

Uma avaliação do uso da Energia Solar Térmica como calor de processo na produção de gesso beta do Polo Gesseiro do Araripe

André Vitor de Albuquerque Santos – andrevitor@mekatronik.com.br

Universidade de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia da Energia; Mekatronik Indústria e Comércio de Automação LTDA.

Kenia Carvalho Mendes – kenia@poli.br

Universidade de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia da Energia.

Resumo. O Polo Gesseiro do Araripe é o principal produtor nacional de gesso. O problema envolto na sua matriz energética é considerado como uma questão chave para a continuidade das operações de produção e beneficiamento do gesso na região. Com condições de insolação bastante favoráveis, estudos anteriores apontam que a possibilidade de uso da radiação solar para a produção da energia térmica necessária à produção de gesso se apresenta como uma alternativa razoável. No entanto, falta uma avaliação mais consistente da questão, seguindo aspectos metodológicos condizentes com as especificidades da geração solar de calor de processos industriais, em que questões relativas à integração do sistema de geração solar ao processo industrial e a uma análise termoeconômica da geração solar, quando encarada como uma possibilidade de investimento industrial, são analisados. Tais questões foram tratadas de acordo com o proposto pela Agência Internacional de Energia, principalmente no que concerne aos aspectos de integração. O cálculo dos ganhos energéticos foi realizado com o auxílio de correlações que fornecem a energia útil anual em função das condições de radiação e de parâmetros técnicos de desempenho da tecnologia de coletor considerada. De acordo com os estudos realizados, não há possibilidade de integração entre o sistema de geração solar e o atual processo produtivo empregado no Polo. As condições de geração, transporte e transferência de calor ao processo não permite a elaboração propostas de integração entre o sistema de geração solar e o processo produtivo. Do lado termoeconômico, a melhor condição analisada chega a reduzir o consumo de lenha em 26% e traz um retorno de investimento em mais de 9 (nove) anos. Por fim, ficou evidente que algumas medidas de eficiência energética, levantadas em investigações anteriores sobre o setor gesseiro do Araripe se apresentam como investimentos de maior atratividade.

Palavras-chave: Polo Gesseiro do Araripe, produção de gesso beta, geração solar de calor de processos industriais.

1. INTRODUÇÃO

O gesso beta, ou simplesmente gesso, é um dos principais materiais de construção civil utilizados no Brasil. Mais de 95% de sua produção nacional, assim como as principais reservas de sua matéria-prima, a gipsita, está concentrada no chamado Polo Gesseiro do Araripe (PGA) (Henriques Jr, 2013; Sindusgesso, 2014).

Atualmente, as principais problemáticas da cadeia produtiva do gesso se concentram nas especificidades da matriz energética Polo, onde a lenha é, praticamente, a única fonte de energia térmica utilizada (Sindusgesso, 2014). Entretanto, estudos apontam que a vegetação local não possui capacidade energética para dar suporte à indústria do gesso, pois a quantidade de lenha produzida em áreas de manejo sustentável é de apenas 3% da demanda, levando à exploração predatória da mata nativa, a Caatinga, sem qualquer controle e fiscalização (Campello, 2013; Silva, 2009).

As exigências legais e sociais sobre as questões ambientais envolvendo o setor gesseiro, incompatíveis com o paradigma de exploração descontrolada da Caatinga, e a preocupação com a segurança do fornecimento da lenha, cada vez mais difícil de ser adquirida, produzem um ambiente de incertezas no setor, que vê, a partir das operações da ferrovia Transnordestina, a possibilidade de transferência de grande parte da cadeia produtiva para regiões com maiores perspectivas de segurança energética (Andrade; Farias; Moutinho, 2013; Sindusgesso, 2014).

Na busca de alternativas à lenha, os altos níveis de insolação da região do Polo Gesseiro do Araripe trouxeram à tona a possibilidade do uso da energia solar como fonte do calor necessário (Rolim; Fraidenaich; Vilela, 2012). No entanto, aspectos sobre a integração do sistema de geração solar ao atual processo produtivo utilizado na região e o seu desempenho termoeconômico são lacunas que evidenciam a necessidade de estudos de avaliação mais específicos sobre essa alternativa energética.

Quando um sistema de geração solar de calor de processo industrial é instalado em uma planta industrial já existente, o principal desafio consiste em definir a situação mais adequada para a integração entre os dois sistemas, o que torna as condições existentes de organização da geração, do fornecimento e do consumo de energia térmica essenciais para as possibilidades de integração (Murphy, 2015; Muster; Schmitt; Schnitzer, 2015).

De acordo com a metodologia de avaliação da Agência Internacional de Energia (IEA) (Muster *et al.*, 2015), o primeiro passo consiste em determinar os pontos que demandam calor dentro do processo produtivo, os chamados pontos de integração. Para cada ponto de integração devem ser estimadas as respectivas temperaturas de fornecimento de calor,

assim como o perfil de demanda térmica (diário, semanal e mensal), ou seja, a curva que apresenta o comportamento temporal da carga térmica fornecida (Muster, 2015), de forma a permitir o cálculo do total anual de energia térmica consumida; sendo, então, os pontos de integração identificados, devem ser classificados de acordo com uma matriz de indicadores, proposta pela IEA (Hassine, 2015). Por fim, os melhores pontos devem ser selecionados e estudados mais profundamente a partir de uma análise termoeconômica (Schmitt, 2015a), onde, de acordo com os conceitos de integração passíveis de utilização (Schmitt, 2015b), são determinados os ganhos energéticos e econômicos advindos do uso do recurso solar. O resultado desta análise serve de base para a tomada de decisão sobre a estratégia de integração a ser utilizada (Helmke; Heß, 2015), caso os indicadores de desempenho (Platzer, 2016) acenem para um horizonte de viabilidade do uso do recurso solar.

