

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE AUTOMAÇÃO E SISTEMAS**

Gelson Onir Pasetti

**AUTOMAÇÃO E OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA DE UMA
UNIDADE DE AQUECIMENTO SOLAR DOMÉSTICA**

Florianópolis

2014

Gelson Onir Pasetti

**AUTOMAÇÃO E OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA DE UMA
UNIDADE DE AQUECIMENTO SOLAR DOMÉSTICA**

Dissertação submetida ao Pós-
Graduação em Engenharia de Au-
tomação e Sistemas para a obtenção
do Grau de Mestre em Engenharia
de Automação e Sistemas.
Orientador: Prof. Dr. Julio Elias
Normey-Rico

Florianópolis

2014

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

Pasetti, Gelson Onir
Automação e Otimização Energética de uma Unidade de
Aquecimento de Solar Doméstica / Gelson Onir Pasetti ;
orientador, Julio Elias Normey-Rico - Florianópolis, SC,
2014.
131 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Automação e Sistemas.

Inclui referências

1. Engenharia de Automação e Sistemas. 2. Sistema Solar.
3. Eficiência Energética. 4. Otimização. 5. Modelagem de
Sistemas. I. Normey-Rico, Julio Elias. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Automação e Sistemas. III. Título.

Gelson Onir Pasetti

**AUTOMAÇÃO E OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA DE UMA
UNIDADE DE AQUECIMENTO SOLAR DOMÉSTICA**

Esta Dissertação foi julgada aprovada para a obtenção do Título de “Mestre em Engenharia de Automação e Sistemas”, e aprovada em sua forma final pela Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas.

Florianópolis, 11 de julho 2014.

Prof. Dr. Rômulo Silva de Oliveira
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Julio Elias Normey-Rico
Presidente

Prof. Dr. Agostinho Plucenio

Prof. Dr. Antonio Augusto Rodrigues Coelho

Prof. Dr. Roberto Lamberts

AGRADECIMENTOS

Agradeço...

A Deus pelos dons que me concedeu.

A meu pai e minha mãe que são os meus exemplos de vida e aos quais eu devo a minha eterna gratidão.

A meu irmão e minha irmã pelos ensinamentos aos longo de nossa convivência.

Aos meus tios e primos que sempre me incentivaram.

A Juliana de Abreu Gonçalves, minha namorada, que com o seu carinho tem me dado o suporte para superar os momentos difíceis e, nos momentos de alegria, partilha comigo seu sorriso.

Ao Professor Julio Normey-Rico, com quem eu aprendi muito, pela orientação, apoio e amizade.

Aos demais professores e mestres, com os quais eu tive contato, pela sabedoria repassada.

Ao Ivan Ribas e Krystian Graupner pelas horas dedicadas ao projeto e pela ajuda na construção da planta solar.

Aos intercambistas e amigos Hugo Ollivier e Deinis Muñoz, com os quais tive o prazer de trabalhar e compartilhar histórias e conhecimento.

Aos petianos Allan Oliveira da Silva, João Pedro S. Weber e Gabriel C. de Castro Perotto pelo trabalho desenvolvido.

Aos colegas mestrandos pelo companheirismo ao longo dos últimos anos.

Aos amigos, sejam eles de longa data ou os mais recentes, pela alegria que trazem aos meus dias.

No que diz respeito ao empenho, ao compromisso, ao esforço, à dedicação, não existe meio termo. Ou você faz uma coisa bem feita ou não faz.

Ayrton Senna da Silva

RESUMO

Este trabalho aborda o aumento da eficiência energética de uma unidade de aquecimento de água para o banho, uma vez que 24% do consumo energético no setor doméstico é utilizado para esse fim. Além disso, o chuveiro elétrico, que está presente em aproximadamente 73% das residências brasileiras, é o principal responsável pelo pico da demanda energética que ocorre entre as 18h e 21h. Diante disso, propõe-se um sistema de aquecimento híbrido, que utiliza como fontes de energia a solar e a elétrica. O sistema é composto basicamente por coletores solares, um tanque de armazenamento e um chuveiro elétrico. Válvulas automáticas e controladores de potência são inseridos na planta para regular as temperaturas da água do boiler e do chuveiro e as vazões de água quente e fria durante o banho. Um microcontrolador é responsável por controlar todo o sistema, a fim de atender aos requisitos (temperatura e vazão do banho) definidos pelo usuário. O ajuste da abertura das válvulas e da potência do chuveiro é feito de forma automática, aumentando o conforto do usuário. Para garantir que a planta solar híbrida irá operar de forma a minimizar o consumo de energia elétrica e reduzir o erro de seguimento a referência, foi desenvolvida uma função de otimização. Como essa função requer uma grande capacidade de processamento, um algoritmo de controle sub-ótimo foi criado para que pudesse ser utilizado em microcontroladores mais simples e baratos. O sistema híbrido foi modelado matematicamente e as expressões foram validadas utilizando os dados adquiridos em um protótipo construído em Florianópolis, Santa Catarina. Testes de campo e simulações comprovaram que o sistema proposto é economicamente viável, economizando expressivas quantidades de energia elétrica e água se comparado aos sistemas tradicionais. Ao tomar como base a média anual do clima de Florianópolis, a planta solar híbrida é capaz de reduzir o consumo de energia elétrica em mais de 78%. Além disso, o sistema solar proposto, se comparado a uma planta solar tradicional, evita o desperdício do volume de água que fica acumulado no encanamento entre o boiler e o chuveiro, o que pode representar uma economia superior a 4 mil litros de água por ano para uma família com quatro pessoas.

Palavras-chave: Sistema Solar, Eficiência Energética, Otimização, Modelagem e Automação de Sistemas

ABSTRACT

This work addresses the increasing energy efficiency of a heating water unit for bath. This motivation is based on the fact that 24% of energy consumption in the domestic sector is used for this purpose. Moreover, the electric shower, which is used in approximately 73% of Brazilian residences, is the main responsible for the peak energy demand that occurs between 18h and 21h. Therefore, a hybrid heating system using solar and electric energy is proposed. The system is basically composed of solar collectors, a storage tank and an electric shower. Automatic valves and power controllers are used in the plant to regulate water temperature inside the boiler and in the shower, and to control hot and cold flow rates during bath. A microcontroller is responsible to control the entire system, in order to meet the requirements (bath temperature and water flow) defined by the user. The adjustment of valve opening and shower power is done automatically, enhancing the comfort for the user. To ensure that the hybrid solar plant will operate to minimize energy consumption and reduce the reference tracking error, an optimization function was developed. Since this function requires a large processing capacity, a suboptimal control algorithm was created so it could be used in simpler and cheaper microcontrollers. The hybrid system was mathematically modeled and expressions were validated using data acquired on a prototype built in Florianópolis, Santa Catarina. Field tests and simulations showed that the proposed system is economically viable, saving significant amount of energy and water compared to traditional systems. Based on the annual average of the climate in Florianópolis, the hybrid solar plant is able to reduce energy consumption by more than 78%. Moreover, the proposed solar system, compared to a traditional solar plant, avoids wasting the volume of water that gets accumulated in the pipeline between the boiler and the shower, which may represent an economy greater than 4000 liters of water per year, considering a family with four people.

Keywords: Solar System, Energy Efficiency, Optimization, Modeling and Automation Systems

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Radiação média diária no mês de Abril de 2014 (INPE, 2014)	31
Figura 2	Participação dos eletrodomésticos mais importantes no consumo médio domiciliar brasileiro (ELETROBRAS, 2009)	32
Figura 3	Curva de carga nas residências brasileiras (ELETROBRAS, 2009)	33
Figura 4	Mecanismos de transferência de calor no coletor solar (PASSOS, 2011)	38
Figura 5	Sistema de aquecimento solar por termossifão (CUMULUS, 2009)	40
Figura 6	Sistema de aquecimento solar por circulação forçada (CUMULUS, 2009)	41
Figura 7	Esquema do sistema solar híbrido	48
Figura 8	Gráfico da potência da resistência elétrica do chuveiro versus a variação da temperatura da temperatura proporcionada por ela	49
Figura 9	Foto do boiler de 200L	51
Figura 10	Foto das placas solares utilizadas para aquecer a água .	51
Figura 11	Foto do Arduino Mega 2560	52
Figura 12	Foto do sensor de temperatura DS18B20	52
Figura 13	Foto do sensor de vazão SEN02141B	53
Figura 14	Foto do fotorresistor LDR de 5mm	53
Figura 15	Foto do relé de estado sólido	54
Figura 16	Foto do servomotor Moxie M38-360	55
Figura 17	Esquema elétrico dos equipamentos localizados na laje .	55
Figura 18	Esquema elétrico dos equipamentos localizados no interior da casa	56
Figura 19	Resultados obtidos através de um experimento entre os dias 09 a 12 de Agosto de 2013	62
Figura 20	Resultados obtidos através de um experimento entre os dias 03 a 09 de Setembro 2013	63
Figura 21	Resultados obtidos através de um experimento no dia 27 de Agosto de 2013	64
Figura 22	Resultados obtidos através de um experimento no dia 28	

de Agosto de 2013.....	65
Figura 23 Resultados obtidos através de um experimento no dia 31 de Setembro de 2013.....	66
Figura 24 Resultados obtidos através de um experimento no dia 17 de Dezembro de 2013.....	67
Figura 25 Diagrama de blocos da planta solar híbrida.....	70
Figura 26 Resultados obtidos através de um experimento no dia 10 de Dezembro de 2013.....	90
Figura 27 Comparativo entre os resultados obtidos no protótipo e no modelo virtual com os dados coletados no dia 10 de Dezembro de 2013.....	92
Figura 28 Resultados obtidos através de um experimento no dia 12 de Dezembro de 2013.....	93
Figura 29 Comparativo entre os resultados obtidos no protótipo e no modelo virtual com os dados coletados no dia 12 de Dezembro de 2013.....	94
Figura 30 Resultado obtido utilizando dados coletados entre os dias 09 e 12 de Agosto de 2013 considerando a potência da resistência do chuveiro igual a 4400W e a do boiler igual a 3000W.....	96
Figura 31 Resultado obtido utilizando dados coletados entre os dias 09 e 12 de Agosto de 2013 considerando a potência da resistência do chuveiro igual a 6600W e a do boiler igual a 3000W.....	97
Figura 32 Resultado obtido utilizando dados coletados entre os dias 09 e 12 de Agosto de 2013 considerando a potência da resistência do chuveiro igual a 4400W e a do boiler igual a 4500W.....	98
Figura 33 Dados de entrada na simulação que representam um dia típico do mês de Junho em Florianópolis.....	104
Figura 34 Dinâmica do sistema 1 (chuveiro elétrico) em um dia típico do mês de Junho (inverno).....	105
Figura 35 Dinâmica do sistema 2 (planta solar) em um dia típico do mês de Junho (inverno).....	106
Figura 36 Dinâmica do sistema 3 (planta solar com chuveiro elétrico) em um dia típico do mês de Junho (inverno).....	108
Figura 37 Dinâmica do sistema 4 (planta solar híbrida otimizada) em um dia típico do mês de Junho (inverno).....	109
Figura 38 Dinâmica do sistema 5 (planta solar híbrida com algoritmo sub-ótimo de controle) em um dia típico do mês de Junho (inverno).....	110

Figura 39	Dados de entrada na simulação que representam um dia típico do mês de Dezembro em Florianópolis.....	111
Figura 40	Dinâmica do sistema 1 (chuveiro elétrico) em um dia típico do mês de Dezembro (verão).....	112
Figura 41	Dinâmica do sistema 2 (planta solar) em um dia típico do mês de Dezembro (verão).....	113
Figura 42	Dinâmica do sistema 3 (planta solar com chuveiro elétrico) em um dia típico do mês de Dezembro (verão).....	115
Figura 43	Dinâmica do sistema 4 (planta solar híbrida otimizada) em um dia típico do mês de Dezembro (verão).....	116
Figura 44	Dinâmica do sistema 5 (planta solar híbrida com algoritmo sub-ótimo de controle) em um dia típico do mês de Dezembro (verão).....	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Participação das fontes de energia na matriz energética brasileira (EPE, 2013)	30
Tabela 2	Valores das constantes da modelagem matemática	60
Tabela 3	Comparação de desempenho entre as três simulações...	100
Tabela 4	Comparação da eficiência energética dos 5 sistemas nos meses de Janeiro (verão), Abril (outono), Julho (inverno) e Outubro (primavera) e em uma média anual do clima de Florianópolis.....	118

LISTA DE SÍMBOLOS

Variável	Descrição	Unidade
Alfabeto latino		
A_{bo}	Área da superfície do boiler	m^2
A_{sc}	Área da superfície do coletor solar	m^2
c_p	Calor específico da água	$J/K.kg$
d	Atraso de transporte da água quente entre o boiler e o chuveiro	s
F_{cold}	Vazão de água fria da caixa d'água para o chuveiro	m^3/s
$F_{cold.est}$	Vazão estimada do consumo de água fria no sistema	m^3/s
$F_{cold.ref}$	Vazão de referência do consumo de água fria	m^3/s
F_{hot}	Vazão de água quente do boiler para o chuveiro e vazão de água fria da caixa d'água para o boiler	m^3/s
$F_{hot.est}$	Vazão estimada do consumo de água quente no sistema	m^3/s
$F_{hot.max}$	Vazão máxima de água quente no sistema	m^3/s
$F_{hot.ref}$	Vazão de referência do consumo de água quente	m^3/s
F_{sh}	Vazão da água do banho (saída do chuveiro)	m^3/s
$F_{sh.est}$	Vazão estimada do consumo de água durante o banho	m^3/s
f_r	Fator de remoção do calor no coletor solar	—
F_{ref}	Vazão de referência (desejada) de água para o banho	m^3/s
I_r	Irradiação solar que incide sobre o coletor solar	W/m^2
K_1	Peso da variável T_{bo} na função objetivo	—
K_2	Peso da variável X_{sh} na função objetivo	—
K_3	Peso da variável T_{sh} na função objetivo	—
K_4	Peso da variável ε_X na função objetivo	—
K_5	Peso da variável ε_T na função objetivo	—
K_{hot}	Fator de perdas térmicas da água entre o boiler e o chuveiro	—
K_{pipe}	Coeficiente de perdas térmicas na tubulação de água quente	m^{-1}

L_{pipe}	Comprimento do cano de água quente	m
m	Horizonte de predição	—
n	Passo amostral	—
P_{bo}	Potência consumida na resistência do boiler	W
$P_{bo.est}$	Consumo de potência estimado na resistência do boiler	W
$P_{bo.max}$	Potência máxima da resistência do boiler	W
$P_{bo.min}$	Potência mínima da resistência do boiler	W
P_{sh}	Potência consumida na resistência do chuveiro	W
$P_{sh.max}$	Potência máxima da resistência do chuveiro	W
$P_{sh.min}$	Potência mínima da resistência do chuveiro	W
Q_{bo}	Calor transferido da resistência do boiler para a água	J
Q_{cons}	Fluxo de calor entre a água quente que sai do boiler para o chuveiro e a água fria da caixa d'água que entra no boiler	J
Q_{loss}	Perdas térmicas do boiler para o ambiente	J
Q_{sc}	Calor útil absorvido pelo fluido nas placas solares	J
Q_{sh}	Calor transferido da resistência do chuveiro para a água	J
t	Instante de tempo	s
T_{amb}	Temperatura ambiente	$^{\circ}C$
T_{bo}	Temperatura da água no interior do boiler	$^{\circ}C$
$T_{bo.est}$	Temperatura estimada da água no interior do boiler	$^{\circ}C$
$T_{bo.max}$	Temperatura máxima que a água no boiler pode atingir	$^{\circ}C$
$T_{bo.min}$	Temperatura mínima que a água no boiler pode atingir	$^{\circ}C$
$T_{bo.ref}$	Temperatura de referência da água no boiler	$^{\circ}C$
T_{cold}	Temperatura da água fria no sistema	$^{\circ}C$
T_{hot}	Temperatura da água quente na entrada do chuveiro	$^{\circ}C$
$T_{hot.est}$	Temperatura estimada da água quente na entrada do chuveiro	$^{\circ}C$
$T_{hot.ref}$	Temperatura de referência da água quente na entrada do chuveiro	$^{\circ}C$
T_{mix}	Temperatura da mistura da água quente e fria no chuveiro	$^{\circ}C$

T_{ref}	Temperatura referência (desejada) para o banho	$^{\circ}C$
t_s	Período de amostragem	s
T_{sci}	Temperatura da água na entrada do coletor solar	$^{\circ}C$
T_{sco}	Temperatura da água na saída do coletor solar	$^{\circ}C$
T_{sh}	Temperatura da água do banho (saída do chuveiro)	$^{\circ}C$
U_{bo}	Coefficiente global de perdas térmicas do boiler	$W/m^2 \cdot ^{\circ}C$
U_{sc}	Coefficiente global de perdas térmicas do coletor solar	$W/m^2 \cdot ^{\circ}C$
V_{bo}	Volume interno do boiler	m^3
X_{sh}	Variável utilizada na função de otimização que representa o produto da vazão de referência pela temperatura de referência	$^{\circ}C \cdot m^3/s$
$X_{sh.max}$	Valor máximo que a variável X_{sh} pode atingir	$^{\circ}C \cdot m^3/s$
$X_{sh.min}$	Valor mínimo que a variável X_{sh} pode atingir	$^{\circ}C \cdot m^3/s$

Alfabeto grego

α	Coefficiente de absorção de calor no coletor solar	—
ε_T	Parâmetro que limita a faixa de operação da temperatura do banho	—
ε_X	Parâmetro que limita a faixa de operação da variável X_{sh}	—
η	Taxa de eficiência na conversão de energia elétrica em calor	—
ρ	Densidade da água	kg/m^3
τ	Coefficiente de transmissão de calor através do vidro	—
$\Delta T_{sh.max}$	Incremento máximo da temperatura da água no chuveiro	$^{\circ}C$

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	29
1.1 ENERGIA SOLAR.....	30
1.2 MOTIVAÇÃO.....	32
1.3 OBJETIVOS	35
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	35
2 PLANTAS DE AQUECIMENTO SOLAR	37
2.1 PLANTAS SOLARES PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA .	37
2.1.1 Coletores solares	37
2.1.2 Reservatório térmico	38
2.1.3 Circulação da água na plantas solares	39
2.1.3.1 Sistema passivo.....	39
2.1.3.2 Sistema ativo.....	40
2.2 CONTROLE E OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE AQUE- CIMENTO SOLAR	41
2.3 MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA UTILI- ZANDO PLANTAS SOLARES DOMÉSTICAS.....	43
2.3.1 Comentários finais	45
3 SISTEMA PROPOSTO	47
3.1 FUNCIONAMENTO DA PLANTA E DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS	47
3.1.1 Operação do sistema	47
3.1.2 Descrição dos equipamentos.....	50
3.2 MODELO MATEMÁTICO	54
3.2.1 Coletor solar plano	57
3.2.2 Boiler	57
3.2.3 Chuveiro elétrico.....	58
3.3 VALIDAÇÃO DO MODELO	59
3.3.1 Boiler	61
3.3.2 Tubulação de água quente.....	61
3.3.3 Sistema completo	62
3.3.4 Comentários finais	64
4 ESTRATÉGIAS DE CONTROLE	69
4.1 DESCRIÇÃO E OBJETIVO	69
4.2 CONTROLE LOCAL	70
4.3 FUNÇÃO DE OTIMIZAÇÃO	72
4.4 ALGORITMO SUB-ÓTIMO	82
4.4.1 Comentários finais	86

5 RESULTADOS	89
5.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS NO PROTÓTIPO	89
5.1.1 Primeiro experimento	89
5.1.2 Segundo experimento	91
5.2 ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA POTÊNCIA DAS RE- SISTÊNCIAS NO CONSUMO ENERGÉTICO DO SIS- TEMA HÍBRIDO	95
5.2.1 Chuveiro elétrico e boiler de média potência	95
5.2.2 Chuveiro elétrico de alta potência e boiler de média potência	97
5.2.3 Chuveiro elétrico de média potência e boiler de alta potência	98
5.2.4 Análise dos três cenários propostos	99
5.3 DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS DE AQUECIMENTO DE ÁGUA	100
5.3.1 Chuveiro elétrico	100
5.3.2 Planta solar temporizada	101
5.3.3 Planta solar com termostato integrado com chu- veiro elétrico	102
5.3.4 Sistema híbrido otimizado e sub-otimizado	102
5.4 COMPARAÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO ENTRE OS SISTEMAS	102
5.4.1 Análise dos sistemas em Junho (inverno)	103
5.4.1.1 Sistema 1 - Chuveiro elétrico	104
5.4.1.2 Sistema 2 - Planta solar temporizada	105
5.4.1.3 Sistema 3 - Planta solar com termostato integrado com chuveiro elétrico	107
5.4.1.4 Sistema 4 - Sistema híbrido otimizado	108
5.4.1.5 Sistema 5 - Sistema híbrido com algoritmo sub-ótimo....	110
5.4.2 Análise dos sistemas em Dezembro (verão)	111
5.4.2.1 Sistema 1 - Chuveiro elétrico	112
5.4.2.2 Sistema 2 - Planta solar temporizada	113
5.4.2.3 Sistema 3 - Planta solar com termostato integrado com chuveiro elétrico	114
5.4.2.4 Sistema 4 - Sistema híbrido otimizado	114
5.4.2.5 Sistema 5 - Sistema híbrido com algoritmo sub-ótimo....	116
5.4.3 Análise dos sistemas nas quatro estações do ano ...	117
5.5 RETORNO SOBRE O INVESTIMENTO	119
5.5.1 Comentários finais	120
6 CONCLUSÃO	121

6.1	IMPORTÂNCIA DO TRABALHO.....	121
6.2	DIRETRIZES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	123
	REFERÊNCIAS	125

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por eletricidade provoca uma busca por novas fontes de energia e pelo aumento da eficiência energética dos sistemas já existentes.

Dados de janeiro de 2014, divulgados pela Empresa de Pesquisa Energética, mostram que o consumo de energia elétrica no Brasil encerrou o ano de 2013 com elevação de 3,5% sobre o ano anterior, totalizando 463.740 gigawatts-hora (GWh). O aumento foi puxado pelo consumo das residências (+6,1%), atingindo o valor total de 124.858GWh (EPE, 2014).

O aumento da demanda energética traz consigo muitos problemas ambientais, pois muitos ecossistemas foram e continuam sendo destruídos ou alterados desde a produção da energia, até disponibilização dela na rede elétrica. No ano de 2010, 80,6% do total da energia consumida no mundo provinha de combustíveis fósseis, os quais causam o efeito estufa, e 2,7% da energia nuclear. Os 16,7% restantes advinham de fontes renováveis, sendo que a biomassa tradicional era responsável por 8,5%, os biocombustíveis representavam 0,7% e as hidrelétricas somavam 3,3% da geração de energia no mundo. Os 4,2% restantes vinham basicamente da energia eólica, solar, geotérmica e dos oceanos, que são as formas de energia que menos agridem o meio ambiente (REN21, 2012).

No Brasil, a participação de fontes renováveis na matriz energética é uma das mais elevadas do mundo. Em 2012, as renováveis forneciam 42,4% da energia brasileira, contra 57,6% das não-renováveis (EPE, 2013). A tabela 1 apresenta as principais fontes energéticas brasileiras e seu percentual de participação na geração de energia.

Segundo o Relatório Especial sobre Energias Renováveis e Mitigação de Mudanças do Clima, divulgado em 2011 pelo IPCC (Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas), se até o ano de 2050 as fontes renováveis fossem responsáveis por mais de 50% da produção de energia do mundo seria possível conter o aquecimento global (IPCC, 2011). O mesmo relatório destaca que as fontes energéticas limpas têm maior potencial energético e melhor custo para lidar com as mudanças climáticas, porque não há limitações técnicas, apenas uma série de barreiras políticas e econômicas que precisam ser alteradas para que se invista mais nas energias renováveis.

Países desenvolvidos e em desenvolvimento como Estados Unidos, Espanha, Inglaterra, Alemanha, Itália, Japão, França, Brasil,

Tabela 1 – Participação das fontes de energia na matriz energética brasileira (EPE, 2013)

Fontes renováveis		Fontes não renováveis	
Biomassa da cana-de-açúcar	15,4%	Petróleo e derivados	39,2%
Hidrelétricas	13,8%	Gás natural	11,5%
Lenha e carvão vegetal	9,1%	Carvão mineral	5,4%
Outras fontes renováveis	4,1%	Urânio	1,5%

Índia e China têm investido na pesquisa e no incentivo do uso de fontes de energias renováveis. Em 2011, a geração de energia a partir dessas fontes atingiu 4.540TWh, volume 5,8% maior que em 2010. A expectativa é de que essa taxa de crescimento seja mantida até 2017, quando produção global alcançará a marca 6.400TWh (ENERGIA, 2012).

Entre as tecnologias de geração de energia que mais vão crescer nos próximos anos, destaca-se a energia solar. Atualmente essa tecnologia tem uma pequena contribuição a nível global, mas estima-se que esse percentual aumente muito nos próximos anos visto que o custo de produção está diminuindo e a sua capacidade de geração aumentando (MORAES, 2011).

Só no ano de 2010 a energia solar cresceu 75% na Alemanha, atingindo a marca de 17.300 megawatts de capacidade de produção elétrica fotovoltaica (SEGUNDO, 2011). Até 2017, a tecnologia solar deverá contribuir com 4,9% da geração renovável, sendo a energia fotovoltaica a de maior crescimento de escala. Essa deve ter sua capacidade mundial aumentada de 70GW, em 2011, para 230GW, em 2017 (ENERGIA, 2012).

1.1 ENERGIA SOLAR

A energia solar é uma fonte de energia inesgotável e limpa. Essa energia chega à Terra por meio da radiação solar e seu valor médio, por unidade de tempo, é chamado de constante solar, sendo igual a $1367W/m^2$ (STINE; GEYER, 2011). Estima-se que essa energia incidente sobre a superfície terrestre seja da ordem de 10 mil vezes o consumo energético mundial (CRESESB, 2013).

Como grande parte do território brasileiro está localizado na região tropical, a incidência da radiação solar é alta, propiciando o uso da energia solar em todo o país. O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) mede diariamente a radiação solar por meio de satélite e divulga essa informação em seu site (INPE, 2014). Na figura 1 é possível verificar a radiação média diária no mês de Abril de 2014.

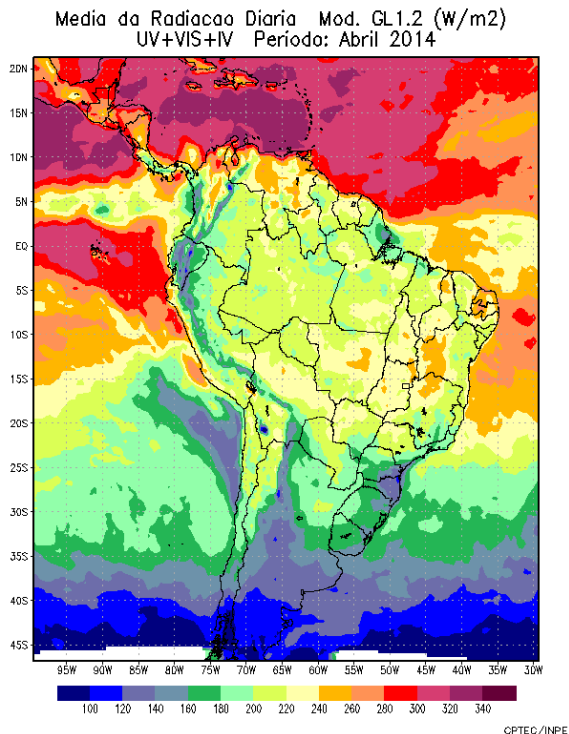


Figura 1 – Radiação média diária no mês de Abril de 2014 (INPE, 2014)

Quase a totalidade das fontes de energia (hidráulica, biomassa, eólica, combustíveis fósseis e dos oceanos) são formas indiretas de energia solar. Além disso, a radiação solar pode ser utilizada diretamente como fonte de energia térmica, para aquecimento de fluídos e ambientes, e para geração de potência mecânica ou elétrica. Ela ainda pode ser convertida diretamente em energia elétrica, por meio de efeitos sobre determinados materiais, entre os quais se destacam o termoeletrico e o fotovoltaico (PENTEADO; PILATTI; PEDROSO, 2008).

O aproveitamento térmico para aquecimento de fluidos é feito com o uso de coletores ou concentradores solares. Além de ser a aplicação mais simples e barata, a tecnologia envolvida no processo está amplamente difundida e pode ser utilizada em diversos setores como o residencial, industrial, agropecuário e de serviços (hotéis, restaurantes, clubes, hospitais, entre outros) (ALVARENGA, 2001). No meio residencial, os coletores planos têm sido muito utilizados para substituir chuveiros elétricos ou então serem utilizados como uma fonte auxiliar para o aquecimento da água.

1.2 MOTIVAÇÃO

Segundo uma pesquisa realizada em 2005 pela Eletrobras Procel (ELETROBRAS, 2009), 80,9% das residências brasileiras aquecem a água do banho de alguma forma, sendo que 90,9% desses domicílios utilizam a eletricidade para esse aquecimento. Isso torna o chuveiro elétrico o principal responsável pelo gasto energético dentro das casas, consumindo 24% da energia elétrica, conforme apresentado na figura 2. Além disso, ele também é um dos principais responsáveis pelo pico energético do sistema elétrico brasileiro, o qual ocorre entre as 18h e 21h, como pode ser observado na figura 3.

