map-testing.com/assets/files/Minnesota%20Tankless%20WH%20study-2010.pdf>. Acesso em: 02 jun. 2021.
- BØHM, B. Production and distribution of domestic hot water in selected Danish apartment buildings and institutions: analysis of consumption, energy efficiency and the significance for energy design requirements of buildings. **Energy Conversion and Management**, v. 67, p. 152-159, 2013.
- BRASIL. **Acórdão Nº 2622/2013**. Órgão julgador: Plenário. Relator: Ministro-Substituto Marcos Bemquerer Costa. Brasília, 25 de setembro de 2013. Tribunal de Contas da União.
- BRASIL. **Lei nº 13.312, de 12 de julho de 2016**. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, para tornar obrigatória a medição individualizada do consumo hídrico nas novas edificações condominiais. Disponível em:

http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2016/lei/l13312.htm.

Acesso em: 05 mar. 2021.

BURCH, J., THORNTON, J. **A realistic hot water draw specification for rating solar water heaters**. World Renewable Energy Forum, Denver, Colorado, 2012.

CASAN - Companhia Catarinense de Águas e Saneamento. **Nova estrutura tarifária**. 2020. Disponível em: <https://www.casan.com.br/noticia/index/url/nova-estrutura-tarifaria#0>. Acesso em: 24 mar. 2021.

CASTELO NETO, J. M. **Curso gestão contábil de condomínios**. Conselho Regional de Contabilidade do Estado do Ceará – CRC – CE. 2008. Disponível em: https://www.crc-ce.org.br/crcnovo/download/apostila_contabilidade_para_condominios_castelo.pdf. Acesso em: 16 jul. 2021.

CELESC - Centrais Elétricas de Santa Catarina. **Reajuste de tarifa elétrica**. 2020. Disponível em: <https://www.celesc.com.br/listagem-noticias/tarifa-da-celesc-e-reajustada-pela-aneel-em-media-8-14-passando-a-vigorar-a-partir-de-22-de-agosto>. Acesso em: 26 mar. 2021.

CHAGURI JUNIOR, J. J. **Sistemas prediais de aquecimento de água a gás: parâmetros de dimensionamento e gerenciamento**. 2009. Dissertação (Mestrado em Energia) – Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

CHILIPEPPER. Chilipepper appliance. **Current Model: CP9000**. Disponível em: <https://chilipepperapp.com/index.php/how-it-works-2/>. Acesso em: 26 maio de 2021.

CIRRA - Centro Internacional de Referência em Reuso de Água. **Avaliação do consumo de insumos (água, energia elétrica e gás) em chuveiro elétrico, aquecedor a gás, chuveiro híbrido, aquecedor solar e aquecedor de acumulação elétrico**. 2009. Disponível em: <http://www.banhoeconomico.com.br/down/ci160409.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2021.

- CLARKE, A.; GRANT, N.; THORNTON, J. **Quantifying the energy and carbon effects of water saving**. Environment Agency and Energy Saving Trust. 2009. Disponível em: <https://www.waterwise.org.uk/knowledge-base/quantifying-the-energy-and-carbon-effects-of-water-saving-2009/>. Acesso em: 07 jun. de 2021.
- CONEJERO, M. C.; CALIA, R. C.; SAUAIA, A. C. A. Redes de inovação e a difusão da tecnologia solar no Brasil. **RAI Revista de Administração e Inovação**, v. 12, n. 2, p. 90-109. 2015.
- CSO - Central Statistical Office. **Energy Efficiency in Poland in years 2000–2010**. Varsóvia, 2012.
- DeOREO, W. B.; MAYER, P. W. **Residential End Uses of Water: Study Update**. Aquacraft, Inc. Water Engineering and Management. Denver, CO: AWWARF, 2014.
- DOCOL. **Chuveiro DOCOL Eden R200**. Disponível em: <https://www.docol.com.br/00887906-chuveiro-docol-eden-r200-p986813>. Acesso em: 04 maio 2021.
- DOE. **Buildings Energy Data Book**. United States Department of Energy, 2011. Disponível em: <https://openei.org/doe-opendata/dataset/buildings-energy-data-book>. Acesso em: 07 jun. 2021.
- EIA – U.S. Energy Information Administration. **Space heating and water heating account for nearly two thirds of U.S. home energy use**. Today in Energy. 07 de novembro de 2018. Disponível em: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=37433>. Acesso em: 01 maio 2021.
- EIA – U.S. Energy Information Administration. **Natural gas explained**. Use of natural gas. Disponível em: <https://www.eia.gov/energyexplained/natural-gas/use-of-natural-gas.php>. Acesso em: 01 maio 2021.

- ELETROBRAS - Centrais Elétricas Brasileiras S. A., PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. **Pesquisa de Posse de equipamentos e Hábitos de Uso** - Casse Residencial - Relatório Brasil. Rio de Janeiro, 2019.
- ELETROBRAS - Centrais Elétricas Brasileiras S. A. **Eficiência Energética e Geração Distribuída**: para os próximos 10 anos (2015-2024). Rio de Janeiro, 2016.
- EPA - U.S. Environmental Protection Agency. **Guide for Efficient Hot Water Delivery Systems**. 2014. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-01/documents/ws-homes-hot-water-distribution-guide.pdf>. Acesso em: 20 set. 2019.
- EPA - U.S. Environmental Protection Agency. **About WaterSense**. 2019. Disponível em: <https://www.epa.gov/watersense/about-watersense>. Acesso em: 20 set. 2019.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro**: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética. Nota técnica EPE 030/2018, p.43, 2018.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia (2030)**. Brasília, p. 447, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2030>. Acesso em: 30 abr. 2021.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Consumo Mensal de Energia Elétrica por Classe (regiões e subsistemas)**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Consumo-mensal-de-energia-eletrica-por-classe-regioes-e-subsistemas>. Acesso em: 05 maio 2021.
- EVANS, A. W.; HARTWICH, O. M. **Unaffordable Housing – Fables and Myths**. Policy exchange. Localis. ISBN 0-9547527-6-7. 2005.
- FAIREY, P.; PARKER, D. **A review of hot water draw profiles used in performance analysis of residential domestic hot water systems**. In: FSEC RR-56-04, Cocoa, FL: Florida Solar Energy Center, 2004.

FAN, Y.; ZHAO, X.; HAN, Z.; LI, J.; BADIEI, A.; AKHLAGHI, Y. G.; LIU, Z. Scientific and technological progress and future perspectives of the solar assisted heat pump (SAHP) system. **Energy**, v. 229, 120719. 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120719>.

FIDAR, A.; MEMON, F.; BUTLER, D. Environmental implications of water efficient microcomponents in residential buildings. **Science of the Total Environment**, v. 408, n. 23, p. 5828-5835, 2010.

FLORIANÓPOLIS. **Lei Complementar nº 60, de 28 de agosto de 2000**. Institui o código de obras e edificações de Florianópolis e dá outras providências. Capítulo XVI - INSTALAÇÕES EM GERAL, Seção I - INSTALAÇÕES HIDRÁULICAS. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/codigo-de-obras-florianopolis-sc>. Acesso em: 07 jun. 2021.

FORTLEV. **Coletor Ecobanho FORTLEV**. 2018. Disponível em: <https://www.fortlev.com.br/institucional/coletor-ecobanho-e-o-novo-lancamento-da-fortlev/>. Acesso em: 07 jun. 2021.

FREITAS, D. A.; GHISI, E. Economic feasibility analysis of rainwater harvesting: a case study in Imbituba, Brazil. **Urban Water Journal**, v. 17, n. 10, p. 905-911, 2020.

FRIJNS, J.; MULDER M.; ROORDA, J. Climate footprint and mitigation measures in the Dutch water sector. *In*: Smith J, Howe C, Henderson J, editors. **Climate change and water, international perspectives on mitigation and adaptation**. London and AWWA, Denver: IWA Publishing, p. 73–80, 2009.

FRIJNS, J.; HOFMAN J.; NEDERLOF, M. The potential of (waste)water as energy carrier. **Energy Conservation and Management**, v. 65, p. 357–363, 2013.

GASPAR. **Lei nº 1155 (1988)**. Institui o código de obras do município de Gaspar. Capítulo VI - DAS CONDIÇÕES GERAIS RELATIVAS ÀS EDIFICAÇÕES, Seção VIII - DOS RESERVATÓRIOS DE ÁGUA, Art. 149. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/codigo-de-obras-gaspar-sc>. Acesso em: 07 jun. 2021.

- GATO-TRINDAD, S.; JAYASURLYA, N.; ROBERTS, P. Understanding urban residential end uses of water. **Water Science & Technology**, v.64, p. 36-42, 2011.
- GEORGE D.; PEARRE, N.S.; SWAN, L.K. High resolution measured domestic hot water consumption of Canadian homes. **Energy and Buildings**, v.105, p. 304–315, 2015.
- GHISI, E.; FERREIRA, D. F. Potential for potable water savings by using rain water and greywater in a multi-storey residential building in southern Brazil. **Building and Environment**, v. 42, n. 7, p. 2512-2522, 2007.
- GHISI, E.; OLIVEIRA, S. M. de. Potential for potable water savings by combining the use of rainwater and greywater in houses in southern Brazil. **Building and Environment**, v. 42, n. 4, p. 1731-1742, 2007.
- GONÇALVES, O. M.; CHAGURI, J. J.; LANDI, F. D. N.; ILHA, M. S. O.; KAVASSAKI, Y.; HENRIQUES, A. M. J.; ISAAC, L. C. S. **Desenvolvimento de tecnologias de substituição de aquecimento de água**: programa de pesquisa e desenvolvimento tecnológico para o setor residencial. São Paulo, 1989.
- GU, L. **A simplified hot water distribution system model**. *In*: 10th International Building Performance Simulation Association conference and exhibition, set. 2007, Beijing, China. Disponível em: <http://www.fsec.ucf.edu/en/publications/pdf/FSEC-PF-429-07.pdf>. Acesso em: 07 jun. 2021.
- HEWITT, N. J.; HENDERSON, P. Drain Water Heat Recovery System – an Energy Conservation Project, **Northern Ireland Centre for Energy Research & Technology**, University of Ulster: Coleraine, Northern Ireland, UK, 2001.
- HILLER, C. C. **Hot Water Distribution System Research – Phase I Final Report**. California Energy Commission. Report No. CEC-500-2005-161, 2005.
- HILLER, C. C. **Hot water distribution system piping heat loss factors, both in air and buried – phase II Test results**. ASHRAE Transactions 114, n. 2, 2008a.

- HILLER, C. C. **Hot Water Distribution System Piping Time, Water, and Energy Waste-Phase II Test Results**. ASHRAE Transactions 114, n. 2, 2008b.
- HKEMSD - Hong Kong Electrical and Mechanical Services Department. **Hong Kong Energy End-use Data 2007**. Hong Kong: The Energy Efficiency Office. 2007.
- HOESCHELE, M. A.; SPRINGER, D. A. **Field and Laboratory Testing of Gas Tankless Water Heater Performance**. ASHRAE Transactions 114 n. 2, 2008.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa de Orçamentos Familiares (POF), 2008-2009 – Análise do consumo alimentar pessoal no Brasil**. Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/46/84498?ano=2008-2009>. Acesso em: 30 abr. 2021.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Industrial Anual - Produto**. Estatísticas. Econômicas. Indústria e Construção. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/industria/9044-pesquisa-industrial-anual-produto.html?edicao=27985&t=downloads>. Acesso em: 01 maio 2021.
- INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. **Portaria nº 18: Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais**. Rio de Janeiro, 2012.
- IORIS, M. D; GHISI, E. Financial feasibility of implementing an automated system to save the cold potable water that would be wasted at the beginning of a hot shower. **Urban Water Journal**, v. 18, 2021. doi: <https://doi.org/10.1080/1573062X.2021.1949479>.
- IORIS, M. D.; GHISI, E.; RAMOS, P. J. Avaliação do potencial de economia de água potável por meio do aproveitamento de água pluvial em um condomínio multifamiliar localizado na cidade de Matão – SP. *In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*, 18, 2020, Porto Alegre, RS. **Anais [...]**. ISBN 978-65-00-13688-3. 2020.

JOHANN, D.; SIMÕES, A. F.; REGO, E. E. Análise econômica comparativa entre eletricidade e gás natural para aquecimento de água no setor residencial. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v.8, n.2, p. 239-249, 2017.

JOHNSON, I. **Domestic Energy End Use and Sustainability**. The ImpEE Project, University of Cambridge, 2005.

JOINVILLE. **Lei Complementar nº 502 (2018)**. Redefine e institui, respectivamente, os instrumentos de controle urbanístico – Estruturação e Ordenamento Territorial do Município de Joinville, partes integrantes do Plano Diretor de Desenvolvimento Sustentável do Município de Joinville e dá outras providências. Capítulo II - DOS DISPOSITIVOS DE CONTROLE DA OCUPAÇÃO, Seção VII - DA TAXA DE PERMEABILIDADE, Art. 76, Parágrafo 2º. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a1/plano-de-zoneamento-uso-e-ocupacao-do-solo-joinville-sc>. Acesso em: 07 jun. 2021.

JUSBRASIL. **Revista da propriedade industrial (RPI) de 28 de julho de 2015**. 2015. Disponível em: <https://www.jusbrasil.com.br/diarios/96630418/rpi-patentes-28-07-2015-pg-133>. Acesso em: 07 jun. 2021.

KAPP, M. S. **Perda de carga em aquecedores de passagem do tipo serpentina**. Trabalho de conclusão de curso – Coordenação do curso de engenharia civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2018.

KEMPTON, W. Residential hot water: A behaviorally-driven system. **Energy**, v. 13, n. 1, p.107-114, 1988.

KIEFT, A.; HARMSSEN, R.; HEKKERT, M, P. Heat pumps in the existing Dutch housing stock: An assessment of its Technological Innovation System. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 44, p. 101064.

KLEIN, G. Hot-Water Distribution Systems. **Plumbing Systems & Design**. American Society of Plumbing Engineers. 2004. Disponível em: https://www.buildingincalifornia.com/wp-content/uploads/2014/03/Hot-Water-Distribution-Systems_Klein.pdf. Acesso em: 07 jun. 2021.

