

PROJETO DE CLIMATIZAÇÃO DE ALTO DESEMPENHO PARA ADEGA DE CACHAÇA

Tomaz Silva Gonzales – tomaz.bsb@gmail.com

João M. D. Pimenta – pimenta@unb.br

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica

LaAR - Laboratório de Ar Condicionado e Refrigeração, www.facebook.com/UnB.LaAR

A2 - Aplicações Industriais e Especiais

Resumo. *Um novo sistema de climatização para adega de cachaça, utilizando soluções passivas e ativas de resfriamento é apresentado neste artigo. O sistema é composto de um poço provençal e chaminé solar como soluções passivas, e um módulo evaporativo como solução ativa. O sistema é simulado matematicamente, através de modelos teóricos de todas as soluções, separadamente e conjuntamente. Assim, a temperatura interna, a umidade relativa e a vazão mássica de ar no interior da adega é obtida e avaliada. Os efeitos nessas condições ambientais são estudados, através da alteração nas configurações físicas das soluções de climatização implementadas. Como resultado, o sistema apresentado demonstra a capacidade de manter as condições requeridas para uma adega de envelhecimento em barris de madeira, mantendo níveis constantes e aceitáveis de temperatura e umidade relativa.*

Palavras-chave: *Poço provençal, Chaminé Solar, EnergyPlus, Envelhecimento de Cachaça.*

1. INTRODUÇÃO

A cachaça é o terceiro destilado mais consumido no mundo, e a segunda bebida mais consumida no Brasil, perdendo apenas para a cerveja. Segundo o Ministério da Agricultura e Pecuária, o Brasil possui em torno de 2000 produtores de cachaça devidamente registrados, com mais de 4 mil rótulos disponíveis no mercado. A produção anual de cachaça gira em torno de 1,3 bilhão de litro por ano, sendo o brasileiro o principal consumidor em quase sua totalidade, com estimativas de consumo por volta de 11,5 litros por consumidor em 2017 (EXPOCHACAÇA,2017).

De acordo com dados da IBRAC, o mercado da cachaça movimentava cerca de R\$ 1,4 bilhão, gerando mais de 600 mil empregos diretos e indiretos, localizados principalmente nos Estados de Minas Gerais, São Paulo, Rio de Janeiro, Ceará, Paraíba e Pernambuco. Em 2014, o Brasil exportou por volta de 1% a 2% da produção nacional de cachaça para 66 países, sendo os principais importadores a Alemanha e os Estados Unidos da América (EUA), contando com um programa de promoção comercial da Agência Brasileira de Promoção de Exportações e Investimentos (Apex), através de um convênio de mais de 40 empresas, prevendo um investimento de R\$ 1,6 milhão.

O envelhecimento da cachaça vem sendo adotado por diversas empresas em seu processo produtivo, para aumentar sua competitividade e atender um mercado cada vez mais exigente. A armazenagem da cachaça em barris de madeira contribui para apurar a suavidade do sabor alcoólico caracteristicamente forte da cachaça, aumentando sua doçura e gerando uma leve sensação amadeirada no produto, o que contribui para a experiência em degustação do produto (FARIA, 1999). Pelo fato de aumentar seu valor agregado, a cachaça envelhecida torna-se um produto ainda mais atrativo para o mercado de exportação e para a produção de cachaças especiais.

Segundo o Manual de Eficiência Energética em Adegas, do projeto Tesla, a etapa onde a bebida é armazenada possui um consumo energético relevante no consumo total ao longo da cadeia de produção do produto. As soluções ativas de climatização são as principais responsáveis pelo consumo energético das adegas para o envelhecimento da bebida, principalmente em regiões de clima quente e seco. Assim, são necessárias soluções tecnológicas para aumentar a eficiência desta etapa, e a aplicação de soluções passivas de climatização é uma solução viável para o contexto tecnológico brasileiro. Com isso, o consumo energético em adegas pode ser reduzido sem gerar altos custos de instalação e execução.

Assim, a utilização de uma solução integrada e otimizada de estratégias passivas de climatização, em conjunto de um sistema ativo eficiente é de grande relevância para a redução do consumo energético em qualquer tipo de edificação. Adicionalmente, as soluções passivas podem ser utilizadas do pequeno ao grande produtor, pois esta utiliza conceitos básicos como sombreamento, ventilação natural, isolamento térmicos, etc. Portanto, com um projeto cuidadoso, a economia no consumo energético pode ser proeminente para cachaças envelhecidas em barris, armazenadas em adegas.

2. CASO DE ESTUDO

O objeto que será estudado será uma adega que terá o fim de armazenar toneis de madeira para o armazenamento de cachaça com o objetivo de envelhecimento da bebida. Esta adega deverá ser capaz de atender as condições necessárias para um correto armazenamento durante todo o processo de alocação, envelhecimento e retirada do produto neste ambiente. As condições ambientais internas são de umidade relativa alta e constante acima de 70% e preferivelmente abaixo de 90% e temperatura do ambiente sem grandes flutuações, em torno de 22°C com uma tolerância de 2,5°C, de acordo com as melhores práticas de envelhecimento de cachaça, o que depende de cada produtor. O projeto arquitetônico da

adega foi realizado por um arquiteto(a), e suas características são suficientes para atender o volume de estoque necessário para esta etapa na produção da cachaça. Cabe ressaltar que este projeto possui caráter multidisciplinar, onde o resultado será condicionado pelas qualidades de projeto de cada disciplina envolvida, respeitando a área de cada profissional e estudante envolvidos e conciliando partes em comum, com o objetivo de criar um ambiente ideal para o envelhecimento da bebida, de baixo custo construtivo e operacional, e que atenda todas as especificações envolvidas.

2.1 Localização e Dados Climáticos

A localização escolhida para a instalação desta adega será a cidade de Taiobeiras, no estado de Minas Gerais, Brasil. Também conhecida como a capital da cachaça, parte da região de Taiobeiras-MG obteve Indicação Geográfica (IG) de procedência para a produção de cachaça, agregando valor e segurança à bebida.

Os dados climáticos utilizados neste projeto foram obtidos através de arquivos climáticos a partir de estações climatológicas do INMET entre os anos de 2000 e 2010. O arquivo contém algumas variáveis de interesse: temperatura do ar, umidade relativa, temperatura do ponto de orvalho, pressão atmosférica, velocidade e direção do vento e irradiâncias solar e iluminâncias.