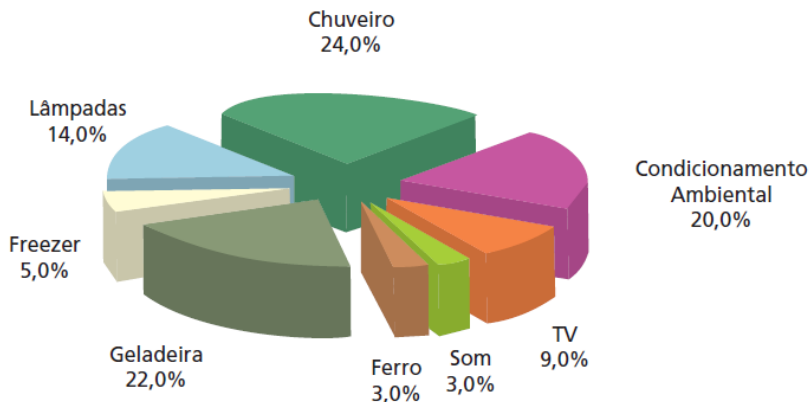


Figura 2 – Participação dos eletrodomésticos mais importantes no consumo médio domiciliar brasileiro (ELETROBRAS, 2009)

Segundo Nota Técnica divulgado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2010), o chuveiro elétrico contribui com 43%

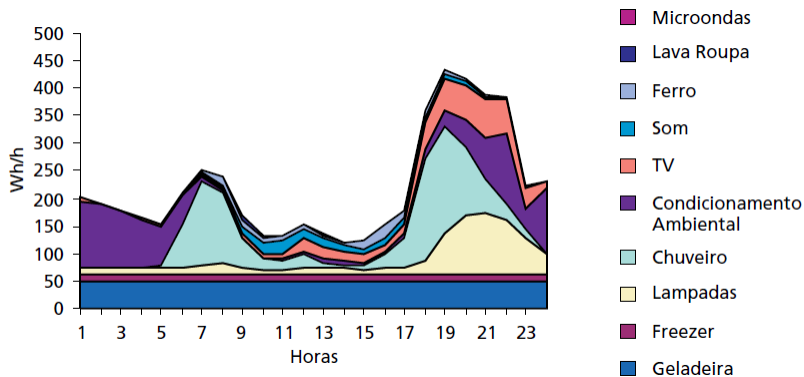


Figura 3 – Curva de carga nas residências brasileiras (ELETROBRAS, 2009)

para a formação do pico de consumo do setor residencial (sistema de baixa tensão). Logo, todo o sistema elétrico brasileiro (geração, transmissão e distribuição) deve ser superdimensionado para atender o pico energético.

De acordo com o Ministério de Minas e Energia, a melhora da eficiência energética dos chuveiros e a compatibilização da energia solar para o aquecimento da água, pode reduzir o consumo elétrico e amenizar o pico da demanda energética do Brasil (MME, 2011).

Outra solução, para reduzir o consumo de energia elétrica, seria incentivar o uso de chuveiros a gás, entretanto esses equipamentos utilizam mais água para o banho que os chuveiros elétricos (VIZEU, 2009) e parte do calor é perdido na tubulação antes de chegar ao chuveiro. Outra desvantagem dessa tecnologia é que um determinado volume de água é perdido no início do banho (devido ao acúmulo de água entre o aquecedor e a ducha) porque a temperatura da água está abaixo do valor desejado. Além disso, ela utiliza um combustível fóssil que causa o efeito estufa.

Diante do exposto, o governo federal já se comprometeu em instalar aquecedores solares em todas as casas que fazem parte do programa "Minha Casa, Minha Vida 2". Na primeira etapa do programa, algumas residências já haviam adotado a tecnologia solar e alguns benefícios, principalmente econômicos, já puderam ser observados pelos moradores (Ministério do Planejamento, 2011b).

A implantação de aquecedores solares em obras de grande escala, como é o caso do "Minha Casa, Minha Vida", é justificada pois seu

custo representa no máximo um acréscimo de 5% no valor total da obra. Com isso, as famílias economizam mais energia e o governo precisa investir menos na expansão do setor elétrico (Ministério do Planejamento, 2011a).

Um estudo realizado pela Empresa de Pesquisa Energética estima que, ao colocar a tecnologia solar em habitações populares, o Brasil poderá economizar 741 gigawatt/hora (GWh) de energia por ano. Isso equivale ao consumo energético de todas as residências da região Centro-Oeste no mês de maio de 2011, por exemplo (Ministério do Planejamento, 2011c).

Outras ações também estão sendo estimuladas pelos governos estaduais para ampliar o uso da energia solar. Em abril de 2013, o governo de São Paulo apresentou o estudo "Levantamento do Potencial da Energia Solar Paulista", o qual mostra a potencialidade da produção solar em grande escala no estado. No mesmo evento, foi divulgado o decreto que concede diferimento e suspensão de impostos para a cadeia de insumos usados nos setores solar e eólico (ENERGIA, 2013).

Em São Paulo, ainda, existe um projeto de lei, o qual tornaria obrigatória a instalação de aquecedores solares ou gás natural em conjuntos habitacionais, habitações populares, hospitais, escolas e creches municipais (PAULO, 2014).

Já no Rio de Janeiro, a Agência Estadual de Fomento (AgeRio), em Dezembro de 2013, ampliou sua linha de financiamento para viabilizar a implantação de projetos que reduzam o consumo e custos de produção de energia. Entre os projetos beneficiados estão: otimização de processos produtivos com redução comprovada no impacto ambiental e utilização de energia eólica e solar (SEDEIS, 2013).

Todas essas ações e a redução do preço dos equipamentos solares têm feito com que eles sejam visto com mais frequência nas residências. Na região de Blumenau, por exemplo, há mais de 2500 moradias com a tecnologia (BRUGNAGO, 2014). Em termos nacionais, em 2009, o número de domicílios com energia solar era de aproximadamente 1057 mil (MME, 2011).

Apesar do sistema de aquecimento solar permitir, em média, uma redução no consumo de energia, se utilizado de forma inadequada, com o suplemento elétrico instalado no boiler, pode se tornar um equipamento pouco eficiente. Assim, este trabalho propõe um sistema de aquecimento híbrido, o qual combina os benefícios de uma planta solar com as vantagens de um chuveiro elétrico, de forma a minimizar o consumo de água e energia. Além disso, foi construída uma unidade de aquecimento solar doméstica e foi desenvolvido um sistema de

automação e controle especialmente para esta unidade.

1.3 OBJETIVOS

O trabalho tem os seguintes objetivos:

- Construir um sistema híbrido de aquecimento de água para o banho, acoplando um chuveiro elétrico a uma planta solar tradicional, a fim de analisar o comportamento térmico do sistema e realizar testes de campo;
- Desenvolver um controle ótimo para o sistema híbrido com o objetivo de reduzir o consumo de energia elétrica e de água durante o banho, gerando uma economia ao usuário;
- Analisar o consumo energético de um chuveiro elétrico, de uma planta solar tradicional e de um sistema híbrido (planta solar integrada ao chuveiro elétrico) e avaliar a viabilidade técnica e econômica da última opção;
- Automatizar o processo de ajuste de temperatura e vazão na hora do banho. O usuário irá definir previamente a temperatura de seu banho e a vazão desejada de tal forma que quando ele abrir o registro do chuveiro, a água tenderá aos valores definidos. Isso irá proporcionar ao usuário maior conforto na hora de tomar o banho.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Na sequência da presente introdução, será apresentado no capítulo 2 as formas de aquecimento solar em plantas domésticas e trabalhos de otimização envolvendo energia solar. No capítulo 3 será abordado o funcionamento do sistema proposto e a modelagem matemática da planta solar. O capítulo 4 focará nas estratégias de controle desenvolvidas para que o sistema atendesse os requisitos definidos e economizasse energia elétrica. No capítulo 5 serão expostos os resultados obtidos com este trabalho e uma comparação entre o sistema proposto e outras plantas de aquecimento de água. Por fim, no capítulo 6, são apresentadas as conclusões deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 PLANTAS DE AQUECIMENTO SOLAR

Este capítulo apresenta o funcionamento de uma planta solar tradicional para o aquecimento de água e alguns projetos que visam o controle e o aumento da eficiência energética em sistemas solares. Além disso, são apresentados alguns trabalhos de otimização envolvendo sistemas de energia solar.

2.1 PLANTAS SOLARES PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA

Um sistema de aquecimento solar simples apresenta os seguintes equipamentos:

- Uma caixa d'água, a qual recebe a alimentação de água da rede municipal;
- Coletores solares que aquecem a água;
- Um reservatório térmico para armazenar a água aquecida.

2.1.1 Coletores solares

Os coletores solares são os principais equipamentos do sistema. Eles absorvem a radiação solar e transferem essa energia, convertida em calor, para um fluido (ar, água ou óleo em geral) (KALOGIROU, 2009).

Os coletores podem ser classificados basicamente em dois tipos: concentradores e não-concentradores. Os coletores concentradores são utilizados quando é necessário aquecer o fluido a temperaturas mais elevadas. Esses equipamentos possuem uma superfície refletora que direcionam a radiação solar a um foco, onde se encontra a tubulação do fluido que irá absorver o calor (KALOGIROU, 2009).

No caso dos coletores não-concentradores, a área de interceptação e absorção da radiação é a mesma. Esses coletores se subdividem em dois tipos: tubos evacuados e planos. Os tubos evacuados recebem este nome devido ao isolamento térmico a vácuo existente em seus coletores solares. Esses equipamentos possuem alta eficiência e são capazes de aquecer o fluido a temperaturas superiores a $100^{\circ}C$, entretanto devido a seu alto custo são empregados basicamente na indústria (KALOGIROU, 2009).

Os coletores planos aquecem a água a uma temperatura de até 80°C . Eles são compostos por uma tubulação de cobre e uma placa absorvedora pintada de preto. Na parte frontal do coletor existe uma cobertura transparente de vidro e na parte de trás existe uma isolamento térmica para evitar perdas de calor para o ambiente (KALOGIROU, 2009). O equipamento utiliza o princípio do efeito estufa para absorver a radiação solar e transferir o calor na forma de energia térmica ao fluido que circula pela placa, conforme apresentado na figura 4.

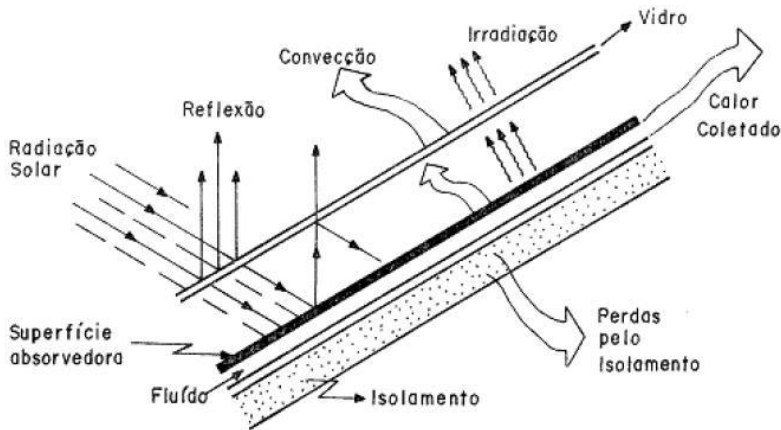


Figura 4 – Mecanismos de transferência de calor no coletor solar (PAS-SOS, 2011)

Para aplicações residenciais, onde a temperatura da água quente é relativamente baixa, os coletores mais indicados são os planos, porque esses equipamentos são mais baratos, a instalação e operação deles é mais simples, têm uma boa durabilidade e são relativamente fáceis de serem reparados (LIMA, 2003). Por esse motivo, este trabalho dará um enfoque maior nos coletores solares planos, também conhecidos como placas solares.

2.1.2 Reservatório térmico

O reservatório térmico é um componente essencial para um funcionamento adequado do sistema solar. Ele é um tanque destinado a armazenar a água quente, proveniente do coletor solar, de modo a atender a demanda diária, mesmo fora dos horários de incidência solar (DUF-

FIE; BECKMAN, 1980). O reservatório deve ter um baixo coeficiente de trocas térmicas, ser resistente à corrosão e suportar temperaturas de até 80°C (CARVALHO, 2005).

Os tanques de armazenamento geralmente utilizam uma segunda fonte de energia para auxiliar no aquecimento do fluido, principalmente nos períodos noturnos e em dias nublados ou chuvosos. Essa fonte auxiliar pode ser elétrica, a gás ou bomba de calor, entretanto, na maioria dos casos, a energia elétrica é usada devido a sua facilidade de aquisição e custo operacional (POZZEBON, 2009). Neste trabalho, serão considerado apenas tanques de armazenamento que possuem uma resistência elétrica industrial em seu interior, os quais são chamados de boilers.

O reservatório pode apresentar, durante sua operação, uma estratificação térmica significativa, de forma que a água que fica no topo tenha uma temperatura mais elevada que a água localizada no fundo do tanque (DUFFIE; BECKMAN, 1980). Este fenômeno ocorre devido a variação do peso específico da água em função da temperatura. O perfil de estratificação depende de vários fatores como o tamanho e formato do tanque, a localização das entradas e saídas de água e vazão da água entrando e saindo do reservatório (DUFFIE; BECKMAN, 1980).

2.1.3 Circulação da água na plantas solares

As plantas solares domésticas são classificadas segundo o tipo de circulação da água: circulação por termossifão, que caracteriza um sistema passivo, ou forçada, que define um sistema ativo.

2.1.3.1 Sistema passivo

A circulação por termossifão, a qual caracteriza um sistema passivo, utiliza o fato de que a água possui diferentes densidades em diferentes temperaturas para fazer com que o líquido se movimente dentro do sistema, pois um fluido aquecido tende a estratificar-se ficando a parte mais quente na zona superior. No caso do sistema de termossifão a água aquecida pelo coletor solar sobe até o reservatório, empurrando a água mais fria e densa para as placas solares. Para que esse movimento seja possível é necessário que o fundo do reservatório fique pelo menos 30 centímetros acima das placas solares, como é possível observar na figura 5.

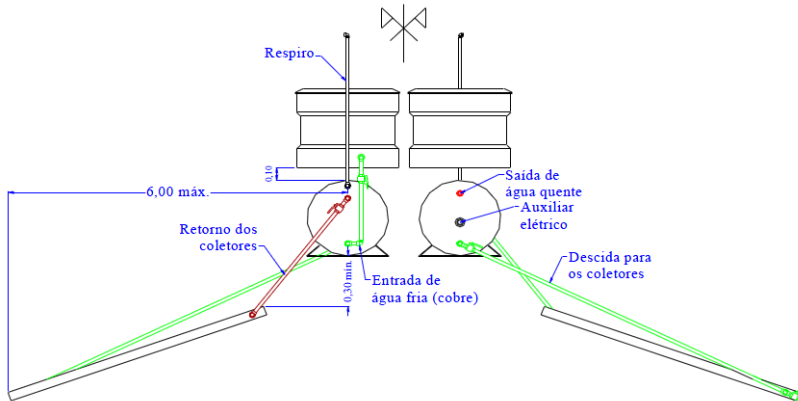


Figura 5 – Sistema de aquecimento solar por termosifão (CUMULUS, 2009)

Como o princípio de funcionamento do sistema passivo é simples e ele tem uma boa adaptação aos climas tropicais, esse é o sistema solar de aquecimento de água mais utilizado nas residências brasileiras (POZZEBON, 2009).

2.1.3.2 Sistema ativo

Quando o local de instalação inviabiliza a utilização da circulação por termosifão, ou em sistemas de grande porte, ou ainda em regiões frias, nas quais existe a possibilidade de geada e congelamento da água dentro do coletor solar, deve optar-se pela circulação forçada. Essa circulação utiliza uma bomba que é comandada por um controlador diferencial que utiliza termostatos posicionados no fundo do reservatório térmico e na saída dos coletores solares para reportar ambas temperaturas. A bomba é acionada sempre que houver um diferencial de temperatura pré-estabelecido entre eles. Nesse caso, o fluido aquecido nas placas é transportado até a parte superior do reservatório e a água mais fria do fundo do tanque é levada para os coletores. A bomba é desligada quando a diferença de temperatura atinge um valor menor que o estabelecido (CUMULUS, 2009). Na figura 6 é possível ver uma ilustração da circulação forçada.

A vantagem desse sistema em relação ao passivo é o ganho de

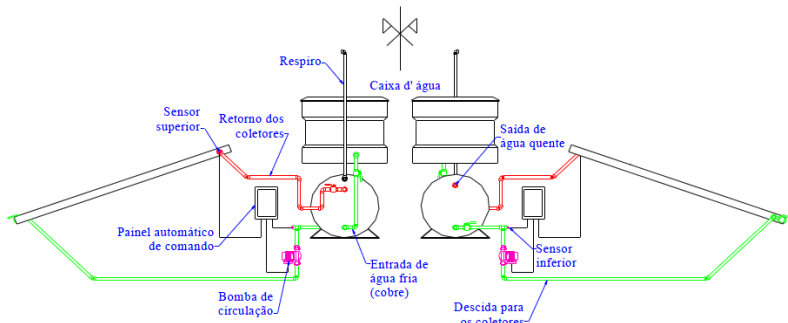


Figura 6 – Sistema de aquecimento solar por circulação forçada (CUMULUS, 2009)

flexibilidade quanto a localização do reservatório e dos coletores. O ponto negativo é que o sistema ativo se torna mais caro, devido a utilização da bomba e do controlador, e a necessidade de um ponto elétrico próximo a planta solar.

2.2 CONTROLE E OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE AQUECIMENTO SOLAR

O controle de plantas solares é desafiador, porque a principal fonte de energia, que é a radiação solar, não pode ser manipulada e sua intensidade varia ao longo do dia, das estações do ano e das condições climáticas (SONNTAG; DING; ENGELL, 2008). Por esse motivo, técnicas de controle avançado estão sendo cada vez mais aplicadas em sistemas solares. Um exemplo disso é a tese de Sobrino (2009), a qual descreve o controle de uma planta termossolar de dessalinização baseada em processo de destilação multiefeitos. Foram utilizadas duas técnicas de controle para comandar o processo. A primeira foi um controle proporcional-integral utilizando a estratégia de linearização por realimentação. A segunda, que apresentou melhores resultados, foi o controle através de um Preditor de Smith Filtrado.

Na Espanha, uma planta solar de grande porte voltada para a refrigeração de laboratórios do Departamento de Engenharia de Sistemas e Controle Automático da Universidade de Sevilha tem sido utilizada por diversos pesquisadores como tema de trabalho. No artigo de Sonntag, Ding e Engell (2008) é proposto um controle supervisor

com uma dinâmica híbrida a fim de minimizar o consumo de fontes de energia auxiliares, garantindo uma operação segura e robusta até mesmo na presença de grandes perturbações. O controle foi projetado por meio de uma análise do balanço energético do sistema e de várias identificações experimentais feitas na planta real.

Já no trabalho de Nunez-Reyes e Bordons (2005), o controle da temperatura de saída do fluido da planta solar em estudo é realizado por meio de técnicas de Controle Adaptativo aliada ao Controle Preditivo baseado em Modelo (MPC). A identificação simultânea do modelo matemático da planta, que é variante no tempo, facilita o ajuste dos parâmetros do controlador a cada mudança nas condições de operação. A combinação de ambas as técnicas de controle também evita o demorado procedimento inicial de identificação do modelo preditivo.

Considerando ainda a planta de Sevilha, a publicação de Reyes et al. (2005) mostra como um Preditor de Smith e uma ação de controle *feed-forward* podem ser utilizados para rejeitar as perturbações causadas pela radiação solar e o aquecimento auxiliar a gás. Essa estratégia de controle se mostrou apropriada quando o processo em estudo apresenta perturbações mensuráveis e incertezas no tempo de atraso do sistema.

Esse último trabalho aplica uma função de otimização em um processo solar térmico para melhorar a eficiência do sistema e reduzir o consumo de uma fonte auxiliar de energia. Outro exemplo de aplicação de otimização em plantas solares foi descrito por Badescu (2007). O autor utiliza um controle ótimo para regular a vazão mássica em coletores solares e maximizar o ganho de energia em processos térmicos que não possuem recirculação de água.

No artigo de Salazar et al. (2003), uma função de otimização é utilizada para dimensionar aquecedores solares compactos para famílias de baixa renda. A função custo desenvolvida no trabalho abrange os custos de aquisição do equipamento, o consumo energético da planta solar, a economia financeira que a família terá ao longo da vida útil do produto e a capacidade do sistema fornecer água quente a uma temperatura pré-determinada pelo usuário. Como os resultados da otimização dependem dos dados meteorológicos da região avaliada, eles só podem ser usados localmente.

Outro trabalho de dimensionamento de uma planta solar é o de Lima (2003). A autora apresenta um modelo de otimização que projeta sistemas de aquecimento solar de água utilizando uma rotina de simulação numérica. Esse cálculo leva em consideração características específicas da planta solar, tais como: condições climáticas locais, perfil

de demanda de água quente, orientação da placa coletora e a temperatura desejada da água no tanque de armazenamento. O resultado da otimização fornece a melhor inclinação e a área dos coletores solares mais adequada para se ter o menor custo com a aquisição e operação do sistema ao longo dos anos.

Há ainda o artigo de Medeiros et al. (2013), cujo foco é o aquecimento de água para zonas rurais. Neste trabalho foi desenvolvido um software para otimizar o dimensionamento da área do coletor solar, volume do boiler e potência da resistência elétrica auxiliar, visando atender às necessidades de água quente do usuário e garantir o custo mínimo anualizado.

Por fim, Colle et al. (2003) utiliza uma função de otimização para calcular a espessura do isolamento térmico dos tanques de armazenamento, os quais são empregados em sistemas de aquecimento solar de baixo custo.

2.3 MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA UTILIZANDO PLANTAS SOLARES DOMÉSTICAS

No ano de 2012, foram investidos US\$4,9 bilhões em pesquisa e desenvolvimento em temas relacionados a área de energia solar, em todo o mundo. A maioria dos estudos estão associados à geração de energia e aplicações industriais. Eles têm como objetivo melhorar a taxa de conversão de energia em placas fotovoltaicas e a eficiência dos processos de produção (UNEP, 2013). Uma prova disso, são os esforços que o governo da Malásia tem feito para aumentar o uso de placas fotovoltaicas na geração de energia. Além do dinheiro investido em pesquisas, o país, que está localizado na região equatorial, tem reduzido as barreiras comerciais para que essa nova tecnologia possa competir de forma igualitária com fontes de energia mais tradicionais (MEKHILEF et al., 2012).

No caso das pesquisas voltadas para a área residencial, a maioria delas focam na melhoria da eficiência energética do aquecimento de água para uso doméstico e no uso de ar quente para climatização de ambientes. Um exemplo disso é o trabalho de Kjellsson, Hellström e Perers (2010), o qual trata do uso dos coletores solares aliados a bombas geotérmicas para aquecimento de água e climatização de residências na Suécia. A intenção dessa combinação é reduzir o consumo de energia elétrica.

No Brasil há também vários estudos nesse tema. O trabalho de

Florio (2010) mostra como o acompanhamento da temperatura em um sistema de aquecimento solar por termossifão pode economizar eletricidade. Através de um circuito eletrônico microcontrolado, o sistema verifica a temperatura da água no tanque de armazenamento e controla o acionamento da resistência elétrica de acordo com a funcionalidade escolhida pelo usuário. Há três modos de operação: temporizado, o qual especifica um horário para o acionamento da resistência elétrica, termostato, que regula a temperatura mínima do boiler utilizando um painel que fica no interior da residência, e programado, no qual o usuário determina o momento de uso e a temperatura desejada da água. Segundo o autor, o sistema é de fácil instalação e propicia uma economia de até 25% na conta mensal.

Na dissertação de Ormenese (2009), é proposto um controlador Fuzzy para regular a entrada da água fria no boiler e, assim, impedir que a água aquecida, que se encontra no tanque de armazenamento, reduza drasticamente sua temperatura devido a mistura térmica dos fluidos. A Lógica Fuzzy utiliza como parâmetros de entrada a intensidade da radiação solar, a quantidade e a temperatura de água dentro do reservatório. O objetivo do controle é melhorar a eficiência de unidades solares de aquecimento de água controlando apenas a válvula de água que abastece o boiler.

A Lógica Fuzzy também é utilizada por Pilatti (2012) para controlar a temperatura e vazão de banho de um chuveiro elétrico. O chuveiro é alimentado com água fria da rede de abastecimento e água quente proveniente de uma planta solar. O objetivo do projeto é fazer a mistura correta dos fluidos para que seja atingida a temperatura e vazão desejada pelo usuário. O controle de entrada de água é feito por duas servoválvulas e o aquecimento auxiliar do fluido é feito por uma resistência elétrica como nos chuveiros tradicionais.

Trabalho semelhante ao anterior foi descrito por Coelho e Brisson (2011), com a diferença de que este utiliza um controlador proporcional-integral para ajustar a vazão e temperatura da água.

No artigo publicado por Passos (2011) foi realizada uma análise comparando três tipos de sistema (aquecimento solar integrado com chuveiro elétrico, aquecimento solar com resistência elétrica no tanque de armazenamento de água e aquecimento solar com reservatório auxiliar) e conclui-se que o sistema híbrido que integra a planta solar com o chuveiro elétrico é mais eficiente que os demais. Esse trabalho, porém, não apresenta resultados experimentais nem trata do problema de controle de vazão e temperatura.

2.3.1 Comentários finais

Nesse capítulo foram descritos os equipamentos básicos de um sistema solar e o tipo de planta instaladas em residências. Também foram citadas algumas estratégias de controle que já foram implementadas em sistemas solares com o intuito de obter melhores respostas a perturbações e diminuir o consumo energético de fontes auxiliares. Por fim, foram relacionados alguns trabalhos que focam na melhoria da eficiência energética de plantas solares domésticas.

No próximo capítulo descreve-se o sistema híbrido proposto e as equações matemáticas que representam o seu comportamento térmico. No capítulo 4, serão apresentadas as estratégias de controle desenvolvidas para operar o sistema e atingir os objetivos descritos no capítulo 1.

3 SISTEMA PROPOSTO

No capítulo anterior foi explicado o funcionamento de um sistema solar tradicional e foram citados alguns trabalhos relacionados a energia solar, assim como de otimização energética.

Neste capítulo é abordado o funcionamento do sistema proposto e os equipamentos empregados em sua implementação. Além disso, serão apresentados os modelos matemáticos da planta, assim como os resultados de validação desses modelos utilizando o protótipo que foi construído na Universidade Federal de Santa Catarina.

3.1 FUNCIONAMENTO DA PLANTA E DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

Um protótipo do sistema proposto foi construído junto ao Laboratório de Escoamento Multifásico do Departamento de Automação e Sistemas, no campus de Florianópolis (27.6° de latitude Sul, 48.4° de longitude Oeste), da Universidade Federal de Santa Catarina. O sistema foi projetado para atender as necessidades de uma família com quatro pessoas.

O protótipo é composto por placas solares, um tanque de armazenamento de água quente (boiler), uma bomba, um controlador que aciona a bomba, uma caixa d'água, um chuveiro elétrico, dois microcontroladores, duas válvulas automáticas que regulam a vazão da água, sete sensores de temperatura, dois sensores de vazão e um sensor de radiação. A figura 7 apresenta o esquema do sistema solar híbrido.

3.1.1 Operação do sistema

A planta solar apresenta dois circuitos hidráulicos que operam de forma independente. Em um deles a água circula entre as placas solares e o tanque de armazenamento de forma que a água quente aquecida pelo sol seja armazenada no boiler. Nesse circuito se utiliza uma bomba, dois sensores de temperatura e um controlador que regula a circulação da água. Quando a diferença de temperatura entre a saída e a entrada do coletor solar (T_{sco} e T_{sci} , respectivamente) for igual ou superior a 5°C, a bomba é acionada, e quando essa diferença cair para 2°C, o controlador desliga a bomba, interrompendo a circulação de água no

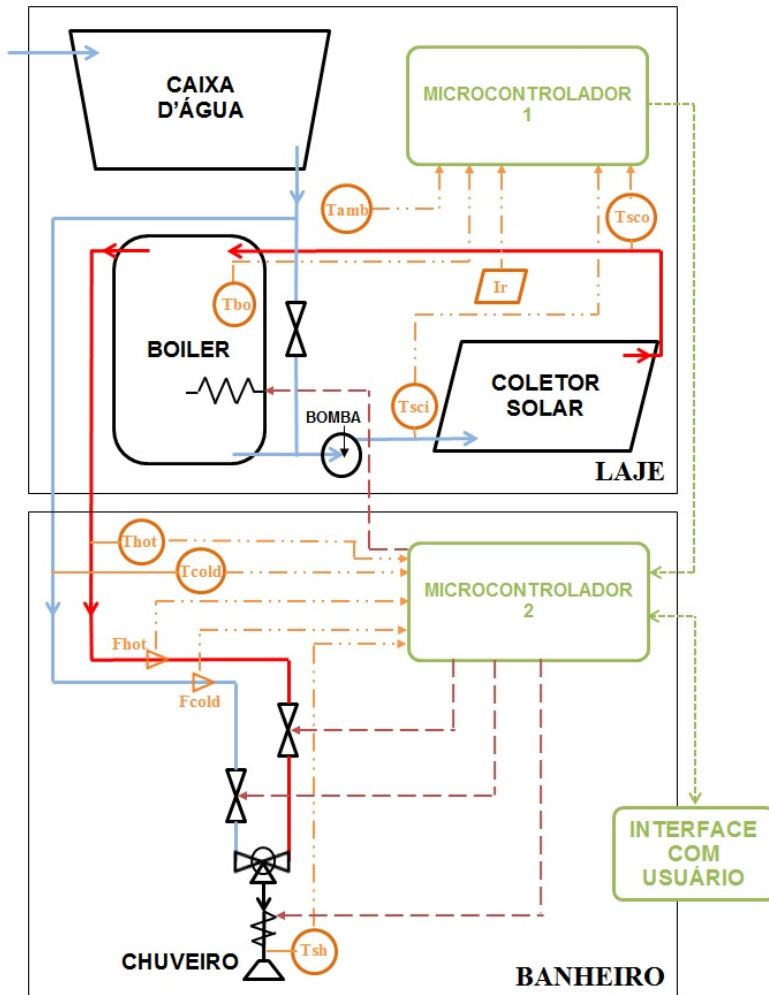


Figura 7 – Esquema do sistema solar híbrido

circuito.

