

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

HENRIQUE DOS SANTOS CARMINATTI

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA INTELIGENTE DE AQUECIMENTO
SOLAR DE ÁGUA DOMÉSTICO

ORIENTADOR: SERGIO COLLE

FLORIANÓPOLIS

2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

HENRIQUE DOS SANTOS CARMINATTI

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA INTELIGENTE DE AQUECIMENTO
SOLAR DE ÁGUA DOMÉSTICO, ANÁLISE ECONÔMICA E VIABILIDADE TÉCNICA

PROJETO DE DISSERTAÇÃO DE
MESTRADO SUBMETIDO AO PROGRAMA
DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DE SANTA CATARINA PARA
OBTENÇÃO DA QUALIFICAÇÃO.

ORIENTADOR: SERGIO COLLE

FLORIANÓPOLIS

2014

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	4
OBJETIVOS.....	4
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
Previsão meteorológica em Sistema de Aquecimento solar Água Doméstico.....	6
Grunenfelder, W.J. e Todtli J. - 1985	6
Prud'homme,T. e Gillet, T. - 2001	7
Colle, S.; Starke, A.R.; Passos, L.A.A.; Veiga, C.E. - 2010.....	7
Koller, T. - 2012.....	8
Carminatti, H.S. - 2014	8
APARATO EXPERIMENTAL.....	9
METODOLOGIA.....	10
REFERÊNCIAS.....	11
APÊNDICE: CRONOGRAMA DE ATIVIDADES.....	13

INTRODUÇÃO

Os trabalhos recentes no tocante a energia solar apontam indiscutivelmente para a direção de sistemas inteligentes. O avanço tecnológico dos micro-computadores conectados a *internet* dá-nos subsídios para uso de dados meteorológicos em tais sistemas de controle.

Muitos são os fatores que clamam para o uso de algoritmos de previsão meteorológica, no controle térmico e geração de energia. Seja devido a variabilidade de produção de energia por aerogeradores ou por painéis solares, seja devido ao perfil de consumo diferenciado para cada hora do dia, fazer uso de previsão meteorológica em busca do menor custo e gasto possível de energia é presentemente oportuno e necessário.

No âmbito nacional, a criação da tarifa branca já aponta para a necessidade de deslocar o pico de demanda de energia elétrica, ainda mais se levarmos em consideração a quantidade de chuveiros elétricos em uso no Brasil. O chuveiro como aquecedor de passagem é presente em aproximadamente 73% das residências do país. O uso desse dispositivo é a principal causa do pico de demanda de energia elétrica residencial no período compreendido entre 18 e 21 horas.

O consumo de energia de chuveiros chega a 43% da energia consumida no pico de demanda. Esse pico traz grandes problemas não só para o consumidor, mas também ao setor elétrico nacional. Estima-se que esse deve reservar cerca de 4 GW para suprir essa demanda. Essa demanda também causa problemas na distribuição de energia devido a sobrecarga nos cabos, o que implica em um superdimensionamento da rede. Sendo assim são necessários estudos que proporcionem alternativas a fim de economizar e utilizar a energia disponível de maneira racional.

OBJETIVOS

O presente projeto tem pois o objetivo principal testar experimentalmente um sistema inteligente de aquecimento de água doméstico. A bancada de testes, está sendo construída, no espaço do terraço do LEPTEN no bloco A do departamento de Engenharia Mecânica.

Desde a concepção inicial de projeto até o presente protótipo muitos trabalhos antevieram e formaram sua base. Cita-se nesse contexto os trabalhos de: Thomas Koller [4], Luigi Passos [6], Colle et al. [3] e o trabalho de conclusão de curso do autor deste projeto [13]. Nesta dissertação de mestrado será analisada a real eficiência do sistema através de norma

ISO 9459-5 em comparação com um sistema de aquecimento solar de água doméstico (SASAD) padrão. Em conjunto a essa experimentação a simulação numérica será validada. Além disso, modificações serão realizadas na simulação feita no *software* TRNSYS com objetivo de reduzir o tempo de processamento.