2. A PRODUÇÃO DE GESSO BETA NO POLO GESSEIRO DO ARARIPE

A produção de gesso no PGA ocorre de modo muito uniforme em todas as empresas, basicamente em duas etapas sucessivas: (i) cominuição; e (ii) calcinação. Na primeira, a gipsita extraída das minas tem sua dimensão reduzida em britadores de mandíbula e moinhos de martelos, acionados por motores elétricos, de forma a conferir a granulometria adequada às partículas minerais.

Na calcinação ocorre a decomposição térmica da gipsita, cujo objetivo é a eliminação de parte da água de cristalização combinada a sua estrutura, para a formação do gesso, com a coprodução de vapor d'água. Esse processo ocorre em fornos industriais, onde a gipsita é introduzida em condições ambiente e, ao receber energia térmica, experimenta uma elevação em sua temperatura, até alcançar o patamar característico da transição de fase (transformação de gipsita em gesso), em torno dos 130 °C (Peres; Benachour; Santos, 2008). Toda essa demanda térmica (sensível e latente) totaliza, teoricamente, de 597,20 kJ/kg de gesso produzido (Kuntze, 2009).

Atualmente, praticamente todas as empresas do Araripe utilizam o mesmo equipamento de calcinação: o forno marmitta rotativo de queima indireta (Sindusgesso, 2014), cuja ilustração pode ser visualizada na Figura 1.

A energia térmica necessária ao processo é obtida a partir da combustão de lenha, principalmente na forma de toras. Esta tecnologia de calcinação apresenta um regime de produção intermitente, em bateladas, com tempo entre ciclos de produção de cerca de 60 minutos (Urbano, 2013).

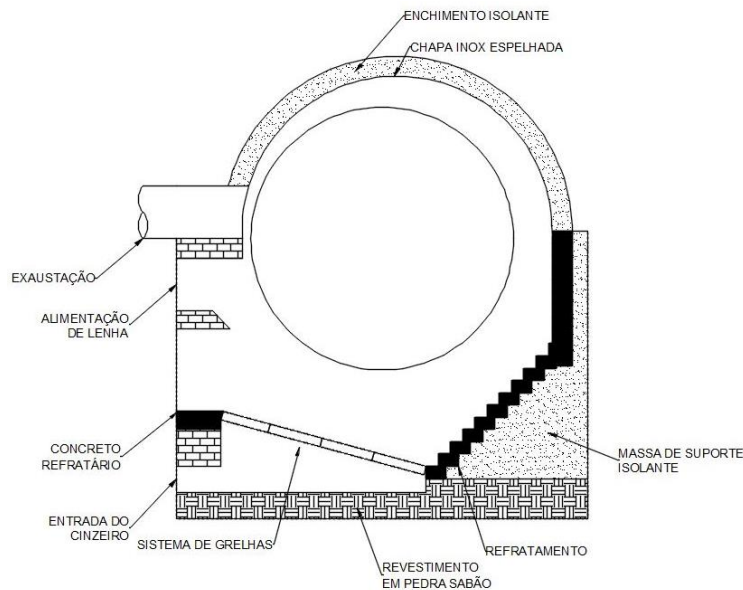


Figura 1 – Seção transversal do forno marmitta rotativo utilizado no PGA.

No centro da Figura 1 pode-se visualizar um corpo cilíndrico metálico, o forno propriamente dito. No seu interior é que fica contido o leito de gipsita em calcinação. A lenha é alimentada pelo lado esquerdo da figura, caindo sobre o conjunto de grelhas inclinadas no lado esquerdo inferior, por onde é soprado o ar de combustão. Os gases quentes gerados escoam pela lateral direita (caminho de menor perda de carga), percorrendo o contorno da câmara de combustão e saindo pelo sistema de exaustão do lado esquerdo superior. Durante esse percurso, esses gases trocam calor com o cilindro metálico, que por sua vez transfere energia para o leito de gipsita. Este corpo cilíndrico é rotativo, no sentido anti-horário, promovendo uma homogeneização do leito e um empuxo adicional que favorece o escoamento dos gases de combustão.

O modo de alimentação da lenha é manual, condicionando o fornecimento de energia a sensibilidade e experiência do operador do forno.

A alimentação do ar de combustão é realizada por um soprador que capta o ar atmosférico e o alimenta na fornalha. Não há nenhuma forma de controle sobre a vazão de ar utilizado para a combustão.

De modo geral, o nível de instrumentação e controle adotado nas empresas de calcinação do Araripe é extremamente baixo. Poucas, entre maiores calcinadoras, utilizam sistemas de supervisão e controle para garantir condições padronizadas das variáveis de processo e, dessa forma, obter o controle de performance do equipamento.