Como esse circuito hidráulico não depende do segundo circuito, pode-se alterar o tipo de circulação entre o coletor solar e o boiler. A configuração utilizada no protótipo foi a da circulação forçada, sendo necessário o uso da bomba, entretanto uma circulação do tipo termosifão (circulação passiva) também poderia ser aplicada. Neste caso o

boiler teria que ficar acima das placas solares, como descrito no capítulo 2.

No segundo circuito, o boiler e a caixa d'água abastecem o chuveiro elétrico com água quente e fria, respectivamente. Conforme a água quente é consumida, a caixa d'água também repõe o volume gasto no boiler. No chuveiro, a água quente e a água fria são misturadas utilizando duas eletroválvulas e, quando necessário, a resistência do chuveiro é acionada para aquecer a água do banho. Se a resistência do chuveiro não tem potência suficiente para atingir a temperatura do banho definida pelo usuário (vide figura 8), a resistência do boiler é ligada previamente utilizando um modelo preditivo (o qual será detalhado no capítulo 4), a fim de garantir maior conforto ao usuário durante o banho.

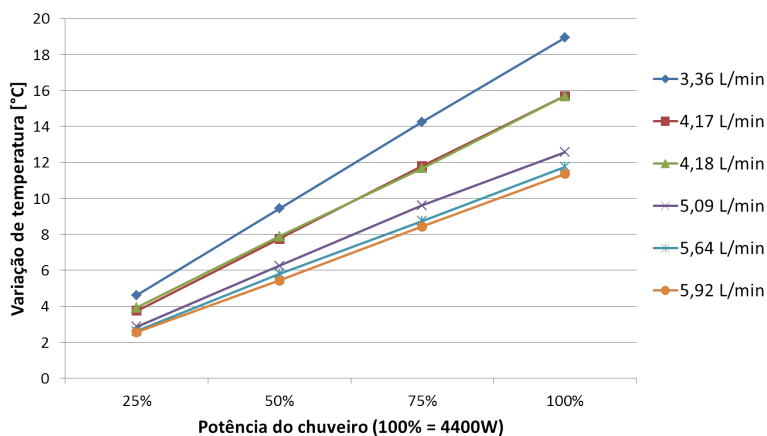


Figura 8 – Gráfico da potência da resistência elétrica do chuveiro versus a variação da temperatura da temperatura proporcionada por ela

A figura 8 mostra a relação da potência da resistência elétrica versus a variação da temperatura da água na câmara do chuveiro. O gráfico foi obtido por meio de experimentos e apresenta dados de seis diferentes valores de vazão. Nele é possível observar que a relação da potência com variação de temperatura é linear e depende da vazão de água do banho. Quanto maior a potência da resistência e menor a vazão de água, maior é a variação de temperatura do fluido. A variação máxima de temperatura registrada nos experimentos foi de 18,9°C, com uma potência de 4400W e uma vazão de 3,36L/min. Caso o usuário desejasse tomar banho com uma vazão de 5,9L/min, a variação máxima

da temperatura que ele conseguiria com um chuveiro de 4400W seria de $11,4^{\circ}\text{C}$. Supondo que a água quente, vinda do boiler, estivesse a 20°C e que o usuário desejasse tomar banho a 35°C , com uma vazão igual ou superior a 6L/min, somente com o chuveiro elétrico de 4400W não seria possível atingir essa temperatura, sendo necessário ligar a resistência do boiler para pré-aquecer a água antes que ela chegasse ao chuveiro.

Dois microcontroladores são usados para o controle e supervisão do processo. O primeiro microcontrolador realiza a aquisição de quatro temperaturas (do ambiente, do boiler, da entrada e da saída do coletor solar) e da radiação solar. Então ele envia todos os dados para o segundo microcontrolador, que faz a leitura de outras três temperaturas (do banho, da água quente e fria) e das vazões de água quente e fria utilizadas no banho. O segundo microcontrolador também é responsável por receber, de uma interface local, os parâmetros definidos pelo usuário. Com toda essa informação, o segundo microcontrolador executa um algoritmo sub-ótimo para controlar as válvulas e as resistências de tal forma que a vazão e a temperatura desejadas sejam atingidas.

O usuário pode inserir ou alterar os parâmetros do sistema utilizando um teclado a prova d'água afixado junto ao chuveiro. Quando o usuário quiser tomar um banho, ele programa o microcontrolador, fornecendo a temperatura e vazão desejada, assim como, o horário e a duração de seu banho. Essa operação pode ser feita a qualquer momento, entretanto o ideal é que seja realizada com pelo menos duas horas de antecedência em relação ao horário do banho programado, para otimizar o uso da energia e maximizar o conforto.

3.1.2 Descrição dos equipamentos

Todos os equipamentos utilizados no protótipo são encontrados no mercado nacional. A escolha desses componentes leva em conta dois aspectos: adequação ao projeto (atendimento dos requisitos) e custo.

Como neste estudo a planta visava apenas o aquecimento de água para o banho, o dimensionamento do tanque de armazenamento e das placas solares, dependia unicamente do número de pessoas que o sistema atenderia. Segundo a norma (ABNT, 1993), cada pessoa consome em média 45L de água quente por dia em uma residência, portanto, neste caso, era aconselhável ter um boiler de 200L. Um exemplo desse equipamento é apresentado na figura 9. Com relação a potência da resistência interna do boiler, quanto maior seu valor, maior é a sua

capacidade de aquecimento e, conseqüentemente, menor é o tempo necessário para aquecer a água do boiler. O valor da potência normalmente está ligado ao volume do tanque de armazenamento, sendo que no protótipo o valor da resistência é de 3000W.



Figura 9 – Foto do boiler de 200L

A área do coletor solar está diretamente ligada ao consumo de água quente e, conseqüentemente, ao volume do tanque de armazenamento. Na planta híbrida, foram utilizadas três placas planas de 1,5m² cada uma, conforme é exposto na figura 10.



Figura 10 – Foto das placas solares utilizadas para aquecer a água

Como a caixa d'água abastece, com água fria, o chuveiro e o boiler, recomenda-se que sua capacidade seja igual ou superior a do boiler. No sistema desenvolvido o volume da caixa d'água é de 310L.

A potência do chuveiro é definida pela usuário, segundo a disponibilidade do produto no mercado. Para a operação desse sistema, recomenda-se chuveiros com grande potência, pois como será demonstrado no capítulo 5, quanto maior a potência da resistência, maior será a economia de energia do sistema híbrido para atender os requisitos de conforto. No protótipo foi instalado um chuveiro de 4400W.

O microcontrolador escolhido foi o Arduino Mega 2560 (vide figura 11), porque é uma plataforma de prototipagem eletrônica de hard-

ware livre, com suporte de entrada/saída embutido, sendo um produto de baixo custo e fácil de usar. O microcontrolador tem a vantagem de possuir vários componentes, protocolos e portas instalados. Ele possui uma linguagem de programação própria, a "Wiring", que é semelhante a C++ e que contém funções específicas para o Arduino. Além disso, o componente possui um ambiente de desenvolvimento (software de programação) específico, o qual inclui interfaces de comunicação e bibliotecas com diversas funcionalidades (ARDUINO, 2013).

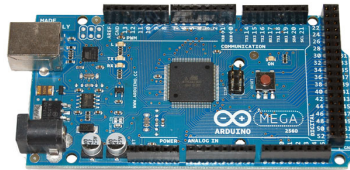


Figura 11 – Foto do Arduino Mega 2560

Para a medição de temperatura optou-se pelo sensor DS18B20 (apresentado na figura 12), pois ele é um termômetro digital capaz de medir a temperatura em graus Celsius com até 9 bits. Sua faixa de operação varia entre -55°C e $+125^{\circ}\text{C}$ e sua exatidão é de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, operando entre 10°C a $+85^{\circ}\text{C}$ (SEMICONDUCTOR, 2002). Como esse sensor envia um sinal digital, o nível de ruído na leitura é menor do que seria obtido com um sensor analógico.



Figura 12 – Foto do sensor de temperatura DS18B20

A vazão é medida por meio do sensor SEN02141B (vide figura 13). Ele é basicamente uma válvula de plástico, com uma pequena turbina de água em seu interior e um sensor de efeito Hall. A água, ao passar pela turbina, faz com que a mesma gire e sua velocidade de rotação varia conforme a vazão da água. A cada giro completo, o sensor

de efeito Hall emite um pulso elétrico que é enviado ao microcontrolador. O cálculo da vazão é dado pelo número de pulsos dividido pela intervalo de tempo vezes o volume da turbina (STUDIO, 2013). Essa medição sofre interferência da dilatação volumétrica da água, entretanto esse fenômeno foi desconsiderado, pois o erro que ele causaria na medição seria inferior a 1%, para uma variação de temperatura de até 20°C.



Figura 13 – Foto do sensor de vazão SEN02141B

A radiação solar é obtida por meio de um fotorresistor LDR de 5mm, apresentado na figura 14. O valor da resistência varia linearmente de acordo com a intensidade luminosa do local. Logo, verificando-se a tensão de saída do equipamento é possível calcular a radiação solar que incide sobre as placas solares (TECHNOLOGIES, 2008). Como a sua faixa de tensão é limitada entre 0 e 5V, o sensor apresenta uma saturação em $720W/m^2$, conseqüentemente ele não consegue medir valores acima desse limite. Esse problema poderia ser solucionado se fosse feita a leitura de um segundo sensor com um *offset* de $500W/m^2$.



Figura 14 – Foto do fotorresistor LDR de 5mm

A planta híbrida possui dois relés de estado sólido com a configuração *zero crossing* (vide figura 15), que têm a função de regular a potência das resistências do chuveiro e do boiler. Para isso, são controladas as tensões de entrada nos dois relés. Caso a tensão de entrada

estiver abaixo de 3V DC, o circuito permanece aberto e a resistência que está sendo controlada, fica desligada. Quando a tensão no relé estiver entre 3V e 32V DC, o circuito elétrico é fechado e a resistência (do chuveiro ou do boiler) passa a ser alimentada com uma corrente elétrica AC, provocando o aquecimento da água (CONTEMP, 2008).



Figura 15 – Foto do relé de estado sólido

Utilizando-se esse método é possível realizar o incremento ou decremento da potência das resistências por meio de degraus de 10% cada, apenas controlando o tempo que as resistências ficam ligadas ou desligadas. Para exemplificar, considera-se que a resistência do chuveiro deva ser acionada com 30% de sua carga total. Nesse caso, o relé permanecerá com o circuito fechado por 150ms (9 ciclos da rede de energia) e durante 350ms (21 ciclos) o circuito ficará aberto.

Dois servomotores Moxie M38-360, cujo modelo é apresentado na figura 16, são utilizados para abrir e fechar os registros de água e, por consequência, regular a vazão de água quente e fria. O grande diferencial desse equipamento, em relação aos demais servomotores, é que ele é capaz de dar 3 voltas completas (1080°). Sua tensão de entrada varia entre 4,8 a 6V e seu torque é de 3.5kg/cm (RC, 2013).

As figuras 17 e 18 mostram o esquema elétrico implementado no protótipo para a aquisição de dados (temperatura, vazão e radiação) e controle dos atuadores (servomotores e resistências elétricas). Vale ressaltar que os pinos 18 e 19 em ambos os Arduinos servem para a comunicação entres eles.

3.2 MODELO MATEMÁTICO

Usando as leis da física, foram criados modelos matemáticos de todo o sistema. Posteriormente esses modelos foram validados no



Figura 16 – Foto do servomotor Moxie M38-360

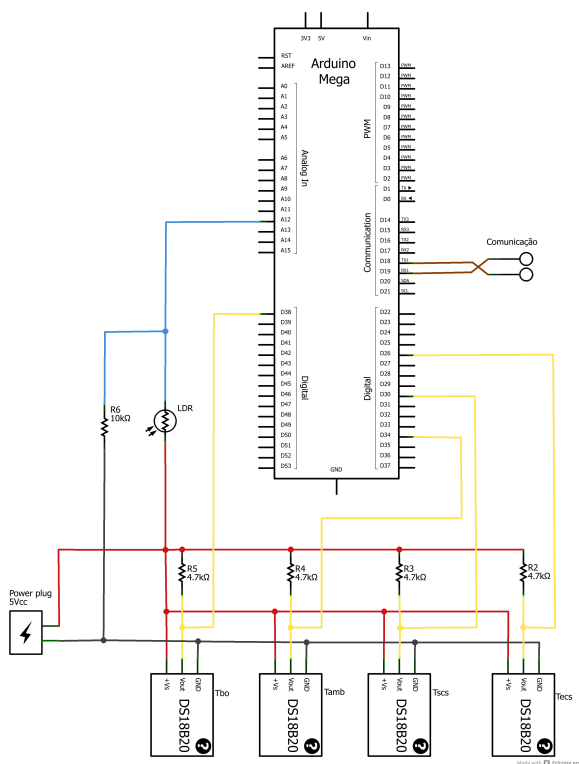


Figura 17 – Esquema elétrico dos equipamentos localizados na laje

protótipo descrito na seção 3.1 e utilizados para avaliar o consumo de energia do sistema híbrido proposto e comparar sua eficiência com um chuveiro elétrico (aquecedor de passagem) e uma planta solar doméstica

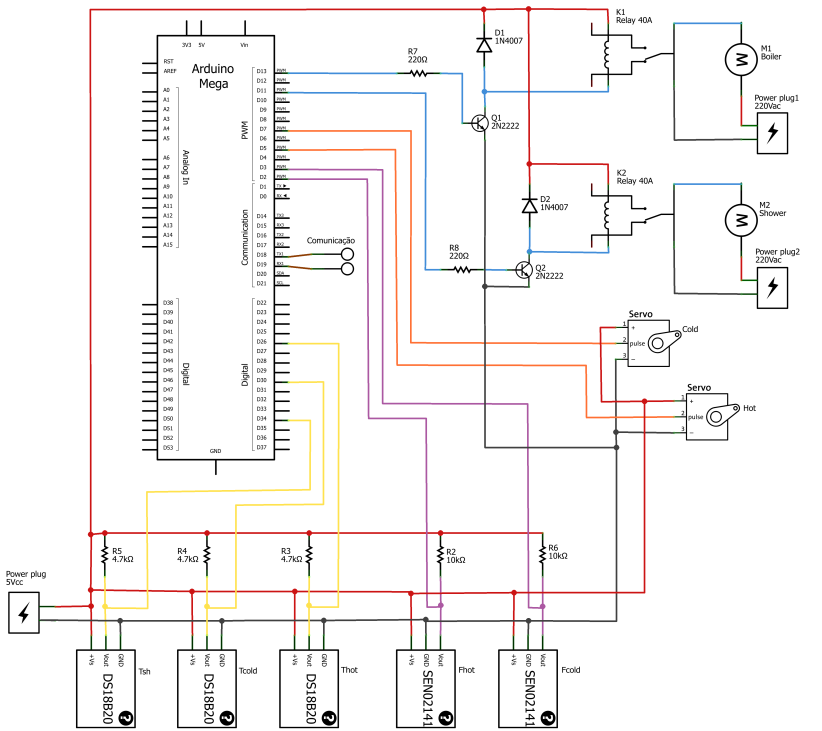


Figura 18 – Esquema elétrico dos equipamentos localizados no interior da casa

tradicional (aquecimento centralizado composto por um coletor solar e um tanque de armazenamento com uma resistência elétrica em seu interior).

Os modelos matemáticos foram desenvolvidos usando as seguintes considerações:

- A temperatura do líquido no tanque de armazenamento não é estratificada;
- As perdas térmicas da tubulação estão concentradas no boiler e no encanamento que leva a água quente ao chuveiro;
- A queda de pressão no coletor solar e no encanamento é negligenciada;

- As capacidades térmicas do coletor solar e da parede do tanque de armazenamento são negligenciadas;
- A transferência de calor, quando ocorre a mistura da água quente e fria, é instantânea.

A fim de facilitar o entendimento, a planta híbrida foi dividida em 3 subsistemas: coletor solar plano, boiler e chuveiro.

3.2.1 Coletor solar plano

No coletor solar a irradiação é convertida em energia térmica, aquecendo a água que passa pelo equipamento. O calor útil absorvido pelo líquido nas placas solares (\dot{Q}_{sc}) pode ser descrito pela equação de Hottel-Whillier-Bliss (SMITH; WEISS, 1977), apresentada na equação 3.1.

$$\dot{Q}_{sc}(t) = A_{sc} \cdot f_r \cdot [I_r(t) \cdot (\tau \cdot \alpha) - U_{sc} \cdot (T_{sci}(t) - T_{amb}(t))] \quad (3.1)$$

O termo A_{sc} refere-se a área da superfície do coletor solar, f_r é o fator de remoção de calor do coletor solar, I_r é a radiação solar, em W/m^2 , que está incidindo sobre a placa, τ e α são os coeficientes de transmissão de calor através do vidro e de absorção de calor na placa solar, respectivamente, U_{sc} é o coeficiente global de perdas térmicas do coletor solar, T_{amb} é a temperatura ambiente e T_{sci} é a temperatura da água que está entrando na placa solar (cujo valor é igual a temperatura da água no interior do boiler, pois considera-se que a temperatura no tanque de armazenamento é não estratificada).

3.2.2 Boiler

O comportamento térmico do tanque de armazenamento é influenciado por diversos fatores: radiação solar, consumo de água quente, temperatura ambiente e acionamento da resistência interna. Duffie e Beckman (1980), descrevem a dinâmica da temperatura do boiler (T_{bo}), por meio da equação 3.2.

$$\rho \cdot c_p \cdot V_{bo} \cdot \frac{\partial T_{bo}}{\partial t} = \dot{Q}_{bo}(t) + \dot{Q}_{sc}(t) + \dot{Q}_{cons}(t) - \dot{Q}_{loss}(t) \quad (3.2)$$

onde

$$\dot{Q}_{bo}(t) = \eta \cdot P_{bo}(t) \quad (3.3)$$

$$\dot{Q}_{cons}(t) = \rho \cdot c_p \cdot F_{hot}(t) \cdot (T_{cold}(t) - T_{bo}(t)) \quad (3.4)$$

$$\dot{Q}_{loss}(t) = U_{bo} \cdot A_{bo} \cdot (T_{bo}(t) - T_{amb}(t)) \quad (3.5)$$

A densidade da água é dada por ρ , c_p representa o calor específico da água e V_{bo} é o volume interno do boiler. O termo \dot{Q}_{bo} é a quantidade de calor transferida da resistência do boiler para a água, \dot{Q}_{cons} é fluxo de calor entre a água quente que está saindo do boiler para o chuveiro e a água fria da caixa d'água que está entrando no boiler e \dot{Q}_{loss} representa a perda térmica do boiler para o ambiente. A constante η é a taxa de eficiência na conversão de energia elétrica em calor e P_{bo} é o valor da potência consumida pela resistência do boiler no instante de tempo t . As variáveis F_{hot} e T_{cold} representam a vazão de água quente consumida e a temperatura de água fria no sistema, respectivamente. A constante U_{bo} é o coeficiente global de perdas térmicas do boiler e A_{bo} é a área de superfície do boiler.

3.2.3 Chuveiro elétrico

O chuveiro elétrico é o último equipamento do sistema e será ligado quando a temperatura da água do banho estiver abaixo da temperatura desejada pelo usuário. Nesse caso, sua resistência será acionada de modo a atingir a temperatura de referência (mais detalhes sobre esse processo serão dados no capítulo 4). Conforme Maceti, Levada e Lautenschleguer (2011), esse dispositivo pode ser modelado como um aquecedor de passagem através da equação de balanço de energia, apresentada na fórmula 3.6.

$$\dot{Q}_{sh}(t) = \eta \cdot P_{sh}(t) = c_p \cdot \rho \cdot F_{sh}(t) \cdot (T_{sh}(t) - T_{mix}(t)) \quad (3.6)$$

O termo \dot{Q}_{sh} representa o calor transferido da resistência do chuveiro para a água, η é a taxa de eficiência na conversão de energia elétrica em calor e P_{sh} é o valor da potência consumida pela resistência do chuveiro no instante de tempo t . A vazão e a temperatura da água do banho são representadas por F_{sh} e T_{sh} , respectivamente. A variável T_{mix} é a temperatura da mistura da água quente e com a água fria na entrada do chuveiro e seu valor é obtido por meio da equação 3.7.

$$T_{mix}(t) = \frac{F_{hot}(t) \cdot T_{hot}(t) + F_{cold}(t) \cdot T_{cold}(t)}{F_{sh}(t)} \quad (3.7)$$

Os termos F_{hot} e F_{cold} indicam a vazão consumida de água quente e fria, respectivamente. Já a temperatura da água quente e fria na entrada do chuveiro são representadas pelas variáveis T_{hot} e T_{cold} , respectivamente.

As perdas térmicas que ocorrem na tubulação entre o boiler e chuveiro estão sendo consideradas por meio de uma constante definida como K_{pipe} . Esse valor é utilizado na equação 3.8 para prever a temperatura da água quente na entrada do chuveiro.

$$T_{hot}(t) = \begin{cases} T_{bo}(t-d) - K_{hot} \cdot (T_{bo}(t-d) - T_{amb}(t)), & F_{hot}(t) > 0(3.8a) \\ T_{hot}(t-1) - K_{pipe} \cdot (T_{hot}(t-1) - T_{amb}(t)), & F_{hot}(t) = 0(3.8b) \end{cases}$$

onde

$$K_{hot} = K_{pipe} \cdot L_{pipe} \quad (3.9)$$

O parâmetro d refere-se ao atraso de transporte entre o boiler e o chuveiro, ou seja, o tempo que leva para que a água quente do tanque de armazenamento chegue ao chuveiro, e seu valor depende da vazão de água quente. A constante L_{pipe} é o comprimento do cano de água quente.

A equação 3.8a é utilizada quando há consumo de água quente no banho. O valor da temperatura da água quente, neste caso, está relacionado com a temperatura do boiler. Já a expressão 3.8b é usada para estimar as perdas térmicas da água quente enquanto o líquido está parado na tubulação e seu valor independe da temperatura do boiler.

Empregando as equações 3.7 e 3.8a e isolando o produto $F_{sh}(t) \cdot T_{sh}(t)$ da equação 3.6, obtém-se uma nova representação matemática do comportamento térmico do chuveiro dada pela expressão 3.10, a qual será utilizada no capítulo 4.

$$F_{sh}(t) \cdot T_{sh}(t) = F_{hot}(t) \cdot [(1 - K_{hot}) \cdot T_{bo}(t-d) + K_{hot} \cdot T_{amb}(t)] + F_{cold}(t) \cdot T_{cold}(t) + \frac{\eta \cdot P_{sh}(t)}{c_p \cdot \rho} \quad (3.10)$$

3.3 VALIDAÇÃO DO MODELO

Vários experimentos foram realizados para ajustar e validar os modelos matemáticos citados anteriormente. A verificação da ade-

quação desses modelos à planta real foi feita por meio do coeficiente de correlação múltipla, o qual mede o relacionamento linear entre as variáveis medidas e as estimadas (COELHO; COELHO, 2004). Em média, o coeficiente de correlação ficou acima de 95%, o que demonstra que os modelos matemáticos representam bem a dinâmica do sistema. Os valores das constantes utilizadas na modelagem foram ajustados empiricamente e eles se encontram na tabela 2.

Tabela 2 – Valores das constantes da modelagem matemática

Símbolo	Descrição	Valor
A_{bo}	Área da superfície do boiler	2,31m ²
A_{sc}	Área da superfície do coletor solar	4,50m ²
f_r	Fator de remoção do calor no coletor solar	0,696
K_{pipe}	Coefficiente de perdas térmicas na tubulação de água quente	0,014m ⁻¹
L_{pipe}	Comprimento do cano de água quente	10m
U_{bo}	Coefficiente global de perdas térmicas no boiler	9,0W/m ² K
U_{sc}	Coefficiente global de perdas térmicas no coletor solar	6,2W/m ² K
α	Coefficiente de absorção do calor no coletor solar	0,9412
η	Taxa de eficiência na conversão de energia elétrica em calor	0,95
ρ	Densidade da água a 40°C	992,2kg/m ³
τ	Coefficiente de transmissão de calor através do vidro	0,85

A dinâmica do boiler e da tubulação de água quente tem uma influência maior no comportamento e controle da planta solar híbrida, por essa razão esses dois subsistemas tiveram um estudo mais aprofundado em relação aos demais. Nas próximas subseções serão mostrados alguns ensaios focando nesses dois subsistemas e comparando os resultados obtidos por meio da simulação com os adquiridos no protótipo. Esses experimentos foram realizados em diversos dias, sob diferentes condições climáticas.

3.3.1 Boiler

Os primeiros estudos do comportamento do boiler visavam determinar o coeficiente de perdas térmicas para o ambiente (U_{bo}), por isso não houve consumo de água quente no sistema.

Para calcular a temperatura do boiler foram utilizados na simulação os dados da irradiação solar e da temperatura ambiente adquiridos durante os experimentos. A primeira coleta de dados foi realizada entre às 17h do dia 09 de Agosto e às 15h do dia 12 de Agosto de 2013, totalizando 70h, conforme apresentado na figura 19. A segunda aquisição iniciou às 16:30 do dia 03 de Setembro e finalizou às 12:30 do dia 09 de Setembro de 2013, totalizando 140h, como pode ser visto na figura 20.

Tanto na figura 19(a) como na 20(a) é possível observar que a medição da radiação solar não supera o valor de $720W/m^2$. Isso acontece devido a saturação do sensor, conforme explicado na seção 3.1.2. Esse mesmo fenômeno ocorre nos demais experimentos apresentados neste trabalho e não tem um grande impacto na validação da modelagem do sistema.

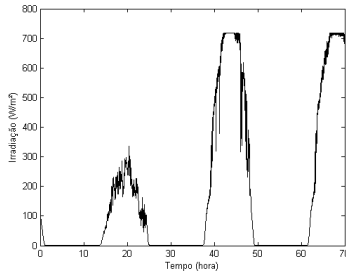
O coeficiente de correlação da temperatura medida e da calculada do boiler foi de 98,12% para o experimento realizado entre os dias 09 e 12 de Agosto (vide figura 19(c)) e de 97,97% para o experimento feito de 03 a 09 de Setembro (vide figura 20(c)).

3.3.2 Tubulação de água quente

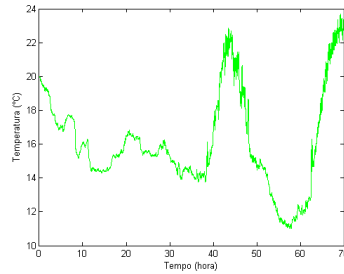
O estudo da dinâmica da temperatura da água quente na tubulação, que chega ao chuveiro, foi realizado utilizando como parâmetros de entrada a temperatura do boiler e a temperatura ambiente. Por meio de ensaios realizados nos dias 27 e 28 de Agosto de 2013, ambos iniciados às 10h e com duração de 3 horas e 25 minutos, foi possível definir o coeficiente de perdas térmicas (K_{pipe}) nessa tubulação, assim como o tempo que levava para que a água quente do tanque de armazenamento chegasse ao chuveiro.

Em ambos os experimentos foram realizados três banhos com duração de 10 minutos cada um e vazões de água quente que variavam de 1,7L/min até 4,5L/min. As figuras 21 e 22 apresentam o resultado desse estudo.

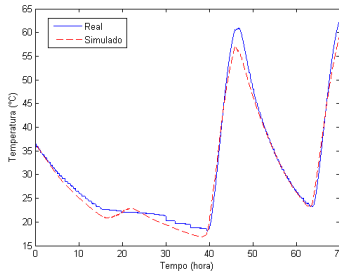
O coeficiente de correlação da temperatura medida e da calculada da água quente foi de 99,17% para o experimento realizado no dia 27



(a) Irradiação solar



(b) Temperatura ambiente



(c) Temperatura medida (linha contínua em azul) e simulada (linha tracejada em vermelho) da água do boiler

Figura 19 – Resultados obtidos através de um experimento entre os dias 09 a 12 de Agosto de 2013

de Agosto (vide figura 21(c)) e de 98,94% para o experimento do dia 28 de Agosto (vide figura 22(c)).

O atraso de transporte (*d*) comprovou possuir uma relação inversamente proporcional entre a vazão de água quente e o tempo do atraso. Nesses estudos, seu valor variou de 41s, para uma vazão de 4,5L/min, até 108s, para a vazão de 1,7L/min.

3.3.3 Sistema completo

Com os subsistemas do boiler e da tubulação de água quente validados, verificou-se o comportamento do sistema completo. As entradas da simulação foram os dados da radiação solar, temperatura ambiente

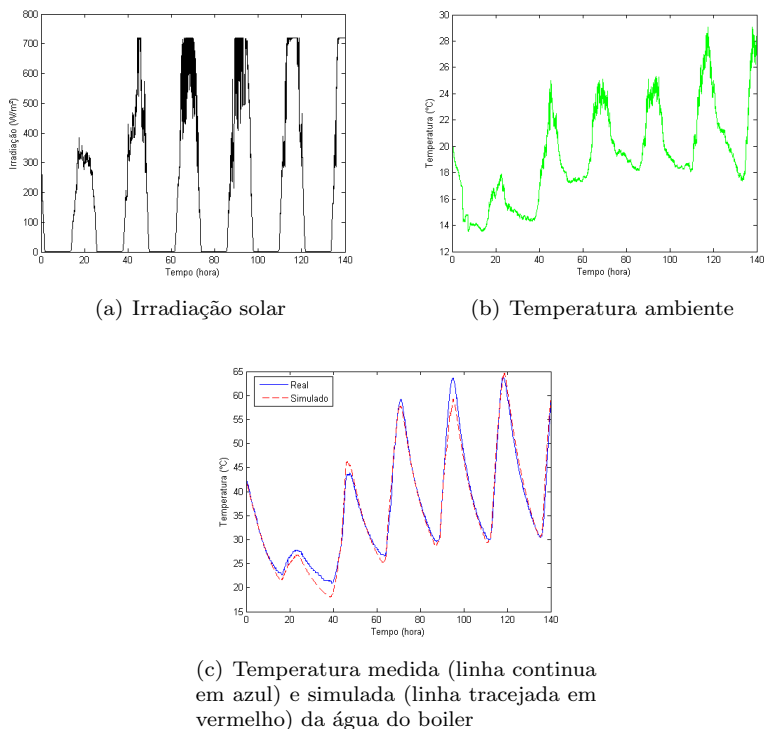
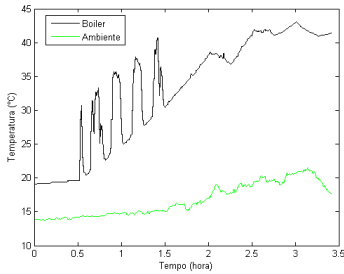


Figura 20 – Resultados obtidos através de um experimento entre os dias 03 a 09 de Setembro 2013

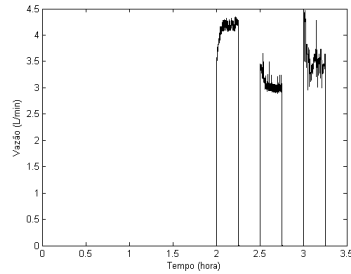
e temperatura da água fria.

