

# COGERAÇÃO EM UMA FÁBRICA DE CIMENTO

**Daniel Vigarinho de Campos**

danielvcampos@yahoo.com.br

*Resumo: Este trabalho faz uma análise termodinâmica de um sistema de cogeração em uma fábrica de cimento. Os gases de exaustão de um forno de cimento carregam consigo grande quantidade de energia, não aproveitada nos processos fabris. É estudada a possibilidade de geração vapor e energia elétrica, num ciclo Rankine, a partir da recuperação dessa energia residual. A análise é feita com base em condições típicas da fabricação de cimento, e os resultados são mostrados em função da massa produzida de clínquer, produto intermediário do processo de fabricação. Também é feito um levantamento sobre os usos de energia térmica e de energia elétrica em uma fábrica de cimento.*

*Palavras chave: cogeração, cimento, energia, clínquer*

## 1. Introdução

O cimento portland é um dos materiais mais usados na engenharia. O Brasil é um dos países em que mais se fabrica e se consome cimento no mundo. A indústria do cimento no Brasil produz a cada ano milhões de toneladas, e gera milhares de empregos. Isso sem falar no setor de construção civil, em que o cimento é ingrediente principal, e que constitui uma das bases da economia nacional.

O cimento portland atual, ou simplesmente cimento, teve sua origem na década de 1850. É um cimento artificial fabricado pela mistura, em proporções rigorosas, de materiais calcários e argilosos, previamente moídos. Após a moagem, a mistura é chamada farinha. A farinha é cozida até fusão parcial (1450 °C), após o que é denominada clínquer. Então, o clínquer é moído e pode receber pequenas adições de outras substâncias para ajustar a composição. Sua formação básica é de silicatos e aluminatos de cálcio, praticamente sem cal livre.

Hoje em dia, é o portland o aglomerante mais usado em construções. Seu consumo cresce constantemente, e é até mesmo um índice de progresso dos povos. O cimento portland pode ser usado para a construção de estruturas, para a execução de revestimentos ou para o rejunte de alvenarias. Apresenta-se sob a forma pulverulenta e, quando misturado com água, forma pasta capaz de endurecer por simples secagem ou, o que é mais geral, em consequência de reações químicas, aderindo às superfícies com as quais está em contato.

Este trabalho mostra os principais processos da fabricação de cimento numa planta industrial. Será feita uma análise sobre a possibilidade da implantação de um sistema de cogeração, baseado na produção de vapor e na geração de energia elétrica a partir dos gases de combustão do forno da fábrica.

A cogeração é realidade em indústrias químicas, sucro-alcooleiras, de papel e celulose. Em alguns casos, as fábricas são mesmo auto-suficientes na produção de energia elétrica, com o emprego da cogeração. A cogeração em fábricas de cimento já é usada em plantas no Japão, na China e em alguns outros países. No Brasil, ainda não existem plantas de cimento que contam com cogeração de energia elétrica, e o presente trabalho pretende, se não cobrir essa lacuna, despertar nos engenheiros brasileiros idéias sobre mais uma fonte para o aproveitamento energético industrial.

## 2. Conceitos Práticos

As indústrias de energia e processos, em particular a de cimento, lidam com alguns conceitos particulares. Conceitos relativos à fabricação de cimento são apresentados nesta seção.

1. Farinha: mistura pulverizada contendo calcário e argila, resultado da moagem de minerais; é cozida num forno em uma das etapas da fabricação de cimento.
2. Clínquer: material granular resultado da queima da farinha num forno, é a base para a fabricação do cimento.
3. Fator do Forno (ou Fator Farinha/Clínquer): parâmetro que caracteriza um forno, é a razão entre a massa de farinha alimentada no forno e a massa de clínquer produzida pelo equipamento; em geral seu valor fica entre 1,6 e 1,8.
4. Consumo Específico Térmico do Forno: outro parâmetro característico de um forno, é a razão entre a energia total do combustível queimado (com base no PCI) e a massa produzida de clínquer; em geral, seu valor fica entre 3.000kJ/kgclínquer e 4.000kJ/kgclínquer.
5. Enchimento: porcentagem do volume do forno ocupada pela farinha durante a queima; Duda sugere que esse valor seja da ordem de 10% a 12%.

## 3. A Fabricação de Cimento Portland e a Cogeração

A seqüência de operações para fabricação do cimento portland circunscreve a extração da matéria-prima, a britagem do mineral, a moagem e a mistura do cru, a queima, o arrefecimento do clínquer, a moagem do clínquer e o ensacamento e a expedição do cimento portland.

