

Uso de Energia e Eficiência Energética nas Calcinadoras do Polo Gessoiro na Região do Araripe-PE



Instituto Nacional de Tecnologia (INT)
Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI)

Rio de Janeiro, Outubro de 2024

Uso de Energia e Eficiência Energética nas Calcinadoras do Polo Gesseiro na Região do Araripe-PE

**Desenvolvido por: Instituto Nacional de Tecnologia – INT / Ministério da
Ciência, Tecnologia e Inovação**

Autores:

Mauricio Francisco Henriques Junior
Joaquim Augusto Pinto Rodrigues
Talita Pereira Faro da Silva
Paula Rocha Cícero

O Instituto Nacional de Tecnologia (INT) desenvolveu o presente estudo sob encomenda da Secretaria de Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (SETEC) do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), e com o apoio da Fundação de Apoio ao Desenvolvimento da Computação Científica (FACC).

INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA – INT

Divisão de Avaliações e Processos Industriais (DIAPI) – Laboratório de Energia (LABEN)

É permitida a reprodução total ou parcial deste material desde que citada a autoria do INT, e que não seja para fins comerciais. Os textos são de exclusiva responsabilidade dos autores.

Endereço:

Av. Venezuela, 82, Rio de Janeiro – RJ, Brasil.
CEP: 20081-312

www.gov.br/int/pt-br

Contato:

augusto.rodrigues@int.gov.br
mauricio.henriques@int.gov.br

Para mais conteúdos do polo gesso, acesse:

www.gov.br/int/pt-br/central-de-conteudos/apl-gesso

Ficha Catalográfica elaborada pela Biblioteca do INT (COPTe)
Bibliotecária Lídia Maria da Silva Schrago Mendes - CRB 7 / 3756

I59u Instituto Nacional de Tecnologia (Brasil).

Uso de Energia e Eficiência Energética nas Calcinadoras do Polo Gesseiro na Região do Araripe–PE / Mauricio Francisco Henriques Junior ... [et al.] – Rio de Janeiro : INT, 2024. – Documento eletrônico.

32p. : il. col.

Inclui bibliografia.

ISBN: 978-65-985944-2-8

1. Gesso. 2. Calcinador. 3. Fornos. 4. Energia. 5. Eficiência energética. 6. Arranjo produtivo local. I. Título. II. Henriques Junior, Mauricio Francisco. III. Rodrigues, Joaquim Augusto Pinto. IV. Silva, Talita Pereira Faro da. V. Cícero, Paula Rocha.

CDU: 620.9:666.9

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	6
RESUMO EXECUTIVO	7
1. Introdução	8
2. Fornos Calcinadores	8
2.1. Descrição Geral	9
3. Uso de Energia nas Calcinadoras	12
4. Eficiência Energética nos Calcinadores	14
4.1. Conceitos Gerais	14
4.2. Descrição das Oportunidades de Otimização Energética nos Calcinadores ...	16
4.2.1. Melhoria de Combustão	17
4.2.2. Emprego de Lenha Picada	20
4.2.3. Recuperação de Calor dos Gases de Exaustão	22
4.2.4. Isolamento Térmico de Paredes dos Calcinadores	24
4.2.5. Controle Automatizado	24
4.2.6. Calcinadores Contínuos.....	25
4.2.7. Maior Eficiência Energética com o Emprego de Gás Natural	26
5. Avaliação Econômica das Medidas de Eficiência Energética Térmica	26
5.1. Modernização de Forno de Calcinação “Barriga Quente”	26
5.2. Emprego de Lenha Picada	27
5.3. Implementação em Conjunto da Modernização dos Calcinadores e Emprego de Lenha Picada	28
6. Potencial de Economia de Energia Regional	28
7. Comentários Finais	30
8. Referências Bibliográficas	32

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema básico de uma calcinadora.....	9
Figura 2. Vista esquemática no calcinador barriga quente/marmita rotativa.....	10
Figura 3. Fornos barriga quente.	11
Figura 4. Fornos tipo marmita rotativa revestidos com chapa de aço.....	11
Figura 5. Forno horizontal rotativo de operação contínua.	12
Figura 6. Lenha tradicional em toras/galhos (à esquerda) e picada (à direita).	13
Figura 7. Esquema simplificado de um calcinador e seus fluxos de materiais, insumos e gases.	15
Figura 8. Diagrama de Sankey – Exemplo das perdas/fluxos de calor em um calcinador típico.	16
Figura 9. Exemplo do comportamento das perdas de calor nos gases quentes na chaminé a 500°C em função do % de excesso de ar na combustão para a queima de lenha com 30% de umidade.	18
Figura 10. Kit Bacharach para a medição de teor de dióxido de carbono (CO ₂) ou de oxigênio (O ₂) em gases de combustão.	19
Figura 11. Queima de lenha em toras sem controle de alimentação e combustão.	19
Figura 12. Queima deficiente de lenha em toras com alimentação manual.	20
Figura 13. Chaminé de calcinador indicando temperatura acima de 500°C e emissão de fuligem.....	20
Figura 14. Vista de fornalha com queima de lenha picada.	21
Figura 15. Representação gráfica de fornalhas: i) com excesso de lenha em toras e pouco ar; ii) com pouca lenha e muito ar; iii) com pedaços menores de biomassa numa situação equilibrada com a quantidade de ar de combustão.	21
Figura 16. Poder calorífico inferior da lenha (em kcal/kg) x % de umidade da lenha ou biomassa.....	22
Figura 17. Variação das perdas de calor na chaminé de calcinadores em função das temperaturas dos gases de exaustão (para um excesso de ar de combustão de 120%).	23
Figura 18. Esquema da recuperação de calor aproveitando os gases quentes de exaustão na saída do calcinador. Ar de combustão indicado em “azul”.	23
Figura 19. Exemplo do comportamento da temperatura externa de paredes - à esquerda: parede sem revestimento interno de fibra cerâmica; à direita: parede com revestimento. Ambas considerando a temperatura interna na fornalha a 800°C.....	24
Figura 20. Exemplo de painéis de controle/programação da produção de unidade de calcinação.	25

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Estimativa do consumo de lenha no polo gesseiro do Araripe - PE.	14
Tabela 2. Excessos de ar de combustão ideais em função dos teores de CO ₂ ou de O ₂ na chaminé por tipo de combustível.....	18
Tabela 3. Parâmetros econômicos para a modernização de forno barriga quente.	27
Tabela 4. Parâmetros econômicos para o picador de lenha/sistema alimentação.....	28
Tabela 5. Parâmetros econômicos para a implementação do pacote modernização dos fornos e lenha picada.	28
Tabela 6. Roteiro da estimativa da economia de energia existente no pólo gesseiro do Araripe	29

APRESENTAÇÃO

O presente estudo **“Uso de Energia e Eficiência Energética nas Calcinadoras do Polo Gesseiro na Região do Araripe-PE”** se insere no Projeto “Eficiência Energética no Arranjo Produtivo Local (APL) Gesseiro da Região do Araripe-PE”, financiado pelo Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovações – MCTI. O projeto visa apoiar o desenvolvimento tecnológico de Arranjos Produtivos Locais (APL) no setor de produção e transformação mineral no Brasil.

O APL de produção de gesso da região do Araripe, principal responsável pela produção nacional, busca promover o desenvolvimento econômico, social e sustentável da região, articular melhorias na infraestrutura local e criar um ambiente favorável para novos investimentos.

Neste sentido, considerando que o processo fabril da fabricação do gesso envolve considerável aporte de energia, principalmente na etapa de calcinação, o tema da eficiência energética foi um dos selecionados e é aqui desenvolvido.

A calcinação se dá a partir da queima de lenha, que é extraída em boa parte do bioma da Caatinga, o que destaca a necessidade de se ampliar a oferta de outras fontes energéticas sustentáveis, além de se praticar seu uso eficiente. Busca-se, portanto, garantir economia de energia, maior produtividade, redução de custos e produtos com qualidade, mantendo o polo competitivo e sustentável, e consequentemente sua capacidade de geração de empregos e renda na região do semiárido brasileiro.

