VINICIUS GRAVINA DA ROCHA

DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE COLETORES SOLAR PARA ÁGUA DE BANHOS EM POSTOS DE COMBUSTÍVEL E COMPARAÇÃO DE CUSTOS E EFICIÊNCIAS DE SISTEMAS ELÉTRICOS E DIESEL

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Porto Alegre
2009

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE COLETORES SOLAR PARA ÁGUA DE BANHOS EM POSTOS DE COMBUSTÍVEL E COMPARAÇÃO DE CUSTOS E EFICIÊNCIAS DE SISTEMAS ELÉTRICOS E DIESEL

VINICIUS GRAVINA DA ROCHA

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
ENGENHEIRO(A) MECÂNICO(A)
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Walter Jesus Paucar Casas
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Sérgio Viçosa Möller
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. Flávio Tadeu van der Laan
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. Sérgio Luiz Frey
UFRGS / DEMEC

Porto Alegre
2009

AGRADECIMENTOS

Gostaria de de agradacer primeiramente ao meu orientador Prof. Dr. Paulo Smith Schneider pela oportunidade de realizar este trabalho e por todo apoio,

Ao Ilo Hoffman também pelo apoio e conversas inspiradoras,

Aos meus ex-colegas do banco J. P. Morgan, principalmente meu supervisor André Baggio que foi e é fonte de muita inspiração. Ao Luiz Henrique Estima, Natan Epstein e Felipe Simch por todas experiências e conhecimentos trocados, que, embora não evidente, estão muito presentes ao longo de todo este trabalho,

Ao Fernando Sehn e Guilherme Garcez Cabral pelas discussões que muito contribuiram nas análises financeiras,

Aos meus pais Maria Alice Gravina e Luiz Fernando Carvalho da Rocha por toda dedicação e cuidado ao longo da minha vida em me motivar e prover as melhores fontes de conhecimento, estudo e informação,

A todos estes, meus sinceros agradecimentos pelas inúmeras conversas que, além de construtiva, muitas foram profundas

Este trabalho contou com apoio e financiamento das seguintes entidades:
-Empresa Nossa Ducha Indústria & Comércio Ltda.
-Chamada pública MCT/SEBRAE/FINEP/Ação Transversal 04/2007 - APLs, projeto: Desenvolvimento de ducha “miniboiler” elétrico de instalação direta no banheiro integrado com sistema solar.

ROCHA, V. G. **Dimensionamento de sistemas de coletores solar para água de banhos em postos de combustível e comparação de custos e eficiências de sistemas elétricos e diesel**. 2009. 20f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

RESUMO

Este trabalho trata do dimensionamento e comparação de 4 sistemas de coletores solar térmico para o aquecimento de água para banhos em um posto de combustivel no município de São Sepé, próximo a Santa Maria (Latitude 30ºS), Brasil. A demanda de água quente destes banhos é estimada em 2.000L a 50ºC, sendo aquecida por um sistema de acumulação diesel, já disponível no posto, de 1.000L com 50kW. É considerado que este sistema é custo afundado, que os coletores instalados são de classe "A" do Inmetro, a taxa de desconto nas análises é de 7,5% e, por desconhecer o regime tributário em questão, os efeitos de impostos e depreciação não impactam o fluxo de caixa. Os sistemas dimensionados são de acumulação solar em 2.000L com aquecimento elétrico de passagem; coletores solar e queimador diesel ligados no mesmo reservatório de 2000L; dois reservatórios interligados em série, o primeiro com 1.000L, ligado aos coletores, cuja saída é ligada na entrada de um segundo de 1.000L, onde está ligado o queimador diesel. O último sistema é semelhante ao anterior, com a diferença no volume do reservatório ligado aos coletores que aumenta para 2.000L. O primeiro sistema apresenta tempo de retorno superior a 20 anos e uma taxa interna de retorno máxima de 3.7% para 40m^2 de área coletora, inferior a taxa mínima de atratividade de 7.5%, devido principalmente a maiores custo de energia elétrica em relação ao diesel. O segundo sistema apresenta baixíssimo rendimento energético com um Fator F de 0,05 para 50m^2 contra 0,76 do anterior para uma mesma área coletora; por isso não é feita sua análise financeira. O terceiro e quarto sistemas apresentam taxas de retorno de 18,9% para 15m^2, com retorno em 6 anos e 20,4% para 20m^2, também em 6 anos.

PALAVRAS-CHAVE: instalação solar térmica, coletor solar, dimensionamento, análise econômica, financeira, banho, posto de combustível

ROCHA, V. G. **Design of solar collectors systems for heating shower water on gas stations and comparison of costs and efficiencies with electrical and diesel systems**. 2009. 20f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

ABSTRACT

This study is about the design and comparison of 4 solar thermal collectors systems for heating shower water on a gas stations in the town of São Sepé, near Santa Maria (Latitude: 30°S), Brazil. The hot water load is estimated at 2.000L at 50°C, being heated by a diesel burner accumulating system already available on the station, with 1.000L and 50kW. On the analysis it's considered that this heating system is a sunk cost, the flat plates collectors are "A" grade according to the Inmetro scale, the discount rate is 7,5% and, as the tax regime is unknown, taxes and depreciation do not impact the cash flow. The designed systems are solar accumulation on a 2.000L reservoir with electrical heating; collectors and diesel burner connected to the same 2.000L reservoir; two reservoirs connected in series: the first with 1.000L, in parallel with the collectors, whose exit is connected to the inlet of the second one with 1.000L, on which is attached the diesel heater. The last system is similar to this previous one; the difference is the solar collector reservoir, which is changed to 2.000L. The first system presents a payback time superior to 20 years with a maximal internal rate of return of 3.7% for 40m^2 of collector area, below the hurdle rate; this is mainly due to the higher costs of electrical energy than diesel. The second system presented a very low energetic performance, with an F factor of 0.05 for 50m^2 vs. 0.76 for the previous system with the same collector area; for this reason, no financial analysis was made for this system. The third and forth system presented an internal rate of return of 18.9% for 15m^2, with a payback time of 6 years and 20.4% for 20m^2, also in 6 years.

KEYWORDS: thermal solar installation, solar collectors system, design, economic analysis, financial analysis, shower, gas station

SUMÁRIO

RESUMO **V**
1. INTRODUÇÃO **8**
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **8**
3. FUNDAMENTACAO TEÓRICA **8**
3.1. ELEMENTOS DO SISTEMA SOLAR DE AQUECIMENTO DE ÁGUA 8
3.3. SOFTWARE TRNSYS V15 2
3.4. INDICADORES FINANCEIROS 3
4. DESENVOLVIMENTO **4**
4.1. DADOS CLIMÁTICOS 4
4.2. CARACTERÍSTICAS DOS BANHOS 6
4.3. VAZÃO DE ÁGUA QUENTE PARA OS BANHOS 7
4.4. MASSA DE ÁGUA ARMAZENADA NO RESERVATÓRIO 8
4.5. COLETORES SOLAR 9
4.6. SISTEMAS SIMULADOS 9
4.7. PREMISSAS FINANCEIRAS 11
5. RESULTADOS **12**
5.1. ANÁLISE TÉCNICA 12
5.1.1. Aquecedor Por Passagem 12
5.1.2. Queimador e Solar no Mesmo Reservatorio 12
5.1.3. Queimador e Solar (1.000L) em Reservatórios Diferentes 12
5.1.4. Queimador e Solar (2.000L) em Reservatórios Diferentes 13
5.1.5. Comparativo dos Sistemas 13
5.2. ANÁLISE FINANCEIRA 14
6. CONCLUSÕES **15**
REFERÊNCIAS **16**
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA **16**
APÊNDICES **17**

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, questionamentos vem surgido sobre uso, disponibilidade e a forma como a energia tem sido utilizada no mundo. Destas energias, uma das mais importante na nossa sociedade é a elétrica, que do ponto de vista exergético muitas vezes é mal aproveitada.