Sobre a cogeração, o chamado ciclo de fundo (ou *bottoming*), é aquele em que a energia rejeitada por uma demanda térmica é usada para a produção de energia elétrica. No caso da fábrica de cimento, a demanda térmica se faz pelas reações químicas endotérmicas envolvidas na clínquerização. Esse ciclo se opõe ao ciclo de topo (ou *topping*), em que a

energia elétrica (ou mecânica) é gerada primeiramente em relação à térmica. Ambos os casos são possíveis de serem aplicados em fábricas de cimento.

#### 4. Cogeração em Ciclo de Fundo – Ciclo Rankine a Vapor

A proposta de cogeração de energia elétrica aqui apresentada é que os gases de combustão do forno de cimento sejam usados para geração de vapor e de energia elétrica, através da energia térmica ainda contida neles no momento da descarga na atmosfera. Para tanto, projeta-se um circuito de vapor, circuito este que deve ser acoplado ao circuito de gases quentes. Segundo essa proposta, esse vapor gerado produziria energia elétrica em um ciclo Rankine.

A idéia é que os gases passem por uma caldeira de recuperação em que trocariam calor com um escoamento de água líquida. Essa água, recebendo energia dos gases, seria vaporizada. O vapor, expandido em uma turbina conectada a um gerador elétrico. Depois da expansão, o vapor seria condensado e bombeado novamente para a caldeira de recuperação, onde recomençaria o ciclo.

A proposta de cogeração é ilustrada na Fig. (1). Note como a parcela dos gases enviada ao moinho de cru não participa da cogeração, mas é conduzida diretamente à chaminé após a saída do moinho. Na verdade, ao aproveitar o calor residual de parte do fluxo dos gases de exaustão do forno, já se está fazendo um tipo de cogeração. Por esta proposta, parte do vapor gerado na caldeira é desviada e encontra a água de alimentação em um desaerador. Esse equipamento tem a dupla função de (1) eliminar da água gases dissolvidos, e (2) aquecer a água antes da entrada da caldeira.

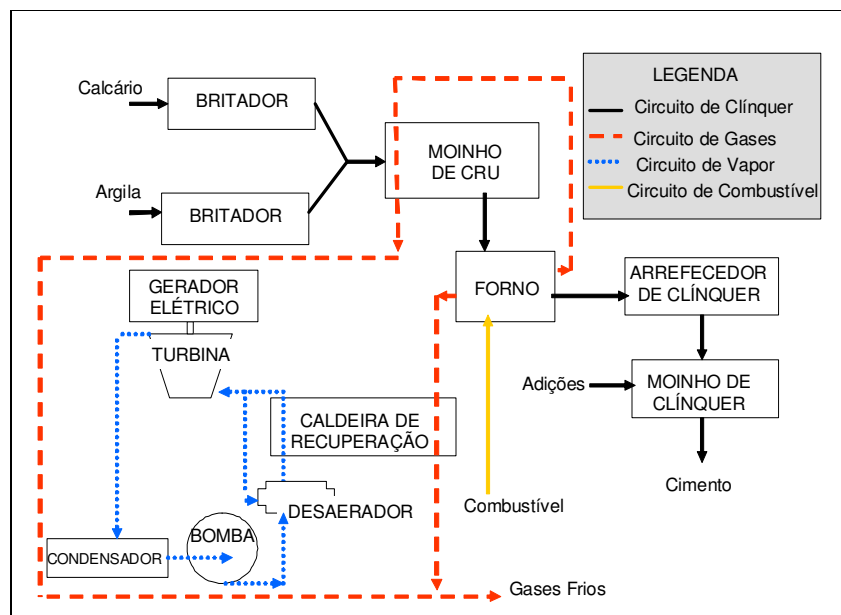


Figura 1. Proposta de seqüência de fabricação de cimento portland com cogeração com ciclo Rankine a vapor.

Essa proposta é promissora devido à grande quantidade de gases produzida no forno. O ciclo Rankine a vapor é o método mais usado no mundo para a recuperação da energia dos gases nas produtoras de cimento, embora não seja o único possível, como será mostrado adiante.

Um exemplo de plantas que faz uso do ciclo Rankine a vapor é a da Florida Crushed Stone, em Brooksville, Florida, nos Estados Unidos. No mesmo país, essa configuração de cogeração de energia elétrica também existe na CalMat, em Colton, Califórnia. Essa última já está em operação desde o ano de 1985.