A validação do sistema foi feita por meio dos dados adquiridos das 12h às 20h do dia 31 de Setembro de 2013 e das 14h às 20h do dia 17 de Dezembro de 2013, utilizando como dados de entrada da simulação a radiação solar, a temperatura ambiente e a temperatura da água fria. Em ambos os experimentos foram realizados quatro banhos entre as 19h e 20h, com duração de 10 minutos cada um e vazão que variava entre 5,5L/min a 3,5L/min. As figuras 23 e 24 apresentam o resultado desse estudo.

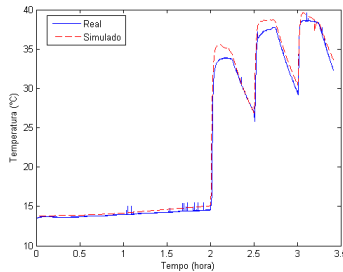
No primeiro experimento, realizado no dia 31 de Setembro, o coeficiente de correlação da temperatura medida e da calculada da água do boiler foi de 98,69% (figura 23(c)), a da água quente foi de 97,82% (figura 23(d)) e a da temperatura do banho na saída do chuveiro foi de



(a) Temperatura de água do boiler (em preto) e ambiente (em verde)



(b) Vazão de água quente



(c) Temperatura medida (linha contínua em azul) e simulada (linha tracejada em vermelho) da água quente

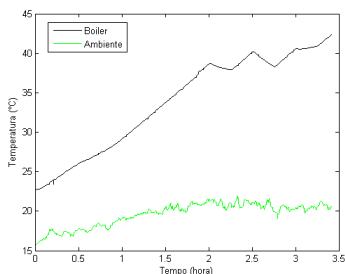
Figura 21 – Resultados obtidos através de um experimento no dia 27 de Agosto de 2013

98,31% (figura 23(f)).

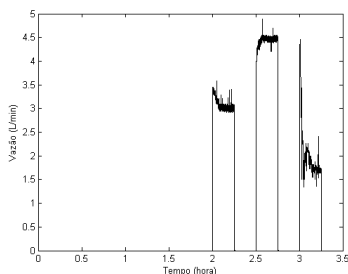
No segundo ensaio, realizado no dia 17 de Dezembro, o coeficiente de correlação da temperatura medida e da calculada da água do boiler foi de 95,98% (figura 24(c)), a da água quente foi de 98,84% (figura 24(d)) e a da temperatura do banho na saída do chuveiro foi de 98,89% (figura 24(f)).

3.3.4 Comentários finais

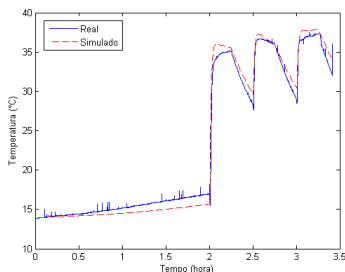
Esse capítulo apresentou os detalhes construtivos da planta implantada em Florianópolis e a respectiva modelagem matemática.



(a) Temperatura de água do boiler (em preto) e ambiente (em verde)



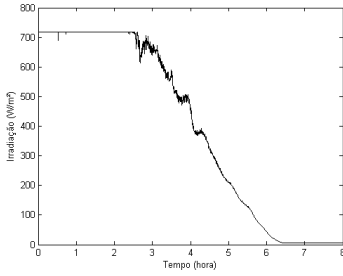
(b) Vazão de água quente



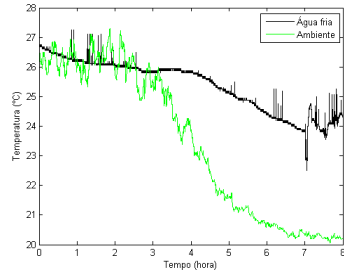
(c) Temperatura medida (linha contínua em azul) e simulada (linha tracejada em vermelho) da água quente

Figura 22 – Resultados obtidos através de um experimento no dia 28 de Agosto de 2013

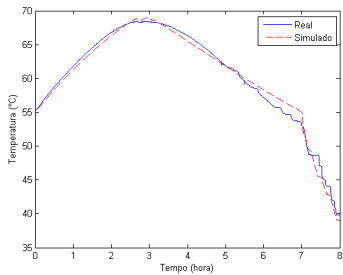
As expressões matemáticas do sistema foram baseadas nas leis da física e em algumas considerações feitas pelo autor para torná-las mais simples. Mesmo com essas simplificações, a modelagem da planta solar híbrida representou adequadamente a dinâmica do sistema, apresentando, na maioria dos casos, um coeficiente de correlação superior a 95%. Dessa forma, pode-se utilizar as expressões matemáticas apresentadas neste capítulo para projetar a lei de controle e realizar simulações que representem com grande veracidade o comportamento da planta, assuntos esses que são abordados nos capítulos 4 e 5, respectivamente.



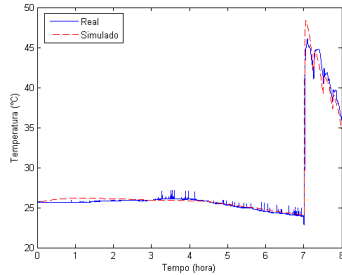
(a) Irradiação solar



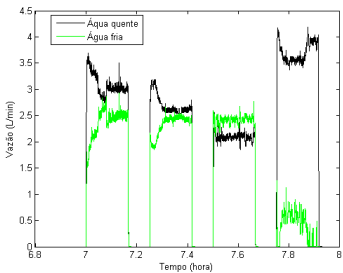
(b) Temperatura da água fria (em preto) e ambiente (em verde)



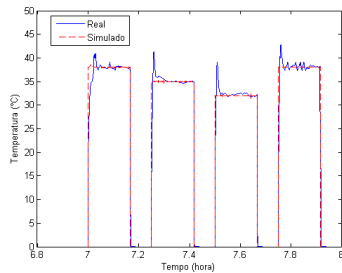
(c) Temperatura medida (linha contínua em azul) e simulada (linha tracejada em vermelho) da água do boiler



(d) Temperatura medida (linha contínua em azul) e simulada (linha tracejada em vermelho) da água quente

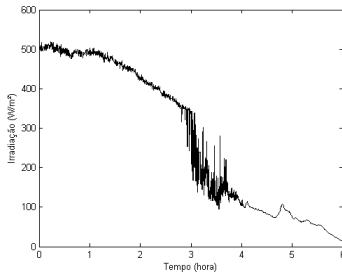


(e) Vazão de água quente (em preto) e

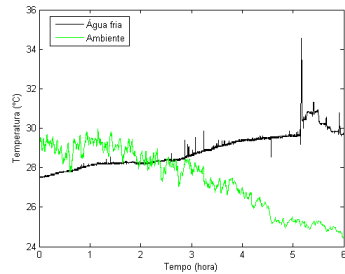


(f) Temperatura medida (linha contínua em azul) e simulada (linha tracejada em vermelho) do banho

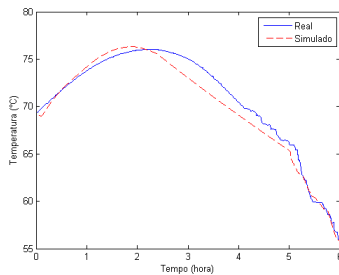
Figura 23 – Resultados obtidos através de um experimento no dia 31 de Setembro de 2013



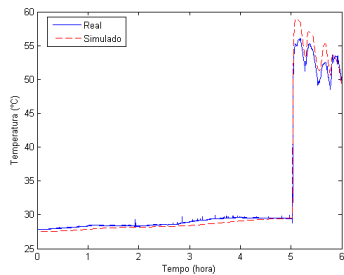
(a) Irradiação solar



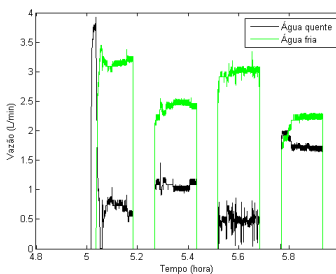
(b) Temperatura da água fria (em preto) e ambiente (em verde)



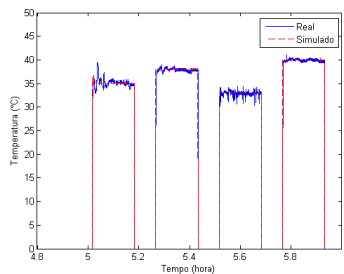
(c) Temperatura medida (linha contínua em azul) e simulada (linha tracejada em vermelho) da água do boiler



(d) Temperatura medida (linha contínua em azul) e simulada (linha tracejada em vermelho) da água quente



(e) Vazão de água quente (em preto) e água fria (em verde)



(f) Temperatura medida (linha contínua em azul) e simulada (linha tracejada em vermelho) do banho

Figura 24 – Resultados obtidos através de um experimento no dia 17 de Dezembro de 2013

4 ESTRATÉGIAS DE CONTROLE

No capítulo 3 foi apresentado o modelo matemático, que descreve o comportamento térmico da planta solar híbrida. Com esse modelo é possível realizar simulações e projetar algoritmos para controlar a temperatura do boiler e do banho, assim como a vazão de água quente e fria durante o banho.

Este capítulo aborda as estratégias de controle desenvolvidas para que o sistema atenda os requisitos definidos pelo usuário e que ainda economize energia elétrica.

4.1 DESCRIÇÃO E OBJETIVO

A estratégia de controle da a planta híbrida solar tem como objetivo controlar a temperatura (T_{sh}) e vazão (F_{sh}) da água do banho. Para isso atua-se na potência dissipada pelas resistências do chuveiro (P_{sh}) e do boiler (P_{bo}), assim como nas válvulas localizadas próximas à entrada do chuveiro, que regulam as vazões de água quente (F_{hot}) e água fria (F_{cold}). Além disso, a temperatura da água no interior do boiler (T_{bo}) também é controlada, pois ela tem uma importante influência no desempenho do sistema e no consumo de energia.

As principais perturbações do processo são a temperatura ambiente (T_{amb}), a temperatura de água fria (T_{cold}) e a irradiação solar (I_r).

Todas as variáveis citadas são mensuráveis, por isso é feita a aquisição delas para realizar o controle da planta.

As referências (temperatura e vazão de água no banho) são fornecidas pelo usuário através da interface local, entretanto os pontos de operação das variáveis controladas são dados através de uma função de otimização e de um algoritmo baseado nessa função que estão descritos nas seções 4.3 e 4.4, respectivamente. A ideia é fazer com que o sistema siga as referências definidas e rejeite eventuais perturbações, tendo o menor gasto de água e de energia elétrica possível.

A figura 25 apresenta o diagrama de blocos da planta solar híbrida, sendo ele composto por um controlador e 3 subsistemas. As 5 entradas que o diagrama possui são as três perturbações (T_{amb} , T_{cold} e I_r) e os dois parâmetros de referência definidos pelo usuário (T_{ref} e F_{ref}). As cinco saídas do diagrama são as variáveis controladas do sistema (T_{bo} , T_{hot} , T_{sh} , F_{hot} e F_{cold}).

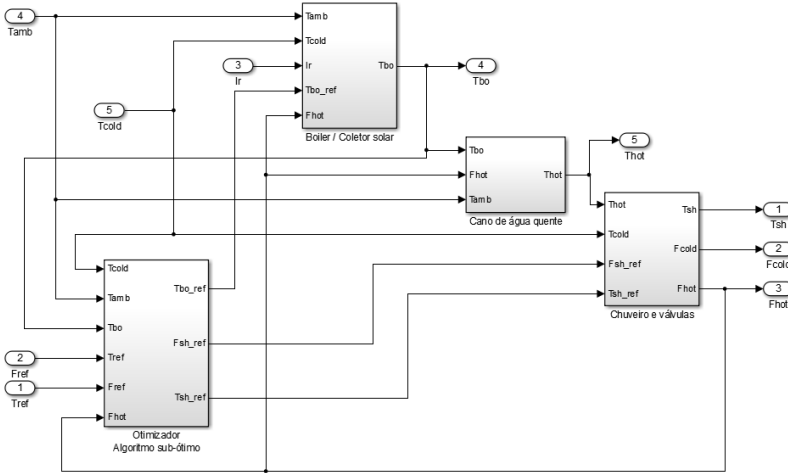


Figura 25 – Diagrama de blocos da planta solar híbrida

4.2 CONTROLE LOCAL

Para realizar o controle do processo foi necessário realizar a discretização do sistema e do modelo matemático da planta. Essa discretização foi feita por meio da aproximação de Euler, conforme exemplificado na equação 4.1.

$$\frac{\partial T_{bo}(t)}{\partial t} \cong \frac{T_{bo}(t + t_s) - T_{bo}(t)}{t_s} \quad (4.1)$$

Com a discretização do sistema, o instante de tempo t é alterado para o passo amostral n , cujo valor é dado por números inteiros e a cada período de amostragem (t_s) o passo amostral é incrementado em uma unidade. A equação 4.2, que representa a temperatura da água no boiler no passo amostral n , é um exemplo de um modelo matemático no tempo discreto.

$$\frac{c_p \cdot \rho \cdot V_{bo}}{t_s} \cdot T_{bo}(n + 1) = Q_{bo}(n) + Q_{sc}(n) + Q_{cons}(n) - Q_{loss}(n) + \frac{c_p \cdot \rho \cdot V_{bo}}{t_s} \cdot T_{bo}(n) \quad (4.2)$$

O controle das vazões de água quente e fria e das temperaturas do banho e do boiler é feito a cada segundo, por meio de um controle

local. O valor medido é comparado com o ponto de operação (referência local), que é calculado pelo microcontrolador por meio de um algoritmo descrito na seção 4.4. Caso o erro da temperatura ou da vazão esteja fora da faixa limite de operação (erro absoluto superior a $0,2L/\text{min}$ para a vazão e $0,3^\circ\text{C}$ para a temperatura) o sistema atuará nas válvulas e nas resistências elétricas para fazer com que as variáveis sigam a referência. Foi escolhida essa faixa de operação pois, para um banho com vazão de $4L/\text{min}$, o erro aceitável da vazão representa 5% do valor de referência e, no caso da temperatura, o erro de $\pm 0,3^\circ\text{C}$ é praticamente imperceptível para o usuário.

O controle de temperatura é feito por meio de controladores proporcionais-integrais (PI), que enviam sinais de controle aos relés de estado sólido e estes, por sua vez, regulam o consumo de energia nas resistências elétricas.

A vazão do banho é composta pelas vazões de água quente e água fria, cujos valores são regulados por controladores proporcionais (P). Esses controladores atuam nos servomotores, que abrem e fecham as válvulas de água automaticamente. A mistura da água quente e fria tem um efeito direto na temperatura do banho e por isso deve ser muito bem balanceada para melhorar o desempenho do sistema e o seguimento da referência.

A vazão de referência de água quente ($F_{hot.ref}$) está relacionada ao consumo de água e a temperatura desejada pelo usuário durante o banho, representadas pelas variáveis F_{ref} e T_{ref} , respectivamente. Seu valor é obtido por meio da expressão 4.3, que utiliza esse parâmetro para controlar a abertura da válvula de água quente na entrada do chuveiro.

$$F_{hot.ref}(n) = \begin{cases} F_{ref}(n), & T_{hot}(n) \leq T_{ref}(n) \quad (4.3a) \\ \frac{F_{ref}(n) \cdot (T_{ref}(n) - T_{cold}(n))}{(T_{hot}(n) - T_{cold}(n))}, & T_{hot}(n) > T_{ref}(n) \quad (4.3b) \end{cases}$$

Após calculada a vazão de referência de água quente verifica-se se seu valor não ultrapassou o limite físico imposto pelo sistema (equação 4.4). Esse limite é definido como vazão máxima ($F_{hot.max}$) e seu valor depende do diâmetro do cano e da pressão da água na tubulação.

$$F_{hot.ref}(n) = \begin{cases} F_{hot.max}, & F_{hot.ref}(n) > F_{hot.max} \quad (4.4a) \\ F_{hot.ref}(n), & F_{hot.ref}(n) \leq F_{hot.max} \quad (4.4b) \end{cases}$$

Uma vez calculada a vazão de referência da água quente, obtém-

se a vazão de referência da água fria ($F_{cold.ref}$) através de uma subtração, como apresentado na equação 4.5.

$$F_{cold.ref}(n) = F_{ref}(n) - F_{hot.ref}(n) \quad (4.5)$$

4.3 FUNÇÃO DE OTIMIZAÇÃO

A função de otimização define os pontos de operação da temperatura da água do boiler e da água do banho, além da vazão de água consumida durante o banho. Esses valores são calculados por meio de uma programação linear, cujo objetivo é economizar energia elétrica e água e, ainda, proporcionar um banho confortável ao usuário.

A programação linear foi desenvolvida considerando a modelagem dos comportamentos térmicos do boiler e do chuveiro descritos na seção 3.2 e a discretização abordada na seção 4.2.

Retomando a equação 4.2 e considerando os valores medidos no instante n , assim como a potência máxima (neste caso $P_{bo.max} = 3000W$) e mínima ($P_{bo.min} = 0W$) da resistência do boiler, a temperatura no instante seguinte estará limitada ao intervalo definido pelas seguintes equações:

$$T_{bo.min}(n+1) \leq T_{bo}(n+1) \leq T_{bo.max}(n+1) \quad (4.6)$$

onde:

$$T_{bo.min}(n+1) = \frac{\eta \cdot P_{bo.min} + \dot{Q}_{sc}(n) + \dot{Q}_{cons}(n) - \dot{Q}_{loss}(n) + \frac{c_p \cdot \rho \cdot V_{bo}}{t_s} \cdot T_{bo}(n)}{(c_p \cdot \rho \cdot V_{bo})/t_s} \quad (4.7)$$

$$T_{bo.max}(n+1) = \frac{\eta \cdot P_{bo.max} + \dot{Q}_{sc}(n) + \dot{Q}_{cons}(n) - \dot{Q}_{loss}(n) + \frac{c_p \cdot \rho \cdot V_{bo}}{t_s} \cdot T_{bo}(n)}{(c_p \cdot \rho \cdot V_{bo})/t_s} \quad (4.8)$$

Assim como no caso do boiler, a potência do resistor do chuveiro está limitada a um valor máximo (no caso do protótipo $P_{sh.max} = 4400W$) e mínimo ($P_{sh.min} = 0W$). Fazendo o uso desses limites e de uma nova variável (X_{sh}), definida na equação 4.9, a expressão matemática 3.10 pode ser reescrita, no tempo discreto, conforme a desigualdade apresentada em 4.10.

$$X_{sh}(n) = F_{sh}(n) \cdot T_{sh}(n) \quad (4.9)$$

$$X_{sh.min}(n) \leq X_{sh}(n) \leq X_{sh.max}(n) \quad (4.10)$$

onde:

$$X_{sh.min}(n) = \frac{F_{hot}(n) \cdot [(1 - K_{hot}) \cdot T_{bo}(n - d) + K_{hot} \cdot T_{amb}(n)]}{F_{cold}(n) \cdot T_{cold}(n) + \frac{\eta \cdot P_{sh.min}}{c_p \cdot \rho}} \quad (4.11)$$

$$X_{sh.max}(n) = \frac{F_{hot}(n) \cdot [(1 - K_{hot}) \cdot T_{bo}(n - d) + K_{hot} \cdot T_{amb}(n)]}{F_{cold}(n) \cdot T_{cold}(n) + \frac{\eta \cdot P_{sh.max}}{c_p \cdot \rho}} \quad (4.12)$$

A programação linear é definida por uma função objetivo linear, também denominada função custo, e por restrições lineares. A função objetivo é a expressão a ser minimizada, a qual retorna o valor ótimo das variáveis do problema. Já as restrições são desigualdades matemáticas que devem ser atendidas pelo valor ótimo encontrado pela programação linear (BOYD; VANDENBERGHE, 2009).

A função objetivo desenvolvida para o problema de otimização da planta solar híbrida é apresentada na equação 4.13.

$$\min \sum_{n=1}^m (K_1 \cdot T_{bo}(n) + K_2 \cdot X_{sh}(n) + K_3 \cdot T_{sh}(n) + K_4 \cdot \varepsilon_X(n) + K_5 \cdot \varepsilon_T(n)) \quad (4.13)$$

A função custo realiza um somatório de m amostras futuras, que corresponde ao horizonte de predição da otimização, sendo que todas as variáveis apresentam valores positivos. A minimização dos termos $T_{bo}(n)$ e $T_{sh}(n)$ têm como objetivo reduzir a temperatura futura do boiler e do chuveiro, respectivamente. Com essa redução, diminui-se as perdas térmicas no tanque de armazenamento e na tubulação e com um valor de referência futura menor, também reduz-se o consumo de energia elétrica para aquecer a água. A variável $X_{sh}(n)$ visa diminuir a vazão de água durante o banho e é responsável por correlacionar a vazão e a temperatura em um único termo. As últimas duas variáveis da função custo ($\varepsilon_X(n)$ e $\varepsilon_T(n)$), que são definidas nas equações 4.14 e 4.15, representam o erro de seguimento a referência.

$$\varepsilon_X(n) = |(F_{ref}(n) \cdot T_{ref}(n)) - X_{sh}(n)| \quad (4.14)$$

$$\varepsilon_T(n) = |T_{ref}(n) - T_{sh}(n)| \quad (4.15)$$

Os pesos das variáveis na função objetivo (K_1 , K_2 , K_3 , K_4 e K_5) são definidos visando minimizar o erro em regime permanente e reduzir o consumo de energia elétrica e de água. Os valores de K_1 e K_3 estão relacionadas ao acionamento da resistência do boiler e do chuveiro, respectivamente. Para priorizar a ativação da resistência do chuveiro

deve-se fazer com que o peso de K_1 seja superior ao de K_3 . Essa priorização visa aumentar a eficiência do sistema, pois, como o chuveiro elétrico aquece um volume de água menor que o boiler, o aquecedor de passagem consome menos energia que o tanque para aumentar a temperatura da água em alguns graus Celsius. Além disso, a água aquecida no boiler apresenta mais perdas térmicas que a água aquecida no chuveiro elétrico.

O peso de K_2 correlaciona o consumo de água com a temperatura do banho. Já os valores de K_4 e K_5 relacionam-se ao seguimento a referência da vazão e da temperatura do banho, respectivamente. Quando maior o peso dessas constantes, menor é o erro em regime permanente, representando maior conforto ao usuário, entretanto maior o consumo de água e, na maioria dos casos, maior é o gasto de energia elétrica.

Os valores das cinco constantes, apresentados na equação 4.16, foram ajustados por meio de experimentos no protótipo e simulações computacionais, visando atender os objetivos propostos no estudo.

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{c_p \cdot \rho \cdot V_{bo}}{t_s \cdot 10^6} \\ K_2 &= \rho \cdot c_p \cdot 10^{-6} \\ K_3 &= 10^{-6} \\ K_4 &= 10^4 \\ K_5 &= 10^4 \end{aligned} \quad (4.16)$$

O problema de otimização do sistema possui oito restrições. Quatro delas provêm das desigualdades 4.6 e 4.10, as quais visam limitar a potência das resistências do boiler e do chuveiro aos seus valores máximos e mínimos, levando-se em consideração (no caso do boiler) as perdas térmicas para o ambiente. As outras quatro restrições fazem com que o sistema siga as referências definidas pelo usuário, aceitando-se valores limitados por uma faixa de operação dada pelas variáveis ε_X e ε_T . Essas restrições foram obtidas através da transformação das igualdades apresentadas nas equações 4.14 e 4.15 nas desigualdades 4.17 e 4.18.

$$(F_{ref}(n) \cdot T_{ref}(n) - \varepsilon_X) \leq X_{sh}(n) \leq (F_{ref}(n) \cdot T_{ref}(n) + \varepsilon_X) \quad (4.17)$$

$$(T_{ref}(n) - \varepsilon_T) \leq T_{sh}(n) \leq (T_{ref}(n) + \varepsilon_T) \quad (4.18)$$

O calor absorvido pela água no coletor solar (Q_{sc}) não é considerado na programação linear, porque seu valor futuro não pode ser

predito com uma grande confiabilidade em um extenso horizonte de tempo. Além disso, ao ignorar o aquecimento solar, a otimização é calculada considerando o pior caso possível, uma vez que as únicas fontes de aquecimento de água serão as resistências elétricas.

As variáveis T_{cold} e T_{amb} são consideradas constantes ao longo do horizonte de predição, logo $T_{cold}(n) = T_{cold}(n + k)$ e $T_{amb}(n) = T_{amb}(n + k)$, para $k \geq 1$

Considerando o exposto acima, a equação 4.19 apresenta o problema de otimização no tempo discreto, o qual minimiza o consumo de energia elétrica e faz uma ponderação entre o custo e o conforto propiciado ao usuário.

$$\min \sum_{n=1}^m (K_1 \cdot T_{bo}(n) + K_2 \cdot X_{sh}(n) + K_3 \cdot T_{sh}(n) + K_4 \cdot \varepsilon_X(n) + K_5 \cdot \varepsilon_T(n))$$

sujeito a :

$$\begin{aligned} T_{bo}(n) &\leq (\eta \cdot P_{bo,max} + Q_{cons}(n-1) - Q_{loss}(n-1) + K_1 \cdot T_{bo}(n-1))/K_1 \\ -T_{bo}(n) &\leq -(Q_{cons}(n-1) - Q_{loss}(n-1) + K_1 \cdot T_{bo}(n-1))/K_1 \\ X_{sh}(n) &\leq (\frac{\eta \cdot P_{sh,max}}{K_2} + F_{hot}(n) + K_1 \cdot T_{bo}(n-d) + K_{hot} \cdot T_{amb}(n)) + F_{cold}(n) \cdot T_{cold}(n) \\ -X_{sh}(n) &\leq -(F_{hot}(n) \cdot [(1 - K_{hot}) \cdot T_{bo}(n-d) + K_{hot} \cdot T_{amb}(n)] + F_{cold}(n) \cdot T_{cold}(n)) \\ X_{sh}(n) &\leq (F_{ref}(n) \cdot T_{ref}(n) + \varepsilon_X) \\ -X_{sh}(n) &\leq -(F_{ref}(n) \cdot T_{ref}(n) - \varepsilon_X) \\ T_{sh}(n) &\leq (T_{ref}(n) + \varepsilon_T) \\ -T_{sh}(n) &\leq -(T_{ref}(n) - \varepsilon_T) \end{aligned} \tag{4.19}$$

Reescrevendo a equação 4.19 na forma matricial, com uma predição de k passos e considerando o atraso de transporte da água quente do boiler até o chuveiro como sendo constante e igual a um passo amostral ($d = 1$), tem-se a programação linear 4.20.

