

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO DE COLETORES EVACUADOS DO TIPO WATER-IN-GLASS PARA GERAÇÃO DE VAPOR PARA USO EM SAUNAS

Maryna F. Ferreira Melo – ynamelo@yahoo.com.br

Paulo Fernando Figueiredo Maciel – paulofernandofm@hotmail.com

Cezar Augusto Fernandes de Araújo Filho – cezaraugustof@hotmail.com

José Henrique Martins Neto – henrique@des.cefetmg.br

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

Resumo. Este estudo propõe o uso de coletores solares do tipo tubo evacuado water-in-glass, comumente aplicado à produção de água quente, na geração de vapor saturado úmido para alimentação de saunas a vapor. São apresentadas simulações do desempenho do sistema na geração de vapor e também um modelo matemático que representa a máxima temperatura atingida pelo sistema em função da área de coleção para a vazão de 0,44kg/h. Testes experimentais foram realizados para validar dados obtidos da simulação numérica utilizando a plataforma TRNSYS (TRansient SYstem Simulation). Uma análise foi realizada para se determinar economia de energia proporcionada pelo sistema solar comparado a sauna convencional elétrica, com base nas tarifas exercidas pela CEMIG (i.e., Companhia Energética de Minas Gerais) no último semestre de 2015. O sistema foi capaz de gerar vapor úmido, a temperatura máxima de ebulição da água foi de $98,13 \text{ °C} \pm 0,87 \text{ °C}$, sendo que a temperatura média do fluido obtida foi de $72,6 \text{ °C} \pm 3,66 \text{ °C}$.

Keywords: Coletor solar evacuado tipo tubo water-in-glass, geração de vapor, sauna.

1. INTRODUÇÃO

Estudos comprovam que o desempenho de coletores solares evacuados pode ser satisfatório no que tange a geração de vapor saturado a baixas temperaturas. Conforme explica Alfaro-Ayala et al. (2015), estão disponíveis no mercado basicamente três diferentes tecnologias de geração solar aplicadas a tubos evacuados: o tipo *water-in-glass*, tema deste artigo, mostrado na Fig.1; os coletores evacuados com perfil em U e coletores evacuados do tipo *heat pipe*. Um estudo realizado por Morrison et. al. (2004) mostra que o sistema de coleção solar tipo *water-in-glass* vem a ser o mais vantajoso dentre 5 tipos de coletores (tubos evacuados em U, water-in-glass, heatpipe, coletores planos, e coletores com sistema de armazenamento) isso deve-se graças à sua simplicidade e baixo custo de produção e manutenção. Coletores do tipo *water-in-glass* são constituídos por dois tubos, concêntricos, de vidro borossilicato contendo vácuo entre eles, sendo o tubo interno recoberto por um material absorvedor de radiação solar. Esse modo construtivo permite a eliminação das perdas térmicas por convecção através da criação de um ambiente evacuado em torno do absorvedor. A energia térmica do sol obtida através dos coletores é transferida para o fluido de trabalho.

O objetivo desse trabalho é estudar a possibilidade do uso de coletores solares tipo *water-in-glass* em cooperação ou substituição a sistemas elétricos ou a gás de geração de vapor para alimentação de saunas. Por questões salutaras a temperatura interna da nossa sauna será limitada a 60 °C. Lin et al. (2012), por exemplo, demonstraram o êxito de sistemas de coletores solares evacuados baixa temperatura aplicados a várias situações como a produção de água aquecida para dormitórios, restaurantes, piscinas e aplicações industriais. Já Li et al. (2015) estudaram o desempenho térmico de coletores evacuados em U instalado na varanda de um apartamento em Shanghai, sendo que suas medições mostraram que este sistema apresenta bons resultados, podendo ser capaz de suprir até 40% de todo o consumo anual de energia para aquecimento de água de um cidadão médio de Shanghai. Giostri et. al (2012) afirma que a geração direta de vapor ainda é objeto de estudo no que diz respeito ao suprimento de demandas energéticas, sendo a geração indireta mais comumente utilizada no mercado. Entretanto, para as aplicações aqui propostas, estudar-se-á a possibilidade de geração direta de vapor de água saturado para suprimento de demandas de vapor de saunas comerciais e domésticas com o objetivo de tornar o sistema simples e economicamente viável.

Bracamonte et al. (2015) fornece parâmetros adequados à inclinação dos coletores solares já que, seus estudos constataram que, para climas subtropicais, o ângulo de inclinação dos coletores em relação a um plano horizontal paralelo ao solo tem influência sobre a eficiência de coletores evacuados tipo *water-in-glass* sendo que o ângulo de 10° foi, dentre os estudados, aquele que possibilitou o maior ganho de temperatura por parte da água de resfriamento dos tubos, apesar desta inclinação induzir o aparecimento de uma zona termicamente inativa no fundo dos tubos.