A seguir são discriminadas as metas do projeto::

- Construir bancada de testes de sistema de aquecimento solar de água doméstico.
- Testar a eficiência do sistema em comparação com SASAD padrão através da norma ISO 9459-5.
- Validar a simulação numérica através de testes de bancada.
- Modificar a simulação feita em TRNSYS buscando reduzir tempo de processamento.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente projeto de dissertação de mestrado toma como base TCC do mesmo autor o qual realizou a simulação numérica do sistema a ser testado experimentalmente. Outros trabalhos pertinentes ao tópico encontrados recentemente também serão adicionados nessa seção.

Previsão meteorológica em Sistema de Aquecimento solar Água Doméstico

Grunenfelder, W.J. e Todtli J. - 1985

Segundo Pichler et al [14] o trabalho de Grunenfelder e Todtli [5] é o mais antigo dentre os que estudam o uso de dados meteorológicos no controle de sistemas de aquecimento de água doméstico.

O trabalho apresentado na Melecon 85 utiliza um sistema simples de tanque único com aquecimento por meio de uma resistência elétrica. Nele são comparados seis tipos diferentes de controle conforme segue:

- 1- Utiliza previsão meteorológica oficial do SMI (*Swiss Meteorological Institute*);
- 2- Utiliza um controle que prediz que os dados meteorológicos do dia por vir serão os mesmos que os do dia atual, ou seja, utiliza dados meteorológicos, de consumo e perdas do dia anterior;
- 3- A partir de uma série de dados (1963-1972) classifica a quantidade de energia recebida no coletor no dia atual entre 4 parâmetros assim prediz o controle de aquecimento para o dia seguinte;
- 4- Utiliza dados previsão de preço de energia elétrica para o dia seguinte em conjunto com a energia absorvida no coletor no dia atual para obter um controle de aquecimento para o dia seguinte;
- 5- Utiliza um algoritmo de programação dinâmica para obter o controle do aquecimento auxiliar para o dia seguinte;
- 6- O controle é fixo e parametrizado utilizando a série de dados meteorológicos entre 1963 e 1972.

Concluiu-se que a performance do sistema depende do volume do tanque. Mas em todas as simulações os sistemas de controle que utilizavam dados meteorológicos foram melhores que o sistema com parametrização fixa.

Prud'homme, T. e Gillet, T. - 2001

O trabalho apresenta uma estratégia de controle baseada em previsão meteorológica e de consumo do usuário. O sistema faz uso de um coletor solar em circuito fechado e, portanto, destaca um trocador de calor para transferir energia do circuito do coletor para o boiler. Por ser vertical, no tanque ocorre estratificação intensa. Tais sistemas com trocador de calor e tanque vertical são típicos de regiões frias para suprir tanto água quente para banho como para o aquecimento de ambientes. O sistema utiliza também um aquecedor auxiliar segmentado com o objetivo de viabilizar a maior estratificação.

O controle de temperatura do tanque é baseado na minimização de uma função que pondera o consumo de energia elétrica e o conforto do usuário para cada dia. Em tal função, contudo, não é levado em consideração os diferentes preços de energia entre o dia e a noite. Para considerar o consumo de energia, a função minimizada, utiliza dados meteorológicos do SMI (Swiss Meteorological Institute) para os dois dias seguintes. Enquanto que, para prever o perfil de consumo, é feita uma média de uso de água dos mesmos dias da semana para os últimos dois meses e aplicado um filtro de Kalman para obter valores futuros de consumo.

