



INTRODUÇÃO

Nos processos térmicos, ou seja, onde há a produção de calor e o processamento físico e/ou químico de um dado material, geralmente se emprega muita energia, produzida pela queima de um dado combustível ou emprego de energia elétrica.

No caso da queima de combustíveis, uma parte da energia produzida se destina efetivamente ao produto ou processo final, mas outra parte, normalmente em maior proporção, é perdida em diferentes partes do equipamento térmico. Diante disso, torna-se importante buscar sempre reduzir essas “perdas térmicas”, obtendo-se uma maior **eficiência energética e redução de custos**.

Um dos pontos mais importantes para se obter essa redução de perdas de calor em equipamentos térmicos, tais como nos calcinadores da produção de gesso, é **operar uma boa combustão**, independentemente do tipo do combustível usado, se lenha, óleo, coque ou gás. Cada um desses tem suas características próprias, facilidades ou dificuldades, conteúdo energético e custos distintos, mas todos esses podem ser empregados de forma mais eficiente e com as menores perdas possíveis.

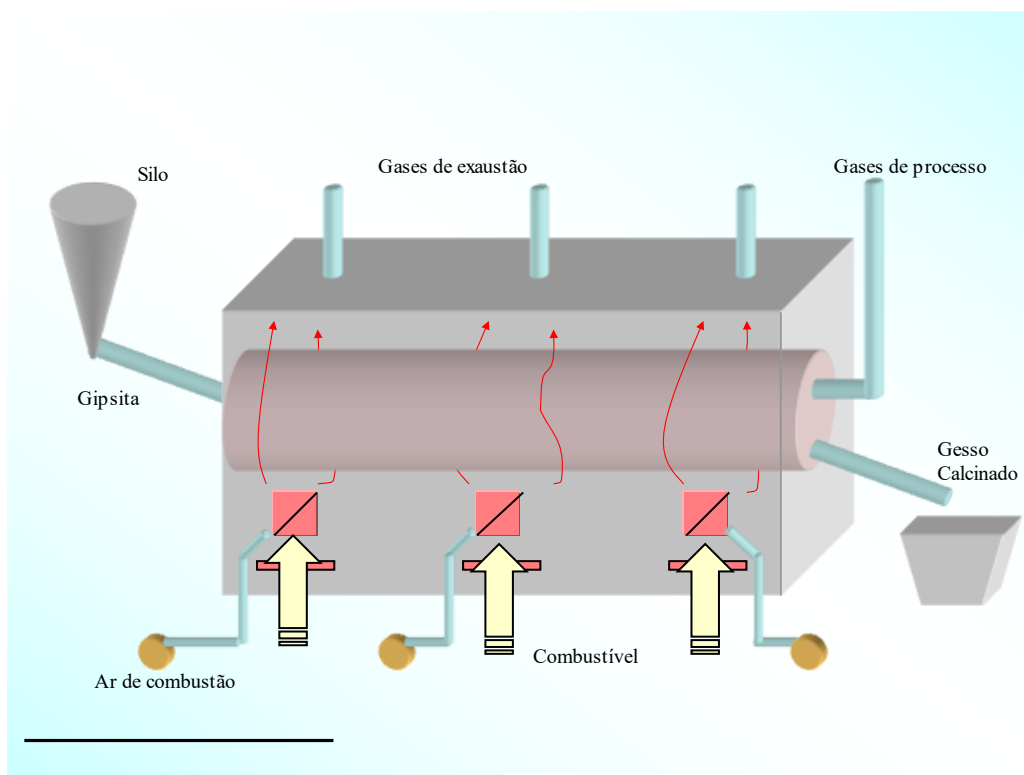


Figura 1. Esquema simplificado de um calcinador e seus fluxos de entradas e saídas de materiais, insumos e gases.

A COMBUSTÃO - CONCEITOS

Ao se processar uma queima ou combustão, são gerados calor e os chamados “gases quentes de combustão” ou “gases de exaustão”. Estes gases são compostos de dióxido de carbono (CO_2) e de vapor d’água, que são os produtos da própria combustão, e também alguma quantidade de ar “de excesso”, que “sobrou” por não ter participado da reação de combustão. Há também alguma quantidade de monóxido de carbono (CO) e de fuligem ou material particulado (carbono não queimado), que são produzidos por má combustão, principalmente quando se usa combustível sólido, como a lenha, carvão e coque.