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE GERAÇÃO DE VAPOR

O sistema solar proposto atua no aquecimento de água até que a mesma atinja seu ponto de ebulição e possa suprir a demanda de saunas úmidas (saunas a vapor) utilizando vapor saturado a pressões próximas à da atmosfera. Neste trabalho foram realizadas simulações numéricas e testes de campo para validação dos resultados, obtidos numericamente para o sistema de geração de vapor. Os testes foram realizados na cidade de Belo Horizonte com latitude igual à $-19^{\circ} 55' 15''$ e longitude igual à $-43^{\circ} 56' 16''$. O sistema é constituído de dois tubos evacuados,

importados, do tipo *water-in-glass* que tem como finalidade o aquecimento de água para uso doméstico/comercial. A área total de absorção é $0,33 \text{ m}^2$ e utilizando uma câmara de medições feita de vidro transparente com um volume é de $0,72 \text{ m}^3$ além de um reservatório de água para alimentação dos coletores colocado numa altura de cerca de 2 m acima dos tubos evacuados, mostrado na Fig. 2. O vapor gerado nos coletores é conduzido para a câmara de medições por uma tubulação de cobre. Os tubos e conexões do equipamento tiveram seu comprimento minimizado e foram devidamente isolados de maneira que as perdas na tubulação do protótipo serão desprezadas e não serão levadas em conta neste primeiro momento.

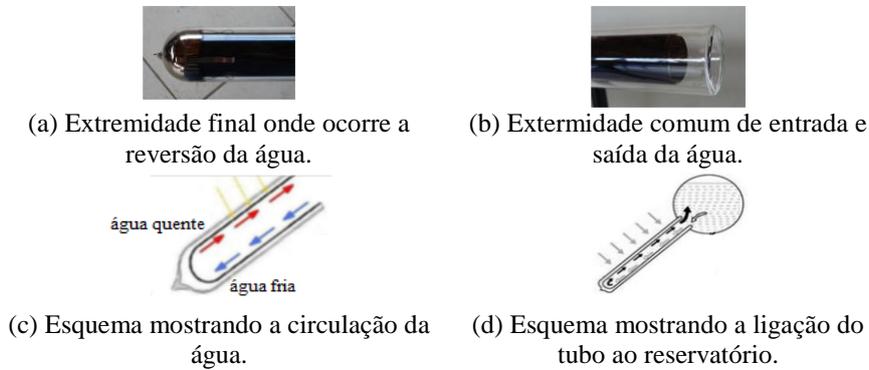


Figura 1 – esquema de um coletor evacuado tipo water-in-glass



Figura 2 - Foto mostrando a instalação de testes

Dois arranjos de montagem foram propostos para o sistema de coleção, o primeiro deles com os dois tubos evacuados dispostos em série, de modo que o fluido de trabalho fosse pré-aquecido no primeiro tubo e então conduzido para um segundo tubo, cuja finalidade é promover a mudança de fase e em seguida, conduzido para a câmara de medições. O segundo arranjo consiste numa configuração em paralelo, ou seja, a água passa simultaneamente nos dois tubos coletores evacuados retornando para a câmara de medições, sem estágio de pré-aquecimento, mostrados na Fig. 3. A temperatura da água na entrada dos coletores foi estimada em $20 \text{ }^\circ\text{C}$ e a vazão volumétrica mantida constante e igual a $0,44 \text{ l/h} \pm 0,11 \text{ l/h}$ para cada tubo operando em paralelo ou para cada série de tubos, sendo controlada por uma válvula do tipo esfera. Foram feitas medições da temperatura na saída do coletor em intervalos constantes de 15 minutos.

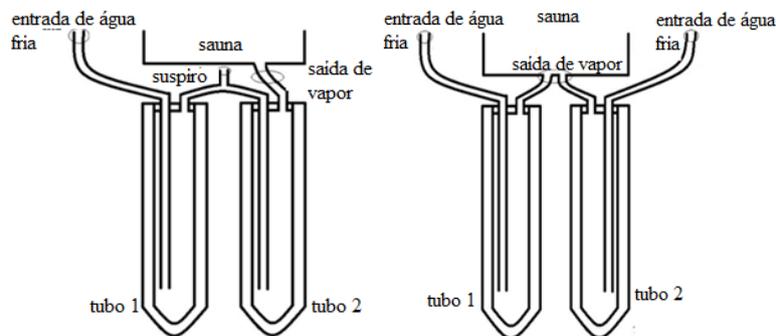


Figura 3–Esquema do sistema interno nos coletores em série e em paralelo

2.1. Instrumentação

As três medições de vazão do experimento foram realizadas com o uso de um rotâmetro para água líquida a temperatura de 20 °C cuja faixa de medição varia de 0,2 l/h a 2,2 l/h e sua resolução é de 0,02 l/h. Sua incerteza padrão, fornecida pelo fabricante, é de 0,01 l/h.