Foram feitos dois tipos de simulação, uma diária e outra para 28 dias. Como resultado os autores apresentam que, utilizando a abordagem de controle sugerida, não é necessário manter os aquecedores auxiliares ligados continuamente, mas sim num sistema *on/off*. Assim o aquecimento auxiliar é somente ligado momentos antes de se consumir a demanda de água quente para aquela hora. E, portanto, é possível manter o reservatório a uma temperatura mais baixa durante o dia, diminuindo a perda térmica. Tal fato, segundo os autores, foi o principal elemento para se aumentar a fração solar no sistema. Os autores ressaltam que os resultados foram de simulação e não experimentais, concluindo que mais estudos devem ser feitos para garantir a eficiência do sistema.

Os autores ainda explicam que, em se tratando de aplicações comerciais, pode ser difícil obter informações de previsão meteorológica para cada SASAD separadamente. Além disso, a estratégia de controle depende da resolução de uma otimização complexa utilizando de capacidade de computação significativa.

Colle, S.; Starke, A.R.; Passos, L.A.A.; Veiga, C.E. - 2010

Nesse trabalho é apresentado o argumento de que o aquecedor solar convencional - proposto como solução no Brasil para desagregar ou reduzir totalmente o pico de demanda

de chuveiros elétricos - não é uma solução efetiva, uma vez que o perfil de demanda de energia dos chuveiros permanece virtualmente inalterado, sempre que ciclos climáticos desfavoráveis se repetirem. Propôs-se, assim, um sistema de aquecimento solar cuja energia auxiliar é controlada, de modo que a água quente seja reservada nas primeiras horas da manhã, quando a tarifa de energia elétrica atingiria seu mínimo, na circunstância de um mercado efetivamente regulado. O trabalho aborda também a otimização do isolamento térmico de reservatórios, para diferentes concepções e modalidades de operação do sistema de aquecimento solar.

Koller, T. - 2012

O autor abordou as simulações numéricas do sistema anteriormente concebido por Colle et al. [3], implementando um algoritmo no *software* TRNSYS. Apresentou uma estratégia de controle do pré-aquecimento do tanque auxiliar sem a necessidade de previsão meteorológica diretamente. Tal controle utilizava apenas os dados obtidos do reservatório, do consumo e da radiação do dia anterior como dados de entrada para o controle de pré-aquecimento do dia presente. Como resultado obteve fração solar de 64,69% para Florianópolis. Além disso analisou a redução no pico de demanda de energia elétrica comparando com um sistema de aquecimento solar simples (sem o tanque de *backup*) com resultados de 99,8% de redução do pico para o sistema inteligente, e 85,4% de redução do pico para o sistema simples.

Carminatti, H.S. - 2014

Este autor continuou o estudo do sistema duplo tanque iniciado por Thomas Koller [4]. O autor modificou o algoritmo buscando maior velocidade de simulação e assim mudou também o sistema de controle para calcular, não uma temperatura de parametrização - conforme Koller [4] -, mas uma quantidade e calor necessária para aquecimento do tanque auxiliar para o dia. Além disso, realizou testes com relação aos efeitos de possíveis erros de previsão meteorológica. Nesse sentido, utilizou um gerador de ruídos modificando os valores de previsão de radiação solar incidente os quais são empregados no controle de pré-aquecimento do tanque de *backup*. Como resultados obteve para um sistema ideal - sem erros na previsão meteorológica - a fração solar de 87%. Enquanto que para o pior caso simulado - com previsão meteorológica superestimando a radiação solar em 100% - a fração solar do sistema ficou em 75% aproximadamente. Nesse caso 57% da demanda de energia elétrica da casa está concentrada entre às 4 e às 6 horas, longe do pico das 18 às 21 horas.

APARATO EXPERIMENTAL

Em busca de validar a simulação numérica e poder criar um algoritmo de controle eficaz, faz-se necessário uma análise experimental em bancada. Os dados obtidos nessa fase serão confrontados com os dados simulados em busca de melhorar a sua representatividade.

A bancada de testes que vem sendo contruída no terraço do Bloco A é dotado dos seguintes equipamentos.

