DANIEL SETRAK SOWMY

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA: METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE
AQUECEDORES DE ÁGUA RESIDENCIAIS
DE ACUMULAÇÃO ELÉTRICOS**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia.**

São Paulo

2007

DANIEL SETRAK SOWMY

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA: METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE
AQUECEDORES DE ÁGUA RESIDENCIAIS
DE ACUMULAÇÃO ELÉTRICOS**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia.**

**Área de Concentração:
Engenharia de Sistemas Prediais**

**Orientador:
Prof. Dr. Racine Tadeu Araújo Prado**

**São Paulo
2007**

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência do seu orientador.

São Paulo, 16 de maio de 2007.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Sowmy, Daniel Setrak

Eficiência energética: metodologia para avaliação de aquecedores de água residenciais de acumulação elétricos / D.S.

Sowmy. -- ed.rev. -- São Paulo, 2007.

113 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

**1.Sistemas prediais 2.Sistemas de aquecimento de água
3.Aquecimento (Eficiência) I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil II.
t.**

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVO	20
3	AQUECEDOR DE ÁGUA RESIDENCIAL DE ACUMULAÇÃO ELÉTRICO.....	21
3.1	Componentes do aquecedor.....	21
3.1.1	Reservatório	22
3.1.2	Resistência elétrica	23
3.1.3	Termostato	23
3.2	Funcionamento do aquecedor	24
3.3	Eficiência energética do aquecedor	24
3.4	Métodos de avaliação de eficiência energética para aquecedor de acumulação elétrico	26
3.4.1	DOE – U. S. Department of Energy	27
3.4.2	IEC – International Electrotechnical Commision	28
3.4.3	Australian Standard e New Zealand Standard.....	29
4	METODOLOGIA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL	31
4.1	Parâmetros selecionados.....	31
4.1.1	Volume armazenado	32
4.1.2	Perda de calor em 24 horas.....	33
4.1.3	Produção de água quente	35
4.1.4	Tempo de reaquecimento	36
4.1.5	Desvio do controle de temperatura	36
4.1.6	Variação cíclica de temperatura.....	37
4.1.7	Fluxograma do método	37
4.2	Cálculo da eficiência.....	38
4.2.1	Ciclo de operação	38
4.2.2	Cálculo do índice de eficiência.....	41
4.3	Bancada de ensaio.....	42
4.3.1	Hidráulica	42
4.3.2	Elétrica	43
4.3.3	Instrumentação.....	44
4.3.4	Configuração da bancada	50
4.3.5	Aferição e ajuste da bancada.....	50
4.4	Variáveis monitoradas	51
4.5	Aquecedores ensaiados	52
5	COMPILAÇÃO E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS	57
5.1	Resultados obtidos	57
5.1.1	Volume armazenado	57
5.1.2	Perda de calor em 24 horas	58
5.1.3	Produção de água quente	60
5.1.4	Tempo de reaquecimento	62

5.1.5	Desvio do controle de temperatura	64
5.1.6	Variação cíclica de temperatura.....	65
5.2	Calculo da eficiência.....	66
6	CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS	76
	ANEXO A – PERDA DE CALOR EM 24 HORAS	81
	ANEXO B – PRODUÇÃO DE ÁGUA QUENTE	91
	ANEXO C – TEMPO DE REAQUECIMENTO	101
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistemas de aquecimento por faixa de consumo (Eletrobras, 2005)	14
Figura 2 – Sistemas de aquecimento por fonte de energia (Eletrobras, 2005).....	15
Figura 3 – Aquecedor elétrico horizontal (Cumulus, 2004)	21
Figura 4 – Aquecedor elétrico vertical (Cumulus, 2004).....	22
Figura 5 – Eficiência energética dos aquecedores	31
Figura 6 – Fluxograma do método	38
Figura 7 – Bomba hidráulica.....	42
Figura 8 – Estabilizador de tensão, analisador de rede e multímetro com alicate.....	43
Figura 9 – Sistema de aquisição de dados	44
Figura 10 – Bloco 1 – “ <i>Virtual Instrument</i> ” desenvolvido	46
Figura 11 – Bloco 2 – “ <i>Virtual Instrument</i> ” desenvolvido	47
Figura 12 – Termopar instalado na bainha de cobre.....	48
Figura 13 – Termopar instalado na placa metálica.....	48
Figura 14 – Transformador de corrente.....	49
Figura 15 – Hidrômetro gerador de pulso digital.....	49
Figura 16 – Esquema da bancada de testes e posicionamento dos sensores.....	52
Figura 17 – Fotos dos aquecedores	55
Figura 18 – Fotos dos aquecedores	56
Figura 19 – Aquecedor 7: Consumo de energia e temperatura do aquecedor.....	60
Figura 20 – Aquecedor 5: Produção de Água Quente.....	62
Figura 21 – Aquecedor 3: Tempo de reaquecimento e energia consumida	64
Figura 22 – Consumo de energia durante um ciclo de operação	72
Figura 23 – Elevação média de temperatura obtida pelos aquecedores	73
Figura 24 – Variação cíclica da temperatura.....	74
Figura 25 – Eficiência energética X Elevação média da temperatura.....	77

Figura 26 – Logotipos do INMETRO e PBE	79
Figura 27 – Logotipo do Selo Procel	79
Figura 28 – Aquecedor 1: Consumo de energia e temperatura do aquecedor	81
Figura 29 – Aquecedor 2: Consumo de energia e temperatura do aquecedor	82
Figura 30 – Aquecedor 3: Consumo de energia e temperatura do aquecedor	83
Figura 31 – Aquecedor 4: Consumo de energia e temperatura do aquecedor	84
Figura 32 – Aquecedor 5: Consumo de energia e temperatura do aquecedor	85
Figura 33 – Aquecedor 6: Consumo de energia e temperatura do aquecedor	86
Figura 34 – Aquecedor 7: Consumo de energia e temperatura do aquecedor	87
Figura 35 – Aquecedor 8: Consumo de energia e temperatura do aquecedor	88
Figura 36 – Aquecedor 9: Consumo de energia e temperatura do aquecedor	89
Figura 37 – Aquecedor 10: Consumo de energia e temperatura do aquecedor	90
Figura 38 – Aquecedor 1: Produção de Água Quente.....	91
Figura 39 – Aquecedor 2: Produção de Água Quente.....	92
Figura 40 – Aquecedor 3: Produção de Água Quente.....	93
Figura 41 – Aquecedor 4: Produção de Água Quente.....	94
Figura 42 – Aquecedor 5: Produção de Água Quente.....	95
Figura 43 – Aquecedor 6: Produção de Água Quente.....	96
Figura 44 – Aquecedor 7: Produção de Água Quente.....	97
Figura 45 – Aquecedor 8: Produção de Água Quente.....	98
Figura 46 – Aquecedor 9: Produção de Água Quente.....	99
Figura 47 – Aquecedor 10: Produção de Água Quente.....	100
Figura 48 – Aquecedor 1: Tempo de reaquecimento e energia consumida	101
Figura 49 – Aquecedor 2: Tempo de reaquecimento e energia consumida	102
Figura 50 – Aquecedor 3: Tempo de reaquecimento e energia consumida	103
Figura 51 – Aquecedor 4: Tempo de reaquecimento e energia consumida	104
Figura 52 – Aquecedor 5: Tempo de reaquecimento e energia consumida	105
Figura 53 – Aquecedor 6: Tempo de reaquecimento e energia consumida	106

Figura 54 – Aquecedor 7: Tempo de reaquecimento e energia consumida	107
Figura 55 – Aquecedor 8: Tempo de reaquecimento e energia consumida	108
Figura 56 – Aquecedor 9: Tempo de reaquecimento e energia consumida	109
Figura 57 – Aquecedor 10: Tempo de reaquecimento e energia consumida	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Perda térmica passiva máxima em 24 horas calculada pelo método DOE.	28
Tabela 2 – Perda térmica máxima em 24 horas conforme a AS/NZS 1056.1 tabela 2.1.	30
Tabela 3 – Calibração das pontas de prova.	50
Tabela 4 – Calibração do hidrômetro.	51
Tabela 5 – Especificações técnicas dos aquecedores 1 a 5	53
Tabela 6 – Especificações técnicas dos aquecedores 6 a 10	54
Tabela 7 – Volumes armazenados medidos.	58
Tabela 8 – Aquecedores 1 a 10: Perda por 24 horas	59
Tabela 9 – Aquecedores 1 a 10: Produção de água quente	61
Tabela 10 – Aquecedores 1 a 10: Tempo de reaquecimento e energia consumida	63
Tabela 11 – Aquecedores 1 a 10: Desvio do controle de temperatura	65
Tabela 12 – Aquecedores 1 a 10: Variação cíclica da temperatura	66
Tabela 13 – Aquecedor 1: Cálculo da eficiência	67
Tabela 14 – Aquecedor 2: Cálculo da eficiência	67
Tabela 15 – Aquecedor 3: Cálculo da eficiência	68
Tabela 16 – Aquecedor 4: Cálculo da eficiência	68
Tabela 17 – Aquecedor 5: Cálculo da eficiência	69
Tabela 18 – Aquecedor 6: Cálculo da eficiência	69
Tabela 19 – Aquecedor 7: Cálculo da eficiência	70
Tabela 20 – Aquecedor 8: Cálculo da eficiência	70
Tabela 21 – Aquecedor 9: Cálculo da eficiência	71
Tabela 22 – Aquecedor 10: Cálculo da eficiência	71
Tabela 23 – Classificação dos aquecedores (EE - eficiência energética)	78
Tabela 24 – Aquecedor 1: Perda por 24 horas	81
Tabela 25 – Aquecedor 2: Perda por 24 horas	82