As cento e cinco medições de temperatura do experimento foram realizadas com o uso de termômetro tipo “espeto”, com faixa de medição de -50 °C a 300°C e resolução de 0,1 °C. Sua incerteza padrão é de 1 °C para a faixa de medição de -20 °C a 200 °C e 2 °C para as faixas de medição de -50 °C a -20 °C e de 200 °C a 300°C. Os instrumentos utilizados são mostrados na Fig. 4.



Figura 4 – Termômetro e Rotâmetro

3. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Para aferição da factibilidade do que propõe este estudo, foi realizada uma simulação de um sistema de geração de vapor utilizando coletores solares do tipo *water-in-glass*, para o dia central de cada mês do ano conforme descrito por Duffie e Beckman (2006) em ambiente da plataforma de simulações de sistema dinâmico TRNSYS (*i.e.*, *TRAnsient SYStem Simulation*). A simulação foi realizada levando-se em conta que o sistema solar está na cidade de Belo Horizonte, local onde foram realizados também o teste de campo utilizando um coletor semelhante ao sistema real. Os resultados obtidos foram usados como base para a realização de uma análise econômica simplificada do tipo “payback” visando determinar o período de tempo necessário para que a economia de energia elétrica seja suficiente para cobrir os custos de instalação do sistema solar.

3.1. Simulações Computacionais

Inicialmente foi simulada a geração de vapor no dia central de cada um dos doze meses conforme recomendam Duffie e Beckman (2006) de ano típico da biblioteca meteorológica METEONORM referente à cidade de Belo Horizonte sendo utilizada a plataforma dinâmica TRANSYS, versão 16.1. Para garantir a evaporação do fluido de trabalho (*i.e.*, água) e uma taxa de produção de vapor mais constante, testes de campo foram realizados com o protótipo para definir uma vazão que possibilitasse o início da evaporação do fluido em um período de aproximadamente uma hora a contar do início do teste, a saber: 11:00 AM. O objetivo deste teste foi determinar uma vazão que proporcionasse uma resposta razoavelmente rápida do sistema. Com base nesses testes, recomenda-se que sejam sempre utilizadas baixas vazões. Para a área de coleção utilizada nos testes, uma das vazões que atendia a esse requisito foi a de 0,44 l/h ± 0,01 l/h de água. Foram realizadas três medições dessa vazão com rotâmetro para água. Essa vazão foi utilizada como parâmetro para simulações computacionais.

Simulações prévias foram realizadas com o intuito de determinar a área ótima de coletores do tipo evacuado *water in glass* para um sistema de sauna real que opere a vazão supracitada e temperatura inicial de 20 °C. Para o cálculo de otimização da área de coleção, tomou-se aleatoriamente como referencial os dias 75, 228 e 288. Foram tomados dados do catálogo do fabricante, tais como área do tubo absorvedor, mas foi utilizado o ângulo de inclinação em relação ao solo de 10° conforme recomendação de Bracamonte et al. (2015), a temperatura do dia; a radiação total recebida e a temperatura do dia são fornecidas para cada hora do dia médio pela biblioteca meteorológica METEONORM. A área de coleção foi então variada de 0,66 m² a 5,28 m², mantendo-se constantes todos os parâmetros dimensionais do coletor e adicionando cada vez mais tubos coletores em série. Também foram mantidos constantes todos os demais parâmetros, tais como vazão, temperatura de entrada do fluido de trabalho no coletor, ângulo de inclinação do coletor em relação ao solo igual a 10° com o coletor voltado para o Norte geográfico ao meio dia solar, dia do ano médio típico. As simulações apontam o valor de 2,815m² como área ótima para todos os dias simulados, segundo se observa na Fig. 5. Portanto, fica evidente que o sistema segue uma tendência firmemente definida no que tange a relação entre sua temperatura e área de coleção. O ajuste polinomial das curvas apresentadas na Fig.5 possui coeficiente de correlação de 0,999 sendo expresso pela Eq. (1).

$$T = -10,498a^2 + 59,079a + 32,2067 \quad (1)$$

Onde: T é a temperatura máxima atingida pelo fluido durante a operação e a representa a área de coleção. Conforme explicam Duffie e Beckman (2006), o aumento da área de coleção implica também num aumento de área de troca de calor com o ambiente e, conseqüentemente, em maiores perdas no sistema, ainda que este opere na condição de evacuação. Apesar dos resultados teóricos obtidos, optou-se pela execução de todos os testes computacionais com base

na área comercialmente disponível mais próxima àquela recomendada pelas simulações. Os tubos possuem 0,037 m de diâmetro interno; 0,047 m de diâmetro externo e 1,5 m de comprimento. Deste modo a área comercial mais próxima àquela apontada pelas simulações é 2,99 m² conforme informações do catálogo do fabricante do coletor.