- Estrutura de Aço inoxidável de 4 mm de largura.
- Placas de 1 m² da Jellyfish de alto desempenho para cada estrutura
- *Boilers* da SolarCamp: um de 130 litros, denominado tanque do coletor, outro de 70 litros, denominado tanque de *backup* e mais um de 200 litros para o segundo sistema.
- No tanque de backup e no tanque do sistema simples estão instaladas resistências elétricas de 1500 Watts.
- Um pireliômetros da Kipp & Zonen modelo CMP 11 já disponível no laboratório.
- 7 transdutores de temperatura do tipo PT-100 já disponíveis no laboratório.
- Uma válvula solenóide Danfoss para controle de descarga.
- Aquisição de dados com sistema Hp agilent modelo 34970A.

A figura 1 mostra a bancada em construção.

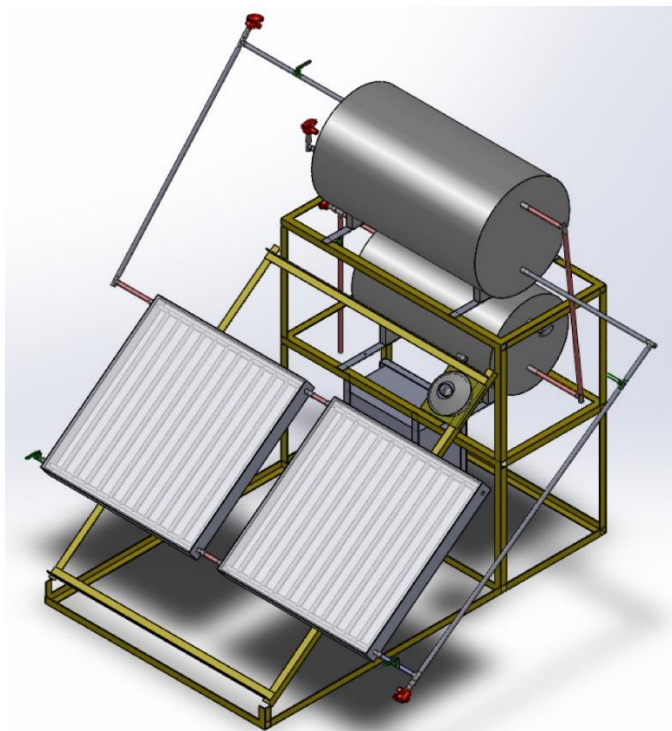


Figura 1 - Bancada experimental: duplo tanque

METODOLOGIA

No âmbito de sistemas de aquecimento solar de água doméstico com duplo tanque pouco foi feito no que diz respeito a experimentação. Em geral os trabalhos se valem da simulação numérica para testar e comparar certos sistemas de controle. Conforme já apresentado esse não será o método deste trabalho. Serão dois tipos de experimentos para o sistema. Um utilizando a norma ISO 9459-5 de 2007 e outro visando a validação dos resultados da simulação. A norma ISO ainda será comprada conforme pode ser analisado no cronograma de atividades a seguir. Se possível, o teste de eficiência dos sistema(ISO 9459-5) e a validação serão feitas concomitantemente.

Para a validação da simulação pretende-se submeter a bancada a um experimento de longa duração (também conforme cronograma). Para isso, a bancada e a simulação em TRNSYS receberão um perfil de consumo diário, controle de aquecimento de *backup* e variáveis meteorológicas iguais. Portanto, será possível comparar os resultados. Pode-se utilizar os mesmos dados meteorológicos uma vez que há um pireliômetro montado na própria estrutura da bancada e também utilizar-se-á os dados da estação meteorológica BSRN. Tal estação é mantida pelo LEPTEN, mesmo laboratório onde ficarão as bancadas de testes.

Além desta norma, tem-se como base o trabalho de Wet e Gauché [8], no qual apresentam uma bancada de testes de sistemas de aquecimento solar de água doméstico na Universidade de Stellenbosch na África do Sul.