RESUMO EXECUTIVO

O estudo examinou as oportunidades para a implementação de medidas de eficiência energética em fornos calcinadores de gesso na região do Araripe no estado de Pernambuco, com o intuito de reduzir custos fabris, aumentar a produtividade dos processos e garantir maior competitividade para as empresas calcinadoras.

Os calcinadores, equipamentos fundamentais para a produção de gesso, são equipamentos que empregam grandes quantidades de energia, na forma de lenha em toras e biomassas picadas. Esse uso, entretanto, ocorre geralmente com baixo rendimento energético, dadas as características técnicas dos calcinadores, modo operacional e perdas de calor inerentes ao próprio processo. Assim, visando minimizar tais perdas de energia, o presente estudo busca avaliar em detalhe as principais possibilidades técnicas para otimização dos equipamentos que, no final, possam trazer redução de custos e ganhos de produtividade.

As alternativas técnicas avaliadas compreenderam: a otimização da combustão nos calcinadores, o emprego de lenha picada em substituição ao modelo usualmente empregado de queima de lenha em toras e galhos, a recuperação de calor para preaquecimento de ar de combustão, a automação do processo, a melhoria do isolamento térmico dos equipamentos e a implementação do gás natural em substituição à lenha.

Esse conjunto de medidas de economia de energia, excetuando-se a implementação do gás natural, pode trazer uma economia de até 30% de energia térmica, na forma de lenha. Na maior parte das empresas calcinadoras, os valores a serem investidos apresentam retorno financeiro relativamente rápido, dependendo dos tipos de intervenções necessárias em cada empresa.

No todo, se adotada como linha de corte que cerca de 50% das empresas do APL gesseiro pudessem adotar o pacote de medidas de maior eficiência energética aqui descrito, que corresponde a uma economia de 30% de lenha por empresa, estima-se que 330.000 estéreos de lenha por ano poderiam ser poupados.

1. Introdução

O presente estudo objetiva examinar as oportunidades para a implementação de medidas de eficiência energética em fornos calcinadores de gesso na região do Araripe no estado de Pernambuco.

No processo de calcinação ocorre a transformação físico-química do minério gipsita em gesso em pó, onde é empregada uma quantidade significativa de energia térmica, suprida basicamente através da queima de vários tipos de biomassas.

Os fornos calcinadores apresentam geralmente um rendimento energético baixo ou intermediário, por apresentarem perdas de calor intrínsecas ao processo em diversas partes dos equipamentos. Nesta linha, tanto as perdas de energia evitáveis, como aquelas passíveis de recuperação são descritas e avaliadas, e são apontadas as intervenções necessárias para uma maior eficiência energética, as economias correspondentes e outros ganhos associados. Além disso, foram também desenvolvidas avaliações econômicas e estimado um potencial geral de economia de energia para o setor na região.

O trabalho contou com estreita cooperação com o Sindicato das Indústrias do Gesso do Estado de Pernambuco - SINDUSGESSO, o Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas - SEBRAE-PE, e o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial - SENAI/FIEPE.

2. Fornos Calcinadores

Dependendo do processo de calcinação da gipsita são obtidos dois tipos de gesso - gesso beta (β) e gesso alfa (α), ambos com uma ampla variedade de aplicações. O gesso tipo β , principal tipo fabricado, é amplamente utilizado no setor da construção civil, que representa mais de 95% do mercado de gesso. Entre suas principais aplicações podem ser destacadas: fabricação de elementos pré-moldados, como placas para forros, elementos decorativos (sancas, pedestais, etc.), blocos divisórios e placas de gesso acartonado, utilizados tanto para forros, como para divisórias e revestimentos; revestimento manual de paredes e tetos (com um tempo de pega maior), e gesso cola, usado no assentamento de blocos, placas e outros elementos decorativos (PROJETEC, 2010).

Os calcinadores têm exatamente a função de promover a transformação da gipsita em gesso, processo que se dá durante cerca de uma hora a uma temperatura entre 150-160°C em fornos de vários tipos, sob movimentação constante para manter uma uniformidade no produto. Neste processo de calcinação, a maior parte do sulfato de cálcio di-hidratado tem sua estrutura cristalina danificada, ao perder o equivalente

a 1 1/2 molécula de água, tomando a forma do denominado sulfato hemidrato de cálcio ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$). A Figura 1 apresenta o esquema de produção básico do processo completo de uma calcinadora.

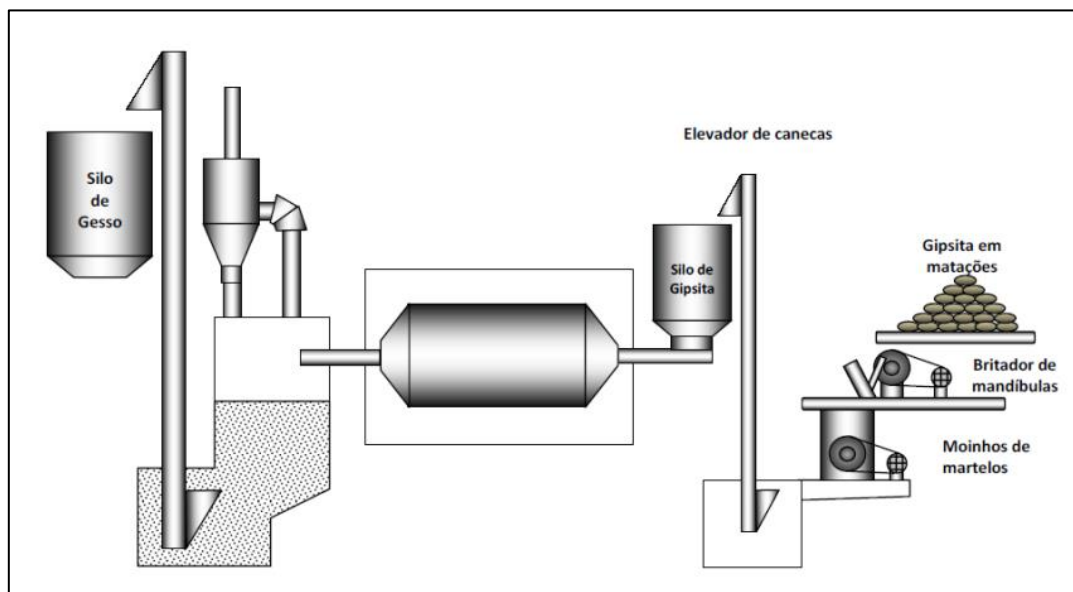


Figura 1. Esquema básico de uma calcinadora.

Fonte: LIMA FILHO (2010) adaptado de PERES *et al.* (2008).

2.1. Descrição Geral

Atualmente os fornos empregados na fabricação de gesso beta são basicamente do tipo cilíndrico horizontal rotativo, conhecidos popularmente por “barriga quente” ou “marmita rotativa”, modelos que estão presentes na maior parte das empresas de menor e médio porte.

O conceito dos fornos compreende um cilindro interno rotativo em aço, posicionado horizontalmente sobre uma fornalha estruturada e revestida com tijolos refratários. Numa das extremidades do cilindro rotativo se dá a alimentação da gipsita moída, enquanto na extremidade oposta ocorre a retirada do material calcinado, o gesso propriamente dito. O processo se dá por bateladas.

Os gases quentes de combustão produzidos na queima na fornalha têm um fluxo ascendente, e passam externamente ao longo de todo cilindro rotativo, sendo em seguida direcionados para a chaminé do equipamento, conforme mostrado na Figura 2. Há também a exaustão do vapor d’água produzido no processo pela perda de água ligada quimicamente da gipsita.