#### 4.1 Outras Configurações para Cogeração em Fábricas de Cimento

- Cogeração em Ciclo de Fundo com Reator de Leito Fluidizado: Li & Kong (s.d.) sugerem uma configuração em que a torre de ciclones é substituída por um reator de leito fluidizado, instalado na boca do forno. Nesse caso, os gases vindos do forno promovem a pré-calcinação da farinha no reator, e são conduzidos a uma caldeira de recuperação que compõe um ciclo Rankine a vapor. Segundo os autores, esse sistema está instalado na linha de produção número 2 da fábrica Huhehaote, na China. Lá, o forno é pequeno, com produção de 550 toneladas de clínquer por dia, mas a capacidade de cogeração de energia elétrica é suficiente para satisfazer toda a demanda da fábrica.

- Cogeração em Ciclo de Fundo com Ciclo Rankine Orgânico o ciclo Rankine orgânico (ou simplesmente ORC) é semelhante a um Rankine a vapor, com a diferença fundamental de usar uma substância orgânica, e não água, como fluido de trabalho. A vantagem do ciclo orgânico em relação ao a vapor é que o fluido orgânico utilizado tem a temperatura de saturação menor que a da água para determinada pressão. Isso quer dizer que a substância orgânica pode recuperar a energia residual de gases disponíveis a temperaturas mais baixas que as necessárias para o ciclo Rankine a

vapor. Exemplos de fluidos orgânicos possíveis de serem usados são óleos de silicone, hidrocarbonetos. O ciclo Rankine orgânico é ainda pouco usado em cogeração nas fábricas de cimento. Um exemplo de instalação desse tipo é a fábrica Heidelberg Zement, na Alemanha.

- Cogeração em Ciclo de Fundo com Ciclo Kalina: o ciclo Kalina usa uma mistura de água e amônia como fluido de trabalho em um ciclo fechado. O uso da mistura é vantajoso porque permite que a vaporização do fluido de trabalho na caldeira de recuperação (mistura rica em amônia) comece em temperaturas mais baixas do que se fosse usada água pura. Além disso, a vaporização da mistura não acontece a temperatura constante, o que aumenta a energia transferida a ela pelos gases, e eleva a eficiência do ciclo. Mirolli (s.d.) estudou o ciclo Kalina para a recuperação tanto dos gases de escape do forno quanto do ar de excesso do resfriador de clínquer. O ciclo Kalina para cogeração funciona com sucesso em fábricas como a usina Sumimoto Corporation Kashima Steel, no Japão, mas ainda não é aplicado comercialmente em fábricas de cimento.

- Cogeração em Ciclo de Topo: a cogeração em ciclo de topo tem possibilidade de ser implantada em fábricas de cimento, mas, em geral, requer altos investimentos. Consiste no uso de calor para gerar energia elétrica, e no envio dos gases de escape desse gerador aos processos industriais ou no suprimento de necessidades de calor de fábricas vizinhas, e de comunidades próximas. A fábrica dinamarquesa Aalborg supre cerca de 15% da demanda de calor municipal da cidade homônima. Outro exemplo é o de uma planta em Rozemburg, Holanda, que gera eletricidade em uma turbina a gás (ciclo Brayton) cuja exaustão é empregada para a secagem da escória usada como adição ao clínquer. Também é possível usar o forno como fonte de calor para produzir frio em chillers de absorção.

## 4.2 Comparação entre as Configurações

Neste texto, o objetivo é que se determine o potencial de cogeração para fábricas de cimento existentes, sem que se altere o processo de fabricação. Como o objetivo da fábrica é a produção de cimento (e não de energia elétrica), foi calculada a cogeração pela recuperação da energia residual dos gases em ciclo de fundo, e não foram focados os ciclos de topo.

Alem disso, entre as configurações possíveis dentro da idéia de recuperar os gases de exaustão, foi escolhido o ciclo Rankine tradicional.

Embora os resultados de Li e Kong (s.d.) para o ciclo Rankine a vapor com reator de leito fluidizado sejam significativos, o presente trabalho optou por manter a torre de ciclones, para que a solução possa ser implementada em fábricas já existentes sem a necessidade de intervenções físicas muito violentas (retirada da torre de ciclones). Como dito, procurou-se trabalhar com o rejeito de energia sem interferir nos processos industriais.

Quanto aos ciclos Rankine Orgânico e Kalina, a Tab. (1) compara-os com o ciclo Rankine a vapor.