Tabela 26 – Aquecedor 3: Perda por 24 horas.....	83
Tabela 27 – Aquecedor 4: Perda por 24 horas.....	84
Tabela 28 – Aquecedor 5: Perda por 24 horas.....	85
Tabela 29 – Aquecedor 6: Perda por 24 horas.....	86
Tabela 30 – Aquecedor 7: Perda por 24 horas.....	87
Tabela 31 – Aquecedor 8: Perda por 24 horas.....	88
Tabela 32 – Aquecedor 9: Perda por 24 horas.....	89
Tabela 33 – Aquecedor 10: Perda por 24 horas.....	90
Tabela 34 – Aquecedor 1: Média ($T_{taq} - T_{taf}$).....	91
Tabela 35 – Aquecedor 2: Média ($T_{taq} - T_{taf}$).....	92
Tabela 36 – Aquecedor 3: Média ($T_{taq} - T_{taf}$).....	93
Tabela 37 – Aquecedor 4: Média ($T_{taq} - T_{taf}$).....	94
Tabela 38 – Aquecedor 5: Média ($T_{taq} - T_{taf}$).....	95
Tabela 39 – Aquecedor 6: Média ($T_{taq} - T_{taf}$).....	96
Tabela 40 – Aquecedor 7: Média ($T_{taq} - T_{taf}$).....	97
Tabela 41 – Aquecedor 8: Média ($T_{taq} - T_{taf}$).....	98
Tabela 42 – Aquecedor 9: Média ($T_{taq} - T_{taf}$).....	99
Tabela 43 – Aquecedor 10: Média ($T_{taq} - T_{taf}$).....	100
Tabela 44 – Aquecedor 1: Tempo de reaquecimento e energia consumida.....	101
Tabela 45 – Aquecedor 2: Tempo de reaquecimento e energia consumida.....	102
Tabela 46 – Aquecedor 3: Tempo de reaquecimento e energia consumida.....	103
Tabela 47 – Aquecedor 4: Tempo de reaquecimento e energia consumida.....	104
Tabela 48 – Aquecedor 5: Tempo de reaquecimento e energia consumida.....	105
Tabela 49 – Aquecedor 6: Tempo de reaquecimento e energia consumida.....	106
Tabela 50 – Aquecedor 7: Tempo de reaquecimento e energia consumida.....	107
Tabela 51 – Aquecedor 8: Tempo de reaquecimento e energia consumida.....	108
Tabela 52 – Aquecedor 9: Tempo de reaquecimento e energia consumida.....	109
Tabela 53 – Aquecedor 10: Tempo de reaquecimento e energia consumida.....	110

LISTA DE SÍMBOLOS

T_{aq} - Temperatura no interior do reservatório próxima a saída para consumo ($^{\circ}\text{C}$)

T_{af} - Temperatura no interior do reservatório próxima a entrada de água fria ($^{\circ}\text{C}$)

T_{taq} - Temperatura no tubo da saída de água quente para consumo ($^{\circ}\text{C}$)

T_{taf} - Temperatura no tubo de entrada de água fria ($^{\circ}\text{C}$)

T_{amb} - Temperatura ambiente no laboratório ($^{\circ}\text{C}$)

T_{maxaq} - T_{aq} máxima atingida ($^{\circ}\text{C}$)

T_{minaf} - T_{af} mínima atingida ($^{\circ}\text{C}$)

DCT - Desvio do controle de temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

DT - Elevação da temperatura da água ($^{\circ}\text{C}$)

VCT - Variação cíclica de temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

E_1 - Energia consumida para manter a água aquecida no interior do aquecedor sem retirada de água (Wh)

E_2 - Energia consumida para reaquecer a água do aquecedor após a utilização de todo o volume de água armazenado (Wh)

E_{24} - Perda por 24 horas (Wh)

E_{aq} - Energia retirada na forma de água quente (Wh)

E_P - Energia elétrica consumida no teste de perda passiva de calor (Wh)

E_T - Energia total consumida durante um ciclo completo de aquecimento e utilização de todo volume de água armazenada no aquecedor (Wh)

V_{aq} - Volume de água quente (l)

t_1 - Tempo em repouso (sem demanda de água) (h)

t_2 - Tempo de reaquecimento (h)

t_P - Duração do teste de perda passiva de calor (h)

RESUMO

Este trabalho propõe um método com objetivo de avaliar a eficiência energética de aquecedores de água residenciais de acumulação elétricos. Os aquecedores foram submetidos a um ciclo de operação simulando uma condição de uso para o cálculo da eficiência. Este ciclo de duração de um dia é composto pelas fases: produção de água quente, reaquecimento e manutenção da temperatura interna. O método foi aplicado no programa experimental e permitiu a identificação de diversos parâmetros referentes ao funcionamento dos aquecedores, tais como: perda passiva por 24 horas, produção de água quente, tempo de reaquecimento, variação da temperatura interna da água e a sua eficiência energética.

Palavras-chave: aquecimento de água, aquecedor de acumulação, aquecimento de água residencial elétrico, eficiência energética.

ABSTRACT

This work proposes a method with objective of evaluating the energy efficiency of electrical residential storage water heaters. The heaters were submitted to an operation cycle simulating a use condition for the calculation of the efficiency. This cycle with duration of one day is composed by the phases: hot water withdrawal, temperature recovery and standby thermal loss. The method was applied in the experimental program and it allowed the identification of several parameters regarding the operation of such heaters as: standby thermal loss per 24 hours, hot water rate output, reheating time, cyclic variation of the temperature and its energy efficiency.

Keywords: water heater, storage water heater, electric water heater, energy efficiency.

1 INTRODUÇÃO

O consumo residencial de energia elétrica no Brasil em 2004, de acordo com o Balanço Energético divulgado pelo Ministério de Minas e Energia (2005), foi de 78.581 GWh. Segundo o último censo realizado pelo IBGE (2000), o número de domicílios permanentes com energia elétrica era de 41.596.986. Desta forma, chega-se a uma estimativa de consumo anual médio por domicílio de 1.889 kWh.

Segundo Prado e Gonçalves (1998) uma parcela substancial desta energia é utilizada em sistemas de aquecimento de água.

Apesar de o Brasil ter uma matriz energética formada principalmente por usinas hidrelétricas, o consumo de energia elétrica gera um impacto ambiental que pode ser avaliado. Taborianski e Prado (2004) apresentam um método que contabiliza a contribuição de diversos tipos de aquecedores de água para a variação do estoque de gases de efeito estufa na atmosfera. O uso eficiente de energia elétrica auxilia a preservação do meio ambiente diminuindo, ou desacelerando, sua degradação.

Os sistemas prediais de água quente são classificados conforme Ilha et al. (1996) em: individuais, centrais privados e centrais coletivos. Os individuais são instalados em um único ponto de utilização dispensando a necessidade de uma rede de água quente. Os centrais privados possuem um equipamento responsável pelo aquecimento da água e uma rede de distribuição até os pontos de utilização de uma mesma unidade. Os centrais coletivos possuem um equipamento responsável pelo

aquecimento da água e uma rede de distribuição até os pontos de utilização de diversas unidades.

Pode-se observar na Figura 1 a distribuição dos tipos de sistema de aquecimento no Brasil por faixa de consumo. Nela constata-se que os sistemas centrais estão concentrados nas maiores faixas de consumo de energia.

Figura 1 – Sistemas de aquecimento por faixa de consumo (Eletrobras, 2005)

Os aquecedores podem ser classificados conforme a fonte da energia que será transformada em calor: elétrica, gás combustível e radiação solar. A Figura 2 apresenta a distribuição dos sistemas de aquecimento nas unidades habitacionais no Brasil.

Figura 2 – Sistemas de aquecimento por fonte de energia (Eletrobras, 2005)

Em Reddy (1995) um comparativo foi feito entre dois sistemas de aquecimento de água: solar e elétrico. Neste estudo o autor selecionou como variáveis mais relevantes o custo de instalação do sistema de aquecimento de água solar e a tarifa cobrada pela energia elétrica. Da relação entre estas duas variáveis foi identificado o ponto em que o investimento em um sistema de aquecimento solar passa a ser vantajoso economicamente.

Em Arruda e Prado (2005) são apresentados resultados que demonstram o aumento da eficiência de um sistema de aquecimento solar através do controle da vazão de água que circula pelos coletores solares. O estudo se aplica aos sistemas com grande número de coletores onde a termossifonagem fica prejudicada.

Lima et al. (2006) apresentam um estudo que compara formas de dimensionamento de um sistema de aquecimento solar para São Paulo. Tendo como referência a proposta adotada pelos fabricantes, cuja estratégia é dimensionar o sistema para o

inverno, os autores analisaram o ganho que se obteria se o sistema utilizasse a configuração ajustada para o melhor funcionamento durante o ano todo.

Conforme Ilha (1991) o perfil de consumo de água quente depende do número de pessoas, suas atividades, fatores culturais, climáticos e quantidade de aparelhos sanitários instalados na unidade habitacional.

O aquecedor de água tem um papel fundamental no sistema predial de água quente. Segundo Petrucci (1998), onde são discutidos diversos métodos de dimensionamento de aquecedores de acumulação, “um aquecedor mal dimensionado pode trazer prejuízos sérios ao usuário” e “uma unidade subdimensionada geralmente traz desconforto ao usuário”.

É escassa a informação disponível sobre os aquecedores de água residenciais de acumulação elétricos fabricados no Brasil. As normas NBR10674 (ABNT, 1989) e NBR10675 (ABNT, 1989) estabelecem para este tipo de aquecedor apenas os requisitos e métodos de ensaios referentes à sua segurança elétrica, não estabelecendo regulamentação quanto à sua eficiência energética. Dados de consumo de energia e a eficiência dos aquecedores não estão disponíveis para os consumidores e projetistas. Neste cenário existe a necessidade de estudos que disponibilizem informações referentes ao funcionamento deste tipo de equipamento.

Os catálogos e manuais dos fabricantes destes aquecedores citam apenas características construtivas dos equipamentos, tais como: volume de água

armazenado, potência da resistência elétrica, pressão hidrostática máxima suportada e suas dimensões.

Informações como o volume de água quente disponível para consumo, o tempo de reaquecimento, o consumo de energia elétrica, a temperatura efetiva de operação e as perdas de calor no reservatório não estão disponíveis para consumidores e projetistas.

A pesquisa nesta área fornece não somente dados para o aprimoramento dos aquecedores, mas também para comparações com outras formas de aquecimento de água para uso residencial.

Em Atikol et al. (2006), um aquecedor de 121 litros foi submetido a diversas retiradas de água quente com vazão de 5 litros por minuto. O volume retirado foi o necessário para, após a mistura com água fria, gerar 50 litros de água quente para banho. O objetivo era o de avaliar o comportamento do equipamento conforme se aumentava a duração dos intervalos entre as retiradas de água quente. Os intervalos foram de 1 a 24 horas e o observado foi que com o decorrer do tempo o gradiente de temperaturas no interior do reservatório vertical diminui e a zona de transição (*thermocline*) se desfaz.

Em Fernández-Seara et al. (2006) um aquecedor de acumulação vertical de 150 litros foi avaliado operando no modo estático, ou seja, sem circulação de água. Foram monitorados o tempo de aquecimento, de resfriamento e a energia consumida. O resultado indicou correlação entre o tempo de aquecimento e a

potência do aquecedor. Já o resfriamento foi influenciado principalmente pela temperatura ambiente.

O mesmo equipamento foi submetido a um segundo estudo no modo dinâmico de operação em Fernández-Seara et al. (2006). A montagem permitiu seis possibilidades de entrada e saída de água. O aquecedor foi submetido a uma demanda de água quente com vazões de 5, 10 e 15 litros por minuto. Após as avaliações propostas pelos autores a configuração mais eficiente foi a composta pela saída de água quente na face superior do tanque e entrada de água fria pela lateral inferior através de um tubo em curva de 90° para baixo.

