

ANÁLISE DE MODELOS EXERGÉTICOS EM FORNOS ROTATIVOS INDUSTRIAIS

Analysis of exergetic models in industrial rotary kiln

Letícia Fabri Turetta*, Túlio Franco Anacleto e Andréa Oliveira Souza da Costa

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química,
Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG
Avenida Antônio Carlos, 6627, Cep 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil.

*E-mail: leticialft@hotmail.com

Recebido em: 25/04/2018, Aceito em: 28/05/2018, Publicado em: 01/08/2018.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22407/1984-5693.2018.v10.p.15-28>.

RESUMO

O setor industrial enfrenta um desafio em relação a sua demanda de energia. Em vista disso, é pertinente o estudo de como é utilizada a energia nos processos industriais. A partir da Primeira e da Segunda Lei da Termodinâmica é possível analisar tais processos, utilizando os balanços de energia e exergia. A análise exergetica de um sistema se destaca, visto que a partir dela é possível se determinar onde ocorrem perdas de energia em um processo por irreversibilidades, informação essencial para ser possível otimizar o uso da energia disponível. Contudo, são encontradas na literatura, diferentes metodologias para a análise da exergia de sistemas. Em vista disso, neste estudo foi realizada uma análise comparativa entre as diferentes abordagens para a análise exergetica de fornos rotativos utilizados em processos industriais, equipamento cuja demanda energética é elevada. A revisão permitiu identificar a variabilidade entre modelagens utilizadas para se realizar a análise de exergia em fornos rotativos. Foi possível observar que em geral, a eficiência exergetica dos fornos foi inferior à energética. Isso permite inferir que a análise exergetica é realmente uma ferramenta mais poderosa para o estudo energético de um sistema.

Palavras-chave: exergia, modelagem, forno rotativo.

ABSTRACT

The industrial sector faces a challenge in relation to its energy demand. In view of this, it is pertinent to study how energy is used in industrial processes. From the First and Second Law of Thermodynamics it is possible to analyze these processes, using the energy and exergy balances. The exergetic analysis of a system stands out, since from it is possible to determine where energy losses occur in a process by irreversibilities, essential information to be possible to optimize the use of the available energy. However, different methodologies for the analysis of system exergy are found in the literature. In this study, a comparative analysis was performed between the different approaches for the exergetic analysis of rotary kilns used in industrial processes. This equipment demands high energy consumption. The review identified the variability between the modelings

used to perform exergy analysis in rotary kilns. It was possible to observe that, in general, the exergetic efficiency of the kilns was inferior than the energetic. This allows to infer that exergetic analysis is actually a more powerful tool for the energetic study of a system.

Keywords: exergy, modeling, rotary kiln.

INTRODUÇÃO

O setor industrial brasileiro foi responsável por consumir 35,71% de toda a energia disponibilizada em 2016 (EPE, 2017). Por conseguinte, é relevante analisar como ocorre o uso da energia nos processos industriais. Um equipamento utilizado em processos industriais com custo energético significativo é o forno rotativo. O forno rotativo é um equipamento utilizado nas indústrias para tratar termicamente materiais como cimento, carvão e asfalto (GÜRTÜRK & OZTOP, 2014; ZEKI *et al.*, 2012 e PEINADO, *et al.*, 2011). As aplicações industriais mais comumente encontradas para fornos rotativos são em secadores, para o pré-processamento de matérias-primas; em incineradores, cuja função primária é destruir resíduos, e em fornos para tratamento térmico de materiais em alta temperatura (MARTINS, *et al.*, 2001).

No processo de produção do cimento, segundo ATMACA & YUMRUTAS (2014), o consumo total de energia é de cerca de 110 kWh/t de cimento, sendo 24,6 % utilizada no forno. Visto que o forno rotativo possui alta demanda energética e é utilizado em muitos processos industriais, o desenvolvimento de estudos para a otimização da operação desse equipamento é fundamental para que tais processos ocorram com a máxima eficiência energética.

O estudo da eficiência de equipamentos industriais pode ser realizado a partir da Primeira e da Segunda Leis da Termodinâmica. Utilizando essas ferramentas é possível se determinar as eficiências energética e exergetica envolvidas no processo (USTAUGLU *et al.*, 2017). A análise energética de um sistema é baseada no princípio da conservação da energia, enquanto a análise de exergetica é capaz de avaliar a degradação da energia quantitativamente. Dessa forma, o estudo da exergia se destaca, uma vez que utilizando essa propriedade é possível detectar e avaliar quantitativamente as imperfeições termodinâmicas de um processo (ÇAMDALI *et al.*, 2004). Em vista disso, o objetivo deste estudo é apresentar e comparar estudos que empregam a análise de exergia para fornos rotativos industriais de diversos processos.

ANÁLISE EXERGÉTICA

Os vários tipos de energia exibem qualidades diferentes. Estas diferenças aparecem na transformação de um tipo de energia em outro durante a realização de processos. O padrão da qualidade energética é chamado de exergia. Assim, a análise exergetica é um conceito importante na análise de processos industriais (ÇAMDALI *et al.*, 2004). O método de análise de exergia permite a avaliação quantitativa da degradação da energia no processo (MADLOOL, *et al.*, 2012).