- KLEIN, G. **Hot Water Distribution Research**. 2005. Disponível em: <http://www.thousandhomechallenge.com/sites/default/files/user-files/documents/HotWaterDistributionPart4.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2019.
- KLEIN, G. **Efficient Hot-Water Piping**. 2013. Disponível em: <https://www.garykleinassociates.com/PDFs/15%20-%20Efficient%20Hot-Water%20Piping-JLC.pdf>. Acesso em: 07 jun. 2021.
- KOMECO. **Manual do usuário**. Linha fluxo balanceado. Modelo: KO 07B. 2018. Disponível em: https://www.komeco.com.br/solucoes/ko-07b/?gclid=CjwKCAjw3MSHBhB3EiwAxcaEu__XFxTrCK0MdmFvmNCoYuC0Gy4AnUEQoEobwiPknE_P71XLQP77TBoCiAMQAvD_BwE. Acesso em: 30 jun. 2021.
- LOWENSTEIN, A.; HILLER, C. C. **Disaggregating residential hot water use**. ASHRAE Transactions: 102:1019-1027, 1996.
- LOWENSTEIN, A.; HILLER, C. C. **Disaggregating residential hot water use - Part II**. ASHRAE Transactions 104:1852-1863, 1998.
- LUTZ, J. **Water and energy wasted during residential shower events: findings from a pilot field study of hot water distribution systems**. Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, Berkeley, 2011.
- LUTZ, J. **Estimating energy and water losses in residential hot water distribution systems**. Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, Berkeley, 2005. Disponível em: <https://escholarship.org/uc/item/4nj7m0q6>. Acesso em: 07 jun. 2021.
- MACINTYRE, A. J. **Instalações hidráulicas: prediais e industriais**. 3. ed. Rio de Janeiro, 1998, 596 p.
- MAEHARA, G. P. **Tigre S/A Tubos e conexões**. Relatório de estágio curricular. Departamento de Engenharia Mecânica, Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2008.

- MAGUIRE, J.; FANG, X.; WILSON, E. **Comparison of Advanced Residential Water Heating Technologies in the United States**. Golden CO: National Renewable Energy Lab. 2013.
- MANOUCHEHRI, R.; BANISTER, C. J.; COLLINS, M. R. Impact of small tilt angles on the performance of falling film drain water heat recovery systems. **Energy and Buildings**, v. 102, p. 181-186, 2015.
- MANOUCHEHRI, R.; COLLINS, M. An experimental analysis of the impact of temperature on falling film drain water heat recovery system effectiveness. **Energy and Buildings**, v. 130, p. 1-7, 2016.
- MAYER, P. W.; DeOREO, W. B.; OPITZ, E. M.; KIEFER, J. C.; DAVIS, W. Y.; DZIEGIELEWSKI, B.; NELSON, J. O. **Residential End Uses of Water**. Denver: AWWA Research Foundation, 1999.
- MEGGERS, F.; LEIBUNDGUT, H. The potential of wastewater heat and exergy: decentralized high-temperature recovery with a heat pump. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 4, p. 879–886, 2011.
- NRC - Natural Resources Canada. **Residential Sector Secondary Energy Use and GHG Emissions by End-Use**, 2012.
- OSBORNE, J. M. A resolution to the NPV-IRR debate?. **The Quarterly Review of Economics and Finance**, v. 50, n. 2, p. 234-239, 2010.
- ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Curva de carga horária**. Resultados da operação. Histórico da operação. Disponível em: http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/curva_carga_horaria.aspx. Acesso em: 30 abr. 2021.
- PALMGREN, C.; STEVENS, N.; GOLDBERG, M.; BARNES, R.; ROTHKIN, K. **Consultant report: 2009 California Residential Appliance Saturation Study, Executive summary**. California Energy Commission. Sacramento, 2010.
- PALMIERI, M.C. **Ciclo por absorção para complementar a climatização e o aquecimento de água no setor hoteleiro**. 2013. Dissertação (Mestrado em

Energia) - Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

PASETTI, G.O. **Automação e otimização energética de uma unidade de aquecimento solar doméstica**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Automação e Sistemas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2014.

POCHWAT, K.; KORDANA, S.; STARZEC, M. SLYS, D. Comparison of two-prototype near-horizontal Drain Water Heat Recovery units on the basis of effectiveness. **Energy**, v. 173, p. 1196-1207, 2019.

PORTO ALEGRE. **Lei Complementar nº 284 (1992)**. Institui o código de edificações de Porto Alegre e dá outras providências. Título XII - INSTALAÇÕES EM GERAL, Capítulo I - INSTALAÇÕES HIDROSSANITÁRIAS, Art. 177. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/codigo-de-obras-porto-alegre-rs>. Acesso em: 07 jun. 2021.

RAMADAN, M; IEMENAND, T.; KHALED, M. Recovering heat from hot drain water – Experimental evaluation, parametric analysis and new calculation procedure. **Energy and Buildings**, v. 128, p. 575-582, 2016.

REFFOLD, E.; LEIGHTON, F.; CHOUFHURY F.; RAYNER P. Greenhouse gas emissions of water supply and demand management. **Science Report nº SC070010**. Environment Agency, 2008.

REWATT. **O kit rewatt**. Banho de conforto e economia. 2020. Disponível em: <https://gmsolucoes20.wixsite.com/website>. Acesso em: 25 maio de 2021.

RINNAI. **RCS-9 BRV-Smartstart**. Home. Acessórios. Recirculação automatizada. 2021. Disponível em: <https://www.rinnai.com.br/acessorios/recirculacao-automatizada/rcs-9-brv-smartstart-1-1-1-1>. Acesso em: 26 maio 2021.

SANGOI, J. M. **Análise comparativa do desempenho de sistemas de aquecimento de água em edificações residenciais**. 2015. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2015.

SANTOS, A. H. C. **Eficiência energética e a contribuição dos gases combustíveis: análise de caso das políticas de avaliação de edificações.** 2011. Dissertação (Mestrado em Energia) – Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2011.

SANTOS, E. M. **Gás Natural: Estratégias para uma Energia Nova no Brasil.** Petrobras, 2002, 352p.

SÃO JOAQUIM. **Lei nº 1.363 (1987).** Institui o código de obras do município de São Joaquim, estado de Santa Catarina. Capítulo VI - DAS CONDIÇÕES GERAIS RELATIVAS ÀS EDIFICAÇÕES, SEÇÃO VIII -DOS RESERVATÓRIOS DE ÁGUA, Art. 152. Disponível em: <https://www.diariomunicipal.sc.gov.br/site/?r=site/acervoView&id=824973>. Acesso em: 07 jun. 2021.

SELEGHIM JUNIOR, P. TC8 Perda de calor em uma tubulação de água quente (Piloto Coursera USP), 2018. 1 vídeo (ca. 16 min). Publicado pelo canal Prof. P. Seleghim. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=-mIAcBJAECA&t=1s>. Acesso em: 12 dez. 2020.

SHERMAN, T. **Disaggregating Residential Shower Warm-Up Waste: An Understanding and Quantification of Behavioral Waste Based On Data from Lawrence Berkeley National Labs.** Evolve Technologies LLC. 2014. Disponível em: <http://showerstream.net/wp-content/uploads/2016/05/Disaggregating-Residential-Shower-Warm-Up-Waste.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2019.

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto - 2019.** 2019. Disponível em: <http://app4.mdr.gov.br/serieHistorica/#>. Acesso em: 20 abr. 2021.

STATISTICS BUREAU OF JAPAN. **Japan statistical yearbook.** Disponível em: <https://www.stat.go.jp/english/data/nenkan/index.html>. Acesso em: 30 abr. 2021.

TACOCOMFORT. Water Circulation Pumps, Circulators and Accessories - **Hot-link Instant Hot Water**. 2021. Disponível em: http://www.tacomfort.com/products/systems/instant_hot_water/hotlink/index.html. Acesso em: 18 maio 2021.

THINKEVOLVE. **Showerstart TSV³**. Evolve technologies. Showerheads. 2021. Disponível em: <https://www.thinkevolve.com/>. Acesso em: 26 maio de 2021.

TOMAZ, P. **Previsão de Consumo de Água – Interface das Instalações Prediais de Água e Esgoto com os serviços Públicos**. Navegar Editora, São Paulo, 2001, 250p.

UKDECC - United Kingdom Department of Energy and Climate Change. **Household End Use Energy Consumption**, 2009.

US CENSUS BUREAU. **2017 Characteristics of new housing**. U.S. Department of Housing and Urban Development. 2017. Disponível em: <https://www.census.gov/construction/chars/pdf/c25ann2017.pdf>. Acesso em: 30 abr. 2021.

WEIHL, J. S.; KEMPTON, W. Residential hot water energy analysis: Instruments and algorithms. **Energy and Buildings**, v. 8, n. 3, p. 197-204, 1985.

WONG, L. T.; MUI, K. W.; GUAN, Y. Shower water heat recovery in high rise residential buildings of Hong Kong. **Applied Energy**, v. 87, n. 2, p. 703–709, 2010.

WOOD, A.; D'ACQUISTO, J. **Pilot Study for a Thermostatic Shower Restriction Valve**. International Energy Program Evaluation Conference, Long Beach, 2015. Disponível em: <http://docplayer.net/38354931-Pilot-study-for-a-thermostatic-shower-restriction-valve.html>. Acesso em: 15 nov. 2019.

ZALOUM, C.; GUSDORF, J.; PAREKH, A. **Performance Evaluation of Drain Water Heat Recovery at the Canadian Centre for Housing Technology – Final Report**, Sustainable Buildings and Communities, Natural Resources Canada, 2007.

ZALOUM, C.; LAFRANCE, M.; GUSDORF, J. **Drain Water Heat Recovery Characterization and Modeling – Final Draft**, Sustainable Buildings and Communities, Natural Resources Canada, 2007.

ZHANG, L.; GUDMUNDSSON, O.; THORSEN, J. E.; LI, H.; SVENDSEN, S. Technical comparison of domestic hot water system which used in China and Denmark. **Energy Procedia**. v. 1, n. 61, p. 2509-2513. 2014.

ZHOU, S. L.; MCMAHON, T. A.; WALTON, A.; LEWIS, J. Forecasting operational demand for an urban water supply zone. **Journal of Hydrology**, v. 259, n. 1-4, p. 189-202, 2002.

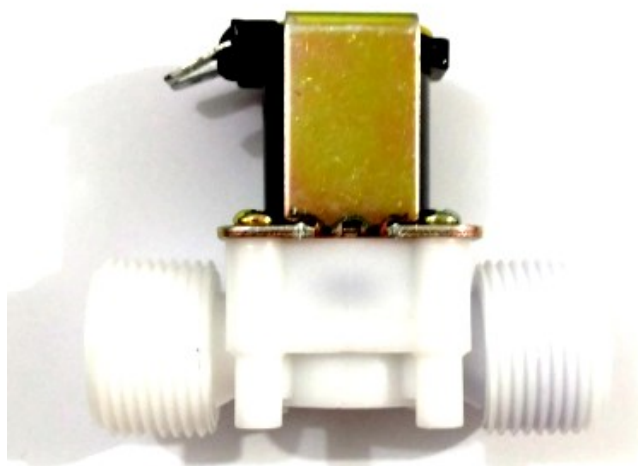
APÊNDICES

Apêndice A

A.1. Válvula solenoide

A válvula solenoide, mostrada na Figura A.1, é um componente hidráulico-eletrônico que pode ser do tipo normalmente aberta ou normalmente fechada. A abertura ou fechamento desta válvula se dá pelo recebimento de um sinal elétrico provindo de um módulo ou fonte externa que interpreta alguma informação pré-programada.

Figura A.1 - Válvula Solenoide



Para o protótipo foi utilizada uma válvula normalmente fechada, instalada próxima do chuveiro e direcionada para a tubulação que encaminharia a água para o reservatório inferior de água potável da edificação. O acionamento desta válvula será guiado pelos sinais interpretados pelo módulo relé que recebe as informações do módulo de radiofrequência NRF24L01.

Para o funcionamento elétrico da válvula é necessário a conexão de um dos pinos da válvula com um dos fios de uma fonte 12 V e o outro pino conectado aos terminais do módulo relé.

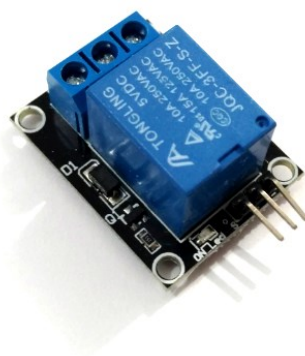
As especificações técnicas da válvula adquirida para o protótipo são:

- Uso: Água e fluidos de baixa viscosidade;
- Tensão de operação: 12 VDC;
- Corrente: 250 mA;
- Pressão – 0,02 a 0,8 MPa;
- Modo de operação: Normal fechado;
- Temperatura máxima do fluido: 100°C;
- Diâmetro da rosca: 19,5 mm;
- Comprimento da rosca: 17 mm;
- Tipo de válvula: Diafragma (operada por servo);
- Dimensões: 85x53x42 mm.

A.2. Módulo relé

O módulo relé utilizado no protótipo, ilustrado na Figura A.2, é alimentado por uma corrente de 5 V provinda da plataforma Arduino, assim como o sistema de proteção "GND". O relé é responsável por receber um sinal de 5 V e possibilitar o funcionamento de componentes eletrônicos simples integrando-os aos componentes que exigem maior voltagem, como por exemplo válvulas solenoides, lâmpadas, motores, etc.

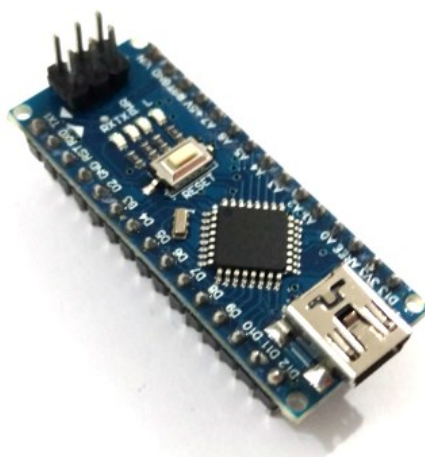
Figura A.2 - Módulo relé



A.3. Arduino Nano V3.0

O Arduino é uma plataforma de prototipagem de hardware livre, ou seja, qualquer usuário é capaz de melhorar ou modificar o Arduino partindo do mesmo hardware básico. A plataforma, ilustrada na Figura A.3, é composta por um microcontrolador Atmel, circuitos de entrada e saída e que podem se conectar com um computador via cabo USB e programada por meio de um Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE) utilizando linguagem baseada em C/C++. Para a programação do protótipo utilizou-se o próprio IDE fornecido pela própria marca Arduino.

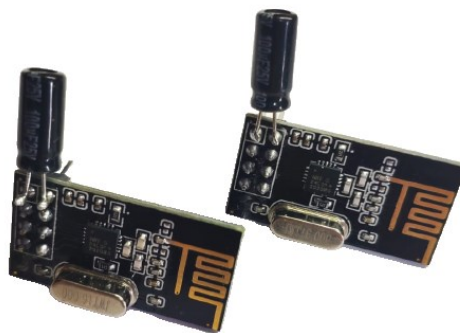
Figura A.3 - Arduino Nano V3.0



A.4. Módulo de radiofrequência NRF24L01

O módulo de radiofrequência NRF24L01 é um componente eletrônico que pode ser utilizado como transmissor e receptor conforme o algoritmo carregado no sistema. O módulo possui uma antena integrada e pode ter seu sinal amplificado por meio de uma antena com maior potencial de transmissão. Para o correto funcionamento do componente é necessário soldar um capacitor de 100 μF nos pinos de 3,3 V e terra, conforme ilustra a Figura A.4.

Figura A.4 - Módulo de radiofrequência NRF24L01.