No que se refere à estratificação da temperatura da água no interior de aquecedores, em Sateikis (2002), tanques verticais de 0,3 e 0,9 metros de diâmetro por 1,6 e 2,0 metros de altura respectivamente foram submetidos a um programa experimental com objetivo de determinar a quantidade de energia térmica armazenada. O estudo determinou também que a zona de transição térmica destes equipamentos estava situada a 0,47 metros da base.

A estratificação em reservatórios térmicos foi avaliada por Jordan e Furbo (2005). Foram simulados dois diferentes comprimentos de tubo na entrada da água fria do reservatório com o objetivo de avaliar uma possível melhora no desempenho de um aquecedor de pequeno porte. Como resultado obteve-se uma estimativa de redução de 3 a 7% no consumo de energia de apoio.

Quanto às perdas térmicas que ocorrem em uma rede de distribuição de água quente, em Cheng et al. (2006) foi demonstrado um modelo empírico que simplifica a sua estimativa.

A modelagem desenvolvida em Kara e Arslanturk (2004) propõe um dimensionamento do sistema de circulação de água para que se obtenha água a 60°C nos aquecedores centrais privados da edificação nos casos em que o aquecedor central privado recebe de um aquecedor central coletivo água com temperatura por volta de 90°C. Esta água circula por uma serpentina no interior do aquecedor central privado aquecendo a água que será utilizada pelo usuário.

2 OBJETIVO

O objetivo é propor um método que permita avaliar a eficiência energética dos aquecedores de água residenciais de acumulação elétricos.

Definido o método, um conjunto de equipamentos será submetido a um programa experimental que fornecerá dados sobre o seu funcionamento. Informações como a temperatura efetiva da água quente disponível para o consumo, perda passiva de calor e tempo necessário para o reaquecimento da água serão compiladas para validar a aplicabilidade do método proposto aos aquecedores nacionais e disponibilizar parâmetros que podem ser empregados no dimensionamento de sistemas de aquecimento de água.

Até o momento da conclusão deste trabalho o comitê responsável pela elaboração da nova norma para aquecedores de água residenciais de acumulação elétricos estava em recesso.

A expectativa é de que as informações compiladas neste trabalho subsidiem a elaboração da nova norma.

3 AQUECEDOR DE ÁGUA RESIDENCIAL DE ACUMULAÇÃO ELÉTRICO

Neste trabalho os aquecedores serão considerados parte de um sistema predial de água quente central privado, ou seja, cada unidade habitacional é atendida por um aquecedor individual.

Nos itens a seguir são identificados os principais componentes do aquecedor e o seu funcionamento.

3.1 COMPONENTES DO AQUECEDOR

O aquecedor elétrico de acumulação é composto pelo reservatório, resistência elétrica e termostato, cujas descrições estão nos itens a seguir. A Figura 3 apresenta o esquema de um aquecedor horizontal.

Figura 3 – Aquecedor elétrico horizontal (Cumulus, 2004)

A Figura 4 apresenta o esquema de um aquecedor vertical.

Figura 4 – Aquecedor elétrico vertical (Cumulus, 2004)

3.1.1 Reservatório

O reservatório é o local de acumulação e aquecimento de água para o consumo. Seu formato é cilíndrico podendo estar na posição vertical ou horizontal. É constituído de três camadas: tanque interno, isolamento térmico e revestimento externo.

O tanque interno é construído com chapas de aço inoxidável ou cobre e fica em contato direto com a água. Sua espessura é dimensionada para suportar a pressão hidrostática a que será submetido o equipamento.

O isolamento térmico é a camada responsável pela manutenção da temperatura no interior do tanque. Esta camada é feita com a aplicação de materiais de baixa condutividade térmica tais como poliuretano injetado, lã de vidro e de rocha. O revestimento externo tem como funções proteger a camada isolante, dar o acabamento estético ao produto e servir de base de fixação das cintas para instalação do equipamento. Diversos materiais são empregados nesta última camada, entre eles aço inoxidável e plástico.

Os volumes fabricados para uso residencial variam atualmente de 50 a 1000 litros no mercado nacional.

3.1.2 Resistência elétrica

A resistência elétrica é a fonte geradora de calor que aquece a água. Sua posição varia de acordo com o reservatório. A potência instalada varia de 1500 a 5000 Watts conforme o volume de água do reservatório. A tensão de alimentação é de 220 volts.

3.1.3 Termostato

O termostato controla o acionamento da resistência elétrica. Este dispositivo monitora a temperatura da água em um ponto do aquecedor e energiza a resistência, caso a temperatura esteja abaixo da temperatura mínima configurada ou a desliga caso a temperatura esteja acima da máxima configurada.

Dois tipos de termostatos são utilizados no mercado brasileiro, o de contato e de imersão. O termostato de contato é fixado na parede externa do tanque interno do

aquecedor. O termostato de imersão fica submerso na água no interior do reservatório. Nos dois casos o ponto escolhido para instalação do termostato influencia na temperatura da água devido à estratificação no aquecedor.

3.2 FUNCIONAMENTO DO AQUECEDOR

O reservatório tem a função de acumular e manter a água aquecida. A resistência elétrica é acionada para aquecer a água. O termostato é um componente sensível à temperatura que aciona a resistência elétrica. O seu funcionamento é automático. Quando está em operação, a resistência interna é acionada pelo termostato de acordo com o seu ajuste. Este ajuste especifica qual a temperatura mínima que deve fazer com que o termostato ligue a resistência elétrica e qual a temperatura máxima que faz com que ele a desligue. Desta forma a água é mantida aquecida no interior do reservatório até o momento em que surge a demanda de uso.

A partir do entendimento da operação do aquecedor é possível identificar que mesmo nos períodos em que não há demanda de água quente existe gasto de energia. Quanto mais eficiente o reservatório for na manutenção da temperatura interna, menor o gasto de energia para a reposição desta perda de calor.

3.3 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO AQUECEDOR

A eficiência energética do aquecedor é diretamente proporcional à razão entre fornecimento de água quente e o consumo de energia. A seguir serão apresentados estudos que avaliaram parâmetros correlacionados à eficiência dos aquecedores.

Entre os parâmetros que influenciam o desempenho dos aquecedores fabricados no Brasil identificados em Barreto (2001) está a perda de calor em 24 horas. Esse relatório apresenta as diferentes formas de operação dos aquecedores no que diz respeito à atuação intermitente da resistência elétrica e suas perdas térmicas.

Entre as pesquisas que avaliaram de forma positiva a utilização de aquecedores com dois tanques (ou reservatórios) em série está Kar e Al-Dossary (1995) que confirma um volume de água quente 10% maior com um consumo de energia 4,5% menor ao utilizar dois reservatórios. A comparação foi entre aquecedores com 100% do volume armazenado em um reservatório e outros com dois reservatórios em série cujas capacidades de armazenagem foram de 10 a 30% e 70 a 80% do volume total armazenado.

Outra abordagem, adotada em Sezai et al. (2005), é a de propor a utilização de duas resistências elétricas. Segundo o autor, a posição tradicional, na parte inferior do tanque vertical, faz com que a resistência seja acionada mesmo que o volume retirado do reservatório seja pequeno. Ao se instalar uma segunda resistência em uma posição mais elevada, o sistema aciona, de acordo com o volume retirado, uma das resistências. Na opção pela segunda resistência o volume de água mantido aquecido é menor o que reduz o consumo de energia.

Características construtivas como a relação entre altura e diâmetro dos aquecedores verticais e o formato da conexão de entrada de água fria foram objeto do estudo desenvolvido em Hegazy e Diab (2002). Neste artigo foi confirmado o aumento da eficiência do aquecedor de 68 para 73% conforme o aumento da relação altura (A)

sobre diâmetro (D) (de $A/D=1$ para $A/D=2$). No que se refere à entrada de água fria, a adoção de uma conexão que criasse o mínimo distúrbio na estratificação do reservatório também interferiu na eficiência do aquecedor.

Em Healy et al. (2003) foram avaliados os índices de desempenho obtidos pelos aquecedores nos Estados Unidos da América. Este estudo alerta para a proximidade entre a estreita faixa de variação destes índices nos aquecedores de melhor desempenho e a incerteza gerada pela metodologia adotada no país.

Em Fanney e Dougherty (1996) foi desenvolvido um modelo que simulou a restrição de acionamento dos aquecedores de acumulação durante os horários de pico da rede de energia elétrica. O objetivo foi de comprovar a possibilidade de redução do pico de demanda de energia gerada por este tipo de equipamento. O resultado foi a queda em até 7% no índice de eficiência dos aquecedores, desempenho que ainda estaria dentro dos padrões exigidos pelos Estados Unidos.

3.4 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA AQUECEDOR DE ACUMULAÇÃO ELÉTRICO

A norma brasileira para projeto de sistemas prediais de água quente NBR7198 (ABNT, 1993) não cita norma vigente no que se refere à eficiência energética para os aquecedores. Nela está citada a NBR10674 (ABNT, 1989) que contempla apenas os itens para segurança elétrica deste tipo de equipamento. Está também em vigor a NBR10675 (ABNT, 1989) que define os métodos de ensaio para os requisitos de segurança elétrica do equipamento.

Neste contexto foi necessário buscar nos métodos e regulamentações internacionais parâmetros que, adaptados à realidade brasileira, possam ser aplicados aos equipamentos fabricados no Brasil.

3.4.1 DOE – U. S. Department of Energy

O método adotado pelo DOE (U.S. Department of Energy, 2000) submete o equipamento a uma série de retiradas de água com vazão constante e volume proporcional ao total armazenado no reservatório. Entre as grandezas monitoradas estão a temperatura da água na saída do aquecedor e o consumo de energia elétrica.

As condições são as seguintes para execução dos procedimentos:

- Medição de consumo de energia elétrica com precisão de $\pm 1\%$ da leitura;
- Medição das temperaturas ambiente, entrada e saída de água com precisão de $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- Precisão na medição da temperatura interna do reservatório de $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

O DOE – U.S. Department of Energy define padrões mínimos de eficiência para os aquecedores elétricos de acumulação e determina, desde 29 de outubro de 2003, a máxima perda térmica passiva (percentual de energia térmica dissipada para o ambiente pelo aquecedor) conforme o volume armazenado (V em galões) de acordo com a inequação 1:

$$\text{Máxima Perda Térmica Passiva} \leq 0,30 + (27 / V) \quad (1)$$

Onde V é o volume armazenado em galões.

A Tabela 1 a seguir apresenta o resultado da aplicação desta fórmula aos volumes de reservatório usuais no mercado brasileiro.

Tabela 1 – Perda térmica passiva máxima em 24 horas calculada pelo método DOE.