2.2 Características do Solo

Segundo o mapa de solos consultado Sistema Brasileiro de Classificação de Solos desenvolvido pela EMBRAPA, a cidade de Taiobeiras se situa em uma região que possui o tipo de solo LAd1, denominado latossolo amarelo distrófico. Este é um tipo de solo de cor amarelada, sendo uniforme ao longo de sua profundidade, o que ocorre também com seu teor de argila. Outro importante aspecto é sua boa retenção de umidade, sendo considerado um solo com boa permeabilidade.

2.3 Dados do Projeto Arquitetônico da Adega

Consiste de um galpão que funcionará como adega para armazenar barris de madeira utilizados para o envelhecimento da cachaça. A adega terá espaço suficiente para a entrada dos barris, alocação e retirada, sem limitar a movimentação dos funcionários, visando a segurança e ergonomia durante o processo de transporte dos tonéis. O espaço interno terá 6,70 metros de comprimento por 3,75 de largura. A altura da parede da adega será de 2,40 metros e a inclinação do telhado será de 50 graus.

Para melhor visualização, um modelo em três dimensões também foi realizado pelo software Sketchup (Fig. 1). Uma das soluções de climatização (chaminé solar) já foi previamente modelada nesta representação e detalhada em corte para facilitar a visualização de sua construção na adega.

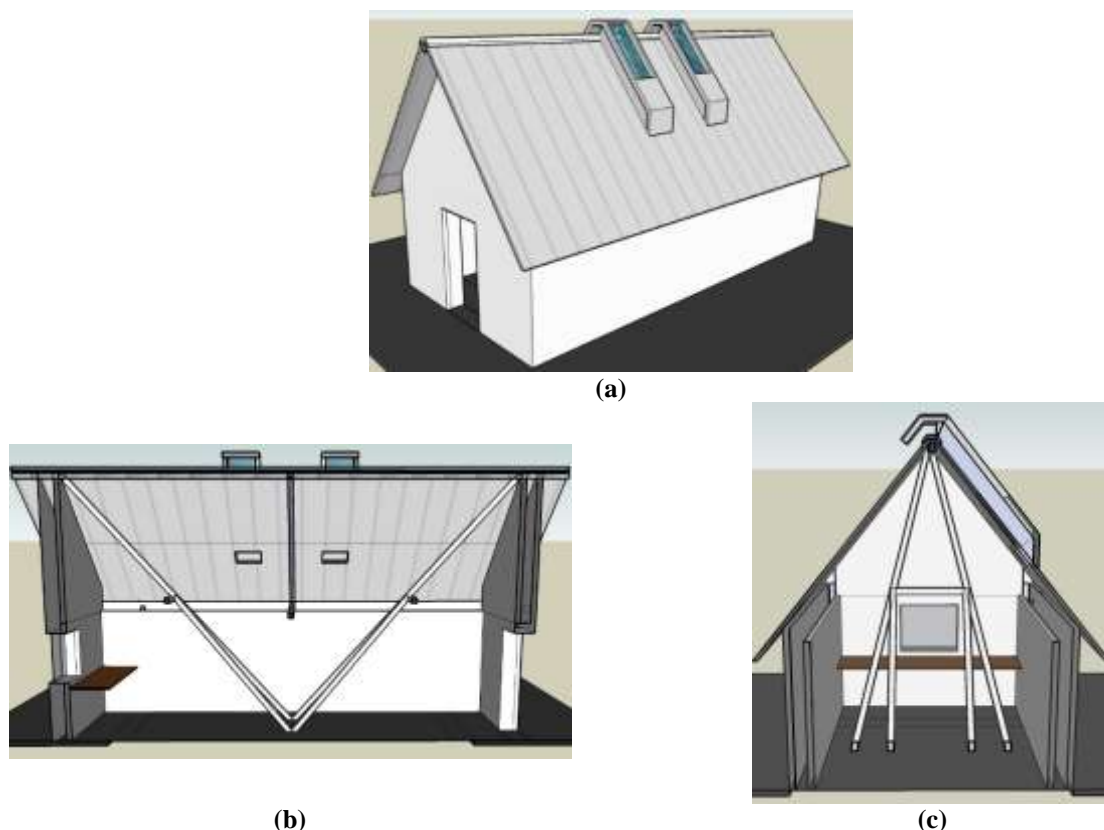


Figura 1. Modelo tridimensional da adega proposta. (a) perspectiva, (b) corte lateral, (c) corte transversal

3. SOLUÇÕES DE CLIMATIAÇÃO PASSIVAS ADOTADAS

As estratégias passivas adotadas neste projeto são o poço provençal e a chaminé solar. Estas duas soluções foram escolhidas, pois o poço provençal diminui consideravelmente a flutuação da temperatura de ar de entrada no ambiente interno, quando comparado com a ventilação natural direta, através de grandes aberturas (Fig. 2).

Para a circulação de ar no poço provençal, é necessária uma força de sucção externa, gerada por meios passivos ou ativos. Como neste projeto buscasse a avaliação de um sistema de climatização passivo e ativo, mas com a mínima utilização deste, selecionou-se a chaminé solar para realizar a força de sucção demandada pelo poço provençal, e sua força de empuxo é gerada pela diferença de temperatura entre o ar que entra na chaminé solar e o ar de saída.

O modelo matemático foi desenvolvido a fim de avaliar todos os cenários e configurações físicas possíveis, com o objetivo de otimizar o sistema para uma situação real. Pela complexidade do modelo, será utilizada ferramentas computacionais para realizar os cálculos necessários apresentados neste capítulo.

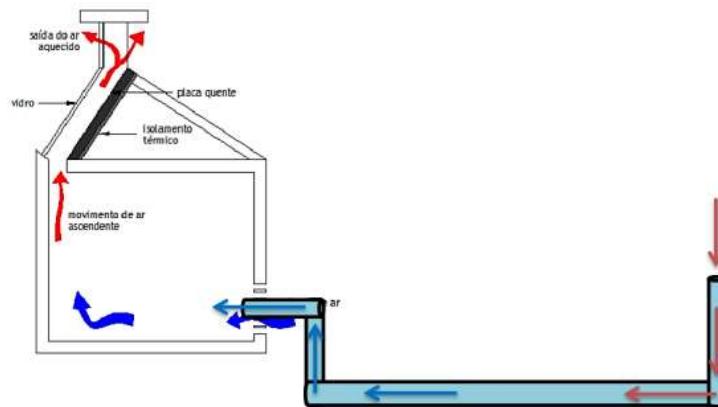


Figura 2. Representação das soluções passivas utilizadas na adega.