Outro conceito pouco utilizado pelas empresas calcinadoras da região é o de recuperação do calor. Não há aproveitamento de parte da energia térmica contida nos gases quentes expelidos pelo sistema de exaustão para o pré-aquecimento do ar de combustão, contribuindo para a diminuição a quantidade de lenha consumida.

O baixo nível tecnológico do Araripe levou ao desenvolvimento e utilização de fornos onde o consumo energético é, normalmente, bastante superior ao necessário. Como consequência, o forno marmita rotativo utilizado no Polo apresenta eficiência média entre as empresas de apenas 14% (Peres; Benachour; Santos, 2008). Em alguns casos específicos, onde há utilização dos avanços citados mais acima, os equipamentos alcançam cerca de 45% (Sindusgesso, 2014). A Tabela 1 apresenta alguns projetos relacionados com medidas de eficiência energética para o processo produtivo do PGA, analisados em um estudo do Banco Interamericano de Desenvolvimento (Henriques Jr, 2013).

Tabela 1 – Projetos de eficiência energética para o PGA.

Projeto	Redução do consumo de lenha [%]	Investimento [R\$]	Vida útil [anos]	Retorno do Investimento [meses]
Instalação de picador de lenha	15,0	90.000,00	20	7,3
Instalação de sistema de controle da calcinação	3,0	20.000,00	20	9,5
Instalação de sistema de recuperação de calor	5,0	25.000,00	15	6,1
Isolamento térmico das paredes da câmara de combustão	5,0	36.000,00	15	8,8

Por fim, a Figura 2 apresenta um fluxograma do processo produtivo empregado no PGA.



Figura 2 – Fluxograma de produção de gesso no PGA.

3. ASPECTOS DE INTEGRAÇÃO DO SISTEMA DE GERAÇÃO SOLAR À PRODUÇÃO DE GESSO

3.1 Pontos de Integração e temperatura de fornecimento de calor

Um ponto de integração determina uma demanda de energia térmica dentro da rede de geração e distribuição de calor do complexo produtivo, caracterizado pela especificação de um perfil de consumo.

Na produção de gesso, o único ponto de integração é o sistema de grelhas da câmara de combustão, onde ocorre a queima da lenha. As empresas do Araripe não realizam medições sobre as condições de combustão nos fornos, de forma que a temperatura alcançada pela chama é desconhecida. Apenas, em alguns poucos casos, ocorre a medição dos gases quentes na saída do sistema de exaustão, que, logicamente, indica uma temperatura menor que a alcançada na combustão.

Por não utilizarem sistemas de recuperação de calor para o pré-aquecimento do ar de combustão, essa temperatura ainda é alta, de cerca de 600 °C, conforme pôde ser visualizado nos sistemas supervisórios durante visitas as empresas de calcinação.

3.2 Perfil de demanda térmica

A evolução temporal da carga térmica consumida no processo de calcinação pode ser determinada a partir do acompanhamento do consumo de lenha. Entretanto, a alimentação manual de toras dificulta essa abordagem.

Assim, outra abordagem foi utilizada, em que foi considerada uma carga térmica média constante, determinada a partir do volume de produção e da eficiência dos equipamentos de calcinação; com uma evolução temporal baseada no perfil anual de operação.

Com relação à operação, a produção de gesso não possui sazonalidade diária, semanal ou anual. Os baixos índices pluviométricos da região favorecem à exploração mineral e à produção contínuas, interrompidas apenas por pequenas paradas de manutenção (Projetec, 2010). Dessa forma, é bastante razoável a modelagem anual do processo como contínua, sem intermitências temporais.

A carga térmica é uma função direta da capacidade de produção do forno: quanto maior o volume de produção, maior a quantidade de energia que deve ser fornecida. Portanto, a carga térmica foi estimada a partir da capacidade de produção média das empresas, da energia teórica de calcinação e da eficiência do forno, conforme aponta a Tabela 2.

Optou-se por utilizar o melhor caso de eficiência térmica da região, de forma a tomar um cenário otimista.

Tabela 2 – Dados das empresas produtoras de gesso e estimativa da carga térmica a ser atendida.

Total de empresas*	Produção Mensal [ton]*	Produção média [ton/h]**	Energia Teórica [kJ/kg]***	Eficiência Térmica	Carga Térmica [kW]	Energia Anual Consumida [GJ]	Custo da energia térmica [R\$/GJ]†
140	375.000,00	3,72	597,20	45,0%	1.371,44	43.249,60	33,49

* (Henriques Jr, 2013); **mês = 30 dias de 24 horas; *** (Kuntze, 2009);

† baseado em R\$ 20,00 por tonelada de gesso (Sindusgesso, 2014).

Neste sentido, o perfil de demanda térmica consiste em uma carga térmica constante, contínua ao longo do período anual de análise.

3.3 Condições de transferência da energia térmica ao processo e conceitos de integração

Como mencionado anteriormente, a energia térmica é fornecida pela convecção dos gases quentes com a superfície do cilindro metálico, em condições de temperatura superiores a 600 °C. Após a troca térmica, esses gases são, então, expelidos para a atmosfera, caracterizando um sistema aberto para essa fase gasosa.

Nesta situação, a geração e transporte de calor ocorrem localmente, junto com a transferência de calor ao processo; não há uma rede de distribuição de calor e, por isso, não há distinção entre as operações no âmbito do processo e no âmbito da geração e transporte, impossibilitando a utilização dos conceitos propostos pela literatura para a integração entre os sistemas (Helmke; Heß, 2015; Schmitt, 2015b).