O conteúdo total da exergia de um processo, onde se tem fluxo de material, é obtido pela exergia de fluxo. A exergia de fluxo pode ser determinada como a soma da exergia termo-mecânica e exergia química. A exergia termo-mecânica é o somatório da exergia física, exergia cinética e exergia potencial. Na maioria das vezes, as variações de exergia potencial e cinética apresentam valores insignificantes e não são consideradas na análise de exergia (MADLOOL, *et al.*, 2012 e ÇAMDALI *et al.*, 2004).

Muitos autores separaram a exergia de fluxo em dois tipos. O primeiro, usualmente nomeado de exergia física, diz respeito à exergia de fluxo associada a sistemas que não apresentam reação química. Nestes casos, apenas os processos mudança fase ou temperatura são considerados. O segundo, usualmente nomeado de exergia química, está associado à contribuição da exergia relacionada às mudanças na composição química do sistema por meio de reações químicas. Não ocorrem mudanças significativas nas expressões usadas por diferentes autores para o cálculo da exergia chamada de física. Porém, para o cálculo da exergia química, uma maior variedade de equações é verificada na literatura. Esta diversidade se explica pela possível adoção de diferentes técnicas para a obtenção da composição final do sistema (após ocorrida a reação química). Alguns autores optam por uma abordagem puramente empírica enquanto outros incorporam ao sistema conceitos fenomenológicos que podem ser explicitados envolvendo outras grandezas termodinâmicas (energia de Gibbs por exemplo).

A análise da exergia provê: uma avaliação da magnitude da energia não aproveitada em relação à energia fornecida ou transformada na planta e no equipamento; uma medida da qualidade da energia e uma variável para definir racionalmente as eficiências para sistemas energéticos (DINCER & ROSEN, 2013). Aplicar uma metodologia que permite localizar, medir e conhecer as causas das irreversibilidades e perdas de exergia pode ser útil para melhorar os novos *designs* de sistemas energéticos e aumentar a eficiência dos sistemas já existentes.

Existem diversos trabalhos na literatura que aplicam a análise de exergia como metodologia de análise dos processos industriais em fornos rotativos (USTAOGLU *et al.* (2017); ATMACA *et al.*, 2014; GÜRTÜRK & OZTOP, 2014; RENÒ, *et al.*, 2013; FARAG, 2012; ZEKI *et al.*, 2012; SOGUT *et al.*, 2010; RASUL, *et al.*, 2005 e ÇAMDALI *et al.*, 2004). A seguir, aspectos relevantes de alguns destes trabalhos são detalhados.

DETALHAMENTO DE ESTUDOS ENVOLVENDO ANÁLISE EXERGÉTICA

Neste estudo, alguns trabalhos publicados em literatura aberta serão apresentados e comparados. Em comum, além de empregarem a análise exergética, tais estudos possuem como objeto de estudo fornos rotativos industriais. Na Tabela 1 são apresentados os objetivos de cada trabalho, as matérias primas empregadas, os produtos obtidos em cada forno e a capacidade dos equipamentos analisados. As informações reportadas na Tabela 1 ilustram a diversidade de fornos rotativos analisados.

Na maioria dos trabalhos avaliados, cinco termos estão presentes em quase todos os balanços exergéticos: exergia de entrada (Ex_{in}), exergia de saída (Ex_{out}), exergia destruída (Ex_{dest}), exergia de transferida por calor (Q) e trabalho (W) (Figura 1). Em alguns trabalhos avaliados, os balanços globais de exergia não explicitam os termos de exergia transferida por calor e trabalho, mas os termos que quantificam as exergias das correntes (*in* e *out*) englobam os respectivos termos (GÜRTÜRK & OZTOP (2014) e RASUL, *et al.*, 2005). A determinação da exergia transferida por calor é um grande desafio no balanço exergético, pois as metodologias aplicadas para quantificar o calor perdido por radiação, condução e convecção são frequentemente empíricas, o que atrela o cálculo a diversos parâmetros específicos para cada sistema.

Tabela 1. Estudos que realizam análises de exergia em processos industriais.

Referência	Objetivo	Matéria-prima	Produto	Capacidade de produção
USTAOGU, e t al., 2017	Analisar as eficiências energética e exergética de um forno rotativo utilizando dados operacionais.	- Farinha; - Ar primário e secundário; - Combustível (carvão).	- Clínquer; - Gases de combustão; - Poeira.	30 t/h
ATMACA <i>et al.</i> , 2014	Analisar parâmetros que afetam o consumo de energia de um forno rotativo na indústria do cimento.	- Farinha; - Ar primário e secundário; - Combustível (carvão).	- Clínquer; - Gases de combustão; - Poeira.	65 t/h
GÜRTÜRK & OZTOP, 2014	Realizar uma análise energética de um forno rotativo utilizado na produção de gesso.	- Gesso cru; - Combustível (gás natural); - Ar; - Gases de combustão (reciclo).	- Pó de gesso; - Gases de combustão.	22,8 t/h
RENÒ, <i>et al.</i> , 2013	Confirmar as vantagens da aplicação do SPL (resíduo sólido da indústria de alumínio) como mineralizador na produção de clínquer a partir de um ponto de vista exergético.	- Farinha; - Ar primário e secundário; - Combustível (coque carvão vegetal, carvão, SPL e pneu).	- Clínquer; - Gases de combustão.	-
FARAG, 2012	Analisar a energia e exergia de um forno de cimento egípcio com desvio completo de gás de forno através do <i>by pass</i> .	- Farinha; - Ar primário e secundário; - Água do resfriador; - Combustível (óleo).	- Clínquer; - Gases de combustão; - Poeira do <i>by pass</i> .	174 t/h
ZEKI YILMAZOGLU & AMIRABEDIN, 2012	Modelar um forno rotativo para secagem de carvão do tipo direto e realizar uma análise exergética como estudo de caso.	- Carvão úmido; - Gases de combustão do queimador.	- Carvão seco; - Gases de exaustão.	12 t/h
SOGUT <i>et al.</i> , 2010	Examinar a recuperação de calor do forno rotativo para uma fábrica de cimento na Turquia utilizando análise de exergia.	- Farinha; - Ar primário e secundário; - Combustível (carvão).	- Clínquer; - Gases de combustão; - Poeira.	39,50 t/h
RASUL, <i>et al.</i> , 2005	Avaliar o desempenho térmico de uma indústria de cimento Portland na Indonésia pelos modelos de balanço de massa, energia e exergia.	- Farinha crua; - Ar primário e o ar de refrigeração; - Combustível (carvão).	- Clínquer; - Gases de escape frio e de forno.	129 t/h
ÇAMDALI <i>et al.</i> , 2004	Realizar uma análise energética e exergética de um forno de clínquer e comparar as duas abordagens.	- Farinha; - Ar primário e secundário; - Combustível (carvão).	- Clínquer; - Gases de combustão; - Poeira.	93 t/h