A energia elétrica é gerada em equipamentos que consomem grandes quantidades de energia, transmitida por longas distâncias com perda, para finalmente chegar aos consumidores. Em muitos casos, depois de todo este percurso, esta energia é simplesmente transformada em calor, como por exemplo em chuveiros elétricos muito difundidos no Brasil. Ela poderia ser utilizada para outros fins, mais nobres, como movimentação de motores, soldagens, telecomunicações ente outros.

Uma alternativa para suprir esta demanda por calor é a energia solar. Porém, ela ainda sofre muitas barreiras, principalmente em relação aos custo e retornos envolvidos, sendo estes seguidamente questionados. Um sistema que não se mostre rentável, dificilmente será aceito pelo mercado. Assim, o objetivo deste trabalho e fazer um análise destes sistemas, tanto do ponto de vista técnico, como do ponto de vista financeiro, afim obter uma visão aprofundada destes diferentes aspectos.

O caso analisado neste trabalho surgiu do desejo de duas empresas de instalar um sistema de aquecimento solar para a água de banho em postos de combustível. Nestes postos, o volume de água quente consumido para banho é relativamente importante, uma vez que muitos motoristas de caminhão tomam seus banhos quando param para abastecer ou reparar seus veículos. O posto em questão é localizado no município de São Sepé, próximo a Santa Maria, por onde passam diversas cargas de colheitas, carne e leite

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Godois (2008) dimensionou e simulou em TRNSYS e F-chart uma instalação solar de domicílio, com fonte de aquecimento complementar a gás e fez uma análise financeira. Foi obtido um tempo de retorno de 18 anos, sendo considerado econômicamente inviável. Schmitt (2007) estudou o sistema numa instalação de maior porte, também no TRNSYS, com aproximadamente 160 moradores. A energia complementar foi elétrica, sendo obtido um tempo de retorno de 7 anos. Chung et al (1997) dimensionaram e simularam em TRNSYS um sistema de maior porte com área coletora de 184m^2 e volume de armazenamento de 600m^3, sendo o tempo de retorno estimado entre 25 a 30 anos.

3. FUNDAMENTACAO TEÓRICA

3.1. Elementos do sistema de coletores solar de aquecimento de água

Existem diversos tipos de sistemas de coletores solares térmicos de baixa temperatura, sendo o aberto de circulação forçada o modelo base deste trabalho. Este sistema dispõe basicamente de 4 componentes: coletores, reservatório, bomba e aquecimento auxiliar, sendo estes ilustrados na Figura 1.

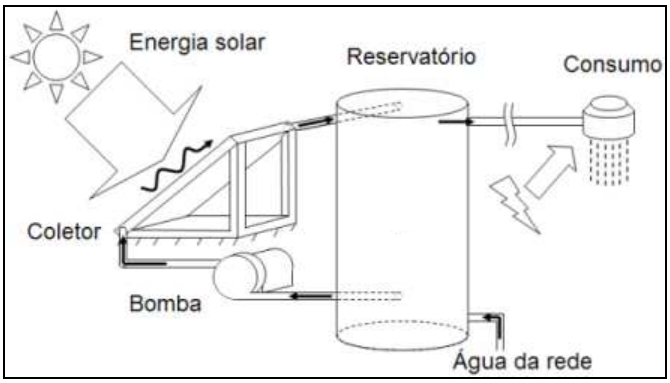


Figura 1 – Esquema de um sistema de coletores solar térmico de baixa temperatura para aquecimento de água para banho

A água dentro do reservatório circula pelos coletores com a pressão fornecida pela bomba. A cada passagem pelos coletores, o fluido ganha um incremento em energia, isto é, um aumento de temperatura, que vai se acumulando no reservatório até o momento de ser consumido. Neste instante, sai a água a ser consumida pelo topo e entra água fria de reposição por baixo.

Esta escolha de local de entrada e saida é decorrente da estratificação da água no reservatório, ou seja, o volume mais quente, por possuir menor massa específica, se desloca para o topo e o frio para o fundo. Assim, a água consumida possui o maior ganho em energia e a água fria que entra, não corre o risco de resfriar a água já aquecida.

Um dos elementos mais importantes do sistema é o coletor, cujo ganho de energia útil Q_u , em W, é dado pela equação abaixo, de Beckman et al (1977).

$$Q_u = F_R A[I_T(\tau\alpha) - U_L(T_I - T_A)] \text{ [W]} \tag{1}$$

onde F_R é o fator de eficiência da remoção de calor, A área do coletor, em m², I_T o fluxo de radiação solar incidente na superfície do coletor, em W/m², τ a transmissividade da superfície que cobre o coletor, α a absortividade do coletor, U_L o coeficiente global de perda de energia do coletor, em W/m², T_I a temperatura de entrada do fluido no coletor em °C e T_A a temperatura do meio ambiente, em °C.

O dimensionamento e cálculo destes sistemas são feitos de diversas maneiras, podendo ser por médias diárias mensais, como o F-chart, ou através do cálculo transiente do sistema ao longo de um período designado. Estes cálculos transientes levam a resultados mais exatos, uma vez que são feitos a partir de dados climáticos horários e se baseiam na eficiência instantânea do sistema, levando em conta dias nublados, chuvosos, encobertos que não são considerados na média. Por procurar resultados mais refinados, este último método de modelagem foi escolhido, sendo usado o software TRNSYS v15 para este fim, descrito na seção abaixo.

3.3. Software TRNSYS v15

Como mencionado, o software TRNSYS foi desenvolvido para simulações transientes com cálculos num intervalo de tempo estabelecido. Ele apresenta uma estrutura modular que permite utilizar blocos que representam diferentes equipamentos e funções que são interligados, como ilustrado na Figura 2.

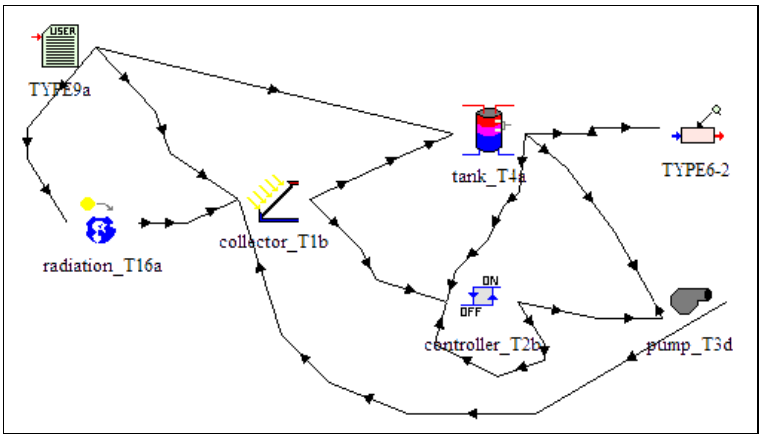


Figura 2 - Estrutura do software TRNSYS

Pode-se observar na figura os diversos elementos do sistema de coletores solar, como a entrada dos dados climáticos a partir de um arquivo (TYPE9a), o processador de radiação (radiation_T16a), o coletor solar (collector_T1b), o tanque de armazenamento (tank_T4a), o aquecedor de passagem (TYPE6-2) e a bomba que faz passar a água nos coletores (pump_T3d) com o controlador diferencial de temperatura para ativá-la (controller_T2b).

Estes elementos apresentados possuem entradas, saídas e parâmetros que no fundo são equações diferenciais. Estas equações estão relacionadas pelas entradas e saidas, representados pelas flechas, que são as temperaturas, vazões, radiações, potências, energias, entre outros, transferidos entre os componentes. Estas equações são então resolvidas pelo software, sendo os resultados desejados, que representam o comportamento do sistema, retornados ao usuário.

3.4. Indicadores financeiros

Segundo Damodaran (2001) os principais indicadores financeiros são taxa interna retorno, tempo de retorno e valor presente líquido, sendo que os dois primeiros escolhidos para serem usados neste trabalho. Todos indicadores consideram que o dinheiro possui valor diferente no tempo, sendo comparáveis através de uma taxa da desconto que aumenta ou diminui o valor deste se levado para o futuro ou trazido para o presente, respectivamente.

