

POTENCIAL DA ENERGIA SOLAR TÉRMICA E FOTOVOLTAICA NO SETOR DE LATICÍNIOS

Lorena Barros Guimarães – lorena.bguimaraes@ufpe.br
Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Energia Nuclear

Igino Giordani da Silva Guerra – igsg@poli.br
Universidade de Pernambuco, Instituto de Inovação Tecnológica - IIT

Ailton Gonçalves da Silva – ags3@poli.br
Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica de Pernambuco

Maria Helena de Sousa – helena.sousa@ufpe.br
Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Energia Nuclear

Vania Freire Lemos – vanialemos91@gmail.com
Centro de Tecnologia Laticínios, Instituto de Tecnologia de Pernambuco - ITEP

Emmanuel Damilano Dutra – emmanuel.dutra@ufpe.br
Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Energia Nuclear

Luis Arturo Gómez-Malagón – lagomezma@poli.br
Universidade de Pernambuco, Instituto de Inovação Tecnológica - IIT

Resumo. *O objetivo deste trabalho foi determinar o potencial do uso de energia solar no setor de laticínios. Para tal fim, foi projetado um sistema para produção de queijo para pequenos produtores na região Nordeste do Brasil, com capacidade para processar 200 L de leite. Inicialmente, o leite passa pelas etapas de aquecimento, pasteurização, refrigeração, fermentação e coagulação, os quais acontecem num único tanque. Posteriormente, o coágulo é moldado, e finalmente maturado. Desta forma, o sistema de processamento requer um tanque, com sistema de aquecimento e refrigeração, e uma câmara fria. O tanque foi projetado para ser aquecido usando Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), e resfriado empregando uma unidade condensadora acoplada a um trocador de bobina helicoidal. A câmara fria foi projetada para usar uma unidade condensadora. A proposta de inserção da energia solar foi através de um sistema termossolar para auxiliar o processo de aquecimento, e de um sistema fotovoltaico para atender as demandas energéticas dos sistemas de refrigeração. A análise de viabilidade econômica foi realizada usando as técnicas de Life Cost Saving (LCS), Payback e Taxa Interna de Retorno (TIR). Adicionalmente, foi determinado o potencial de aquecimento global relacionado em cada processo. Os resultados mostraram que o sistema de fabricação de queijo tem custos de implantação e operação anual de ≈R\$41.000,00 e ≈R\$24.000,00, respectivamente, considerando um ciclo de fabricação diária. A inserção da energia solar diminui o Global Warming Potencial (GWP) em 32,1% e requer investimento de ≈R\$46.000,00 para reduzir os custos de operação em 48%, apresentando um payback de 2,4 anos e 6 anos para o sistema termossolar e fotovoltaico, respectivamente.*

Palavras-chave: *Energia Solar Fotovoltaica, Energia Solar Térmica, Laticínio.*

1. INTRODUÇÃO

Do volume total de litros de leite que são processados diariamente no Estado de Pernambuco, aproximadamente 72% são utilizados para fabricação de queijo (SECTI/PE, 2017). O valor total desta produção láctea do APL pernambucano se deve não apenas à exportação, em termos de mercado interno do leite e seus derivados, como também na atração de turistas para a região do agreste em razão da sua especificidade produtiva de queijo artesanal (Da Silva, P. H. F. et al., 2020).

No processamento de laticínios, as demandas de calor de processo são atendidas usando vapor d'água. Esse vapor advém de caldeiras à lenha ou de aquecedores a gás liquefeito de petróleo - GLP, sendo este último o mais difundido dentre os pequenos e médios produtores. Observa-se que a atual forma de obtenção de calor de processo nesses setores gera elevadas quantidades de rejeitos térmicos, cujo desperdício energético provoca não apenas a elevação dos custos de produção, como também contribui com a emissão de gases e partículas nocivas.

Dessa forma, verifica-se a necessidade de inovação no processo produtivo, de modo a desenvolver dispositivos que possibilitem uma melhoria na qualidade e produtividade do setor, atrelando a redução de custos a minimização do desperdício energético, cujos subprodutos são bastante nocivos ao meio ambiente. Para tal, é essencial que tais equipamentos estejam integrados a fontes auxiliares de energia, que apresentem um menor potencial de gerar impactos ao meio ambiente, e que sejam de baixo custo, de modo a não onerar nas despesas operacionais. O uso da energia solar no processo de laticínios é uma alternativa para geração de calor de processo e geração de energia fotovoltaica (Akmese, 2021) (De Blas, 2003) (Quijera, J. A., 2011) (Kasera, 2021) (Sur, A., 2020). Sendo assim, o presente trabalho visa analisar a viabilidade técnica, econômica e ambiental do uso de energia solar no setor de laticínios.

2. METODOLOGIA

Uma planta completa para processamento de queijos (Queijaria) finos e maturados, diferente do processamento de queijo coalho, deve possuir no mínimo quatro ambientes: “Recepção e Armazenagem”, “Fabricação”, “Maturação”, “Embalagem e Expedição” (IMA, 2021).

O projeto aqui descrito, é focado na área de Fabricação (aquecimento, pasteurização, resfriamento, fermentação e coagulação) e Maturação para um estabelecimento agroindustrial de pequeno porte, visando atender a uma demanda de processamento de 200 litros de leite por operação, considerando uma operação por dia e 21 dias por mês. O projeto visa atender as demandas de otimização de processos apresentadas por pequenos produtores ao Centro Tecnológico (CT) de Laticínios do Instituto de Tecnologia de Pernambuco (ITEP/OS), localizado no município de Garanhuns.

A análise técnica do uso energia solar numa queijaria será realizada a partir da análise da demanda energética do sistema convencional. A partir dessa demanda será realizada a proposta de um sistema termossolar para atender a demanda térmica, e de um sistema fotovoltaico para atender a demanda de energia elétrica. Seguidamente será apresentada a análise de viabilidade econômica do investimento em energias renováveis, assim como seu impacto ambiental.