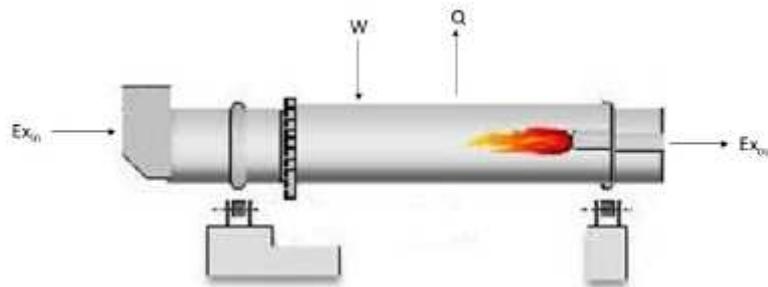


Figura 1. Diagrama do balanço de exergia geral para fornos rotativos. Fonte: Adaptado de OPTIMUS (2018).

USTAUGLU *et al.* (2017) realizaram uma análise energética e exergetica de um forno rotativo de clínquer do tipo úmido com o auxílio de dados operacionais de uma planta de cimento na Turquia. Os autores consideraram a contribuição da exergia física e química tanto para as correntes de entrada como para as correntes de saída, além da influência do trabalho e da transferência de calor (Tabela 2). O cálculo da exergia química foi realizado utilizando diferentes equações conforme a característica da corrente analisada (Tabela 3). Foram expostas equações de exergia química para substâncias gasosas simples e misturas. Essas equações são fenomenológicas e foram desenvolvidas a partir de relações entre a exergia química e a energia de Gibbs. Já a exergia química do combustível (carvão) foi determinada por equações empíricas que correlacionam o poder calorífico superior e as frações mássicas do carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio do combustível. Foram propostas duas equações empíricas. A escolha da equação está relacionada à taxa de carbono. A exergia física, por sua vez, foi calculada utilizando duas expressões distintas: uma para gás e outra para sólidos e líquidos. Ambas as equações são dependentes da capacidade calorífica, pressão e temperatura (Tabela 3).

ATMACA *et al.* (2014) aplicaram o balanço de exergia para analisar os parâmetros que afetam o consumo de energia de um forno rotativo na indústria de cimento. No balanço de exergia, proposto pelos autores, é quantificada a exergia do calor, do trabalho e das correntes (Tabela 2). A exergia do calor foi determinada pela análise de transferência de calor por condução, convecção e radiação. O trabalho avaliado pelo modelo foi o trabalho elétrico. O somatório de exergia das correntes (*in* e *out*) é determinado pela equação da exergia física. A exergia física foi calculada pela equação dependente da entalpia, temperatura ambiente e entropia. A exergia química não é contabilizada no balanço de exergia do sistema (Tabela 3).

GÜRTÜRK & OZTOP (2014) utilizaram os balanços de energia e de exergia para analisar um forno rotativo utilizado para a produção de gesso. O modelo foi construído com o intuito de determinar as perdas de energia do sistema e as irreversibilidades do processo e, assim, propor melhores condições operacionais. No balanço de exergia foram considerados os somatórios das exergias referentes às correntes de entrada e saída do sistema, a exergia perdida na forma de calor e a exergia destruída pelas irreversibilidades do sistema (Tabela 2). Para as correntes de entradas e saída foram considerados os efeitos das exergias física e química utilizando as equações expostas na Tabela 3.

A exergia química foi quantificada por duas equações: uma para mistura gasosa e outra para hidrocarbonetos. A equação da exergia química para mistura gasosa é dependente da exergia química padrão e um termo logarítmico de mistura da fração molar dos constituintes.

A equação da exergia química dos hidrocarbonetos é uma equação empírica dependente dos índices moleculares do hidrocarboneto, da exergia química padrão e da energia de Gibbs. A exergia destruída também foi calculada utilizando a equação descrita na Tabela 3, enquanto a exergia perdida foi determinada pela diferença entre os demais valores calculados do balanço de exergia.