A primeira delas, a taxa de retorno, representa a taxa de retorno de um investimento dado o fluxo de caixa, constante ou não, decorrente deste, como apresentado na figura abaixo:

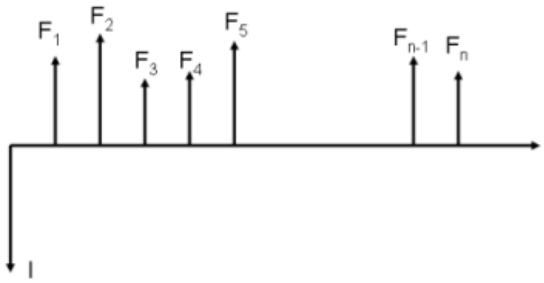


Figura 3 - Exemplo de fluxo de caixa para cálculo da taxa interna de retorno

Neste fluxo, cada movimento de caixa é trazido para o presente pela equação

$$VP_k = \frac{F_k}{(1+i)^n} \tag{2}$$

onde VP_i é o valor presente do fluxo, F_i é o fluxo de caixa no futuro, i a taxa de desconto e n o periodo em que ocorre o fluxo. Assim, todo o fluxo de caixa futuro pode ser trazido para um valor presente, pela soma de cada um dos fluxos descontado pela taxa e pelo período equivalente, resultando na seguinte equação.

$$VP_{total} = \sum_k \frac{F_k}{(1+i)^n} \tag{3}$$

A taxa interna de retorno é a taxa de desconto i, tal que o valor presente dos fluxos de caixa futuros é igual ao investimento inicial, ou seja

$$i \text{ tal que} \sum_k \frac{F_k}{(1+i)^n} = -I \tag{4}$$

A segunda ferramenta, o tempo de retorno, representa o tempo que o investimento leva para se pagar e começar a aportar lucro. Este cálculo faz uso da taxa mínima de atratividade, geralmente a de um investimento de baixo risco, como um título de dívida do governo, que é usada para descontar os fluxos de caixa futuro. Assim, o tempo de retorno é definido como o menor período k a partir do qual a soma dos valores presentes dos fluxos de caixa, descontados pela taxa mínima de atratividade, é maior que o investimento inicial, ou seja

$$\text{Menor } k \text{ tal que} \sum_k \frac{F_k}{(1+i)^n} > -I \tag{5}$$

4. DESENVOLVIMENTO

Primeiramente são estabelecidos os parâmetros de entrada que vão compor o problema, como dados climáticos, características dos banhos, premissas financeiras, etc. Em seguida é desenvolvida a parte técnica, onde os sistemas são dimensionados e simulados. Por último seguem as análises financeiras e conclusões.

4.1. Dados climáticos

O posto estudado é localizado no município de São Sepé, próximo a cidade de Santa Maria. Para esta, foi obtido um ano representativo climático no site do Energy Plus (2009), software para dimensionamento de cargas térmicas em construções, sendo estes dispostos num formato horário. Dentre os dados disponíveis, foram utilizados neste projeto radiação global total horizontal, temperatura de bulbo seco e temperatura de bulbo umido.

A radiação solar diária está apresentada na figura abaixo, nos valores médios, máximos e mínimos mensais.

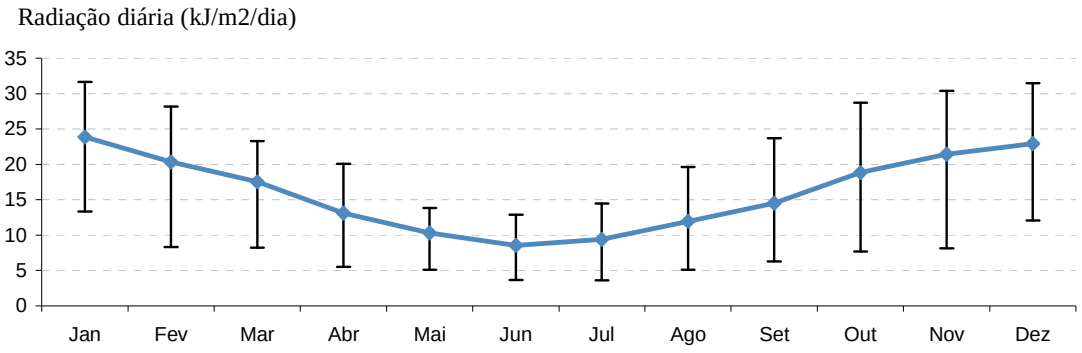


Figura 4 – Radiação solar diaria. Médias, máximas e mínimas mensais de ano representativo de Santa Maria (Energy Plus, 2009)

Observa-se, que no período de verão a radiação solar é mais intensa, com uma incidência média diária em janeiro de 23,8kJ/m2/dia, chegando a uma máxima de 31,6 kJ/m^2/dia. Já no inverno a radiação é de menor intensidade. No mês de junho, a média diária mensal é de 8,5 kJ/m^2/dia, 64% menor que em janeiro, sendo o mínimo diário do período de 3,6kJ/m2/dia.

Abaixo, a representação da temperatura de bulbo seco nos seus valores médios máximos e mínimos de cada mês.

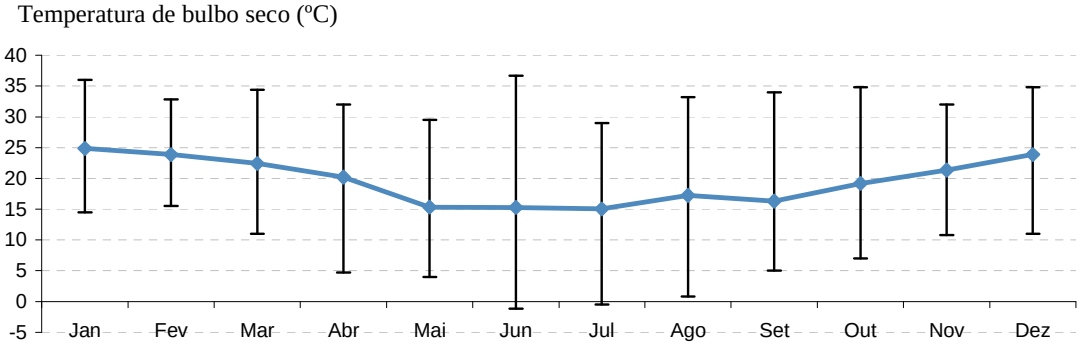


Figura 5 – Temperatura de bulbo seco média, máxima e mínima de cada M6es para um ano representativo de Santa Maria (Energy Plus, 2009)

A temperatura de bulbo seco segue curva semelhante a de radiação solar, com média diária em janeiro, de 24,8ºC com máximos e mínimos de 15ºC e 36ºC. Já no inverno, em julho, a média diária mensal é de 15,1ºC oscilando no mês entre -0,5 e 29ºC. Como as temperaturas chegam a valores abaixo de zero, existe o risco d'água congelar dentro dos coletores, o que, dado o comportamento atípico de aumento de volume do processo, pode romper as estruturas por onde ela circula. Isto implica em precauções não levadas em conta neste trabalho.

Sobre a temperatura de água da rede, devido a falta desta informação na localidade, foi tomada como estimativa a temperatura de bulbo úmido, apresentada abaixo nos seus valores médios, máximos e mínimos mensais.