2.1 Sistema convencional

O sistema convencional é formado por um tanque de processo de dupla camisa, usando água como fluido de trabalho, onde serão realizadas as etapas de aquecimento (aumento da temperatura até 65°C numa hora), pasteurização lenta (manutenção da temperatura durante 30 minutos), resfriamento (diminuição da temperatura até 35°C em 40 minutos), fermentação e coagulação (manutenção da temperatura durante 80 minutos), assim como de uma câmara fria para realizar o processo de maturação. O diagrama do sistema é mostrado na Fig. 1. Adicionalmente, o tanque de processamento poderá dispor de agitadores para uniformizar a temperatura durante todas as etapas, além de termômetros para fins de monitoramento da temperatura de processo.

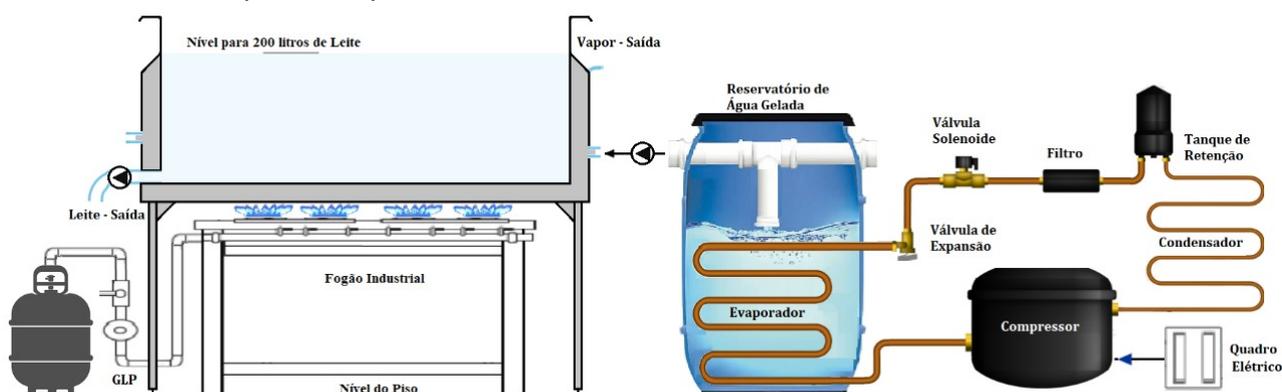


Figura 1 – Diagrama do sistema convencional para realizar os processos de aquecimento, pasteurização e resfriamento

2.1.1 Sistema de aquecimento do tanque

O sistema de aquecimento proposto utilizará queimadores a gás instalados na parte inferior do tanque. No início da operação, a camisa do tanque é preenchida parcialmente com água no estado líquido na temperatura ambiente. Após o acionamento dos queimadores essa água é aquecida até 100°C e passa para o estado de vapor. Para manter a área máxima de contato entre o vapor e as superfícies da camisa, e assim aumentar a taxa de transferência de calor para o leite, é definido um volume de água de aproximadamente 23 litros, equivalente a 25% do volume total da camisa. A condensação de vapor quando em contato com a superfície interna do inox, se configura em um mecanismo de transferência de calor por convecção, que será responsável por elevar a temperatura do leite. Ao atingir a temperatura desejada no leite, o fluxo de gás é reduzido nos queimadores e controlado para mantê-la constante. O dimensionamento dos queimadores para a etapa de aquecimento inicia com o cálculo da demanda térmica do leite assim:

$$\dot{Q}_{leite} = \frac{V_{leite} \cdot \rho_{leite} \cdot C_{p_{leite}} \cdot \Delta T_{leite}}{\text{tempo}} \quad (1)$$

Em que V_{leite} é o volume do leite, o qual será considerado de 200 l, ρ_{leite} é a densidade do leite e $C_{p_{leite}}$ é o calor específico a pressão constante do leite. Tendo em vista que as propriedades termofísicas dos alimentos variam de acordo com sua composição química e com a temperatura (Munir, M. T. et al., 2016), adotou-se os valores médios na faixa de temperaturas de operação (25°C-65°C) ($\rho_{leite} = 1.020,3 \text{ kg/m}^3$; $C_{p_{leite}} = 3,8 \text{ kJ/kg.K}$). As perdas de calor na base, lateral e topo do tanque foram determinadas a partir da análise dos processos de transferência de calor por condução, convecção e radiação, usando o modelo de resistência térmica equivalente, (Bergman et al, 2014). O procedimento adotado para o cálculo das taxas de transferência de calor foi similar à metodologia apresentada na literatura para o estudo dos processos de

transferência de calor em reatores de camisa dupla (Nassar & Mehrotra, 2011). Considerando a eficiência do queimador, ($\eta_{\text{queimador}}$), temos que a potência dos queimadores é:

$$P_{\text{queimador}} = \frac{\dot{Q}_{\text{leite}}}{\eta_{\text{tanque}} \cdot \eta_{\text{queimador}}} \quad (2)$$

2.1.2 Sistema de refrigeração do tanque

O sistema de refrigeração do tanque deve diminuir a temperatura do leite de 65 °C para 35°C em 40 min, e manter essa temperatura no processo de fermentação e coagulação durante 80 min. Após esse processo, o coágulo é moldado entre 35 °C e temperatura ambiente para depois ser levado para maturação. O sistema proposto para a refrigeração do tanque consiste na passagem de água fria através da camisa do tanque de processo num circuito fechado. Essa água é resfriada num tanque com água onde está imerso um trocador de calor com serpentina ou bobina helicoidal contendo o fluido refrigerante vindo de uma unidade condensadora. A quantidade de calor necessária para resfriar o leite será determinada a partir da equação do calor sensível como a Eq. (1). As eficiências dos trocadores de calor serão estimadas a partir de dados disponíveis na literatura. Finalmente, será selecionada a unidade condensadora a partir de dados disponíveis em catálogos dos fabricantes.

2.1.3 Projeto da câmara fria

No setor de laticínios, a etapa de maturação do queijo é essencial para conferir características diferenciadas na estrutura, no sabor e na aparência do mesmo. Nesta etapa, o tempo de exposição do produto ao ambiente controlado das câmaras frias, em termos de umidade, temperatura e fluxo de ar, garantem condições especificamente adequadas para tornar possível a ocorrência destas alterações físicas e bioquímicas na constituição do queijo (Bylund, G., 1995).