RENÒ *et al.* (2013) avaliaram as vantagens da aplicação do SPL (resíduo sólido da indústria de alumínio) na produção de clínquer a partir do balanço exergetico. A produção de clínquer inclui processos térmicos e químicos, de modo que a ênfase dos autores foi na exergia térmica, que é a soma da exergia física e química. Os autores não apresentaram o balanço global de exergia para o sistema. A Tabela 3 apresenta as equações para a determinação da exergia física para os gases e sólidos, e da exergia química para os gases e sólidos. A exergia química dos sólidos é calculada pela exergia química total da mistura sólida, multiplicada pelo número de mols dos constituintes. A exergia química dos gases, por sua vez, é calculada pela equação que relaciona a energia de Gibbs, a exergia química padrão elementar e um termo logarítmico de mistura da fração molar dos constituintes. A exergia física dos sólidos é calculada pela equação dependente da entalpia, temperatura ambiente e entropia. A exergia física dos gases, por sua vez, é calculada pela equação dependente da capacidade calorífica isobárica e temperatura do gás.

FARAG (2012) calculou o balanço de exergia para o processo de produção de cimento. A autora não apresentou a equação do balanço global de exergia usado para o sistema, mas a exergia física e a exergia química das correntes foram determinadas pelo estudo. A exergia química do combustível (óleo pesado) foi determinada por uma equação empírica que correlaciona o poder calorífico superior e as frações mássicas de carbono, hidrogênio, oxigênio e enxofre do combustível. A exergia química envolvida na formação do clínquer foi reportada pela autora em forma de tabela. Os valores foram obtidos usando os dados das entalpias de reações da mistura para formar clínquer e a exergia química padrão dos fluxos de gás e sólidos. A exergia química das substâncias gasosas e líquidas foram calculadas pela equação que correlaciona a exergia química padrão e um termo logarítmico de mistura das frações mássicas de cada espécie (Tabela 3).

ZEKI *et al.* (2012) realizaram a modelagem de um forno rotativo do tipo direto utilizado para a secagem de carvão. A fim de verificar a modelagem, realizaram uma análise exergetica. Nesse tipo de forno, a secagem do carvão ocorre por gases de combustão gerados previamente em um queimador. Diferente da maioria dos fornos, este opera em co-corrente, com o intuito de evitar a auto-ignição das partículas de carvão. Na análise exergetica os autores consideraram as contribuições da exergia física e química no termo referente às correntes de entradas e saída, e as contribuições do calor e do trabalho no balanço exergetico (Tabela 2). Contudo, não foram apresentadas as equações para cálculo da exergia química. Já as equações de exergia física foram adaptadas a partir da equação apresentada na Tabela 3 com o acréscimo de termos inerentes ao processo de secagem e parâmetros psicrométricos. SOGUT *et al.*, (2010) modelaram um sistema de recuperação de calor na indústria cimenteira da Turquia. O balanço de exergia do forno rotativo considerou as influências da exergia química e física nas correntes de entrada e saída do forno, além dos termos referentes a exergia do calor e trabalho (Tabela 2). A exergia química para o gás foi calculada pela equação dependente da vazão mássica, temperatura do estado morto e um termo logarítmico das pressões (Tabela 3). Os autores não mencionam as equações utilizadas para a determinação da exergia química dos componentes sólidos. A exergia física foi calculada pela equação dependente da entalpia, temperatura ambiente e entropia.

RASUL *et al.* (2005). avaliaram o desempenho térmico de uma indústria de cimento na Indonésia, com uma visão integrada para melhorar a produtividade da planta. O balanço de exergia aplicado ao forno rotativo possui dois somatórios de entradas e saídas e o termo responsável em quantificar a exergia perdida pelas irreversibilidades do processo de produção de cimento (Tabela 2). A exergia de entrada é a soma da exergia física (farinha, ar primário e refrigerado) e da exergia química do combustível (carvão). A exergia química do carvão é obtida por meio do valor calorífico líquido do carvão e o calor de evaporação da água presente no combustível. A exergia de saída é a soma da exergia física (clínquer e gases de escape), da exergia do calor perdido por radiação e convecção e da exergia devido à reação química (Tabela 3).

ÇAMDALI *et al.* (2004) realizaram uma análise de energia e exergia para um forno rotativo de clínquer operando a seco com pré-calcinação. Para a realização do balanço de exergia, inicialmente, os autores consideraram apenas a exergia física das correntes de entrada e de saída do forno e o calor (Tabela 2). Contudo, a fim de complementar a análise, foi considerada na exergia de entrada as reações que ocorrem decorrentes da queima do combustível, utilizando a diferença entre os valores de Gibbs padrão para os reagentes e os produtos. Esse procedimento foi realizado em consequência da grande influência da exergia química dos combustíveis na análise, visto que eles apresentam alta disponibilidade de energia que pode ser liberada por reações químicas. Neste estudo todas correntes gasosas foram consideradas ideais e não foram considerados os efeitos de mistura dessas correntes (Tabela 3).

Tabela 2. Equacionamento dos balanços de exergia aplicados em fornos rotativos.