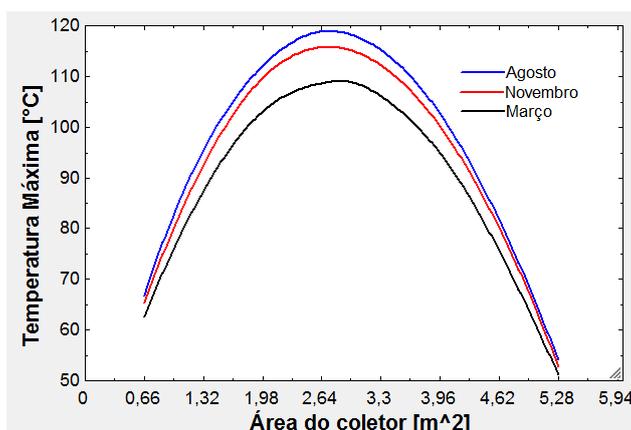


Figura 5 – Temperatura máxima de saída do fluido de trabalho em função da área de coleção solar para os meses de março, agosto e novembro.

Para estimar o comportamento de um sistema real, não só ao longo dos meses de maior incidência de radiação solar no hemisfério sul, mas, principalmente, naqueles de menor captação radiativa, foram geradas simulações, para que estatisticamente, fosse estimada a temperatura do fluido ao longo das horas do dia médio de cada mês do ano médio típico da biblioteca meteorológica METEONORM, referente à cidade de Belo Horizonte. Também, para fins de cálculo de potência real gerada pelo sistema, a densidade da água de trabalho foi tomada em função da temperatura média da substância pura ao longo do dia de operação, disponível em Moran e Shapiro (2006), a se contar a partir das 9:00 até as 16:00 horas. A temperatura do dia e a radiação total recebida são fornecidas para cada hora do dia médio pela biblioteca meteorológica METEONORM; as simulações foram realizadas para um ângulo de incidência de 10° e a temperatura inicial da água de alimentação do sistema foi considerada igual a 25 °C. Foram tomadas amostras aleatórias de seis temperaturas para cada dia central de cada mês para cálculo da temperatura média do dia.

As simulações mostram que a geração direta de vapor é possível durante vários meses do ano, especialmente naqueles que compõem a primavera e o verão austrais, e também durante alguns meses de estiagem da região do cerrado onde se situa a cidade de Belo Horizonte.

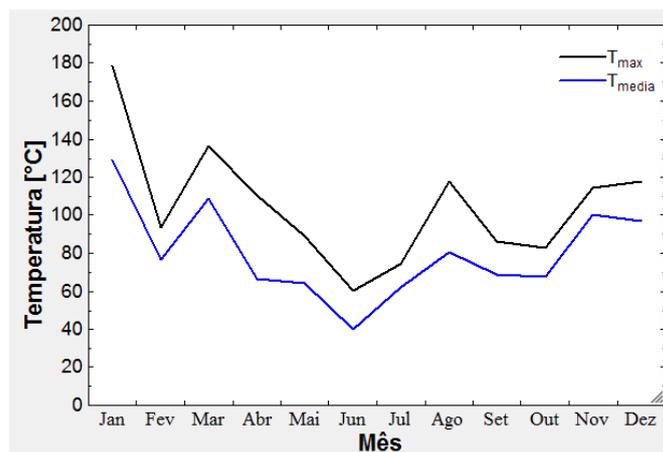


Figura 6 – Temperaturas de saída do sistema gerador de vapor e temperaturas médias referentes ao ano médio típico.

Os resultados mostram que nem sempre o sistema proposto será capaz de fornecer quantidades significativas de vapor, ou mesmo algum vapor durante os meses mais frios do ano conforme dados apresentados na Tab. 1. Deste modo, o uso de sistemas de geração elétricos ou a gás não poderá ser completamente eliminado do sistema de operação de uma sauna, mas é possível minimizar a necessidade de seu uso em prol de um sistema de geração completamente limpo e renovável através o uso de água previamente aquecida.