Tendo em vista que existem diferentes tipos de queijo, pode-se inferir que há uma grande variedade de processos de fabricação bem como o estabelecimento de condições específicas de armazenamento para cada um deles, com diferentes combinações de faixas de temperatura e umidade. Por exemplo, o queijo artesanal produzido no agreste pernambucano, permanece dentro da câmara de maturação a uma temperatura 14°C com uma umidade relativa de 85%. Considerando que o tempo médio de maturação dos queijos produzidos está entre de 60 a 90 dias, e que o rendimento aproximado é de 18 kg de queijo por cada operação, a capacidade máxima de ocupação total dos queijos é de 816 kg.

2.1.3.1 Cargas térmicas

As cargas térmicas da câmara fria foram determinadas para uma câmara de maturação com dimensões de 5,5 m (comprimento), 2,3 m (altura) e 2,3 m (largura). No projeto foram realizadas as seguintes considerações: a composição dos elementos construtivos relativos a esta edificação apresentam piso constituído por um radier, telhado composto por telhas de barro, e as paredes são compostas por três camadas, sendo elas alvenaria comum (revestimento externo), poliestireno 100 (isolante térmico) e reboco claro (revestimento interno); não há presença de minimizadores de infiltração; os queijos a serem armazenados são embalados com uma camada de filme de pvc; no interior da sala de maturação existem 3 lâmpadas LED de 9W; duas pessoas são responsáveis pelo serviço e levam aproximadamente 1,5 h para executarem as atividades de carregamento; e a sala conta com a presença de dois motores da unidade evaporadora.

A carga térmica foi determinada usando os procedimentos detalhados pelos manuais de Refrigeração e Fundamentos da ASHRAE (Handbook ASHRAE, 2014) (Handbook ASHRAE, 1997), e pelas normas ABNT NBR 5413:1982, ABNT NBR 6401:1978, ABNT NBR 16401, NBR ABNT 02:135.07-001/2.

2.1.3.2 Capacidade frigorífica

A capacidade frigorífica é definida como sendo a quantidade de calor a ser retirada do meio que se quer refrigerar através do evaporador da unidade frigorífica. Essa quantidade de calor corresponde a correção em relação ao tempo de funcionamento, que considera o tempo de degelo como parâmetro, e a um fator de segurança relativo ao somatório de todas as cargas térmicas associadas à edificação. O tempo de degelo pode ser natural, quando a temperatura do interior da câmara fria é maior que 0°C, ou artificial, quando a temperatura da câmara fria é menor que 0°C. Para fins de degelo natural, o tempo de funcionamento se dá em torno de 16 horas, já para o degelo artificial o tempo de funcionamento é em torno de 18 a 20 horas (Handbook ASHRAE, 2015). A Eq. (3) apresenta o cálculo da capacidade frigorífica.

$$Q_o = \frac{(Q_t + Q_{inf} + Q_{prod} + Q_{emb} + Q_{ilum} + Q_{ocup} + Q_{equip}) \cdot (1 + CS)}{\Delta t_{degelo}} \quad (3)$$

Em que, Q_o é Capacidade frigorífica [kJ/h]; Q_t é a quantidade de calor total transferido em [(kJ/h).24h]; Q_{inf} é a quantidade de calor total infiltrado [(kJ/h).24h]; Q_{prod} é a quantidade de calor total relativo aos produtos[(kJ/h).24h]; Q_{emb} é a quantidade de calor total relativo aos produtos embalados [(kJ/h).24h]; Q_{ilum} é a quantidade de calor total relativo às

fontes de iluminação [(kJ/h).24h]; Q_{ocup} é a quantidade de calor total relativo a fontes de circulação e ocupação de pessoas [(kJ/h).24h]; Q_{equip} é a quantidade de calor total relativo a presença de equipamentos no ambiente [(kJ/h).24h]; CS é o coeficiente de segurança [10%]; e Δt_{degelo} é o tempo de funcionamento relacionado com o tempo de degelo [16h].

A partir da determinação da capacidade frigorífica, foi selecionada a unidade condensadora de catálogos dos fabricantes.

2.2 Projeto de inserção das energias renováveis

A proposta do uso de energia solar no processo convencional consiste na inserção de um sistema termossolar para aquecimento, e um sistema fotovoltaico para atender as demandas de energia elétrica. O diagrama do sistema usando energia solar é mostrado na Fig. 2.

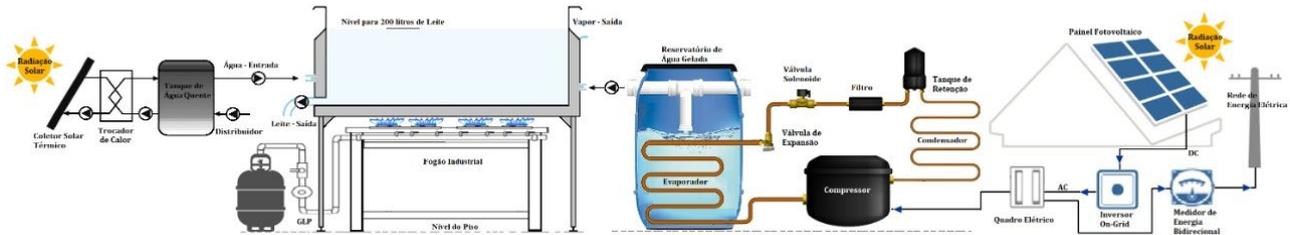


Figura 2. Diagrama do sistema empregando energia termossolar e fotovoltaica.