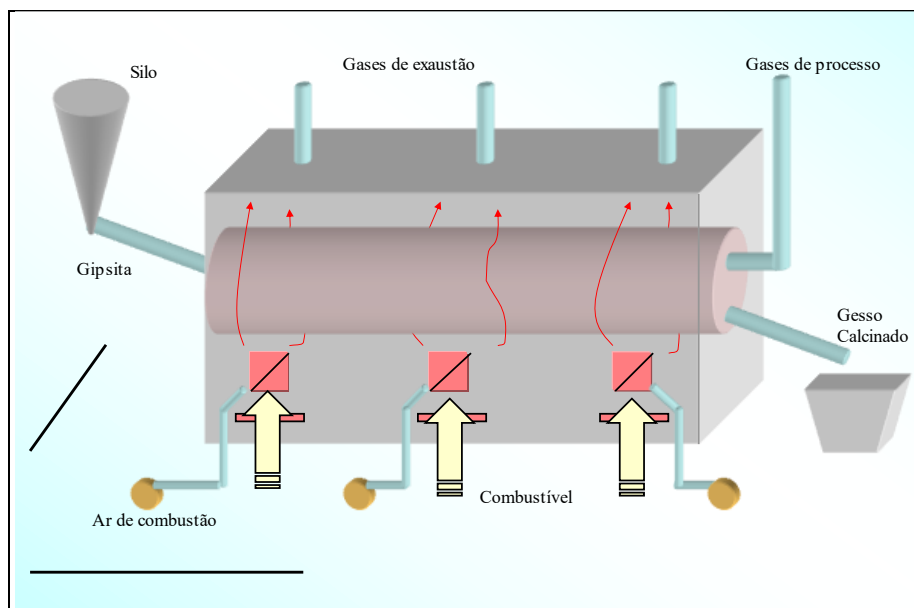


Figura 2. Vista esquemática no calcinador barriga quente/marmitta rotativa.
Fonte: Elaborado por A. Faccion

Embora os fornos barriga quente possam empregar diversos tipos de combustíveis - sólidos, líquidos ou gasosos, atualmente a lenha, em toras ou picada, é o combustível principal utilizado pelas empresas calcinadoras na região do Araripe-PE (SEBRAE-PE, 2018).

Os calcinadores são geralmente fabricados na própria região por metalúrgicas locais ou mesmo nas próprias empresas calcinadoras (Henriques Jr., 2013). A depender do fabricante, essas pequenas plantas podem apresentar uma determinada configuração contando com os equipamentos periféricos e outros comandos, o que permite um monitoramento razoável da operação de calcinação. Portanto, o processo por batelada pode ser controlado automaticamente através de programas computacionais (controle de tempo, de temperatura e de perda de massa) ou, em situações mais simples, operados empiricamente com base na experiência dos funcionários. As Figuras 3 e 4 mostram alguns calcinadores barriga quente/marmitta rotativa.



Figura 3. Fornos barriga quente.
 Fonte: Peres in PROJETEC (2010) (à esquerda) e própria (à direita).



Figura 4. Fornos tipo marmita rotativa revestidos com chapa de aço.
 Fonte: própria (à esquerda) e SINDUSGESSO (2023) (à direita).

Grosso modo, nos fornos calcinadores de operação intermitente presentes na região a produção pode se situar entre 3,2 t e 6,0 t de gesso/batelada, como também podem ser realizadas diversas bateladas por dia. Apresentam consumo médio de lenha de 0,5 metro estéreo (st) por tonelada de gesso em pó.

Alternativamente, embora com um custo de capital bem mais elevado, a calcinação pode ser realizada em fornos com produção contínua, de maior capacidade de produção e maior eficiência energética. São fornos tubulares horizontais rotativos, com comprimentos entre 12 e 20 m e diâmetro entre 1 e 3 m, conforme Figura 5, construídos em aço e revestidos internamente com refratários/tijolos isolantes. Nestes

equipamentos, a gipsita pré-moída percorre toda a extensão do tubo rotativo por gravidade e é calcinada no percurso. O tempo de residência é controlado pela velocidade de rotação do tubo. A capacidade dos fornos se situa em torno de 3-4 t/hora, e o consumo específico de energia médio é de 17 kg de GLP/t de gesso ou 80 kg de biomassa/t de gesso, que são índices melhores em relação aos equipamentos tradicionais a bateladas e alimentados com lenha (Henriques Jr., 2013).

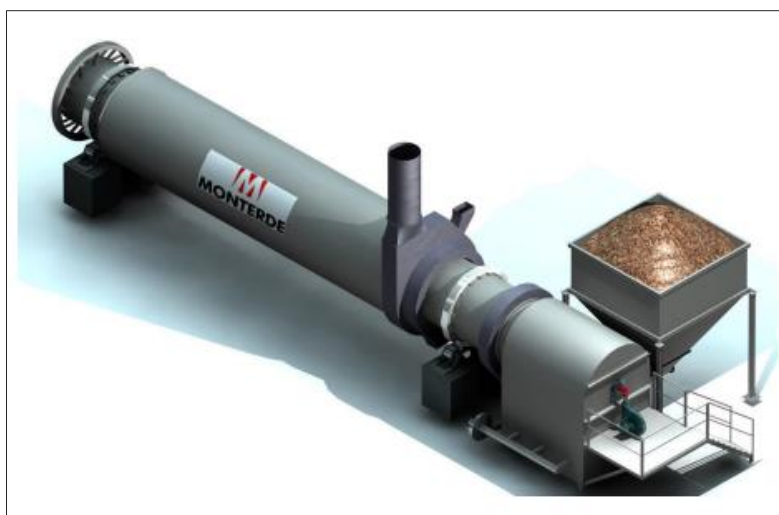


Figura 5. Forno horizontal rotativo de operação contínua.
Fonte: Monterde in PROJETEC (2010).

Na região do Araripe, além da lenha usada como combustível, o coque de petróleo também já foi amplamente empregado no início dos anos 2000, como também foram realizados alguns testes com gás natural (GN) em algumas empresas por volta de 2013/2014, mas que não demonstraram viabilidade econômica à época, dado o preço mais elevado do gás (Oliveira e Shinohara, 2014). No entanto, esse combustível volta a despertar interesse no momento, dada a possibilidade de se reduzir ou eliminar alguns impostos e encargos, de acordo com propostas a cargo da COPERGÁS e do governo do Estado de Pernambuco (SINDUSGESSO, 2023; COPERGÁS, 2024).

3. Uso de Energia nas Calcinadoras

O estudo “Linha de Base” elaborado pelo INT (2023), em complemento ao estudo “Cadeia Produtiva do Gesso na Região da Chapada do Araripe” do SEBRAE-PE (2018), indica que estariam em operação na região do Araripe-PE cerca de 130 empresas calcinadoras operando formalmente, alcançando uma produção de gesso em pó de 1,65 milhões de toneladas por ano. Por outro lado, o SINDUSGESSO (2023) aponta que estejam operando na região cerca de 185 fabricantes de gesso, resultando

numa produção em torno de 4,44 milhões t/ano. Isso representa uma diferença de 170%, portanto bastante significativa para a tomada de decisões e de políticas públicas no caso de se avaliar alternativas energéticas e outras necessidades.

Conforme comentado, a energia térmica¹ para a calcinação é suprida exclusivamente pelo uso de biomassas energéticas, na forma tradicional de lenha em toras e galhos ou lenha picada, conforme mostrado na Figura 6.



Figura 6. Lenha tradicional em toras/galhos (à esquerda) e picada (à direita).

O consumo de energia térmica não está definido precisamente, devendo se situar entre 0,3 e 0,7 metro estéreo de lenha (st) por tonelada de gesso, de acordo com estudos prévios de Henriques Jr. (2013), CEPIS (2016), Mascarenhas (2016), MMA (2018), dentre outros, e uma coleta de dados pontuais junto a alguns produtores entre 2023 e 2024. Esse indicador pode variar de acordo com a tecnologia empregada, regime de operação (se contínuo ou batelada), tipo de lenha ou biomassa e sua umidade, tipo de queima (alimentação intermitente ou contínua e automatizada), estado de conservação ou manutenção do calcinador, ritmo de produção (bateladas por dia), dentre outros aspectos.

Dessa forma, tomando-se como o valor médio um consumo de 0,5 st de lenha/tonelada de gesso calcinado, a quantidade total de lenha pode ser estimada conforme indicado na Tabela 1, variando de acordo com a fonte de dados escolhida.

¹Há também um consumo de energia elétrica empregada em motores diversos ao longo de todo o processo produtivo.

Tabela 1. Estimativa do consumo de lenha no polo gesso do Araripe - PE.

Fonte de dados	Produção anual (t)	Consumo de lenha equivalente		
		estéreo/ano	t/ano	tep/ano
SEBRAE (2018)	1.650.000	825.000	247.500	76.725
SINDUSGESSO (2023)	4.440.000	2.220.000	660.000	204.600

Obs.: tep - tonelada equivalente de petróleo.