Referência	Balanço de exergia
USTAAGLU, ALPTEKIN & AKAY, 2017	$\sum (1 - \frac{T_0}{T}) \dot{Q} - \dot{W} + \sum \dot{m}_{in} ex_{in} - \sum \dot{m}_{out} ex_{out} = \sum \dot{E}x_{dest}$
ATMACA <i>et al.</i> , 2014	$\sum (1 - \frac{T_0}{T}) \dot{Q} - \dot{W} + \sum \dot{m}_{in} ex_{in} - \sum \dot{m}_{out} ex_{out} = \sum \dot{E}x_{dest}$
GÜRTÜRK & OZTOP, 2014	$\sum \dot{E}x_{in} - \sum \dot{E}x_{out} - \sum \dot{E}x_{loss} = \sum \dot{E}x_{dest}$
RENO, <i>et al.</i> , 2013	-
FARAG, 2012	-
ZEKI YILMAZOGU & AMIRABEDIN, 2012	$\sum (1 - \frac{T_0}{T}) \dot{Q} - \dot{W} + \sum \dot{E}x_{in} - \sum \dot{E}x_{out} = \sum \dot{E}x_{dest}$
SOGUT <i>et al.</i> , 2010	$\sum (1 - \frac{T_0}{T}) \dot{Q} - \dot{W} + \sum \dot{m}_{in} (ex_{ch in} + ex_{ph in}) - \sum \dot{m}_{out} (ex_{ch out} + ex_{ph out}) = \sum \dot{E}x_{dest}$
RASUL, <i>et al.</i> , 2005	$\sum \dot{E}x_{in} = \sum \dot{E}x_{out} + I$
ÇAMDALI, ERİŞEN & ÇELEN, 2004	$\sum \dot{m}_{in} ex_{in} = \sum \dot{m}_{out} ex_{out} + \sum (1 - \frac{T_0}{T}) \dot{Q} + \sum \dot{E}x_{dest}$

Tabela 3. Equacionamento da exergia química, física e a destruição da exergia aplicados em fornos rotativos.

Referência	Exergia química	Exergia física	Destruição de exergia
USTAOGLU, ALPTEKİN & AKAY, 2017	$Ex_{ch}(\text{gás no estado padrão}) = \dot{m}RT_0 \ln \frac{P_0}{P}$ $Ex_{ch}(\text{componente puro}) = -\Delta G^\circ - \sum_{k=1}^k (x_k Ex_{ch,k})_{\text{produtos}} + \sum_{k=1}^k (x_k Ex_{ch,k})_{\text{reagentes}}$ $Ex_{ch}(\text{mistura}) = m * \left(\sum_{k=1}^k x_k e_{ch0,k} + RT_0 \sum_{k=1}^k x_k \ln x_k \right)$ $Ex_{ch}(\text{fuel}) = PCS(1,0437 + 0,1882 * \frac{x_H}{x_C} + 0,061 * \frac{x_O}{x_C} + 0,0404 * \frac{x_N}{x_C});$ $Ex_{ch}(\text{fuel}) = PCS \left[\frac{(1,0438 + 0,1882 * \frac{x_H}{x_C} - 0,2509 (1 + 0,7256 * \frac{x_H}{x_C}) + 0,0383 * \frac{x_N}{x_C})}{(1 - 0,3035 * \frac{x_O}{x_C})} \right];$ <p>Para $TXC < 0,667$ Para $0,667 < TXC < 2,67$</p>	$ex_{ph}(\text{gás}) = Cp \left[(T - T_0) - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right] + RT_0 \ln \frac{P}{P_0}$ $ex_{ph}(\text{líquido e sólido}) = Cp \left[(T - T_0) - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right] + v(P - P_0)$	-
ATMACA <i>et al.</i> , 2014	-	$ex_{ph} = (h - h_0) - T_0(s - s_0)$	-
GÜRTÜRK & ÖZTOP, 2014	$ex_{ch}(\text{mistura gasosa}) = \sum_{k=1}^k x_k e_{ch0,k} + RT_0 \sum_{k=1}^k x_k \ln x_k$ $e_{ch0}(\text{hidrocarboneto } C_aH_b)$ $= \left[g_k + \left(a + \frac{b}{4} \right) * g_{O_2} - a * g_{CO_2} - \frac{b}{2} * g_{H_2O(l)} \right] (T_0, P_0) + a * e_{ch,CO_2}$ $+ \frac{b}{2} * e_{ch,H_2O(l)} - \left(a + \frac{b}{4} \right) * e_{ch,O_2}$	$ex_{ph} = (h - h_0) - T_0(s - s_0)$	I $= T_0$ $* \left(\sum \dot{m}_{out} s_{out} - \sum \dot{m}_{in} s_{in} - \sum \frac{\dot{Q}}{T} \right)$
RENÓ, <i>et al.</i> , 2013	$ex_{ch}(\text{sólido}) = n_{ms} \cdot b_{ms}$ $ex_{ch}(\text{gás}) = n_{mg} \left[\sum_k y_{gk} \cdot (\Delta G^\circ + ex_{ch0,k}) + R \cdot T_0 \sum_k y_{gk} \cdot \ln(y_k) \right]$	$ex_{ph}(\text{sólido}) = \sum_k^n [(h - h_0) - T_0(s - s_0)]_k$ $ex_{ph}(\text{gás}) = (T_g - T_0) \cdot \sum_k^n n_{gk} \cdot \frac{1}{(T_g - T_0)} \left[\int_{T_0}^{T_g} C_p dT - T_0 \int_{T_0}^{T_g} \frac{C_p}{T} dT \right]$	-

Continua.