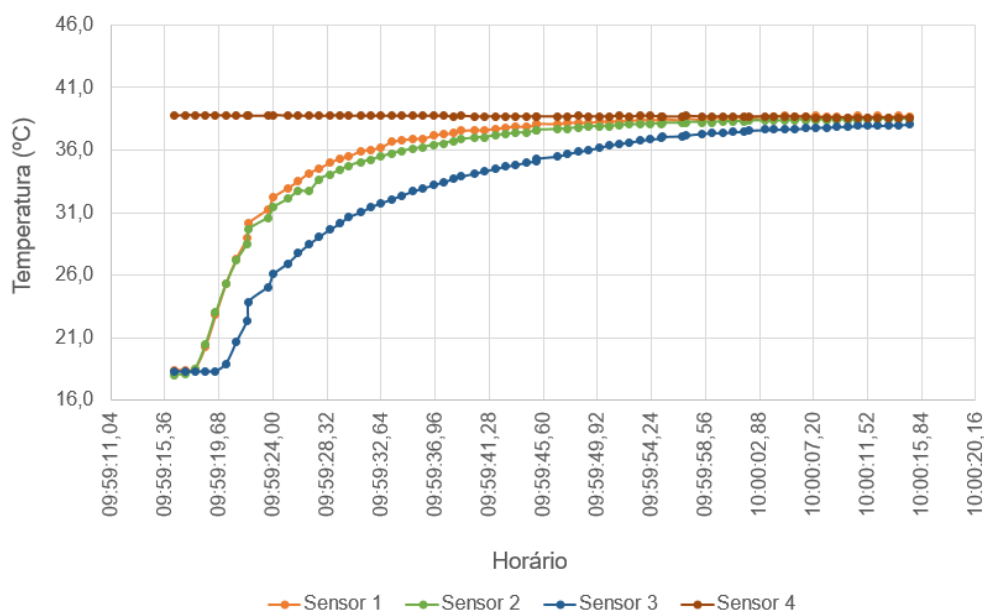
As especificações técnicas do módulo utilizado no protótipo são:

- Tensão de operação: 1,9 V;
- 3,6 VDC;
- Corrente de operação (envio): 11,3 mA;
- Corrente de operação (recebimento): 12,3 mA;
- Corrente de operação (*power-down*): 900 nA;
- Sensibilidade do receptor em 250 kbps: -85 dBm;
- Taxa de transmissão em 250 kb (área aberta): 100 m;
- Quantidade de canais: 125;
- Antena integrada à placa;
- Temperatura de operação: -40 a 85°C.

Apêndice B

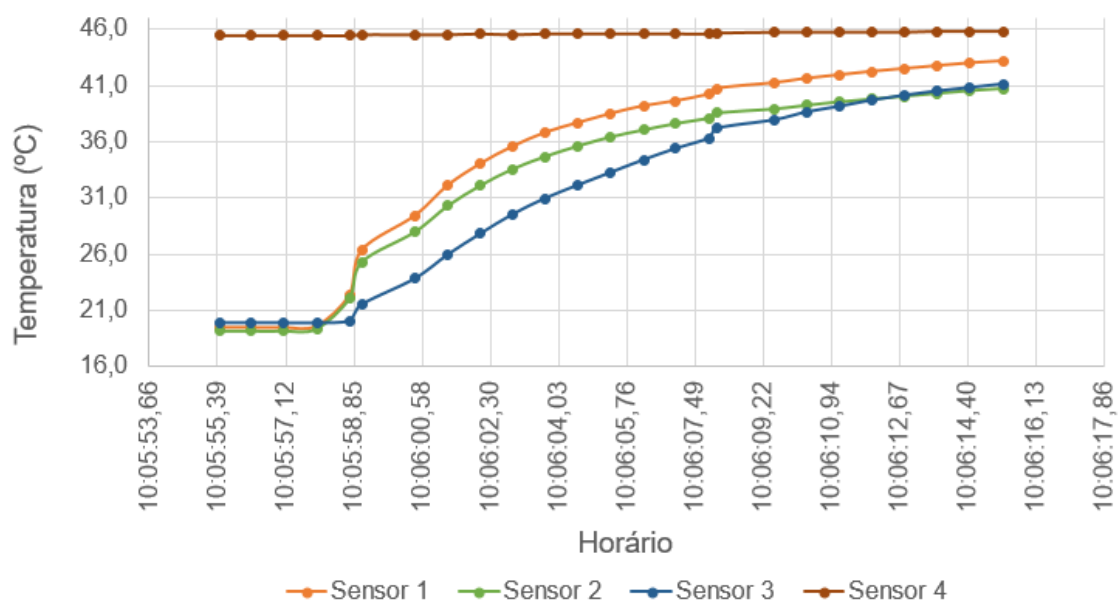
A Figura B.1 ilustra a variação da temperatura ao longo do tempo para três sensores DS18B20 diferentes. Na primeira medição, três termômetros foram inseridos no banho-maria digital com a temperatura ajustada para 17,6°C. Após um minuto, as temperaturas médias dos sensores 1, 2 e 3 eram, respectivamente, 18,0°C, 17,8°C e 18,1°C. A temperatura média do sensor que acompanhava a temperatura do banho-maria analógico foi 38,66°C. Verifica-se que os sensores de temperatura alcançaram a temperatura de 38,66°C que o banho-maria registrava após transcorridos, aproximadamente, 47 segundos.

Figura B.1 – Crescimento da temperatura medida pelos sensores DS18B20 ao longo do tempo – Medição 1.



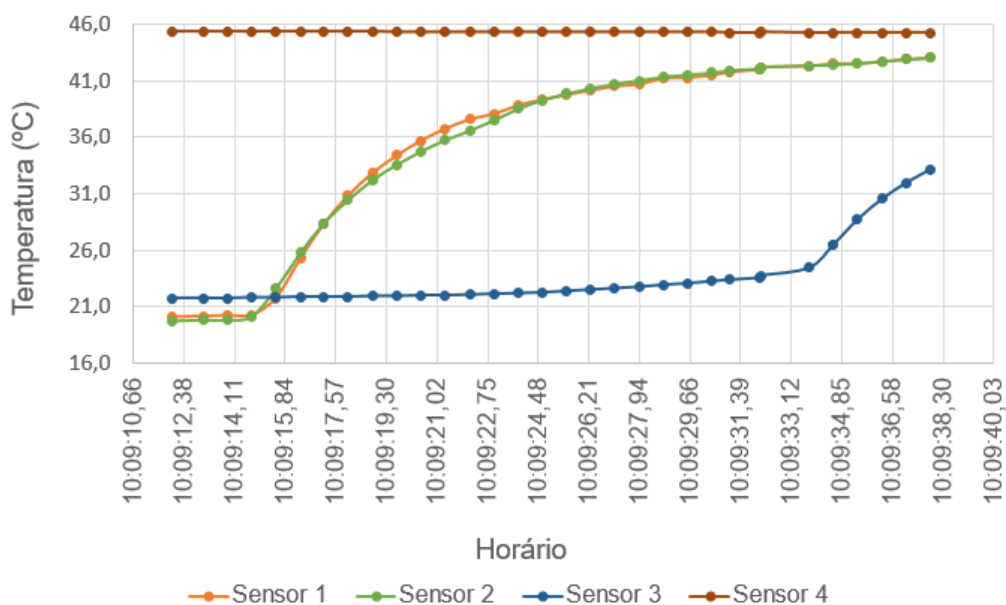
As Figuras B.2 e B.3 ilustram o mesmo procedimento realizado para a obtenção da Figura B.1. Na segunda medição o banho-maria digital estava com a temperatura ajustada para 18,7°C. Após um minuto, a temperatura média dos sensores 1, 2 e 3 eram de, respectivamente, 19,4°C, 19,1°C e 19,9°C. A temperatura média do sensor que acompanhava a temperatura do banho-maria analógico era de 45,6°C. Verifica-se que os sensores de temperatura apresentaram menores variações de temperatura e alcançaram certa estabilidade na temperatura de 41,0°C após, aproximadamente, 21 segundos.

Figura B.2 – Crescimento da temperatura medida pelos sensores DS18B20 ao longo do tempo – Medição 2.



Na terceira medição foi ajustada a temperatura de 19,4°C para o banho-maria digital. Após um minuto, a temperatura média dos sensores 1, 2 e 3 eram de, respectivamente, 20,2°C, 19,7°C e 22,6°C. O banho-maria analógico estava com a temperatura regulada em 45,4°C. Desconsiderando-se o sensor 3, verifica-se que os outros dois sensores de temperatura alcançaram certa estabilidade na temperatura de 41,0°C após transcorridos, aproximadamente, 26 segundos.

Figura B.3 – Crescimento da temperatura medida pelos sensores DS18B20 ao longo do tempo – Medição 3.



Apêndice C

Tabela C.1 - Dados característicos para cada residência onde foram realizadas as medições *in loco*.

Residência	Data da medição	T _{ext} (°C)	Local	Área total (m ²)	Ponto mais próximo do aquecedor	Ponto mais afastado do aquecedor	Número de pontos de consumo de água quente	
							Chuveiros	Torneiras
Condomínio Dante Alighieri - apartamento 1	27/06/2019	20,0	Criciúma - SC	300,0	Torneira do tanque	Torneira da suíte	2	4
Condomínio Epiros Park - apartamento 2	18/07/2019	19,7	Florianópolis - SC	56,0	Torneira da cozinha	Torneira da suíte	1	2
Condomínio Acapulco - apartamento 3	03/08/2019	16,0	Pato Branco - PR	133,0	Torneira da área de serviço	Chuveiro da suíte	2	4
Residência unifamiliar - casa 1	02/08/2019	16,7	São Lourenço do Oeste - SC	200,0	Torneira da área de serviço	Torneira do banheiro comum	2	4
Condomínio Fernando Pessoa - apartamento 4	16/08/2019	14,9	São José - SC	120,0	Torneira da área de serviço	Chuveiro da suíte	3	4

Tabela C.1 - Dados característicos para cada residência onde foram realizadas as medições *in loco* (continuação).

Residência	Data da medição	T _{ext} (°C)	Local	Área total (m ²)	Ponto mais próximo do aquecedor	Ponto mais afastado do aquecedor	Número de pontos de consumo de água quente	
							Chuveiros	Torneiras
Condomínio D'Park - apartamento 5	28/08/2019	22,1	Florianópolis - SC	172,0	Torneira da cozinha	Chuveiro da suíte	3	5
Condomínio Boulevard Davignon - apartamento 6	30/08/2019	16,6	Florianópolis - SC	103,0	Torneira da cozinha	Chuveiro da suíte	2	3
Condomínio Solar da Primavera - apartamento 7	11/09/2019	23,0	Florianópolis - SC	67,0	Torneira da cozinha	Chuveiro da suíte	2	3
Condomínio Athenas Park - apartamento 8	18/10/2019	21,5	Florianópolis - SC	62,0	Torneira do banheiro	Chuveiro da suíte	2	2
Condomínio Saint Thomas - apartamento 9	01/12/2019	25,4	Porto Alegre - RS	75,0	Torneira da cozinha	Chuveiro do banheiro	1	2
Residência unifamiliar - casa 2	08/12/2019	23,8	Curitiba - PR	300,0	Chuveiro do banheiro	Chuveiro da suíte	2	0

Tabela C.1 - Dados característicos para cada residência onde foram realizadas as medições *in loco* (continuação).

Residência	Data da medição	T _{ext} (°C)	Local	Área total (m ²)	Ponto mais próximo do aquecedor	Ponto mais afastado do aquecedor	Número de pontos de consumo de água quente	
							Chuveiros	Torneiras
Condomínio Manchester Park - apartamento 10	16/12/2019	23,0	Florianópolis - SC	72,0	Torneira da cozinha	Chuveiro da suíte	2	3
Residência unifamiliar – casa 3	30/10/2020	20,4	Tubarão – SC	300,0	Torneira da área de serviço	Chuveiro suíte	3	5
Condomínio Saint James - apartamento 11	20/05/2021	23,2	São José - SC	75,0	Torneira da cozinha	Chuveiro suíte	2	3

Apêndice D

A seguir encontram-se as medições realizadas para as demais residências que não foram ilustradas na seção 4.2.

Figura D.1 - Temperatura e volume de água desperdiçado ao longo do tempo após o acionamento da torneira da cozinha do apartamento 2.

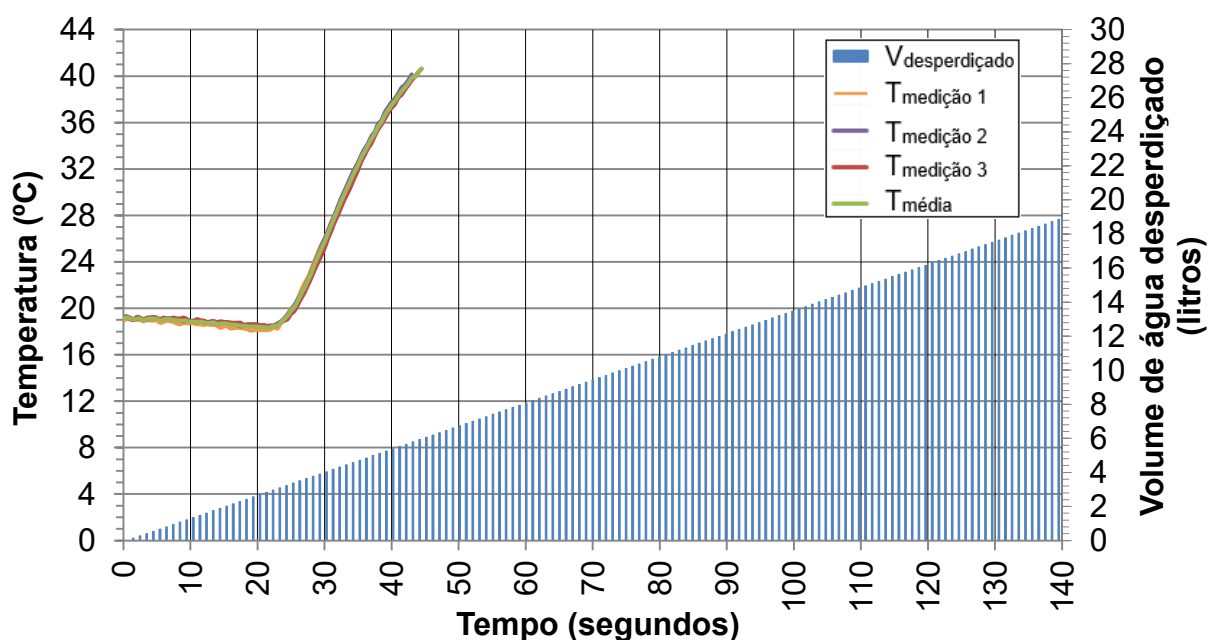


Figura D.2 - Temperatura e volume de água desperdiçado ao longo do tempo após o acionamento da torneira do banheiro do apartamento 2.