Fonte: Elaboração própria.

Portanto, se considerado o patamar superior de produção, dado pelo SINDUSGESSO (2023), o consumo total de lenha equivalente atinge aproximadamente 2,22 milhões m st de lenha/ano ou 660.000 toneladas de lenha/ano (equivalente a 204.600 tep/ano), montante bastante significativo e merecedor de atenção, tanto pelo lado da oferta dessa energia, quanto pelo lado da demanda, já que existem formas para minimizar esse consumo nas empresas, conforme será apresentado adiante.

Dessa forma, para efeito de comparação, caso esse consumo de lenha fosse provido exclusivamente pela mata da Caatinga, seria necessária uma área equivalente do bioma de aproximadamente 37.000 hectares², desconsiderando o uso de outras biomassas que certamente compõem a oferta atual, que inclui: algaroba (*Prosopis juliflora* (Sw.) DC.)³, podas de frutíferas e municipais, resíduos de madeira (pó de serra, podas, construção civil e *pallets*), plantios (eucalipto por exemplo) e planos de manejo florestal sustentável (PMFS) da própria Caatinga (MMA, 2018), todas fontes com procedência legal e que detêm autorizações dos agentes de meio ambiente.

4. Eficiência Energética nos Calcinadores

4.1. Conceitos Gerais

Eficiência energética significa produzir algo ou realizar um serviço empregando uma menor quantidade de energia, mas sem prejudicar a qualidade do produto final ou do serviço. Ou seja, significa produzir o mesmo ou até mais, mas sem desperdiçar energia.

Nos processos e equipamentos térmicos em geral, onde há a produção e uso de calor para realizar alguma transformação física ou química, ou ainda em tratamentos térmicos, geralmente se emprega grande quantidade de energia, tanto aquela para

² Área equivalente a cerca de 62.000 campos de futebol.

³ Espécie exótica, de exploração permitida pelos agentes ambientais, e cuja lenha tem boas características para queima em fornos (MMA, 2018).

suprir a energia “útil” necessária ao produto propriamente dito, como também para “compor” a parcela que é necessária para o processo como um todo, e que é perdida e eventualmente desperdiçada.

Portanto, seguindo a regra geral dos equipamentos térmicos, os calcinadores apresentam vários tipos de perdas de calor, embora algumas possam ser minimizadas ou recuperadas parcialmente, conforme detalhado nos itens adiante. O uso eficiente da energia, além de proporcionar reduzir custos na produção em muitas situações, torna possível garantir maior qualidade dos produtos finais e reduzir perdas, além de gerar emissões atmosféricas poluentes mais baixas.

Conforme representado na Figura 7, o calor fornecido pela queima de um combustível qualquer, seja lenha, gás ou outro, é direcionado ao material que está sendo processado (no caso a gipsita), o chamado calor útil, mas também se dispersa por várias partes do calcinador, incluindo: (1) gases de exaustão da fornalha (chaminé), (2) através das paredes por radiação e convecção, (3) no vapor d’água da desidratação da gipsita e (4) no próprio gesso aquecido quando retirado do equipamento. Somente uma parcela, ao redor de 30 a 50%, de acordo com o tipo de equipamento ou modelo operacional da empresa, é de fato aproveitada para a transformação físico-química da gipsita para gesso em pó. Todo o calor restante é perdido, reduzindo a eficiência do equipamento, motivo pelo qual se faz importante compreender e atuar de forma a otimizar o processo, conforme discutido adiante.

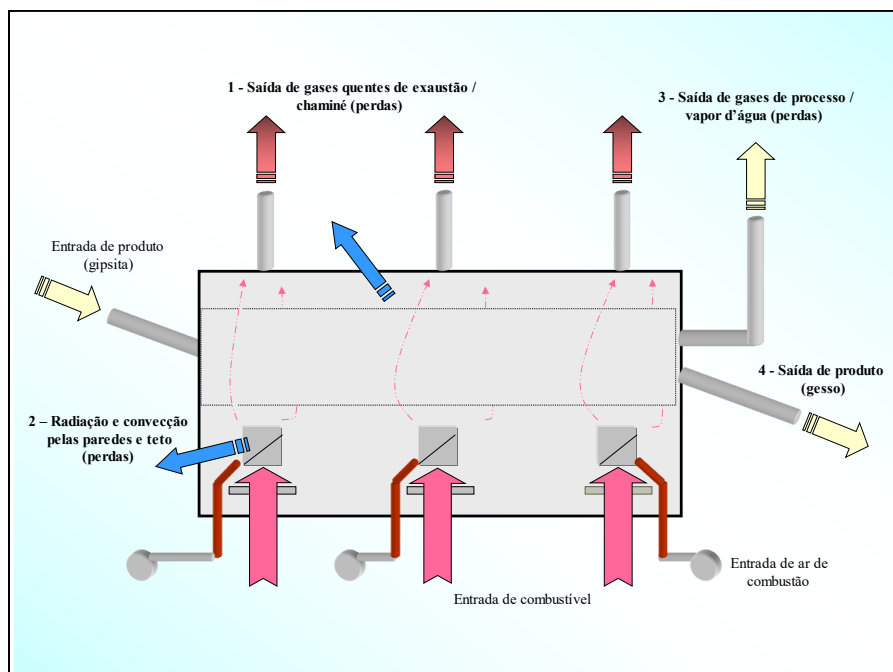


Figura 7. Esquema simplificado de um calcinador e seus fluxos de materiais, insumos e gases.
Fonte: Elaborado por A. Faccion.

A Figura 8 mostra o diagrama de Sankey onde estão indicadas as parcelas usuais ou médias de cada tipo de perda de energia.

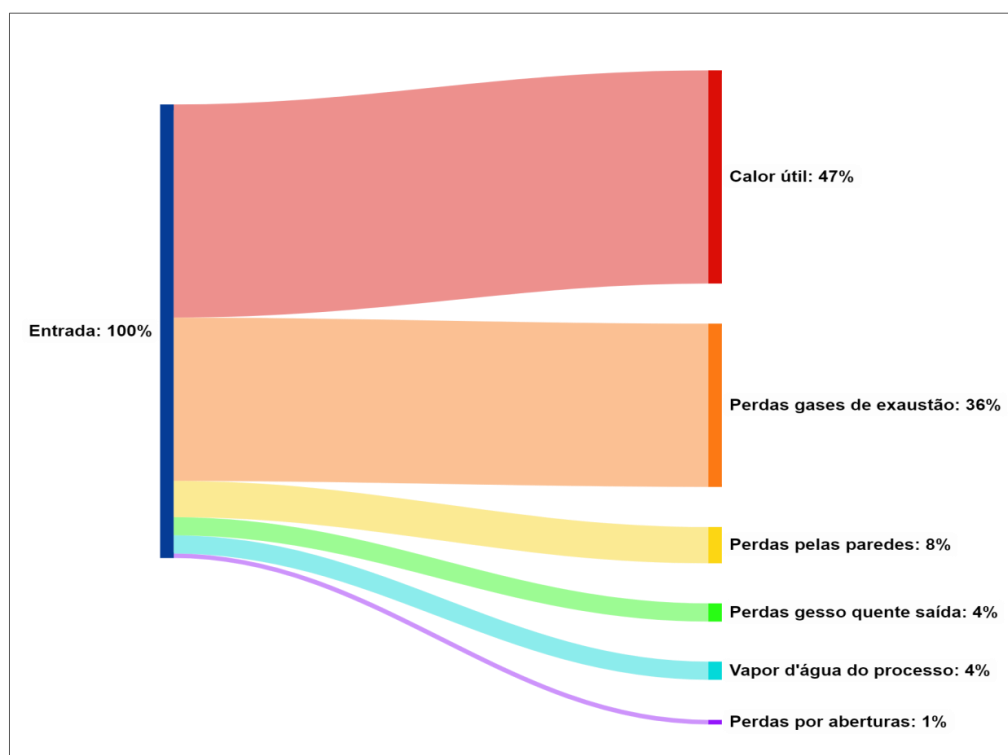


Figura 8. Diagrama de Sankey – Exemplo das perdas/fluxos de calor em um calcinador típico.
Obs.: “vapor d’água do processo” refere-se ao calor contido na água ligada quimicamente a gipsita e que é suprimida na calcinação.