Tabela 3. Equacionamento da exergia química, física e a destruição da exergia aplicados em fornos rotativos. Conclusão.

Referência	Exergia química	Exergia física	Destruição de exergia
FARAG, 2012	$ex_{ch}(\text{líquido e gás}) = \sum_{k=1}^k x_k (ex_{ch0k} + RT_0 \ln(x_k))$ $ex_{ch}(\text{fuel}) = PCS(1,0401 + 0,1728 * \frac{x_H}{x_C} + 0,0452 * \frac{x_O}{x_C} + 0,2196 * \frac{x_S}{x_C} (1 - 2,0628 * \frac{x_H}{x_C}))$	$ex_{ph} = (h - h_0) - T_0(s - s_0)$ $ex_{ph}(\text{gás}) = Cp(T - T_0) - T_0(cp * \ln \frac{T}{T_0} - R * \ln \frac{P}{P_0})$ $ex_{ph}(\text{sólido}) = Cp(T - T_0) - T_0(\ln \frac{T}{T_0} - v \frac{P}{P_0})$	$I = ex_{in} - ex_{out} = T_0 * S_{gen}$
ZEKI YILMAZOGLU & AMIRABEDIN, 2012	-	$ex_{ph} = (h - h_0) - T_0(s - s_0)$	-
SOGUT <i>et al.</i> , 2010	$ex_{ch}(\text{gás}) = m R T_0 \ln \frac{P_0}{P}$	$ex_{ph} = (h - h_0) - T_0(s - s_0)$	$I = \dot{E}x_{dest} = T_0 * S_{gen}$
RASUL, <i>et al.</i> , 2005	$ex_{ch}(\text{carvão}) = NHV + Z * wa$	$ex_{ph} = (h - h_0) - T_0(s - s_0)$	-
ÇAMDALI, ERİŞEN & ÇELEN, 2004	$ex_{ch} = g_{produtos}^0 - g_{reagentes}^0$	$ex_{ph} = (h - h_0) - T_0(s - s_0)$	$\dot{E}x_{dest} = T_0 * S_{gen}$

ANÁLISE DAS EFICIÊNCIAS EXERGÉTICAS

A análise de trabalhos publicados na literatura indica que não existe uma concordância entre os autores no que diz respeito ao cálculo da eficiência exergética. Tal fato dificulta a comparação dos resultados numéricos obtidos em cada estudo.

O formato mais comum para este cálculo envolve a razão entre as exergias que saem e entram no forno rotativo. Neste caso, a eficiência quantifica efetivamente a exergia de entrada que é convertida na exergia dos produtos (MADLOOL *et al.*, 2012).

Na Tabela 4 se encontram os valores numéricos das eficiências energéticas e exergéticas e as equações utilizadas para o cálculo das eficiências exergéticas dos estudos analisados neste trabalho. Além disso, são listados na Tabela 4 os principais resultados obtidos em cada trabalho, especialmente analisando as mudanças de processo estudadas.

As eficiências exergéticas de seis sistemas analisados pelos estudos, apresentaram valores inferiores, quando comparados aos valores das eficiências energéticas (Tabela 4). O estudo desenvolvido por RASUL, *et al.* (2005) foi o único que apresentou eficiência exergética com valor superior a eficiência energética.

As diversas equações para a determinação da eficiência exergética são propostas de acordo o objetivo de cada pesquisa. FARAG *et al.* (2012) e RASUL *et al.* (2005) utilizaram metodologias distintas para o cálculo das eficiências dos fornos rotativos para produção de cimento (Tabela 4).

FARAG (2012) utilizou uma equação para o cálculo da eficiência exergética que relaciona a diferença entre a exergia do clínquer e da farinha dividida pela soma da exergia do ar secundário e do óleo combustível. A eficiência exergética calculada foi menor nos processos operando com o *by pass*. Entretanto, o consumo de combustível diminuiu em cerca de 23% com o *by pass*.

A equação da eficiência exergética usada por ZEKI *et al.*, (2012) relaciona a exergia de saída com a exergia do combustível. Os autores concluíram que para se obter uma maior eficiência exergética é viável reutilizar o calor perdido ou integrar sistemas de energia solar ao forno rotativo. RASUL, *et al.* (2005) calcularam a eficiência exergética dividindo a exergia das reações químicas com a exergia de entrada. A conversão da energia química do combustível (carvão) em energia térmica foi a principal causa das irreversibilidades do processo ocasionando baixos valores de eficiência exergética.

CONCLUSÕES

Os setores industriais requerem alta demanda de energia desempenhando um papel importante nas economias globais. Neste contexto, economizar energia em paralelo com a melhoria do sistema são ações vitais para o crescimento do setor industrial. A análise exergética efetivamente é capaz de evidenciar perdas de energia, especialmente indicando que há perdas de energia por irreversibilidades, o que não é possível analisar empregando apenas os balanços de energia. Foi possível observar que em geral, a eficiência exergética dos fornos foi inferior à energética.

Os balanços globais de exergia apresentam variabilidade nos termos do trabalho e das correntes de entrada e saída. A influência do trabalho no balanço exergético não foi contabilizada por alguns autores. Entretanto, avaliar a influência do trabalho de eixo e do trabalho elétrico pode ser muito custoso para o modelo e não apresentar influência significativa na eficiência exergética do sistema. As correntes de entrada e saída apresentaram variabilidade no que tange a influência da exergia química nos modelos. Alguns autores não contemplaram este termo em seus modelos.