3.1 O Poço Provençal

O poço provençal, também conhecido por poço canadiano ou trocador de calor solo-ar, é uma solução de climatização passiva que consiste no aproveitamento da energia térmica do solo a uma certa profundidade, transferindo calor ao ar exterior que passa dentro destes tubos instalados no subsolo. Uma das características do solo é sua inércia térmica, onde as flutuações de temperaturas ao longo do dia são consideravelmente menores comparados com a temperatura do ar na superfície. Outra característica é seu atraso térmico temporal, sendo que a temperatura do solo não acompanha a tendência da temperatura do ar externa ao longo do ano, sendo que no verão o solo mantém-se frio e no inverno, quente.

O modelo adotado neste trabalho foi desenvolvido por Lee e Strand (2009, 2010), implementado no programa EnergyPlus. Certas simplificações foram consideradas para que o tempo de simulação fosse mais rápido e para que os dados de entrada fossem reduzidos. Tais simplificações são apresentadas em Gonzales (2017).

3.1.1 Temperatura do Solo

Primeiramente, deverá ser calculado a temperatura do solo ao redor do tubo, tendo como base da equação desenvolvida a expressão da temperatura de superfície do solo. A análise que leva a equação requerida (Eq. 1) envolve a avaliação da transferência de calor convectivo, a absorção da radiação solar pelo solo, a radiação de onda longa emitida pelo solo, e o calor latente perdido devido a evaporação. Assumindo uma constante de difusividade térmica do solo como homogênea, a temperatura do solo em qualquer profundidade z e tempo t pode ser estimado através da expressão:

$$T_{solo} = T_m - A_s \exp \left[-z \left(\frac{\pi}{365 \alpha_s} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \cos \left\{ \frac{2\pi}{365} \left[t - t_0 - \frac{z}{2} \left(\frac{365}{\pi \alpha_s} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\} \quad (1)$$

onde,

- α_s difusividade térmica do solo.
- A_s amplitude da temperatura de superfície do solo.
- Z profundidade do tubo.
- t_0 Constante de fase da temperatura de superfície do solo.

A difusividade térmica do solo depende do tipo do solo. O solo da região do município de Taiobeiras/MG se aproxima do tipo “Heavy and Dump”, e sua superfície do tipo “Covered and Moist”. Usando então o programa utilitário CalcSoilSurfTemp, responsável pelo cálculo de três parâmetros importantes para a simulação dos poços canadianos: (i) Temperatura média anual da superfície do solo; (ii) Amplitude média da superfície do solo, e; (iii) Constante de fase da temperatura de superfície do solo.

3.1.2 Modelo Matemático para o Poço Provençal

Para calcular a troca de calor entre a tubulação enterrada, o solo e o ar em seu interior, o coeficiente de transferência de calor global foi calculado para uma análise das resistências térmicas envolvidas (Fig. 3).

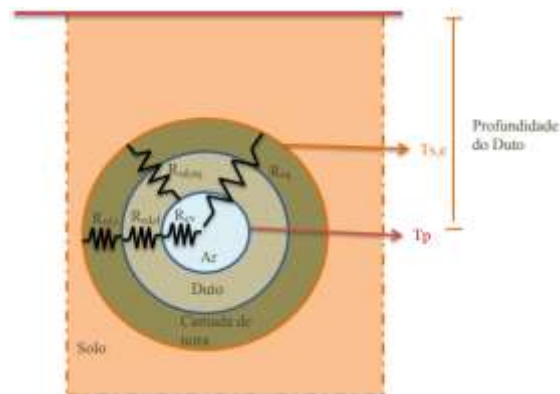


Figura 3. Resistências térmicas para cada seção do tube e do solo.

Então, a transferência de calor entre o solo e o ar dentro da tubulação, para um comprimento diferencial, é igual a quantidade de calor armazenado pelo ar, resultando em uma temperatura uniforme ao longo do comprimento do tubo, simplificando o modelo,

$$U_t dy [T_a(y) - T_{z,t}] = -\dot{m}_a C_a [dT_a(y)] \quad (2)$$

onde y é o comprimento da tubulação (variável).

A temperatura de saída do ar da tubulação é avaliada, considerando que a temperatura do ar de entrada da tubulação ($y=0$) é igual à temperatura do ar externa (ambiente). Assim, integrando os dois lados da equação 4.10, a seguinte expressão pode ser obtida:

$$U_t y = -\dot{m}_a C_a \ln |T_a(y) - T_{z,t}| + C \quad (3)$$

onde, pela condição de contorno $T_a(0) = T_{am}$, temos,

$$C = \dot{m}_a C_a \ln |T_{am} - T_{z,t}| \quad (4)$$

Assim, o valor da temperatura em função ao comprimento da tubulação pode ser finalmente avaliado através da resolução da temperatura do ar interno da tubulação $T_a(y)$, para o ar de saída da tubulação onde $y=L$ para os casos em que $T_{am} > T_{(z,t)}$, $T_{am} = T_{(z,t)}$ e $T_{am} < T_{(z,t)}$ descritos em Gonzales (2017)

Observe-se que o uso de uma única tubulação pode gerar dificuldades para a execução do projeto, por require longos comprimentos de tubulação, causando maiores quedas de pressão. A solução proposta será o uso de um circuito em paralelo, cuja representação e equacionamento de vazões e perdas de carga decorrentes de tal arranjo é apresentado em Gonzales (2017).

3.2 Chaminé Solar

Uma chaminé solar é basicamente um canal de seção retangular, existindo um fluxo de ar interno causado pela diferença de densidade do ar entre a entrada e a saída deste canal (Fig. 4). Esta diferença de densidade é criada através da captação da energia solar incidente direta em uma das faces do canal. Normalmente usa-se uma cobertura transparente em uma face e uma superfície absorvedora na outra face do canal.

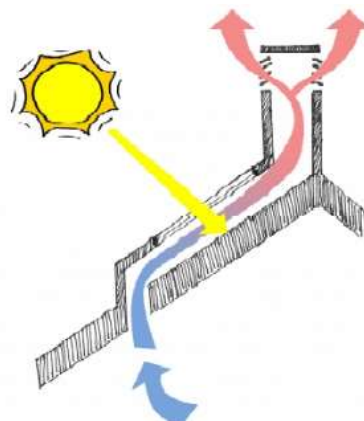


Figura 4. Representação do funcionamento da chaminé solar inclinada.

O objetivo da chaminé solar é gerar uma circulação de ar de dentro do local em estudo para o ambiente externo através da diferença de pressão gerado dentro da chaminé. Esta é uma solução passiva, já que gera uma ventilação natural sem o uso de fontes mecânicas que consomem energia. Para este objetivo ser alcançado, o projetista deverá encontrar a configuração ideal levando em conta diversas configurações da chaminé e da localização geográfica.