$$\begin{aligned} \min \quad & \Sigma(c'x) \\ \text{sujeito a :} \quad & Ax \leq b \end{aligned} \tag{4.20}$$

onde:

$$x = [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4 \quad x_5]'_{1 \times 5k}$$

tal que

$$\begin{aligned}
 x_1 &= [T_{bo}(n) \quad T_{bo}(n+1) \quad T_{bo}(n+2) \quad \dots \quad T_{bo}(n+k-2) \quad T_{bo}(n+k-1)]_{1 \times k} \\
 x_2 &= [X_{sh}(n) \quad X_{sh}(n+1) \quad X_{sh}(n+2) \quad \dots \quad X_{sh}(n+k-2) \quad X_{sh}(n+k-1)]_{1 \times k} \\
 x_3 &= [T_{sh}(n) \quad T_{sh}(n+1) \quad T_{sh}(n+2) \quad \dots \quad T_{sh}(n+k-2) \quad T_{sh}(n+k-1)]_{1 \times k} \\
 x_4 &= [\varepsilon_X(n) \quad \varepsilon_X(n+1) \quad \varepsilon_X(n+2) \quad \dots \quad \varepsilon_X(n+k-2) \quad \varepsilon_X(n+k-1)]_{1 \times k} \\
 x_5 &= [\varepsilon_T(n) \quad \varepsilon_T(n+1) \quad \varepsilon_T(n+2) \quad \dots \quad \varepsilon_T(n+k-2) \quad \varepsilon_T(n+k-1)]_{1 \times k}
 \end{aligned} \tag{4.21}$$

$$c' = [c_1 \ c_2 \ c_3 \ c_4 \ c_5]_{1 \times 5k}$$

tal que

$$c_1 = [K_1 \ K_1 \ K_1 \ \dots \ K_1 \ K_1]_{1 \times k}$$

$$c_2 = [K_2 \ K_2 \ K_2 \ \dots \ K_2 \ K_2]_{1 \times k}$$

$$c_3 = [K_3 \ K_3 \ K_3 \ \dots \ K_3 \ K_3]_{1 \times k}$$

$$c_4 = [K_4 \ K_4 \ K_4 \ \dots \ K_4 \ K_4]_{1 \times k}$$

$$c_5 = [K_5 \ K_5 \ K_5 \ \dots \ K_5 \ K_5]_{1 \times k}$$

(4.22)

$$\begin{aligned}
 A &= \begin{bmatrix} A_1 & 0_{k \times k} & 0_{k \times k} & 0_{k \times k} \\ -A_1 & 0_{k \times k} & 0_{k \times k} & 0_{k \times k} \\ A_2 & 0_{k \times k} & 0_{k \times k} & 0_{k \times k} \\ -A_2 & 0_{k \times k} & 0_{k \times k} & 0_{k \times k} \\ 0_{k \times k} & I_{k \times k} & -I_{k \times k} & 0_{k \times k} \\ 0_{k \times k} & I_{k \times k} & 0_{k \times k} & 0_{k \times k} \\ 0_{k \times k} & 0_{k \times k} & I_{k \times k} & 0_{k \times k} \\ 0_{k \times k} & 0_{k \times k} & -I_{k \times k} & -I_{k \times k} \end{bmatrix}_{8k \times 5k} \\
 A_1 &= \begin{bmatrix} \frac{1}{K_1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_2 \cdot F_{hot}(n) - K_1 + K_3}{K_1} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_2 \cdot F_{hot}(n+1) - K_1 + K_3}{K_1} & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{K_2 \cdot F_{hot}(n+k-2) - K_1 + K_3}{K_1} \end{bmatrix}_{k \times k} \\
 A_2 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -(1 - K_{hot}) \cdot F_{hot}(n+1) & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & -(1 - K_{hot}) \cdot F_{hot}(n+2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{k \times k}
 \end{aligned}
 \tag{4.23}$$

tal que

$0_{k \times k}$ = matriz nula $k \times k$
 $I_{k \times k}$ = matriz identidade $k \times k$

$$\begin{aligned}
b &= \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \\ -b_6 \end{bmatrix}_{8k \times 1} \\
b_1 &= \begin{bmatrix} (T_{b_0}(n-1) \cdot (-K_2 \cdot F_{hot}(n-1) + K_1 - U_{b_0} \cdot A_{b_0}) + \eta \cdot F_{b_0, max} + U_{b_0} \cdot A_{b_0} - T_{amb}(n-1) + K_2 \cdot F_{hot}(n-1) \cdot T_{cold}(n-1))/K_1 \\ (-\eta \cdot F_{b_0, max} + U_{b_0} \cdot A_{b_0} \cdot T_{amb}(n) + K_2 \cdot F_{hot}(n) \cdot T_{cold}(n))/K_1 \\ (+\eta \cdot F_{b_0, max} + U_{b_0} \cdot A_{b_0} \cdot T_{amb}(n+1) + K_2 \cdot F_{hot}(n+1) \cdot T_{cold}(n+1))/K_1 \\ \vdots \\ (+\eta \cdot F_{b_0, max} + U_{b_0} \cdot A_{b_0} \cdot T_{amb}(n+k-3) + K_2 \cdot F_{hot}(n+k-3) \cdot T_{cold}(n+k-3))/K_1 \\ (+\eta \cdot F_{b_0, max} + U_{b_0} \cdot A_{b_0} \cdot T_{amb}(n+k-2) + K_2 \cdot F_{hot}(n+k-2) \cdot T_{cold}(n+k-2))/K_1 \\ \vdots \\ (T_{b_0}(n-1) \cdot (+K_2 \cdot F_{hot}(n-1) - K_1 + U_{b_0} \cdot A_{b_0}) - U_{b_0} \cdot A_{b_0} \cdot T_{amb}(n-1) - K_2 \cdot F_{hot}(n-1) \cdot T_{cold}(n-1))/K_1 \\ (-U_{b_0} \cdot A_{b_0} \cdot T_{amb}(n) - K_2 \cdot F_{hot}(n) \cdot T_{cold}(n))/K_1 \\ (-U_{b_0} \cdot A_{b_0} \cdot T_{amb}(n+1) - K_2 \cdot F_{hot}(n+1) \cdot T_{cold}(n+1))/K_1 \\ \vdots \\ (-U_{b_0} \cdot A_{b_0} \cdot T_{amb}(n+k-3) - K_2 \cdot F_{hot}(n+k-3) \cdot T_{cold}(n+k-3))/K_1 \\ (-U_{b_0} \cdot A_{b_0} \cdot T_{amb}(n+k-2) - K_2 \cdot F_{hot}(n+k-2) \cdot T_{cold}(n+k-2))/K_1 \end{bmatrix}_{k \times 1} \\
b_2 &= \begin{bmatrix} (T_{b_0}(n-1) \cdot (-K_2 \cdot F_{hot}(n-1) + K_1 - U_{b_0} \cdot A_{b_0}) + \eta \cdot F_{b_0, max} + U_{b_0} \cdot A_{b_0} - T_{amb}(n-1) + K_2 \cdot F_{hot}(n-1) \cdot T_{cold}(n-1))/K_1 \\ (-\eta \cdot F_{b_0, max} + U_{b_0} \cdot A_{b_0} \cdot T_{amb}(n) + K_2 \cdot F_{hot}(n) \cdot T_{cold}(n))/K_1 \\ (+\eta \cdot F_{b_0, max} + U_{b_0} \cdot A_{b_0} \cdot T_{amb}(n+1) + K_2 \cdot F_{hot}(n+1) \cdot T_{cold}(n+1))/K_1 \\ \vdots \\ (+\eta \cdot F_{b_0, max} + U_{b_0} \cdot A_{b_0} \cdot T_{amb}(n+k-3) + K_2 \cdot F_{hot}(n+k-3) \cdot T_{cold}(n+k-3))/K_1 \\ (+\eta \cdot F_{b_0, max} + U_{b_0} \cdot A_{b_0} \cdot T_{amb}(n+k-2) + K_2 \cdot F_{hot}(n+k-2) \cdot T_{cold}(n+k-2))/K_1 \\ \vdots \\ (T_{b_0}(n-1) \cdot (+K_2 \cdot F_{hot}(n-1) - K_1 + U_{b_0} \cdot A_{b_0}) - U_{b_0} \cdot A_{b_0} \cdot T_{amb}(n-1) - K_2 \cdot F_{hot}(n-1) \cdot T_{cold}(n-1))/K_1 \\ (-U_{b_0} \cdot A_{b_0} \cdot T_{amb}(n) - K_2 \cdot F_{hot}(n) \cdot T_{cold}(n))/K_1 \\ (-U_{b_0} \cdot A_{b_0} \cdot T_{amb}(n+1) - K_2 \cdot F_{hot}(n+1) \cdot T_{cold}(n+1))/K_1 \\ \vdots \\ (-U_{b_0} \cdot A_{b_0} \cdot T_{amb}(n+k-3) - K_2 \cdot F_{hot}(n+k-3) \cdot T_{cold}(n+k-3))/K_1 \\ (-U_{b_0} \cdot A_{b_0} \cdot T_{amb}(n+k-2) - K_2 \cdot F_{hot}(n+k-2) \cdot T_{cold}(n+k-2))/K_1 \end{bmatrix}_{k \times 1}
\end{aligned} \tag{4.24}$$

$$\begin{aligned}
b_3 &= \left[\begin{array}{c} (1 - K_{hot}) \cdot F_{hot}(n) \cdot T_{bo}(n-1) + K_{hot} \cdot F_{hot}(n) \cdot T_{amb}(n) + F_{cold}(n) \cdot T_{cold}(n) + (\eta \cdot P_{sh,max})/K_2 \\ K_{hot} \cdot F_{hot}(n+1) \cdot T_{amb}(n+1) + F_{cold}(n+1) \cdot T_{cold}(n+1) + (\eta \cdot P_{sh,max})/K_2 \\ K_{hot} \cdot F_{hot}(n+2) \cdot T_{amb}(n+2) + F_{cold}(n+2) \cdot T_{cold}(n+2) + (\eta \cdot P_{sh,max})/K_2 \\ \vdots \\ K_{hot} \cdot F_{hot}(n+k-2) \cdot T_{amb}(n+k-2) + F_{cold}(n+k-2) \cdot T_{cold}(n+k-2) + (\eta \cdot P_{sh,max})/K_2 \\ K_{hot} \cdot F_{hot}(n+k-1) \cdot T_{amb}(n+k-1) + F_{cold}(n+k-1) \cdot T_{cold}(n+k-1) + (\eta \cdot P_{sh,max})/K_2 \\ K_{hot} \cdot F_{hot}(n+k) \cdot T_{amb}(n+k) + F_{cold}(n+k) \cdot T_{cold}(n+k) + (\eta \cdot P_{sh,max})/K_2 \end{array} \right]_{k \times 1} \\
b_4 &= \left[\begin{array}{c} -(1 - K_{hot}) \cdot F_{hot}(n) \cdot T_{bo}(n-1) - K_{hot} \cdot F_{hot}(n) \cdot T_{amb}(n) - F_{cold}(n) \cdot T_{cold}(n) \\ -K_{hot} \cdot F_{hot}(n+1) \cdot T_{amb}(n+1) - F_{cold}(n+1) \cdot T_{cold}(n+1) \\ -K_{hot} \cdot F_{hot}(n+2) \cdot T_{amb}(n+2) - F_{cold}(n+2) \cdot T_{cold}(n+2) \\ \vdots \\ -K_{hot} \cdot F_{hot}(n+k-2) \cdot T_{amb}(n+k-2) - F_{cold}(n+k-2) \cdot T_{cold}(n+k-2) \\ -K_{hot} \cdot F_{hot}(n+k-1) \cdot T_{amb}(n+k-1) - F_{cold}(n+k-1) \cdot T_{cold}(n+k-1) \end{array} \right]_{k \times 1} \\
b_5 &= \left[\begin{array}{c} F_{ref}(n) \cdot T_{ref}(n) \\ F_{ref}(n+1) \cdot T_{ref}(n+1) \\ F_{ref}(n+2) \cdot T_{ref}(n+2) \\ \vdots \\ F_{ref}(n+k-2) \cdot T_{ref}(n+k-2) \\ F_{ref}(n+k-1) \cdot T_{ref}(n+k-1) \end{array} \right]_{k \times 1} \\
b_6 &= \left[\begin{array}{c} T_{ref}(n) \\ T_{ref}(n+1) \\ T_{ref}(n+2) \\ \vdots \\ T_{ref}(n+k-2) \\ T_{ref}(n+k-1) \end{array} \right]_{k \times 1}
\end{aligned} \tag{4.25}$$

A cada período de execução, que foi estipulado em um minuto, essa função entrega ao controlador os pontos de operação da temperatura da água do boiler e do banho e da vazão de água do banho, que são usados pelo controle local. Os resultados da utilização dessa função de otimização no sistema são apresentados no capítulo 5.

4.4 ALGORITMO SUB-ÓTIMO

Os microcontroladores, de forma geral, são equipamentos que possuem uma baixa capacidade de processamento, não sendo possível incluir em suas rotinas funções de otimização complexas. Ainda assim, o controle aplicado por eles deve fazer com que o sistema opere numa faixa próxima ao ponto ótimo, o qual traz o maior conforto e economia ao usuário. Por esse motivo, foi desenvolvido um algoritmo de controle, baseado na função de otimização descrita na seção 4.3, que garante o seguimento à referência (tanto da temperatura, como da vazão) e, ao mesmo tempo, procura economizar energia elétrica. Tal algoritmo, ainda, evita a necessidade de uma otimização complexa, podendo ser implementado no hardware disponível.

O objetivo principal do algoritmo é calcular o valor futuro da temperatura da água no boiler ($T_{bo.ref}$) necessário para atingir a temperatura de referência do banho (T_{ref}), considerando o incremento máximo de temperatura que o chuveiro elétrico pode fornecer dada uma vazão constante de água. Caso o valor predito da temperatura do boiler é inferior à $T_{bo.ref}$, a resistência do boiler deve ser acionada. Caso contrário, o microcontrolador deve regular a potência do chuveiro elétrico para que a temperatura da água do banho siga a referência definida previamente.

Para o desenvolvimento do algoritmo foi necessário usar o modelo discretos da planta. Utilizando as equações 4.2, 3.3, 3.4 e 3.5, mas desconsiderando o termo $Q_{sc}(n)$, pois supõe-se que o sistema opere no pior caso possível, no qual a única fonte de aquecimento da água no tanque de armazenamento é a sua resistência elétrica interna, obtém-se a equação 4.26.

$$\begin{aligned}
 T_{bo.est}(n) &= T_{bo}(n) \\
 T_{bo.est}(n+k) &= \frac{t_s \cdot [c_p \cdot \rho \cdot F_{hot.est}(n+k-1) \cdot (T_{cold}(n+k-1) - T_{bo.est}(n+k-1)) \\
 &\quad - U_{bo} \cdot A_{bo} \cdot (T_{bo.est}(n+k-1) + T_{amb}(n+k-1)) \\
 &\quad + (c_p \cdot \rho \cdot V_{bo} \cdot T_{bo.est}(n+k-1)) / t_s]}{c_p \cdot \rho \cdot V_{bo}}
 \end{aligned} \tag{4.26}$$

A variável $T_{bo.est}$ representa o valor estimado da temperatura da

água no tanque de armazenamento. O parâmetro k é a predição de k passos futuros dessa variável e seu valor é dado por $1 \leq k \leq m$, sendo que m é o horizonte de predição. Assim como no caso da função de otimização, as variáveis T_{cold} e T_{amb} são consideradas constantes ao longo do horizonte de predição, logo:

$$\begin{aligned} T_{cold}(n) &= T_{cold}(n+k) \\ T_{amb}(n) &= T_{amb}(n+k) \end{aligned} \quad (4.27)$$

A variável $F_{hot.est}$, utilizada na equação 4.26, é a estimacão do consumo de água quente e considera-se que seu valor seja igual a $F_{hot.ref}$, ou seja, que o sistema apresente erro nulo no seguimento a referência da vazão. Dessa forma, o valor predito da vazão de água quente é dado pela equação 4.28.

$$F_{hot.est}(n+k) = \begin{cases} sent_1, & T_{hot.est}(n+k) \leq T_{ref}(n+k) \\ sent_2, & T_{hot}(n+k) > T_{ref}(n+k) \end{cases} \quad \begin{matrix} (4.28a) \\ (4.28b) \end{matrix}$$

onde:

$$sent_1 = F_{ref}(n+k) \quad (4.29)$$

$$sent_2 = \frac{F_{ref}(n+k) \cdot (T_{ref}(n+k) - T_{cold}(n+k))}{(T_{hot.est}(n+k) - T_{cold}(n+k))} \quad (4.30)$$

Uma vez estimada a vazão de água quente, verifica-se a mesma está dentro do limite máximo permitido pelo sistema (equação 4.31), para então obter a vazão estimada de água fria (equação 4.32).

$$F_{hot.est}(n+k) = \begin{cases} F_{hot.max}, & F_{hot.est}(n+k) > F_{hot.max} \\ F_{hot.est}(n+k), & F_{hot.est}(n+k) \leq F_{hot.max} \end{cases} \quad \begin{matrix} (4.31a) \\ (4.31b) \end{matrix}$$

$$F_{cold.est}(n+k) = F_{ref}(n+k) - F_{hot.est}(n+k) \quad (4.32)$$

A variável $T_{hot.est}$, usada na equação 4.28, é a estimacão da temperatura da água quente na entrada do chuveiro. Sua expressão matemática, a qual é baseada na equação 3.8, é dada por:

$$T_{hot.est}(n+k) = \begin{cases} sent_3, & F_{hot.est}(n+k-1) > 0 \\ sent_4, & F_{hot.est}(n+k-1) = 0 \end{cases} \quad \begin{matrix} (4.33a) \\ (4.33b) \end{matrix}$$

onde:

$$sent_3 = (1 - K_{hot}) \cdot T_{bo.est}(n + k - d) + K_{hot} \cdot T_{amb}(n + k) \quad (4.34)$$

$$sent_4 = (1 - K_{pipe}) \cdot T_{hot.est}(n + k - 1) + K_{pipe} \cdot T_{amb}(n + k) \quad (4.35)$$

No primeiro passo do algoritmo estimam-se os valores da temperatura do boiler ($T_{bo.est}(n + k)$) e da temperatura de água quente ($T_{hot.est}(n + k)$) na entrada do chuveiro para todo o horizonte de predição, usando as equações 4.26 e 4.33, respectivamente. Para realizar esse cálculo é também necessário estimar o consumo futuro de água quente ($F_{hot.est}(n + k)$) e fria ($F_{cold.est}(n + k)$), os quais podem ser obtidos por meio das equações 4.28 e 4.32. Todavia, é necessário conhecer as referências futuras do sistema, por isso é importante que o usuário defina antecipadamente os valores desejados da temperatura ($T_{ref}(n + k)$) e vazão ($F_{ref}(n + k)$) do banho. Caso isso não ocorra, os valores da temperatura e vazão de referência são considerados nulos ao longo de todo o horizonte de predição.

No segundo passo do algoritmo, calcula-se a máxima variação de temperatura da água que o chuveiro é capaz de fornecer ($\Delta T_{sh.max}$), dada uma vazão constante diferente de zero. Utilizando-se a equação 3.6, assumindo o valor máximo da potência do chuveiro ($P_{sh.max}$) e que a vazão do banho ($F_{sh.est}(n + k)$) é dada pela equação 4.36, obtém-se a expressão 4.37, que representa o incremento máximo da temperatura da água no chuveiro.

$$F_{sh.est}(n + k) = F_{cold.est}(n + k) + F_{hot.est}(n + k) \quad (4.36)$$

$$\Delta T_{sh.max}(n + k) = \frac{\eta \cdot P_{sh.max}}{c_p \cdot \rho \cdot F_{sh.est}(n + k)} \quad (4.37)$$

Quando $F_{sh.est}(n + k) = 0$, assume-se que $\Delta T_{sh.max}(n + k) = 10^3$.

No terceiro passo do procedimento, verifica-se se a temperatura de referência do banho ($T_{ref}(n + k)$) menos a temperatura estimada da água quente ($T_{hot.est}(n + k)$) é maior ou menor que $\Delta T_{sh.max}(n + k)$. Se é menor ou igual, a temperatura de referência de água quente ($T_{hot.ref}(n + k)$), que representa a temperatura que essa variável deve ter ao longo do tempo, é igual à estimada anteriormente ($T_{hot.est}(n + k)$). Se é maior, a temperatura de referência da água quente é igual a temperatura de referência do banho ($T_{ref}(n + k)$) menos a variação de temperatura máxima que o chuveiro consegue fornecer. Essa lógica

está representada na equação 4.38.

$$T_{hot.ref}(n+k) = \begin{cases} sent_5, & \Delta T_{sh.max}(n+k) \geq T_{ref}(n+k) - T_{hot.est}(n+k) \text{ (4.38a)} \\ sent_6, & \Delta T_{sh.max}(n+k) < T_{ref}(n+k) - T_{hot.est}(n+k) \text{ (4.38b)} \end{cases}$$

onde:

$$sent_5 = T_{hot.est}(n+k) \quad (4.39)$$

$$sent_6 = T_{ref}(n+k) - \Delta T_{sh.max}(n+k) \quad (4.40)$$

Com a temperatura de referência da água quente na entrada do chuveiro definida ($T_{hot.ref}(n+k)$), obtém-se, por meio da equação 4.41 (que foi baseada na equação 4.33a), a temperatura de referência futura do boiler ($T_{bo.ref}$).

$$T_{bo.ref}(n+k) = \frac{T_{hot.ref}(n+k+d) - K_{hot} \cdot T_{amb}(n+k+d)}{(1 - K_{hot})} \quad (4.41)$$

Em seguida, calcula-se a potência da resistência do boiler ($P_{bo.est}(n+k)$) necessária para atingir essa temperatura, conforme apresentado na expressão 4.42.

$$P_{bo.est}(n+k) = \frac{c_p \cdot \rho \cdot V_{bo} \cdot (T_{bo.ref}(n+k) - T_{bo.est}(n+k))}{\eta} \quad (4.42)$$

O último passo garante que a potência calculada da resistência do boiler a cada instante não ultrapasse a potência máxima do equipamento ($P_{bo.max}$). Iniciando-se com o último elemento do vetor de predição da potência da resistência do boiler ($P_{bo.est}(n+k)$), verifica-se se o valor é maior ou menor que a potência máxima dessa resistência. Se é menor, mantém-se o número predito. Se é maior, altera-se o valor de $P_{bo.est}(n+k)$ para a potência máxima e a diferença entre a potência máxima e a predita é acrescentada no elemento precedente do vetor ($P_{bo.est}(n+k-1)$), conforme demonstrado na expressão 4.43

$$\begin{aligned} P_{bo.est}(n+k) \leq P_{bo.max} &\longrightarrow P_{bo.est}(n+k) = P_{bo.est}(n+k) \\ P_{bo.est}(n+k) > P_{bo.max} &\longrightarrow P_{bo.est}(n+k-1) = P_{bo.est}(n+k-1) + P_{bo.est}(n+k) - P_{bo.max} \\ &P_{bo.est}(n+k) = P_{bo.max} \end{aligned} \quad (4.43)$$

Esse procedimento é realizado em todo o vetor até que se chegue ao segundo elemento de $P_{bo.est}(n+k)$, cujo valor é aplicado como ação de controle na resistência do boiler.

Todo procedimento de cálculo dessa ação de controle encontra-se descrito nos algoritmos 1 e 2.

Esse algoritmo sub-ótimo é executado pelo microcontrolador a cada minuto, fazendo com que o passo amostral seja equivalente a 60 segundos. O atraso de transporte da água quente do boiler até o chuveiro foi considerado como sendo um valor fixo igual a um passo amostral ($d = 1$). Já o horizonte de predição escolhido para o protótipo desenvolvido foi de 2 horas, logo o valor de m é igual a 120 passos. Nos cálculos das predições são utilizados os últimos valores lidos dos sensores das seguinte variáveis: F_{cold} , F_{hot} , T_{bo} , T_{hot} , T_{cold} e T_{amb} .

Assim como no caso da função de otimização, os resultados da aplicação desse algoritmo no sistema híbrido são apresentados no capítulo 5.

4.4.1 Comentários finais

Nesse capítulo foram abordadas as estratégias de controle, explicando como é realizado o controle local e quais são as variáveis de medida e os parâmetros de controle. Também foram apresentados a função de otimização e o algoritmo sub-ótimo, que foi desenvolvido baseado nessa função. Observa-se que as duas principais diferenças entre o algoritmo sub-ótimo e a otimização são:

1. O algoritmo sub-ótimo não garante que o valor encontrado é o ótimo;
2. A função de otimização passa ao sistema o valor de referência da temperatura do boiler, permitindo o controle local de temperatura. Já o algoritmo envia ao sistema a ação de controle que deve ser aplicada no boiler.

No próximo capítulo serão apresentados os resultados dos experimentos aplicando-se as leis de controle descritas neste capítulo. Além disso, será feita uma comparação entre o sistema híbrido proposto e as demais soluções utilizadas para aquecer a água do banho, a fim de verificar a eficiência energética de cada um dos sistemas.

Algorithm 1 Estimação das variáveis $F_{cold.est}$, $F_{hot.est}$, $T_{bo.est}$ e $T_{hot.est}$

```

 $t_s = 60$ 
 $d = 1$ 
 $m = 120$ 
 $K_1 = (\rho \cdot c_p \cdot V_{bo})/t_s$ 
 $K_2 = \rho \cdot c_p$ 
 $F_{cold.est}(1) = F_{cold}(n)$ 
 $F_{hot.est}(1) = F_{hot}(n)$ 
 $T_{bo.est}(1) = T_{bo}(n)$ 
 $T_{hot.est}(1) = T_{hot}(n)$ 
for  $k = 2$  to  $m$  do
     $T_{bo.est}(k) = [K_2 \cdot F_{hot.est}(k-1) \cdot T_{cold}(n) - K_2 \cdot F_{hot.est}(k-1) \cdot$ 
     $T_{bo.est}(k-1) - U_{bo} \cdot A_{bo} \cdot T_{bo.est}(k-1) + U_{bo} \cdot A_{bo} \cdot T_{amb}(n) + K_1 \cdot$ 
     $T_{bo.est}(k-1)]/K_1$ 
    if  $F_{hot.est}(k-1) == 0$  then
         $T_{hot.est}(k) = (1 - K_{pipe}) \cdot T_{hot.est}(k-1) + K_{pipe} \cdot T_{amb}(n)$ 
    else
         $T_{hot.est}(k) = (1 - K_{hot}) \cdot T_{bo.est}(k-d) + K_{hot} \cdot T_{amb}(n)$ 
    end if
    if  $T_{ref}(k) == 0$  then
         $F_{hot.est}(k) = 0$ 
         $F_{cold.est}(k) = 0$ 
    else if  $T_{hot.est}(k) \leq T_{ref}(n+k)$  then
        if  $F_{ref}(n+k) < F_{hot.max}$  then
             $F_{hot.est}(k) = F_{ref}(n+k)$ 
             $F_{cold.est}(k) = 0$ 
        else
             $F_{hot.est}(k) = F_{hot.max}$ 
             $F_{cold.est}(k) = F_{ref}(n+k) - F_{hot.est}(k)$ 
        end if
    else if  $T_{hot.est}(k) > T_{ref}(k)$  then
         $F_{hot.est}(k) = [F_{ref}(n+k) \cdot (T_{ref}(n+k) - T_{cold}(n))]/(T_{hot.est}(k) -$ 
         $T_{cold}(n))$ 
        if  $F_{hot.est}(k) > F_{hot.max}$  then
             $F_{hot.est}(k) = F_{hot.max}$ 
        end if
         $F_{cold.est}(k) = F_{ref}(k) - F_{hot.est}(k)$ 
    end if
end for

```

Algorithm 2 Cálculo da ação de controle de $P_{bo}(n)$

$$F_{sh.est}(1) = F_{cold}(n) + F_{hot}(n)$$

for $k = 2$ to $(m - d)$ **do**

$$F_{sh.est}(k) = F_{cold.est}(k) + F_{hot.est}(k)$$

if $F_{sh.est}(k) == 0$ **then**

$$\Delta T_{sh.max}(k) = 1000$$

else

$$\Delta T_{sh.max}(k) = (\eta \cdot P_{max.sh}) / (c_p \cdot \rho \cdot F_{sh.est}(k))$$

end if

if $\Delta T_{sh.max}(k) < (T_{ref}(n + k) - T_{hot.est}(k))$ **then**

$$T_{hot.ref}(k) = (T_{ref}(n + k) - \Delta T_{sh.max}(k))$$

else

$$T_{hot.ref}(k) = T_{hot.est}(k)$$

end if

$$T_{bo.ref}(k) = [T_{hot.ref}(k + d) - K_{hot} \cdot T_{amb}(n + d)] / (1 - K_{hot})$$

$$P_{bo.est}(k) = V_{bo} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{bo.ref}(k) - T_{bo.est}(k)) / \eta$$

end for

for $k = 2$ to $(m - d)$ **do**

if $P_{bo.est}(m + 2 - k) > P_{max.bo}$ **then**

$$P_{bo.est}(m + 2 - k - 1) = P_{bo.est}(m + 2 - k - 1) + P_{bo.est}(m + 2 - k) - P_{max.bo}$$

$$P_{bo.est}(m + 2 - k) = P_{max.bo}$$

end if

end for

$$P_{bo}(n) = P_{bo.est}(2)$$

5 RESULTADOS

Nos capítulos anteriores foram apresentadas a planta solar híbrida para aquecimento de água e a estratégia de controle implementada no sistema a fim de reduzir os custos com energia elétrica e garantir o conforto do usuário durante o banho.

Neste capítulo serão expostos os resultados experimentais obtidos com o controle da planta solar. Também será realizada uma comparação entre essa planta e outros sistemas de aquecimento que estão disponíveis no mercado brasileiro, analisando-se a eficiência energética e o retorno de investimento que o sistema em estudo traria ao usuário.

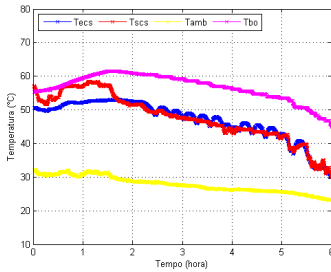
5.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS NO PROTÓTIPO

A função de otimização e o algoritmo sub-ótimo, desenvolvidos no capítulo 4 foram aplicados no protótipo descrito no capítulo 3. Para a realização desse experimento foi utilizado um computador que enviava ao microcontrolador, fixado próximo ao chuveiro, a temperatura e vazão de referência definida pelos usuários, juntamente com o horário e duração do banho de cada um deles. Além disso, o computador também gravava todos os sinais obtidos pelos sensores e, no caso do segundo experimento, calculava o ponto ótimo de operação por meio da função de otimização (apresentada na seção 4.3), visto que o microcontrolador não tinha recursos suficiente para realizar tal operação.

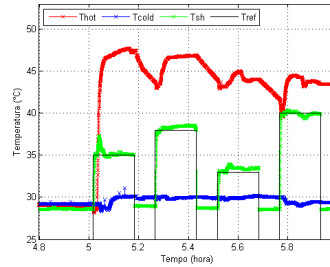
5.1.1 Primeiro experimento

O primeiro experimento foi realizado no dia 10 de Dezembro de 2013, iniciando as 14 horas e 30 minutos e tendo a duração de seis horas. Neste experimento foi utilizado o algoritmo sub-ótimo (explicado na seção 4.4) para controlar as potências das resistências elétricas e o resultado dele é exposto na figura 26. Os quatro banhos programados ocorreram entre a quinta e sexta hora do experimento, tendo a duração de 10 minutos cada banho, temperaturas de referências que variavam entre 33°C e 40°C e a vazão desejada ficou entre 3,5L/min e 4,0L/min.