Tabela 1 – Temperaturas máximas e médias do sistema de aquecimento ao longo do ano médio típico

Mês	T _{max} (°C)	T _{média} (°C)
Jan	178,4	129,1
Fev	93,4	76,7
Mar	136,6	108,7
Abr	110,2	66,6
Mai	88,8	64,2
Jun	60,2	39,9
Jul	74,1	62,2
Ago	118,0	80,5
Set	86,4	67,0
Out	83,1	67,6
Nov	114,6	100,1
Dez	118,0	96,8

3.2. Medições de campo

Para realização das simulações, os coletores foram montados a um ângulo de 10°, conforme recomendam Bracamonte et al. (2015) com azimute igual a 180°. Em todos os testes, os tubos coletores foram cheios até o limite recomendado pelo fabricante, enquanto a válvula de entrada de água de alimentação foi mantida fechada até que a água dos tubos atingisse seu ponto de ebulição que, na cidade de Belo Horizonte, cuja altitude é de 852,19 m nos dias simulados foi (98,1 ± 0,9)°C. Ao atingir-se o ponto de ebulição a válvula foi então aberta para alimentar os coletores com a já referida vazão de 0,44 l/h ± 0,1 l/h para cada tubo operando em paralelo, ou para cada série de tubos.

As medições aqui apresentadas foram realizadas tanto para dias com alto índice de insolação quanto para dias fortemente nublados e são referentes aos dias 04, 06, 09, 12 e 13 do mês de novembro do ano de 2015. Foram realizadas, no total, vinte e uma horas de medições, o que resultou numa amostra de cento e cinco medições de temperatura de saída do protótipo.

A irradiância (W/m²) recebida pelo coletor durante as horas de operação são fornecidos por INMET (i.e., Instituto Nacional de Meteorologia) (2015), coletados pela estação automática “Cercadinho”, localizada a aproximadamente 2,5 km de distância do local de realização do experimento. São também dados do INMET (2015) a temperatura média horária e temperatura máxima do dia. A incerteza referente às medições de temperatura e da radiação recebida não é claramente informada pelo INMET (2015), deste modo, a incerteza apresentada para a temperatura média do dia se refere apenas à distribuição normal das temperaturas ao longo do período de experiência com intervalo de confiança de 95%. O tempo de experimentação foi diferente nos diferentes dias de teste devido à ocorrência de tempestades e, até mesmo, à quebra dos coletores por impacto.

3.3. Modelo Matemático

O calor útil gerado é a medida da capacitância térmica do fluido e é dado por:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (2)$$

Onde \dot{m} é a vazão mássica de fluido 0,44 kg/h, C_p é o calor específico à pressão constante da água em (J/kg.K) e ΔT a variação de temperatura da água obtida em uma hora ou, em 3.600 segundos. A eficiência do equipamento pode ser calculada através de dados da irradiância (W/m²) fornecidos por INMET (i.e., Instituto Nacional de Meteorologia) (2015). Essa é dada pela Eq. 3:

$$\eta = \frac{\dot{Q}}{I \cdot a} \quad (3)$$

Onde \dot{Q} é o calor útil gerado pelo sistema, I a irradiância referente a cada hora do período de experimentação e a é a área do coletor do protótipo que, conforme anteriormente mencionado, é de 0,33 m². Este sistema foi comparado a uma sauna elétrica convencional cuja alimentação seja feita por um gerador de vapor condensador comercial monofásico cujo consumo de potência elétrica é $\dot{Q}_e = 12 \text{ kW}$ e força eletromotriz requerida é $F.E.M. = 220 \text{ V}$.

A sauna solar aqui proposta supostamente opera 8 horas por dia e, tomando-se a hipótese conservadora de que o sistema seja completamente autônomo apenas durante as duas horas de maior insolação do dia e opere à temperatura média do fluido (72,6°C ± 3,7 °C) medida durante os experimentos nas demais horas, utilizando-se, para isso, um sistema elétrico auxiliar que garanta a ebulição do fluido. Sua área de coletores solares deve ser a área comercial mais próxima àquela da área ótima de coleção, conforme mencionado anteriormente, 2,99m². Isso equivale a 18 tubos comerciais operando em paralelo ou 9 séries de dois tubos. A vazão experimentada para cada tubo operando em paralelo ou para cada série de tubos é 0,44 l/h ± 0,1 l/h. A vazão total adequada à essa área de coleção operando em