Vários métodos foram desenvolvidos para avaliar o desempenho de chaminés solares. O método utilizado é o analítico que considera simplificações do sistema para desenvolver um modelo matemático confiável, com o objetivo de avaliar o sistema para diversos casos de estudo. Neste trabalho adotou-se um modelo analítico baseado nos trabalhos de Mathur, et al, 2006, onde um modelo foi desenvolvido para prever o fluxo de massa de uma chaminé solar inclinada. As simplificações aplicáveis são descritas em Gonzales (2017).

A Figura 5 (a) resume como funciona a transferência de calor em uma chaminé solar, mostrando os coeficientes de transferência de calor envolvidos e as temperaturas que serão avaliadas. Basicamente, o balanço energético da chaminé solar pode ser resumido em um circuito elétrico, abordado na Fig. 5 (b), que será dividido no balanço da cobertura transparente, do ar dentro da chaminé e da parede absorptiva para avaliar as 3 temperaturas desconhecidas.

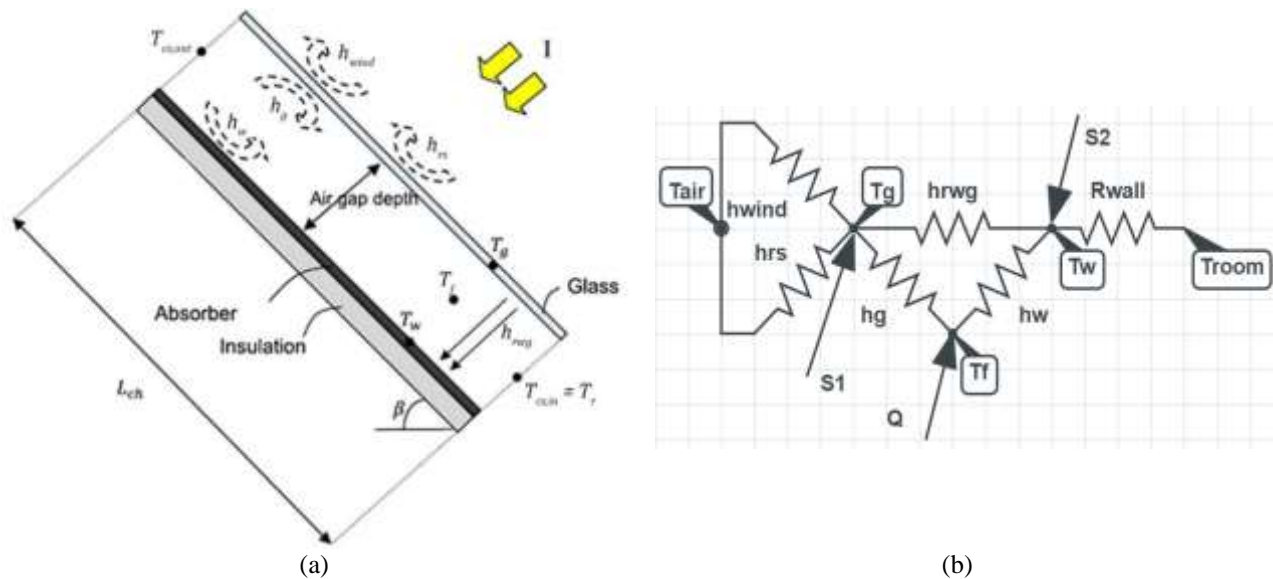


Figura 5. Análise da transferência de calor na chaminé solar. (a) Diagrama esquemático adotado no balanço de energia; (b) Representação do circuito elétrico análogo para estudo das trocas de calor na chaminé solar

3.2.1 Balanço de Energia para a Cobertura Transparente

Esta equação será o equilíbrio entre a soma da radiação solar incidente mais o ganho de calor por radiação da cobertura transparente devido a parede absorptiva, igual ao resultado dos coeficientes de perda de calor no ar interior no canal mais o resultado dos coeficientes de perda de calor entre a cobertura e o ambiente externo. Esta equação pode ser escrita como:

$$S_1 A_g + h_{rwg} A_w \cdot (T_w - T_g) = h_g A_g (T_g - T_f) + U_{tcs} A_g (T_g - T_{air}) \quad (5)$$

sendo,

- U_{tcs} coeficiente de perda de calor do vidro para o ambiente;
- S_1 fluxo de calor da irradiação solar absorvido pela cobertura transparente;
- h_{rwg} coeficiente de transferência térmica por radiação vidro/parede;
- h_g coeficiente de transferência térmica convectiva ar/vidro.
- α_1 absorptância térmica da cobertura transparente (0,06)

3.2.2 Balanço de Energia para o Ar dentro da Chaminé

Esta equação será o equilíbrio entre a convecção na parede absorptiva mais a convecção na parede transparente, igual ao ganho de calor pelo ar ao longo do canal da chaminé. A transferência de calor da cobertura transparente e da parede absorptiva para o fluxo de ar dá-se através da convecção natural. Esta equação pode ser escrita como:

$$h_w A_w (T_w - T_f) + h_g A_g (T_g - T_f) = \frac{\dot{m}_a C_{p1} (T_{fo} - T_r)}{\gamma} \quad (6)$$

sendo, $h_w = h_g$ com a diferença ser utilizado a média entre a temperatura da parede absorptiva e a temperatura do ar interno para a obtenção das propriedades físicas do ar e γ o coeficiente de aproximação da temperatura média (0,74).

3.2.3 Balanço de Energia para a Parede Absortiva

Esta equação será o equilíbrio entre a radiação solar igual a convecção do ar no canal, mais a radiação rebatida de ondas longas para a parede transparente, mais a transferência de calor por condução entre a parede absortiva e a parede isolada do galpão. Esta equação pode ser escrita como:

$$S_2 A_w = h_w A_w (T_w - T_f) + h_{r_{twg}} A_w (T_w - T_g) + U_b A_w T_r \quad (7)$$

onde,

- U_b coeficiente de transferência térmica total parede/isolante;
- S_2 fluxo de calor da irradiação solar absorvido pela parede absortiva;
- τ transmissividade da cobertura transparente (0,84);

No modelo matemático proposto, as temperaturas T_w , T_f e T_g são as temperaturas desconhecidas a serem estimadas, que são necessárias para determinar a temperatura de saída da chaminé T_{fo} .

3.3 COMBINAÇÃO ENTRE CHAMINÉ SOLAR E POÇO PROVENÇAL

Para ocorrer o funcionamento do poço provençal, é necessária uma diferença de pressão entre a entrada da tubulação do poço provençal localizado no ambiente externo e sua saída localizada dentro da adega. Diversas soluções podem ser adotadas, porém o objetivo primário deste trabalho é avaliar a possibilidade de um sistema completamente passivo, sem a utilização de soluções mecânicas, como a utilização de ventiladores por exemplo. Assim, será analisado o conjunto entre chaminé solar e poço provençal.