2.2.1 Sistema termossolar para aquecimento

A proposta do uso da energia solar no processo de aquecimento consiste no fornecimento de água quente para o tanque de processo. Esta alternativa foi escolhida devido à maturidade da tecnologia para aquecimento de água. Desta forma o sistema proposto é formado por coletores solares térmicos de placa plana ($F_{r\tau\alpha} = 0,76$; $F_{rUL} = 5,97$) acoplados a um tanque de armazenamento de água. Considerando que o sistema termossolar deverá suprir ao tanque de processo com 23 litros de água com a temperatura do tanque de armazenamento, e que após o processo de beneficiamento do leite deverá suprir água quente para o processo de limpeza, foi realizada determinada a temperatura do tanque ao longo do tempo do sistema termossolar considerando um tanque de armazenamento de 100 litros e várias áreas do coletor solar usando o software *Transient System Simulation* - TRNSYS® (Thermal Energy System Specialists, 2017). Também foi determinada a fração solar, a qual é definida como a quantidade de energia entregue pelo sistema termossolar e a energia total necessária para realizar o processo, em função da área de coleta.

2.2.2 Sistema fotovoltaico para refrigeração

A energia desejada para acionamento do compressor pertencente às unidades condensadoras dimensionadas para atender a demanda da câmara fria e da etapa de refrigeração pode ser gerada através de energia solar fotovoltaica conectado à rede de distribuição de energia elétrica seguindo a legislação relacionada à geração distribuída (ANEEL, 2012). Nesta configuração *on-grid*, o sistema solar fotovoltaico é composto por módulos fotovoltaicos, inversores e por uma estrutura metálica de sustentação para os módulos. Para fins de dimensionamento deste sistema auxiliar de geração é essencial determinar a potência do gerador, a qual pode ser calculada assim:

$$P_{FV}(W_p) = \frac{(E/TD)}{HSP_{MA}} \quad (4)$$

Em que E é a energia necessária para realizar o acionamento dos compressores, TD é a taxa de desempenho ou Performance Ratio-PR ($TD=0,75$), e o número de horas de sol pleno médio - HSP para a cidade de Garanhuns (Latitude: -8,89074; Longitude: -36,4966) é estimado em 5,3 horas (CRESESB - SunData®). Desta forma, o número de painéis será P_{FV}/P_{painel} , na qual P_{painel} é a potência do painel comercial. Da mesma forma, a área dos painéis será o número de painéis vezes a área do painel comercial. A potência do inversor é determinada a partir do Fator de Dimensionamento do Inversor-FDI, o qual é definido como:

$$FDI = \frac{P_{Nca}(W)}{P_{FV}(W_p)} \quad (5)$$

Onde P_{Nca} é a potência nominal CA do inversor. Os valores de FDI reportados na literatura estão na faixa inferior de 0,75 a 0,85, enquanto que o limite superior é de 1,05 (Tavares, J. P., Galdino M. A., 2014).

2.3 Análise econômica

A análise econômica determinou os custos do sistema convencional e dos investimentos adicionais usando energia termossolar e fotovoltaica. A análise de viabilidade econômica do sistema termossolar e fotovoltaica é realizada usando as técnicas de *Life Saving Cost* (LCS), *payback* e Taxa Interna de Retorno (TIR) (Kalogirou, 2013).

O LCS é definido como a diferença entre os custos do sistema convencional e o custo do sistema auxiliado pela energia solar, em função da área dos coletores, considerando a vida útil do sistema, trazendo os valores ao presente (Valor presente Líquido - VPL). O *payback* é o tempo necessário para que a economia gerada pelo sistema retorne o valor do investimento. A TIR é a taxa de desconto de mercado aplicada a um fluxo de caixa de tal forma que o seu VPL seja zero. A Tab. 1 apresenta as expressões para o cálculo do LCS e TIR.

Tabela 1 - Expressões para o cálculo de LCS e TIR

Nº	Expressão	Variáveis
1	$LCS = \sum_{j=0}^n \frac{E_{solar}}{(1 + i_{dm})^j}$	<i>E_{solar}</i> é a economia resultante do sistema solar auxiliar proposto [R\$/ano]; <i>i_{dm}</i> é a taxa relativa ao desconto de mercado (Selic, 2021) [9,5% a.a.]; <i>n</i> é o prazo total para análise do investimento [20 anos]; <i>j</i> é o período de tempo decorrido para análise [anos].
2	$\sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1 + TIR)^j} - V_{inicial} = 0$	<i>FC_j</i> é o fluxo de caixa para cada período de tempo da análise [R\$/ano]; <i>V_{inicial}</i> é o valor correspondente ao valor pago como investimento inicial [R\$].

2.4 Avaliação de potencial de aquecimento global

A avaliação de ciclo de vida (ACV) é utilizada para avaliar os impactos ambientais relacionados a um produto ou a um processo. Esta análise considera todas as etapas, desde a extração da matéria-prima até o consumo, disposição, reciclagem ou reuso do recurso. As normas técnicas determinam a estrutura, os princípios, requisitos e diretrizes que devem constar em um estudo de ACV (ABNT ISO/NBR 14040-14044, 2009).

A fim de compreender a mitigação dos impactos ambientais decorrentes da mudança de fonte de energia primária para os sistemas avaliados, foi realizada uma comparação utilizando a abordagem do ciclo de vida. Para isso, foi utilizada a base de dados Ecoinvent v.3.8®. O modelo escolhido foi o “*Allocation at the point of substitution* (APOS)” e o método de análise foi o ReCiPe 2016 Hierarchist (Huijbregts et al., 2017). Para este estudo, optou-se por avaliar apenas o impacto de potencial de aquecimento global (*Global Warming Potential* - GWP), dado em kgCO₂eq/kWh.

O impacto da energia solar no acionamento dos sistemas de refrigeração e aquecimento é determinado a partir da comparação entre os GWPs para o sistema convencional e o sistema usando energia solar. O GWP para cada processo foi obtido a partir da multiplicação entre o consumo de energia térmica ou elétrica (em kWh), e o fator de impacto obtido a partir da base de dados.

3. RESULTADOS

3.1 Sistema convencional

3.1.1 Projeto do sistema de aquecimento

No sistema de aquecimento serão empregados os queimadores a gás de alta pressão, tipicamente empregados em fogões semi industriais, os quais funcionam com Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) com parâmetros de operação tais como, vazão máxima de 0,855 kg/h, potência de 7,6 kW e eficiência típica de 30% (Roa, 2021) (Jugjai, 2002).