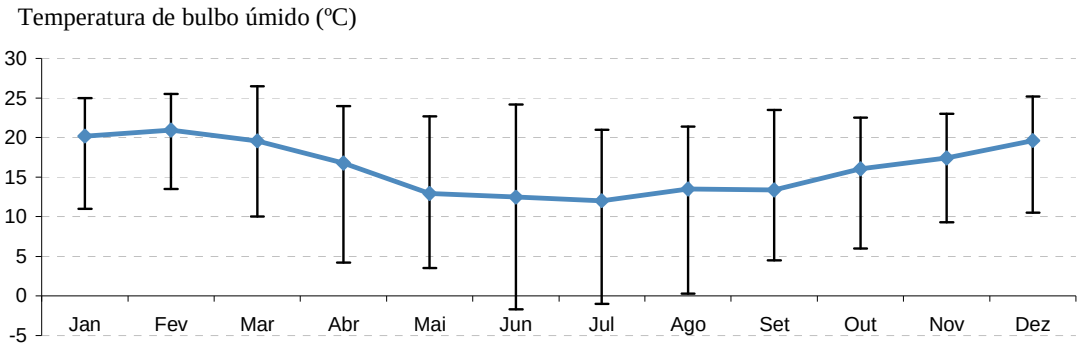


Figura 6 – Temperatura de bulbo úmido média, máxima e mínima diária do ano representativo de Santa Maria (Energy Plus, 2009)

Estas temperaturas apresentam sazonalidade semelhante, sendo a média diária mensal máxima no mês de fevereiro de 21ºC e a mínima em julho de 12ºC. Neste ano típico de Santa Maria, os valores máximos e mínimos de temperatura de bulbo úmido são de 26.5ºC e -1.7ºC.

4.2. Características dos banhos

Atualmente o posto dispõe de 5 duchas no banheiro masculino e 2 duchas no banheiro feminino. A água para estas duchas é aquecida num reservatório de 1.000L no qual está acoplado um queimador diesel Cuenod NC6 de potência d e 50kW.

A maior parte dos usuários dos banhos são caminhoneiros do sexo masculino que param para abastecer seus caminhões ao longo das suas jornadas de tranporte de cargas. Isto significa que a maior parte da demanda por água quente é para os chuveiros masculinos. Por isso, para critério de simplificação, foi considerado que os 2 chuveiros femininos equivalem, em termos de consumo de água quente, a 1 chuveiro masculino. Ou seja, será considerado que no posto existem 6 chuveiros.

Dada a rotina dos caminhoneiros, estes banhos são tomados em grande parte no final do dia, ao anoitecer, quando os motoristas saem das estradas e numa menor parcela pela manhã, antes deles partirem para a estrada novamente. Assim sendo, foi estabelecido que 20% da demanda por água quente é no período da manhã e 80% no final da tarde, como apresentado na figura a seguir:

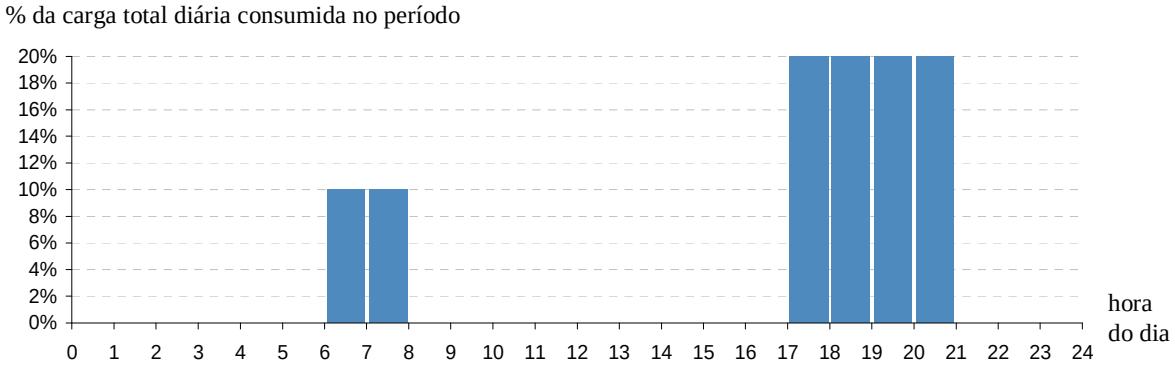


Figura 7 – Histograma do percentual de água quente consumido no posto ao longo do dia

Esta distribuição implica que entre 6 e 8 da manhã são consumidos 20% do volume diário, 10% em cada hora e os 80% restantes, entre 17 e 21h, a uma razão de 20% por hora, totalizando os 100% da carga diária.

Em termos de quantidade de banhos, estimou-se uma sazonalidade, havendo maior ocorrência no verão do que no inverno por motivos como maiores movimentações de carga nos meses de janeiro a abril devido ao período de colheitas da região e menores no inverno, quando as safras entram em baixa e a disposição das pessoas para o banho é menor devido às baixas temperaturas.

Outra característica estimada foi a temperatura de banho, sendo menores no verão, quando as pessoas procuram se refrescar, e mais altas no inverno quando buscam se aquecer. Estes dois parâmetros de banho, quantidades e temperaturas, estão representados na figura abaixo.

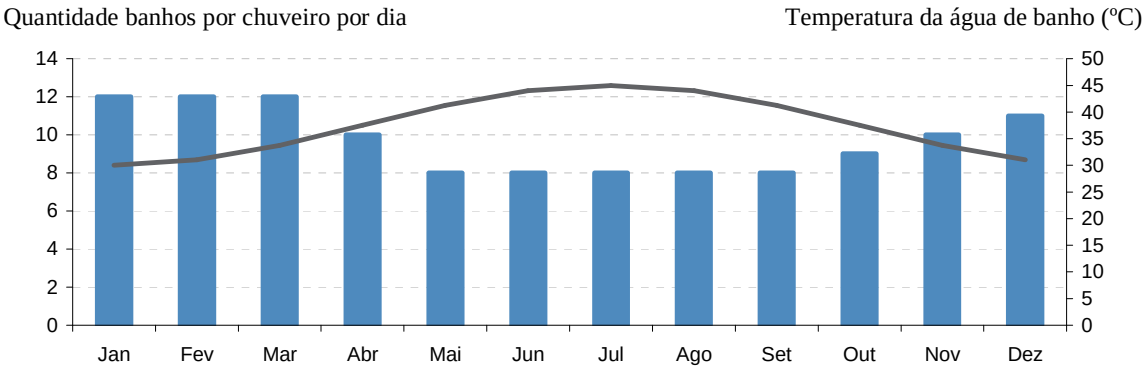


Figura 8- Histograma da quantidade de banhos por chuveiro por dia e da temperatura de água do banho

Assim foi considerado que no verão ocorre a maior média de banhos por dia por chuveiro, sendo 12 nos meses de janeiro a março. Já no inverno este número é 30% menor, sendo 8 banhos por chuveiro por dia para os meses de maio a setembro com valores intermediários para os outros meses.

Em relação a temperatura de banho, ela vai de 30ºC no verão para 45ºC no inverno. Para a vazão e tempo de banho, foram considerados o padrão dos chuveiros Nossa Ducha, que já estão instalados no posto, que limitam a 6l/min e duração de 8min.

4.3. Massa de água quente para um dia de banho

A partir das características dos banhos, foi possível calcular a massa de água quente necessária para fornecer os banhos de um dia nas temperaturas estimadas. Esta massa foi obtida pela multiplicação dos fatores apresentado na equação abaixo:

$$M_{banho/dia} = n_{chuveiros} x_{banhos/dia} t_{banho} \dot{Q}_{banho} \rho_{água} \text{ [kg]} \quad (6)$$

onde $n_{chuveiros}$ é numero de chuveiros disponível no posto, $x_{banhos/dia}$ é a quantidade de banhos por dia por chuveiro, t_{banho} o tempo de banho, em min, Q a vazão do banho, em l/min e ρ_{agua} a densidade de água, em kg/l.

Foi considerado que a densidade da água é constante em 1 kg/l e aplicando esta equação à demanda diária de banhos em cada mês, foram obtidas as seguintes massas de água quente necessária para fornecer um dia de banho.

Tabela 1 – Quantidade de banhos e massa de água para um dia de banhos na temperatura estabelecida

	Banhos por chuveiro por dia	Massa total p/ um dia de banhos* kg
Jan	12	3.456
Fev	12	3.456
Mar	12	3.456
Abr	10	2.880
Mai	8	2.304
Jun	8	2.304
Jul	8	2.304
Ago	8	2.304
Set	8	2.304
Out	9	2.592
Nov	10	2.880
Dez	11	3.168

*Considerando 6 chuveiros com uma vazão de 6l/min e um tempo de duração de 8min

Devido as sazonalidades do banho, a maior demanda por água na temperatura de banho foi no verão, chegando a 3.456kg de água e menores no inverno, chegando a 2.304kg. Porém, a água fica armazenada no reservatório a uma temperatura superior, sendo misturada com água fria da rede para atingir a temperatura desejada. Assim, resta calcular este volume de água a ser armazenado no reservatório.