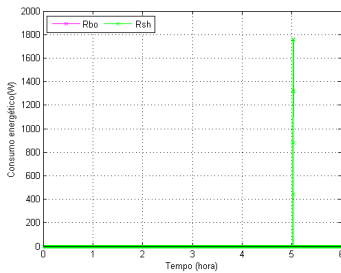
No gráfico 26(a) observa-se que a temperatura da água no interior do boiler estava acima da temperatura desejada pelo usuário, logo, não foi preciso ligar a resistência do boiler em nenhum momento e a



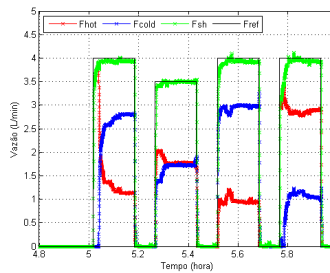
(a) Temperaturas de entrada (em azul) e saída (em vermelho) do coletor solar, ambiente (em amarelo) e do boiler (em rosa)



(b) Temperaturas da água quente (em vermelho), da água fria (em azul), da saída do chuveiro (em verde) e de referência (em preto)



(c) Potência das resistências do boiler (em rosa) e do chuveiro (em verde)



(d) Vazões de água quente (em vermelho), água fria (em azul), do chuveiro (em verde) e de referência (em preto)

Figura 26 – Resultados obtidos através de um experimento no dia 10 de Dezembro de 2013

resistência do chuveiro só foi ligada durante um minuto (vide figura 26(c)). Esse tempo foi necessário para que fosse consumido o volume água que estava no cano de água quente (aproximadamente 3,1L) e para que a água aquecida do boiler chega-se até o chuveiro, conforme pode ser observado através da linha vermelha no gráfico 26(b).

Como a temperatura da água quente estava acima da temperatura de referência, foi necessário controlar a mistura de água quente e água fria, utilizando as equações 4.3 e 4.5. O resultado do controle das vazões de água pode ser visto na figura 26(d).

O consumo energético total foi de 0,023kWh e a média do somatório do erro absoluto de seguimento a referência durante o banho foi

de $0,478^{\circ}\text{C}$, no que se refere a temperatura, e de $0,1494\text{L}/\text{min}$ referente a vazão desejada pelos usuário. Vale ressaltar que, conforme apresentado na seção 4.2, o sistema ignora erros cuja diferença, em módulo, de temperatura é inferior a $0,3^{\circ}\text{C}$ e o desvio absoluto na vazão é menor que $0,2\text{L}/\text{min}$. Essa faixa de erro foi considerada para evitar que potência do chuveiro e a abertura das válvulas fossem alteradas devido a erros praticamente imperceptíveis aos usuários do sistema. Além do mais, alguns desses erros estão relacionados a baixa resolução dos sensores utilizados no protótipo.

Com o objetivo de comparar e validar os resultados obtidos no protótipo com o modelo virtual da planta, foram utilizados os dados da radiação solar, temperatura de água fria e temperatura ambiente adquiridos durante o experimento. Esses três dados serviram como entradas na simulação, a qual também era controlada pelo algoritmo sub-ótimo, e os resultados são apresentados na figura 27.

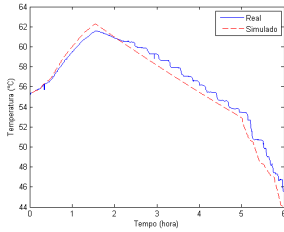
Como pode ser observado tanto o modelo real, como o virtual apresentam um resultado bastante semelhante. Os coeficientes de correlação múltipla entre os dois sistemas são: $95,15\%$ para a temperatura do boiler, $97,17\%$ para a temperatura da água quente, $95,63\%$ para a temperatura do chuveiro (neste caso considera-se apenas o período entre a quinta e sexta hora do experimento), $89,20\%$ para a vazão de água quente (levando em conta apenas o intervalo entre a quinta e sexta hora do experimento) e $90,27\%$ (considerando apenas os dados entre a quinta e sexta hora do experimento) para a vazão de água fria.

No modelo virtual o consumo energético foi de $0,019\text{kWh}$, enquanto que o erro no seguimento da temperatura de referência foi de $0,059^{\circ}\text{C}$ e no caso da vazão foi de $4,878 \cdot 10^{-6}\text{L}/\text{min}$.

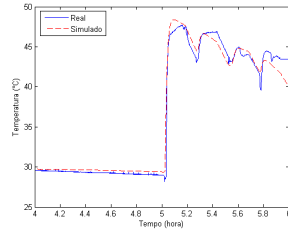
5.1.2 Segundo experimento

O segundo experimento, no qual foi utilizado a função de otimização para definir os pontos de operação do sistema, foi realizado no dia 12 de Dezembro de 2013, iniciando as 10 horas e 30 minutos e tendo a duração de uma hora. Durante esse período foram simulados quatro banhos, com os mesmos parâmetros do experimento anterior. A figura 28 apresenta os resultados obtidos com o protótipo.

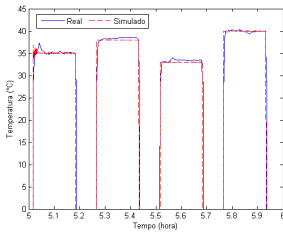
No gráfico 28(a) observa-se que a temperatura da água no interior boiler estava abaixo da temperatura desejada pelo usuário, exposto na figura 28(b). Entretanto essa diferença era pequena, sendo possível aquecer a água até o ponto desejado somente com a resistência



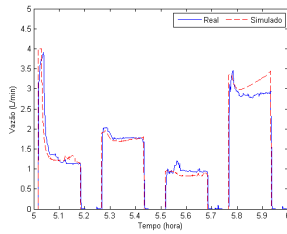
(a) Temperatura medida (linha cheia em azul) e simulada (linha tracejada em vermelho) da água do boiler



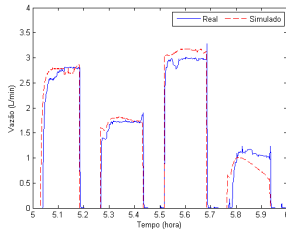
(b) Temperatura medida (linha cheia em azul) e simulada (linha tracejada em vermelho) da água quente



(c) Temperatura medida (linha cheia em azul) e simulada (linha tracejada em vermelho) da água na saída do chuveiro



(d) Vazão medida (linha cheia em azul) e simulada (linha tracejada em vermelho) da água quente



(e) Vazão medida (linha cheia em azul) e simulada (linha tracejada em vermelho) da água fria

Figura 27 – Comparativo entre os resultados obtidos no protótipo e no modelo virtual com os dados coletados no dia 10 de Dezembro de 2013

do chuveiro, deixando a resistência do boiler desligado durante todo o

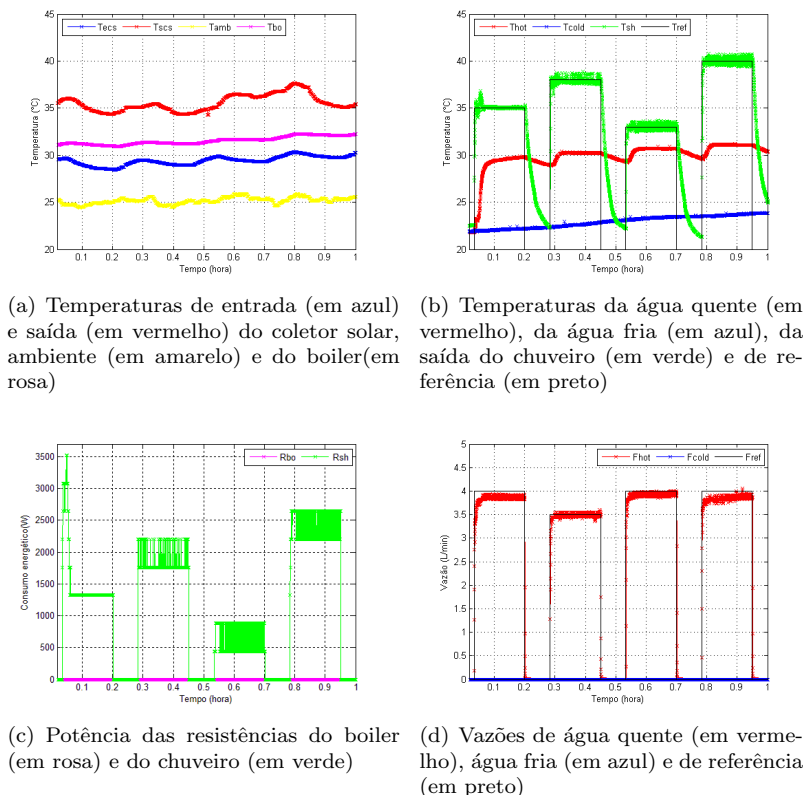


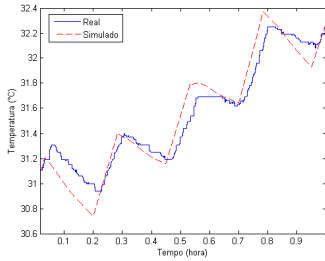
Figura 28 – Resultados obtidos através de um experimento no dia 12 de Dezembro de 2013

experimento, conforme é mostrado no gráfico 28(c).

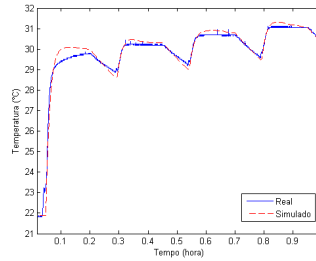
Como a temperatura da água quente estava abaixo da temperatura desejada pelo usuário, o sistema não abriu a válvula de água fria durante os banhos, como pode ser observado na figura 28(d).

A média do somatório do erro absoluto de seguimento a referência durante o banho foi de $0,404^{\circ}\text{C}$, no que se refere a temperatura, e de $0,140\text{L}/\text{min}$ referente a vazão desejada pelos usuário. Já o consumo energético do chuveiro foi de $1,051\text{kWh}$.

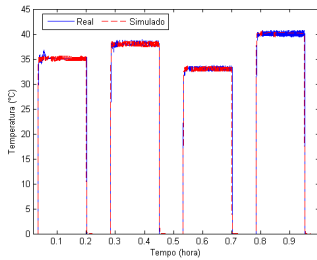
Comparando novamente os resultados obtidos no protótipo com o modelo virtual da planta, mas dessa vez utilizando a função de otimização na simulação, obteve-se os resultados expostos na figura 29.



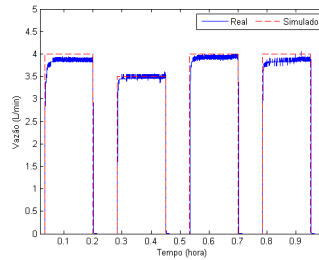
(a) Temperatura medida (linha cheia em azul) e simulada (linha tracejada em vermelho) da água do boiler



(b) Temperatura medida (linha cheia em azul) e simulada (linha tracejada em vermelho) da água quente



(c) Temperatura medida (linha cheia em azul) e simulada (linha tracejada em vermelho) da água na saída do chuveiro



(d) Vazão medida (linha cheia em azul) e simulada (linha tracejada em vermelho) da água quente

Figura 29 – Comparativo entre os resultados obtidos no protótipo e no modelo virtual com os dados coletados no dia 12 de Dezembro de 2013

No modelo virtual o consumo energético foi de 1,115kWh, enquanto que o erro no seguimento da temperatura de referência foi de $0,338^{\circ}\text{C}$ e no caso da vazão foi de $3,077 \cdot 10^{-6}\text{L}/\text{min}$.

Analisando-se os coeficientes de correlação múltipla entre os dois sistemas, obtém-se os seguintes índices: 92,13% para a temperatura do boiler, 97,27% para a temperatura da água quente, 98,40% para a temperatura do chuveiro e 96,58% para a vazão de água quente. Em ambos os casos a vazão de água fria foi nula. Assim como no experimento anterior, o alto índice de correlação demonstra que o modelo virtual representa com grande grau de confiabilidade a planta real, podendo ser utilizado para demonstrar determinadas condições climáticas e diferentes modos de operação, que não foram testados no protótipo.

5.2 ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA POTÊNCIA DAS RESISTÊNCIAS NO CONSUMO ENERGÉTICO DO SISTEMA HÍBRIDO

O sistema híbrido, no que diz respeito a temperatura da banho, apresenta dois graus de liberdade, ou seja, a água pode ser aquecida através da resistência do boiler ou do chuveiro. Essa flexibilidade permite que o sistema opere de diferentes formas para atingir a temperatura desejada pelo usuário. Entretanto, cada modo de operação tem um consumo energético diferente e cabe ao sistema definir qual é o mais eficiente, dando prioridade aquele que consome menos energia elétrica.

Para fazer o estudo da eficiência energética foi analisado o período de maior consumo de energia para aquecimento da água, o inverno. Os dados utilizados são aqueles coletados no protótipo entre os dias 09 e 12 de Agosto de 2013, os quais já foram apresentados na seção 3.3. Os banhos foram programados para ocorrerem entre as 20h e 21h e entre as 6h e 7h. Em cada um desses períodos, serão realizados 4 banhos, com duração de 10 min cada e intervalos de 5 min entre eles. Em todos os banhos a temperatura de referência foi de 35°C e a vazão desejada foi de 6L/min. No estudo foi utilizado o algoritmo sub-ótimo aplicado no modelo matemático da planta e foram realizadas três simulações:

1. Considerou-se os mesmos valores das potências das resistências utilizados no protótipo;
2. Alterou-se a potência da resistência do chuveiro para 6600W (um acréscimo de 50% comparado a resistência utilizada no protótipo) e manteve-se a potência do boiler em 3000W;
3. Modificou-se a potência da resistência do boiler para 4500W e a potência da resistência do chuveiro permaneceu em 4400W.

5.2.1 Chuveiro elétrico e boiler de média potência

Nesta primeira simulação foi utilizado o modelo virtual do protótipo sem nenhuma alteração. A potência da resistência do chuveiro é de 4400W e a do boiler é de 3000W. Utilizando os dados coletados e a programação dos banhos descritos anteriormente, obteve-se o resultado apresentado na figura 30.

No primeiro gráfico da figura 30 são expostos a temperatura do

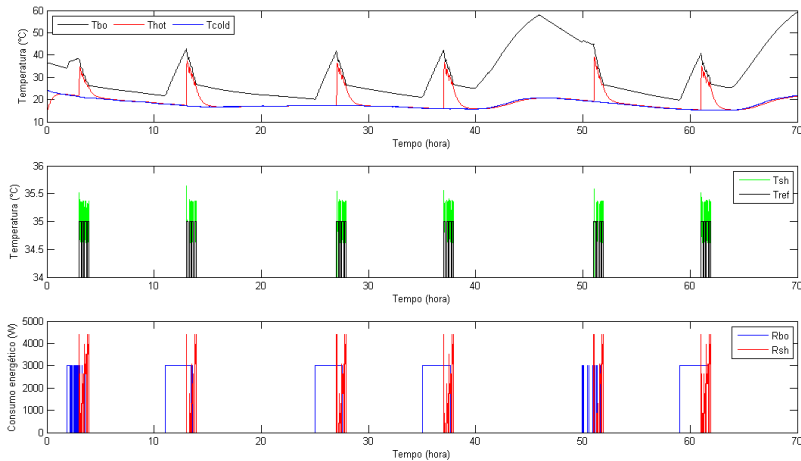


Figura 30 – Resultado obtido utilizando dados coletados entre os dias 09 e 12 de Agosto de 2013 considerando a potência da resistência do chuveiro igual a 4400W e a do boiler igual a 3000W

boiler (em preto), temperatura da água quente (em vermelho) e a temperatura da água fria (em azul). No segundo gráfico são apresentados a temperatura do banho (em verde) e a referência (em preto). No último gráfico da figura são mostrados os acionamentos das resistências do boiler (em azul) e do chuveiro (em vermelho).

Ao analisar os três gráficos, observa-se que em todos os períodos que antecediam os banhos foi necessário ligar a resistência do boiler, visto que, somente a potência do chuveiro não teria capacidade aquecer a água até o ponto de referência definido pelo usuário. Isso é facilmente percebido no quarto banho de cada período, o qual utilizava a potência máxima do chuveiro elétrico para diminuir o erro de seguimento a referência.

O acionamento da resistência do boiler era o mais tarde possível, reduzindo, assim, as perdas térmicas. Quando a resistência era desligada, a temperatura da água no interior do equipamento chegava a valores próximos de 40°C.

Entre o quarto e o quinto período do banho (terceiro dia de coleta de dados), a água do boiler foi aquecida pela radiação solar, reduzindo o consumo elétrico nos banhos noturnos do terceiro dia. O aquecimento solar não ocorreu no primeiro e segundo dia, devido a nebulosidade (vide figura 19(a)). De qualquer forma, para o segundo, quarto e sexto

períodos de banho seria necessário ligar a resistência do boiler, porque os banhos ocorriam no início da manhã, momento em que a água não poderia ser aquecida pelo sol.

O consumo energético total foi de 41,509kWh e o erro médio da temperatura do banho comparado a referência foi de 0,201°C.

5.2.2 Chuveiro elétrico de alta potência e boiler de média potência

Na segunda simulação aumentou-se a potência da resistência do chuveiro em 50%, atingindo o valor de 6600W e a resistência do boiler foi mantida em 3000W. O resultado desse experimento é apresentado na figura 31.

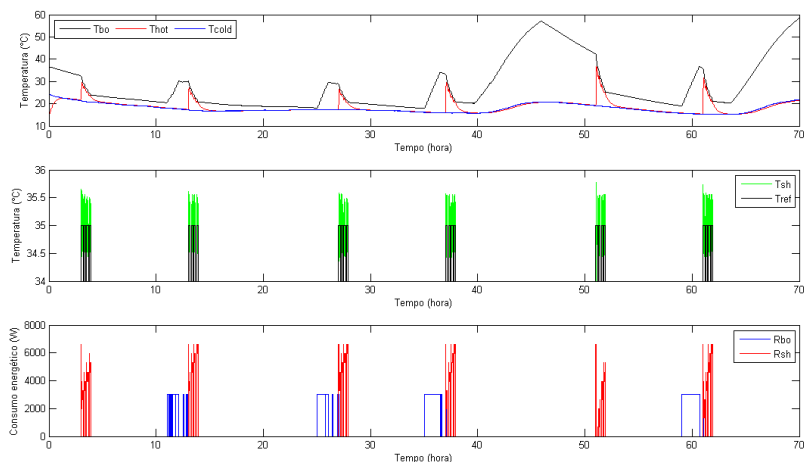


Figura 31 – Resultado obtido utilizando dados coletados entre os dias 09 e 12 de Agosto de 2013 considerando a potência da resistência do chuveiro igual a 6600W e a do boiler igual a 3000W

No primeiro gráfico da figura 31 são expostos a temperatura do boiler (em preto), temperatura da água quente (em vermelho) e a temperatura da água fria (em azul). No segundo gráfico são apresentados a temperatura do banho (em verde) e a referência (em preto). No último gráfico da figura são mostrados os acionamentos das resistências do boiler (em azul) e do chuveiro (em vermelho).

Ao analisar os três gráficos, observa-se que no primeiro e no

quinto conjunto de banhos não foi necessário acionar a resistência do boiler para atingir a temperatura desejada. Nos demais conjuntos, a resistência do boiler foi ligada, porém por um intervalo de tempo menor se comparado com a simulação passada. Nestes casos, a temperatura da água do boiler chegava a valores entre 30°C e 35°C .

A resistência do chuveiro teve um consumo energético 122% maior que na simulação passada, entretanto o consumo do boiler caiu em 52,5%. Com isso, o consumo energético total foi de 33,318kWh (o que representa 80,2% do consumo da primeira simulação) e o erro médio da temperatura do banho comparado a referência foi de $0,221^{\circ}\text{C}$.

5.2.3 Chuveiro elétrico de média potência e boiler de alta potência

Na terceira simulação a potência da resistência do chuveiro voltou ao seu valor original (4400W) e a potência do boiler foi aumentada em 50%, atingindo o valor de 4500W. O resultado dessa simulação é apresentado na figura 32.

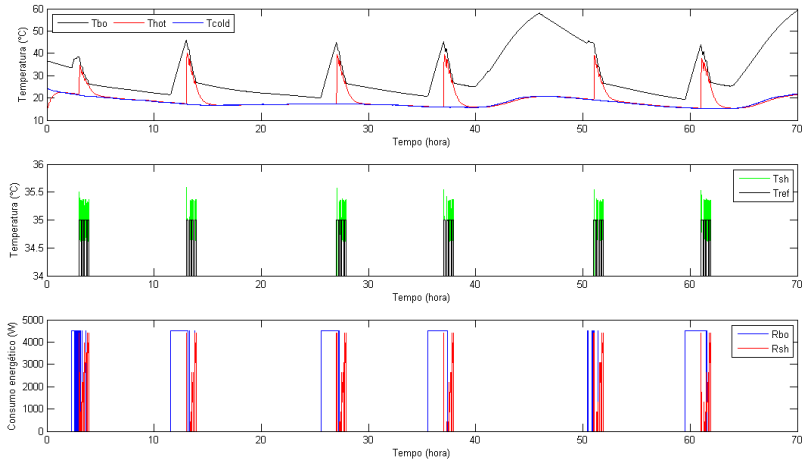


Figura 32 – Resultado obtido utilizando dados coletados entre os dias 09 e 12 de Agosto de 2013 considerando a potência da resistência do chuveiro igual a 4400W e a do boiler igual a 4500W

No primeiro gráfico da figura 32 são expostos a temperatura do boiler (em preto), temperatura da água quente (em vermelho) e a tem-

peratura da água fria (em azul). No segundo gráfico são apresentados a temperatura do banho (em verde) e a referência (em preto). No último gráfico da figura são mostrados os acionamentos das resistências do boiler (em azul) e do chuveiro (em vermelho).

O resultado da terceira simulação assemelha-se muito a primeira, a diferença é que nesta a resistência do boiler é acionada mais tarde, se comparado ao primeiro experimento, e a temperatura que a água atinge dentro do equipamento, momentos antes do primeiro banho, é próxima de 42°C . A resistência do boiler também fica ligada por um intervalo de tempo menor (68,4% do tempo em relação ao primeiro caso), entretanto o consumo energético desse equipamento foi praticamente o mesmo (102,5% comparado a simulação 1). No caso do chuveiro, o gasto de energia elétrica foi de 87,9% em relação a primeira simulação. Com isso, o consumo energético total foi de 41,425kWh (o que representa 99,8% do consumo da primeira simulação) e o erro médio da temperatura do banho comparado a referência, neste ensaio, foi de $0,189^{\circ}\text{C}$.

5.2.4 Análise dos três cenários propostos

Ao comparar as três simulações, percebe-se que a grande economia de energia ocorre quando aumenta-se a potência do aquecedor de passagem (chuveiro). Já um aquecedor central com alta potência não tem muita influência na eficiência energética, entretanto esse valor interfere bastante no tempo necessário para que a água dentro do reservatório atinja a temperatura ideal para o banho. Quanto maior o valor da potência do boiler, menor será o tempo necessário para se atingir a temperatura desejada.

A tabela 3 apresenta uma compilação dos resultados obtidos em cada um dos experimentos.

Vale ressaltar que em um dia ensolarado, a diferença de desempenho entre os três sistemas seria reduzida, visto que a maior parte do aquecimento da água ocorreria pela radiação solar. Dessa forma, não seria necessário acionar a resistência do boiler e um chuveiro de média potência já seria suficiente para aquecer a água. Assim, a economia de energia do sistema 2 frente aos outros seria mais importante em períodos frios e de pouca irradiação.

Tabela 3 – Comparação de desempenho entre as três simulações

	Simulação	Valor
Consumo energético da resistência do chuveiro	1	7,775kWh
	2	17,286kWh
	3	6,837kWh
Consumo energético da resistência do boiler	1	33,734kWh
	2	16,032kWh
	3	34,589kWh
Consumo energético total do sistema	1	41,509kWh
	2	33,318kWh
	3	41,425kWh
Erro médio da temperatura durante todos os banhos	1	0,201°C
	2	0,221°C
	3	0,189°C

5.3 DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS DE AQUECIMENTO DE ÁGUA

No capítulo 2 foram apresentados alguns sistemas utilizados para o aquecimento da água do banho em residências. Dos sistemas citados, foram selecionados três, os quais serão descritos com maiores detalhes nesta seção e serão utilizados como comparativo para a análise da eficiência energética do sistema híbrido proposto.

5.3.1 Chuveiro elétrico

O chuveiro elétrico é um equipamento muito simples e barato, sendo encontrado na maioria das residências brasileiras (ELETROBRAS, 2009). Ele normalmente apresenta faixas de potência dependendo do modelo adquirido pelo usuário. Neste caso, foi considerado um chuveiro elétrico que varia sua potência de 0% a 100% sendo que o incremento mínimo entre cada valor será de 5%, permitindo assim 20 variações de temperatura. Essa configuração foi escolhida baseada no chuveiro que foi desenvolvido no protótipo apresentado no capítulo 3, entretanto a potência do chuveiro nesta análise foi alterada para a 7500W, que é

o valor mais recomendado para clima de Santa Catarina (INMETRO, 2014). Foi inserido no sistema um controlador PI que regula a potência do equipamento e, conseqüentemente, a temperatura na saída do banho.

O equipamento tem apenas uma fonte de água, a caixa d'água. Fazendo analogia com o sistema híbrido, essa fonte de água seria classificada como fria. O controle da vazão é feito por uma válvula automatizada igual a implementado no protótipo descrito no capítulo 3.

5.3.2 Planta solar temporizada

Uma planta solar tradicional é composta por placas solares, um tanque de armazenamento, o qual possui uma resistência elétrica em seu interior, e uma caixa d'água que fornece água fria para o sistema. A planta não possui um chuveiro elétrico, logo a água quente do boiler deve estar a uma temperatura superior a desejada pelo usuário no momento do banho.

A temperatura do boiler é regulada por um termostato, o qual liga e desliga a resistência do boiler. Utilizando o sistema temporizado proposto por Florio (2010), o circuito do termostato só é ativado (energizado) em determinados horários do dia (pré-ajustado pelo usuário). Neste trabalho, foi definido que o termostato seria ligado 3 horas antes do primeiro banho e que permaneceria acionado até terem passados 5 minutos após o término do último banho programado do período (totalizando um intervalo de 4 horas de acionamento a cada conjunto de banho). Nos momentos em que o termostato está ativado, ele liga a resistência do boiler (3000W) quando a temperatura no interior do tanque está abaixo de 45°C no verão, 49°C no outono e na primavera e 52°C , no inverno. A resistência é desligada sempre que o temperatura da água atinge 48°C , no verão, 52°C no outono e na primavera e 55°C no inverno.

Na entrada da ducha do banho, a água quente do boiler é misturada com a água fria da caixa d'água utilizando os mesmo controladores e atuadores utilizados no protótipo (sistema híbrido) para o controle de vazão e da temperatura da mistura da água.

5.3.3 Planta solar com termostato integrado com chuveiro elétrico

O terceiro sistema assemelha-se a figura 7, entretanto o controle da temperatura do tanque de armazenamento é feito por um termostato, que liga a resistência do boiler (3000W) sempre que a temperatura no interior do tanque atinge um valor mínimo (25°C). Uma vez acionada, a resistência do boiler só é desligada quando a temperatura da água chega aos 28°C . Essa operação ocorre independentemente do horário ou dos hábitos de banho dos usuários.

O chuveiro utilizado é semelhante ao descrito no tópico 5.3.1, porém, neste caso, a potência do equipamento será de 4400W, com 10 faixas de temperatura, ou seja, o incremento de potência ocorre em degraus de 10%, e ele tem duas fontes de água: uma quente, que vem do boiler, e uma fria, fornecida pela caixa d'água. A mistura das águas utiliza a mesma técnica empregada no protótipo.

5.3.4 Sistema híbrido otimizado e sub-otimizado

O sistema que utiliza a função de otimização ou o algoritmo sub-ótimo para o controle da temperatura é o mesmo descrito no 3.

Ainda que tenha sido demonstrado no tópico 5.2 que um chuveiro elétrico de maior potência poderia economizar mais energia, a potência do chuveiro foi mantida em 4400W para analisar a operação da resistência do boiler.

5.4 COMPARAÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO ENTRE OS SISTEMAS

Na primeira seção deste capítulo foram apresentados os resultados obtidos com o protótipo e verificou-se que o modelo virtual com o controle desenvolvido representa com grande grau de confiabilidade o comportamento do sistema real. Na seção anterior foram descritos com maiores detalhes os sistemas comerciais disponíveis no mercado.

Nesta seção será feito uma análise do consumo energético por meio de simulações da operação dos sistemas apresentados. Para isso serão utilizadas médias históricas do clima de Florianópolis.

O comportamento da temperatura ambiente nas simulações foi aproximado por uma onda senoidal, cuja amplitude e temperatura

média foram obtidas através do trabalho de Goulart, Lamberts e Firmino (1998). A temperatura máxima ocorre às 12h e a mínima ocorre às 24h.

A temperatura da água fria ao longo do dia também foi aproximada por uma onda senoidal, cuja temperatura média coincidia com a média da temperatura ambiente e a amplitude era a metade da amplitude da temperatura ambiente.

Os valores da radiação solar ao longo dos meses em Florianópolis foram obtidos através do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (CRESESB, 2013). Como os dados são fornecidos em [$kWh/m^2.dia$] e eles correspondem às médias diárias para cada um dos 12 meses do ano, o comportamento dessas variáveis foi aproximado por uma senoide que possui apenas o semiciclo positivo, sendo nulo durante o semiciclo negativo. A desvantagem dessa aproximação é que não se pode estudar os efeitos de nuvens passageiras sobre as placas solares. Outro problema é que não tem como avaliar o comportamento do sistema em dias totalmente ensolarados ou chuvosos em um determinado mês, pois o dado fornecido pelo Centro é uma média mensal dos dias de baixa e alta irradiação.

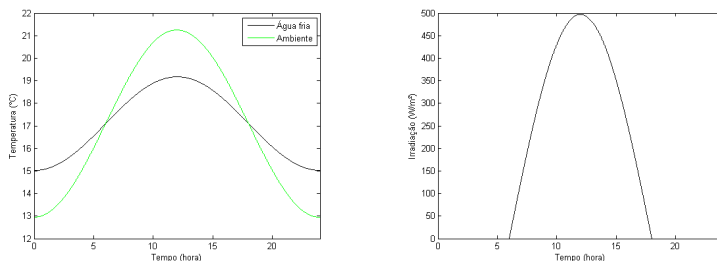
Além do estudo da eficiência energética dos sistemas, também foi avaliado o seguimento a referência da temperatura do banho, a fim de garantir um banho agradável ao usuário.