O modelo matemático adotado foi baseado no trabalho de Spencer (2001), que considerou a distribuição de temperatura dentro da chaminé como uniforme, para determinar a queda de pressão ao longo de todo sistema. O ar irá se movimentar dentro da chaminé solar devido sua diferença de densidade na entrada da chaminé e na saída da chaminé, pois este fluido irá se aquecer à medida que se desloca ao longo do duto aquecido, pela energia solar oferecida. Esta diferença de densidade gera um efeito de empuxo sem gerar um aumento na temperatura interna do ambiente, e seu potencial estará em função de diferença de pressão entre a entrada da tubulação do poço provençal e saída da chaminé solar. Porém, ao longo deste caminho ocorrerá perdas de carga localizadas e distribuídas, e, se a força de empuxo vencer todas essas perdas, ocorrerá a circulação de ar neste sistema.

Assim, o empuxo gerado poderá ser calculado através da diferença de densidade do ar gerada pelo gradiente de temperatura entre os pontos afastados por uma tal altura vertical multiplicada pela aceleração gravitacional. A perda de carga será avaliada para a linha com o percurso mais longo do sistema, onde sofre maior queda de pressão. Como resultado, a expressão para a vazão mássica de ventilação é obtida, por,

$$\dot{m}_a = (2BL_{cs} \sin \theta)^{\frac{1}{3}} A^{\frac{2}{3}} \quad (8)$$

onde,

$$A^* = \frac{1}{\frac{1}{(c_1 A_{tub})^2} + \frac{c_2 + c_3 + c_4 + c_5}{A_{tub}} + \sum \frac{f_t L}{d_{tub} A_{tub}} + \frac{1}{(c_6 A_{cs})^2} + \frac{f_{cs} L_g}{D_{hid,cs} A_{cs}}} \quad (9)$$

sendo,

- f_t e f_{cs} fator de atrito da tubulação e da chaminé solar, respectivamente.
- c_1 coef. de perda de carga concentrada na entrada do tubo de admissão, valor igual a 0,98;
- $c_2=c_3=c_4=c_5$ coeficientes de perda de carga concentrada do joelho da tubulação, valor igual a 0,3;
- c_6 coef. de perda de carga concentrada na entrada da chaminé solar, valor igual a 0,57 (Idelchik, 1994);

4. RESULTADOS - CHAMINÉ SOLAR, POÇO PROVENÇAL E MÓDULO EVAP. COMBINADOS.

Os resultados para os modelos matemáticos desenvolvidos, foram obtidos com o auxílio do software EES (Engineering Equation Solver) com o qual se realizou o efeito da parametrização de várias variáveis e seu impacto no desempenho e potencial de arrefecimento ou aquecimento do sistema. No presente trabalho, devido a limitação de espaço, serão apresentados unicamente os resultados relativos a previsão de desempenho para o sistema como um todo. Resultados de análise detalhados encontram-se disponíveis no trabalho do qual este artigo é derivado (Gonzales, 2017)

Com as duas soluções passivas combinadas, as perdas de carga são colocadas em questão, e uma análise mais aprofundada é realizada. A chaminé solar possui características físicas já bem definidas, sendo sua altura a maior possível, a distância entre a cobertura transparente e a parede absortiva volta de 20 centímetros, e inclinação de 50 graus, o qual é o valor recomendado para a latitude do local estudado. Sua largura poderá ser modificada a fim de alterar a vazão mássica do sistema se necessário. Uma solução discutida para facilitar a execução do projeto seria utilizar duas chaminés em conjunto.

Já as características físicas da tubulação enterrada deverão contribuir para a diminuição das perdas de carga, e da relação entre vazão e taxa de troca de calor. Suas características deverão atender os requisitos de projeto para temperatura, principalmente. A principal característica a ser levada será o diâmetro das tubulações em paralelo e da quantidade dessas conectadas com uma tubulação central.

Também será instalado um módulo evaporativo. Os três modelos disponíveis neste projeto serão avaliados. O projeto do sistema hidráulico utilizará apenas uma bomba d'água periférica, tubulações e um aspersor, além de um reservatório. O painel ficará localizado na saída do poço provençal.

Além disso, a carga térmica total foi inserida no cálculo dessas soluções em conjunto, para prover uma precisa avaliação da capacidade de arrefecimento desse sistema. O objetivo principal é otimizar seus componentes, visando ao baixo custo, e atender os requisitos de projeto.

Para isso, utiliza-se a ferramenta Min/Max do software Engineering Equation Solver. A ferramenta investiga, através de algoritmos, os valores que, em conjunto, resultam no valor mínimo de uma variável selecionada. Para este caso, foi selecionada a temperatura da adega, buscando minimizar seu valor.

Simulação para um dia típico de verão

O sistema de climatização da adega, já devidamente dimensionado, foi submetido a uma avaliação mais específica. Do arquivo climático, selecionou-se o dia 16/10 com dia típico de verão, para simular o comportamento térmico da adega a cada hora. O foco principal foi de avaliar a temperatura e umidade interna adega, os dois requisitos de projeto mais importantes. Esses estão representados nas Figs. 6 (a) e (b), respectivamente.

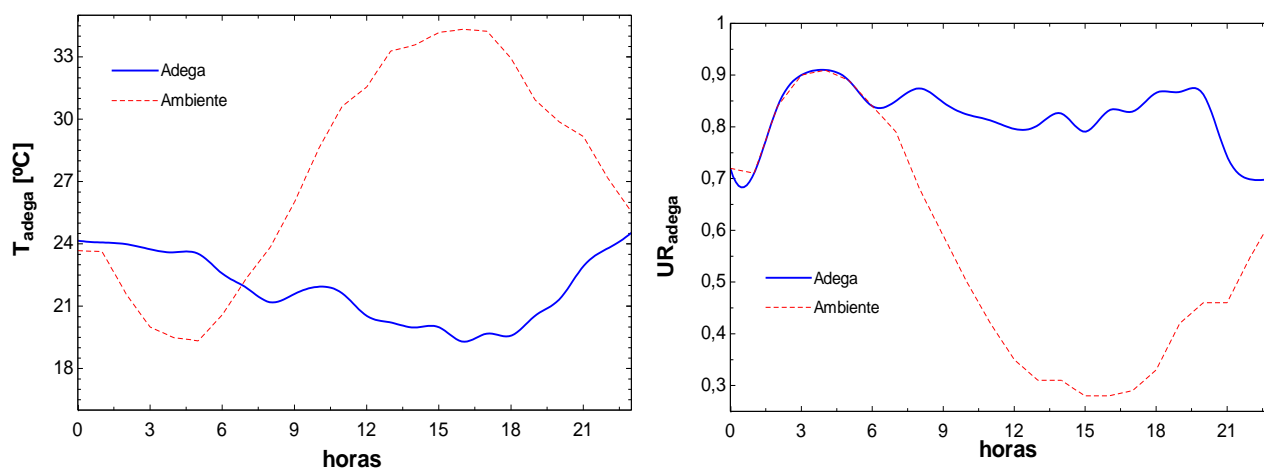


Figura 6. Variação horária da temperatura (esq.) e umidade relativa (dir.) da chaminé solar no dia 16/10.