3.4 Estratégia de integração e modelagem do processo de calcinação

Diante do exposto, duas barreiras são evidentes. Primeiro, a temperatura de fornecimento de calor, mesmo considerando os 600 °C na saída do sistema de exaustão, está muito além do limite alcançado pelas atuais tecnologias de coletores solar disponíveis comercialmente, de até 400 °C (Horta, 2016). Em segundo, a simultaneidade espacial entre a geração, transporte e fornecimento do calor necessário ao processo de calcinação travam as possibilidades de integração ao processo produtivo utilizado no Polo Gesso do Araripe.

A partir desse impasse, e da necessidade de avaliar o sistema de geração solar como uma alternativa de investimento industrial, cujo objetivo é a redução do consumo de lenha, tornou-se necessário considerar uma situação hipotética, em que essas barreiras possam ser superadas, ou seja, com uma temperatura de fornecimento de calor dentro dos limites alcançados pelas tecnologias comerciais de coletores solar; e onde as operações e geração, transporte e fornecimento de calor sejam separadas, permitindo a consideração de conceitos de integração.

Para este fim, foi considerada a estratégia de integração mais simples e favorável para geração solar, ou seja, quando esta atua como um pré-aquecedor em série com um sistema convencional de geração de calor e com o processo industrial, sem armazenamento térmico, conforme apresentado na Figura 3.

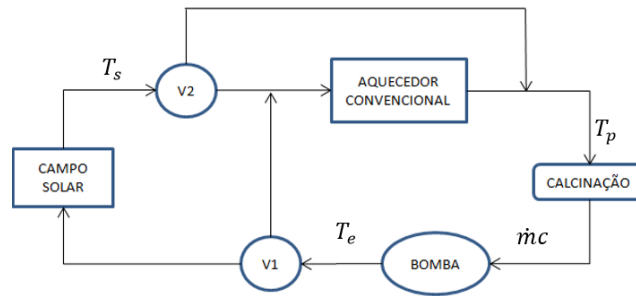


Figura 3 – Configuração de integração proposta.

Nesta situação, a calcinação é um processo hipotético, de aquecimento indireto, como o forno rotativo de casco duplo proposto por Urbano (2013), onde a energia térmica necessária é retirada de um fluido líquido com temperatura T_p . A temperatura desse fluido na saída da calcinação, ou seja, na entrada do campo solar é T_e , de forma que a queda na temperatura do fluido seja capaz de fornecer carga térmica necessária à calcinação. Esse fluido escoar forçadamente pelo sistema com uma taxa de capacidade calorífica $\dot{m}c$ constante, de acordo com a Eq. (1):

$$\dot{m}c = \frac{L}{(T_p - T_e)} \quad (1)$$

em que L é a carga térmica, definida na Tabela 2. Como consequência, a temperatura de saída do campo solar, T_s , é variável. O ganho energético adicional, necessário para que o fluido alcance T_p é dado pelo sistema de aquecimento convencional. Nesta modelagem de integração, entende-se o sistema de aquecimento convencional utilizando lenha em toras como combustível; ainda, é considerado como ideal, sem perdas, uma vez que as ineficiências do processo produtivo do Araripe foram representadas na determinação da carga térmica na Tabela 2 e, por isso, já estão incluídas no processo de calcinação hipotético.

A válvula V1 direciona o fluido para o sistema de aquecimento convencional, sem passar pelo campo solar, em momentos que a radiação incidente é insuficiente para a produção de energia útil. Já a válvula V2 direciona o fluido para o processo, sem passar pelo sistema de aquecimento convencional, quando a energia útil gerada pelo campo solar é suficiente para que a temperatura de saída do campo seja igual a T_p .

4. ANÁLISE TERMOECONÔMICA

4.1 Tecnologias de conversão e temperaturas de processo

Para que seja possível ocorrer a calcinação, a gipsita deve alcançar, no mínimo, uma temperatura de 130 °C. Entretanto, a transferência de calor do fluido para o processo ocorre apenas quando T_p é superior a esse valor.

Dentre as alternativas comerciais de conversão da radiação solar em energia térmica, os chamados coletores, e indicadas para a aplicação em calor de processo, apenas as tecnologias de concentração linear, como o coletor parabólico linear e o coletor linear Fresnel, conseguem alcançar temperaturas acima dos 130 °C (Horta, 2016). Nesse nicho, duas faixas de temperatura de trabalho foram identificadas: média, de até 250 °C; e alta, de até 400 °C.

A partir desses níveis de temperatura, duas situações de temperatura para o hipotético processo de calcinação foram consideradas, conforme apresenta a Tabela 3.

Tabela 3 – Dados do processo de calcinação hipotético considerado.

Temperatura de Trabalho	Carga Térmica [kW]	T_p [°C]	T_e [°C]	$\dot{m}c$ [kW/K]
Média	1.371,44	200,00	150,00	27,43
Alta	1.371,44	350,00	300,00	27,43

Nessas situações, alguns coletores comerciais foram identificados na literatura (Horta, 2016, 2017; Silva *et al.*, 2014). Optou-se por considerar valores médios para os coeficientes do modelo quadrático de eficiência instantânea e para o custo específico, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Dados dos coletores comerciais considerados.