Volume (litros)	Máxima perda térmica passiva em 24 horas (%)
100	32
150	24
200	19

3.4.2 IEC – International Electrotechnical Commission

O método adotado pela International Electrotechnical Commission (IEC, 1987) para medir o desempenho de aquecedores elétricos de acumulação de água para uso doméstico aplica sete procedimentos, quais sejam:

- Verificação da capacidade nominal;
- Perda passiva por 24 horas;
- Produção de água quente;
- Tempo de reaquecimento;
- Fator de mistura;
- Desvio do controle;
- Variação cíclica da temperatura.

Este método submete o equipamento a uma demanda de água quente com vazão constante proporcional ao volume do aquecedor e define as seguintes condições para execução dos procedimentos:

- Precisão na medida de temperatura de $\pm 0,5$ K;
- Temperatura ambiente 20 ± 2 °C;
- Umidade relativa menor que 85 %;
- Tensão de alimentação com variação menor que 5 %;
- Temperatura da água de entrada ajustada para 15 ± 2 °C.

3.4.3 Australian Standard e New Zealand Standard

O método descrito na Australian / New Zealand Standard 1056 partes 1 (AS/NZS, 1991) e 4 (AS/NZS, 1997) submete o aquecedor a três tipos de demanda de água quente. A demanda está dimensionada de acordo com o consumo típico do usuário daquele país. Em cada uma delas é retirado um percentual do volume total de acordo com o horário simulado. Os perfis reproduzem uma utilização regular ao longo do dia, outra mais concentrada no período da manhã e uma última mais concentrada no período da tarde.

A perda térmica máxima permitida em 24 horas é limitada de acordo com o volume de água quente produzido pelo aquecedor. Os dados retirados da norma AS/NZS 1056 Parte 1 tabela 2.1 para os volumes usualmente adotados no Brasil em equipamentos não pressurizados são os apresentados na Tabela 2:

Tabela 2 – Perda térmica máxima em 24 horas conforme a AS/NZS 1056.1 tabela 2.1.

Volume de água quente (litros)	Máxima perda térmica em 24 horas (kWh)
100	2,3
160	2,8
200	3,1

4 METODOLOGIA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão apresentados os parâmetros selecionados aos quais serão submetidos os aquecedores.

4.1 PARÂMETROS SELECIONADOS

A abordagem adotada neste estudo foi a de contabilizar a quantidade de energia retirada do aquecedor na forma de água quente e comparar com a energia consumida em duas parcelas principais. A primeira derivada da perda passiva de calor e a outra utilizada para aquecer a água após o uso de todo o volume reservado. A Figura 5 abaixo ilustra o conceito adotado para o cálculo da eficiência.

$$\text{Eficiência} = \frac{\text{Produção de água quente}}{\text{Consumo de energia elétrica}}$$

Perda passiva ↩ ↪ Reaquecimento

Figura 5 – Eficiência energética dos aquecedores

Para cada parcela de energia identificada na Figura 5 foi adotado um parâmetro adaptado da IEC 379 - *Methods for measuring the performance of electric storage water-heaters for household purposes* (IEC, 1987) conforme detalhado nos itens a seguir.

4.1.1 Volume armazenado

O volume armazenado será medido com o objetivo de aferir a diferença entre o volume nominal declarado pelo fabricante e o volume real de água disponível para o consumo. O volume real será o utilizado nos cálculos de eficiência energética do aquecedor.

O procedimento de medição é o seguinte:

- Instalação do aquecedor na bancada de ensaios;
- Nivelamento do aquecedor;
- Purga da rede de alimentação de água fria;
- Execução da conexão de entrada de água fria;
- Instalação de um respiro na saída de água quente para consumo com 10 cm de altura em relação ao ponto mais alto do aquecedor;
- Leitura do hidrômetro instalado na rede de alimentação de água fria;
- Abertura do registro na rede de alimentação de água fria;
- Interrupção do abastecimento de água fria ao transbordar água pelo respiro;
- Leitura do hidrômetro instalado na rede de alimentação de água fria;

O volume registrado pela diferença entre as leituras do hidrômetro é o volume armazenado.

4.1.2 Perda de calor em 24 horas

Este parâmetro é a energia consumida pelo aquecedor apenas para manter a água aquecida. Mesmo sem atender a uma demanda de consumo de água quente e contando com o isolamento térmico, o aquecedor perde calor para o ambiente. Esta perda é compensada automaticamente pela resistência elétrica instalada. A energia consumida está diretamente associada à perda térmica do aquecedor para o ambiente. Desta forma, ao medir a energia elétrica consumida durante um período de tempo prolongado, sem retirar água quente do aquecedor, pode-se considerar que ela seja igual à energia térmica perdida para o ambiente.

O procedimento é executado em uma sala climatizada com temperatura de 20°C e após o ensaio de volume armazenado, portanto consideram-se as verificações e instalações do procedimento anterior executadas.

A temperatura de operação do aquecedor adotada pelos fabricantes no Brasil é 60°C, sendo assim, sempre que possível, a configuração do termostato será 60°C.

O procedimento para medição da perda de calor por 24 horas é o seguinte:

- Posicionamento dos cinco sensores de temperatura, quais sejam:
 - Temperatura da água fria na tubulação de alimentação (T_{taf});
 - Temperatura da água quente na tubulação de saída para consumo (T_{taq});
 - Temperatura da água no interior do aquecedor próximo à entrada de água fria (T_{af} - ponto mais próximo da camada inferior);

- Temperatura da água no interior do aquecedor próximo à saída de água quente (T_{aq} - ponto mais próximo da camada superior);
- Temperatura ambiente (T_{amb}).
- Instalação elétrica do aquecedor, alimentação em 220 Volts e aterramento;
- Instalação (em série) do registrador de consumo de energia elétrica;
- Configuração do termostato (se houver acesso) para o limite de 60°C de temperatura;
- Monitoramento da elevação de temperatura da água ($T_{taq} - T_{taf}$) e acionamento da resistência elétrica;
- O período de medição tem início após o primeiro desligamento da resistência;
- Durante quarenta e oito horas (t_p) são monitorados as temperaturas e o consumo de energia elétrica (E_p);
- Após as quarenta e oito horas verifica-se a situação da resistência elétrica e caso ela esteja ligada, é necessário aguardar o seu desligamento automático pelo termostato e então encerrar o procedimento.

O valor E_p é dividido pelo número de horas de duração do procedimento (t_p) e multiplicado por vinte e quatro. O resultado é a perda média a cada vinte e quatro horas (E_{24}) conforme a Equação 2.

$$E_{24} = (E_p / t_p) \times 24 \quad (2)$$

Onde E_{24} é a perda média de energia a cada 24 (Wh); E_p é a energia elétrica consumida durante todo o procedimento (Wh); t_p é a duração do procedimento (h).

Os registros das oscilações de temperatura obtidos durante este procedimento são utilizados nos procedimentos para determinação do desvio do controle de temperatura e variação cíclica de temperatura.

4.1.3 Produção de água quente

Este parâmetro é determinado logo após o ensaio de perda de calor em vinte e quatro horas. Ele é a quantidade de água quente efetivamente disponível para consumo.

Após as quarenta e oito horas aguarda-se o desligamento da resistência elétrica para garantir que a temperatura no interior do aquecedor seja a máxima. Assim que houver o desligamento deve-se iniciar a retirada da água quente.

A vazão de retirada é de 10 litros por minuto para aquecedores de 200 litros ou menos. A medição da vazão é feita através de um hidrômetro gerador de pulso (300 pulsos por litro) instalado no ramal de entrada de água fria e o volume é confirmado pela leitura direta da relojoaria do mesmo. A duração é o tempo necessário para circular uma vez todo o volume nominal do aquecedor, por exemplo, um aquecedor de 200 litros tem duração de 20 minutos, e durante este tempo são monitoradas as temperaturas da água fria na entrada (T_{taf}) e da água quente na saída para consumo (T_{taq}).

A diferença de temperatura entre a água quente na saída de consumo e a água fria na entrada é contabilizada. Ela é considerada a elevação média de temperatura. A

temperatura média na saída de água quente para consumo (T_{taq}) é considerada a produção de água quente. O resultado é apresentado da seguinte forma: 200 litros a x° Celsius.

O consumo de energia elétrica é monitorado durante todo o procedimento e contabilizado como energia de reaquecimento (E_2).

4.1.4 Tempo de reaquecimento

É o tempo necessário para que o aquecedor eleve a temperatura, logo após a produção de água quente, até o nível máximo, situação em que o termostato desliga a resistência. São contabilizados o tempo (t_2) e a energia elétrica (E_2) consumida durante o reaquecimento.

4.1.5 Desvio do controle de temperatura

O cálculo do desvio do controle de temperatura (DCT) é feito a partir dos registros obtidos no procedimento de medição das perdas por vinte e quatro horas. É calculada a média da temperatura T_{aq} durante as quarenta e oito horas. A diferença entre a média de T_{aq} e 60°C é o desvio do controle de temperatura em graus Celsius, conforme apresenta a Equação 3.

$$\text{DCT} = T_{\text{aq}} - 60^{\circ}\text{C} \quad (3)$$

Onde DCT é o desvio do controle de temperatura ($^{\circ}\text{C}$); T_{aq} é a temperatura da água no interior do reservatório próxima a saída para consumo ($^{\circ}\text{C}$).

4.1.6 Variação cíclica de temperatura

Este parâmetro registra a faixa de temperatura em que a água quente pode estar. Dependendo do momento em que o usuário consome água do aquecedor, pode obter água mais quente ou mais fria, esta variação deve ser compensada pelo usuário através da mistura entre água fria e quente no misturador. O ideal é que esta faixa de variação seja a mais estreita possível.

O cálculo da variação cíclica da temperatura (VCT) é feito a partir dos registros obtidos no procedimento de medição das perdas por vinte e quatro horas. Determinam-se os valores máximo de T_{aq} (T_{maxaq}) e mínimo de T_{af} (T_{minaf}) atingidos durante o procedimento. A diferença entre os valores é a variação cíclica da temperatura conforme apresenta a Equação 4.

$$VCT = T_{maxaq} - T_{minaf} \quad (4)$$

Onde VCT é a variação cíclica de temperatura (°C); T_{maxaq} é a T_{aq} máxima atingida (°C); T_{minaf} é a T_{af} mínima atingida (°C).

4.1.7 Fluxograma do método

A seqüência de medição dos parâmetros detalhados nos itens 4.1.1 a 4.1.6 é apresentada na figura 6. Nota-se que os parâmetros desvio do controle de temperatura e variação cíclica da temperatura são obtidos durante a medição da perda de calor em 24 horas.

Figura 6 – Fluxograma do método

4.2 CÁLCULO DA EFICIÊNCIA

O método adotado para o cálculo da eficiência energética dos aquecedores de acumulação é descrito a seguir.