As soluções de climatização adotadas para a adega mostraram-se suficientes para atender as condições de projeto, segundo as figuras acima. Primeiramente, as flutuações dos valores de umidade e temperatura estão baixas, principalmente quando comparadas com a temperatura e umidade ambiente, estabilizando as condições ambientais internas. Além disso, os valores de temperatura e umidade estão dentro dos valores especificados, mantendo a umidade relativa entre 80% e 90% por quase todo o período do dia, e valores de temperatura entre 19°C e 24°C, o que está dentro do especificado. Observe que a temperatura ambiente externa flutua entre 19°C e 34°C, com umidade entre 90% e 30%, o que evidencia um alto ajuste das condições ambientais externas para as internas, através das soluções para climatização adotadas.

A adoção de materiais de alta capacidade térmica também contribui para manter as temperaturas estáveis ao longo do dia. O atraso térmico da parede reduziu os ganhos internos principalmente pela cobertura, que é a superfície mais afeta por ganhos solares. A Fig. 7 (a) mostra esse comportamento.

Enquanto os ganhos de calor através da cobertura da adega começam a surgir efeito, o atraso térmico das paredes faz uma compensação a esse ganho, complementando com o funcionamento do sistema de climatização. Ao mesmo tempo, as soluções de climatização agem nas horas que ocorre irradiação solar, tendo grande influência na diminuição da temperatura da adega. Com isso, mesmo para um dos dias mais quentes do ano, a combinação das soluções passivas e a do módulo evaporativo foram suficientes para atender as necessidades das condições ambientais de armazenagem da cachaça em adega para esta época do ano, na cidade de Taiobeiras, Minas Gerais.

A figura 7 (b) mostra a importância da correta seleção dos materiais da fachada da adega. A linha vermelha mostra a soma dos ganhos de cada superfície opaca da adega, demonstrando uma capacidade de certas superfícies de diminuir o ganho pela carga térmica de outra. Agora, as soluções de climatização, no dia quente típico, possuem importante contribuição na manutenção da temperatura interna da adega, como pode ser vista na linha azul da figura analisada. Na Fig. 8 os processos podem ser visualizados podendo-se notar que o módulo evaporativo foi o principal responsável pela diminuição da temperatura e aumento da umidade relativa.

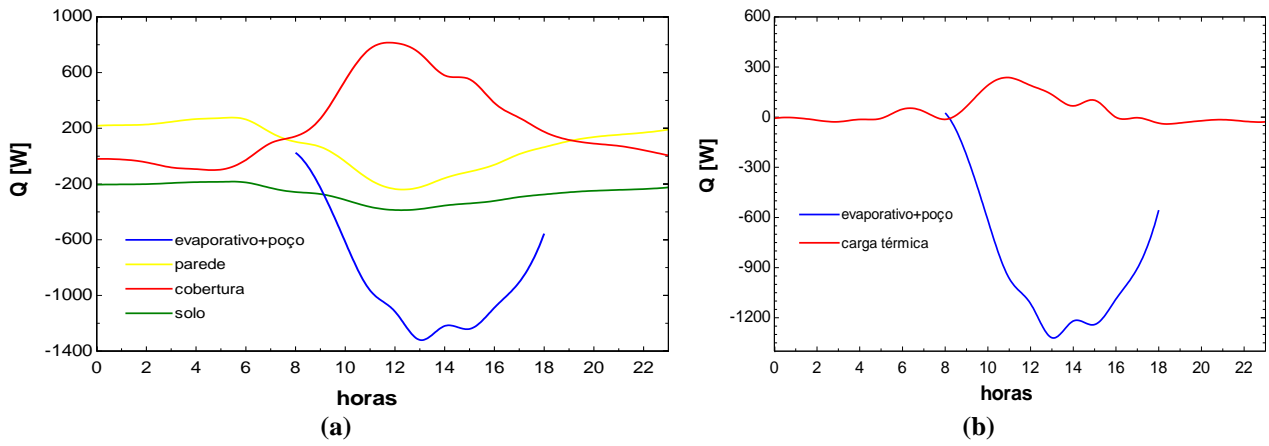


Figura 7. Variação horária dos ganhos internos para cada superfície (a) e carga térmica (b) para a solução de climatização n dia 16/10.

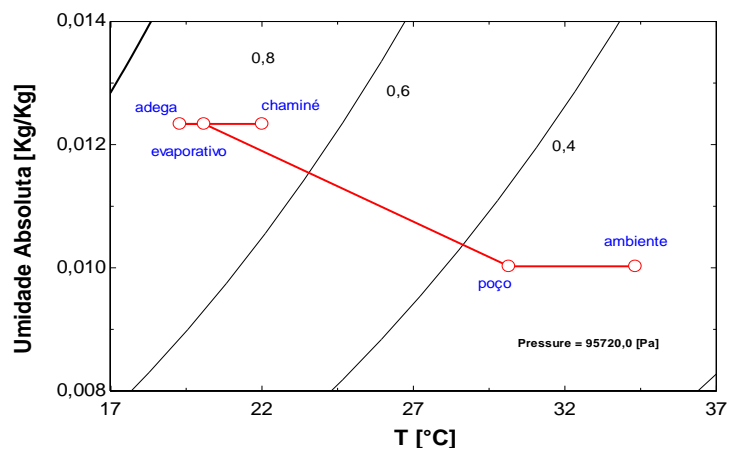


Figura 8. Carta psicrométrica do sistema para o dia 16/10.

Simulação para um dia típico de inverno

Mesmo estando em uma região considerada quente, a cidade de Taiobeiras sofre com baixas temperaturas no período que abrange o mês de maio. Mesmo essas baixas temperaturas podendo favorecer o arrefecimento do ambiente, sua flutuação pode gerar perdas de volume no barril armazenado na adega em estudo. Assim, as Figs 9 e 10 mostram o comportamento das condições internas da adega para esta época do ano, utilizando as soluções de climatização propostas.