Tabela 1. Ciclos Termodinâmicos para Cogeração

Parâmetro	Ciclo Termodinâmico		
	Rankine a Vapor	Rankine Orgânico	Kalina
Temperatura Mínima dos Gases (°C)	250	200	200
Custo Aproximado (US\$ / kW capaz de gerar)	1.100 a 1.400	1.500 a 3.500	1.100 a 1.500
Geração Elétrica em Relação ao Rankine a Vapor	1	1,3 a 1,7	1,3 a 1,6

Fonte: WADE (2007)

A tabela mostra que o ciclo Kalina é capaz de recuperar gases a temperaturas mais baixas que o Rankine orgânico, e que o Rankine a Vapor é o que exige a mais alta temperatura dos gases entre os três. O resultado disso é que o ciclo a vapor tem a menor geração elétrica entre eles.

Contudo, é o ciclo Rankine a vapor o de custo (um pouco) mais baixo. Esse motivo, somado ao fato de ser o a vapor o mais consagrado ciclo de recuperação de gases, e ao de terem os outros dois ciclos aplicação ainda restrita, fez com que o ciclo Rankine a vapor fosse escolhido para ser estudado com mais profundidade neste trabalho.

## 5. Hipóteses Adotadas

O ciclo de cogeração projetado neste trabalho foi calculado a partir da consideração de algumas hipóteses. Elas são listadas abaixo:

1. Fabricação em via seca
2. Regime permanente
3. Energias cinética e potencial nos escoamentos gasosos são desprezadas
4. Ar atmosférico é composto apenas por oxigênio e nitrogênio
5. Farinha é formada apenas por argila e calcário
6. Não há perdas de massa de farinha nem de água dentro dos equipamentos nem entre eles
7. Gases que de escape do forno têm a mesma composição que os produtos da combustão

8. Farinha sai do moinho de cru com umidade zero
9. Farinha sai do moinho de cru à mesma temperatura que entra no forno
10. Caldeira, turbina, condensador, bomba, desaerador e moinho são adiabáticos
11. Gerador elétrico tem rendimento 100%

## 6. Considerações Termodinâmicas

Como visto, o sistema de cogeração aqui considerado envolverá uma unidade motora que usa vapor de água como fluido de trabalho. O vapor, nesse caso, sofre uma série de transformações ao percorrer um circuito, após o que retorna ao estado inicial. O modelo ideal para o aproveitamento de vapor em centrais de potência é o ciclo Rankine.

O ciclo Rankine ideal é composto por quatro processos termodinâmicos, a saber: (1) bombeamento adiabático reversível, (2) transferência de calor isobárica para o vapor, (3) expansão adiabática reversível, (4) transferência de calor isobárica, a partir do vapor.

A primeira lei da Termodinâmica (eq. (1)) embasa o exame dos aspectos energéticos do ciclo Rankine. Ela relaciona as taxas de calor,  $\dot{Q}_{VC}$ , e trabalho,  $\dot{W}_{VC}$ , trocadas no volume de controle, com as vazões em massa das substâncias que entram em suas fronteiras,  $\dot{m}_e$ , e as que saem delas,  $\dot{m}_s$ , (ou vazões molares,  $\dot{n}_e$  e  $\dot{n}_s$ ) e suas respectivas entalpias,  $h_e$  e  $h_s$ .

$$\dot{Q}_{VC} + \sum_R [\dot{n}_e \cdot (\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})_e] = \dot{W}_{VC} + \sum_P [\dot{n}_s \cdot (\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})_s] \quad (1)$$

Os ciclos reais têm perdas, irreversibilidades, que os afastam dos ciclos ideais. Neste trabalho são consideradas as perdas na turbina e na bomba. Como a máquina real não é isentrópica, define-se o rendimento isentrópico, que relaciona a operação real com a ideal. O rendimento isentrópico para uma bomba é dado pela eq. (2), e o para uma turbina, pela eq. (3).

$$\eta_{iso\_bomba} = \frac{h_e - h_{s,iso}}{h_e - h_{s,real}} \quad (2)$$

$$\eta_{iso\_turbina} = \frac{h_e - h_{s,real}}{h_e - h_{s,iso}} \quad (3)$$

Para a bomba, também é útil lembrar que o trabalho específico isentrópico é calculado pela integral do volume específico, do fluido bombeado, em relação à pressão, como é mostrado na eq. (9).

$$w_{iso\_bomba} = -\int_e^s v dP = -v \cdot (P_s - P_e) \quad (4)$$

Outra expressão importante em todos os volumes de controle é a equação da continuidade, ou lei da conservação de massa, eq. (5).