paralelo então deverá ser de $7,92 \text{ l/h} \pm 0,01 \text{ kg/h}$, ou de $3,96 \text{ l/h} \pm 0,01 \text{ kg/h}$ operando em série. Além disso, é interessante considerar que o sistema real somente seja capaz de atingir a temperatura de ebulição durante seis meses do ano. Tal consideração baseia-se nos resultados das simulações computacionais, que são explicitados em Tab. 1. Segundo estes resultados, a temperatura de saída da água dos coletores não será suficiente para iniciar a ebulição durante os meses de fevereiro, maio, junho, julho, setembro e outubro. Assim, é aceita a hipótese de que o sistema opere constantemente auxiliado por evaporador elétrico. Desse modo, o cálculo do custo anual do sistema solar deve ser feito em duas etapas. A primeira delas é referente aos meses em que a sauna é capaz de gerar vapor e possui uma certa autonomia. Isso ocorre durante 184 dias do ano conforme Tab. 1. Deste modo a equação que descreve o consumo da sauna solar tem a forma:

$$C_1 = k * n * t * \dot{Q}_{s1} \quad (4)$$

Onde C_1 é o custo referente aos meses do ano em que as simulações computacionais indicam que a ebulição pode ocorrer, k é o custo do kWh com base na tarifa B3 da Cemig (i.e; Companhia Energética de Minas Gerais) (2015); n o número de dias do ano, t o tempo diário, em horas, de operação do sistema solar, no caso 5 horas; e \dot{Q}_{s1} é a potência elétrica requerida para elevar a temperatura média do fluido até a temperatura média de ebulição. Deste modo \dot{Q}_{s1} no regime permanente é descrito por:

$$\dot{Q}_s = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{ebulição} - T_{média}) \quad (5)$$

$$\dot{Q}_s = 0,44 \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right) \cdot \frac{1}{3600} \left(\frac{\text{h}}{\text{s}}\right) \cdot 1478 \left(\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right) \cdot [(99,0 - 68,9) + 273 \text{ (K)}] \quad (5a)$$

$$\dot{Q}_s = 0,44 \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right) \cdot \frac{1}{3600} \left(\frac{\text{h}}{\text{s}}\right) \cdot 1478 \left(\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right) \cdot [(97,2 - 76,3) + 273 \text{ (K)}] \quad (5b)$$

A equação 5a refere-se aos limites superiores da temperatura de ebulição e da temperatura média, ou seja, a maior diferença de temperatura possível dentro do intervalo de confiança. A equação 5b refere-se aos limites inferiores da temperatura de ebulição e da temperatura média, ou seja, a menor diferença de temperatura possível dentro do intervalo de confiança. O cálculo da potência requerida para os demais 181 dias do ano é feito de maneira análoga, no entanto, considera-se que o tempo de operação do gerador de vapor condensador é de 8 horas diárias, conforme mencionado anteriormente. O termodinâmico utilizado para cálculo das grandezas de interesse deste estudo é demonstrado por Moran e Shapiro (2006).

4. RESULTADOS

Os resultados obtidos mostram que, para ambos os tipos de arranjo, série ou paralelo, foi possível gerar vapor, mesmo em dias de grande nebulosidade. A Tab.2 apresenta os resultados de experimentos realizados durante o mês de novembro do ano de 2015. As temperaturas médias dos dias experimentados apresentadas por Tab.2 foram calculadas com base na temperatura média das horas de experimentação. As medições de temperatura do fluido foram tomadas na saída dos coletores, em intervalos constantes de 15 minutos, e totalizaram 105 medições. A Temperatura máxima do fluido apresenta incerteza indicada pelo fabricante do instrumento de medição mostrado em Fig. 4.

Tabela 2 – resultados das simulações de campo

Dia	Característica	Temperatura Média do Dia (°C)	Temperatura Máxima do Dia (°C)	Temperatura Máxima do Fluido (°C)	Temperatura Média do Fluido (°C)	Calor Útil Gerado (W/m²)	Rendimento Médio Diário (%)	Ocorrências
04/nov	Arranjo em série Dia claro	30,2±1,1	31,7	98,0 ± 0,1	87,6±6,6	9,87 ± 18,25	0,97 ± 1,81	Tempo Total de simulação: 2:15 Ponto de ebulição 97,8°C Os coletores se romperam por impacto forçando o fim da simulação
06/nov	Arranjo em paralelo Dia parcialmente nublado	30,4 ± 0,5	31,5	98,5 ± 0,1	88,6 ± 6,0	7,11 ± 13,74	0,49 ± 2,08	Tempo Total de simulação: 5:30h Ponto de ebulição 98,5°C Tempo Total de sombreamento: 2:30h
09/nov	Arranjo em paralelo Dia nublado	23,3 ± 1,4	26,1	88,0 ± 0,1	59,2 ± 7,8	10,28 ± 5,69	2,35 ± 1,70	Tempo Total de simulação: 6:15h Ponto de ebulição 98,5°C Tempo Total de sombreamento: 6:15h
12/nov	Arranjo em paralelo Dia nublado	28,4 ± 0,6	29,1	67,6 ± 0,1	62,8 ± 2,4	1,78 ± 16,54	0,23 ± 2,35	Tempo Total de simulação: 3:30h Não houve ebulição Tempo Total de sombreamento: 2:30h Tempestades forçaram o fim da simulação
13/nov	Arranjo em série Dia Nublado	28,8 ± 1,1	29,9	98,2 ± 0,1	79,0 ± 11,7	14,58 ± 24,18	1,71 ± 2,66	Tempo Total de simulação: 3:15h Ponto de ebulição 98,1°C Tempo Total de sombreamento: 0:30h Tempestades forçaram o fim da simulação