Como regra geral, para todos os equipamentos térmicos alimentados por combustíveis, existem duas possibilidades centrais para se alcançar maior eficiência energética: a “otimização da combustão propriamente dita” e a “promoção de troca de calor mais eficiente entre produtos da combustão e o processo ou produto”. No primeiro caso, da melhoria da combustão, os conceitos envolvidos são apresentados adiante em 4.2.1 e 4.2.2. A promoção da troca de calor mais eficiente refere-se a uma condição que se dá quando os gases de combustão fornecem o máximo de calor ao produto ou processo e deixam o equipamento a uma temperatura a mais baixa possível, conforme exemplificado no caso dos calcinadores de operação contínua (vide 4.2.6).

4.2. Descrição das Oportunidades de Otimização Energética nos Calcinadores

Conforme comentado, as oportunidades de melhoria do uso da energia térmica nas empresas estão presentes em diversos pontos dos calcinadores, e permitem não

somente reduzir custos e perdas na produção, mas também obter uma melhoria da qualidade dos produtos e ainda minimizar a emissão de poluentes atmosféricos.

4.2.1. Melhoria de Combustão

Operar uma boa combustão, independentemente do tipo do combustível usado, permite economizar energia nos calcinadores de produção de gesso. Isto significa que cada tipo de combustível tem suas características próprias, conteúdo energético, facilidades ou dificuldades, custos específicos e, portanto, exigem condições específicas de combustão para que se consiga uma operação ótima, com menores perdas de calor na chaminé e baixas emissões de fuligem (Trinks e Mawhinnney, 1975; BristishGas, 1992). Neste sentido três condições básicas são fundamentais:

- i) Ter uma câmara de combustão dimensionada corretamente para a capacidade energética que se deseja e de acordo com o tipo de combustível, se lenha ou gás, por exemplo;
- ii) Ter uma mistura bem homogênea e íntima entre o combustível e o ar de combustão (comburente);
- iii) Ter uma proporção adequada entre as quantidades do combustível e do ar, que é variável de acordo com o tipo de combustível.

Caso alguma destas condições não seja atendida, ocorre uma perda excessiva de energia nos gases quentes de combustão na saída para a chaminé, como também pode ocorrer a produção de fuligem.

Essas perdas de calor elevadas nos gases quentes de exaustão (na chaminé) acontecem em todos os equipamentos térmicos atendidos pela queima de combustíveis, pois se trata de uma condição intrínseca ao processo de combustão industrial, mas que só pode ser atenuada quando se tem um ajuste adequado da proporção ar/combustível. Ou seja, é essencial não existir excesso de ar de combustão muito além do necessário, nem ter ar insuficiente (faltar ar), que causará a geração de fuligem. O excesso de ar de combustão, além do necessário, proporciona perdas de calor ainda mais elevadas nos gases de exaustão na chaminé. Portanto, quanto menor for o “excesso de ar” usado na combustão, menores serão as perdas nos gases quentes da chaminé, conforme ilustrado na Figura 9, para a queima de lenha.

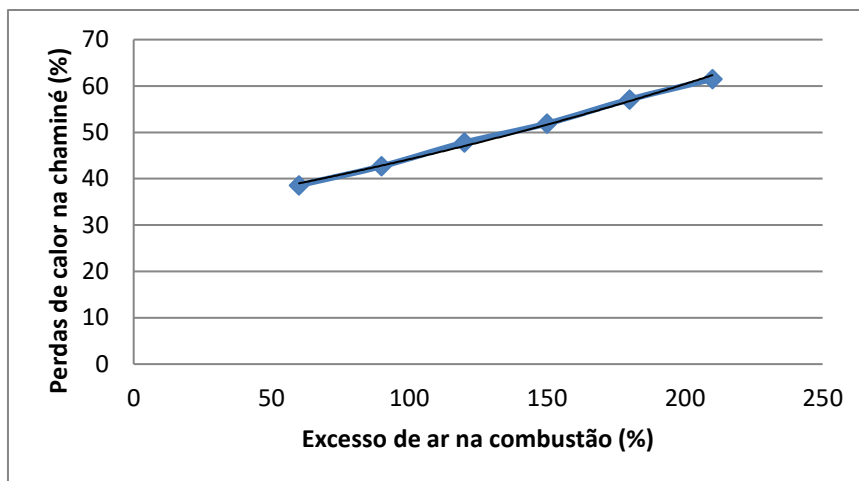


Figura 9. Exemplo do comportamento das perdas de calor nos gases quentes na chaminé a 500°C em função do % de excesso de ar na combustão para a queima de lenha com 30% de umidade.

Portanto, para cada tipo de combustível há uma faixa ideal de mistura ar/combustível, conforme indicado na Tabela 2. Nota-se que, combustíveis sólidos precisam operar necessariamente com taxas de excesso de ar mais elevadas. Essas proporções de ar de combustão ideais podem ser controladas através de medições da composição volumétrica dos gases de chaminé, através do teor de gás carbônico (CO₂) ou de oxigênio (O₂), empregando-se analisadores de combustão (químicos ou eletrônicos), mostrado na Figura 10.

Tabela 2. Excessos de ar de combustão ideais em função dos teores de CO₂ ou de O₂ na chaminé por tipo de combustível.

Tipo de combustível	Faixa ideal de excesso de ar de combustão (%)	% equivalente na chaminé	
		CO ₂	O ₂
Lenha (em toras)	80 – 110	9,5 – 11,0	9,5 – 11,0
Lenha picada ou pó de serra	45 – 60	12,5 - 13,5	6,8 – 7,9
Óleo combustível	10 - 25	12,7 – 14,5	2,0 – 4,5
Gás natural	4 - 10	10,6 – 11,3	0,7 – 2,3

Fonte: Elaboração própria.



Figura 10. Kit Bacharach para a medição de teor de dióxido de carbono (CO_2) ou de oxigênio (O_2) em gases de combustão.

No caso da queima de lenha em toras, é comum ocorrer um descontrole muito grande na combustão, uma vez que há momentos em que a câmara de combustão está com muito combustível e pouco ar e, em outros, a lenha vai sendo consumida e a fornalha se apresenta com pouco combustível e ar em excesso. Assim, o processo de queima fica muito instável e gera perdas de calor elevadas nos gases na chaminé, além de fuligem em excesso, conforme mostrado nas Figuras 11, 12 e 13. No caso do emprego de gás natural, a sua combustão é mais fácil de ser ajustada, como também permite alcançar uma maior eficiência energética e ausência completa de fuligem.



Figura 11. Queima de lenha em toras sem controle de alimentação e combustão.



Figura 12. Queima deficiente de lenha em toras com alimentação manual.



Figura 13. Chaminé de calcinador indicando temperatura acima de 500°C e emissão de fuligem.

Como regra geral, pode-se considerar uma economia média na melhoria e ajuste da combustão com a lenha entre 2% e 5%, segundo simulações próprias.

4.2.2. Emprego de Lenha Picada

O emprego de lenha picada ou pó de serra visa obter maior estabilidade na queima e economia de energia. A biomassa picada geralmente se encontra bastante uniforme e seca, o que viabiliza uma melhor mistura com o ar de combustão, bem como possibilita empregar um menor volume desse ar. Além disso, quando o material picado é injetado através de sistemas automatizados e com alimentação contínua, ou mesmo moduláveis de acordo com a necessidade de calor e o ritmo de operação dos calcinadores, a eficiência energética conseguida geralmente é ainda superior (Figuras 14 e 15).



Figura 14. Vista de fornalha com queima de lenha picada.

Situação comum:

Queima com toras de diferentes formas e dimensões → Combustão instável



Fornalhas com excesso de lenha

Falta de ar → Gera Fuligem

Fornalhas com pouca lenha

Excesso elevado de ar → Maior consumo de lenha



Situação desejável:

Queima com cavacos, briquetes ou serragem → Combustão estável



Fornalhas com lenha picada em volumes estáveis e equilibrados

- Redução na emissão de fuligem
- Economia de biomassa
- Melhor controle da temperatura no interior dos fornos

Quanto menores os pedaços de biomassa, pode-se ter melhor controle da quantidade de ar necessária para uma combustão eficiente e equilibrada

Figura 15. Representação gráfica de fornalhas: i) com excesso de lenha em toras e pouco ar; ii) com pouca lenha e muito ar; iii) com pedaços menores de biomassa numa situação equilibrada com a quantidade de ar de combustão.