4.2.1 Ciclo de operação

O ciclo de operação é composto por três fases. A primeira fase, de produção de água quente, simula a extração de toda água quente armazenada no aquecedor e a sua reposição com água em temperatura ambiente. A segunda fase simula a recuperação da temperatura da água no interior do aquecedor. A terceira corresponde à sua manutenção na temperatura configurada pelo termostato. A duração das três fases somadas é de vinte e quatro horas.

a) Primeira fase – Produção de água quente

A energia retirada do aquecedor na forma de água quente (E_{aq}) é calculada a partir da elevação média de temperatura (DT) medida entre a saída de água quente (T_{taq}) e a entrada de água fria (T_{taf}), conforme mostra a Equação 5.

$$DT = T_{taq} - T_{taf} \quad (5)$$

Onde DT é a elevação da temperatura da água ($^{\circ}\text{C}$); T_{taq} é a temperatura no tubo da saída de água quente para consumo ($^{\circ}\text{C}$); T_{taf} é a temperatura no tubo de entrada de água fria ($^{\circ}\text{C}$).

Multiplicando o volume de água quente produzido (V_{aq}) pela elevação de temperatura obtida (DT) e convertendo a unidade para Wh (considerando que 1 Wh é igual a 3600 J e o calor específico da água igual a $4180 \text{ J/Kg.C}^{\circ}$) tem-se a conversão conforme a Equação 6.

$$E_{aq} = DT \times V_{aq} \times 4180 / 3600 \quad (6)$$

Onde E_{aq} é a energia retirada do aquecedor na forma de água quente (Wh); DT é a elevação da temperatura da água ($^{\circ}\text{C}$); V_{aq} é o volume de água quente (l).

b) Segunda fase – Reaquecimento

É a energia elétrica utilizada na recuperação da temperatura da água após a utilização de todo o volume reservado. Este consumo é registrado pelo analisador de rede em Wh. Esta parcela será denominada E_2 .

A duração da primeira e segunda fase será denominada Tempo de reaquecimento (t_2) e será contabilizado em horas.

c) Terceira fase – Perda passiva

É a parcela de energia dissipada para o ambiente enquanto o aquecedor está apenas armazenando a água quente no seu interior. Esta parcela é denominada E_1 e contabilizada pelo analisador de rede através do consumo de energia elétrica em Wh.

Calcula-se o tempo complementar ao de recuperação (Equação 7), que é o intervalo de tempo em que o aquecedor não tem retirada de água.

$$t_1 = 24 - t_2 \quad (7)$$

Onde t_1 é o tempo em repouso (sem demanda de água) (h); t_2 é o tempo de reaquecimento (h).

Faz-se a estimativa do consumo de energia elétrica para este intervalo de tempo conforme a Equação 8.

$$E_1 = (t_1 / 24) \times E_{24} \quad (8)$$

Onde E_1 é a energia consumida para manter a água aquecida no interior do aquecedor sem retirada de água (Wh); t_1 é o tempo em repouso (sem demanda de água) (h); E_{24} é a perda de energia em 24 horas (Wh).

4.2.2 Cálculo do índice de eficiência

A eficiência é a razão entre a energia retirada pela água quente produzida pelo aquecedor e toda energia elétrica consumida pelo mesmo ao longo de um ciclo de operação.

A somatória das duas parcelas ($E_1 + E_2$) representa o total de energia consumida durante um ciclo completo de aquecimento e utilização de toda água quente produzida pelo aquecedor (esta somatória é denominada E_T).

A razão entre a energia retirada na forma de água quente (E_{aq}) e a energia total consumida (E_T) durante o ciclo é a eficiência do aquecedor (Equação 9).

$$EF = E_{aq} / E_T \quad (9)$$

Onde EF é a eficiência energética percentual; E_{aq} é a energia retirada na forma de água quente (Wh); E_T é a energia total consumida durante um ciclo completo de aquecimento e utilização de todo volume de água armazenada no aquecedor (Wh)

4.3 BANCADA DE ENSAIO

A montagem necessária para executar o procedimento experimental foi instalada no Laboratório de Instalações Prediais do IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. A bancada teve como objetivo simular as condições usuais de instalação dos aquecedores no que diz respeito aos requisitos hidráulicos e elétricos. A seguir são descritos os equipamentos utilizados, sua configuração e aferição.

4.3.1 Hidráulica

O sistema hidráulico da bancada foi composto por:

- a) Reservatório de água enterrado de 40000 litros (infra-estrutura existente);
- b) Ramal de alimentação de água fria gerada por um resfriador de água e controle eletrônico de temperatura configurado para 20° Celsius;
- c) bomba hidráulica (Figura 7);

Figura 7 – Bomba hidráulica

- d) Isolante térmico tubular flexível de polietileno;

- e) Isolante térmico rígido (poliestireno expandido);
- f) Tubos e conexões metálicas.

4.3.2 Elétrica

O sistema de alimentação elétrica foi composto por:

- a) Estabilizador de tensão (Figura 8);

Figura 8 – Estabilizador de tensão, analisador de rede e multímetro com alicate

- b) Quadro de distribuição geral;
- c) Disjuntores;
- d) DRs (disjuntor diferencial residual);
- e) Cabos e conectores.

4.3.3 Instrumentação

a) Sistema de aquisição de dados National Instruments – FieldPoint com a seguinte configuração (Figura 9):

- Módulo central de comunicação FP-1600 com porta Ethernet 10/100 Mbps;
- Módulo FP-AI-110 com oito canais de entrada analógica e conversor digital de 16 bits;
- Módulo FP-CTR-502 com oito canais de entrada para contadores e conversor digital de 16 bits;
- Módulo FP-TC-120 com oito canais de entrada para termopares com conversor digital de 16 bits.

Figura 9 – Sistema de aquisição de dados

- b) Software de monitoração e aquisição de dados LabView versão 5.0;
- c) “*Virtual Instrument*” – VI, arquivo que simula um instrumento virtual no LabView, desenvolvido para o programa experimental configurado para registrar em um arquivo tipo texto as leituras de cinco canais de temperatura, dois canais de contador digital, data e hora. O sistema foi configurado para armazenar um registro por minuto no arquivo e apresentar de forma contínua as leituras no monitor do computador. O sistema foi desenvolvido em dois blocos, cada um responsável por uma parte do monitoramento.
 - Bloco 1 – Responsável pelo monitoramento do hidrômetro, analisador de rede, da resistência elétrica e registro dos dados no arquivo eletrônico (Figura 10);

Figura 10 – Bloco 1 – “Virtual Instrument” desenvolvido

- Bloco 2 – Responsável pela varredura dos canais de monitoramento da temperatura (Figura 11).

Figura 11 – Bloco 2 – “Virtual Instrument” desenvolvido

- d) Analisador de rede elétrica ESB SAGA-3000 Modelo 1360 com memória de massa de 1 Megabyte. O equipamento possui conectores para até três fases de alimentação elétrica e duas saídas digitais configuráveis. Um delas foi utilizada para concentrar todos os dados referentes ao consumo de energia elétrica no sistema de aquisição FieldPoint;
- e) Termopares tipo T - Cobre/Constantan com faixa de utilização de -200 a 350°C. Foram utilizados cinco termopares sendo quatro deles instalados em bainhas de cobre (Figura 12) e um em uma placa metálica (Figura 13);

Figura 12 – Termopar instalado na bainha de cobre

Figura 13 – Termopar instalado na placa metálica

- f) Transformadores de corrente com relação de redução de 50 para 5 Amperes (Figura 14);

Figura 14 – Transformador de corrente

- g) Hidrômetro Schlumberger (Figura 15) com gerador de pulso digital (300 pulsos por litro) e resolução de 0,1 litros por leitura direta do mostrador;

Figura 15 – Hidrômetro gerador de pulso digital

- h) Multímetro digital Fluke45 com pontas de prova e alicate medidor de corrente e relação 1mA por A (1:1000);

4.3.4 Configuração da bancada

A instalação da bancada foi realizada em uma sala com uma área de 40 m² climatizada utilizando um condicionador de ar (quente e frio) de parede Springer de 12000 Btus.

4.3.5 Aferição e ajuste da bancada

Os sensores de temperatura e o sistema de aquisição de dados foram enviados para calibração e obtiveram os resultados listados na Tabela 3 conforme os certificados RBC números 68494-101, 68495-101, 68496-101, 68497-101, 68498-101:

Tabela 3 – Calibração das pontas de prova.

Termômetro de referência (°C)	Correção ponta 00 (°C)	Correção ponta 01 (°C)	Correção ponta 02 (°C)	Correção ponta 03 (°C)	Correção ponta 04 (°C)
0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,3
20,1	-0,1	0,0	0,0	-0,1	0,0
40,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
59,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
80,0	0,6	0,6	0,7	0,7	0,6
100,2	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9

As correções foram aplicadas aos valores medidos pelo equipamento.

O hidrômetro obteve os resultados de calibração listados na Tabela 4:

Tabela 4 – Calibração do hidrômetro.

Vazão referencia (l/min)	Erro (%)
0,23	-9,03
0,35	-4,81
12,33	-0,88
24,17	-1,97
47,17	-3,14

Calculando-se o valor interpolado para a vazão que será utilizada no procedimento experimental de 10 litros por minuto obtém-se o erro de -1,7 %. Este desvio foi desprezado.

4.4 VARIÁVEIS MONITORADAS

As variáveis monitoradas são as seguintes:

- Temperatura da água no interior do tanque na conexão superior (T_{aq});
- Temperatura da água no interior do tanque na conexão inferior (T_{af});
- Temperatura da água na tubulação de entrada de água fria do tanque (T_{taf});
- Temperatura da água na tubulação de saída de água quente do tanque (T_{taq});
- Temperatura ambiente (T_{amb});
- Vazão de água fria na entrada do tanque (Q_{af});

- Volume de água fria armazenada no aquecedor (V_{af});
- Tempo de duração do aquecimento (t_2);
- Energia elétrica consumida pela resistência elétrica.

A Figura 16 a seguir apresenta o esquema da instrumentação da bancada de ensaio.

Figura 16 – Esquema da bancada de testes e posicionamento dos sensores

4.5 AQUECEDORES ENSAIADOS

Os fabricantes convidados a participar do estudo seguiram a orientação de encaminhar seu produto mais comercializado para uso residencial. As Tabelas 5 e 6 a seguir listam as principais características construtivas informadas pelos fabricantes através de manuais de instruções, etiquetas e páginas na Internet. As Figuras 17 e 18 apresentam as fotos dos aquecedores.