Os valores de temperatura média do fluido ao longo do dia foram medidos na saída dos coletores e são apresentados na Tab. 2 com incerteza combinada de medição $\pm 5\%$. Os resultados obtidos mostram que, tanto durante as simulações com arranjo em série dos coletores quanto aquelas com arranjo em paralelo, foi possível se gerar vapor, mesmo em dias parcialmente nublados. O comportamento dinâmico dos sistemas diferiu no fato de que houve a formação de um bolsão de vapor na área de curvatura da tubulação de interligação dos coletores quando montados em série, o que se tornou um obstáculo ao fluxo de fluido. Deste modo, houve necessidade de se instalar um suspiro na parte mais alta da tubulação de ligação entre o coletor de pré-aquecimento e o de evaporação. As temperaturas atingidas foram bastante similares em ambos os casos. No entanto, o arranjo em série demonstrou ter a capacidade de iniciar o processo de ebulição mais rapidamente se comparado ao arranjo em paralelo. Este fenômeno, juntamente com a influência da formação de bolsões de vapor na tubulação da sauna além uma análise do desempenho do sistema operando com outros ângulos de inclinação são de interesse dos autores e serão objetos de estudos futuros.

Os resultados obtidos pelo experimento diferem consideravelmente daqueles obtidos em simulações computacionais, e isso pode, em parte, ser atribuído ao fenômeno do El Niño experimentado pela América do Sul no segundo semestre de 2015. A Organização Meteorológica Mundial (2015) alerta que nesse ano o El Niño será o mais forte dos últimos 65 anos, tornando o ano de 2015 um ano atípico. Esse fenômeno pode ter interferido diretamente na eficiência do experimento. Observa-se em Tab. 3 que o protótipo permaneceu sombreado durante 57,83% do tempo de simulação, o que pode ter tido influência na temperatura média de saída do fluido.

Tabela 3 – Temperaturas médias de saída e ebulição e tempo de sombreamento

Temperatura Média de Ebulição	98,1 \pm 0,9 °C
Temperatura Média do Fluido	72,6 \pm 3,7 °C
Tempo Percentual de sombreamento	57,83%

Ainda assim os resultados obtidos são positivos. Uma análise financeira realizada com base nos resultados dos testes em campo mostra que, em comparação a uma sauna elétrica comercial, a Tab. 4 mostra ainda o custo anual máximo de operação da sauna, calculado para o limite inferior do intervalo de confiança da temperatura média do fluido.

Tabela 4 – Custos anuais de operação

Operação em Paralelo		
	Custo Sauna Solar	Custo Sauna Elétrica
limite superior	R\$ 401.36	R\$ 19,438.09
limite inferior	R\$ 252.72	
Operação em Série		
	Custo Sauna Solar	Custo Sauna Elétrica
limite superior	R\$ 200.68	R\$ 19,438.09
limite inferior	R\$ 126.36	

Na hipótese deste sistema ser aplicado a saunas secas o sistema é autossuficiente ao longo de todo ano, já que este recebe calor de um radiador térmico. É indispensável que este sistema disponha de um dispositivo controlador de temperatura para que a mesma não ultrapasse 60 °C garantindo a segurança do usuário da sauna.

5. CONCLUSÃO

O estudo apresentado investigou o uso de coletores solares do tipo tubo evacuado water-in-glass na geração de vapor para alimentação de saunas a vapor, aqui denominadas saunas solares. Seu funcionamento foi simulado através de métodos computacionais e, também testes em campo. Foi Proposto um sistema de tubos conectados em série e outro em paralelo. Simulações realizadas mostram que o protótipo pode operar de maneira autônoma, ou seja, sem a necessidade de sistemas elétricos auxiliares, durante aproximadamente metade do ano no caso de saunas a vapor e durante todo o ano no caso de saunas secas. Foi possível, através deste sistema, obter um grande ganho energético no suprimento da demanda energética de uma sauna comercial convencional. O custo de um feixe de tubos coletores de 2,99m² de área é de aproximadamente R\$ 3.200,00; o que transforma o sistema num investimento altamente interessante.