Além das vantagens citadas, ao se trabalhar com lenha picada ou pó de serra, uma parcela da umidade presente na lenha original em toras é suprimida naturalmente, o que proporciona um maior aproveitamento energético. A umidade da lenha em toras pode variar de 15% a 40%, sendo que uma lenha muito “verde”, por exemplo, pode conter mais de 30% de água, que representa um desperdício de energia, conforme ilustrado na Figura 16. Quanto mais seca, maior será o seu poder calorífico⁴.

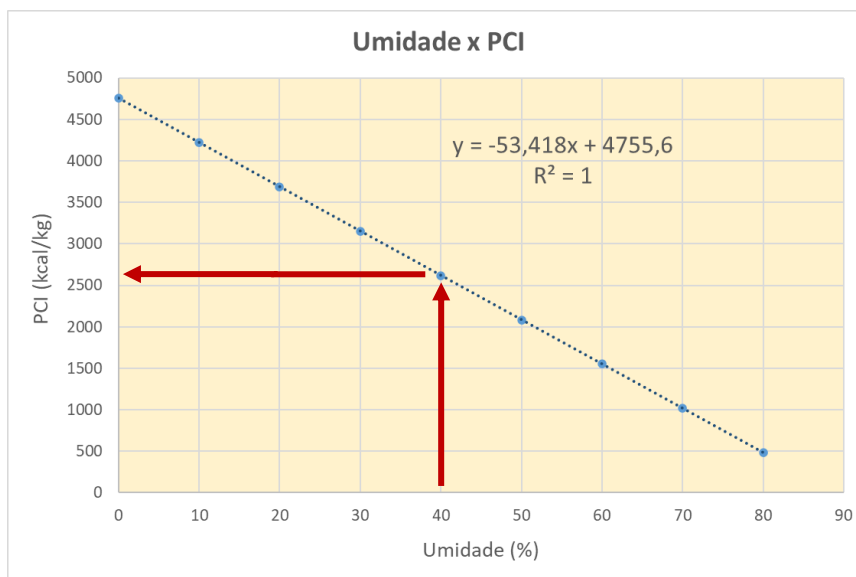


Figura 16. Poder calorífico inferior da lenha (em kcal/kg) x % de umidade da lenha ou biomassa.

A troca de um sistema tradicional de queima de lenha em toras por um sistema de lenha picada com alimentação contínua e automatizada pode garantir uma economia de energia entre 18% e 25%, de acordo com simulações próprias. Esta faixa resulta das temperaturas dos gases de exaustão na entrada da chaminé e da proporção de ar/combustível para manter uma boa combustão.

4.2.3. Recuperação de Calor dos Gases de Exaustão

Conforme mencionado, os calcinadores geralmente apresentam perdas de calor que podem atingir entre 35% e 60% nos gases de exaustão na chaminé, dependendo das condições de combustão e da temperatura dos gases na saída da fornalha (na

⁴O poder calorífico inferior (PCI) da lenha, além da umidade, também sofre ligeira variação de acordo com a espécie da biomassa - algaroba, poda de cajueiro, nativa da Caatinga, eucalipto ou outras.

entrada da chaminé), conforme ilustrado na Figura 17. Quanto mais elevada for a temperatura, maiores são as perdas nos gases de combustão. Observa-se que as perdas totais de calor aumentam praticamente em dobro, ao variar a temperatura de 350 °C para 650 °C.

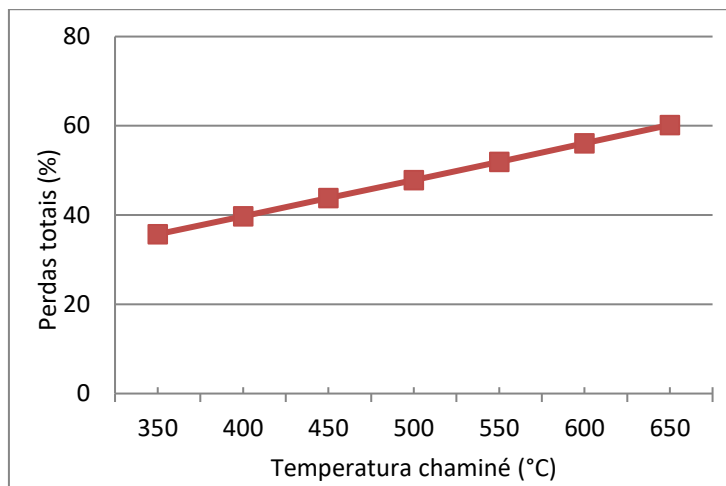


Figura 17. Variação das perdas de calor na chaminé de calcinadores em função das temperaturas dos gases de exaustão (para um excesso de ar de combustão de 120%).

Parte desse calor, entretanto, é passível de recuperação, e pode servir para pré-aquecer o próprio ar de combustão, adotando-se um sistema bastante simples composto por um trocador de calor na saída do calcinador, junto ao duto da chaminé (vide Figura 17).

Caso se consiga elevar a temperatura do ar de combustão até 120°C, por exemplo, a economia de energia atinge 6%.

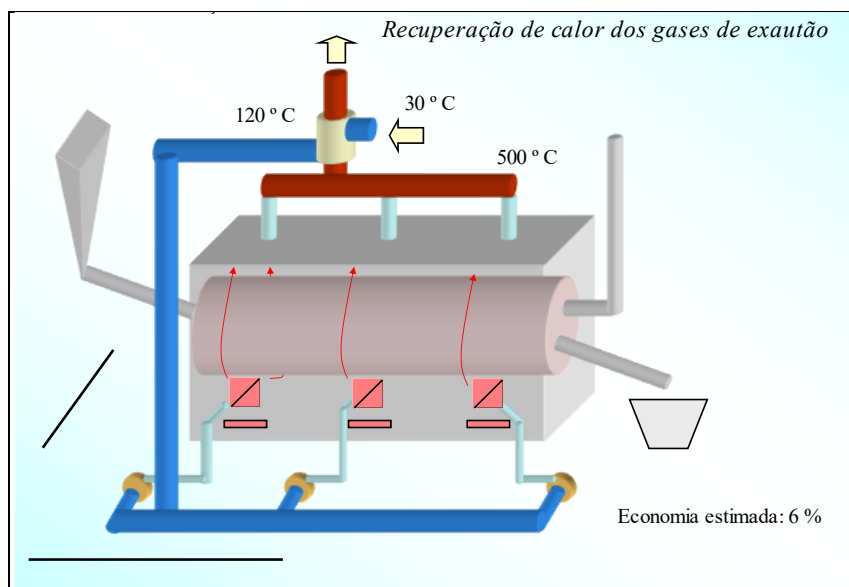


Figura 18. Esquema da recuperação de calor aproveitando os gases quentes de exaustão na saída do calcinador. Ar de combustão indicado em azul.

Fonte: Elaborado por A. Faccion.

4.2.4. Isolamento Térmico de Paredes dos Calcinadores

A eficiência energética nos calcinadores também pode ser otimizada com o emprego de refratários de maior qualidade ou através da instalação de mantas de fibra cerâmica aplicadas internamente sobre a alvenaria refratária. Dessa forma é possível reduzir as perdas de calor por radiação e/ou convecção através das paredes e teto. A economia existente pode se situar entre 2% e 3%.

O dimensionamento adequado de paredes e a perfeita vedação de portas e fornalhas também contribuem para uma maior economia de energia.

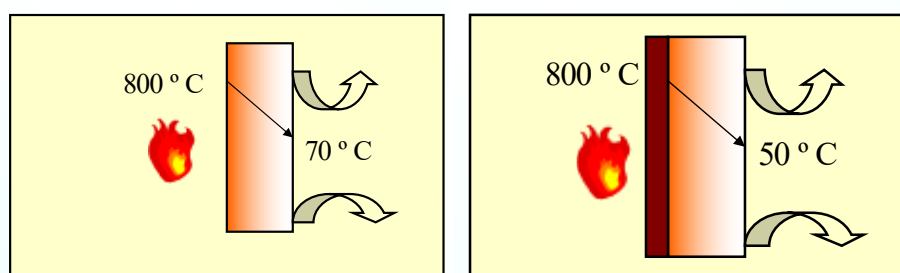


Figura 19. Exemplo do comportamento da temperatura externa de paredes - à esquerda: parede sem revestimento interno de fibra cerâmica; à direita: parede com revestimento. Ambas considerando a temperatura interna na fornalha a 800°C.