4.4. Massa de água armazenada no reservatório

Conhecendo a temperatura de banho, da água da rede e a massa de água para o banho é possível calcular a massa de água quente a ser armazenado na temperatura estabelecida. Para isto, supõe-se o seguinte esquema de mistura, com seu respectivo volume de controle.

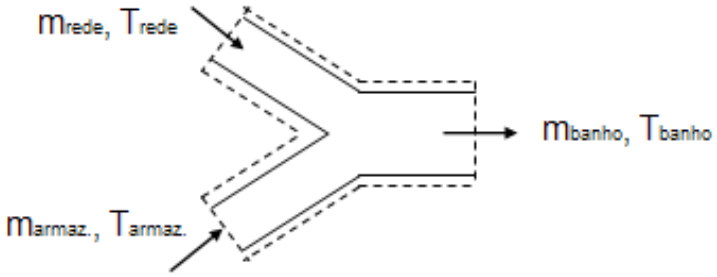


Figura 9 - Volume de controle na mistura de água quente do reservatório com a fria da rede

Na parte superior, entra a massa de água proveniente da rede e na inferior a massa do reservatório, ambas nas respectivas temperaturas. Nesta mistura, as hipóteses consideradas são regime permanente, homogeneidade das entradas e saídas, mistura adiabática e que as únicas energias envolvidas são as térmicas. Fazendo os balanços energético e mássico, obtém-se a seguinte equivalência de massa de água armazenada:

$$M_{armaz} = M_{banho} \frac{(T_{banho} - T_{rede})}{(T_{armaz} - T_{rede})} \tag{7}$$

A temperatura considerada para o armazenamento é de 50ºC para garantir uma certa variação das temperaturas de banho. Esta água será misturada com a da rede, tomada como a temperatura de bulbo úmido por falta de dados, conforme apresentado na Figura 6.

Além disto, para não super-dimensionar o sistema, foi escolhida a menor temperatura de bulbo úmido de cada mês, desconsiderando os valores 5% mais baixos. O resultado da massa equivalente na temperatura de armazenamento para fornecer os banhos de um dia está apresentado na tabela abaixo:

Tabela 2 - Volume de água armazenada

	Temperatura da água da rede considerada °C	Massa amazenada kg
Jan	15,3	1.464
Fev	16,2	1.514
Mar	13,1	1.934
Abr	10,5	1.969
Mai	6,3	1.843
Jun	4,7	1.999
Jul	4,5	2.051
Ago	6,6	1.985
Set	7,3	1.832
Out	10,6	1.770
Nov	11,7	1.658
Dez	14,3	1.482

As massas de água quente armazenada ficaram em torno de 2.000kg. Observa-se que diferente da demanda anterior, de água na temperatura de banho, a demanda por água armazenada é maior no inverno do que no verão, devido principalmente a uma menor temperatura da água da rede. Assim, mesmo com uma maior quantidade de banhos no verão, a maior demanda por água quente armazenada é no inverno, chegando a 2.051kg no mês de julho. A partir destes resultados, foi determinado que o tanque de água quente deve comportar 2.000kg, ou seja 2.000L.

4.5. Coletores Solar

O fabricante dos coletores solar ainda não havia passado as qualificações do Inmetro, logo as características dos coletores ainda não estavam disponíveis. Por isso, foi escolhido um coletor representativo da classe “A” do Inmetro (2009), com o intuito de avaliar a instalação caso os coletores fossem de maior qualidade possível. As propriedades estabelecidas foram $FrUL$=6,7W/m^2/K e $Fr(\tau\alpha)$=0,753. Estas mesmas características foram utilizadas em todas simulações para criar uma mesma base de comparação.

A inclinação dos coletores foi escolhida para privilegiar a absorção no inverno, que segundo Duffie e Beckmam (1979), é a latitude do local mais 10º. Com os coletores sendo instalados próximos a latitude de Santa Maria, a 30º S, a inclinação estabelecida foi de 40º com relação a horizontal.

A vazão pelos coletores foi dimensionada segundo o mesmo autor, em 0.015 l/s/m^2, ou em unidades equivalente 54kg/h/m^2. Os cálculos de vazões para as área escolhidas para simulação de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60 e 70 m^2 encontram-se no apêndice A.

4.6. Sistemas simulados

Para fins comparativos, foram modelisados 4 sistemas diferentes, ilustrados abaixo, sendo eles de passagem; solar e queimador no mesmo reservatório; solar e queimador em

reservatório separados. Este último foi simulado em 2 configurações, totalizando os 4 sistemas simulados

O sistema de passagem está apresentado na figura abaixo:

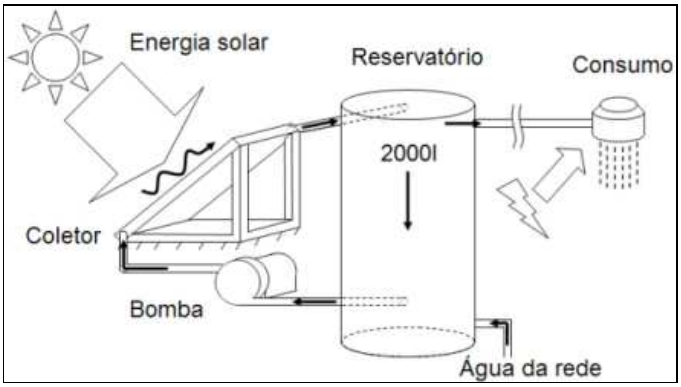


Figura 10- Primeiro sistema: passagem

Neste sistema, a água é aquecida pelo sol e acumulada no reservatório. A energia complementar para elevar a temperatura da água à de banho é adicionado no momento do consumo. Neste sistema, foi utilizado um reservatório de 2000L.

Abaixo, o sistema com os coletores e o queimador ligados no mesmo reservatório

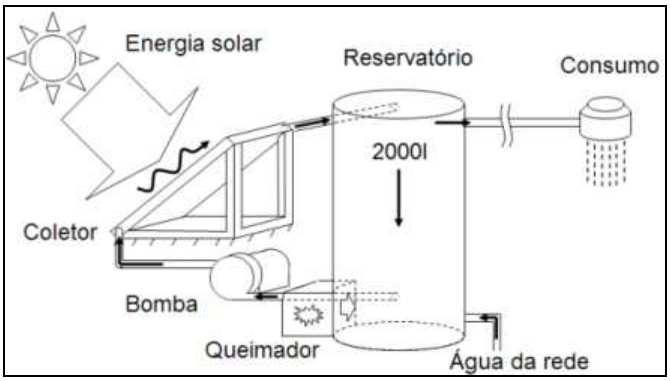


Figura 11- Segundo sistema: solar e queimador no mesmo tanque

O sistema acima foi baseado considerando o queimador diesel de 50kW já disponível no posto. Nele o coletor solar foi ligado no mesmo reservatório de 2000L do queimador.

Abaixo, o esquema do terceiro e quarto sistema, nas 2 versões:

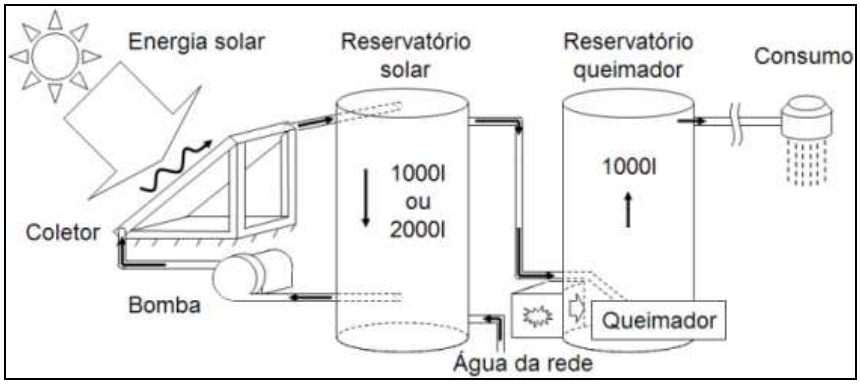


Figura 12- Terceiro sistema: solar e queimador em tanques separados ligados em série

Estes últimos sistemas também fazem uso do queimador já existente no posto, sendo o volume de água quente necessário distribuído entre os dois reservatório: um com aquecimento solar e outro com o queimador. Os reservatórios estão interligados em série, de maneira que a saída do reservatório do coletor está ligada na entrada do com queimador. Isto implica que a água que chega no segundo reservatório já obteve um ganho de energia solar.