Temperatura de Trabalho	α_0	α_1 [W/m ² K]	α_2 [W/m ² K ²]	Custo [€/m ²]
Média (até 250 °C)	0,6870	0,4428	0,0023	370,00
Alta (até 400 °C)	0,6960	0,0228	0,0002	600,00

4.2 Modelagem e dimensionamento do campo solar

O sistema de geração solar foi modelado sem considerar as questões relativas às configurações em série e paralelo dos coletores, mas compreendendo o campo solar como um todo, e representando-o pela área total de abertura dos coletores, A_{ab} [m²]. Assim, as perdas térmicas em tubulações não absorvedoras são desconsideradas.

Ainda, utilizou-se o modelo estático de primeira ordem de eficiência instantânea para modelar o desempenho do campo solar, conforme apresentado na Eq. (2) (Rabl, 1985):

$$\eta = F_R \left[\eta_o - \frac{U \cdot (T_e - T_{amb})}{I} \right] \quad (2)$$

Na Eq. (2), η_o representa a eficiência óptica; U é o coeficiente global de perdas térmicas, em kW/K; T_e é a temperatura de entrada do fluido no campo solar, em °C; T_{amb} é a temperatura ambiente, em °C; I é a radiação incidente; e F_R é um fator de transferência de calor, representado pela Eq. (3):

$$F_R = \left\{ \frac{\dot{m}c}{A_{ab}U_{eq}} \left[1 - \exp\left(\frac{-A_{ab}U_{eq}}{\dot{m}c}\right) \right] \right\} \quad (3)$$

Como consequência, a potência útil instantânea gerada pelo sistema de geração solar é dada pela Eq. (4):

$$P = \eta A_{ab} I \quad (4)$$

4.3 Critério de dimensionamento do campo solar

A área de abertura do campo solar foi determinada considerando que no instante de máxima radiação incidente a potência fornecida é igual a carga térmica necessária, L , de acordo com a Eq. (5), em que $I_{máx}$ é a radiação máxima incidente no campo solar e I_x é o limiar de radiação, Eq. (6), ambos em kW/m².

$$A_{ab} = - \left(\frac{\dot{m}c}{U} \right) \cdot \ln \left[1 - \frac{L \cdot U}{\eta_o \dot{m}c \cdot (I_{máx} - I_x)} \right] \quad (5)$$

4.3 Ganhos energéticos anuais

A partir do conceito de limiar de radiação, I_x [kW/m²], um valor no qual a eficiência instantânea é nula e sob o qual não há produção de energia útil, conforme Eq. (6), os ganhos energéticos anuais, Q [GJ], foram determinados partir de correlações polinomiais quadráticas para a energia anual coletável, $q(I_x)$ [GJ/m²].

$$I_x = \frac{U \cdot (T_e - \bar{T}_{amb})}{\eta_o} \quad (6)$$

em que \bar{T}_{amb} representa a média anual de temperatura, em °C. Para coletores de concentração linear, com seguimento solar na direção leste-oeste, a correlação tem a forma da Eq. (7) (Rabl, 1981; Reddy, 2007):

$$q(I_x) = q_0 + q_1 I_x + q_2 I_x^2 \quad (7)$$

em que os coeficientes q_0 , q_1 e q_2 são apenas funções da média anual de radiação direta, \bar{I}_b [kW/m²], obedecendo as relações apresentadas na Eq. (8) (Rabl, 1985):

$$\begin{aligned} q_0 &= -0,098 + 11,944 \bar{I}_b - 0,657 \bar{I}_b^2 \\ q_1 &= -0,599 - 30,363 \bar{I}_b + 17,788 \bar{I}_b^2 \\ q_2 &= 1,093 + 17,606 \bar{I}_b - 17,290 \bar{I}_b^2 \end{aligned} \quad (8)$$

Neste sentido a energia anual entregue pelo campo solar, em GJ, é definida de acordo com a Eq. (9) (Rabl, 1985):

$$Q = A_{ab}\eta_o F_R q(I_x) \quad (9)$$

4.4 Condições de análise

Com relação aos dados técnicos apresentados na Tabela 4, há uma necessidade de linearização do modelo quadrático para a obtenção da eficiência óptica e do coeficiente global de perdas térmicas do modelo linear da Eq. (2). Esta linearização foi realizada em torno das respectivas temperaturas de entrada no campo solar, T_e , tendo como resultado os dados apresentados na Tabela 5. Foi considerada uma taxa de cambio de R\$ 4,00/€ para a composição do custo específico dos coletores, sem levar em conta os impostos de importação.

Tabela 5 – Dados técnico dos coletores considerados para os cálculos.

Temperatura de Trabalho	η_o	U [W/m ² K]	Custo [R\$/m ²]
Média (até 250 °C)	0,7335	1,0224	1.480,00
Alta (até 400 °C)	0,7154	0,1332	2.400,00

Os dados meteorológicos considerados na análise são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Dados meteorológico considerado para os cálculos.

Descrição	Símbolo	Valor	Unidade
Média anual de radiação direta*	\bar{I}_b	0,786	kW/m ²
Média anual de temperatura ambiente	\bar{T}_{amb}	24	°C
Radiação direta máxima**	$I_{m\acute{a}x}$	1,00	kW/m ²

* 5,5 kWh/m²-dia (Pereira *et al.*, 2017) para 7 horas de insolação diária (Tiba; Fraidenraich, 2000).