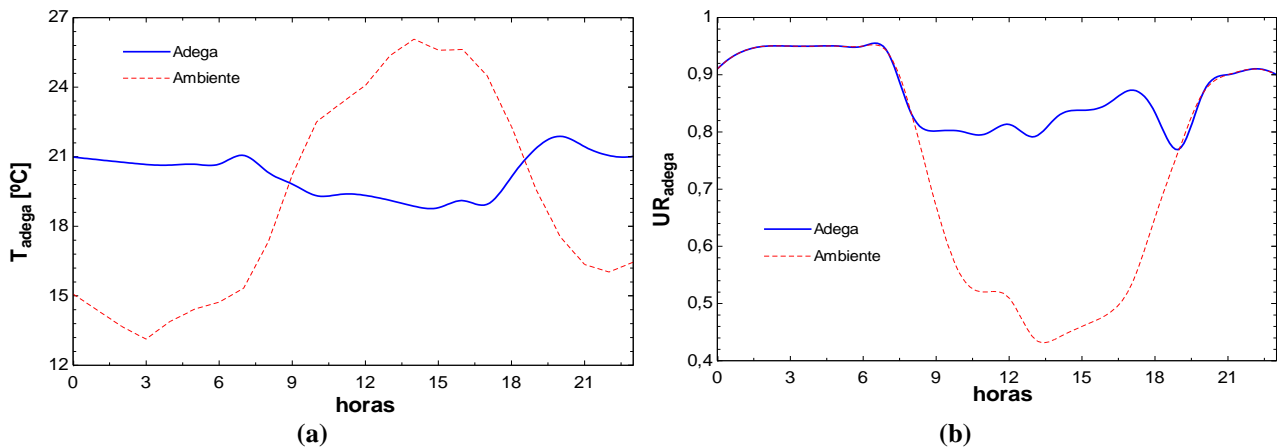


Figura 9. Variação horária da temperatura (a) e da umidade relativa (b) exterior e no interior da adega no dia 16/10.

Nos dias de inverno, as flutuações de temperatura mostram-se ainda mais aparentes, e as soluções de climatização conseguem contornar essa característica do ambiente, mantendo a temperatura a níveis desejados. A temperatura interna da adega se mantém, basicamente, 21°C ao longo do dia, atendendo as necessidades de projeto. Sua umidade permanece acima de 80%, e com uma boa constância de valores. As soluções atenderam as condições ambientais de projeto ao longo

do dia, mesmo com seu funcionamento limitado aos períodos com irradiação solar. Assim, também no inverno, as soluções adotadas ajustam os valores de temperatura ambiental externa (entre 12°C e 26°C) e umidade relativa (entre 40% e 95%) de forma efetiva para as condições ambientais necessárias e efetivas para o envelhecimento da cachaça.

Pela Fig. 10 (a), percebe-se que a fachada lateral da adega possui importante atuação na diminuição da carga interna da adega. Neste caso, a partir do momento que os ganhos de calor começam a surgir, a parede imediatamente atua pela sua energia térmica absorvida durante o período noturno. Além disso, as trocas de calor no período frio do ano são menos intensas, o que pode contribuir para a constância de valores de temperatura e umidade internas da adega. Já as soluções de climatização possuem menor papel de refrigeração do local, como ocorreu no dia quente. Alguns horários do dia a solução até mesmo ajudou a esquentar o ambiente, ajudando a manter as temperaturas equilibradas no interior da adega.

Assim, no período do inverno, as soluções passivas e módulo evaporativo conseguiram manter as condições ambientais demandadas pelo projeto. O inverno também possui fatores de riscos em relação a armazenagem da cachaça, poderia ser necessário até mesmo aquecer o ambiente, visto que as temperaturas externas podem chegar a 12°C. Mas, pelo fato da temperatura do solo a certa profundidade, no inverno, possuir valores maior que a temperatura ambiente, isso ajuda a aumentar a temperatura interna.

A Fig. 10(b) mostra que, para o período de inverno a carga térmica da adega é mais influenciada pela temperatura externa, pois a alta capacidade térmica das paredes mantém a baixa temperatura de sua superfície, porém, pela menor irradiação solar e ganho de calor pelo ar externo, a carga térmica no interior da adega sofre maiores flutuações que no verão. A solução de climatização contribui para aumentar a temperatura interna da adega nas primeiras horas do ano, e no final do dia as paredes contribuem para o este aumento também. Finalmente, a Fig. 11 mostra o funcionamento do sistema para uma hora específica do dia típico de inverno selecionado.

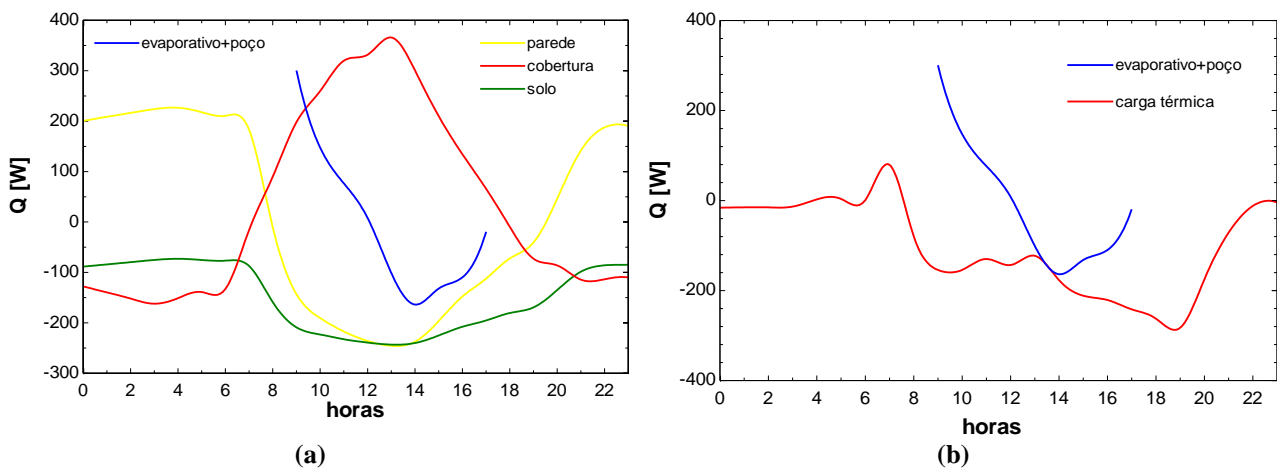


Figura 10. Variação horária dos ganhos internos para cada superfície (a) e carga térmica (b) para a solução de climatização n dia 21/05.