As simulações visavam representar o comportamento de uma família de 4 pessoas. Os banhos aconteciam diariamente entre as 19h e 20h, sendo que cada banho tem duração de 10 minutos e há um intervalo de 5 minutos entre cada banho. A vazão e temperatura de referência eram de 5L/min e 35°C, respectivamente, em todos os banhos programados.

5.4.1 Análise dos sistemas em Junho (inverno)

A temperatura ambiente, a temperatura da água fria e a radiação solar utilizadas no primeiro conjunto de simulações são apresentadas na figura 33. O valor dessas variáveis ao longo do tempo representam um dia típico do mês de Junho de Florianópolis, Santa Catarina.

Com essas entradas foram realizadas 5 simulações que estão descritas a seguir.



(a) Temperatura ambiente (em verde) e da água fria (em preto)

(b) Radiação solar

Figura 33 – Dados de entrada na simulação que representam um dia típico do mês de Junho em Florianópolis

5.4.1.1 Sistema 1 - Chuveiro elétrico

O chuveiro elétrico, descrito no tópico 5.3.1, apresentou a dinâmica exposta na figura 34 quando foi submetido a entradas relacionadas a um dia de inverno.

O gráfico 34(a) mostra a vazão de água utilizada durante o banho. Observa-se que o erro nesse caso é nulo, visto que a vazão de referência é de 5L/min. A figura 34(b) apresenta o acionamento da resistência elétrica durante os banhos. Em média, a resistência operou com uma potência de 7125W, entretanto no primeiro, segundo e quarto banho, o controlador fez com que a potência do chuveiro ficasse chaveando para que a temperatura de referência fosse seguida com o menor erro possível, como pode ser visto em 34(c). Esse chaveamento na potência da resistência, que reflete na temperatura da água do banho, ocorre devido as faixas de acionamento discreto do componente, uma vez que a diferença entre faixas subsequentes é de 440W. Esse fenômeno poderia ser reduzido se fossem implementadas mais faixas discretas de operação na resistência elétrica. Uma opção para isso seria utilizar um TRIAC (Triodo para Corrente Alternada) para controlar a potência do chuveiro, porém esse componente causa interferências ou geração de harmônicas na rede de energia elétrica, podendo afetar o funcionamento de outros equipamentos eletrônicos que ficam ligados em paralelo (CUNHA, 2007). O chaveamento na potência do chuveiro também ocorre nas demais simulações que serão apresentadas nessa seção.

Nessa simulação o erro médio absoluto durante os banhos foi de

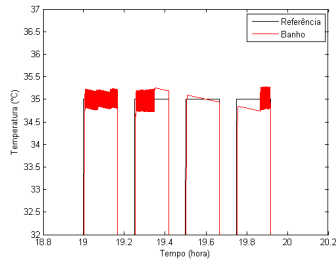
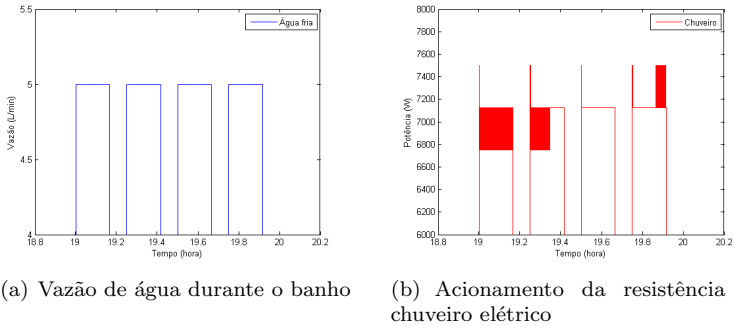


Figura 34 – Dinâmica do sistema 1 (chuveiro elétrico) em um dia típico do mês de Junho (inverno)

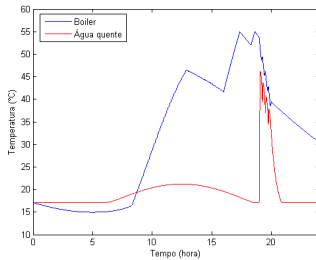
0,2816°C e o consumo energético total foi de 4,6967kWh.

É importante mencionar que se a potência do chuveiro fosse menor ou a vazão da água fosse maior, o sistema não conseguiria seguir a temperatura de referência (35°C) definida pelo usuário.

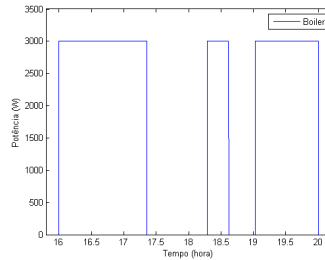
5.4.1.2 Sistema 2 - Planta solar temporizada

A planta solar, apresentada em 5.3.2, na simulação de um dia do mês de Junho teve o comportamento exibido na figura 35.

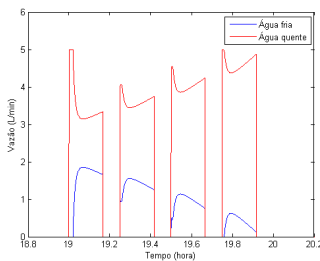
O gráfico 35(a) mostra a temperatura da água no boiler e no cano de água quente próximo a entrada da ducha. Observa-se que a temperatura da água no interior do tanque de armazenamento começa



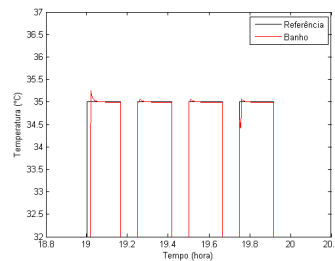
(a) Temperatura da água no boiler (em azul) e da água quente na entrada da ducha (em vermelho)



(b) Acionamento da resistência do boiler



(c) Vazão de água fria (em azul) e de água quente (em vermelho) durante o banho



(d) Temperatura de referência (em preto) e da água do banho (em vermelho)

Figura 35 – Dinâmica do sistema 2 (planta solar) em um dia típico do mês de Junho (inverno)

a aumentar às 16h, quando a resistência do boiler é acionada, como pode ser visto na figura 35(b). Quando o temperatura no interior do tanque atinge 55°C a resistência é desligada, e ela só volta a ser acionada por volta das 18h e 20min, quando a temperatura fica abaixo de 52°C , ficando nesse estado por aproximadamente 30 minutos. Às 19 horas iniciam-se os banhos e a água do boiler começa a ser consumida, conforme pode ser observado na figura 35(c)). O volume de água quente que sai do tanque é igual ao volume de água fria que entra nela, é por isso que das 19h às 20h a temperatura do boiler cai drasticamente e a resistência do boiler é acionada mais uma vez.

Comparando os gráficos 35(a) e 35(b), verifica-se que houve um desperdício de energia elétrica, pois se o primeiro acionamento da re-

sistência fosse em um horário mais próximo do horário de banho, não seria necessário ligar e desligar a resistência várias vezes. Observa-se ainda que depois das 20 horas, toda a água quente que fica no interior do tanque tem perda térmica e a energia elétrica utilizada para aquecer essa grande quantidade de água é desperdiçada ao longo da noite.

A temperatura do banho é exposta no gráfico 35(d). Percebe-se que no primeiro banho, demora cerca de 40 segundos até que a água quente do boiler chegue ao chuveiro. Nos demais a temperatura do banho é seguida com um erro muito pequeno, devido as válvulas que regulam a mistura da água quente e fria na proporção correta.

Nesse ensaio o erro médio absoluto durante os banhos foi de $0,372^{\circ}\text{C}$ e o consumo energético total foi de $7,988\text{kWh}$.

Outra forma de medir o desempenho dessa planta é calcular a fração solar. Esse dado é obtido pela divisão da quantidade de energia solar convertida em calor pelo total de energia utilizado pelo sistema. A fração solar fornece o percentual de energia que é suprido pelo aquecimento solar (KALOGIROU, 2009). Para esse experimento a fração solar foi de $20,93\%$.

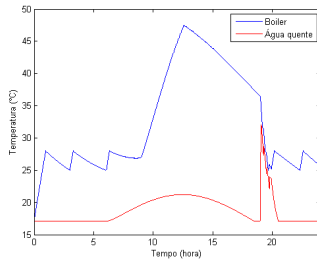
5.4.1.3 Sistema 3 - Planta solar com termostato integrado com chuveiro elétrico

O terceiro sistema, descrito no tópico 5.3.3, quando submetido as entradas referentes a um dia de inverno, teve uma dinâmica apresentada na figura 36.

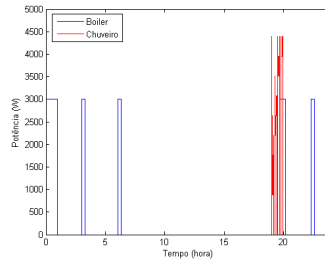
O gráfico 36(a) mostra a temperatura da água no tanque de armazenamento. Observa-se que sempre que temperatura da água (em azul) atinge 25°C , a resistência do boiler é acionada (vide figura 36(b)), sendo desligada no momento em que a água atinge 28°C . Esse processo apresenta uma alta ineficiência energética, pois em vários momentos do dia a água está sendo aquecida sem qualquer necessidade e a energia elétrica convertida em calor está sendo desperdiçada devido as perdas térmicas.

Nessa simulação, toda a água utilizada no chuveiro provém do boiler, como é observado no gráfico 36(c). Mesmo com a temperatura da água quente desse experimento menor que a do anterior (sistema 2), o sistema ainda consegue seguir a temperatura de referência (figura 36(d)), devido a presença do chuveiro elétrico que aquece a água no final do processo.

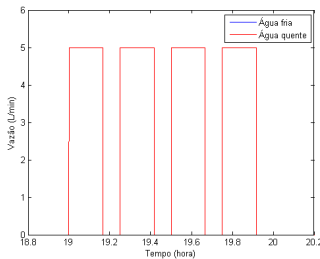
Nessa simulação o erro médio absoluto durante os banhos foi de



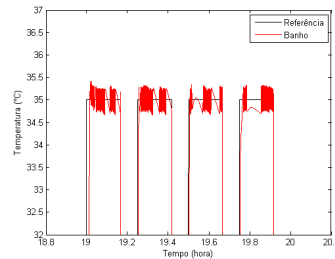
(a) Temperatura da água no boiler (em azul) e da água quente na entrada da ducha (em vermelho)



(b) Acionamento da resistência do boiler e do chuveiro elétrico



(c) Vazão de água fria (em azul) e de água quente (em vermelho) durante o banho



(d) Temperatura de referência (em preto) e da água do banho (em vermelho)

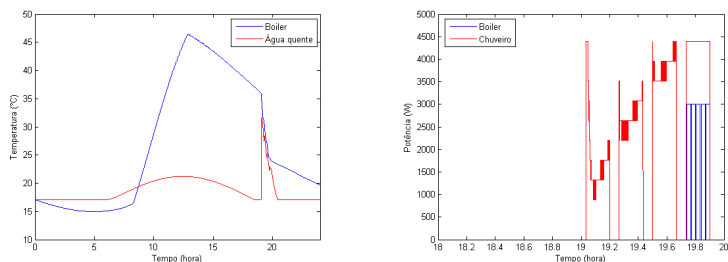
Figura 36 – Dinâmica do sistema 3 (planta solar com chuveiro elétrico) em um dia típico do mês de Junho (inverno)

0,252°C e o consumo energético total foi de 8,897kWh. A fração solar ficou em 19,20%.

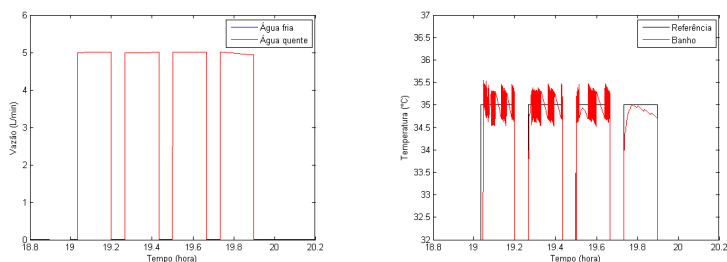
5.4.1.4 Sistema 4 - Sistema híbrido otimizado

O sistema híbrido otimizado apresentou o comportamento exposto na figura 37 quando realizado a simulação.

Os gráficos 37(a) e 37(b) apresentam a temperatura da água no boiler e o acionamento das resistências, respectivamente. Nota-se que, diferente do sistema 3, a resistência do boiler só é ligada durante o quarto banho, minimizando o consumo de energia elétrica.



(a) Temperatura da água no boiler (em azul) e da água quente na entrada da ducha (em vermelho) (b) Acionamento da resistência do boiler e do chuveiro elétrico



(c) Vazão de água fria (em azul) e de água quente (em vermelho) durante o banho (d) Temperatura de referência (em preto) e da água do banho (em vermelho)

Figura 37 – Dinâmica do sistema 4 (planta solar híbrida otimizada) em um dia típico do mês de Junho (inverno)

Nessa simulação, a vazão de água durante o banho, exibida na figura 37(c), apresenta um pequeno erro de seguimento a referência no final do quarto banho. Esse erro decorre da função de otimização, que ao minimizar a função custo apresentada na equação 4.13, faz uma ponderação entre o seguimento a referência da vazão e temperatura e o consumo de eletricidade. Por esse mesmo motivo, a temperatura do banho, apresentada no gráfico 37(d)), também tem um decaimento no final do quarto banho. Apesar disso, o erro no final do banho ainda se mantém dentro da faixa de operação estipulada pelo sistema.

Nesse experimento o erro médio absoluto durante os banhos foi de $0,3309^{\circ}\text{C}$ e o consumo energético total foi de $2,549\text{kWh}$. A fração solar ficou em $45,34\%$.

5.4.1.5 Sistema 5 - Sistema híbrido com algoritmo sub-ótimo

A planta solar integrada com o chuveiro elétrico e controlada com o algoritmo sub-ótimo teve a dinâmica mostrada na figura 38, considerando a operação em um dia de inverno de Florianópolis.

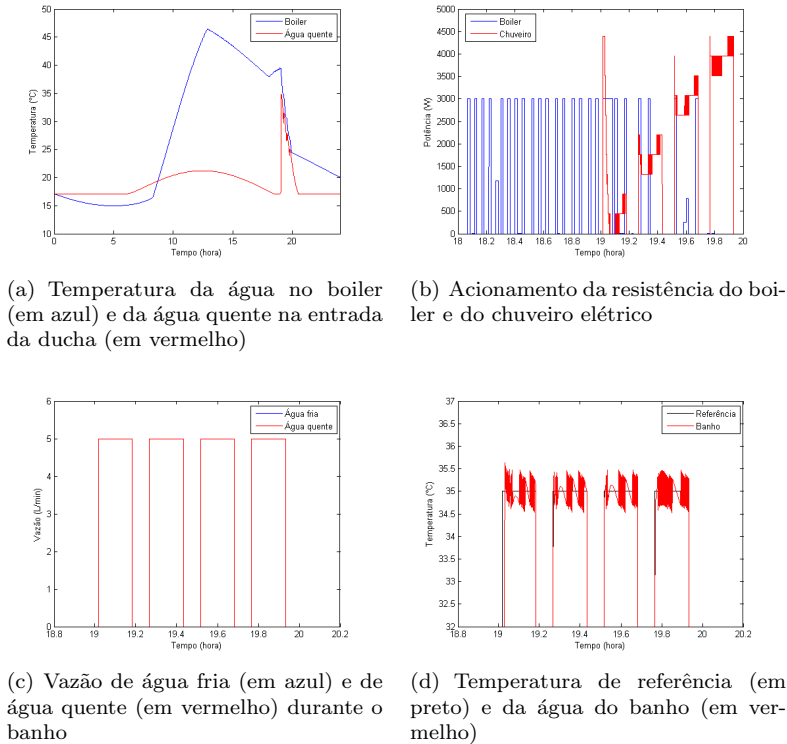


Figura 38 – Dinâmica do sistema 5 (planta solar híbrida com algoritmo sub-ótimo de controle) em um dia típico do mês de Junho (inverno)

O sistema 5 tem um comportamento semelhante ao sistema anterior, com a diferença que o sistema aciona a resistência do boiler antes de iniciar os banhos (vide figura 38(b)), aumentando assim um pouco o consumo elétrico se comparado ao caso ótimo. O acionamento antecipado da resistência do boiler provoca o aumento na temperatura da água no interior do tanque próximo as 19h, conforme pode ser visto na figura 38(a). A vazão de água, mostrada no gráfico 38(c) segue a

referência estipulada pelo usuário. Já a temperatura do banho (figura 38(d)), na maior parte do tempo fica dentro da faixa de operação, exceto no primeiro minuto do primeiro banho, porque a resistência do chuveiro, mesmo usando 100% da potência, não consegue atingir a temperatura de referência. Esse problema poderia ser solucionado aumentando-se a potência máxima do chuveiro elétrico. Com isso também poderia ser modificado o algoritmo de controle, o que reduziria o acionamento da resistência do boiler e aumentaria a eficiência energética do sistema.

Nessa simulação o erro médio absoluto durante os banhos foi de $0,322^{\circ}\text{C}$ e o consumo energético total foi de $2,945\text{kWh}$. A fração solar ficou em $41,79\%$.

5.4.2 Análise dos sistemas em Dezembro (verão)

A temperatura ambiente, a temperatura da água fria e a radiação solar utilizadas no segundo conjunto de simulações são apresentadas na figura 39. O valor dessas variáveis ao longo do tempo representam um dia típico do mês de Dezembro de Florianópolis, Santa Catarina.

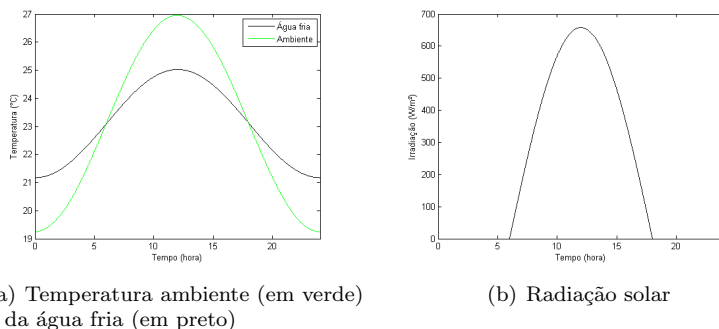
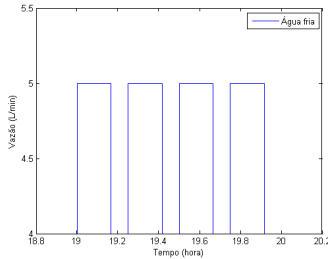


Figura 39 – Dados de entrada na simulação que representam um dia típico do mês de Dezembro em Florianópolis

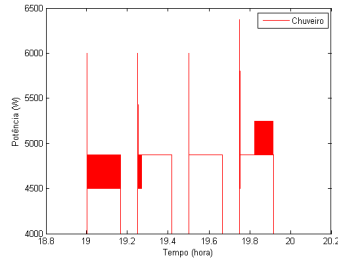
Com essas entradas foram realizadas 5 simulações que estão descritas a seguir.

5.4.2.1 Sistema 1 - Chuveiro elétrico

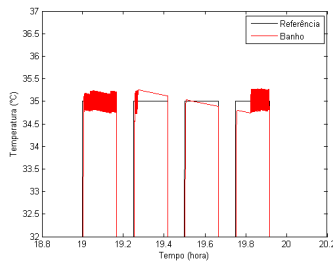
O chuveiro elétrico apresentou a dinâmica exposta na figura 40 quando foi submetido a entradas relacionadas a um dia verão.



(a) Vazão de água durante o banho



(b) Acionamento da resistência do chuveiro elétrico



(c) Temperatura de referência (em preto) e da água do banho (em vermelho)

Figura 40 – Dinâmica do sistema 1 (chuveiro elétrico) em um dia típico do mês de Dezembro (verão)

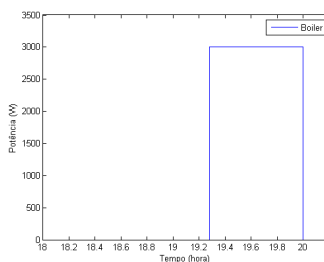
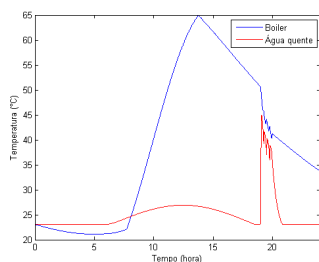
O gráfico 40(a) mostra que a vazão de água consumida durante os banhos seguiu a referência de 5L/min. A figura 40(b) apresenta o acionamento da resistência elétrica durante os banhos. Em média, a resistência operou com uma potência de 4875W, entretanto no início de cada banho ocorria um pico energético o qual era responsável por aquecer o volume de água que ficava armazenada na câmara interna do chuveiro. A temperatura da água do banho é exposta na figura 40(c). Nota-se que enquanto o erro da temperatura medida está dentro da faixa de tolerância de $0,3^{\circ}\text{C}$, o sistema mantém a potência do chuveiro

contante. Quando o erro ultrapassa esse valor, a potência do chuveiro começa a chavear, mas o erro ainda fica dentro da faixa de operação devido a mistura térmica da água que ocorre dentro da câmara do chuveiro.

Nessa simulação o erro médio absoluto durante os banhos foi de $0,2456^{\circ}\text{C}$ e o consumo energético total foi de $3,222\text{kWh}$.

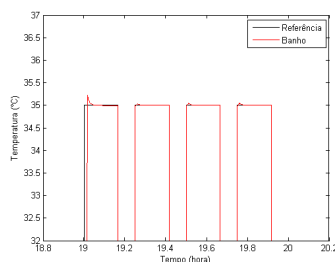
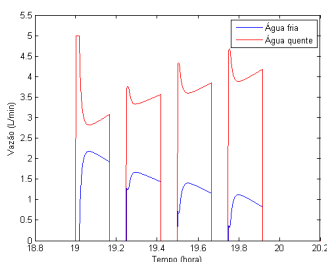
5.4.2.2 Sistema 2 - Planta solar temporizada

A planta solar temporizada na simulação de um dia do mês de Dezembro teve o comportamento exibido na figura 41.



(a) Temperatura da água no boiler (em azul) e da água quente na entrada da ducha (em vermelho)

(b) Acionamento da resistência do boiler



(c) Vazão de água fria (em azul) e de água quente (em vermelho) durante o banho

(d) Temperatura de referência (em preto) e da água do banho (em vermelho)

Figura 41 – Dinâmica do sistema 2 (planta solar) em um dia típico do mês de Dezembro (verão)

O gráfico 41(a) mostra a dinâmica da temperatura da água no boiler sendo aquecida em um dia de verão, chegando a atingir até 65°C . Como o sol aqueceu bastante a água não foi necessário ligar a resistência do boiler antes das 19h (vide figura 41(b)). O consumo de água quente, apresentado no gráfico 41(c), foi menor que no inverno e como a temperatura da água fria também é maior verão, a variação na temperatura do boiler não é intensa como na estação mais fria do ano. O erro de seguimento à temperatura de referência (figura 41(d)) também é menor porque entre os banhos, a perda térmica é reduzida, logo a temperatura da água quente tende a variar menos que no inverno.

Nesse ensaio o erro médio absoluto durante os banhos foi de $0,236^{\circ}\text{C}$ e o consumo energético total foi de $2,162\text{kWh}$. A fração solar ficou em $56,42\%$.

5.4.2.3 Sistema 3 - Planta solar com termostato integrado com chuveiro elétrico

O terceiro sistema, quando submetido as entradas referentes a um dia de verão, teve uma dinâmica apresentada na figura 42.

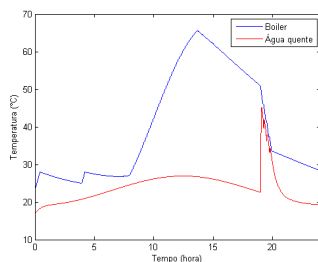
A temperatura da água quente e da água no interior do boiler é apresentada no gráfico 42(a). Devido ao aquecimento solar, nesse experimento é o consumo elétrico foi bem menor se comparado ao mesmo sistema operando no inverno, como pode ser visto na figura 42(b). Nesse caso também, houve uma mistura de água quente e água fria nos três primeiros banhos (figura 42(c)), o que não ocorreu no inverno. O erro de seguimento à referência no mês de Dezembro, apresentado no gráfico 42(d), foi metade do que foi na verificado no mês de Junho.

Nesse experimento o erro médio absoluto durante os banhos foi de $0,121^{\circ}\text{C}$ e o consumo energético total foi de $2,196\text{kWh}$. A fração solar ficou em $56,04\%$.

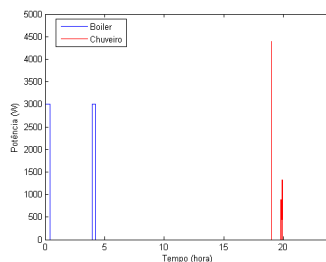
5.4.2.4 Sistema 4 - Sistema híbrido otimizado

O sistema híbrido otimizado apresentou o comportamento exposto na figura 43 quando realizado a simulação.

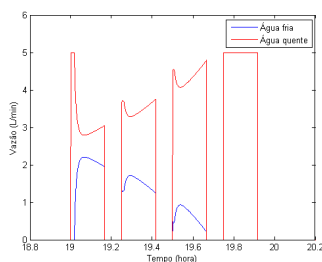
Os gráficos 43(a) e 43(b) apresentam a temperatura da água no boiler e o acionamento das resistências, respectivamente. Nota-se que, diferente do sistema 3, a resistência do boiler não é ligada em nenhum momento do experimento. Fora isso, o comportamento



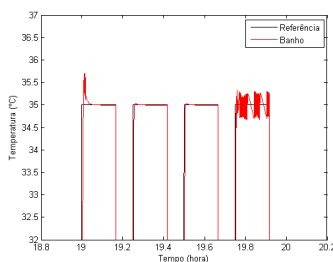
(a) Temperatura da água no boiler (em azul) e da água quente na entrada da ducha (em vermelho)



(b) Acionamento da resistência do boiler e do chuveiro elétrico



(c) Vazão de água fria (em azul) e de água quente (em vermelho) durante o banho



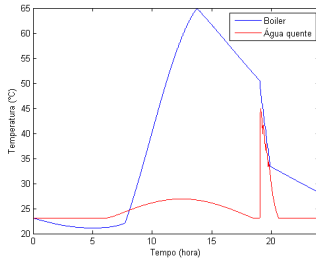
(d) Temperatura de referência (em preto) e da água do banho (em vermelho)

Figura 42 – Dinâmica do sistema 3 (planta solar com chuveiro elétrico) em um dia típico do mês de Dezembro (verão)

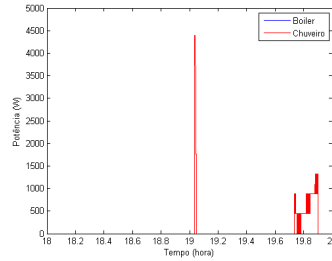
de ambos os sistemas é muito semelhante, principalmente quando se compara o consumo de água (figura 43(c)) e a temperatura do banho (figura 43(d)).

Nesse experimento o erro médio absoluto durante os banhos foi de $0,118^{\circ}\text{C}$ e o consumo energético total foi de $0,157\text{kWh}$. A fração solar ficou em $94,69\%$.

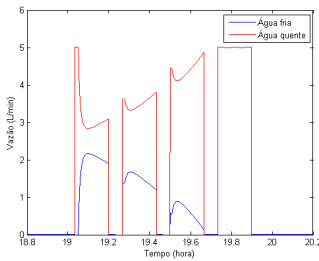
Fazendo um comparativo entre a operação do sistema 4 no verão e no inverno, verifica-se que o consumo de energia elétrica em Dezembro é apenas $6,2\%$ do gasto registrado em Junho, devido a maior incidência da radiação solar.



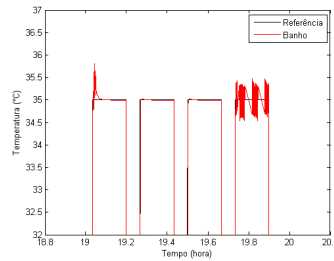
(a) Temperatura da água no boiler (em azul) e da água quente na entrada da ducha (em vermelho)



(b) Acionamento da resistência do boiler e do chuveiro elétrico



(c) Vazão de água fria (em azul) e de água quente (em vermelho) durante o banho



(d) Temperatura de referência (em preto) e da água do banho (em vermelho)

Figura 43 – Dinâmica do sistema 4 (planta solar híbrida otimizada) em um dia típico do mês de Dezembro (verão)

5.4.2.5 Sistema 5 - Sistema híbrido com algoritmo sub-ótimo

A planta solar integrada com o chuveiro elétrico e controlada com o algoritmo sub-ótimo teve a dinâmica mostrada na figura 44, considerando a operação em um dia de verão de Florianópolis.

A dinâmica do sistema com o algoritmo sub-otimizado, apresentado nos quatro gráficos da figura 44 é muito semelhante ao apresentado anteriormente no sistema otimizado, com uma pequena diferença no acionamento da resistência do chuveiro (44(b)) e, por consequência na temperatura do banho.