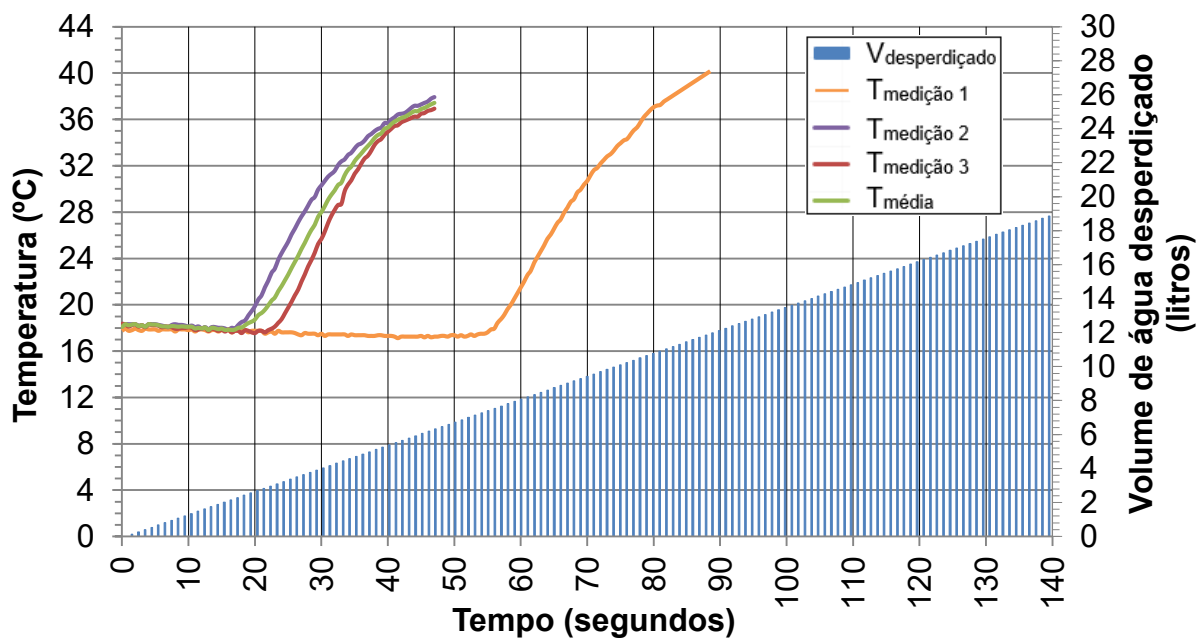


Figura D.3 - Temperatura e volume de água desperdiçado ao longo do tempo após o acionamento da torneira da área de serviço do apartamento 3.

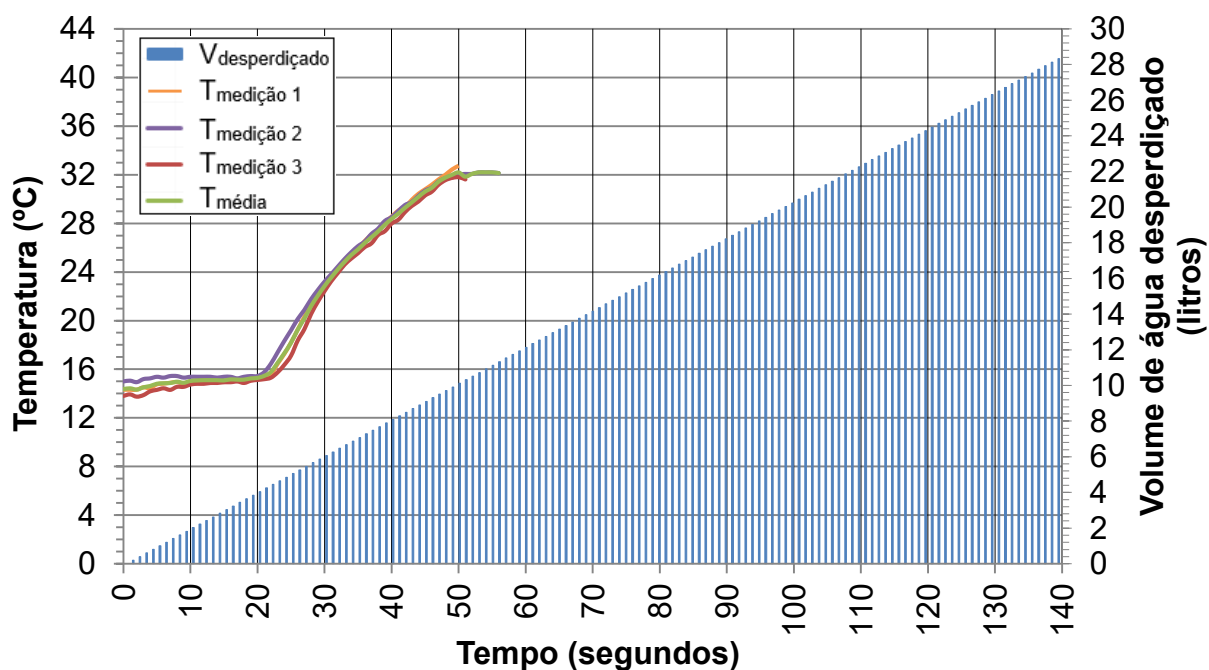


Figura D.4 - Temperatura e volume de água desperdiçado ao longo do tempo após o acionamento da torneira da cozinha do apartamento 5.

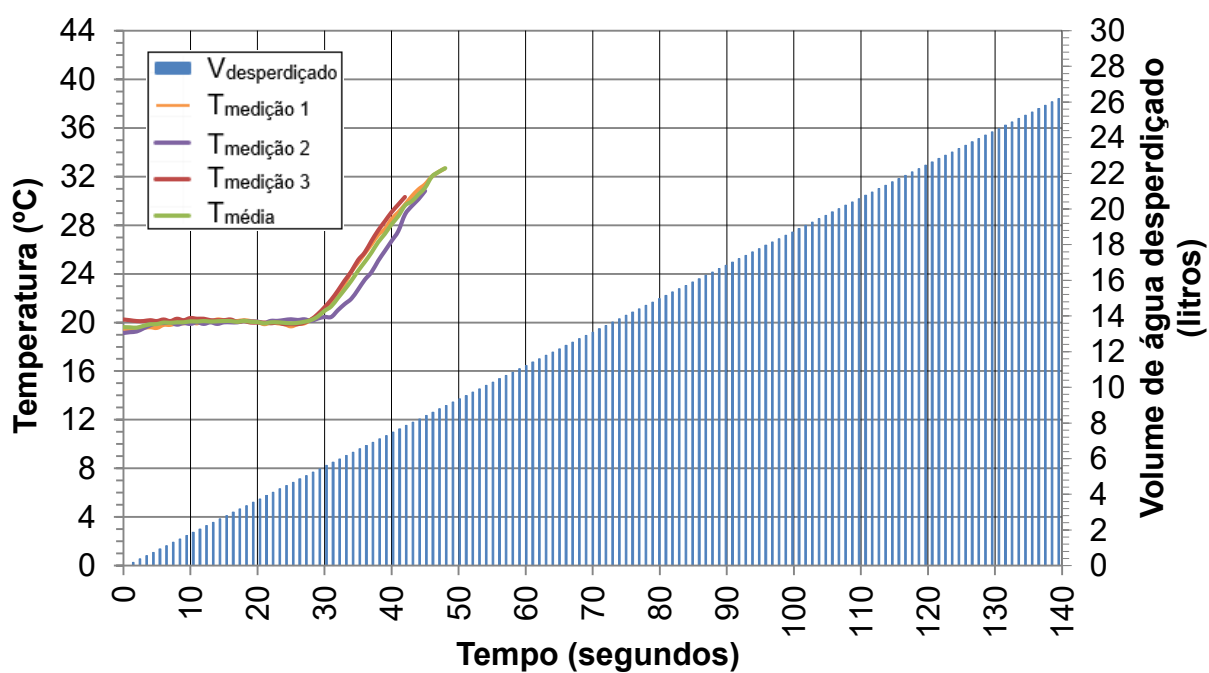


Figura D.5 - Temperatura e volume de água desperdiçado ao longo do tempo após o acionamento da torneira da cozinha do apartamento 6.

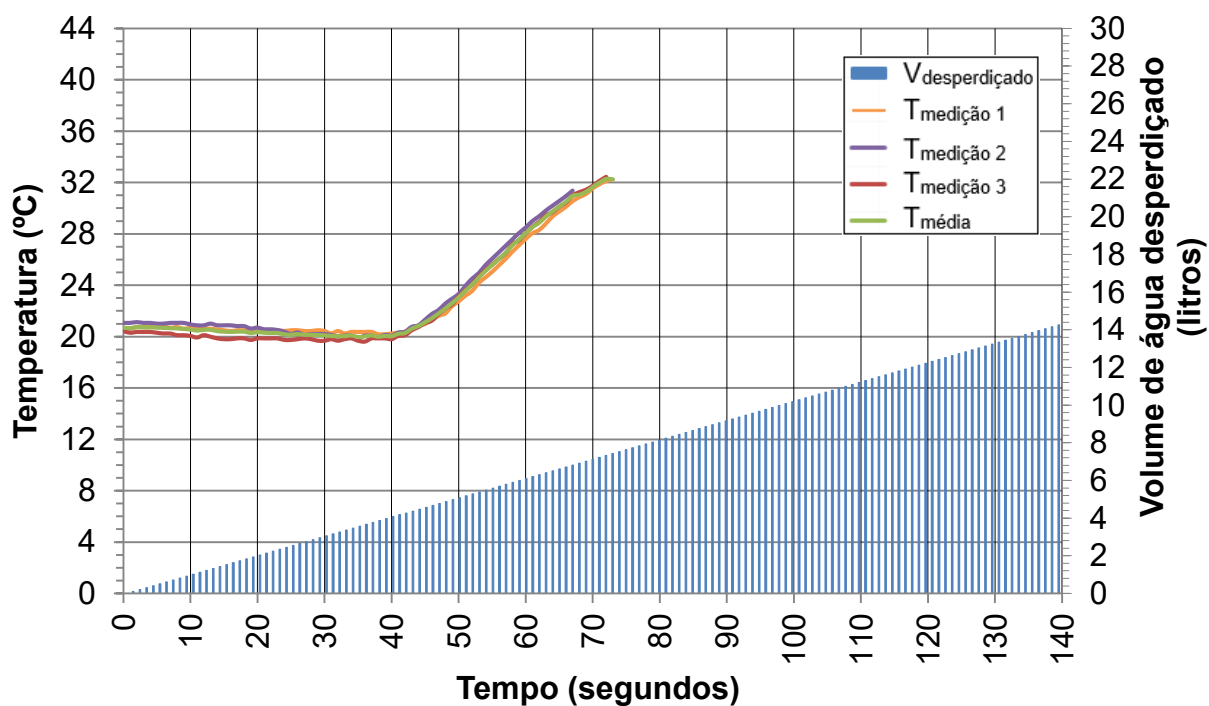


Figura D.6 - Temperatura e volume de água desperdiçado ao longo do tempo após o acionamento da torneira da cozinha do apartamento 7.

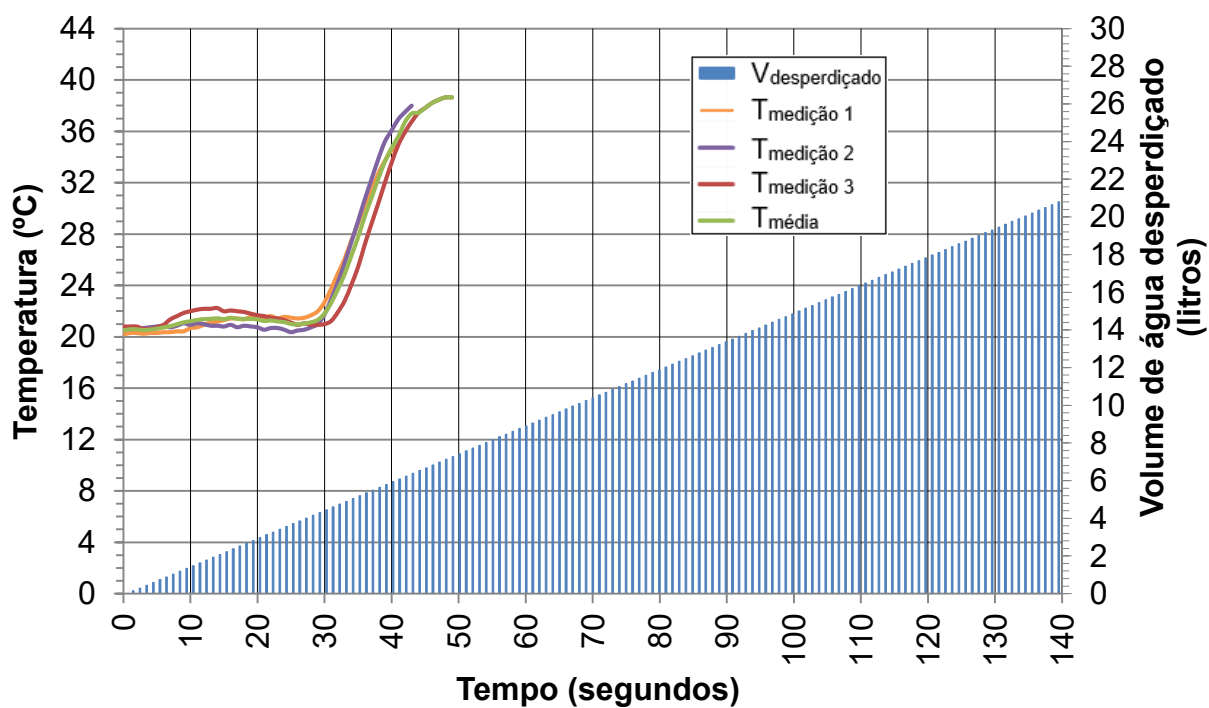


Figura D.7 - Temperatura e volume de água desperdiçado ao longo do tempo após o acionamento da torneira do banheiro do apartamento 8.