Tabela 5 – Especificações técnicas dos aquecedores 1 a 5

Aquecedor	1	2	3	4	5
Posição	Horizontal	Horizontal	Horizontal	Horizontal	Horizontal
Volume nominal	200 litros	150 litros	200 litros	200 litros	200 litros
Tanque interno	Cobre	Aço Inoxidavel	Aço inoxidável	Aço Inoxidavel	Aço Inoxidavel
Isolamento térmico	Poliuretano expandido	Poliuretano	Poliuretano expandido	Poliuretano	Poliuretano
Revestimento externo	Chapa de aço laminada a frio esmaltada	Chapa de aço	Chapa de alumínio	Chapa de aço	Chapa de aço
Tipo de termostato	Imersão	Imersão	Imersão	Imersão	Contato
Potência da resistência elétrica	2000 watts	2500 watts	2500 watts	3000 watts	2000 watts
Tensão de alimentação	220 volts	220 volts	220 volts	220 volts	220 volts

Tabela 6 – Especificações técnicas dos aquecedores 6 a 10

Aquecedor	6	7	8	9	10
Posição	Horizontal	Horizontal	Horizontal	Vertical	Horizontal
Volume nominal	150 litros	200 litros	150 litros	200	200 litros
Tanque interno	Aço Inoxidavel	Aço inoxidável	Aço inoxidável	Aço inoxidável	chapa de aço inox
Isolamento térmico	Poliuretano	Poliuretano expandido	Poliuretano expandido	Poliuretano expandido	poliuretano expandido
Revestimento externo	Chapa de aço	Chapa de aço inoxidável	Chapa de aço inoxidável	Chapa de aço inoxidável	chapa de alumínio
Tipo de termostato	Contato	Contato	Contato	Contato	Imersão
Potência da resistência elétrica	2000 Watts	2000 watts	2000	2000	2500 watts
Tensão de alimentação	220 volts	220 volts	220 volts	220 volts	220 volts

Figura 17 – Fotos dos aquecedores

Figura 18 – Fotos dos aquecedores

5 COMPILAÇÃO E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos pelos aquecedores submetidos ao procedimento experimental e em seguida os cálculos para obtenção da eficiência energética dos equipamentos.

5.1 RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados dos procedimentos experimentais a que foram submetidos os aquecedores são apresentados nos itens a seguir.

5.1.1 Volume armazenado

Os volumes medidos de acordo com o procedimento definido no item 4.1 são os listados na Tabela 7.

Tabela 7 – Volumes armazenados medidos

Aquecedor	Volume armazenado medido (litros)	Volume nominal (litros)
Aquecedor 1	205	200
Aquecedor 2	137	150
Aquecedor 3	185	200
Aquecedor 4	203	200
Aquecedor 5	201	200
Aquecedor 6	154	150
Aquecedor 7	210	200
Aquecedor 8	152	150
Aquecedor 9	192	200
Aquecedor 10	199	200

Pode-se observar uma variação de - 8 % a 5 % na diferença entre o volume nominal declarado e o volume armazenado efetivamente no aquecedor.

5.1.2 Perda de calor em 24 horas

O procedimento de medição da perda de calor em 24 horas obteve os resultados listados na Tabela 8.

Tabela 8 – Aquecedores 1 a 10: Perda por 24 horas

Aquecedor	T_{aq} Média (°C)	Energia consumida em 24 horas (Wh)
1	55,4	1624
2	58,8	3870
3	59,2	2266
4	58,7	4070
5	56,6	1771
6	62,9	2178
7	60,0	2253
8	57,8	1735
9	62,1	1770
10	57,9	1776

Pode-se observar na Tabela 8 uma ampla variação dos valores de consumo resultado da perda passiva de calor, bem como uma diferença de 7,5 °C entre as temperaturas médias dos aquecedores 6 e 1.

A Figura 19 apresenta o resultado gráfico detalhado obtido para o aquecedor 7. Nela é possível observar a operação do termostato que aciona a resistência elétrica quando a temperatura atinge o seu limite inferior e a desliga quando a temperatura atinge o limite superior. O aquecedor 7 foi selecionado como exemplo por ilustrar a operação do termostato em intervalos regulares de tempo e temperatura. Os gráficos para cada aquecedor estão no ANEXO A.

Figura 19 – Aquecedor 7: Consumo de energia e temperatura do aquecedor

Pode-se observar na Figura 19 a amplitude da variação da temperatura da água durante as 48 horas de duração do teste. Esta oscilação na temperatura pode representar um potencial desconforto para o usuário.

5.1.3 Produção de água quente

A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos no procedimento de produção de água quente.

Tabela 9 – Aquecedores 1 a 10: Produção de água quente

Aquecedor	Elevação de temperatura ($T_{\text{taq}} - T_{\text{tar}}$) Média (°C)
1	30,5
2	36,4
3	38,4
4	41,5
5	34,7
6	43,9
7	39,3
8	40,6
9	36,8
10	36,8

Observa-se nos resultados da Tabela 9 uma variação de 13,4 °C entre a elevação média de temperatura dos aquecedores 6 e 1.

A Figura 20 apresenta o resultado gráfico detalhado obtido para o aquecedor 5. Nele pode-se observar um comportamento que é comum aos aquecedores centrais. São necessários alguns minutos para que a temperatura da água no ponto de consumo se estabilize e, após atingir aproximadamente 90 % do volume de água reservado, a temperatura da água cai acentuadamente. O aquecedor 5 foi selecionado como exemplo por apresentar a elevação de temperatura mais suave. Os gráficos para cada aquecedor estão no ANEXO B.

Figura 20 – Aquecedor 5: Produção de Água Quente

5.1.4 Tempo de reaquecimento

A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos pelo procedimento de medição do tempo e da energia de reaquecimento.

Tabela 10 – Aquecedores 1 a 10: Tempo de reaquecimento e energia consumida

Aquecedor	Duração (horas:minutos)	Energia consumida (Wh)
1	4:24	7403
2	3:00	6700
3	3:52	9566
4	3:53	10570
5	4:28	9197
6	4:12	8510
7	4:46	9583
8	4:10	8190
9	4:23	8420
10	4:13	9347

O tempo de recuperação da temperatura máximo foi de 4 horas e 46 minutos. Considerando-se que os intervalos entre os picos de demanda nos períodos da manhã, meio-dia e da noite são desta ordem ou maiores pode-se considerar que a potência instalada e o tempo de recuperação são suficientes para atender a uma demanda não superior ao volume armazenado pelo aquecedor.

A Figura 21 apresenta o resultado gráfico detalhado obtido para o aquecedor 3. Os gráficos para cada aquecedor estão no ANEXO C.

Figura 21 – Aquecedor 3: Tempo de reaquecimento e energia consumida

O gráfico apresentado na Figura 21 registra o intervalo de tempo desde a primeira vez que a resistência elétrica é acionada, durante o procedimento de produção de água quente, até o seu desligamento. O tempo de reaquecimento é o decorrido desde o final da retirada de água quente até o seu desligamento. Apesar de o início da curva de temperatura mostrar um aparente esfriamento da água, isto de fato não ocorre. O início do gráfico demonstra a estratificação da água no interior do aquecedor.

5.1.5 Desvio do controle de temperatura

A Tabela 11 apresenta os resultados obtidos pelos aquecedores neste procedimento.

Tabela 11 – Aquecedores 1 a 10: Desvio do controle de temperatura

Aquecedor	T_{aq} Média (°C)	Desvio (°C)
1	55,4	-4,6
2	58,8	-1,2
3	59,2	-0,8
4	58,7	-1,3
5	56,6	-3,4
6	62,9	2,9
7	60,0	0,0
8	57,8	-2,2
9	62,1	2,1
10	57,9	-2,1

Os resultados listados na Tabela 11 foram obtidos configurando-se o termostato para 60°C ou, nos casos em que não há indicação da temperatura em graus, para a indicação de máximo. O desvio do controle de temperatura foi calculado pela diferença entre 60°C e a média em 48 horas da T_{aq}.

5.1.6 Variação cíclica de temperatura

A Tabela 12 apresenta os resultados obtidos pelos aquecedores neste procedimento.

Tabela 12 – Aquecedores 1 a 10: Variação cíclica da temperatura

Aquecedor	T _{aq} Mínima (°C)	T _{aq} Máxima (°C)	Variação (°C)
1	54,8	57,1	2,3
2	57,3	61,8	4,5
3	58,1	62,1	4,0
4	56,9	61,9	5,0
5	54,8	59,7	4,9
6	62,6	63,5	0,9
7	58,7	61,9	3,2
8	57,5	58,2	0,7
9	60,6	63,5	2,9
10	56,4	60,9	4,5

A variação cíclica da temperatura foi calculada pela diferença entre a T_{aq} máxima e mínima medidas durante as 48 horas.

5.2 CALCULO DA EFICIÊNCIA

Nos itens a seguir são apresentados os cálculos da eficiência energética para cada aquecedor.

a) Aquecedor 1:

Tabela 13 – Aquecedor 1: Cálculo da eficiência

Consumo de energia em repouso	1624	Wh
Fração do dia em repouso	82	%
Consumo de energia para reaquecimento	7403	Wh
Fração do dia para reaquecimento	18	%
Energia total consumida (um dia)	8729	Wh
Elevação média de temperatura da água	30,5	°C
Energia retirada (água quente)	7083	Wh
Eficiência	81	%

b) Aquecedor 2:

Tabela 14 – Aquecedor 2: Cálculo da eficiência

Consumo de energia em repouso	3386	Wh
Fração do dia em repouso	88	%
Consumo de energia para reaquecimento	6700	Wh
Fração do dia para reaquecimento	12	%
Energia total consumida (um dia)	10086	Wh
Elevação média de temperatura da água	36,4	°C
Energia retirada (água quente)	6340	Wh
Eficiência	63	%

c) Aquecedor 3:

Tabela 15 – Aquecedor 3: Cálculo da eficiência

Consumo de energia em repouso	2266	Wh
Fração do dia em repouso	84	%
Consumo de energia para reaquecimento	9566	Wh
Fração do dia para reaquecimento	16	%
Energia total consumida (um dia)	11467	Wh
Elevação média de temperatura da água	38,4	°C
Energia retirada (água quente)	8917	Wh
Eficiência	78	%

d) Aquecedor 4:

Tabela 16 – Aquecedor 4: Cálculo da eficiência

Consumo de energia em repouso	3411	Wh
Fração do dia em repouso	84	%
Consumo de energia para reaquecimento	10570	Wh
Fração do dia para reaquecimento	16	%
Energia total consumida (um dia)	13981	Wh
Elevação média de temperatura da água	41,5	°C
Energia retirada (água quente)	9637	Wh
Eficiência	69	%

e) Aquecedor 5:

Tabela 17 – Aquecedor 5: Cálculo da eficiência

Consumo de energia em repouso	1771	Wh
Fração do dia em repouso	81	%
Consumo de energia para reaquecimento	9197	Wh
Fração do dia para reaquecimento	19	%
Energia total consumida (um dia)	10638	Wh
Elevação média de temperatura da água	34,7	°C
Energia retirada (água quente)	8058	Wh
Eficiência	76	%

f) Aquecedor 6:

Tabela 18 – Aquecedor 6: Cálculo da eficiência

Consumo de energia em repouso	2178	Wh
Fração do dia em repouso	83	%
Consumo de energia para reaquecimento	8510	Wh
Fração do dia para reaquecimento	18	%
Energia total consumida (um dia)	10688	Wh
Elevação média de temperatura da água	43,9	°C
Energia retirada (água quente)	7646	Wh
Eficiência	72	%

g) Aquecedor 7:

Tabela 19 – Aquecedor 7: Cálculo da eficiência

Consumo de energia em repouso	2253	Wh
Fração do dia em repouso	80	%
Consumo de energia para reaquecimento	9583	Wh
Fração do dia para reaquecimento	20	%
Energia total consumida (um dia)	11389	Wh
Elevação média de temperatura da água	39,3	°C
Energia retirada (água quente)	9126	Wh
Eficiência	80	%

h) Aquecedor 8:

Tabela 20 – Aquecedor 8: Cálculo da eficiência

Consumo de energia em repouso	1735	Wh
Fração do dia em repouso	83	%
Consumo de energia para reaquecimento	8190	Wh
Fração do dia para reaquecimento	17	%
Energia total consumida (um dia)	9624	Wh
Elevação média de temperatura da água	40,6	°C
Energia retirada (água quente)	7079	Wh
Eficiência	74	%

i) Aquecedor 9:

Tabela 21 – Aquecedor 9: Cálculo da eficiência

Consumo de energia em repouso	1770	Wh
Fração do dia em repouso	82	%
Consumo de energia para reaquecimento	8420	Wh
Fração do dia para reaquecimento	18	%
Energia total consumida (um dia)	9867	Wh
Elevação média de temperatura da água	36,8	°C
Energia retirada (água quente)	8537	Wh
Eficiência	87	%

j) Aquecedor 10:

Tabela 22 – Aquecedor 10: Cálculo da eficiência

Consumo de energia em repouso	1776	Wh
Fração do dia em repouso	82	%
Consumo de energia para reaquecimento	9347	Wh
Fração do dia para reaquecimento	18	%
Energia total consumida (um dia)	10811	Wh
Elevação média de temperatura da água	36,8	°C
Energia retirada (água quente)	8546	Wh
Eficiência	79	%

Considerando-se que os equipamentos analisados são similares e destinados ao mesmo perfil de consumidor, estes aquecedores apresentam um intervalo de variação amplo no que se refere ao consumo de energia conforme pode se observar na Figura 22 a seguir.

Figura 22 – Consumo de energia durante um ciclo de operação

Outra característica que diferenciou o funcionamento dos aquecedores foi a elevação média de temperatura. Este critério interfere diretamente no conforto do usuário e na relação de mistura quente e fria que deve ser ajustada. É a real disponibilidade de água quente. Fator que deveria acompanhar o volume no dimensionamento feito pelo projetista.

A Figura 23 a seguir mostra as elevações médias de temperatura obtidas pelos aquecedores.

Figura 23 – Elevação média de temperatura obtida pelos aquecedores

A variação cíclica da temperatura também representa um indicador de conforto para o usuário. A sua amplitude gera a necessidade de ajustar a mistura entre água quente e fria. Entre os critérios que poderiam figurar em uma regulamentação, está o intervalo de variação permitido em valores absolutos ou relativos. A Figura 24 apresenta os diferentes intervalos de variação cíclica de temperatura dos aquecedores.

Figura 24 – Variação cíclica da temperatura

Outro fator que associado à temperatura média influencia diretamente o conforto é o tempo necessário para que a água atinja a temperatura desejada no ponto de consumo. Na bancada de testes, a distância entre a saída do aquecedor e o ponto de medição da temperatura foi da ordem de centímetros. Mesmo assim (levando-se ainda em conta a inércia dos medidores de temperatura) o tempo necessário para que a água na tubulação atingisse a temperatura disponível no interior no reservatório foi da ordem de minutos. Esta demora representa não somente o desconforto, mas também desperdício de água.

No caso de aquecedores de acumulação horizontais, maioria no mercado brasileiro, o fator de mistura da água e a sua estratificação no interior do reservatório se tornam mais desfavoráveis, pois podem fazer com que a água quente reservada no

aquecedor se misture com a água fria antes de sair, prejudicando o seu desempenho.

6 CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

Os aquecedores de água elétricos de acumulação representam uma parcela substancial do consumo de energia em uma residência que se utiliza deste tipo de sistema. Esta avaliação decorre dos valores contabilizados de energia consumida por este tipo de aquecedor quando comparados ao consumo anual médio residencial de energia no Brasil.

A variação da eficiência energética foi de 63% a 87% e o que se observa é que os equipamentos operam em níveis de conforto diferentes. Considera-se aqui como nível de conforto a elevação média da temperatura. Ou seja, o ideal seria que o equipamento proporcionasse a maior elevação média de temperatura com alta eficiência e não somente o menor consumo de energia.

O gráfico apresentado na Figura 25 associa a eficiência energética calculada para o aquecedor e a sua elevação média de temperatura. Cada ponto no gráfico representa um aquecedor. Nele pode-se observar que mesmo aquecedores testados que apresentam aproximadamente a mesma elevação média de temperatura, atingiram níveis diferentes de eficiência energética, como por exemplo, os aquecedores 2 e 9 (o segundo apresentou uma eficiência superior). Da mesma forma pode-se comparar os aquecedores 1 e 7 que obtiveram a eficiência energética semelhante, porém o aquecedor 7 oferece água a uma temperatura 8 °C mais elevada.

Figura 25 – Eficiência energética X Elevação média da temperatura

Este índice poderia ser direcionado pelos órgãos reguladores para um melhor aproveitamento da energia utilizada pelos aquecedores bem como para orientar os consumidores e projetistas na seleção de aquecedores.

A necessidade de melhorias tecnológicas neste tipo de sistema de aquecimento é importante quando se considera a repercussão deste consumo de energia durante toda a sua vida útil, estimada em vinte anos. Todo esforço no sentido de tornar estes equipamentos mais eficientes quanto ao consumo de energia se refletirá na diminuição do impacto ambiental gerado por eles.

A disponibilidade de informações referentes à real capacidade de produção de água quente e não somente a potência elétrica instalada ou o volume armazenado seriam de grande auxílio para projetistas. Atualmente as especificações técnicas

disponibilizadas pelos fabricantes se restringem às características construtivas dos aquecedores e não ao seu desempenho.

Os parâmetros e procedimentos descritos neste trabalho estão servindo de referência para o grupo de estudo técnico de aquecedores elétricos de acumulação gerenciado pelo INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial).

Os fabricantes e demais integrantes deste grupo definiram a adoção dos dados compilados até o momento para utilização no PBE (Programa Brasileiro de Etiquetagem). Isto permitirá que os fabricantes que participarem voluntariamente do programa poderão utilizar os logotipos apresentados na figura 26 e indicarão na etiqueta do aquecedor a sua classificação de eficiência energética conforme os critérios apresentados na tabela 23. Os aquecedores deverão apresentar eficiência acima de 65% para participar do programa de etiquetagem.

Tabela 23 – Classificação dos aquecedores (EE - eficiência energética)

Classe	EFICIÊNCIA (%)
A	$EE > 85$
B	$85 \geq EE > 80$
C	$80 \geq EE > 75$
D	$75 \geq EE > 70$
E	$70 \geq EE \geq 65$

Figura 26 – Logotipos do INMETRO e PBE

Houve ainda a adoção pela Eletrobrás do método e dos resultados da eficiência para concessão do uso do Selo Procel (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica) para os aquecedores classificados como A. O objetivo do programa é incentivar a competição entre os fabricantes para atingir a classificação A e sistematicamente aumentar os níveis exigidos para esta classificação. O consumidor poderá identificar estes aquecedores pelo logotipo apresentado na figura 27.

Figura 27 – Logotipo do Selo Procel

Desta forma os parâmetros medidos estarão identificados nas etiquetas dos aquecedores e nos sites do INMETRO e da Eletrobrás para consulta pública.

Entre as melhorias tecnológicas, que podem ser apontadas como objeto de estudos futuros, com possibilidade de resultados no sentido da redução de consumo de energia estão: a melhoria no sistema de isolamento térmico dos reservatórios, adequação dos ajustes dos termostatos quanto ao intervalo de operação de acionamento e desligamento da resistência elétrica e a melhoria na eficiência da resistência elétrica na produção de calor no interior do reservatório.

ANEXO A – PERDA DE CALOR EM 24 HORAS

a) Aquecedor 1:

Figura 28 – Aquecedor 1: Consumo de energia e temperatura do aquecedor

Tabela 24 – Aquecedor 1: Perda por 24 horas

Perda por 24 horas
1624 Wh

b) Aquecedor 2:

Figura 29 – Aquecedor 2: Consumo de energia e temperatura do aquecedor

Tabela 25 – Aquecedor 2: Perda por 24 horas

Perda por 24 horas
3870 Wh

c) Aquecedor 3:

Figura 30 – Aquecedor 3: Consumo de energia e temperatura do aquecedor

Tabela 26 – Aquecedor 3: Perda por 24 horas

Perda por 24 horas
2266 Wh

d) Aquecedor 4:

Figura 31 – Aquecedor 4: Consumo de energia e temperatura do aquecedor

Tabela 27 – Aquecedor 4: Perda por 24 horas

Perda por 24 horas
4070 Wh

e) Aquecedor 5:

Figura 32 – Aquecedor 5: Consumo de energia e temperatura do aquecedor

Tabela 28 – Aquecedor 5: Perda por 24 horas

Perda por 24 horas
1771 Wh

f) Aquecedor 6:

Figura 33 – Aquecedor 6: Consumo de energia e temperatura do aquecedor

Tabela 29 – Aquecedor 6: Perda por 24 horas

Perda por 24 horas
2640 Wh

g) Aquecedor 7:

Figura 34 – Aquecedor 7: Consumo de energia e temperatura do aquecedor

Tabela 30 – Aquecedor 7: Perda por 24 horas

Perda por 24 horas
2253 Wh

h) Aquecedor 8:

Figura 35 – Aquecedor 8: Consumo de energia e temperatura do aquecedor

Tabela 31 – Aquecedor 8: Perda por 24 horas

Perda por 24 horas
1735 Wh

i) Aquecedor 9:

Figura 36 – Aquecedor 9: Consumo de energia e temperatura do aquecedor

Tabela 32 – Aquecedor 9: Perda por 24 horas

Perda por 24 horas
1770 Wh

j) Aquecedor 10:

Figura 37 – Aquecedor 10: Consumo de energia e temperatura do aquecedor

Tabela 33 – Aquecedor 10: Perda por 24 horas

Perda por 24 horas
1776 Wh

ANEXO B – PRODUÇÃO DE ÁGUA QUENTE

a) Aquecedor 1:

Figura 38 – Aquecedor 1: Produção de Água Quente

Tabela 34 – Aquecedor 1: Média ($T_{taq} - T_{taf}$)