As duas diferentes configurações deste sistema foram uma com o reservatório solar de 1.000L e outra com 2.000L. A capacidade do reservatório do queimador para ambas configurações foi de 1.000L, capacidade já existente no posto de gasolina. Os dados dos sistemas foram resumidos na tabela abaixo.

Também foram escolhidas as áreas de coletoras de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60 e 70m^2 para as simulações, afim de se obter uma curva para visualizar o comportamento dos sistemas.

Tabela 3 - Resumo dos sistemas simulados

Nome do sistema	Dimensões dos Reservatórios	Energia complementar
Passagem	Solar 2.000L	Aquecimento por passagem
Acumulação Simples	Solar 2.000L	Queimador
Acumulação Dupla 1.000L	Solar 1.000L Acumulação 1.000L	Queimador
Acumulação Dupla 2.000L	Solar 2.000L Acumulação 1.000L	Queimador

4.7. Premissas financeiras

Taxa de desconto e taxa mínima de atratividade

A taxa de desconto e a taxa mínima de atratividade foram baseadas na Selic, descontado o imposto de renda. Na data do presente trabalho esta se encontra a 8,75% que descontado os 15% do imposto de renda resultam em aproximadamente 7,5%.

Custos do projeto

Os custos dos coletores foram obtidos da empresa fabricante de coletores envolvida no projeto. O preço por metro quadrado de coletor é de aproximadamente R$400. Os custos para os reservatório de 1.000L e 2.000L foram avaliados em R$1.400 e R$2.100, a instalação com mão de obra em R$1.800. O reservatório com aquecedor diesel já se encontra no posto, sendo considerado custo afundado. Estes valores estão resumidos na tabela abaixo

Tabela 4 – Custos dos elementos do sistema solar

Elemento	Preço
Coletor Solar	R$400/m^2
Reservatório 1000L	R$1.400
Reservatório 2000L	R$2.100
Instalação e mão de obra	R$1.800

Custo da energia

As duas fontes de energia comparadas foram diesel e eletricidade. Atualmente o custo do diesel em Santa Maria é de aproximadamente R$2/l e o poder calorífico é de 39MJ/l (DUFFIE BECKHAM, 1979). Juntando os dois valores, é obtido o custo de aproximadamente R$0,05/MJ. A eletricidade, segundo a o site da Aneel (2009) para a distribuidora Empresa Luz e Força Santa Maria S/A, custa R$0,34951/kWh que com impostos resulta em aproximadamente R$0,44/kWh, ou em unidades equivalente R$0,12/MJ.

Manutenção
A manutenção dos coletores solares envolve principalmente a limpeza periódica das placas e uma eventual substituição de peças. Isto resultou numa estimativa de R$100 por trimestre

5. RESULTADOS

5.1. Análise técnica

A partir dos parâmetros de entrada, foi modelado no software TRNSYS os diferentes sistemas propostos. Afim de comparar os diferentes sistemas, foi usado o Fator - F (DUFFIE BECKHAM, 1979), que representa a fração de energia demandada suprida pela energia solar.

5.1.1. AQUECEDOR POR PASSAGEM

Depois de construído o modelo no TRNSYS, cujo diagrama encontra-se no apêndice B, o sistema foi simulado para as diferentes áreas coletoras propostas. Os resultados foram compilados e a distribuição de fatores F ao longo do ano está representada na Figura 13

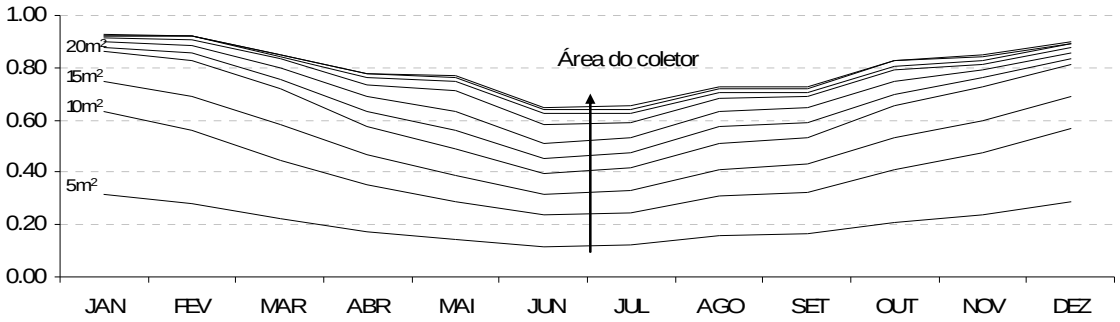


Figura 13 – Primeiro sistema: de passagem, distribuição dos fatores F ao longo do ano para diferentes áreas

Para uma pequena área de coletor, como 5m^2 o fator F no verão chegou no máximo a 0,32 e no inverno a 0,12. Já para grande áreas como os 70 m^2, o fator foi de 0,92 no verão e 0,65 no inverno. Observa-se que o aumento da área coletora aumenta a parcela de energia fornecida pelo sol, sendo que esta proporção se reduz com o aumento da área. Por exemplo ao duplicar a área de 5 para 10 m^2, fator F aumentou em 100%, já duplicando a área de 30 para 60m^2, o aumento do fator é de apenas 11%.

5.1.2. QUEIMADOR E SOLAR NO MESMO RESERVATORIO

Este sistema também foi simulado no TRNSYS. Contudo, as primeiras simulações com 50m^2 já indicaram um baixíssimo rendimento do sistema, com o fatores F em média de 0,05, contra 0,76 do sistema anterior. Assim, foi optado por não dar continuidade na análise deste sistema.

5.1.3. QUEIMADOR E SOLAR (1.000L) EM RESERVATÓRIOS DIFERENTES

O terceiro sistema também foi modelado no TRNSYS, diagrama no apendice C, e os fatores F obtidos para este sistema estão apresentados na figura a seguir:

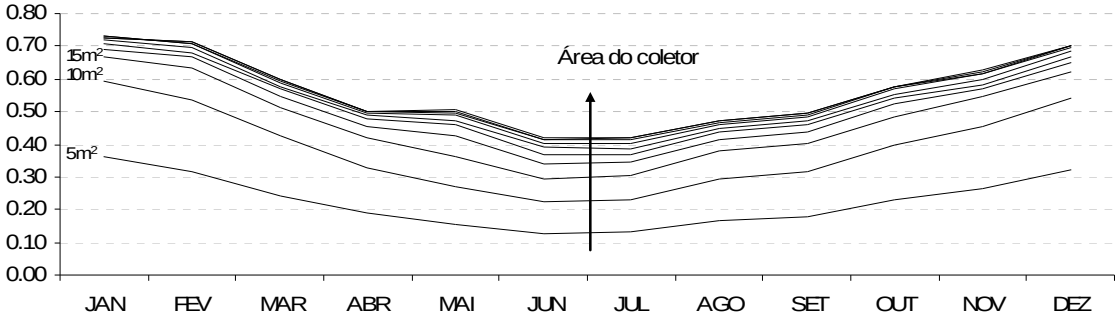


Figura 14 – Sistema de acumulação de 1.000L: distribuição dos fatores F ao longo do ano para diferentes áreas

Este sistema apresentou rendimento inferior ao de passagem, com fatores F em média 30% menores.