** (Muller; Rau; Schrufer, 2014).

5. RESULTADOS

5.1 Integração ao processo industrial

A uniformidade de processo produtivo utilizado nas empresas do Polo Gesseiro do Araripe (PGA) permitiu a análise de todo o setor por um único estudo de caso. Na cadeia produtiva, apenas o processo de calcinação, que ocorre no forno marmitta rotativo de queima indireta, consome energia térmica.

Observou-se que a único ponto de integração é o sistema de grelhas da fornalha, onde ocorre a combustão da lenha para a produção da energia térmica necessária à produção de gesso.

A falta de medições sobre as condições reais de combustão não permitiu a determinação da temperatura de fornecimento de calor. Entretanto, medições da temperatura dos gases de combustão na saída do sistema de exaustão indicam 600 °C.

A alimentação manual de lenha na forma de toras, impossibilita a determinação da evolução temporal do consumo de lenha. Assim, o perfil de demanda térmica foi determinado por outra abordagem, tomando como base uma carga térmica constante e contínua ao longo do ano, e calculada de acordo com o volume de produção médio das 140 empresas produtoras de gesso.

Por fim, verificou-se que a alta temperatura de fornecimento de calor, maior que 600 °C; e a simultaneidade espacial e temporal da geração, transporte e transferência de energia térmica necessária à calcinação, sem a distinção entre as operações de processo e de geração e distribuição de calor, são os dois fatores que impossibilitam a integração entre o sistema de geração solar e o processo produtivo.

5.2 Análise termoeconômica

A partir da estratégia de integração considerada para o hipotético processo de calcinação detalhado na Seção 3.4, foi possível analisar o sistema de geração solar como um investimento industrial. Dadas as impossibilidades de integração, optou-se por uma abordagem simples para a determinação dos ganhos energéticos do campo solar e sua avaliação como uma alternativa de investimento industrial, cujo objetivo é a redução do consumo de lenha.

De acordo com o critério de dimensionamento definido na Eq. (5), e considerando os dados da Tabela 3 e da Tabela 5, as áreas de abertura do campo solar para as duas condições hipotéticas de calcinação, em m², seguem conforme

apresenta a Tabela 7. No âmbito econômico, o custo do investimento solar foi calculado a partir de um valor médio específico, apresentado na Tabela 5. Os respectivos valores dos custos são apresentados na Figura 5.

Tabela 7 - Área de abertura e custo do investimento para as duas classes de coletores consideradas.

	Área de Abertura [m ²]	Custo Investimento	Ganho energético anual [GJ]	Fração Solar
Média Temp.	2.369,87	R\$ 3.507.400,71	11.060,62	26,00%
Alta Temp.	2.030,90	R\$ 4.874.162,00	11.859,11	27,00%

Com as áreas de abertura definidas, os respectivos ganhos energéticos anuais, definidos pela Eq. (9), são apresentados na Tabela 7. Esses ganhos energéticos constituem uma fração da energia anual consumida pelo processo de calcinação, representando uma redução do consumo de lenha. Tal conceito é definido como a fração solar, cujos valores são apresentados na Tabela 7.

O sistema de geração solar não produz uma receita direta, mas a gera indiretamente por uma redução no consumo de lenha. Numa definição simples, utilizada para caracterizar os investimentos da Tabela 1, o tempo de retorno do investimento é definida como a razão entre o custo do investimento e a receita anual gerada pelo investimento; nesse sentido, para as duas condições de campo solar consideradas, o tempo de retorno é apresentado na Figura 4.

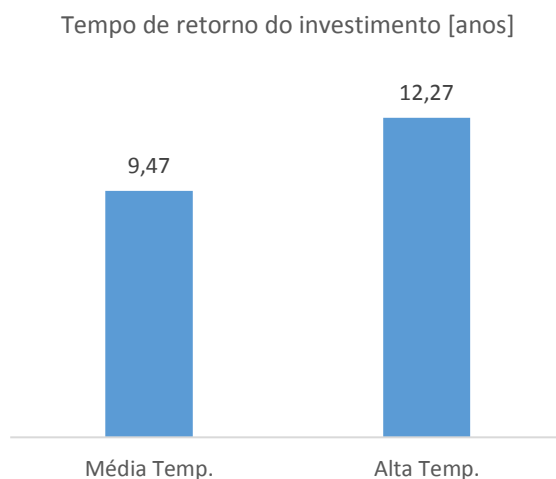


Figura 4 – Tempo de retorno do investimento para as condições de campo solar consideradas.

As diferenças observadas na área de abertura, de cerca de 300 m², justificam-se no coeficiente de perdas térmicas significativa menor para a condição de alta temperatura. No entanto, essas diferenças se equilibram no desempenho anual e os ganhos energéticos anuais são bastante próximos, evidenciados ainda mais pela quase igualdade na fração solar.

No entanto, os custos do investimento, apresentam uma significativa diferença, que pode ser melhor visualizada no tempo de retorno dos investimentos. O alto custo específico do campo solar na condição de alta temperatura provoca um custo de investimento que, devido a pequena diferença nos ganhos energéticos, não consegue trazer um retorno em um tempo mais curto que a condição de campo de média temperatura. Portanto, a condição de média temperatura se apresenta como a melhor alternativa.