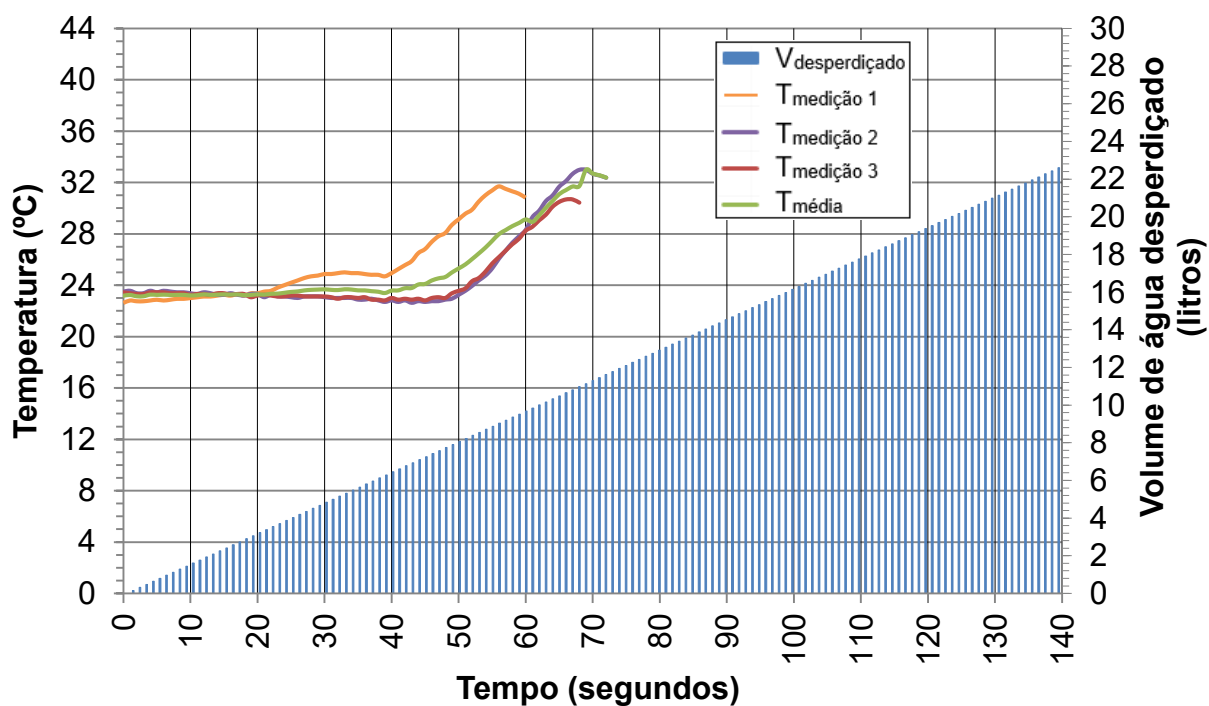


Figura D.8 - Temperatura e volume de água desperdiçado ao longo do tempo após o acionamento da torneira da cozinha do apartamento 9.

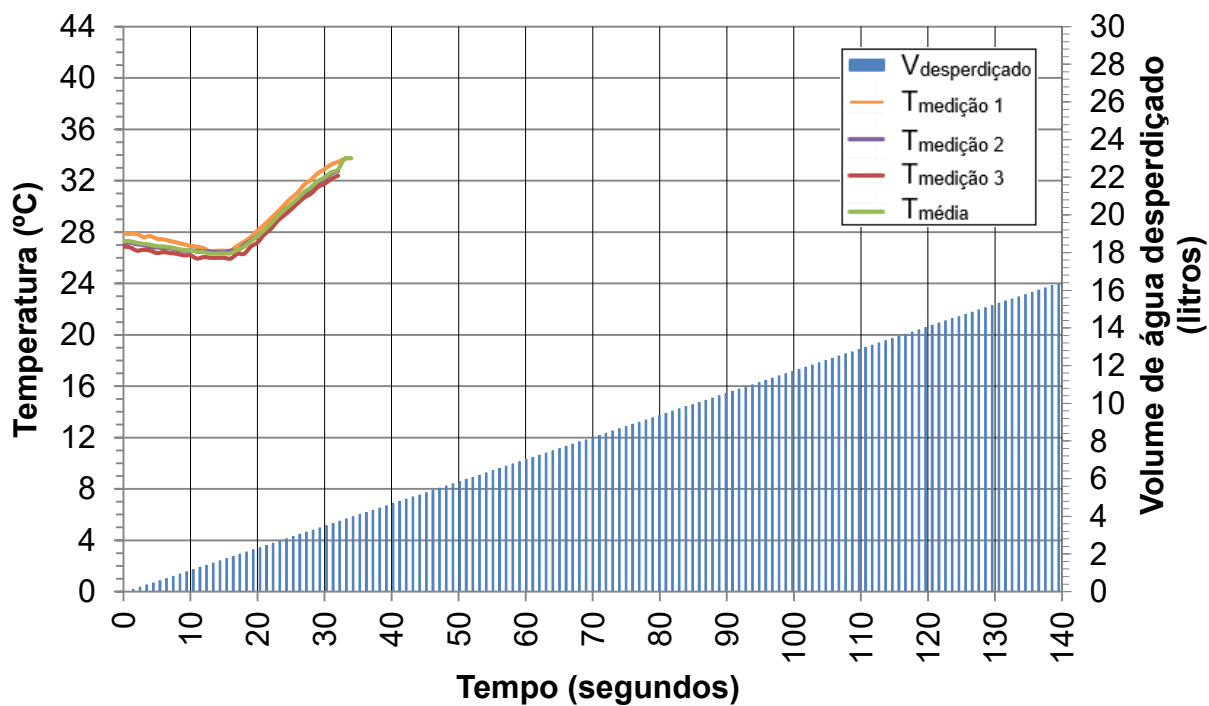


Figura D.9 - Temperatura e volume de água desperdiçado ao longo do tempo após o acionamento do chuveiro do banheiro da casa 2.

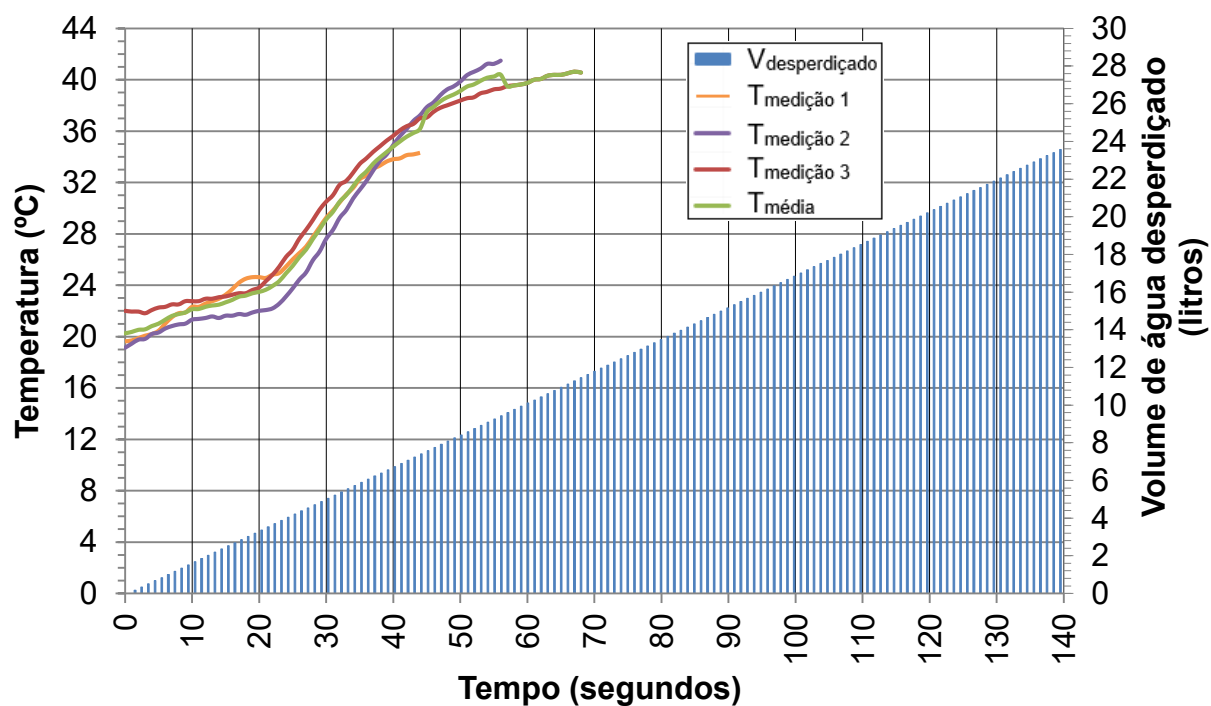


Figura D.10 - Temperatura e volume de água desperdiçado ao longo do tempo após o acionamento da torneira da cozinha do apartamento 10.

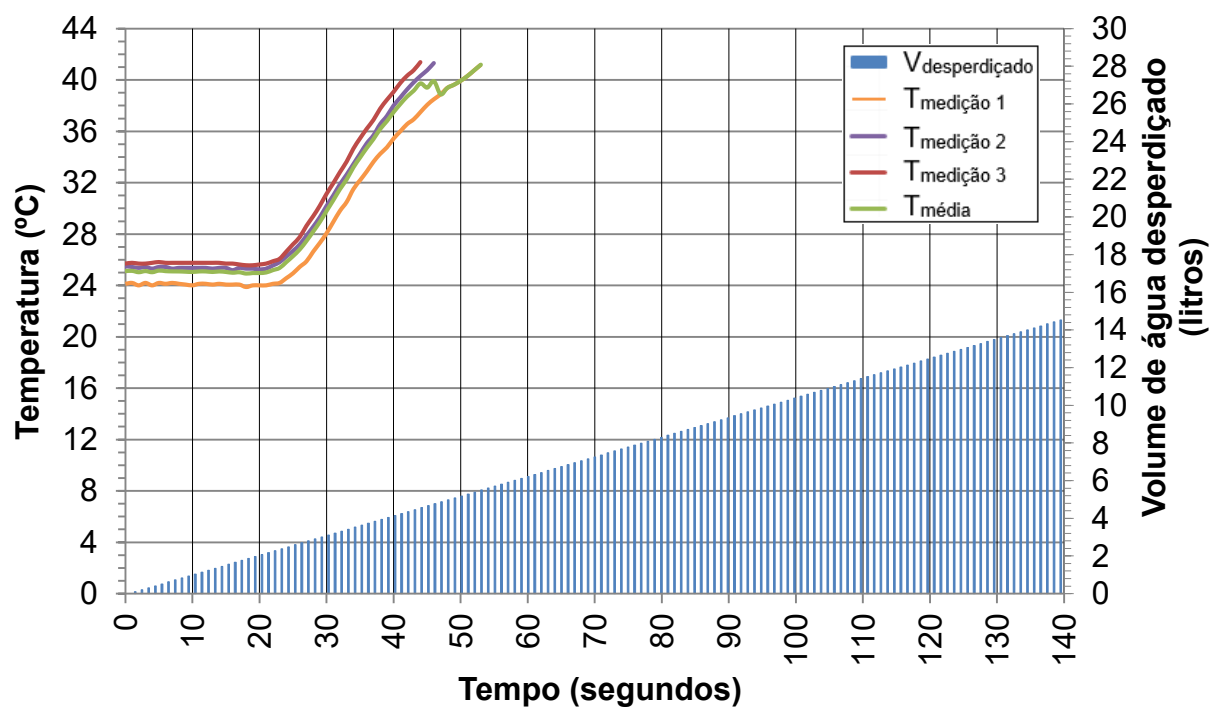


Figura D.11 - Temperatura e volume de água desperdiçado ao longo do tempo após o acionamento da torneira da área de serviço da casa 3.

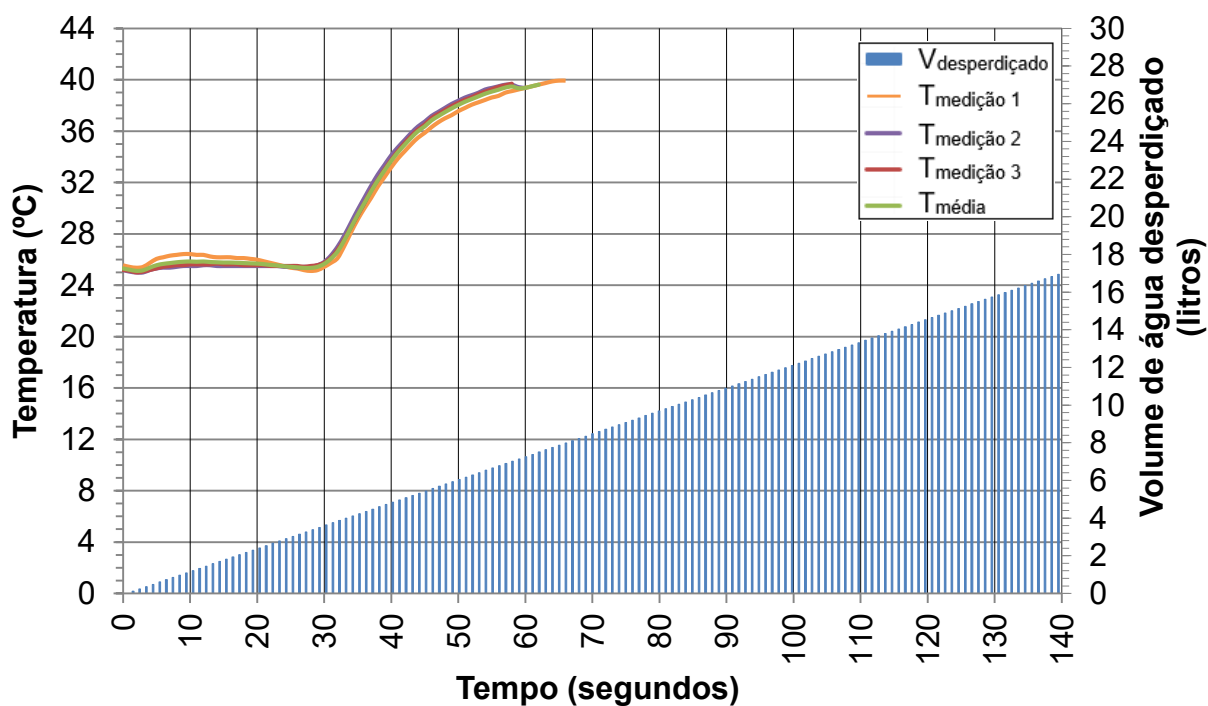


Figura D.12 - Temperatura e volume de água desperdiçado ao longo do tempo após o acionamento da torneira da cozinha do apartamento 11.