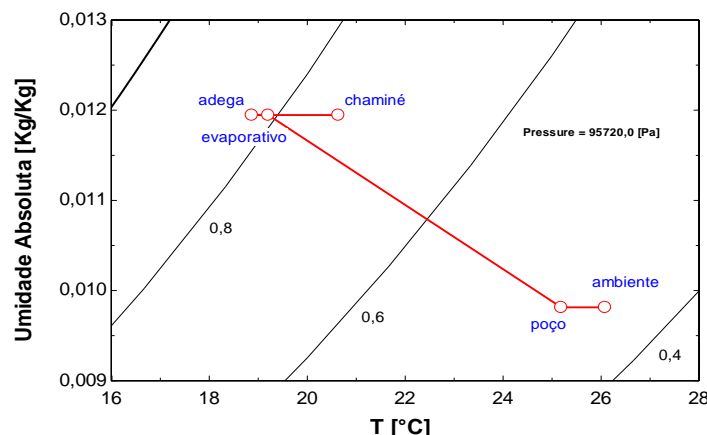


Figura 11. Carta psicrométrica do sistema para o dia 21/05.

5. CONCLUSÕES

Analisando o arquivo climático de Taiobeiras – MG e suas características geográficas, percebe-se o potencial de uso da energia térmica do solo para o resfriamento passivo do ar, pois o solo é argiloso e úmido, beneficiando as trocas de calor entre o solo e a tubulação. As temperaturas são amenas ao longo do ano, o que aumenta a possibilidade do uso

apenas de soluções passivas. Como a adega não é um ambiente de permanência prolongada, as cargas térmicas dela provêm apenas das fachadas, pisos e coberturas, o que facilita o uso de soluções passivas.

Os modelos matemáticos responderam bem quando inseridos na ferramenta de cálculo computacional EES. Esta ferramenta provou ser robusta quando cálculos complexos envolvendo processos iterativos de diversas variáveis são requisitados. Os resultados gráficos foram obtidos através de uma tabela paramétrica com mais de 1000 valores disponíveis, resultando em curvas de repostas precisas.

O uso do poço provençal foi importante para a diminuição da flutuação da temperatura da entrada, no caso, a temperatura ambiente. A implementação de tubulações em paralelo foi essencial para a melhora da efetividade de trocas de calor por essa solução. A avaliação do diâmetro das tubulações decidiu o desempenho dessa solução, em um equilíbrio de performance entre trocas de calor e perda de carga.

O módulo evaporativo, além de suprir uma certa quantidade de carga térmica, proveu a umidade necessária para o ambiente se manter nas condições desejadas de temperatura e umidade relativa. Ocorreu uma boa sinergia entre essa solução e o poço provençal, e, segundo os resultados da simulação, a chaminé solar conseguiu vencer as perdas de carga geradas pelo painel evaporativo, não necessitando de uma outra solução ativa, quando em pleno funcionamento.

A chaminé solar foi suficiente para manter a autonomia do sistema de climatização. Devida a sua boa altura, e, com o correto dimensionamento, a chaminé possui suficiente capacidade de sucção, conseguindo prover um fluxo de ar com acertados valores para se chegar as condições ambientais requeridas.

Os materiais das fachadas da adega também mostram grande importância para a diminuição da flutuação de temperatura dentro da adega, e também para mitigar os efeitos das diferenças de temperaturas diurnas e noturnas, através da alta capacitância do material e de seu atraso térmico. Isso auxiliou para o atingimento dos objetivos propostos para as soluções de climatização.

Assim, neste projeto, nota-se que soluções de climatização passivas combinada com soluções passivas de baixo consumo energético possuem grande potencial de arrefecimento, podendo trabalhar até mesmo sem a necessidade de estar ligada a rede de distribuição de energia elétrica, sendo supridas por pequenas células fotovoltaicas, por demandar um pequeno consumo de energia. Proposta para o aprofundamento das análises apresentadas neste trabalho encontram-se me Gonzales (2017).

6. REFERÊNCIAS

- EXPOCACHAÇA 2017 - 8 a 11 de junho no Expominas - Belo Horizonte / MG. EXPOCACHAÇA 2017 - 8 a 11 de junho no Expominas - Belo Horizonte / MG. Disponível em: . Acesso em: 12 abril. 2017
- FARIA, J. B. Análise tempo-intensidade de características sensoriais de cachaça de cana durante o envelhecimento em tonel de carvalho (*Quercus sp.*). Boletim da Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia de Alimentos, v. 33, n. 1, p. 27-34, 1999.
- GONZALES, T.S. Projeto de climatização de alto desempenho para adega de cachaça, Projeto de Graduação (TCC), Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 2017
- IDELCHIK, I.E., Handbook of Hydraulic Resistance, CRC Press Inc., 3rd Edition, 1994.
- KHANAL, LEI R.. Solar chimney—A passive strategy for natural ventilation. Energy and Buildings, v. 43, n. 8, p. 1811-1819, 2011.
- LEE, KWANG HOSTRAND, RICHARD K. Implementation of an Earth Tube System Into Energyplus Program. Champaign, IL, 2010
- LEE, KWANG HOSTRAND, RICHARD K. Enhancement of natural ventilation in buildings using a thermal chimney. Energy and Buildings, v. 41, n. 6, p. 615-621, 2009.
- MATHUR J., MATHUR S., ANUPMA. Summer-performance of inclined roof solar chimney for natural ventilation. Energy and Buildings 38 (2006) 1156–1163
- SPENCER, S. An experimental investigation of a solar chimney natural ventilation system. Masters thesis, Concordia University, 2001
- TESLA. Manual de Eficiência energética em Adegas. Universidad Politécnica de Madrid, 2014.
- U.S. Department of Energy. Engineering Reference. EnergyPlus version 8.8.0 Documentation, 2017

HIGH PERFORMANCE CLIMATIZATION PROJECT FOR CACHAÇA AGING

Abstract. *A new air conditioning system for a cachaça cellar using both passive and active cooling solutions is presented in this paper. The system is composed of an earth pipe and solar chimney as passive solutions, and an evaporative module as an active solution. The system is mathematically modeled and simulated, through theoretical models of all solutions, separately and together. Thus, the internal temperature, the relative humidity and the mass flow of air inside the cellar is obtained evaluated. The effects in these environmental conditions are studied, through the change in the physical configurations of the implemented air conditioning solutions. As a result, the proposed system demonstrates the potential to maintain the required conditions for an aging cellar of cachaça in wooden barrels, maintaining constant and acceptable levels of temperature and relative humidity.*

Keywords: Earth pipe, Solar chimney, EnergyPlus, Aging of Cachaça.