$$\sum \dot{m}_e = \sum \dot{m}_s \quad (10)$$

O funcionamento de um ciclo fica bem situado se forem feitas, além dos cálculos energéticos, considerações sobre o potencial de realização de trabalho do fluido. Isto é, a segunda lei da termodinâmica estabelece que nem toda a energia disponível pode ser convertida em trabalho, mas uma parte dela deve ser rejeitada. A medida do potencial de realizar trabalho, ou disponibilidade, é a exergia, simbolizada pela letra  $b$ . A exergia destruída representa, então, a redução da disponibilidade, isto é, a diminuição do potencial de realização de trabalho. A expressão para o balanço de exergia aparece na eq. (6), em que as grandezas referidas às condições ambiente têm subscritos 0.

$$\sum \dot{m}_e \cdot b_e = \sum \dot{m}_s \cdot b_s + \dot{W}_{VC} - \dot{Q}_{vc} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) + \dot{B}_{destruída} \quad (6)$$

Para casos em que a energia química de um combustível é convertida em calor e/ou trabalho, também é possível definir os rendimentos energético, eq. (7), e exegético, eq. (8).

$$\eta = \frac{\sum \dot{W}_{\text{útil}} + \sum \dot{Q}_{\text{processo}}}{\dot{m}_{\text{combustível}} \cdot PCI} \quad (7)$$

$$\eta_{\text{ex}} = \frac{\sum \dot{W}_{\text{útil}} + \sum \dot{Q}_{\text{processo}} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{\text{processo}}}\right)}{\dot{B}_{\text{combustível}}} \quad (8)$$

Valores importantes para instalações de cogeração são o fator de utilização de energia, FUE, definido na eq. (9), e a razão de energia, RE, eq. (10). O FUE relaciona a energia aproveitada com a requerida (térmica e elétrica). A RE relaciona as demandas térmica e elétrica num volume de controle.

$$FUE = \frac{\sum \dot{W}_{\text{útil}} + \sum \dot{Q}_{\text{processo}}}{\dot{m}_{\text{combustível}} \cdot PCI + \sum \dot{W}_{\text{elétrico}}} \quad (9)$$

$$RE = \frac{\dot{W}_{\text{elétrico\_requerido}}}{\dot{Q}_{\text{térmico\_requerido}}} \quad (10)$$

## 7. A Fábrica

Foram desenvolvidos modelos matemáticos da fábrica de cimento e do sistema de cogeração proposto. Foram estabelecidas condições típicas de operação de uma fábrica, e examinados volumes de controle do forno, do moinho de cru, da caldeira de recuperação, do desaerador, da turbina, do condensador e da bomba. Os resultados aparecem sempre em relação a um quilograma de clínquer produzido.

### 7.1 Condições de Operação da Fábrica

Alguns valores foram admitidos ou calculados para as condições de operação da fábrica. Esses valores aparecem a seguir:

1. Temperatura ambiente: 25°C
  2. Temperatura de referência para as entalpiás de formação: 0°C
  3. Fator do forno admitido: 1,7kgfarinha/kgclínquer
  4. Umidade do mineral admitida: 0,07kgágua/kgmineral
  5. Temperatura de entrada da farinha no forno: 70°C
  6. Temperatura de saída do clínquer do forno: 1.100°C
  7. Teor de oxigênio no ar atmosférico, em volume: 21%
  8. Teor de nitrogênio no ar atmosférico, em volume: 79%
  9. Relação molar do ar atmosférico:  $\frac{79\%}{21\%} = 3,76 \text{ molN}_2/\text{molO}_2$
  10. Coeficiente de ar (valor usual para fornos de cimento):  $\lambda = 1,25$
  11. Massa molar do ar atmosférico (de Van Wylen (2003)): 28,97kg/kmol
  12. Massa específica do clínquer (de Incropera (2002), concreto com brita): 2.300kg/m<sup>3</sup>
  13. Teor admitido de calcário na farinha, em massa: 90%
  14. Teor admitido de argila na farinha, em massa: 10%
  15. Calor específico do calcário (Incropera (2002), a 300K): 0,81kJ/kgK
  16. Calor específico da argila (Incropera (2002), a 300K): 0,88kJ/kgK
  17. Razão de energia, (Balestieri (2002)): 0,11
  18. Temperatura de exaustão dos gases da torre: 400°C
- Valor pouco superior sugerido por Alsop (2001); esse aumento pretende aproximar o estudo a valores reais verificados.
19. Consumo específico térmico no forno (base PCI do combustível) sugerido por Alsop e mostrado na tabela 6: 3.347,2kJ/kgclínquer
  20. Enchimento do forno (Duda (1985)): 10%

## 7.2 Parâmetros de Fabricação

Foram coletados e calculados valores típicos de produção e consumo de energia em fábricas de cimento:

1. Produção da mineração (função da umidade,  $u$ , e do Fator do Forno,  $F$ ), eq. (21)

$$\frac{\dot{m}_{\text{mineração}}}{\dot{m}_{\text{clínquer}}} = \frac{F}{1-u} \quad (11)$$

2. Água no mineral

De forma semelhante ao tópico anterior, vem a eq. (22)

$$\frac{\dot{m}_{\text{água}}}{\dot{m}_{\text{clínquer}}} = \frac{F}{\frac{1}{u} - 1} \quad (12)$$

3. Consumo de Energia Elétrica na Moagem de Cru: Duda (1985) sugere consumo de 128,52kJ/kgclínquer

4. Consumo de Energia Elétrica no Forno (em função do enchimento,  $e$ , e da massa específica do clínquer,  $\rho_{\text{clínquer}}$ ), eq. (23)

$$\dot{W}_{\text{elétrico}_\text{forno}} = \frac{1}{e \cdot 4,5 \cdot \rho_{\text{clínquer}}} \quad (13)$$

5. Consumo de Energia Elétrica na Moagem de Cimento: considerado igual ao consumo de energia elétrica na moagem de cru.

6. Consumo de Energia Elétrica nas outras atividades fabris: calculado pela razão de energia

A Tab. (2) e a Fig. (2) mostram os resultados para o uso da energia nas etapas de fabricação, com os percentuais referidos ao consumo total de energia da fábrica.

Tabela 2. Parâmetros de Fabricação

Grandeza	Valor	Unidade
Produção da Mineração	1,83	kg/kgclínquer
Água no Mineral	0,13	kg/kgclínquer
Consumo de Energia Elétrica na Moagem de Cru	128,52	kJ/kgclínquer
Consumo de Energia Elétrica no Forno	3,48	kJ/kgclínquer
Consumo de Energia Elétrica na Moagem de Clínquer	128,52	kJ/kgclínquer
Consumo de Energia Elétrica em outras Atividades	107,67	kJ/kgclínquer
Consumo de Energia Térmica no Forno	3347,20	kJ/kgclínquer
Consumo Total Elétrico	368,19	kJ/kgclínquer
Consumo Total Térmico	3347,20	kJ/kgclínquer

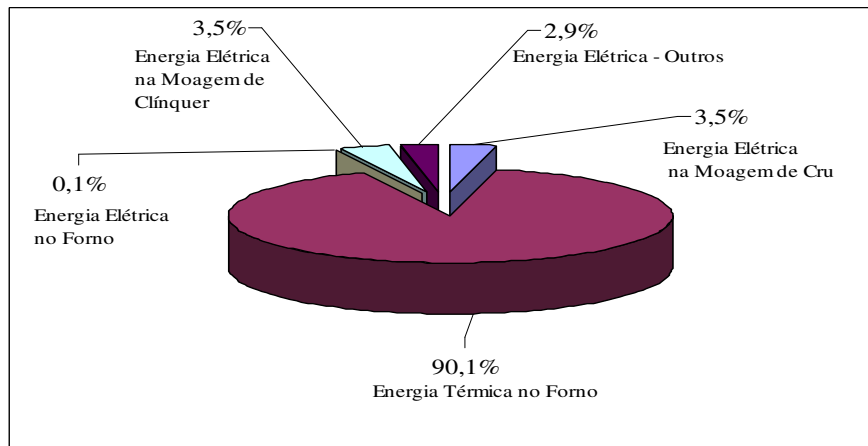


Figura 2. Distribuição da energia usada na fabricação de cimento.

## 8. O Sistema Calculado

A combustão no forno foi calculada para o coque de petróleo, combustível comum, sem perda de generalidade para o caso de uma instalação usar outro combustível. A composição do coque de petróleo é mostrada na Tab. (3)

Tabela 3. Dados do Coque de Petróleo Seco

PCI = 35.000kJ/kg			
Componente	Fórmula	Massa Molecular (kg/kmol)	% em Massa
Carbono	C	12,011	86,30
Hidrogênio	H <sub>2</sub>	2,016	3,77
Enxofre	S	32,06	5,38
Oxigênio	O <sub>2</sub>	32,00	1,72
Nitrogênio	N <sub>2</sub>	28,01	1,51
Cinzas	-	-	0,32

Cada equipamento estudado tem seus resultados mais importantes apresentados na Tab. (4). A Tab. (5) expõe os resultados globais para a cogeração. Nessa última, é importante lembrar que neste trabalho os equipamentos foram considerados adiabáticos (uma impossibilidade real), e que foi considerada energia útil a que é transferida ao clínquer, sem considerar que ele deve ser resfriado quando sai do forno. Mesmo assim, os valores encontrados são valiosos, para que se comparem os desempenhos da planta nos casos sem e com cogeração. Os resultados para um caso possível em que 15% da energia do PCI é perdido para o ambiente aparecem na coluna assinalada na Tab. (5).