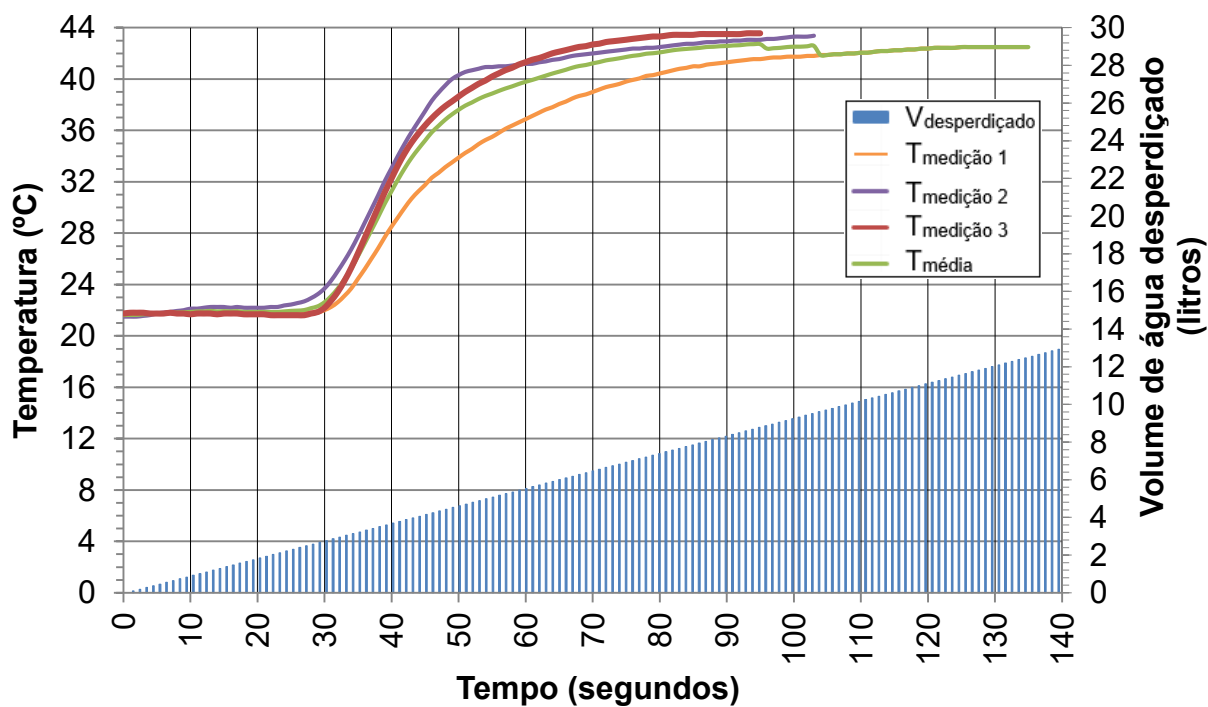
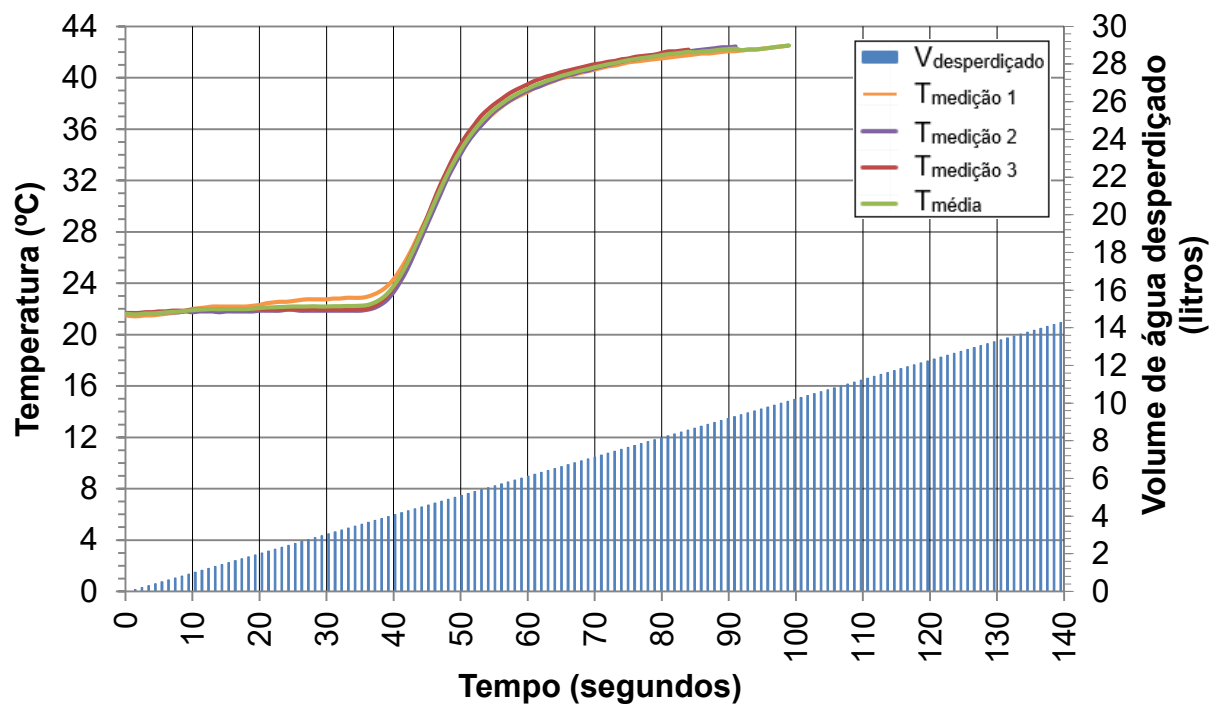


Figura D.13 - Temperatura e volume de água desperdiçado ao longo do tempo após o acionamento da torneira da suíte do apartamento 11.



Apêndice E

As Figuras E.1 e E.3 ilustram três medições em instantes diferentes do aumento da temperatura após o acionamento do botão dos pontos de consumo 2 e 3. Após o intervalo de tempo do acionamento foi verificada a temperatura na saída de água dos pontos. A Figura E.2 ilustra as três medições de temperatura na saída de água no ponto de consumo 2 após os respectivos acionamentos do aparelho sanitário.

Figura E.1 – Variação da temperatura no ponto de consumo 2 do protótipo.

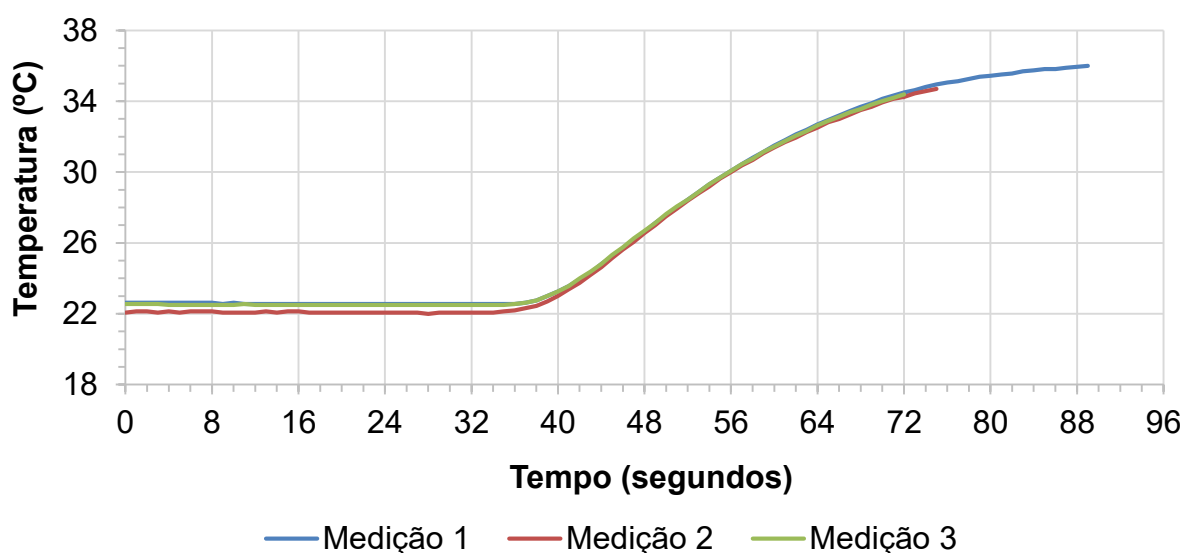


Figura E.2 – Variação da temperatura na saída do ponto de consumo 2 do protótipo.

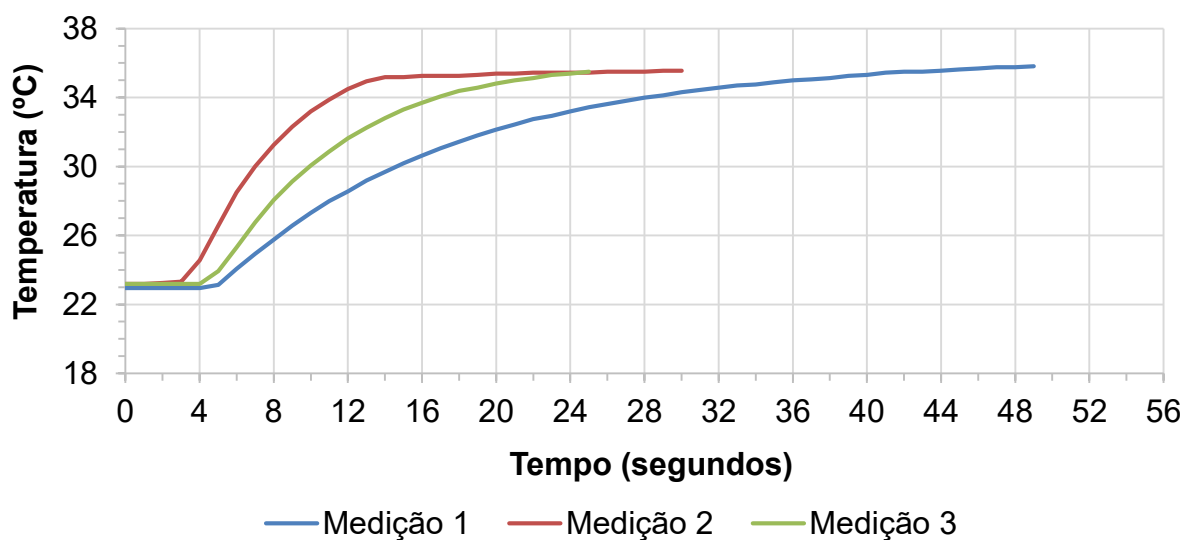
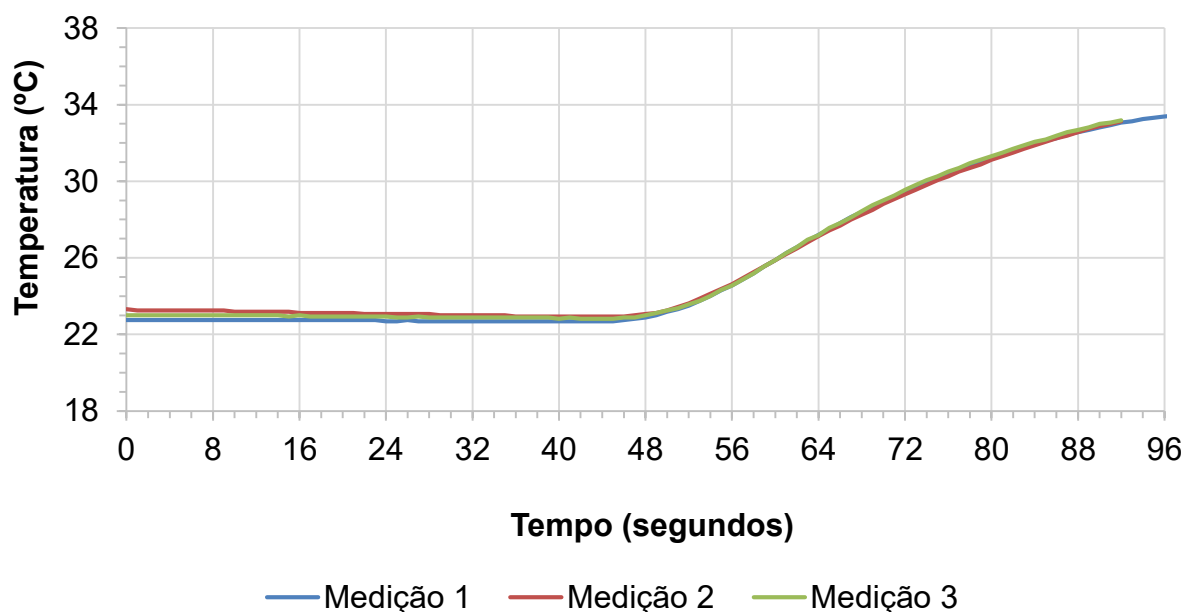
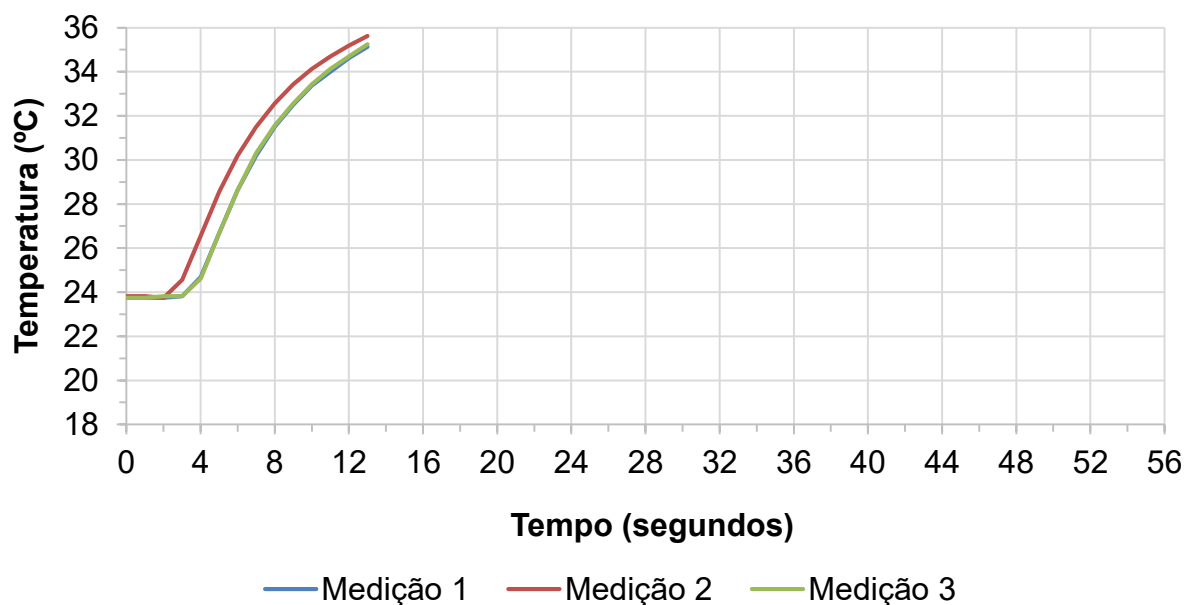


Figura E.3 – Variação da temperatura no ponto de consumo 3 do protótipo.



A Figura E.4 ilustra as três medições de temperatura na saída de água do ponto de consumo 3 após o acionamento do aparelho sanitário 3.

Figura E.4 – Variação da temperatura na saída do ponto de consumo 3 do protótipo.



Apêndice F

Figura F.1 – Planta isométrica indicando a tubulação de retorno e o local de instalação do painel de comando do sistema de recirculação individual para o modelo arquitetônico 2.