No entanto, é importante destacar que com uma redução no consumo de lenha de 26%, um investimento de R\$ 3,5 milhões e um tempo de retorno de mais de 9 (nove) anos, o investimento solar não apresenta uma boa atratividade.

De acordo com a Tabela 1, onde são listadas algumas oportunidades de eficiência energética que contribuem na redução do consumo de lenha, essas medidas possuem um tempo de retorno de apenas poucos meses.

Ainda, com apenas 4,8% do investimento solar (R\$ 171.000,00), é possível implantar as medidas listadas na Tabela 1, que resultariam em uma redução do consumo de lenha de 28%, contribuindo mais com significativamente para a redução do consumo de lenha e com um dispêndio financeiro significativamente menor.

6. CONCLUSÕES

O atual processo de produção de gesso beta no Polo Gesseiro do Araripe (PGA) não permite a integração do sistema de geração solar ao processo produtivo. A incompatibilidade de integração observada, evidenciada principalmente na

temperatura de fornecimento de calor, traz à luz a necessidade de elaboração de pesquisas sobre o desenvolvimento de uma nova concepção do processo de calcinação, de forma a torná-lo compatível com o modo de operação dos sistemas de geração solar de calor de processos industriais.

Esta atual incompatibilidade inviabiliza a utilização do recurso solar como uma solução de curto prazo para a problemática do consumo de lenha nas empresas calcinadoras do Pólo Gesseiro do Araripe (PGA), uma vez que novas concepções de calcinação, favoráveis às condições do recurso solar, devem passar por todas as etapas de pesquisa e desenvolvimento até serem aceitas no ambiente industrial.

Do lado energético, o investimento solar não apresenta uma boa atratividade. Mesmo com uma análise bastante simplificada, onde os seus ganhos energéticos são superestimados e os custos subestimados, apresenta, na melhor situação, um tempo de retorno de pouco mais de 9 (nove) anos.

Outros investimentos concorrentes na redução do consumo de lenha, como apresentados na Tabela 1, se apresentam como alternativas mais viáveis, já que possuem simplicidade técnica, custo de investimento e tempo de retorno significativamente mais favoráveis que a proposta solar. De fato, o processo produtivo do Araripe é, em geral, bastante precário, fato caricaturado na baixa eficiência média dos fornos da região, de apenas 14%.

Corroborando as afirmativas citadas acima, recomendações da Agência Internacional de Energia indicam que a utilização da geração solar em um processo produtivo deve ser encarada como a inserção de uma nova fonte de geração de calor e, assim, sua utilização deve ser considerada apenas quando não há mais possibilidade de ações de eficiência energética e de aproveitamento de calor residual.

Complementando o já exposto, é importante enfatizar a realidade local do PGA. Distante cerca de 700 km das principais áreas metropolitanas da região Nordeste, o Pólo não possui disponibilidade de mão de obra qualificada, principalmente no que concerne à manutenção de novas tecnologias, como a solar.

Agradecimentos

Os autores gostariam de prestar seus sinceros agradecimentos à Mekatronik Industria e Comércio de Automação pelo apoio técnico e financeiro para o desenvolvimento da pesquisa, realizada sob o âmbito do projeto de inovação FACEPE (Fundação de Amparo à Ciência Tecnologia do Estado de Pernambuco) TECNOVA SIN-00769.16/14.

REFERÊNCIAS

- Andrade, C. A. L. de, Farias, C. J. L., Moutinho, L. M. G., 2013. O arranjo produtivo local do gesso do Araripe e a sua relação com a Ferrovia Transnordestina, Parnaíba – Piauí, VII SOBER Nordeste.
- Campello, F. C. B., 2013. O consumo específico de lenha como índice técnico para o ordenamento florestal no Araripe em Pernambuco, Revista dos Mestrados Profissionais, vol. 2, n. 1, pp. 23–43.
- Hassine, I. B., 2015. Identification of Suitable Integration Points, In: Muster, B. (Org.). Solar Process Heat for Production and Advanced Applications: Integration Guideline, International Energy Agency, Solar Heating & Cooling Programme, task 49: Solar Heat Integration in Industrial Processes, Deliverable B2, pp. 77–85.
- Helmke, A., Heß, S., 2015. Classification of Solar Process Heat System Concepts, In: Muster, B. (Org.). Solar Process Heat for Production and Advanced Applications: Integration Guideline, International Energy Agency, Solar Heating & Cooling Programme, task 49: Solar Heat Integration in Industrial Processes, Deliverable B2, pp. 61–76.
- Henriques Jr, M. F., 2013. Potencial de financiamento de eficiência energética nos setores de cerâmica e gesso no Nordeste, Banco Interamericano de Desenvolvimento.
- Horta, P., 2016. Process heat collectors: state of the art and available medium temperature collectors, International Energy Agency, Solar Heating & Cooling Programme, task 49: Solar Heat Integration in Industrial Processes, Deliverable A1.3
- _____, 2017. Comunicação pessoal.
- Kuntze, R. A., 2009. Gypsum: Connecting Science and Technology, American Society for Testing Materials - ASTM International.
- Müller, C., Rau, C., Schrüfer, J., 2014. CSP in non-electrical applications, Projeto Energia Heliotérmica, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, Brasília.
- Murphy, P., 2015. Guidelines Developed for Process Heat Integration, International Energy Agency, Solar Heat & Cooling Programme, task 49: Solar Heat Integration in Industrial Processes.
- Muster, B. *et al*, 2015. Integration Guideline, International Energy Agency, Solar Heating & Cooling Programme, task 49: Solar Heat Integration in Industrial Processes, Deliverable B2.
- _____, (Org.), 2015. Definitions and Nomenclatures, Solar Process Heat for Production and Advanced Applications: Integration Guideline, International Energy Agency, Solar Heating & Cooling Programme, task 49: Solar Heat Integration in Industrial Processes, Deliverable B2, pp. 4–7.
- _____; Schmitt, B.; Schnitzer, H., 2015. Thermal Processes and Heat Distribution Networks in Industry. In: Muster, B. (Org.). Solar Process Heat for Production and Advanced Applications: Integration Guideline, International Energy Agency, Solar Heating & Cooling Programme, task 49: Solar Heat Integration in Industrial Processes, Deliverable B2, 2015, pp. 11–30.