O calor sensível necessário para aumentar a temperatura do leite de 25 °C para 65 °C foi determinado usando a Eq. (1). Neste caso, a quantidade de energia necessária é de 31 MJ, equivalente a 8,6 kWh. A partir dos cálculos de transferência de calor usando o modelo de resistências térmicas foi determinada uma efetividade da transferência de calor da água para o leite de aprox. 70%. Desta forma, a potência dos queimadores de 41,1 kW é obtida a partir da Eq. (2). Em vista que cada queimador tem potência de 7,6 kW, serão necessários (41,4/7,6) 6 queimadores.

3.1.2 Sistema de refrigeração do tanque

O fluxo de calor a ser removido durante o processo de refrigeração do leite pode ser calculado usando a Eq. (1) considerando $\Delta T = 30^\circ\text{C}$ e que o tempo de refrigeração é de 40 min. Desta forma, o fluxo de calor é de 9,8 kW. Considerando uma efetividade de troca térmica no tanque de processo de aprox. 47,2% (Paul, E. L. et al., 2003) e para o

trocador de bobina helicoidal de 77,0% (McKetta Jr, J. J. et al., 1991), a potência do evaporador da unidade condensadora é de 3,5 kW.

Visando o dimensionamento de uma unidade condensadora capaz de atender essa capacidade de refrigeração foram analisadas as unidades capazes de operar com três tipos de fluidos refrigerantes diferentes (R-134a, R-404a e R-407c) de modo a estabelecer suas condições operacionais de trabalho (pressão de admissão, pressão de descarga e propriedades termodinâmicas) mediante seu ciclo termodinâmico.

A comparação resultou na seleção de uma unidade condensadora utilizando o R-134a, o qual apresentou o menor custo de aquisição e COP=4,8, onde o COP é definido como a relação entre o calor removido e o trabalho realizado pelo compressor. A unidade escolhida foi da fabricante Danfoss, modelo Optyma HJZ022D20Q Trifásico 220v 2 HP, cuja potência de acionamento do compressor estimada foi de 1,5 kW (Danfoss, 2021). Considerando que o compressor vai funcionar 40 minutos diariamente, a energia anual consumida é cerca de 252 kWh.

3.1.3 Câmara fria

Utilizando os métodos descritos na seção 2.1.3, a capacidade frigorífica estimada para esta câmara fria foi de aproximadamente 32.852,4 BTU/h, que corresponde a 7.851,9 kCal/h. A distribuição das cargas térmicas é mostrada na Fig. 2.

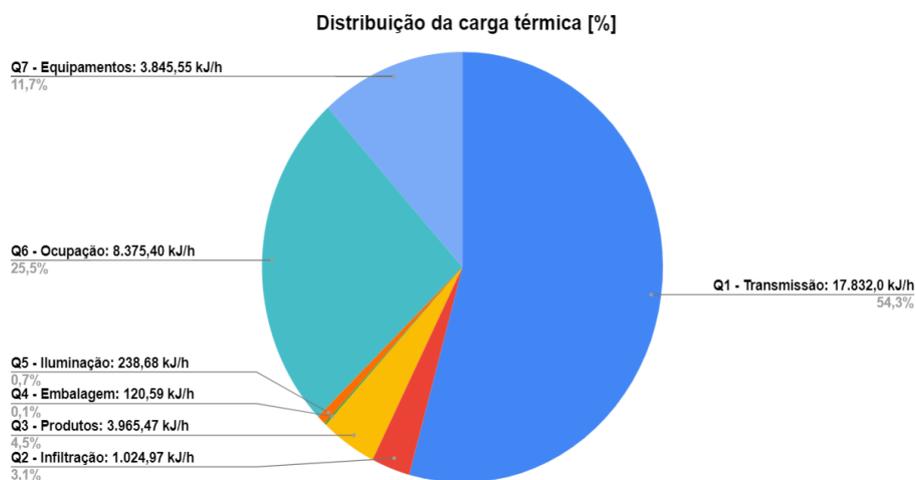


Figura 2 - Distribuição da carga térmica na sala de maturação.

Assim, com base na umidade relativa externa a edificação, no diferencial de temperatura do fluido refrigerante para aplicação e na temperatura externa máxima a edificação, pode-se buscar em catálogos a unidade condensadora capaz de atender a essa demanda frigorífica. O modelo selecionado foi o Optyma HJM028D20Q Trifásico 220v 2,5 HP da fabricante Danfoss (Danfoss, 2021). Tal modelo utiliza R22 como fluido refrigerante e tem um compressor que apresenta um consumo de 2,1 kW. Considerando que o compressor vai funcionar 16 horas diariamente, a energia anual consumida é cerca de 12.264 kWh.

3.2 Inserção das energias renováveis

3.2.1 Sistema termossolar para aquecimento

Considerando o volume de água necessária para alimentar o tanque de processo, foram estudadas as configurações do sistema de aquecimento de água com 1m² e 2 m² de área de coleta, e tanque de armazenamento de 100 litros. O perfil temporal da temperatura da água no tanque de armazenamento durante o processo de remoção da água para o tanque de processo é mostrado na Fig. 3. As simulações usando o TRNSYS mostraram que, para um dia com céu claro, a temperatura da água aumenta a partir das 8:00 a.m. e cai abruptamente no momento em que é realizada a remoção de água para o tanque de processo. Posteriormente a temperatura aumenta até os valores máximos por volta das 15:00 e decai no final do dia. Na figura pode-se observar também que a variação de temperatura entre os sistemas estudados é de aprox. 10°C.

Também foi observado que a fração solar foi praticamente constante para as configurações estudadas sendo 8,95% para 1m² e 9,23% para 2 m². Desta forma, foi escolhido o sistema com menor área de coleta para realizar a análise econômica. Para esta configuração o tempo de processo foi diminuído em aprox. 10 min, o qual é o tempo empregado para o aquecimento da água a partir da temperatura ambiente até 80°C usando o sistema convencional. Adicionalmente, simulações considerando que o início da pasteurização é realizado em horários onde a temperatura do tanque é máxima, mostraram que a fração solar máxima é de aprox. 11%, indicando que a contribuição do sistema termossolar é praticamente constante durante o período de incidência da radiação solar.