Em relação aos autores que avaliaram a exergia química em seus modelos, contabilizaram esta influência de formas distintas. Alguns autores utilizaram equações em função da energia de Gibbs ou exergia química padrão ou potencial químico ou função da massa, pressão e temperatura ou por meio de parâmetros empíricos acoplados ao poder calorífico superior. Na literatura não existe um consenso de metodologia para a determinação da exergia química de um sistema. A análise do conjunto equacional dos modelos de avaliação da exergia física não apresentou variabilidade significativa. Em quase todos os modelos foram utilizados nas equações os termos de entalpia e entropia.

A revisão das metodologias propostas pela literatura se mostrou importante para identificar a variabilidade de abordagens referentes à modelagem para a análise exergetica de fornos rotativos industriais.

Tabela 4. Avaliação dos resultados das eficiências.

Referência	Eficiência energética (%)	Eficiência exergetica (%)	Equação da eficiência exergetica	Resultados
USTAOGLU, ALPTEKIN & AKAY, 2017	46	35	$\eta_{exergetica} = \frac{ \sum m_{out} \cdot ex_{out} }{ \sum m_{in} \cdot ex_{in} }$	Os valores de eficiência energética e exergetica encontrados para esse processo de clínquezação em meio úmido foram inferiores aos encontrados para fornos rotativos de clínquer que operam a seco.
ATMACA <i>et al.</i> , 2014	55,8	38,7	$\eta_{exergetica} = \frac{ \sum m_{out} \cdot ex_{out} }{ \sum m_{in} \cdot ex_{in} }$	A análise do desempenho do forno rotativo indica que o processo de formação de clínquer envolve perdas de energia e o processo é afetado por certos parâmetros como combustível refratários do forno e temperatura ambiente (principalmente considerando o inverno).
GÜRTÜRK & ÖZTOP, 2014	69	16	$\eta_{exergetica} = \frac{ \sum m_{out} \cdot ex_{out} }{ \sum m_{in} \cdot ex_{in} }$	As eficiências energética e exergetica podem ser elevadas realizando-se um pré-aquecimento das correntes de entrada, como o ar e o gás natural.
RENÖ, <i>et al.</i> , 2013	-	29,8 e 29,4	$\eta_{exergetica} = \frac{ \sum m_{out} \cdot ex_{out} }{ \sum m_{in} \cdot ex_{in} }$	A eficiência exergetica do caso 1 (29,8) com resíduo do SPL apresentou valor superior que a eficiência exergetica do caso 2 (29,4). Apesar da pequena diferença entre as eficiências exergeticas dos dois estados de caso, o estudo de caso que empregou SPL reduziu o consumo de combustível fóssil em 0,20 kg/s.
FARAG, 2012	70,2	29,8	$\eta_{exergetica} = \frac{ex_{clinker} - ex_{ar\ natural}}{ex_{ar\ secundario} + ex_{fuel}}$	Em processos operando com o <i>by pass</i> as eficiências energéticas e exergeticas diminuem, entretanto, o consumo de combustível diminui em cerca de 23% com o <i>by pass</i> .
ZEKI YILMAZOGU & AMIRABEDIN, 2012	-	17	$\eta_{exergetica} = \frac{m_{out} \cdot ex_{out}}{m_{fuel} \cdot ex_{fuel}}$	Desenvolver formas de se reutilizar o calor perdido ou integrar sistemas de energia solar no forno rotativo são possíveis recursos para se obter uma maior eficiência energética.
SOGUT <i>et al.</i> , 2010	61	49	$\eta_{exergetica} = \frac{ \sum m_{out} \cdot ex_{out} }{ \sum m_{in} \cdot ex_{in} }$	O modelo matemático de análise de energia e exergia permitiu avaliar a importância de se empregar os sistemas de recuperação de energia.
RASUL, <i>et al.</i> , 2005	52,07	57,07	$\eta_{exergetica} = \frac{ \sum ex_{rea\toes\ quimicas} }{ \sum ex_{in} }$	A irreversibilidade do sistema foi de cerca de 20%. A principal causa de irreversibilidade no processo foi decorrente da conversão da energia química do combustível (carvão) em energia térmica.
ÇAMDALI, ERİŞEN & ÇELEN, 2004	97	64,4	$\eta_{exergetica} = \frac{ \sum m_{out} \cdot ex_{out} }{ \sum m_{in} \cdot ex_{in} }$	A partir do balanço de energia foi possível observar que 3% da energia é perdida na forma de calor, taxa que, embora pareça pequena, é significativa quando se considera esse valor quantitativamente ao longo do tempo. Além disso, a análise exergetica permitiu observar que os gases de chaminé apresentam alto percentual de energia que não é utilizada no processo e pode ser direcionada para outras aplicações.