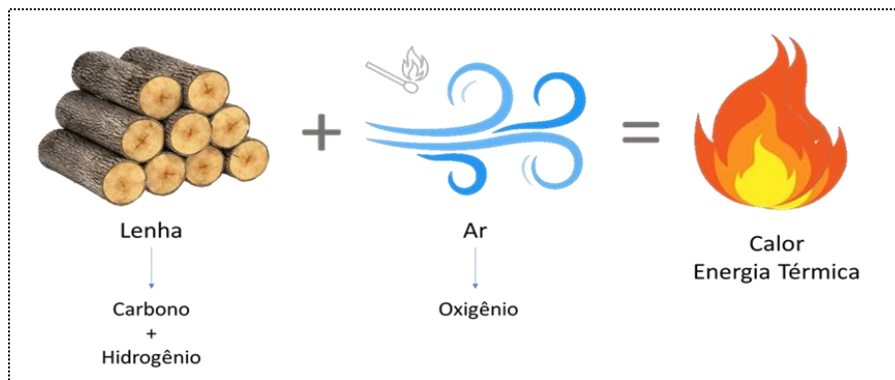


Figura 2. Esquema de combustão.

Para uma boa combustão, independentemente do tipo do combustível, três condições básicas são imprescindíveis:

- I. Ter uma câmara de combustão projetada adequadamente para a capacidade energética que se deseja e de acordo com o tipo do combustível;**
- II. Ter uma mistura bem homogênea do combustível com o ar de combustão (comburente);**
- III. Ter uma proporção adequada entre as quantidades de ar e de combustível, que é variável em função do tipo de combustível.**

Caso estas condições não ocorram, há perda de energia e produção de fuligem. E caso a proporção de ar e combustível não esteja adequada, as perdas de calor podem se tornar muito elevadas nos chamados “gases quentes de exaustão”, na saída da câmara de combustão do equipamento ou na chaminé.

Essas perdas de calor elevadas nos gases quentes na chaminé acontecem na maior parte dos equipamentos térmicos, tais como caldeiras, fornos, incluindo os calcinadores de produção de gesso. Trata-se de uma condição intrínseca ao processo de combustão industrial, e que só pode ser minimizada quando se tem uma **recuperação de parte desse calor** ou quando se tem um ajuste adequado da proporção **ar/combustível**, conforme explicado a seguir.

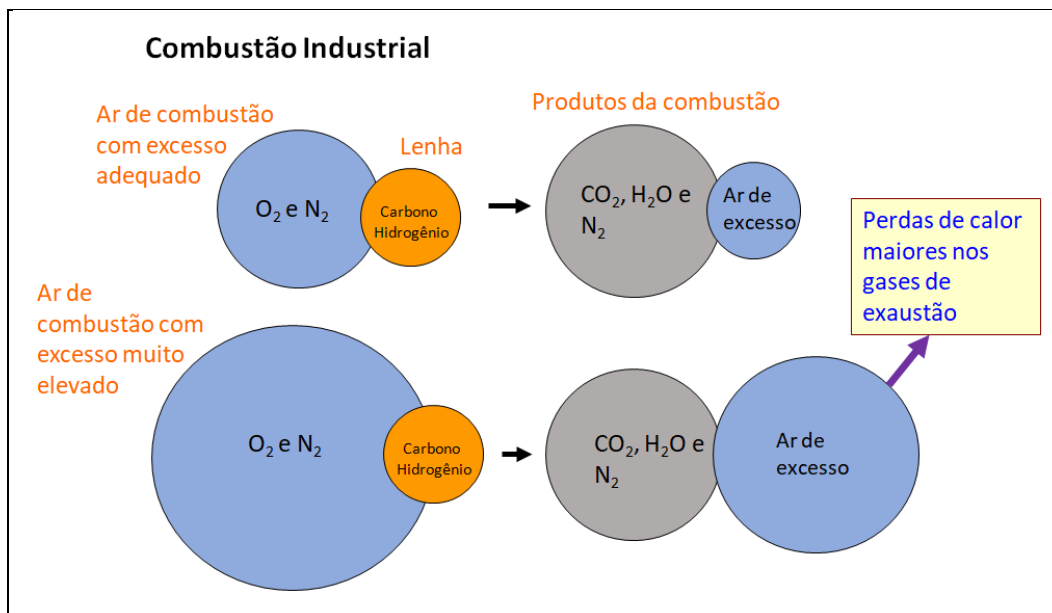


Figura 3. Processo de combustão industrial.