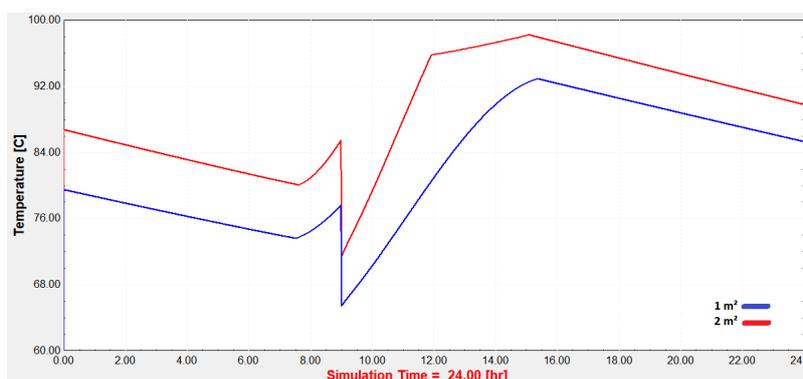


Figura 3. Temperatura do tanque do sistema termossolar empregando coletores de 1m² e 2 m²

3.2.2 Sistema fotovoltaico para refrigeração

Considerando que os consumos anuais dos compressores da câmara fria e o sistema de refrigeração do tanque de leite, são de 12.264 kWh e 252 kWh, a potência do sistema fotovoltaico é dada pela Eq. (4). Neste caso a potência é de 8,6 kW. Selecionando módulos de 330 W modelo CS6U-330P MaxPower (CanadianSolar, 2016), serão necessários aprox. 20 painéis, os quais representam uma área total aproximada de 38 m².

A seleção do inversor é determinada usando a Eq. (5) considerando FDI = 0,8. Neste caso, o inversor selecionado tem potência 7kW modelo CSI-7K-S22002-ED Canadian Solar (CanadianSolar, 2020). Este inversor possui duas entradas MPPT com tensão máxima DC de entrada de 600V e corrente máxima na entrada de cada MPPT de 12,5A. Considerando que os painéis estão distribuídos em duas strings de 10 painéis em série, a tensão máxima gerada por string é de 456V (Nº painéis x V_{oc} = 10 x 45,6V), o qual é menor que a tensão máxima DC do inversor. Adicionalmente, a corrente máxima por string (I_{sc} do painel de 9,45A) é menor que a corrente máxima do inversor.

3.3 Análise econômica

O custo do sistema convencional inclui o tanque de processo, os sistemas de aquecimento e refrigeração, e a câmara fria. Os custos dos equipamentos e instalação são dados na Tab. 2.

Tabela 2 - Custos de implantação do sistema de aquecimento e resfriamento do tanque de processo

Item	Descrição	Equipamento	Valor R\$	Referências
1	Tanque de processo	Tanque de camisa dupla	5.000,00	(Autor).
2	Sistema de aquecimento	6 queimadores de gás com suporte	2.333,52	(Gás Center).
3	Sistema de resfriamento	Unidade condensadora 2 Hp Danfoss Optyma HJZ022D20Q Trifásico 220v, trocador de calor de bobina helicoidal (bombona de 300L, serpentina de cobre e isolantes térmicos).	8.438,41	(Eletrofrigor); (Autor).
4	Câmara fria	Unidade condensadora Danfoss 2,5 HP Optyma HJM028D20Q Trifásico 220v R22 Construção civil no município de Garanhuns.	27.006,44	(CBIC); (Eletrofrigor).
TOTAL			40.738,37	

Para o sistema convencional, os custos da operação de resfriamento foram determinados de acordo com o consumo de eletricidade por parte dos compressores pertencentes às unidades condensadoras. O valor referente ao custo da energia elétrica, foi estabelecido mediante os critérios tarifários da concessionária de energia do Estado de Pernambuco (NEOENERGIA PERNAMBUCO, 2021). Já os custos de operação de aquecimento foram determinados a partir do valor do combustível GLP no município de Garanhuns (ANP, 2022).

Para o sistema usando energia solar, o custo da operação de aquecimento considerou a fração solar de 10%, sendo então 90% do custo convencional. Para o sistema fotovoltaico, o custo de operação foi o custo de disponibilidade

(R\$30,00/mês padrão monofásico). Os custos anuais de operação usando energia convencional e solar são mostrados na Tab. 3.

Tabela 3 - Custos operacionais mensais dos sistemas de aquecimento e resfriamento

Sistema Convencional					Usando Energia Solar
Item	Descrição	Custo da energia (CE)	Consumo Anual (CM)	Valor R\$ anual	Valor R\$ anual
1	Combustível GLP	R\$ 7,08/kg	1.723,68 kg	12.204,00	10.983,60
2	Refrigeração	R\$ 0,89/kWh	12.641,0 kWh	11.250,49	360,00
TOTAL				23.454,49	11.343,60

Da Tab. 3 foi observado que os custos mensais de operação diminuíram em aproximadamente 48%. Indicadores para realizar a análise do investimento em energia termossolar e fotovoltaica, tais como *payback*, TIR e VPL, considerando as taxas de retorno sobre investimento de 2021, são apresentados na Tab. 4.

Tabela 4 - Payback, TIR, VPL dos investimentos empregados nos sistemas termossolar e fotovoltaico

Item	Descrição	Investimento (R\$)	Payback (anos)	TIR (%a.a.)	VPL (R\$)
1	Sistema termossolar: 1 m ² coletor de placa plana, tanque de armazenamento de 100 litros, acessórios.	2.600,00	2,4	66,11	20.526,44
2	Sistema fotovoltaico: 20 painéis solares fotovoltaicos de 330 W, inversor 7 kW, acessórios (string box, cabos, instalação, etc.).	42.827,68	6	14,0	79.775,41

Em vista que os valores de *payback* são menores que o tempo de vida útil dos equipamentos, que a TIR é maior que as taxas máximas de atratividade disponíveis no mercado em 2021 (Poupança: 70% Selic, Certificado de Depósito Bancário: 100% CDI e Tesouro Direto: 100% Selic) (Banco Central do Brasil, 2022), e que o VPL é positivo, podemos afirmar que o investimento em energia solar é viável.