NOMENCLATURA

- a - índice estequiométrico do carbono;
- b - índice estequiométrico do hidrogênio;
- b_{ms} - exergia química total da mistura
- C_p - capacidade calorífica;
- $ex_{ar\ secundário}$ - exergia específica do ar secundário;
- ex_{ch} - exergia específica química;
- ex_{chin} - exergia específica química de entrada;
- ex_{chout} - exergia específica química de saída;
- ex_{ch0} - exergia específica química padrão;
- $ex_{clinker}$ - exergia específica do clínquer;
- $ex_{farinha}$ - exergia específica da farinha;
- ex_{fuel} - exergia específica do combustível;
- ex_{in} - exergia específica de entrada;
- ex_{out} - exergia específica de saída;
- ex_{ph} - exergia específica física;
- ex_{phin} - exergia específica física de entrada;
- ex_{phout} - exergia específica física de saída;
- $ex_{reações\ químicas}$ - exergia específica das reações químicas;
- Ex_{ch} - exergia química;
- Ex_{dest} - exergia destruída;
- Ex_{in} - exergia de entrada;
- Ex_{loss} - exergia perdida relacionada a perda de calor;
- Ex_{out} - exergia de saída;
- g - energia livre de Gibbs específica;
- g° - energia livre de Gibbs padrão;
- gk - energia livre de Gibbs específica da espécie;
- ΔG° - energia livre de Gibbs padrão de formação;
- h - entalpia específica;
- h_0 - entalpia específica ambiente;
- I - perda de exergia por irreversibilidades;
- k - espécies;
- m - vazão mássica;
- m_{in} - vazão mássica de entrada;
- m_{fuel} - vazão mássica do combustível;
- m_{out} - vazão mássica de saída;
- n_{ms} - número de mols da mistura sólida
- NHV - valor de aquecimento líquido;
- PCS - poder calorífico superior;
- P - pressão;
- P_0 - pressão ambiente;
- Q - calor perdido;
- R - constante dos gases;

- s - entropia específica;
- s_0 - entropia específica ambiente;
- S_{in} - entropia de entrada;
- S_{gen} - exergia gerada;
- S_{out} - entropia de saída;
- T - temperatura;
- T_0 - temperatura ambiente;
- T_g - temperatura do gás;
- TXc - taxa de carbono;
- v - volume específico;
- w_a - porcentagem em peso de água no combustível;
- W - trabalho;
- x - fração mássica;
- x_O - fração mássica do oxigênio;
- x_H - fração mássica do hidrogênio;
- x_C - fração mássica do carbono;
- x_S - fração mássica do enxofre;
- y - fração molar;
- Z - calor de evaporação;
- $\eta_{exergética}$ - eficiência exergética;

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES e a Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais -FAPEMIG.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ATMACA, A.; YUMRUTAS, R. Analysis of the parameters affecting energy consumption of a rotary kiln in cement industry. **Applied Thermal Engineering**, 66, 435-444, 2014.
- ÇAMDALI, Ü.; ERİŞEN, A.; ÇELEN, F. Energy and exergy analyses in a rotary burner with pre-calcinations in cement production. **Energy Conversion and Management**, 45, 017–3031, 2004.
- DINCER, I.; ROSEN, M. A. **Energy Environment and Sustainable Development**. 2. ed. San Diego: Elsevier, 2013.
- EPE. **Anuário estatístico de energia elétrica**. 2017
- FARAG, L. M. Energy and exergy analyses of Egyptian cement kiln plant with complete kiln gas diversion through by pass. **International Journal of Advances in Applied Sciences**, 1, 35-44, 2012.
- GÜRTÜRK, MERT; OZTOP, HAKAN F. Energy and exergy analysis of a rotary kiln used for plaster production. **Applied Thermal Engineering**, 67, 554–565, 2014.
- MADLOOL, N.A.; SAIDUR, R.R.; AHIM, N.A.; ISLAM, M.R.; HOSSIAN, M.S. An exergy analysis for cement industries: An overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 16, 921-932, 2012.
- MARTINS, M.A.; OLIVEIRA, L.S.; FRANCA, A.S. Modeling and simulation of petroleum coke calcination in rotary kilns. **Fuel**, 80, 1611-1622, 2001.
- OPTIMUS. Optimus soluções em engenharia de processos. Disponível em: < <https://optimus.eng.br/knowledge-center/sistemas-de-recuperacao-para-fabricas-de-cimento/attachment/b/>>. Acesso em: 22 de maio 2018.
- PEINADO, D., VEGA, M., GARCÍA-HERNANDO, N., MARUGÁN-CRUZ, C. Energy and exergy analysis in an asphalt plant's rotary dryer. **Applied Thermal Engineering**, 31, 1039-1049, 2011.
- RASUL, M.G.; WIDIANTO, W.; MOHANTY, B. Assessment of the thermal performance and energy conservation opportunities of a cement industry in Indonesia. **Applied Thermal Engineering**, 25, 2950–2965, 2005.
- RENÓ, M. L. G., TORRES, F. M. T., SILVA, R. J., SANTOS, J. J. C., Melo, M. L. N. M. Exergy analyses in cement production applying waste fuel and mineralizer. **Energy Conversion and Management**, 75, 98–104, 2013.

- SOGUT, Z., OKTAY, Z.E.; KAZAROÇ, Z. Mathematical modeling of heat recovery from a rotary kiln. **Applied Thermal Engineering**, 30, 817-825, 2010.
- USTAOGLU, Abid; ALPTEKIN, Mustafa; AKAY, Mehmet Emin. Thermal and exergetic approach to wet type rotary kiln process and evaluation of waste heat powered ORC (Organic Rankine Cycle). **Applied Thermal Engineering**, 112, 281–295, 2017.
- ZEKI; YILMAZOGLU, M.; AMIRABEDIN, E. 3E Analysis of a Solar Assisted Rotary Type Coal Dryer. **International Journal of Renewable Energy Research**, 2, 16–22, 2012.