5.1.4. QUEIMADOR E SOLAR (2.000L) EM RESERVATÓRIOS DIFERENTES

Este sistema foi modelisado usando o mesmo esquema do modelo anterior, alterando somente o volume do reservatório ligado ao coletor solar, que passou de 1.000L para 2.000L. Os fatores F obtidos para este sistema estão representados na figura abaixo

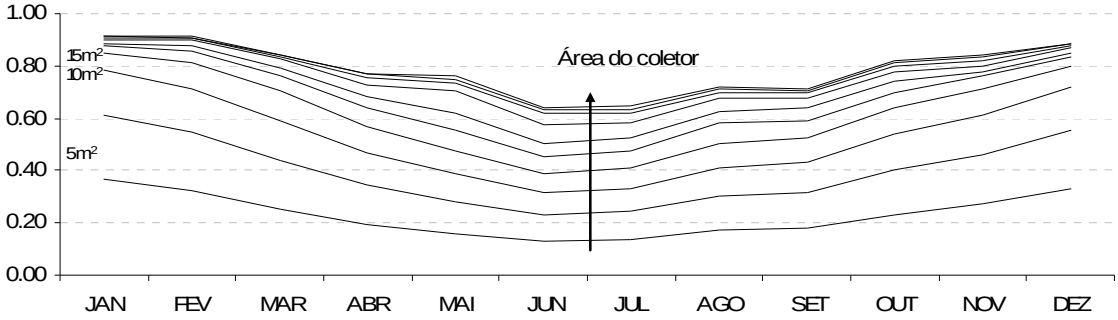


Figura 15 – Sistema de acumulação de 2.000L: distribuição dos fatores F ao longo do ano para diferentes áreas

Este sistema apresenta rendimento semelhante ao de passagem, porém ele requer um volume de acumulação total de 3.000L, ou seja 50% superior aos outros sistemas.

5.1.5. COMPARATIVO DOS SISTEMAS

Afim de se comparar a eficiência dos 3 sistemas, os fatores F total anual de cada foram graficados, como apresentado abaixo:

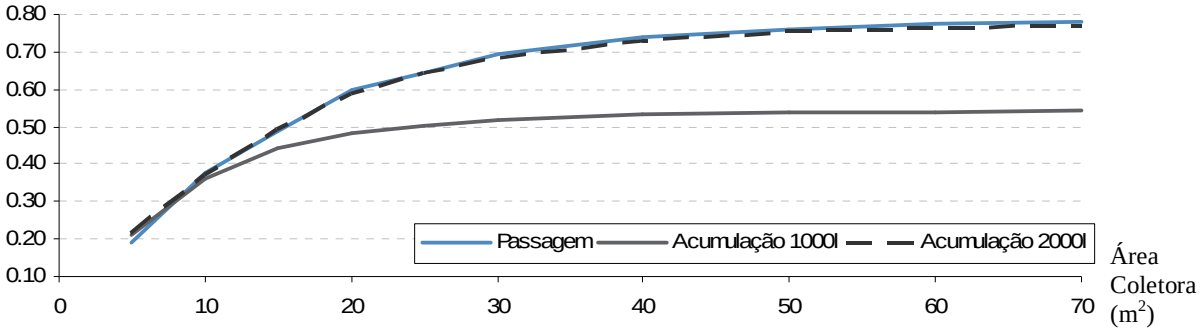


Figura 16 - Fator F anual por sistema para diferentes áreas

Como mencionado, os sistemas de passagem e de acumulação com 2.000L apresentaram uma distribuição de fatores F parecidos. Já o sistema de acumulação apresentou um fator F em média 30% menor.

5.2. Análise financeira

Dados os 3 sistemas simulados integralmente, passagem, acumulação 1.000 e 2.000L, foram propostos 3 cenários econômicos, apresentados na tabela abaixo, afim de avaliá-los do ponto de vista financeiro.

Tabela 5 - Cenários para avaliar os sistemas

Cenario	1	2	3
Sistema	Passagem	Acumulacao 1.000L	Acumulacao 2.000L
Energia Complementar	Eletricidade	Diesel	Diesel
Tanque adicional	1.000L	1.000L	2.000L

O primeiro cenário é o sistema de passagem com aquecimento elétrico que requer um tanque adicional de 1.000L. Ou seja, este cenário considera que o tanque com o queimador diesel será ligado junto ao novo tanque, mas com o queimador desativado.

O segundo cenário se baseia no sistema com acumulação de 1.000L, sendo o tanque adicional aquecido pelo sol e o outro por diesel. O terceiro cenário apresenta as mesmas características do segundo, sendo a única diferença que o tanque de acumulação solar é de 2.000L. Vale lembrar que atualmente o posto está usando diesel para aquecer a água, ou seja, qualquer mudança no uso da energia deve ser comparado com os gastos atuais em diesel.

Com isso, a partir dos cenários, sistemas e premissas financeiras foram montados fluxos de caixa de 20 anos, tempo de vida estimado de uma instalação solar. A receita gerada pelo sistema é decorrente do custo evitado com gastos de energia que, considerando as premissas financeiras e as estimativas de gastos de energia, é de aproximadamente R$5.000 por ano.

Assim, foi estabelecido um fluxo de caixa anual para os cenários, baseado na seguinte estrutura:

Custo de energia evitado (R$)-Manutenção (R$)=**Fluxo de caixa (R$)** (8)

No fluxo de caixa, foi desconsiderado o efeito da depreciação e dos impostos, pois estes dependem do regime tributário no qual está inscrito a empresa. Assim, o valor aqui calculado representa o maior fluxo de caixa possível.

À partir destes, foram calculadas as taxas internas de retorno e os períodos de retorno para cada sistemas no seu cenário, apresentados abaixo:

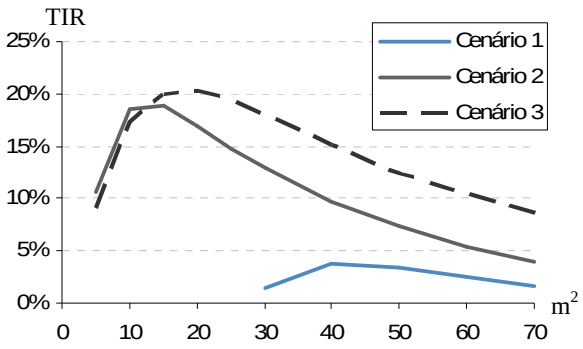


Figura 17 - Taxa interna de retorno dos cenários por área coletora

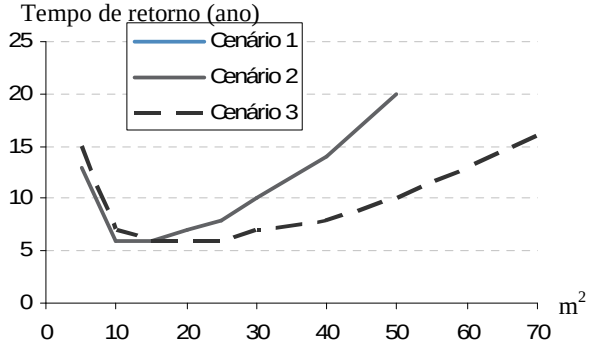


Figura 18 – Tempo de retorno do investimento dos cenários por área coletora

Observa-se que os cenários 2 e 3 apresentaram taxas de retorno ácima da taxa mínima de atratividade, sendo os maiores valores de 18,9% e 20,4%, respectivamente, para áreas coletoras de 15m^2 e 20m^2. Já o cenário 1 apresentou taxa interna de retorno máxima da 3,7% para uma área da 40m^2, abaixo da taxa mínima de atratividade.

Em termos de tempo de retorno, os investimentos dos cenário 2 e 3 se pagaram no sexto ano para as áreas coletoras mencionadas. Já o primeiro cenário apresentou um tempo de retorno superior aos 20 anos de vida da instalação.

A diferença entre os cenários se deve principalmente aos custos de energia, sendo a eletricidade 2.4x superior ao diesel para um mesmo poder calorífico. Isto implica que em relação ao diesel, a eletricidade só começa a ser rentável quando o fator F anual passa de 0,58, ou seja quando a energia elétrica a ser suprida for 2,4x menor do que o gasto de energia atual.