Importante: cada tipo de combustível (lenha, óleo, coque ou gás) exige um projeto específico de câmara de combustão e de tiragem dos gases quentes (exaustão). Portanto, a simples troca de coque para lenha, ou vice-versa (ou qualquer outra), necessita de um dimensionamento específico, sob pena de se perder eficiência energética.

O QUE ACONTECE NA PRÁTICA QUANDO SE QUEIMA LENHA EM TORAS

No caso da queima de lenha em toras, ocorre muito descontrole de combustão, pois há momentos em que a fornalha está demasiadamente cheia de lenha e há pouco ar de combustão e, em outros momentos, ao contrário, há pouca lenha para uma quantidade injetada de ar fixa, que acaba se tornando excessiva. Assim, o processo de queima oscila bastante, ou seja, tem momentos com níveis baixíssimos de ar de combustão (e com emissão de fuligem), e em outros, com muito ar de excesso para pouco combustível. Operando dessa forma, a temperatura de queima não se estabiliza e perde-se muita energia nos gases de exaustão/chaminé, conforme demonstrado adiante.



Figura 4. Fornalha com excesso de lenha e pouco ar de combustão (à esquerda) e fornalha com lenha em quantidade adequada aos volumes de ar (à direita).

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



Figura 5. Representação gráfica de fornalhas em duas situações: i) com excesso de lenha em toras; ii) com pouca lenha e excesso elevado de ar.

OTIMIZANDO A COMBUSTÃO

Geralmente uma combustão industrial opera com uma quantidade de ar superior, chamado de **ar de excesso**. Entretanto, parte desse ar em excesso acaba gerando perdas ainda mais altas nos gases de exaustão (na chaminé) descritos anteriormente. Assim, quanto **menor for esse excesso de ar, menores poderão ser as perdas na chaminé**. Esse ar de excesso também não pode ser muito pequeno, sob pena de produzir fuligem. Portanto, para cada tipo de combustível **há uma faixa ideal de mistura ar/combustível**.

O controle ou medição da quantidade de ar de combustão pode ser feita através da análise do teor de dióxido de carbono (CO_2) ou de oxigênio (O_2) presentes nos gases de exaustão, empregando-se aparelhos portáteis, como o kit Bacharach (**Figura 6**) ou instrumentos eletrônicos.



Figura 6. Kit Bacharach para análise de teor de CO_2 (à esquerda) e analisador de combustão eletrônico (à direita).

Assim, de acordo com os teores de CO_2 ou O_2 , obtém-se o percentual do excesso de ar de combustão que está acontecendo no calcinador e, conseqüentemente, é possível avaliar se a combustão está acontecendo numa faixa ideal ou não, conforme **Tabela 1**.

Tabela 1. Faixas de excessos de ar de combustão ideais por tipo de combustíveis em função dos teores de CO₂ ou de O₂, medidos nos gases de exaustão de chaminé.

Combustível	% ideal de excesso de ar	Faixa de CO ₂ (%)	Faixa de 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

Em suma, quando se tem uma combustão com falta de ar ou volume insuficiente, ocorre má combustão e há geração de muita fuligem. E por outro lado, quando se tem uma combustão com ar em excesso muito elevado, as perdas de calor na saída da câmara de combustão (na chaminé) aumentam bastante, conforme mostrado na **Tabela 2**. Nesta tabela percebe-se que é possível obter uma economia de **22% de energia (lenha)** quando se reduz a quantidade de excesso de ar de 135% para 65%, aproximadamente. Ou seja, **vale a pena controlar e buscar reduzir o excesso de ar de combustão**.

Tabela 2. Estimativas de perdas de calor, eficiência energética e economias em calcinadores para diferentes condições de combustão.