- Pereira, E. B. *et al*, 2017. Atlas Brasileiro de Energia Solar. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos.
- Peres, L., Benachour, M., Santos, V. A., 2008. Gesso: Produção e utilização na construção civil, Sebrae, Recife.
- Platzer, W., 2016. Performance assessment methodology and simulation case studies, International Energy Agency, Solar Heat & Cooling Programme, task 49: Solar Heat Integration in Industrial Processes, Deliverable C3.
- Projotec, 2010. Estudo de viabilidade tecnicoeconômica do processo de produção e logística do gesso fabricado a partir da gipsita do Araripe Pernambuco, Relatório Final.
- Rabl, A., 1981. Yearly average performance of the principal solar collector types. *Solar Energy*, vol. 27, n. 3, pp. 215–233.
- _____, 1985. *Active Solar Collectors and Their Applications*, Oxford University Press.
- Reddy, T. A., 2007. Active Solar Heating Systems. In: Kreith, F.; Goswami, D. Y. (Org.). *Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy*, CRC Press, pp. 916–964.
- Rolim, M. M.; Fraidenraich, N.; Vilela, O. C., 2014. Energia solar na produção de gesso – renovando definições, IV CBENS – IV Congresso Brasileiro de Energia Solar, Recife.
- Schmitt, B., 2015a. Assessment Methodology for Solar Heat Integration. In: Muster, B. (Org.). *Solar Process Heat for Production and Advanced Applications: Integration Guideline*, International Energy Agency, Solar Heating & Cooling Programme, task 49: Solar Heat Integration in Industrial Processes, Deliverable B2, pp. 31–33.
- _____, 2015b. Classification of Integration Concepts. In: Muster, B. (Org.). *Solar Process Heat for Production and Advanced Applications: Integration Guideline*, International Energy Agency, Solar Heating & Cooling Programme, task 49: Solar Heat Integration in Industrial Processes, pp. 46–60.
- Silva, J. A. A., 2009. Potencialidades de florestas energéticas de Eucalyptus no pólo gesseiro do Araripe-PE. *Academia Pernambucana de Ciência Agrônômica*, vol. 5 e 6, pp. 301–319.
- SILVA, R. *et al*, 2014. Thermo-economic design optimization of parabolic trough solar plants for industrial process heat applications with memetic algorithms. *Applied Energy*, vol. 113, pp. 603–614.
- Sindusgesso, 2014. Potencialidades do Pólo Gesseiro do Araripe, Simpósio Pólo Gesseiro do Araripe: Potencialidades, Problemas e Soluções, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.
- Tiba, C.; Fraidenraich, N., 2000. Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados terrestres, Editora Universitária da UFPE.
- Urbano, J. J., 2013. Estudo numérico do processo de calcinação da gipsita em fornos rotativos com aquecimento indireto a óleo. Tese de Doutorado, PPGEM, UFPE.

An assessment of the Solar Thermal Energy as process heat in the production of beta plaster of the Araripe Gypsum Pole

Abstract. *The Araripe Gypsum Pole is the greatest plaster producer in Brazil. The problem involved in its energy matrix is considered as a key issue for the continuity of the plaster's production and processing operations in the region. With very favorable conditions, previous studies indicate that the possibility of using solar radiation to produce the thermal energy required for the process production presents itself as a reasonable alternative. However, a more consistent assessment study is lacking, following methodological aspects consistent with the specificities of solar heat in industrial processes, in which issues related to the integration of the solar generation system into the industrial process and to a thermoeconomic analysis of solar generation, when viewed as a possibility of industrial investment, are analyzed. These issues were investigated with in accordance with the proposal of the International Energy Agency, particularly as regards the integration aspects. The calculation of the energy yields was carried out with the aid of correlations that provide the annual useful energy in function of the radiation conditions and technical parameters of performance of the considered collector technology. According to the studies carried out, there is no possibility of integration between the solar generation system and the current process employed in the Pole. The conditions of generation, transportation and heat transfer to the process do not allow elaboration of integration proposals between the solar generation system and the production process. From the thermoeconomic perspective, the best condition analyzed reduces the firewood consumption by 26% and brings a return on investment of more than nine (9) years. Finally, it became clear that some energy efficiency projects, analyzed in previous researches on the Araripe gypsum sector, are investments that are more attractive.*

Key words: Araripe Gypsum Pole, plaster production, solar heat for industrial processes.