4.2.5. Controle Automatizado

O controle do processo se faz fundamental não somente para garantir uma boa qualidade dos produtos, mas também para evitar o desperdício de energia. Para tal, é necessário o controle de tempo de cada batelada de produção, das temperaturas, da velocidade de rotação do forno (via controle da corrente elétrica) e de outros parâmetros. A economia prevista situa-se entre 2% e 5%.



Figura 20. Exemplo de painéis de controle/programação da produção de unidade de calcinação.

4.2.6. Calcinadores Contínuos

De acordo com a descrição geral no item 2.1, os calcinadores de operação contínua permitem maior eficiência energética por associar dois conceitos apresentados anteriormente de forma simultânea. Isto é, por operarem ininterruptamente não sofrem aquecimentos e resfriamentos que se dão nos equipamentos intermitentes, o que faz com que não aconteçam flutuações de temperatura e perdas de calor elevadas.

O segundo conceito diz respeito ao maior aproveitamento do calor em toda a extensão do equipamento, fazendo com que os gases quentes de combustão deixem o equipamento em uma temperatura mais baixa, ou seja, esses gases trocam calor com o material de forma mais eficiente. Portanto, quanto mais baixa a temperatura dos gases de exaustão (na entrada da chaminé), menores são as perdas de calor, o que aumenta o rendimento térmico final do equipamento. A eficiência energética dos calcinadores contínuos, operando com lenha picada, pode facilmente superar 60%, empregando lenha picada ou combustível gasoso.

4.2.7. Maior Eficiência Energética com o Emprego de Gás Natural

O emprego do gás natural (GN) em substituição à lenha, caso possa ser viabilizado economicamente, pode trazer uma maior eficiência energética, e também uma condição ambiental positiva, tendo em vista seu baixo nível de emissões atmosféricas poluentes (fuligem e CO) e por ajudar com a redução da demanda de lenha de procedência irregular.

Do ponto de vista técnico, a maior eficiência energética se dá exatamente por se conseguir uma melhor combustão, com perdas mais baixas nos gases de exaustão, conforme discutido anteriormente. A eficiência energética de um calcinador tradicional do tipo barriga quente operando com gás natural pode ultrapassar 60% de rendimento energético, de acordo com cálculos próprios.

5. Avaliação Econômica das Medidas de Eficiência Energética Térmica

A presente avaliação econômica está focada nas questões relacionadas à eficiência energética, detalhando a modernização dos calcinadores e o emprego de lenha.

A economia média com o uso de energia térmica numa calcinadora mais antiga ou que não esteja operando com muito controle, pode se situar em torno de 30%, caso computadas as economias parciais descritas anteriormente, isto é: melhoria da combustão e uso de lenha picada (~20%); recuperação de calor para preaquecimento de ar de combustão (~5%); melhoria do isolamento térmico (~2%); e controle automatizado (~2%). A seguir, é apresentada de forma detalhada a avaliação econômica do conceito de “modernização da calcinação” e da “instalação de um sistema de lenha picada”.

5.1. Modernização de Forno de Calcinação “Barriga Quente”

A modernização dos calcinadores consiste na adoção de um sistema de controle e automação, o ajuste da combustão e do sistema de tiragem de gases quentes, recuperação de calor e a melhoria do isolamento térmico. Essa modernização completa possibilita uma economia de lenha/biomassa entre 5% e 10%, além de outros ganhos econômicos resultado da redução de eventuais perdas, aumento da produção e obtenção de gesso de maior qualidade. A produção, por exemplo, pode ser aumentada em até 33% ampliando-se a quantidade de bateladas por dia; o pessoal envolvido pode ser reduzido em uma pessoa por turno, perfazendo um ganho financeiro total de R\$ 150.720,00 por ano.

► Estimativa dos custos / investimentos:

Reforma/adaptação do forno barriga quente – incluindo a remontagem de refratários, novo isolamento térmico, recuperação de calor para pré-aquecer o ar de combustão e automação simples do forno (controle de temperatura do forno, controle de abastecimento e de fornamento, operação do moinho (gesso em pó), supervisor (computador e software), sala climatizada, painel elétrico e serviço de montagem): estimativa de R\$ 230.000,00.

Alternativamente, pode-se considerar a implementação de um “sistema avançado de automação”, que incluiria o controle da britagem, da alimentação de lenha picada (cavacos), da parte de alimentação de matéria-prima (nível de gipsita no silo e dos transportadores), do forno (massa de gipsita, temperaturas, velocidade de rotação e tempo), da estabilização, do gesso (transportadores, moinhos e nível no silo) e a instalação de sala de controle.

Os parâmetros econômicos para a modernização e automação de fornos do tipo barriga quente estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros econômicos para a modernização de forno barriga quente.

Investimento (R\$)	Economia (R\$/mês)	Vida útil (anos)	TIR (%)	VPL (R\$)	Prazo de retorno(anos)
230.000,00	150.720,00	18	65,5	2.324.109,56	1,5

Obs.: taxa de juros: 8,0% ao ano.

Fonte: Elaboração própria.

O resultado econômico para a reforma do forno barriga quente é extremamente positivo, com alta taxa de retorno de investimento (65,5%) e prazo de retorno bastante curto. Nota-se que, na economia financeira indicada contempla não somente a economia de lenha (10%), mas outros ganhos, como a possibilidade de aumento da produção em 33% e a redução de um funcionário por turno, pontos que ampliam bastante a economicidade da reforma e automação dos calcinadores.

5.2. Emprego de Lenha Picada

A implementação de sistema picador/alimentador de lenha, controlado automaticamente, proporciona ganhos econômicos entre 20% e 25% com o combustível em relação aos sistemas manuais e sem controle. O sistema contempla área de estoque, esteiras transportadoras, silos e caixas alimentadoras/queimadores.

Os picadores elétricos empregam facões ou tambores, embora possam ser usados picadores movidos a diesel, com a vantagem de estarem aptos para trabalhar

no campo, em áreas de manejo florestal ou de plantio, se for o caso. A Tabela 4 apresenta os parâmetros econômicos.

Tabela 4. Parâmetros econômicos para o picador de lenha/sistema alimentação.

Investimento (R\$)	Economia (R\$/mês)	Vida útil (anos)	TIR (%)	VPL (R\$)	Prazo de retorno(anos)
200.000,00	24.190,00	20	10,4	252.621,21	8,5

Obs.: taxa de juros: 8,0% ao ano.

Fonte: Elaboração própria.

A avaliação econômica para a instalação de picadores isoladamente não se mostra tão atraente economicamente quanto à modernização dos fornos, embora possa ser considerada viável, tendendo a ampliar sua economicidade na medida em que a lenha em toras encareça e também no caso de não existir custo adicional com a energia elétrica, caso esta possa ser provida por painéis fotovoltaicos, ou seja, a um custo extremamente baixo para a empresa. No presente caso a economia de biomassa na queima adotada de forma conservadora é de 20%.

5.3. Implementação em Conjunto da Modernização dos Calcinadores e Emprego de Lenha Picada

Adotando-se em conjunto a reforma ou modernização dos fornos calcinadores e o uso de lenha picada de modo automatizado, pode-se obter um resultado econômico bastante positivo conforme apresentado na Tabela 5, demonstrado por elevada taxa interna de retorno e prazo de retorno relativamente rápido.

Tabela 5. Parâmetros econômicos para a implementação do pacote modernização dos fornos e lenha picada.

Investimento (R\$)	Economia (R\$/mês)	Vida útil (anos)	TIR (%)	VPL (R\$)	Prazo de retorno (anos)
430.000,00	174.910,00	18	40,6	2.534.034,66	4,5

Obs.: taxa de juros: 8,0% ao ano.

Fonte: Elaboração própria.