% de excesso de ar de combustão	% de CO ₂	Perdas calor totais (%)	Eficiência energética (%)	Economia de energia pela regulagem do excesso de ar (%)
65	12,0	41,8	58,2	22,2
135	8,5	54,7	45,3	

Base de cálculo: Lenha em tora e picada com 30% e 20% de umidade, respectivamente; temperatura média dos gases quentes na chaminé durante o processo de 500°C; e 5% de outras perdas (referentes ao calor através das paredes, estrutura e no produto ainda quente ao ser retirado dos calcinadores), somadas às perdas na chaminé.

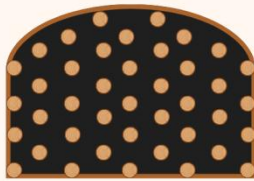
Vale destacar que as economias potenciais podem variar de acordo com outros parâmetros do processo, como por exemplo, a umidade da lenha e a temperatura dos gases de exaustão. Caso a umidade da lenha seja maior e as temperaturas de exaustão sejam mais elevadas, as economias podem ser ainda maiores.

VANTAGENS DE SE USAR LENHA PICADA/PÓ DE SERRA E ALIMENTAÇÃO AUTOMATIZADA

No caso da queima de biomassas, quanto mais fracionado estiver o combustível, isto é, na forma de pó de serra, cavacos, lascas ou briquetes, a queima é facilitada e mais econômica, pois se consegue **maior homogeneidade** na mistura ar/combustível, como também é possível trabalhar com um menor volume de ar de combustão conforme explicado, afora o melhor controle e estabilidade do processo.

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 7. Representação gráfica de fôrma com pedaços menores de biomassa numa situação equilibrada com a quantidade de ar de combustão.

Outra vantagem que a lenha picada oferece refere-se à **redução natural da umidade** presente na biomassa energética. Uma menor umidade favorece a combustão e traz economia, já que não se gasta energia do próprio forno para evaporar essa água contida na biomassa. Deve-se lembrar que quando se usa lenha muito “verde”, o **teor de água pode ser superior a 30%**, e isso representa um gasto adicional de energia.



Figura 8. Biomassa picada.

Nos calcinadores, o emprego de lenha picada ou pó de serra em sistemas com alimentação contínua automatizada proporciona uma **economia média de combustível em torno de 22%**, podendo variar de acordo com os parâmetros operacionais do equipamento.



APL GESSO ARARIPE - PE

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Este informe técnico faz parte do conjunto de materiais de disseminação tecnológica do Projeto “Eficiência Energética nos Arranjos Produtivos Locais (APL) na Produção de Gesso na Região do Araripe-PE”, a cargo do Instituto Nacional de Tecnologia (INT), e sob encomenda do Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI). É voltado para apoio ao polo produtor de gesso e busca promover o Uso Eficiente de Energia e a implementação de Fontes Renováveis de Energia, em particular de lenha sustentável e de energia solar fotovoltaica, dentre outros temas de interesse das empresas. O objetivo geral é fomentar maior produtividade no setor, além de proporcionar sustentabilidade no seu sentido mais amplo.

No site do Instituto Nacional de Tecnologia é possível ter acesso a outros materiais dedicados ao setor gesseiro, tais como: calcinadores eficientes, licenciamento ambiental, energia solar, elétrica, entre outros.

Acesse: <https://www.gov.br/int/pt-br/central-de-conteudos/apl-gesso>

Elaborado por:

Instituto Nacional de Tecnologia (INT) - <https://www.gov.br/int/pt-br>

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

Contatos: augusto.rodrigues@int.gov.br / mauricio.henriques@int.gov.br

A reprodução total ou parcial deste material é permitida devendo ser mencionada a autoria do INT.

Instituto Nacional de Tecnologia (INT). Melhoria da Combustão. Coleção Boas Práticas e Tecnologias na Produção de Gesso, N° 02. Projeto APL Produção de Gesso na Região do Araripe-PE. Rio de Janeiro, 2023.

Parceria:



SINDUSGESSO

Sindicato das Indústrias do Gesso do Estado de Pernambuco



FIEPE

Federação das
Indústrias do Estado
de Pernambuco

Realização:

INSTITUTO
NACIONAL DE
TECNOLOGIA **INT**

MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÃO

GOVERNO FEDERAL
BRASIL
UNIÃO E RECONSTRUÇÃO