Nesse sentido o presente trabalho conseguirá analisar o SASAD duplo tanque como um todo. Desde o a simulação numérica até a validação experimental.

REFERÊNCIAS

- [1] DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 3^a ed. New Jersey: John Wiley and Sons, 2006
- [2] KLEIN, S.; ALVARADO, F. **TRNSYS: A Transient Systems Simulation Program**. [S.l.]: Madison, Wisconsin: Solar Energy Laboratory, 2010.
- [3] COLLE, Sérgio, STARKE, Allan R., PASSOS, Luigi, VEIGA, Carlos E.. **Uma Análise de Sistemas de Aquecimento Solar de Água para Uso Doméstico no Brasil**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 3., 2010, Belém, 2010.
- [4] KOLLER, T. **Simulation and Performance analysis of a solar domestic hot water system controlled by weather forecast information**. 2012. 89 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Centro Tecnológico, Technische Universität München, Florianópolis, 2012.
- [5] GRÜNENFELDER, Walter J.; TÖDTLI, Jürg. **The Use of Weather Predictions and Dynamic Programming in the Control of Solar Domestic Hot Water Systems**. Melecon. Madrid, p. 1-11. 9 out. 1985
- [6] PASSOS, Luigi. **Um Estudo Sobre Impactos Técnicos e Econômicos da Agregação do Aquecimento Solar de Água nos Domicílios Brasileiros**. 2011. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.
- [7] T.PRUD'HOMME; GILLET, D.. **Advanced Control Strategy of a Solar Domestic Hot Water System With a Segmented Auxiliary Heater**. *Energy And Building, Lausanne*, v. 1, n. 33, p.463-475, jan. 2001.
- [8] SALAZAR, Juan Pablo de Lima Costa; ABREU, Samuel Luna de; COLLE, Sérgio. **Energy Conservation and Electric Energy Peak Reduction Potential During Peak Hours for a Group of Low-Income Residential Consumers of a Brazilian Utility**. In: ISES, 2005, Orlando.
- [9] BORGES, Thomaz P.f.; COLLE, Sérgio; WENDEL, Marcelo. **Multiobjective Optimization as a Decision Tool for Financing or Rebating Domestic Solar Water Heaters**. In: ISES, 2005, Orlando 2005.

- [10] ALMEIDA, Mauro Araujo; SCHAEFFER, Roberto; LAROVERE, **Emilio Lèbre**. **The Potential for Electricity Conservation and Peak Load Reduction in the Residential Sector of Brazil**. Energy, Rio de Janeiro, n. 26, p.413-429, out. 2001.
- [11] GIGLIO, Thalita; LAMBERTS, Roberto; BARBOSA, Miriam; URBANO, Mariana. **A procedure for Analysing Energy Savings in Multiple Small Solar Water Heaters in Low-Income Housing in Brazil**. Energy Policy. p. 43-55. 2014.
- [12] KABLAN, M.M. **Forecasting the Demand on Solar Water Heating Systems and Their Energy Savings Potential During the Period 2001-2005 in Jordan**. Energy: Conversion & Management. Al-karak, p. 2027-2036. set. 2002.
- [13] CARMINATTI, Henrique S. **Análise dos Efeitos dos Erros da Previsão Meteorológica em um Sistema de Aquecimento de Água Doméstico com Duplo Tanque e com Sistema de Controle de Pré-Aquecimento**. 2014. 56 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.
- [14] PICHLER, Martin F.; LERCH, Werner; HEINZ, Andreas; GOERTLER, Gregor; SCHRANZHOFER, Hermann, RIEBERER, René. **A Novel Linear Predictive Control Approach for Auxiliary Energy Supply to a Solar Thermal Combistorage**. Solar Energy Graz, Austria, n. 101, p. 203-219. 2014.

APÊNDICE: CRONOGRAMA DE ATIVIDADES