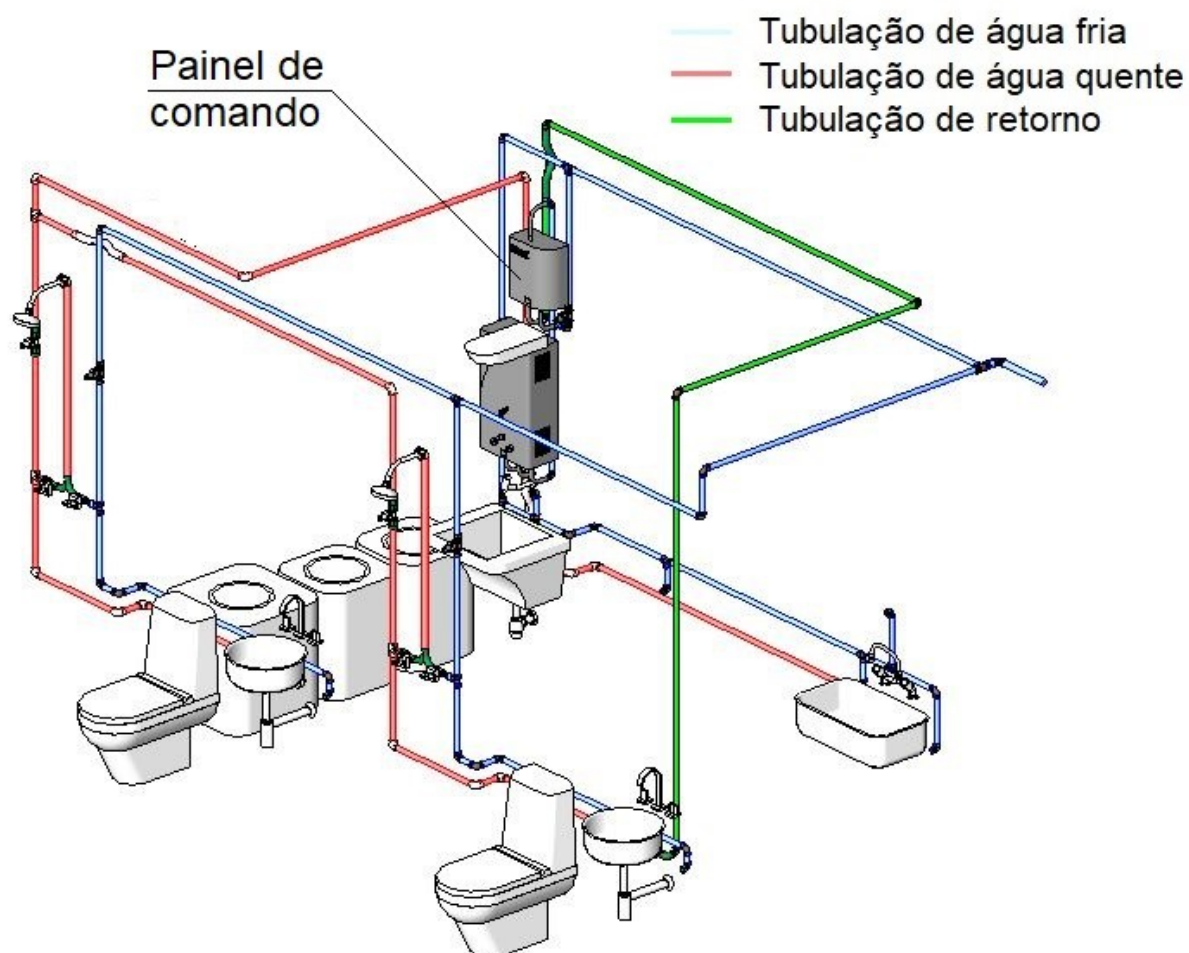
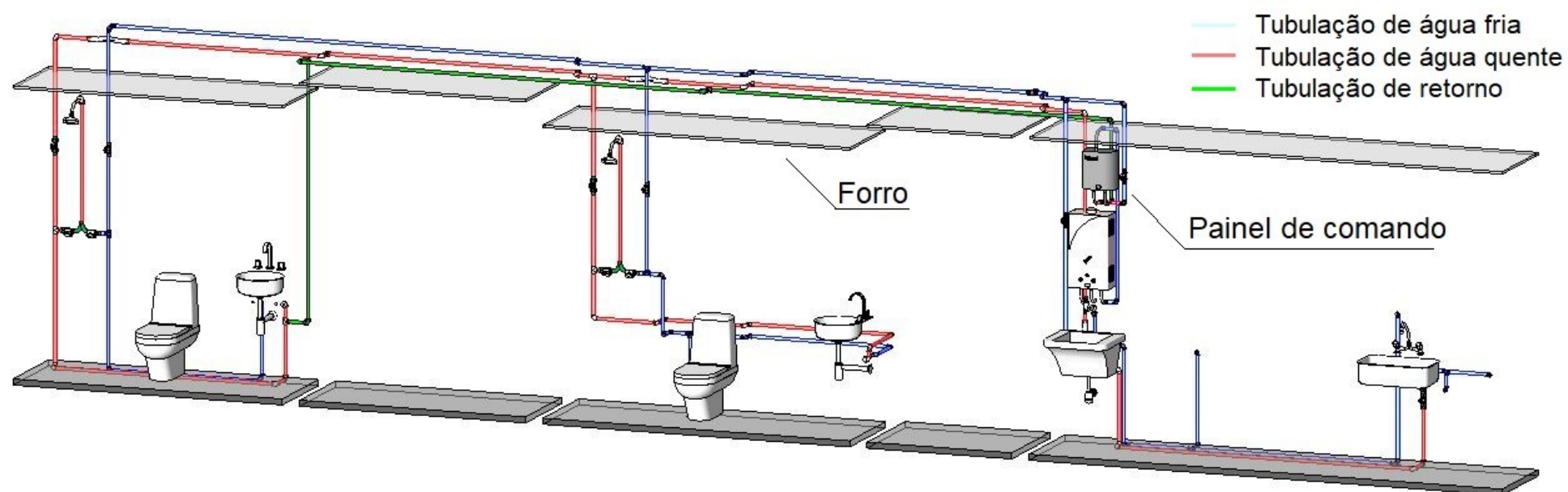


Figura F.2 – Planta isométrica indicando a tubulação de retorno e o local de instalação do painel de comando do sistema de recirculação individual para o modelo arquitetônico 3.



Apêndice G

Tabela G.1 – Orçamento dos materiais para o sistema de recirculação individual.

Item	Custo unitário (R\$)		
	Fornecedor 1	Fornecedor 2	Fornecedor 3
Tubulação (32mm) (m)	17,10	15,67	15,00
Tubulação (25mm) (m)	10,80	13,92	18,17
Tê (32mm)	6,90	9,00	7,50
Tê (25mm)	3,20	4,25	4,00
Joelho (32mm)	3,00	6,00	3,80
Joelho (25mm)	1,90	3,50	2,00
Isolante térmico (m)	1,70	1,50	1,35
Sistema Smartstart	3.105,00	1.913,49	1.676,92

Apêndice H

Figura H.1 – Planta isométrica com adaptação do sistema automatizado proposto para o modelo arquitetônico 2.

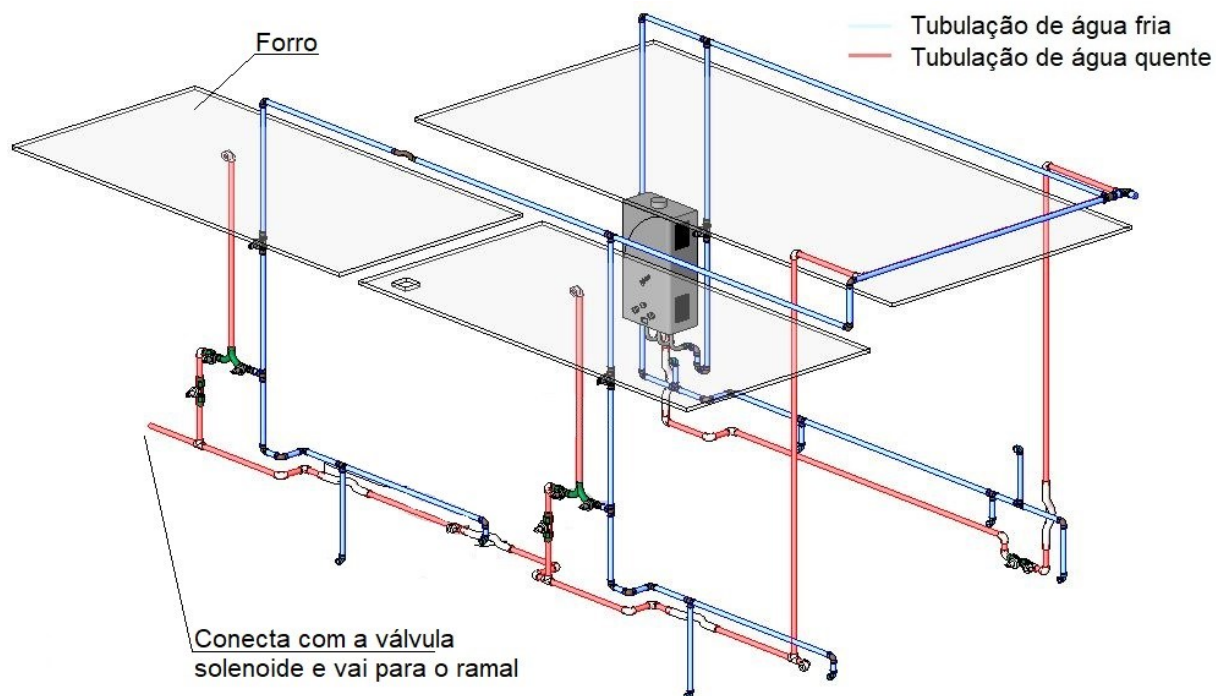


Figura H.2 – Planta isométrica com adaptação do sistema automatizado proposto para o modelo arquitetônico 3.

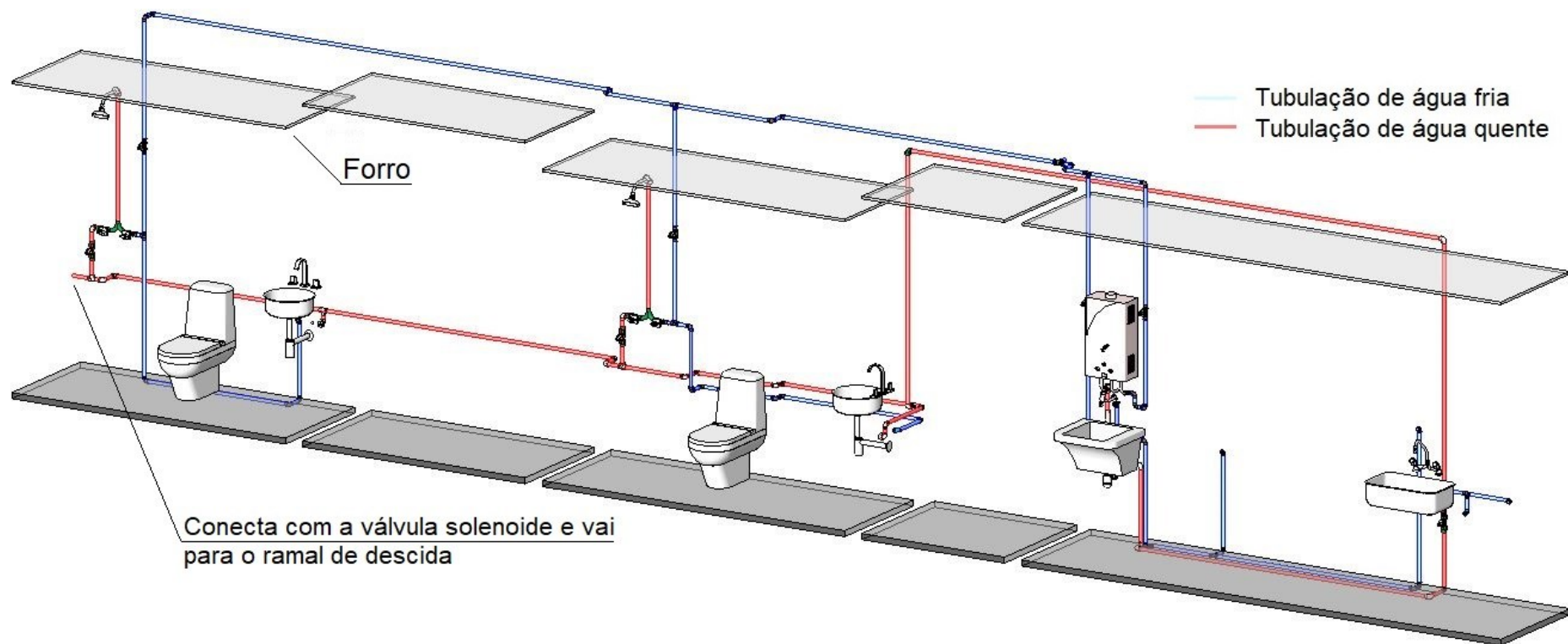
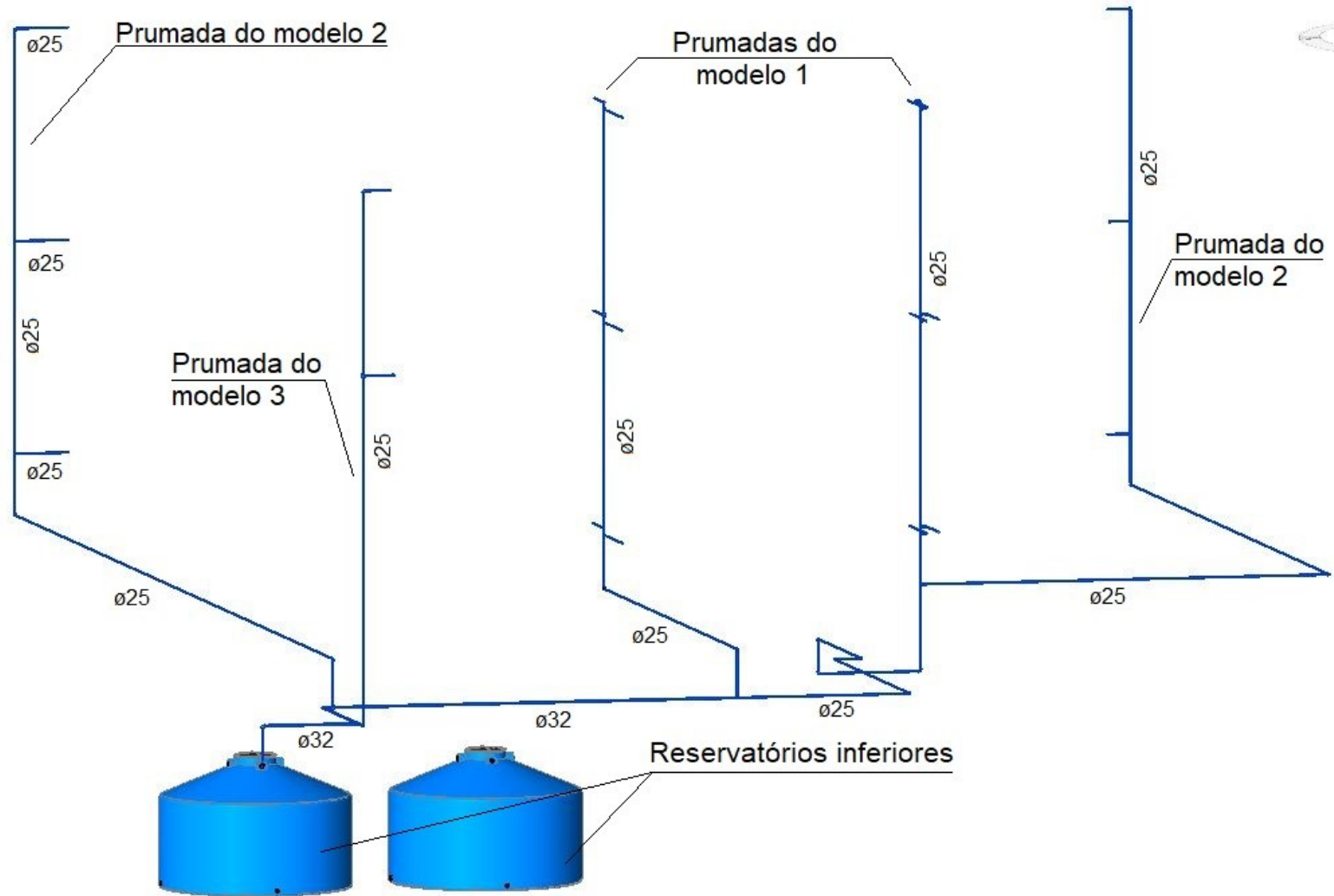


Figura H.3 - Esquema isométrico com as prumadas verticais.