Média ($T_{taq} - T_{taf}$)
30,5 °C

b) Aquecedor 2:

Figura 39 – Aquecedor 2: Produção de Água Quente

Tabela 35 – Aquecedor 2: Média ($T_{\text{taq}} - T_{\text{taf}}$)

Média ($T_{\text{taq}} - T_{\text{taf}}$)
36,4 °C

c) Aquecedor 3:

Figura 40 – Aquecedor 3: Produção de Água Quente

Tabela 36 – Aquecedor 3: Média ($T_{taq} - T_{taf}$)

Média ($T_{taq} - T_{taf}$)
38,4 °C

d) Aquecedor 4:

Figura 41 – Aquecedor 4: Produção de Água Quente

Tabela 37 – Aquecedor 4: Média (T_{taq} - T_{taf})

Média (T _{taq} - T _{taf})
41,5 °C

e) Aquecedor 5

Figura 42 – Aquecedor 5: Produção de Água Quente

Tabela 38 – Aquecedor 5: Média ($T_{taq} - T_{taf}$)

Média ($T_{taq} - T_{taf}$)
34,7 °C

f) Aquecedor 6:

Figura 43 – Aquecedor 6: Produção de Água Quente

Tabela 39 – Aquecedor 6: Média ($T_{taq} - T_{taf}$)

Média ($T_{taq} - T_{taf}$)
43,9 °C

g) Aquecedor 7:

Figura 44 – Aquecedor 7: Produção de Água Quente

Tabela 40 – Aquecedor 7: Média ($T_{\text{taq}} - T_{\text{taf}}$)

Média ($T_{\text{taq}} - T_{\text{taf}}$)
39,3 °C

h) Aquecedor 8:

Figura 45 – Aquecedor 8: Produção de Água Quente

Tabela 41 – Aquecedor 8: Média ($T_{\text{taq}} - T_{\text{taf}}$)

Média ($T_{\text{taq}} - T_{\text{taf}}$)
40,6 °C

i) Aquecedor 9:

Figura 46 – Aquecedor 9: Produção de Água Quente

Tabela 42 – Aquecedor 9: Média ($T_{taq} - T_{taf}$)

Média ($T_{taq} - T_{taf}$)
36,8 °C

j) Aquecedor 10:

Figura 47 – Aquecedor 10: Produção de Água Quente

Tabela 43 – Aquecedor 10: Média ($T_{taq} - T_{taf}$)

Média ($T_{taq} - T_{taf}$)
36,8 °C

ANEXO C – TEMPO DE REAQUECIMENTO

a) Aquecedor 1:

Figura 48 – Aquecedor 1: Tempo de reaquecimento e energia consumida

Tabela 44 – Aquecedor 1: Tempo de reaquecimento e energia consumida

Tempo de reaquecimento	Energia consumida
4 horas e 24 minutos	7403 Wh

b) Aquecedor 2:

Figura 49 – Aquecedor 2: Tempo de reaquecimento e energia consumida

Tabela 45 – Aquecedor 2: Tempo de reaquecimento e energia consumida

Tempo de reaquecimento	Energia consumida
3 horas e 0 minutos	6700 Wh

c) Aquecedor 3:

Figura 50 – Aquecedor 3: Tempo de reaquecimento e energia consumida

Tabela 46 – Aquecedor 3: Tempo de reaquecimento e energia consumida

Tempo de reaquecimento	Energia consumida
3 horas e 52 minutos	9566 Wh

d) Aquecedor 4:

Figura 51 – Aquecedor 4: Tempo de reaquecimento e energia consumida

Tabela 47 – Aquecedor 4: Tempo de reaquecimento e energia consumida

Tempo de reaquecimento	Energia consumida
3 horas e 53 minutos	10570 Wh

e) Aquecedor 5:

Figura 52 – Aquecedor 5: Tempo de reaquecimento e energia consumida

Tabela 48 – Aquecedor 5: Tempo de reaquecimento e energia consumida

Tempo de reaquecimento	Energia consumida
4 horas e 28 minutos	9197 Wh

f) Aquecedor 6:

Figura 53 – Aquecedor 6: Tempo de reaquecimento e energia consumida

Tabela 49 – Aquecedor 6: Tempo de reaquecimento e energia consumida

Tempo de reaquecimento	Energia consumida
4 horas e 12 minutos	8510 Wh

g) Aquecedor 7:

Figura 54 – Aquecedor 7: Tempo de reaquecimento e energia consumida

Tabela 50 – Aquecedor 7: Tempo de reaquecimento e energia consumida

Tempo de reaquecimento	Energia consumida
4 horas e 46 minutos	9583 Wh

h) Aquecedor 8:

Figura 55 – Aquecedor 8: Tempo de reaquecimento e energia consumida

Tabela 51 – Aquecedor 8: Tempo de reaquecimento e energia consumida

Tempo de reaquecimento	Energia consumida
4 horas e 10 minutos	8190 Wh

i) Aquecedor 9:

Figura 56 – Aquecedor 9: Tempo de reaquecimento e energia consumida

Tabela 52 – Aquecedor 9: Tempo de reaquecimento e energia consumida

Tempo de reaquecimento	Energia consumida
4 horas e 23 minutos	8420 Wh

j) Aquecedor 10:

Figura 57 – Aquecedor 10: Tempo de reaquecimento e energia consumida

Tabela 53 – Aquecedor 10: Tempo de reaquecimento e energia consumida

Tempo de reaquecimento	Energia consumida
4 horas e 13 minutos	9347 Wh

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Projeto e execução de instalações prediais de água quente - NBR 7198**. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Aparelhos elétricos de aquecimento de água não instantâneo de uso doméstico e similar – requisitos de segurança - NBR 10674**. Rio de Janeiro, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Aparelhos elétricos de aquecimento de água não instantâneo de uso doméstico e similar – ensaios de segurança - NBR 10674**. Rio de Janeiro, 1989.

ARRUDA L. B., PRADO R. T. A. **Operação de sistemas de aquecimento solar de água com controle de vazões em coletores planos**. São Paulo, 2005. (Boletim técnico). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/412.

ATIKOL U., ALDABBAGH L. B. Y., SEZAI I. Effect of standing time after usage on the performance of storage-type domestic electrical water-heaters. **Journal of the Energy Institute**. v. 79, n. 1, p. 53-58, 2006.

AUSTRALIAN STANDARD/NEW ZEALAND STANDARD (AS/NZS). **Storage water heaters. Part 1: General requirements**, AS/NZS 1056.1:1991.

AUSTRALIAN STANDARD/NEW ZEALAND STANDARD (AS/NZS). **Storage water heaters. Part 4: Daily energy consumption calculations for electric types**, AS/NZS 1056.4:1997.

BARRETO, D. **Caracterização dos parâmetros de influência no desempenho de aquecedores prediais de água de acumulação**. (Relatório Técnico). Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2001.

CHENG C., LEE M., LIN Y. Empirical prediction method of transmission heat loss in hot water plumbing. **Energy and Buildings**. n.38, p.1220-1229, 2006.

CUMULUS S. A. **Manual de uso e instalação aquecedor elétrico por acumulação**. (2004)

ELETROBRÁS. **Pesquisa de posses e hábitos 2005**. Rio de Janeiro, 2006. (Banco de dados enviado por e-mail).

FANNEY A. H., DOUGHERTY B.P. Thermal Performance of Residential Electric Water Heaters Subjected to Various Off-Peak Schedules. **Journal of Solar Energy Engineering**. v.118, p.73-80, May, 1996.

FERNÁNDEZ-SEARA J., UHÍA F. J., SIERES J. Experimental analysis of a domestic electric hot water storage tank. Part I: Static mode of operation. **Applied Thermal Engineering**. Article in Press. 6 May 2006.

FERNÁNDEZ-SEARA J., UHÍA F. J., SIERES J. Experimental analysis of a domestic electric hot water storage tank. Part II: dynamic mode operation. **Applied Thermal Engineering**. Article in Press. 6 May 2006.

HEGAZY A. A., DIAB M. R. Performance of an improved design for storage-type domestic electrical water-heaters. **Applied Energy**. n.71, p.287–306, 2002.

HEALY W. M., LUTZ J. D., LEKOV A. B. Variability in Energy Factor Test Results for Residential Electric Water Heaters. **HVAC&R**. v.9, n.4, October, 2003.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **IEC 379 - Methods for measuring the performance of electric storage water-heaters for household purposes**. 1987.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa de orçamentos familiares**. <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/pesquisas/pof/default.asp>. Acesso em 06/04/2004.

ILHA, M. S. O.; GONÇALVES, O. M.; KAVASSAKI, Y. **Sistemas prediais de água quente**. (Texto técnico). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, TT/PCC/09. São Paulo, 1996.

ILHA, M. S. **Estudo dos parâmetros relacionados com a utilização de água quente em edifícios residenciais**. 185 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

JORDAN U., FURBO S. Thermal stratification in small solar domestic storage tanks caused by draw-offs. **Solar Energy**. n.78, p.291-300, 2005.

KARA Y. A., ARSLANTURK C. Modeling of central domestic water heater for buildings. **Applied Thermal Engineering**. n.24, p.269-279, 2004.

KAR, A. K., AL-DOSSARY K. M. Thermal Performances of Water Heaters in Series. **Applied Energy**. n.52, p.47-53, 1995.

LIMA J. B. A., PRADO R. T. A., TABORIANSKI V. M. Optimization of tank and flat-plate collector os solar heating system for single-family households to assure economic efficiency through the TRNSYS program. **Renewable Energy**. n.31, p.1581-1595, 2006.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Balanço energético 2005: Ano base 2004**. 188p. Rio de Janeiro. EPE 2005.

PETRUCCHI, A. L. **Modelo para previsão do comportamento de aquecedores de acumulação em sistemas de água quente**. 167p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.

PRADO, R. T. A.; GONÇALVES, O. M. Water heating through electric shower and energy demand. **Energy and Buildings**. n.29, p.77-82, 1998.

REEDY B. S. Electrical vs solar water heater: a case study. **Energy Convers. Mgmt.** v.36, n.11, p.1097-1106, 1995.

SATEIKIS, I. Determination of the amount of thermal energy in the tanks of buildings heating systems. **Energy and Buildings**. n.34, p.357-361, 2002.

SEZAI I., ALDABBAGH L.B.Y., ATIKOL U., HACISEVKI H. Performance improvement by using dual heaters in a storage-type domestic electric water-heater. **Applied Energy**. n.81, p.291–305, 2005.

TABORIANSKI, V. A.; PRADO, R. T. A. Comparative evaluation of the contribution of residential water heating systems to the variation of greenhouse gases stock in the atmosphere. **Building and environment**. n.39, p.645-652, 2004.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Technical support document: Energy efficiency standards for consumer products: residential water heaters**. Washington, DC, December 2000.