Tabela 4. Resumo dos Resultados

	Substância	Equipamento											
		Mineral / Farinha / Clínquer	Água / Vapor	Gases de Combustão	Forno	Moinho de Cru	Caldeira de Recuperação	Desaerador	Turbina	Condensador	Bomba		
Grandeza	Vazão de Entrada (kg/kgclínquer)	X			1,70	1,83	-	-	-	-	-	-	-
			X		-	-	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10		
				X		-	1,02	1,13	-	-	-	-	-
	Vazão de Saída (kg/kgclínquer)	X			1,00	1,70	-	-	-	-	-	-	-
			X			-	0,13	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10
				X		2,15	1,02	1,13	-	-	-	-	-
	Temperatura de Entrada (°C)	X			70	25	-	-	-	-	-	-	-
			X			-	-	120	50	375	46	46	
				X		-	400	400	-	-	-	-	-
	Temperatura de Saída (°C)	X			1.100	70	-	-	-	-	-	-	-
			X			-	150	375	120	46	46	46	
				X		400	150	150	-	-	-	-	-
	Pressão de Entrada (kPa)		X			-	-	1.123	1.123	1.123	10	10	
	Pressão de Saída (kPa)		X			-	-	1.123	1.123	10	10	1.123	
Energia no Escape (%)			X		27,19	4,69	5,17	-	-	-	-	-	
Exergia Destruída (kJ/kgclínquer)					-	-	218,57	5,91	16,68	15,34	0,13		
Energia Elétrica Consumida (kJ/kgclínquer)					-	3,8	128,52	-	-	-	-	0,14	
Energia Elétrica Gerada (kJ/kgclínquer)					-	-	-	-	-	71,41	-	-	

Notas: (1) a energia no escape é relativa ao PCI do combustível; (2) no forno, vazão de saída vapor está contabilizada na dos gases de combustão; (3) no forno, balanço de massa ainda deve contemplar vazão de combustível e de ar de combustão; (4) no moinho, a vazão de entrada de mineral contempla mineral seco e água; (5) no moinho, a saída de água é devida à evaporação da umidade do mineral; (6) no desaerador, dados de entrada de água são referentes à água fria.

Tabela 5. Resultados Globais

Grandeza	Valor*	Valor**	Unidade
Energia Líquida Gerada	71,27	71,27	kJ/kgclínquer
Rendimento Energético sem Cogeração	72,8	57,8	%
Rendimento Energético com Cogeração	97,0	82,0	%
Rendimento Exergético sem Cogeração	39,3	31,2	%
Rendimento Exergético com Cogeração	53,3	45,2	%
FUE sem Cogeração	75,5	62,0	%
FUE com Cogeração	97,3	83,7	%

\* supondo equipamentos adiabáticos

\*\* supondo 15% de perda de energia, relativos ao PCI, por troca de calor com o ambiente

A Caldeira de recuperação pode ser do tipo de Três Tubulões. Nelas, existem um tubulão superior que abriga a vapor saturado, e dois inferiores, que guardam água líquida. Entre os dois tubulões inferiores, um coletor de particulado é posicionado para armazenar os sólidos precipitados. Esse tipo de caldeira é mostrado na (Fig.) 3. O perfil de temperaturas na caldeira, por sua vez, é ilustrado na Fig. (4).