Apêndice I

Tabela I.1 - Orçamento dos materiais para o sistema de recirculação proposto.

Item	Custo unitário (R\$)		
	Fornecedor 1	Fornecedor 2	Fornecedor 3
Tubulação PPR (25 mm) (m)	10,80	13,92	18,17
Tê PPR (25 mm)	3,20	4,25	4,00
Joelho PPR (25 mm)	1,90	3,50	2,00
Curva PPR (25 mm)	9,90	20,00	11,25
Tubulação PVC (25 mm) (m)	4,65	4,00	4,33
Tê PVC (25mm)	1,10	1,50	1,25
Joelho PVC (25 mm)	0,87	0,90	0,75
Tubulação PVC (32 mm) (m)	9,52	9,13	9,50
Tê PVC (32 mm)	2,10	4,80	4,25
Joelho PVC (32 mm)	2,90	2,90	2,50
Válvula solenoide	52,90	41,54	49,90
Microcontrolador	42,90	33,50	47,31
Resistor 1kΩ	0,15	0,10	0,03
Botões de acionamento	0,49	0,16	0,12
Lâmpada LED	0,48	0,74	0,43
Módulos relé 5V 1 Canal	9,90	10,50	9,23
Fonte 9V	19,90	19,90	20,58
Fonte 12V	10,67	15,11	21,87
Fiação (m)	0,90	0,22	0,24
Receptor radiofrequência	14,90	10,30	13,21
Transmissor radiofrequência	14,90	10,30	13,21
Conduíte (m)	1,40	2,50	2,00

Apêndice J

Tabela J.1 – Custo com energia do sistema de recirculação individual para o condomínio Palmas Central.

Ano	Mês	Custo por unidade (R\$)			Custo total para o condomínio (R\$)
		Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	
1	1	5,02	4,88	4,97	99,47
	2	4,54	4,41	4,49	89,84
	3	5,02	4,88	4,97	99,47
	4	4,86	4,72	4,81	96,26
	5	5,02	4,88	4,97	99,47
	6	4,86	4,72	4,81	96,26
	7	5,02	4,88	4,97	99,47
	8	5,02	4,88	4,97	99,47
	9	4,86	4,72	4,81	96,26
	10	5,02	4,88	4,97	99,47
	11	4,86	4,72	4,81	96,26
	12	5,02	4,88	4,97	99,47
2	1	5,25	5,10	5,19	103,93
	2	4,74	4,60	4,69	93,87
	3	5,25	5,10	5,19	103,93
	4	5,08	4,93	5,02	100,58
	5	5,25	5,10	5,19	103,93
	6	5,08	4,93	5,02	100,58
	7	5,25	5,10	5,19	103,93
	8	5,25	5,10	5,19	103,93
	9	5,08	4,93	5,02	100,58
	10	5,25	5,10	5,19	103,93
	11	5,08	4,93	5,02	100,58
	12	5,25	5,10	5,19	103,93

Tabela J.1 – Custo com energia do sistema de recirculação individual para o condomínio Palmas Central (continuação).

Ano	Mês	Custo por unidade (R\$)			Custo total para o condomínio (R\$)
		Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	
3	1	5,62	5,46	5,56	111,36
	2	5,08	4,93	5,02	100,58
	3	5,62	5,46	5,56	111,36
	4	5,44	5,29	5,38	107,77
	5	5,62	5,46	5,56	111,36
	6	5,44	5,29	5,38	107,77
	7	5,62	5,46	5,56	111,36
	8	5,62	5,46	5,56	111,36
	9	5,44	5,29	5,38	107,77
	10	5,62	5,46	5,56	111,36
	11	5,44	5,29	5,38	107,77
	12	5,62	5,46	5,56	111,36
4	1	6,02	5,85	5,96	119,32
	2	5,44	5,29	5,38	107,77
	3	6,02	5,85	5,96	119,32
	4	5,83	5,66	5,77	115,47
	5	6,02	5,85	5,96	119,32
	6	5,83	5,66	5,77	115,47
	7	6,02	5,85	5,96	119,32
	8	6,02	5,85	5,96	119,32
	9	5,83	5,66	5,77	115,47
	10	6,02	5,85	5,96	119,32
	11	5,83	5,66	5,77	115,47
	12	6,02	5,85	5,96	119,32

Tabela J.1 – Custo com energia do sistema de recirculação individual para o condomínio Palmas Central (continuação).

Ano	Mês	Custo por unidade (R\$)			Custo total para o condomínio (R\$)
		Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	
5	1	6,46	6,27	6,38	127,85
	2	5,83	5,66	5,77	115,48
	3	6,46	6,27	6,38	127,85
	4	6,25	6,07	6,18	123,73
	5	6,46	6,27	6,38	127,85
	6	6,25	6,07	6,18	123,73
	7	6,46	6,27	6,38	127,85
	8	6,46	6,27	6,38	127,85
	9	6,25	6,07	6,18	123,73
	10	6,46	6,27	6,38	127,85
	11	6,25	6,07	6,18	123,73
	12	6,46	6,27	6,38	127,85
6	1	6,92	6,72	6,84	136,99
	2	6,25	6,07	6,18	123,73
	3	6,92	6,72	6,84	136,99
	4	6,69	6,50	6,62	132,57
	5	6,92	6,72	6,84	136,99
	6	6,69	6,50	6,62	132,57
	7	6,92	6,72	6,84	136,99
	8	6,92	6,72	6,84	136,99
	9	6,69	6,50	6,62	132,57
	10	6,92	6,72	6,84	136,99
	11	6,69	6,50	6,62	132,57
	12	6,92	6,72	6,84	136,99

Tabela J.1 – Custo com energia do sistema de recirculação individual para o condomínio Palmas Central (continuação).

Ano	Mês	Custo por unidade (R\$)			Custo total para o condomínio (R\$)
		Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	
7	1	7,41	7,20	7,33	146,79
	2	6,69	6,50	6,62	132,58
	3	7,41	7,20	7,33	146,79
	4	7,17	6,97	7,09	142,05
	5	7,41	7,20	7,33	146,79
	6	7,17	6,97	7,09	142,05
	7	7,41	7,20	7,33	146,79
	8	7,41	7,20	7,33	146,79
	9	7,17	6,97	7,09	142,05
	10	7,41	7,20	7,33	146,79
	11	7,17	6,97	7,09	142,05
	12	7,41	7,20	7,33	146,79
8	1	7,94	7,71	7,85	157,28
	2	7,17	6,97	7,09	142,06
	3	7,94	7,71	7,85	157,28
	4	7,68	7,46	7,60	152,21
	5	7,94	7,71	7,85	157,28
	6	7,68	7,46	7,60	152,21
	7	7,94	7,71	7,85	157,28
	8	7,94	7,71	7,85	157,28
	9	7,68	7,46	7,60	152,21
	10	7,94	7,71	7,85	157,28
	11	7,68	7,46	7,60	152,21
	12	7,94	7,71	7,85	157,28

Tabela J.1 – Custo com energia do sistema de recirculação individual para o condomínio Palmas Central (continuação).

Ano	Mês	Custo por unidade (R\$)			Custo total para o condomínio (R\$)
		Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	
9	1	8,51	8,26	8,42	168,52
	2	7,69	7,46	7,60	152,21
	3	8,51	8,26	8,42	168,52
	4	8,23	8,00	8,14	163,09
	5	8,51	8,26	8,42	168,52
	6	8,23	8,00	8,14	163,09
	7	8,51	8,26	8,42	168,52
	8	8,51	8,26	8,42	168,52
	9	8,23	8,00	8,14	163,09
	10	8,51	8,26	8,42	168,52
	11	8,23	8,00	8,14	163,09
	12	8,51	8,26	8,42	168,52
10	1	9,12	8,86	9,02	180,57
	2	8,23	8,00	8,14	163,10
	3	9,12	8,86	9,02	180,57
	4	8,82	8,57	8,73	174,75
	5	9,12	8,86	9,02	180,57
	6	8,82	8,57	8,73	174,75
	7	9,12	8,86	9,02	180,57
	8	9,12	8,86	9,02	180,57
	9	8,82	8,57	8,73	174,75
	10	9,12	8,86	9,02	180,57
	11	8,82	8,57	8,73	174,75
	12	9,12	8,86	9,02	180,57

Apêndice K

Tabela K.1 – Economia financeira para os três cenários de potencial de economia de água.

Ano	Mês	Economia (R\$)		
		Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
1	1	606,78	758,48	884,61
	2	409,92	512,40	614,88
	3	606,78	758,48	884,61
	4	537,44	647,24	757,04
	5	606,78	758,48	884,61
	6	537,44	647,24	757,04
	7	606,78	758,48	884,61
	8	606,78	758,48	884,61
	9	537,44	647,24	757,04
	10	606,78	758,48	884,61
	11	537,44	647,24	757,04
	12	606,78	758,48	884,61
2	1	648,04	810,05	944,76
	2	437,80	547,24	656,69
	3	648,04	810,05	944,76
	4	573,99	691,25	808,52
	5	648,04	810,05	944,76
	6	573,99	691,25	808,52
	7	648,04	810,05	944,76
	8	648,04	810,05	944,76
	9	573,99	691,25	808,52
	10	648,04	810,05	944,76
	11	573,99	691,25	808,52
	12	648,04	810,05	944,76

Tabela K.1 – Economia financeira para os três cenários de potencial de economia de água (continuação).

Ano	Mês	Economia (R\$)		
		Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
3	1	692,11	865,14	1.009,01
	2	467,57	584,46	701,35
	3	692,11	865,14	1.009,01
	4	613,02	738,26	863,50
	5	692,11	865,14	1.009,01
	6	613,02	738,26	863,50
	7	692,11	865,14	1.009,01
	8	692,11	865,14	1.009,01
	9	613,02	738,26	863,50
	10	692,11	865,14	1.009,01
	11	613,02	738,26	863,50
	12	692,11	865,14	1.009,01
4	1	739,17	923,97	1.077,62
	2	499,36	624,20	749,04
	3	739,17	923,97	1.077,62
	4	654,70	788,46	922,22
	5	739,17	923,97	1.077,62
	6	654,70	788,46	922,22
	7	739,17	923,97	1.077,62
	8	739,17	923,97	1.077,62
	9	654,70	788,46	922,22
	10	739,17	923,97	1.077,62
	11	654,70	788,46	922,22
	12	739,17	923,97	1.077,62

Tabela K.1 – Economia financeira para os três cenários de potencial de economia de água (continuação).

Ano	Mês	Economia (R\$)		
		Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
5	1	789,44	986,80	1.150,90
	2	533,32	666,65	799,97
	3	789,44	986,80	1.150,90
	4	699,22	842,08	984,93
	5	789,44	986,80	1.150,90
	6	699,22	842,08	984,93
	7	789,44	986,80	1.150,90
	8	789,44	986,80	1.150,90
	9	699,22	842,08	984,93
	10	789,44	986,80	1.150,90
	11	699,22	842,08	984,93
	12	789,44	986,80	1.150,90
6	1	843,12	1.053,90	1.229,16
	2	569,58	711,98	854,37
	3	843,12	1.053,90	1.229,16
	4	746,77	899,34	1.051,90
	5	843,12	1.053,90	1.229,16
	6	746,77	899,34	1.051,90
	7	843,12	1.053,90	1.229,16
	8	843,12	1.053,90	1.229,16
	9	746,77	899,34	1.051,90
	10	843,12	1.053,90	1.229,16
	11	746,77	899,34	1.051,90
	12	843,12	1.053,90	1.229,16

Tabela K.1 – Economia financeira para os três cenários de potencial de economia de água (continuação).

Ano	Mês	Economia (R\$)		
		Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
7	1	900,45	1.125,56	1.312,74
	2	608,31	760,39	912,47
	3	900,45	1.125,56	1.312,74
	4	797,55	960,49	1.123,43
	5	900,45	1.125,56	1.312,74
	6	797,55	960,49	1.123,43
	7	900,45	1.125,56	1.312,74
	8	900,45	1.125,56	1.312,74
	9	797,55	960,49	1.123,43
	10	900,45	1.125,56	1.312,74
	11	797,55	960,49	1.123,43
	12	900,45	1.125,56	1.312,74
8	1	961,68	1.202,10	1.402,01
	2	649,68	812,10	974,52
	3	961,68	1.202,10	1.402,01
	4	851,78	1.025,80	1.199,83
	5	961,68	1.202,10	1.402,01
	6	851,78	1.025,80	1.199,83
	7	961,68	1.202,10	1.402,01
	8	961,68	1.202,10	1.402,01
	9	851,78	1.025,80	1.199,83
	10	961,68	1.202,10	1.402,01
	11	851,78	1.025,80	1.199,83
	12	961,68	1.202,10	1.402,01

Tabela K.1 – Economia financeira para os três cenários de potencial de economia de água (continuação).

Ano	Mês	Economia (R\$)		
		Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
9	1	1.027,08	1.283,84	1.497,34
	2	693,86	867,32	1.040,78
	3	1.027,08	1.283,84	1.497,34
	4	909,70	1.095,56	1.281,41
	5	1.027,08	1.283,84	1.497,34
	6	909,70	1.095,56	1.281,41
	7	1.027,08	1.283,84	1.497,34
	8	1.027,08	1.283,84	1.497,34
	9	909,70	1.095,56	1.281,41
	10	1.027,08	1.283,84	1.497,34
	11	909,70	1.095,56	1.281,41
	12	1.027,08	1.283,84	1.497,34
10	1	1.096,92	1.371,15	1.599,16
	2	741,04	926,30	1.111,56
	3	1.096,92	1.371,15	1.599,16
	4	971,56	1.170,06	1.368,55
	5	1.096,92	1.371,15	1.599,16
	6	971,56	1.170,06	1.368,55
	7	1.096,92	1.371,15	1.599,16
	8	1.096,92	1.371,15	1.599,16
	9	971,56	1.170,06	1.368,55
	10	1.096,92	1.371,15	1.599,16
	11	971,56	1.170,06	1.368,55
	12	1.096,92	1.371,15	1.599,16