O cenário 3 apresenta uma taxa mínima de atratividade superior ao cenário 2, +1,5p.p. Porém ele requer um maior volume de armazenamento, no total de 3.000L, que o torna potencialmente menos atrativo. Este fato, somado a inviabilidade econômica do cenário 1, implica que o segundo cenário é o mais adequado para a aplicação. Neste cenário, a melhor escolha de área coletora é 15m^2, pois esta apresenta maior taxa interna de retorno, 18,9% e menor tempo de retorno, 6 anos.

6. CONCLUSÕES

Depois de simulados os diferentes sistemas propostos e inserí-los em cenários para avaliar seus aspectos financeiros, chegou-se a diversas conclusões. Porém, antes de explicitá-las, é importante ressaltar duas considerações otimistas que levaram a tais resultados, como a suposição de coletores com alto rendimento, classe “A” do Inmetro, devido ao desconhecimento das características reais dos que serão instalados. Também, a maximização do fluxo de caixa ao desconsiderar os efeitos de impostos e depreciação, uma vez que não foi estabelecido o regime tributário da empresa.

Assim, concluiu-se que com exceção do segundo sistema, coletores ligados no mesmo reservatório do queimador, os sistemas solares supriram uma importante parcela da energia necessária para aquecer a água dos banhos, com fatores F acima de 0,5. Estes resultados, do ponto de vista energético, são muito atrativos, sendo necessário uma análise financeira para verificar suas viabilidades.

Ao ser inserido em um cenário com seus elementos monetizados, o sistema de passagem com aquecimento elétrico perdeu atratividade, pois a maior taxa de retorno foi de 3,7%, abaixo da taxa mínima de atratividade de 7,5%. Isto se deve principalmente ao fato do posto atualmente usar diesel para aquecer sua água, cujo preço por poder calorífico é 2,4x inferior ao da energia elétrica, sendo difícil seu deslocamento.

Os outros dois sistemas nos seus cenários, reservatórios ligados em série com 1.000L e 2.000L, apresentaram retorno sobre o investimento superior a taxa mínima de atratividade, com valores máximos de 18,9% e 20% para áreas coletoras de 15 e 20m^2 e tempos de retorno de 6 anos para ambos.

REFERÊNCIAS

Aneel 2009 - Tarifas elétricas vigentes, consultado em Outubro de 2009: http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=493&idPerfil=2

BECKMAN, W.A., KLEIN, S.A and DUFFIE, J.A, 1977, **Solar Heating Design**, John Wiley & Sons, New York

Catálogo do queimador à diesel Cuenod NC6, consultado em Outubro de 2009: http://pdf.directindustry.com/pdf/cuenod-thermotechnique/oil-burners-nc4r-nc4-nc6-nc9/21259-46914.html

DAMODARAN, A., 2001, **Corporate Finance**, 2nd edition John Wiley & Sons, New York

Energy Plus, consultado em Outubro de 2009: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/region=3_south_america_wmo_region_3/country=BRA/cname=Brazil

GODOIS, R. B. **Avaliação de métodos para dimensionamento de sistemas solares de aquecimentode água: f-chart e simulação com programa TRNSYS**. 2008. 15 f. Monografia (Trabalhode Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica,Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

Inmetro , Catálogo de coletores solar, consultado em Outubro de 2009: http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/ColetoresSolares.pdf

SCHMITT, D. R. Estudo **da Viabilidade Técnica e Econômica para Implantação de Sistema Solar no Prédio da Sociedade Porto Alegrense de Auxílio aos Necessitados** – SPAAN. 2007, Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

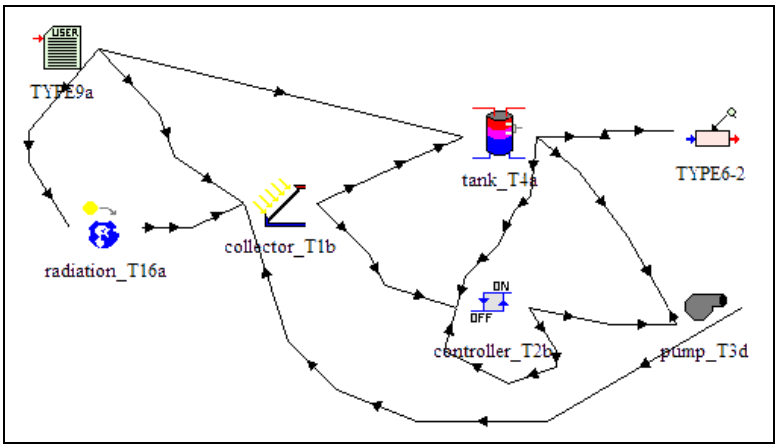
DUFFIE, J.A and BECKMAN, W.A., 1991, **Solar Engineering of Thermal Processes**, 2nd edition, John Wiley & Sons, New York,

ISO 9459-2, **Solar heating – domestic water heating systems – Part 5: System performance characterization by means of whole-system tests and computer simulation**. ISO 2007

SOARES, F. S de, **Curso de especialização em utilizações do gás natural,** revisão 2003. Apostila UFRGS, Disciplina: análise econômica do gás natural

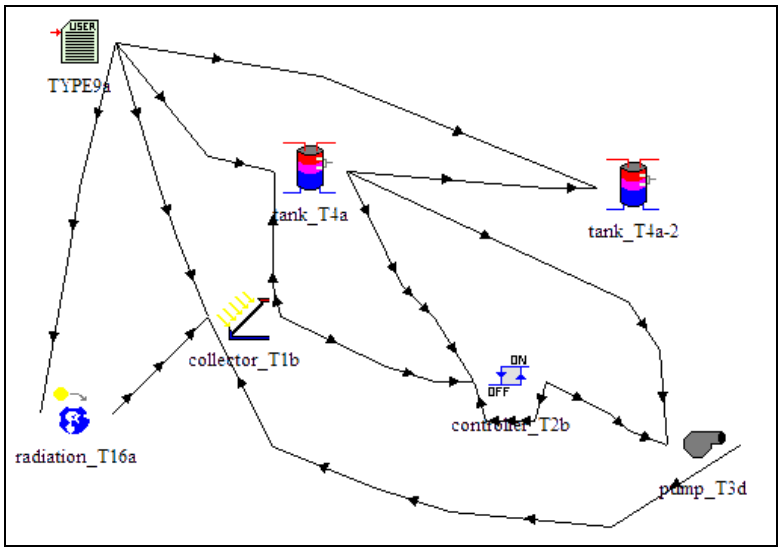
APÊNDICE

APÊNDICE – A diagrama TRNSYS do sistema de passagem e do sistema com aquecimento solar e queimador ligados no mesmo reservatório.



Pode-se observar na figura os diversos elementos do sistema, como a entrada dos dados climáticos e da demanda por água a partir do arquivo (TYPE9a), o processador de radiação (radiation_T16a), o coletor solar (collector_T1b), o tanque de armazenamento (tank_T4a), o aquecedor de passagem (TYPE6-2) e a bomba que faz passar a água nos coletores (pump_T3d) com o controlador diferencial de temperatura para ativá-la (controller_T2b).

APÊNDICE B – Diagrama TRNSYS dos sistemas com dois reservatório, um ligado aos coletores o outro com o queimador.



Pode-se observar na figura os diversos elementos do sistema, como a entrada dos dados climáticos e da demanda por água a partir do arquivo (TYPE9a), o processador de radiação (radiation_T16a), o coletor solar (collector_T1b), os dois tanques de armazenamento (tank_T4a e tank_T4a-2 e a bomba que faz passar a água nos coletores (pump_T3d) com o controlador diferencial de temperatura para ativá-la (controller_T2b).

APÊNDICE C – Vazões no sistema de coletores. As vazões no sistema de coletores foram calculadas para as áreas das simulações de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60 e 70 m^2 pela recomendação de Beckman et al (2009) de 0.015 $l/s/m^2$ de área coletora

Area m^2	**Vazão no sistema de coletores kg/h**
5	270
10	540
15	810
20	1.080
25	1.350
30	1.620
40	2.160
50	2.700
60	3.240
70	3.780