6. Potencial de Economia de Energia Regional

A economia de energia e o aumento de produtividade dos fornos calcinadores podem ser efetivados através da adoção de algumas das medidas de uso eficiente de energia de forma parcial ou via uma modernização tecnológica mais completa, incluindo um sistema de uso de lenha picada.

Combinando-se todas as possibilidades descritas anteriormente, pode-se atingir uma economia média em torno de 30% em uma calcinadora mais antiga ou que não esteja operando com muito controle. Nestes casos podem ser computadas as economias parciais descritas anteriormente, isto é: melhoria da combustão e uso de lenha picada (~20%); recuperação de calor para preaquecimento de ar de combustão (~5%); melhoria do isolamento térmico (~2%); e controle automatizado (~2%), perfazendo cerca de 30%.

O mesmo patamar de economia é obtido quando confrontados os consumos específicos de energia praticados em empresas mais modernas e eficientes, no valor médio de 0,35 st de lenha/t de gesso, e aqueles montantes de outras unidades mais antigas ou ineficientes, em torno de 0,5 st de lenha/t de gesso, ou seja, também cerca de 30%⁵, que se mostra bastante significativo.

A avaliação econômica realizada, tanto para a modernização dos calcinadores quanto para a implementação de sistemas de lenha picada nas empresas, mostrou-se atrativa em termos econômicos, com taxas de retorno elevadas e prazos curtos de retorno.

Portanto, tomando-se esse potencial técnico de 30% de economia de energia, e aplicando-o a 50% das calcinadoras da região, poder-se-ia estimar uma economia potencial total, conforme roteiro mostrado na Tabela 6.

Tabela 6. Roteiro da estimativa da economia de energia existente no pólo gesso do Araripe

Discriminação	Valores
Produção total de gesso no pólo	4.400.000 t/ano
Produção equivalente à 50% das empresas	2.200.000 t/ano
Economia específica de lenha (30%)	0,15 st/t de gesso
Potencial de economia de lenha anula no polo gesso	$2.200.00 \times 0,15 = 330.000$ st de lenha

Como resultado, para uma produção anual de 2,22 milhões de toneladas de gesso, a economia existente de lenha seria de 330.000 st por ano, ou a R\$ 23 milhões/ano. Esse volume de lenha equivale a uma área de cerca de 5.500 hectares de mata nativa da Caatinga, desconsiderando que parte da oferta atual da biomassa energética tem uma ampla oferta de outras procedências e tipos, tais como: algaroba,

⁵(50-35= 15); (15/50)*100 = 30%.

podas de árvores frutíferas e urbanas e manejo florestal da própria Caatinga. Mas, de qualquer forma, trata-se de um aspecto importante para a preservação ambiental do bioma.

7. Comentários Finais

Os calcinadores constituem o elemento chave para a produção de gesso, processo térmico realizado por meio da queima de combustíveis, cujo rendimento energético efetivo geralmente é baixo ou mediano, devido às tecnologias atualmente empregadas do polo do Araripe.

A baixa eficiência energética dos calcinadores se deve pelas condições de combustão, geralmente agravadas pela queima de combustíveis sólidos, como a lenha em toras, como também pelo tipo de equipamento, o forno barriga quente/marmitta rotativa e de seu modelo operacional.

A combustão de lenha nos calcinadores sempre apresenta grandes oscilações, e emprega volumes excessivos de ar de combustão, condição que acarreta necessariamente um rendimento inferior em relação a combustíveis líquidos e gasosos. Além disso, a troca de calor nos fornos não é muito eficiente, o que faz com que os gases quentes de combustão atinjam altas temperaturas na saída dos fornos, acarretando ineficiência térmica.

Portanto, caso a matriz energética do setor gesseiro prossiga empregando a lenha ou outras biomassas sólidas nos calcinadores, algumas medidas para poupar energia se tornam importantes para conseguir redução de custos e maior competitividade. Dentre essas podem ser destacadas: melhoria da combustão, preaquecimento do ar de combustão, melhoria do isolamento térmico, automação da operação do processo e emprego de lenha picada.

A implementação de sistemas para o uso de lenha picada, na forma de briquetes, *chips* ou pó de serra, possibilita operar com maior estabilidade e menores volumes de ar de combustão e, conseqüentemente, reduzir as perdas de calor contidas nos gases quentes de exaustão na chaminé. Somente essa ação pode proporcionar economias de até 25% com o combustível, conforme a situação pré-existente do equipamento e o ajuste efetivado.

O estudo visando à otimização e modernização completa dos calcinadores aponta uma economia de até 30% em uma instalação desatualizada tecnologicamente. Esse montante pode ser obtido computando-se os itens para maior economia de energia, somados à implementação do sistema de uso de lenha picada.

Assim, considerando a adoção do pacote de medidas de eficiência energética, estima-se que devam ser investidos em torno de R\$ 430 mil por empresa na média,

proporcionando um prazo de retorno financeiro de cerca de 4,5 anos, e uma taxa de retorno do investimento a de 41% aproximadamente, que são condições bastante favoráveis.

Em linha com esse resultado individual, caso adotada a estimativa de economia de energia citada de 30% por empresa, e isso aplicado a 50% do parque de calcinação atual, é estimado um potencial de economia de energia equivalente a 330.000 st de lenha por ano ou R\$ 23 milhões/ano, considerando os preços atuais da lenha na região. A área correspondente de mata nativa da Caatinga, caso outras biomassas (algaroba, podas, PMFS e outras) possam ser desconsideradas, seria de 5.500 hectares aproximadamente.

8. Referências Bibliográficas

- BRISTISH GAS, 1992. Combustion engineering and gas utilisation, British Gas School of Fuel Management, 3rd edition, London.
- CEPIS, 2016. Relatório da assistência técnica empresa Gesso Aliança. Projeto de Eficiência Energética e Produção Mais Limpa da Cadeia Produtiva do Gesso, Trindade/PE.
- HENRIQUES JR., M.F., 2013. Potencial de financiamento de eficiência energética: nos setores de cerâmica e gesso no Nordeste. Banco Interamericano de Desenvolvimento /IDB *monographs*, 169pgs.
- INT/MCTI, 2023. Panorama atual do arranjo produtivo local (APL) gesseiro da região do Araripe-PE – Linha de Base 2023. Projeto Eficiência Energética no APL Gesseiro da Região do Araripe-PE, Rio de Janeiro-RJ.
- LIMA FILHO, H.J.B., 2010. Tratamento de resíduos de gesso da construção e da demolição – RCD para a produção de gesso beta reciclado. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. Programa de Mestrado em Engenharia Química. Recife-PE.
- MASCARENHAS, R.R., 2016. Estudo da eficiência energética de fornos destinados à calcinação do gesso no polo gesseiro do Araripe. Trabalho de conclusão de curso de Química Industrial, CT da Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande-PB.
- MMA, 2018. Biomassa para energia no Nordeste: atualidade e perspectivas / Ministério do Meio Ambiente, Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento – Brasília, DF.
- OLIVEIRA, M. A. C., SHINOHARA, A. H., 2014. A experiência com gás natural/GLP no pólo gesseiro do Araripe, PE. *Cerâmica*, v. 60, n. 354, p. 243-253.
- PERES, I., BENANCHOUR, M., SANTOS, V.A., 2008. Gesso: produção e utilização na construção civil, SEBRAE. Recife-PE.
- PROJETEC, 2010. Estudo de viabilidade técnico-econômica do processo de produção e logística do gesso fabricado a partir de gipsita do Araripe Pernambuco. Relatório Final.
- SEBRAE-PE, 2019. Cadeia produtiva do gesso na região da chapada do Araripe, Recife-PE.
- SINDUSGESSO, 2023. Uma agenda positiva para o pólo gesseiro no sertão pernambucano.
- SOUSA, J., ZANELLA, R., 2024. O gás natural é o combustível da transição energética - COPERGÁS. In: Encontro Tecnológico Polo Gesseiro do Araripe, org.INT/MCTI, SINDUSGESSO e SEBRAE-PE. Trindade-PE.
- TRINKS, W., MAWHINNNEY, M.H., 1975. *Hornos Industriales*. Urmo, vol. 1 e 2, S.A. de Ediciones, Bilbao.