É necessário que haja cada vez mais esforços por parte da sociedade, de governos e na comunidade científica no sentido de que informações a respeito de energias limpas e renováveis sejam mais amplamente difundidas e sua tecnologia se torne cada vez mais acessível.

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Paulo Eduardo Lopes Barbieri pela e ao Prof. Dr. André Guimarães Ferreira pela orientação.

À Escola Estadual Técnico Industrial Professor Fontes por gentilmente ceder o uso de seus laboratórios e demais dependências aos autores.

Ao Sr. Eng^o. Flávio Pacelli Ziviani de Oliveira e ao Sr. Marcos Thalles Ferreira Melo pelo suporte técnico sem o qual este trabalho não seria possível.

REFERÊNCIAS

- Alfaro-Ayala J. A., Martínez-Rodríguez G., Picón-Núñez, M., Uribe-Ramírez A. R., Gallegos-Muñoz A., 2015. Numerical Study of a Low Temperature Water-in-glass Evacuated Tube Solar Collector. *Energy Conversion and Management Journal*, ed. 94, págs.472–481.
- Morrison, G.L., Budihardjo I., Behnia M., 2004. Water-in-glass evacuated tube solar water heaters. *Solar Energy* edição 74; págs 135–40.
- Lin W. M., Chang K.C., Liu Y. M., Chung K. M., 2012. Field Surveys of Non-Residential Solar Water Heating Systems in Taiwan. *Energies Journal*, ed. 5, págs.258–69.
- Li R., Dai Y., Wang R., 2015. Experimental investigation and simulation analysis of the thermal performance of a balcony wall integrated solar water heating unit. *Renewable Energy*; 75:115–22.
- Giostrì, A., Binotti M., Astolfi M., Silva P., Macchi E., Manzolini G., 2012. Comparison of Different Solar Plants Based on Parabolic Trough Technology. *Solar Energy Journal*, ed. 86, págs 1208–1221.
- Bracamonte J., Parada J., Dimas J., Baritto M., 2015. Effect the Collector Tilt Angle on Thermal Efficiency and Stratification of Passive Water in Glass Evacuated Tube Solar Water Heater. *Applied Energy Journal*, ed. 155, págs 648–659.
- Duffie J. A., Beckman W. A., 2006. *Solar Engineering of Thermal Processes – Gear Team*. 4^a ed, John Wiley & Sons Ltd.
- Moran M.J., Shapiro, H. N., 2006. *Princípios de Termodinâmica Para Engenharia* - 5^a Ed, LTC.
- Instituto Nacional de meteorologia, 2015. Estações Automáticas em Belo Horizonte. Disponível em <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>>. Visitado em 22 de novembro de 2015
- Organização Meteorológica Mundial, 2015. El Niño Expected to Strengthen Further: High Impacts, Unprecedented Preparation. Disponível em: <<https://www.wmo.int/media/content/el-ni%C3%B1o-expected-strengthen-further-high-impacts-unprecedented-preparation>>. Visitado em 24 de novembro de 2015
- Companhia Energética de Minas Gerais, 2015. Valores De Tarifa e Serviços. Disponível em <https://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Paginas/valores_de_tarifa_e_servicos.aspx>. Visitado em 25 de novembro de 2015,

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ASSESMENT OF THE PERFORMANCE OF WATER-IN-GLASS EVACUATED TUBE COLLECTORS IN STEAM GENERATION FOR SAUNAS

Abstract: *This study proposes the use of water-in-glass evacuated solar collectors, commonly applied to hot water production, in the generation of saturated steam to supply the thermic demand of wet saunas. This paper presents system performance simulations in steam generation and also a mathematical model that represents the maximum temperature achieved by the system depending on the collection area for the flow rate of 0,44 l / h. Experimental tests were performed to validate data obtained from numerical simulation using TRNSYS platform (i.e., TRAnsient SYStem Simulation). Economic analysis was performed in order to determine monetary saving provided by the solar system compared to a conventional electric sauna, based on taxes charged by CEMIG (i.e., Companhia Energética de Minas Gerais) in the second half of 2015. The system was able to generate saturated water steam for supplying the steam demand of the system in six month of the year. The maximum temperature of boiling water reached by the system was $98.13^{\circ} C \pm 0.87^{\circ} C$, and the average temperature of fluid obtained was $72.6^{\circ} C \pm 3.66^{\circ} C$.*

Keywords: *water-in-glass evacuated tube solar collector, steam generation, sauna.*