Nessa simulação o erro médio absoluto durante os banhos foi de $0,118^{\circ}\text{C}$ e o consumo energético total foi de $0,166\text{kWh}$. A fração solar

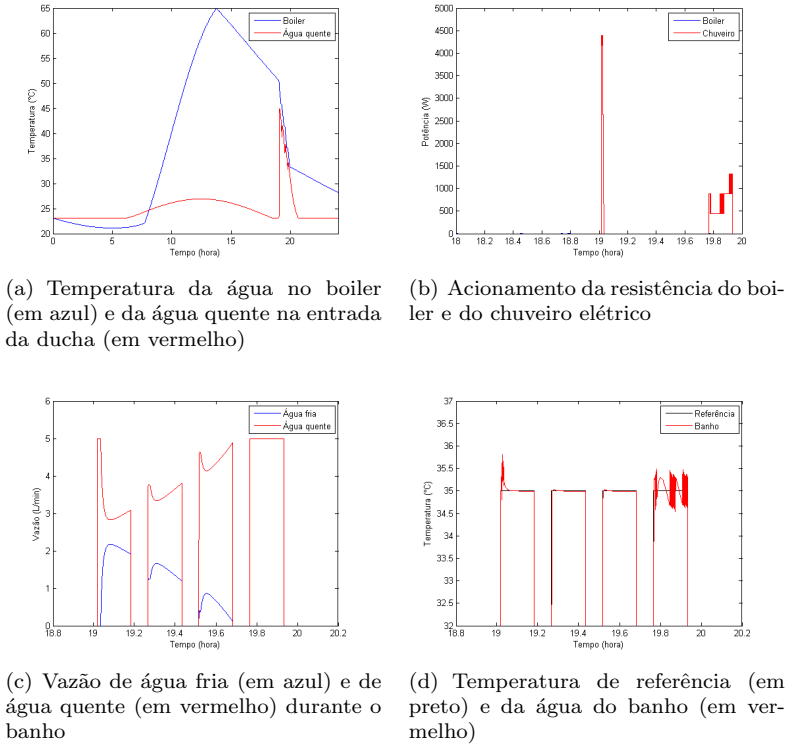


Figura 44 – Dinâmica do sistema 5 (planta solar híbrida com algoritmo sub-ótimo de controle) em um dia típico do mês de Dezembro (verão)

ficou em 94,40%.

5.4.3 Análise dos sistemas nas quatro estações do ano

Um estudo mais detalhado da eficiência energética dos cinco sistemas ao longo do ano foi realizado por meio da compilação de dados do consumo elétrico e do erro de seguimento a referência nos meses de Janeiro (verão), Abril (outono), Julho (inverno) e Outubro (primavera) e da média anual do clima de Florianópolis. Também foi analisado o gasto diário que a família teria com energia elétrica considerando, ao todo, 4 banhos por dia, os quais ocorriam entre às 19h e 20h, com de

10 minutos cada banho. A vazão e temperatura de referência eram de 5L/min e 35°C, respectivamente. A tarifa de energia elétrica considerada foi de R\$0,35543/kWh, que era o valor da tarifa residencial (B1) vigente em Março de 2014, em Santa Catarina, acrescido de impostos. O resultado do estudo é apresentado na tabela 4.

Tabela 4 – Comparação da eficiência energética dos 5 sistemas nos meses de Janeiro (verão), Abril (outono), Julho (inverno) e Outubro (primavera) e em uma média anual do clima de Florianópolis

	Sistema	Janeiro	Abril	Julho	Outubro	Média anual
Consumo energético diário	1	2,940kWh	3,687kWh	4,803kWh	3,993kWh	3,858kWh
	2	1,993kWh	3,775kWh	7,711kWh	4,650kWh	3,860kWh
	3	1,787kWh	4,040kWh	9,002kWh	4,794kWh	4,380kWh
	4	0,063kWh	0,684kWh	2,491kWh	1,078kWh	0,834kWh
	5	0,067kWh	0,692kWh	2,974kWh	1,088kWh	0,846kWh
Gasto diário	1	R\$1,04	R\$1,31	R\$1,71	R\$1,42	R\$1,37
	2	R\$0,71	R\$1,34	R\$2,74	R\$1,65	R\$1,37
	3	R\$0,64	R\$1,44	R\$3,20	R\$1,70	R\$1,56
	4	R\$0,02	R\$0,24	R\$0,89	R\$0,38	R\$0,30
	5	R\$0,02	R\$0,25	R\$1,06	R\$0,39	R\$0,30
Percentual do gasto energético comparado ao sistema 1	1	100%	100%	100%	100%	100%
	2	67,8%	102,4%	160,5%	116,5%	100,1%
	3	60,8%	109,6%	187,4%	120,1%	113,5%
	4	2,1%	18,6%	51,9%	27,0%	21,6%
	5	2,3%	18,8%	61,9%	27,2%	21,9%
Erro médio absoluto da temperatura durante todos os banhos	1	0,240°C	0,252°C	0,285°C	0,253°C	0,273°C
	2	0,205°C	0,292°C	0,398°C	0,330°C	0,326°C
	3	0,091°C	0,174°C	0,246°C	0,206°C	0,193°C
	4	0,092°C	0,191°C	0,347°C	0,234°C	0,208°C
	5	0,089°C	0,184°C	0,322°C	0,238°C	0,207°C

Comparando os sistemas 1 (chuveiro elétrico) e 2 (planta solar temporizada), verifica-se que eles têm um desempenho energético praticamente idêntico na média anual, entretanto no verão a planta solar é mais eficiente, enquanto que no inverno o aquecedor de passagem é o mais econômico. Isso demonstra que em regiões cujo clima é mais quente e a incidência da radiação solar é maior, as plantas solares tendem a ser mais econômicas, mas em regiões mais frias ou com baixa irradiação, o aquecedor de passagem é economicamente mais viável.

O sistema 3 (planta solar com termostato integrado com chuveiro), apesar de ser um híbrido, tem a pior eficiência energética entre todos os sistemas analisados, pois ele desperdiça muita energia aquecendo a água em períodos em que não há nenhum banho previsto.

Já os sistemas 4 (otimizado) e o 5 (sub-ótimo) são os que apresentam o melhor desempenho entre os cinco analisados, porque eles utilizam as duas fontes de aquecimento (solar e elétrica) de uma forma mais eficiente, priorizando, no caso do consumo elétrico, o chuveiro

elétrico ao boiler. Utilizando a média anual, ambos os sistemas economizam R\$1,07 por dia comparado a ao chuveiro elétrico (sistema 1) e a planta solar temporizada (sistema 2), o que representa uma economia superior a 78% no gasto de energia elétrica.

É importante ressaltar que caso os banhos ocorressem mais tarde (após as 20h) ou logo no início da manhã a eficiência energética dos sistemas que utilizam a energia solar seria menor, devido as perdas térmicas do boiler ao longo da noite. Por outro lado, a eficiência energética dos sistemas 3, 4 e 5 poderia ser maior se fosse utilizado um chuveiro elétrico com uma potência superior a 4400W.

Com relação ao erro de seguimento à temperatura, todos os sistemas apresentarem um erro médio inferior a 0,4°C, sendo que o erro máximo para todos os casos foi registrado em Julho e o erro mínimo foi obtido em Janeiro.

5.5 RETORNO SOBRE O INVESTIMENTO

No estudo da viabilidade econômica da planta solar híbrida automatizada foi analisado o tempo de *payback*, ou seja, o tempo para que o projeto se pague. Para isso foi necessário estimar o valor comercial do sistema proposto, considerando a aquisição dos equipamentos (placas solares, boiler, caixa d'água, chuveiro, microcontroladores, sensores, atuadores, etc), a mão-de-obra necessária para se montar a planta híbrida e a margem de lucro da empresa responsável pelo sistema. Na estimativa não foi incluído gastos hidráulicos, pois partiu-se do pressuposto que a residência já teria um encanamento próprio para a água quente e outro para a água fria disponíveis para serem usados. Com isso, obteve-se um valor de venda do produto no mercado estimado entre 4400 a 4800 reais.

Comparando o sistema híbrido automatizado com as demais soluções atualmente disponíveis no mercado, verifica-se que o seu preço é maior devido aos seguintes motivos:

- Nenhuma outra solução apresentada neste trabalho possui controle de vazão automático;
- A complexidade do sistema com controle ótimo ou algoritmo sub-ótimo é maior que os demais, principalmente no que se refere a controle de temperatura;
- E, como comprovado na seção anterior, o sistema proposto é mais econômico que qualquer outra solução.

No cálculo do *payback* do sistema híbrido automatizado foi utilizado o preço médio estimado de venda do produto (4600 reais) e o valor economizado em energia elétrica ao longo do ano (390 reais). Essa última informação foi obtida por meio da comparação com um chuveiro elétrico, que foi o sistema com o segundo melhor desempenho na média anual (conforme apresentado na tabela 4). A metodologia utilizada no cálculo foi o *payback* simples, o qual não leva em consideração a taxa de juros, nem a inflação do período, que afetaria o preço da tarifa de energia elétrica. Com esses dados foi calculado que seria necessário aproximadamente 11,8 anos para que o projeto se pagasse. Isso demonstra que o projeto é viável, entretanto ele possui um baixo retorno sobre o investimento. Sua rentabilidade de 8,48% ao ano, pode ser maior caso o preço da tarifa de energia elétrica aumente nos próximos anos ou o preço das placas solares e boiler diminua com o passar do tempo, barateando o produto final.

5.5.1 Comentários finais

Os resultados apresentados neste capítulo comprovaram que o sistema híbrido proposto neste trabalho é mais eficiente que os demais sistemas para aquecimento de água do banho e é capaz de atender os requisitos definidos pelo usuário, no que diz respeito ao seguimento à referência de temperatura e vazão.

Outro ponto a ser ressaltado é a economia de água. Os sistemas que possuem aquecimento central, como é o caso das plantas solares tradicionais, ou quando o aquecedor de passagem fica longe da ducha, como os aquecedores a gás, apresentam um grande desperdício de água. Isso acontece porque o volume de água que fica acumulado no encanamento entre o chuveiro e o sistema de aquecimento, com o passar do tempo, sofre perdas térmicas e como essa quantidade de água não é aquecida antes de chegar até o usuário, acaba sendo desperdiçada. O volume de água jogado fora varia de acordo com a instalação hidráulica em cada residência, mas, no caso do protótipo, a quantidade chegava a 3,1 litros em cada banho. Esse volume só não era desperdiçado, pois o sistema híbrido construído aquecia a água fria utilizando a resistência elétrica do chuveiro.

A longo prazo, a implantação do sistema híbrido em residências mostrou ser economicamente viável. O próximo passo do projeto seria desenvolver um solução mais comercial do produto, a qual poderia ser implementada em todo território nacional.

6 CONCLUSÃO

No último capítulo deste documento são apresentadas as conclusões referentes ao trabalho realizado, mostrando a importância dos resultados obtidos e utilidade do projeto desenvolvido. Também são dadas sugestões para projetos futuros nesse mesmo tema.

6.1 IMPORTÂNCIA DO TRABALHO

Este trabalho aborda o estudo e a construção de uma unidade de aquecimento de água para banho utilizando como fontes de energia a solar e a elétrica. O projeto foi desenvolvido a fim de aumentar o conforto do usuário durante o banho, reduzir os gastos com energia elétrica e evitar o desperdício de água. Para se atingir esse objetivo um protótipo foi construído em Florianópolis, Santa Catarina, e foram inseridos vários equipamentos para automatizar e controlar a temperatura e vazão de água durante o banho. Também foi desenvolvido uma função de otimização que, por meio de uma função custo, garante que a planta opere de forma a reduzir o consumo de energia elétrica e o erro de seguimento a referência. Como a função de otimização requer uma grande capacidade de processamento, um algoritmo de controle sub-ótimo foi criado para ser inserido em microcontroladores mais simples e baratos.

Todo o sistema foi modelado e posteriormente validado utilizando os dados adquiridos no protótipo. Em testes de campo e em simulações, pode-se verificar a eficiência energética da planta híbrida. Ao tomar como base a média anual do clima de Florianópolis, o sistema proposto é capaz de reduzir em mais de 78% a energia elétrica consumida durante o banho, representando uma economia de 390 reais por ano para uma família composta por 4 pessoas. Além disso, a planta solar híbrida, se comparada a uma planta solar tradicional, evita o desperdício do volume de água que fica acumulado no encanamento entre o boiler e o chuveiro. A quantia de água economizada varia de acordo com a instalação hidráulica em cada residência, mas, no caso do protótipo, a economia chegava a 3,1 litros em cada banho, o que representa um desperdício de de 4526 litros de água por ano para uma família com 4 pessoas.

As principais contribuições desse trabalho são relacionadas a seguir:

- Projeto e construção de uma unidade de aquecimento de água automatizada;
- Desenvolvimento de uma função de otimização e de um algoritmo sub-ótimo para o controle da planta solar híbrida;
- Estudo da influência da potência das resistências no consumo energético do sistema híbrido;
- Análise do consumo energético e comportamento dinâmico de diferentes sistemas de aquecimento de água.

Muitos sistemas residenciais estão sendo automatizados, mas até o momento não há nenhum sistema de baixo custo disponível no mercado que tenha o controle de temperatura e vazão. O sistema proposto neste trabalho atenderia essa demanda, entretanto ele ainda é um protótipo e deve ser aprimorado antes de ser comercializado em território nacional.

Os dois controles desenvolvidos para o sistema (função de otimização e algoritmo sub-ótimo) foram testados com sucesso no protótipo e a solução encontrada pode ser replicada em outras plantas de aquecimento de água. O fato do sistema híbrido ter duas fontes de calor (a resistência do chuveiro e a do boiler) que são controladas, aumenta o grau de liberdade do sistema. Consequentemente, é possível ter duas ou mais estratégias de controle diferentes e todas elas darem um resultado semelhante no que diz respeito ao seguimento da temperatura de referência. Entretanto deve ser avaliado o impacto que cada estratégia tem no consumo energético e optar por aquela que minimiza os gastos, que, nesse caso, é a priorização pelo uso da resistência do chuveiro. Por fim, o comportamento térmico de vários sistemas, sob diferentes condições climáticas, foi analisado e verificou-se que a solução encontrada era a mais sustentável e, a longo prazo, economicamente viável de ser implementada em residências.

Como contribuição para o estudo e desenvolvimento de soluções inovadoras no campo da energia solar, principalmente no que diz respeito ao aquecimento de água, este trabalho gerou as seguintes publicações:

- PASETTI, G. O.; NORMEY-RICO, J. E. Automation and Energy Optimization of a Domestic Solar Heating Unit. *Fifth International Renewable Energy Congress*. Hammamet - Tunisia, 2014.

- PASETTI, G. O.; NORMEY-RICO, J. E.; SARTORI, R. SANCHEZ, J. L. G. Redução do Consumo Energético em um Sistema Híbrido Automatizado para Aquecimento de Água. *V Congresso Brasileiro de Energia Solar*. Recife/PE - Brasil, 2014.
- PASETTI, G. O.; SILVA, A. O.; NORMEY-RICO, J. E. Automação e Aumento da Eficiência Energética de um Chuveiro Elétrico Integrado a uma Planta Solar. *12ª Semana de Ensino Pesquisa e Extensão (SEPEX)*. UFSC, Florianópolis/SC - Brasil, 2013.
- Material multimídia disponível em "<http://youtu.be/iHVDRiSM85c>".

6.2 DIRETRIZES PARA TRABALHOS FUTUROS

A utilização da energia solar em processos térmicos está crescendo cada vez mais, assim como a busca por soluções mais eficientes e com menor impacto ambiental. Pensando nisto, elaborou-se uma lista de possíveis temas de pesquisa a serem realizadas futuramente com o objetivo de aumentar a eficiência energética dos sistemas de aquecimento de água e também o conforto oferecido aos usuários, por meio da automação dos processos de aquecimento.

- Construir o protótipo apresentado neste trabalho em outras cidades e analisar o comportamento e eficiência do sistema em diferentes climas.
- Modificar a função de otimização considerando apenas a energia elétrica consumida nas resistências e o erro de seguimento a referência da vazão. A ponderação desses termos deveria priorizar a redução no consumo de energia, aceitando-se um erro maior no seguimento a referência da vazão. Nesse caso, o ponto de operação da temperatura do banho seria igual a referência definida pelo usuário.
- Substituir o chuveiro elétrico por um aquecedor a gás, visto que em muitos países estes equipamentos são mais comuns e econômicos que os chuveiros elétricos. Nesse caso, o controle do aquecimento final da temperatura do banho seria feito por meio do consumo de gás no aquecedor de passagem. O artigo (WANG; ZANG; NING, 2011) apresenta um exemplo de controle de temperatura aplicado a um aquecedor a gás.

- Aplicar o trabalho de Ormenese (2009) na planta híbrida, controlando assim a entrada de água fria no tanque de armazenamento para aumentar a eficiência energética do sistema.
- Criar uma estratégia de controle que faça a recirculação da água que fica parada na tubulação entre o boiler e o chuveiro, de tal forma que, quando o usuário for tomar banho, o sistema só permita a saída de água quando a água quente do boiler estiver disponível na entrada do chuveiro, evitando assim o uso da resistência elétrica nos primeiros segundos do banho.
- Desenvolver uma interface de comunicação do sistema híbrido com a internet, possibilitando que usuário insira ou altere os parâmetros de referência do banho fora de sua casa, por meio de um computador ou celular com acesso a internet.
- Estender a ideia do aquecimento solar integrado a um aquecedor de passagem aos processos fabris, aplicando uma função de otimização, semelhante a apresentada neste trabalho, para fazer o controle de todo o processo.

REFERÊNCIAS

ABNT. *NBR 7198- Projeto e execução de instalações prediais de água quente*. Rio de Janeiro, 1993. 1–6 p.

ALVARENGA, C. A. *Energia Solar*. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2001.

ANEEL. *Estrutura Tarifária para o Serviço de Distribuição de Energia Elétrica*. Brasília: Agência

Nacional de Energia Elétrica, 2010. 1–39 p. Disponível em:

<<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2010/120/documento/srd-aneel.pdf>>.

ARDUINO. *Arduino*. 2013. Disponível em:

<<http://www.arduino.cc/>>.

BADESCU, V. Optimal control of flow in solar collectors for maximum exergy extraction. *International journal of heat and mass transfer*, v. 50, n. 21-22, p. 4311–4322, out. 2007. ISSN 00179310. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0017931007002402> <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931007002402>>.

BOYD, S.; VANDENBERGHE, L. *Convex Optimization*.

Seventh. Cambridge University Press, 2009. 1–704 p.

ISSN 10556788. ISBN 9780521833783. Disponível em:

<http://www.stanford.edu/boyd/cvxbook/bv_cvxbook.pdf>.

BRUGNAGO, P. *Blumenau investe em energia solar*.

Blumenau: [s.n.], Março 2014. Disponível em:

<<http://www.clicrbs.com.br/jsc/sc/imprensa/4,186,4438929,23869>>.

CARVALHO, C. H. F. de. *Projeto de um Sistema de Aquecimento Solar de Água para Pousadas*. 1–55 p. Tese (Monografia de Pós-

graduação) — Universidade Federal de Lavras, 2005. Disponível em: <http://www.solenerg.com.br/files/monografia_carloshenrique.pdf>.

COELHO, A. A. R.; COELHO, L. d. S. *Identificação de Sistemas Dinâmicos Lineares*. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

COELHO, G. M. C.; BRISSON, E. R. *Controle de Temperatura de um Chuveiro com Aquecimento Solar e Elétrico*. 1–74 p. Tese (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade de São Paulo, 2011.

COLLE, S. et al. Cost optimization of low-cost solar domestic hot water systems assisted by electric energy. In: *ISES Solar World Congress 2003*. Göteborg/Sweden: [s.n.], 2003. p. 1–4. Disponível em: <https://www.lepten.ufsc.br/publicacoes/solar/eventos/2003/ISES2003/colle_salazar.pdf>.

CONTEMP. *Relé de Estado Sólido*. 2008. 1–2 p. Disponível em: <http://www.contemp.com.br/downloads/pdf/Manual_reli_1_2_SSR.pdf>.

CRESESB. *Potencial Energético Solar - Sundata*. 2013. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/sundata/index.php>>.

CUMULUS. *Manual de uso e instalação do sistema de aquecimento solar*. [S.l.], 2009. 1–31 p. Disponível em: <http://www.cumulus.com.br/br/imagens/produtos/solar_manual.pdf>.

CUNHA, A. F. Controle de SRC e TRIAC por Zero Crossing - Saber Eletrônica Online Controle de SRC e TRIAC por Zero Crossing Controle de SRC e TRIAC por Zero Crossing. *Eletrônica Total*, São Paulo, n. 126, p. 1–4, 2007. Disponível em: <<http://www.sabereletronica.com.br/artigos/945-controle-de-src-e-triac-por-zero-crossing>>.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. *Solar engineering of thermal processes*. 2. ed. New York, EUA: John Wiley & Sons, 1980. 1–919 p.

ELETROBRAS. *Avaliação do Mercado de Eficiência Energética do Brasil*. Rio de Janeiro: ELETROBRAS; PROCEL, 2009. 1–77 p.

ENERGIA, A. *São Paulo solar*. São Paulo: [s.n.], Abril 2013. Disponível em: <<https://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2013/04/sao-paulo-solar/22499>>.

ENERGIA, J. da. *Ritmo de crescimento das renováveis será 60 % maior entre 2011 e 2017*. São Paulo: [s.n.], Julho 2012. Disponível em: <http://www.jornaldaenergia.com.br/ler_noticia.php?id_noticia=10428&id_secao=2>.

EPE. *Balanço energético nacional 2013*. Rio de Janeiro, 2013. 1–55 p. Disponível em: <[https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese do Relat%C3%B3rio Final_2013_Web.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final%202013-Web.pdf)>.

EPE. Consumo de Eletricidade aumenta 3,5% em 2013. *Resenha Mensal do Mercado de Energia Elétrica*, Ano VII, n. Número 76, p. 1, 2014. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/ResenhaMensal/20140129_1.pdf>.

FLORIO, J. a. L. *Sistema de Monitoração e Controle para Aquecedor Solar*. 1–61 p. Tese (Dissertação de Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, 2010. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=000774754>>.

GOULART, S. V. G.; LAMBERTS, R.; FIRMINO, S. *Dados Climáticos para Projeto e Avaliação Energética de Edificações para 14 Cidades Brasileiras*. 2. ed. Florianópolis: Núcleo de Pesquisa em Construção/UFSC, 1998. 1–345 p.

INMETRO. *Tabela de Consumo de Energia Elétrica-Chuveiros Elétricos*. 2014. 1–5 p. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/chuveiro.pdf>>.

INPE. *Radiação Solar e Terrestre*. 2014. Disponível em: <satelite.cptec.inpe.br/radiacao/>.

IPCC. Technical Summary. In: CAMBRIDGE UNIVERSITY. *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. Cambridge, Inglaterra: Cambridge University Press, 2011. p. 27–160. ISBN 978-1-107-60710-1. Disponível em: <http://srren.ipcc-wg3.de/report/IPCC_SRREN_Full_Report.pdf>.

KALOGIROU, S. A. *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. 1. ed. EUA: Academic Press, Elsevier, 2009. 1–760 p. ISBN 978-0-12-374501-9.

KJELLSSON, E.; HELLSTRÖM, G.; PERERS, B. Optimization of systems with the combination of ground-source heat pump and solar collectors in dwellings. *Energy*, v. 35, n. 6, p. 2667–2673, Junho 2010. ISSN 03605442. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S036054420900108X>>.

LIMA, J. B. A. *Otimização de Sistema de Aquecimento Solar de Água em Edificações Residenciais Unifamiliares Utilizando o Programa TRNSYS*. Tese (Dissertação de Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2003. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-03032004-153752/pt-br.php>>.

MACETI, H.; LEVADA, C. L.; LAUTENSCHLEGUER, I. J. Ciência e cotidiano: A Física do chuveiro elétrico. *Scientia Plena*, v. 3, n. 8, p. 313–318, 2011. Disponível em: <<http://www.scientiaplenu.org.br/ojs/index.php/sp/article/view/607>>.

MEDEIROS, M. et al. Optimizing a mixed water heating system (solar and electric) for rural areas. *Acta Scientiarum. Technology*, v. 35, n. 1, p. 69–74, Janeiro 2013. ISSN 1807-8664. Disponível em: <<http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciTechnol/article/view/11998>>.

MEKHILEF, S. et al. Solar energy in Malaysia: Current state and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier Ltd, v. 16, n. 1, p. 386–396, Janeiro 2012. ISSN 13640321. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032111004138>>.

Ministério do Planejamento. *Energia solar faz bem para o bolso do consumidor e do governo*. 2011. Disponível em: <<http://www.pac.gov.br/noticia/2d5fba0b>>.

Ministério do Planejamento. *Minha Casa , Minha Vida 2 investe em energia solar*. 2011. Disponível em: <<http://www.pac.gov.br/noticia/3fccf547>>.

Ministério do Planejamento. *Você sabia?* 2011. Disponível em: <<http://www.pac.gov.br/noticia/e529e498>>.

MME. *Plano Nacional de Eficiência Energética*. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2011. 1–136 p. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/PlanoNacEfiEnergetica.pdf>>.

MORAES, F. *Energias renováveis : alternativa para salvar o planeta*. Maio 2011. Disponível em: <<http://www.oeco.com.br/reportagens/25074-energias-renovaveis-alternativa-para-salvar-o-planeta>>.

NUNEZ-REYES, A.; BORDONS, C. Predictive control of a solar air conditioning plant with simultaneous identification. In: *44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference 2005*. Seville, Espanha: IEEE, 2005. p. 1355–1360. ISBN 0780395689. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs.all.jsp?arnumber=1582347>>.

ORMENESE, M. *Controlador fuzzy para otimização de sistemas de aquecimento de água com coletores solares*. 65 p. Tese (Dissertação de Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, 2009. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=000469096>>.

PASSOS, L. A. d. A. *Cenários Econômicos de Impacto da Energia Solar para Aquecimento de Água Doméstico no Extrato*

de Consumidores de Baixa Renda Usuários de Chuveiros Elétricos no Brasil. 1–110 p. Tese (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2011. Disponível em: <http://www.lepten.ufsc.br/producao/diss_luigi.pdf>.

PAULO, C. M. d. S. a. *Projetos preveem eficiência energética e mais iluminação em SP*. São Paulo: [s.n.], Fevereiro 2014. Disponível em: <http://www.camara.sp.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&preveem-eficiencia-energetica-e-mais-iluminacao-publica-em-sp&catid=159:especiais&Itemid=65>.

PENTEADO, J. a. G.; PILATTI, L. A.; PEDROSO, B. Construção de um sistema de aquecimento solar de água integrado a um sistema de aquecimento a gás. In: *Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais*. Ponta Grossa: Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2008. p. 1–8. Disponível em: <http://www.4eetcg.uepg.br/oral/30_1.pdf>.

PILATTI, L. A. D. *Controle da Temperatura e Vazão de um Chuveiro Usando Lógica Fuzzy*. 1–88 p. Tese (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012. Disponível em: <https://www.academia.edu/5086238/Controle_da_Temperatura_e_Vazao_de_um>

POZZEBON, F. B. *Aperfeiçoamento de um Programa de Simulação Computacional para Análise de Sistemas Térmicos de Aquecimento de Água por Energia Solar*. 1–113 p. Tese (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/16305>>.

RC, L. P. *Servo Moxie M38-360*. 2013. Disponível em: <http://www.lowpricer.com/product_info.php?products_id=745>.

REN21. *Renewables 2012: Global Status Report*. Paris, França: REN21 Secretariat, 2012. 1–172 p. Disponível em: <http://www.map.ren21.net/GSR/GSR2012_low.pdf>.

REYES, A. Núñez et al. A Smith predictive based MPC in a solar air conditioning plant. *Journal of Process Control*, v. 15, n. 1, p. 1–10, Fevereiro 2005. ISSN 09591524. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959152404000575>>.

SALAZAR, J. P. C. et al. Optimization of a compact solar domestic hot water system for low-income families with peak

demand and total cost constraints. In: *ISES Solar World Congress 2003*. Göteborg/Sweden: [s.n.], 2003. p. 1–6. Disponível em: <https://www.labsolar.ufsc.br/publicacoes/solar/eventos/2003/ISES2003/salazar_abreu.pdf>.

SEDEIS, A. *AgeRio financia projetos de eficiência energética*. Rio de Janeiro: [s.n.], Dezembro 2013. Disponível em: <<http://tnpetroleo.com.br/noticia/agerio-financia-projetos-de-eficiencia-energetica/>>.

SEGUNDO, U. *Ciência Energia solar cresceu 75 % em 2010 na Alemanha*. Março 2011. Disponível em: <<http://ultimosegundo.ig.com.br/ciencia/meioambiente/energia+solar+cresceu+75+>>

SEMICONDUCTOR, D. *DS18B20 Temperature Sensor*. Dallas Semiconductor, 2002. 1–27 p. Disponível em: <<http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>>.

SMITH, C. C.; WEISS, T. A. Design application of the Hottel-Whillier-Bliss equation. *Solar Energy*, v. 19, p. 109–113, 1977. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X77900470>>.

SOBRINO, L. R. *Contribuciones al Modelado y Control de una Planta de Desalación Solar*. 1–207 p. Tese (Tese de Doutorado) — Universidad de Almería, 2009.

SONNTAG, C.; DING, H.; ENGELL, S. Supervisory Control of a Solar Air Conditioning Plant with Hybrid Dynamics. *European Journal of Control*, v. 6, p. 451–463, 2008.

STINE, W. B.; GEYER, M. The Sun's Energy. In: *Power From The Sun*. Pomona, EUA: California State Polytechnic University, 2011. cap. 2, p. 1–27. Disponível em: <<http://www.powerfromthesun.net/Book/chapter02/chapter02.html>>.

STUDIO, S. *SEN02141B Water Flow Sensor*. Seeed Studio, 2013. Disponível em: <http://www.seeedstudio.com/wiki/G3/4_Water_Flow_sensor>.

TECHNOLOGIES, S. *Light Dependent Resistor - LDR*. Sunrom Technologies, 2008. 1–4 p. Disponível em: <<http://www.sunrom.com/media/files/p/54/3190-datasheet.pdf>>.

UNEP. *Global Trends in Renewable Energy Investment 2013*. Frankfurt am Main: Frankfurt School, 2013. 1–84 p. Disponível em: <<http://www.unep.org/pdf/GTR-UNEP-FS-BNEF2.pdf>>.

VIZEU, R. *Chuveiro elétrico consome mais energia, mas gasta menos água*. São Paulo: [s.n.], Abril 2009. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/folha/dinheiro/ult91u551959.shtml>>.

WANG, L.; ZANG, H.; NING, Y. The gas water heater control system design based on fuzzy control. *2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering*, Ieee, p. 840–843, Abril 2011. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5778171>>.