3.4 Avaliação de potencial de aquecimento global

O impacto ambiental relacionado ao potencial de aquecimento global para cada sistema encontra-se na Tab. 5. No caso do uso da energia solar térmica (linha 1), a emissão de CO₂ no novo sistema de aquecimento é 90% do sistema convencional (GLP) e 10% do sistema termossolar.

Tabela 5 - Potencial de aquecimento global na operação atual do sistema convencional e usando energia solar.

Item	Descrição	Consumo Convencional (CC) kWh	Sistema Convencional		Usando Energia Solar	
			PCC	Total kg CO ₂	PCR	Total kg CO ₂
1	Sistema de aquecimento	15.321,6	0,314	4.816,3	0,0141	4.356,3
2	Refrigeração do tanque	252,0	0,230	57,9	0,0695	17,5
3	Câmara fria	12.264,0	0,230	2.824,5	0,0695	852,7
			TOTAL	7.698,7	TOTAL	5.226,5

PCC: Pegada de Carbono convencional (kg de CO₂ (eq)/kWh)
PCR: Pegada de Carbono Renovável (kg de CO₂ (eq)/kWh)

Sendo assim, pode-se avaliar que a implementação da integração do sistema auxiliar com energia solar termossolar e fotovoltaica contribui de maneira eficaz na redução em cerca de 2.472,2 kgCO₂eq por ano (diminuição de 32,1%).

4. CONCLUSÃO

O projeto do sistema convencional de processamento de leite para a fabricação de queijo mostrou a importância do gerenciamento dos recursos energéticos para aquecimento e resfriamento do leite. Do ponto de vista ambiental, o uso das energias convencionais tem um impacto no meio ambiente que pode ser mitigado com o uso de energias renováveis. Por outro lado, as energias renováveis apresentam-se como uma opção eficiente no uso de recursos energéticos em processos industriais. Desta forma, a análise da inserção da energia solar térmica e fotovoltaica no processamento de queijo para pequenos produtores mostrou-se uma opção viável do ponto de vista técnico, econômico e ambiental.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer o apoio recebido pela Fundação Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), a Universidade de Pernambuco/Escola Politécnica de Pernambuco (UPE/POLI), a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e ao Instituto de Tecnologia de Pernambuco (ITEP).

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 5413:1982, Versão Corrigida 1992 – Iluminância de interiores – Publicada em 05.1992.
- ABNT NBR 6401:1978, Versão Corrigida 1980 – Instalações centrais de ar-condicionado para conforto, Parâmetros básicos de projeto – Publicada em 12.1980.
- ABNT NBR 16401 – Instalações de ar-condicionado, Sistemas centrais e unitários – Publicada em 04.09.2008.
- ABNT NBR ISO 14040 – Gestão ambiental, Avaliação do Ciclo de Vida, Princípios e estrutura – Publicada em 31.12.2001.
- ABNT NBR ISO 14044:2009, Versão Corrigida 2014 – Gestão ambiental, Avaliação do Ciclo de Vida, Requisitos e orientações – Publicada em 21.07.2014.
- ABNT Projeto 02:135.07-001/2:2013 – Desempenho térmico de edificações – Publicada em 09.2003.
- Akmese, S., Omernglu, G., Comakli, O., 2021. Photovoltaic thermal (PV/T) system assisted heat pump utilizations for milk pasteurization, Solar Energy, vol. 218, pp. 35-47.
- ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), 2017. Resolução Normativa 482 de 2012. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 15/12/2021.
- ANP (Agência Nacional do Petróleo), 2022. Sistema de Levantamento de Preços - SLP. Disponível em: <https://preco.anp.gov.br/include/Resumo_Ultimos_Meses_Index.asp>. Acesso em: 04/01/2021.
- ASHRAE, ASHRAE Handbook - Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, Atlanta, 1997.
- ASHRAE, ASHRAE Handbook - HVAC - applications heating, ventilation and air-conditioning applications, American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, Atlanta, 2015.
- ASHRAE, ASHRAE Handbook - Refrigeration, American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, Atlanta, 2014.
- BCB (Banco Central do Brasil), 2022. Taxas de juros básicas - Histórico. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/controlinflacao/historicotaxasjuros>>. Acesso em: 17/02/2022.
- Bergman, T. L, et al, 2014. Fundamentos de transferência de calor e de massa, tradução Eduardo Mach Queiroz, Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, 7 Ed., Rio de Janeiro, LTC.
- Bylund, G., 1995. Dairy processing handbook. Tetra Pak Processing Systems AB. Sweden.
- CanadianSolar, 2016. Canadian Solar CS6U-P MaxPower Datasheet. Disponível em: <<https://download.aldo.com.br/pdfprodutos/Produto34226IdArquivo4451.pdf>>. Acesso em: 16/02/2022.
- CanadianSolar, 2020. Single Phase String Inverter 7000/8000/9000. Disponível em: <https://static.csisolar.com/wp-content/uploads/2019/12/15153035/Datasheet_CSI-7K-9K-S22002-ED_EN.pdf>. Acesso em: 17/02/2022
- CBIC (Câmara Brasileira da Indústria da Construção Civil). Custo Unitário Básico Estadual (Indicador dos custos do setor de construção civil). Disponível em: <<http://www.cub.org.br/cub-m2-estadual/>>. Acesso em: 15/12/2021.
- CRESESB (Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito), 2021. Potencial Solar - SunData v3.0. Disponível em: <<http://cresesb.cepel.br/index.php#data>>. Acesso em: 25/02/2022
- Da Silva, P. H. F., Siqueira, K. B., Binoti, M. L., Nunes, R. M., Stephani, R., 2020. Tendências do mercado de produtos lácteos. Brasil Dairy Trends, pp. 343.
- Danfoss, 2021. Catálogo Geral de Unidades Condensadoras Optyma. Disponível em: <<https://assets.danfoss.com/documents/182633/AF121386439414pt-BR0701.pdf>>. Acesso em: 25/02/2022.
- De Blas, M., Appelbaum, J., Torres, J. L., Garcia, A., Prieto, E., Illanes, R., 2003. A refrigeration facility for milk cooling powered by photovoltaic solar energy, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 11, n.7, pp. 467-479.

- Eletrofrigor. Materiais para refrigeração comercial: Unidades condensadoras - Danfoss. Disponível em: <<https://www.eletrofrigor.com.br/catalogsearch/result/?q=unidades+condensadoras+danfoss>>. Acesso em: 25/02/2022.
- Gás Center. Queimador Alta Pressão REAL 141 mm com Tubo de 30cm - Ref. 02647. Disponível em: <<https://www.gascenter.com.br/peças-fogoes-industriais/queimador-real-141mm-tubo-30cm>>. Acesso em: 06/01/2022
- Huijbregts, M. A., Steinmann, Z. J., Elshout, P. M., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., Van Zelm, R., 2017. ReCiPe2016: a harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. The International Journal of Life Cycle Assessment, vol. 22, n. 2, pp. 138-147.
- IMA (Instituto Mineiro de Agropecuária), 2021. IMA registra primeira queijaria na região Norte do estado. Belo Horizonte - Publicada em 23.03.2021. Disponível em: <<http://www.ima.mg.gov.br/noticias/1890-ima-registra-primeira-queijaria-na-regiao-norte-do-estado>>. Acesso em: 15/11/2021.
- Jugjai, S., Rungsimuntuchart N., 2002. High efficiency heat-recirculating domestic gas burners, Experimental thermal and Fluid Science, vol. 26, n. 5, pp. 581-592.
- Kasera, S., Nayak, R., Bhaduri, S. C. (2021). Performance analysis of solar milk refrigerator using energy efficient R290, Case Studies in Thermal Engineering, vol. 24, pp. 100855.
- Kalogirou, S., 2016. Engenharia de Energia Solar: Processos e Sistemas. Elsevier.
- McKetta Jr, J. J., 1991. Heat transfer design methods. CRC Press.
- Munir, M. T., Zhang, Y., Yu, W., Wilson, D. I., Young, B. R., 2016. Virtual milk for modelling and simulation of dairy processes. Journal of dairy science, vol. 99, n. 5, pp. 3380-3395.
- Nassar N. N., Mehrotra A. K., 2011. Design of a laboratory experiment on heat transfer in an agitated vessel, Education for Chemical Engineers, vol. 6, n. 3, pp. e83-e89.
- NEOENERGIA PERNAMBUCO, 2021. Informações de tarifas do grupo A. Disponível em: <<https://servicos.neoenergiapernambuco.com.br/residencial-rural/Pages/Alta%20Tens%C3%A3o/tarifas-grupo-a.aspx>>. Acesso em: 20/12/2021.
- Paul, E. L., Atiemo-Obeng, V. A., Kresta, S. M., 2003. Handbook of industrial mixing: science and practice, vol. 1, John Wiley & Sons.
- Quijera, J. A., Alriols, M. G., Labidi, J., 2011. Integration of a solar thermal system in a dairy process. Renewable Energy, vol. 36, n.6, pp. 1843-1853.
- Roa, MI-019 - Manual Fogão Alta Pressão Semi Industrial Queimador Ferro Fundido - Luxo Deluxe.pdf 2021. Disponível em: <http://roa.com.br/downloads/?pasta=Manual_de_Produtos>, Acesso em 30/12/2021.
- SECTI/PE (Secretaria de Ciências, Tecnologia e Inovação de Pernambuco), 2017. Arranjo Produtivo Local de Laticínios em Pernambuco. Publicado em 06.2017. Disponível em: <http://www.secti.pe.gov.br/wp-content/uploads/2020/05/PMC_-LATICINIOS_FINAL_04_12_2017.pdf>. Acesso em: 12/11/2021.
- Sur, A., Sah, R. P., Pandya, S., 2020. Milk storage system for remote areas using solar thermal energy and adsorption cooling, Materials Today: Proceedings, vol. 28, pp.1764-1770.
- Tavares, J. P., Galdino M. A., 2014. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. CEPTEL-CRESESB.
- Thermal Energy System Specialists, LLC (2017). TRNSYS 18, a TRaNsient SYstem Simulation Program. Madison USA.

POTENTIAL OF SOLAR THERMAL AND PHOTOVOLTAIC ENERGY IN THE DAIRY SECTOR

Abstract. *The objective of this work was to determine the potential for the use of solar energy in the dairy sector. To this end, a system for cheese production was designed for small producers in the Northeast region of Brazil, with a capacity to process 200 L of milk. Initially, the milk goes through the stage of heating, pasteurization, refrigeration, fermentation and coagulation, which take place in a single tank. Afterwards, the clot is molded, and finally matured. Thus, the processing system requires a tank with a heating and cooling system, and a cold chamber. The tank is designed to be heated using Liquefied Petroleum Gas (LPG), and cooled using a condenser unit coupled to a helical coil exchanger. The cold room is designed to use a condensing unit. The proposal for the insertion of solar energy was through a thermosolar system to assist the heating process, and a photovoltaic system to meet the energy demands of the refrigeration systems. The economic feasibility analysis was carried out using the techniques of Life Cost Saving (LCS), Payback and Internal Rate of Return (IRR). Additionally, the related global warming potential in each process was determined. The results showed that the cheese making system has implementation and annual operation costs of ≈R\$41.000,00 and ≈R\$24.000,00, respectively, considering a daily production cycle. The use of solar energy reduces the global warming potential (GWP) by 32.1% and requires an investment of ≈R\$46.000,00 to reduce operating costs by 48%, presenting a payback of 2,4 and 6 years for the thermosolar and photovoltaic systems, respectively.*

Key words: Photovoltaic Solar Energy, Thermal Solar Energy, Dairy.