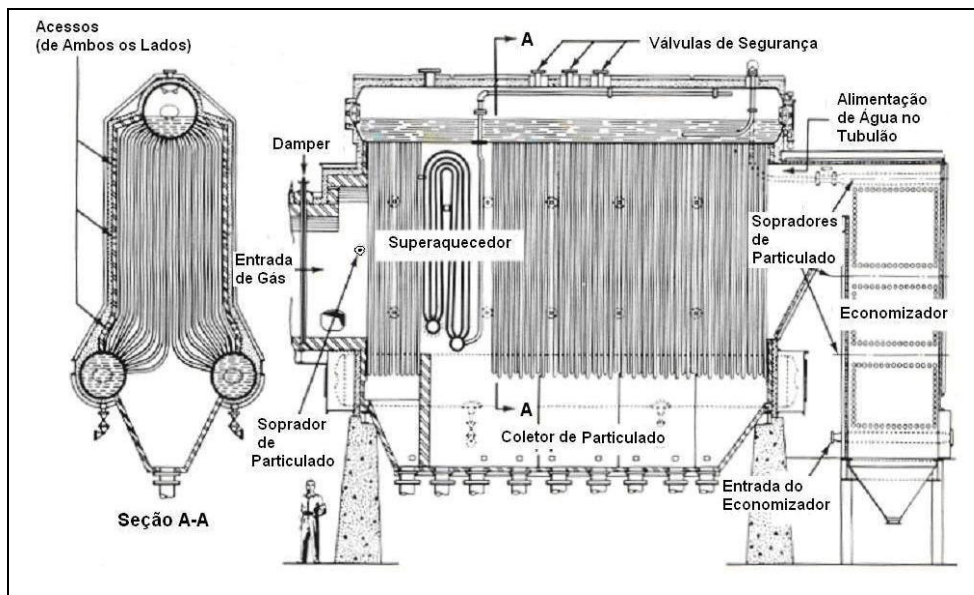


Figura 3. Caldeira de Três Tubulões.

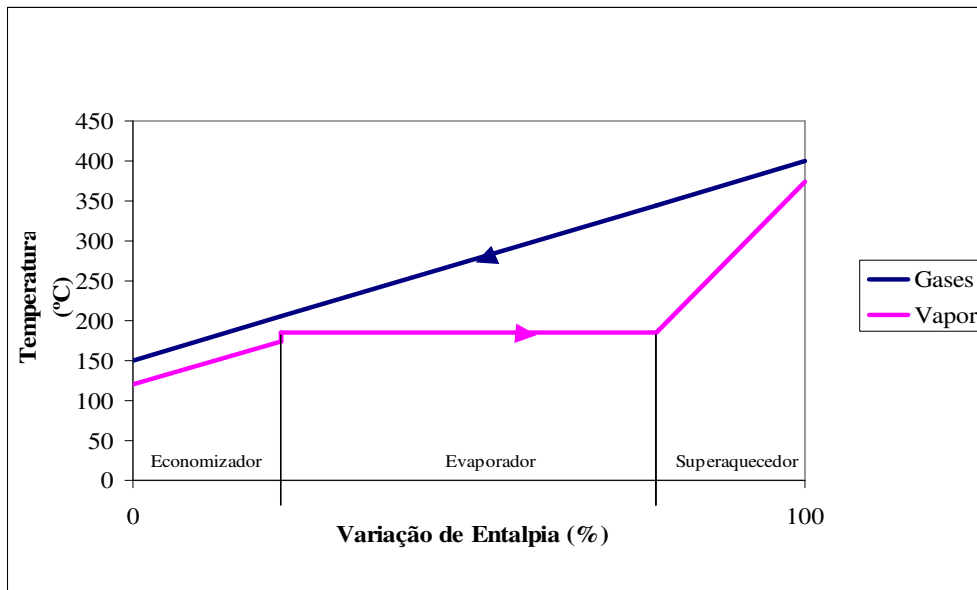


Figura 4. Perfil de temperaturas na caldeira.



## 9. Discussão

Ficam evidentes os benefícios que podem ser trazidos pela implantação de um sistema de cogeração de energia elétrica a partir da recuperação dos gases do forno de clínquer. Para o caso adiabático, o rendimento energético salta de pouco mais de 70% para quase 100% (a exemplo do FUE); o rendimento exergético sobe de menos de 40% para mais de 50%.

A primeira coisa que deve ser dita é que o ciclo apresentado foi simplesmente projetado, sem ser otimizado. Sua otimização poderia aumentar a quantidade de energia elétrica gerada.

Li & Kong, em seu ciclo a vapor com reator de leito fluidizado, não avaliam a possibilidade de os gases do forno participarem da secagem de cru, isto é, os autores consideram a totalidade da exaustão do forno para a geração de vapor. Com essa análise, afirmam que uma fábrica que usa cogeração com ciclo Rankine a vapor seja capaz de gerar 39kWh/tclínquer, ou 140,4kJ/kgclínquer. Ora, esse valor é o mesmo que foi determinado no presente trabalho, considerando-se que aqui optou-se pelo desvio de 47,5% dos gases do forno para a secagem no moinho, restando apenas os outros 52,5% para a cogeração. É fácil calcular que, caso todo o escape do forno fosse para a caldeira de recuperação, poder-se ia gerar 135,8kJ/kgclínquer, ou 37,8kWh/tclínquer. A proximidade desse valor ao colocado por Li & Kong atesta a confiabilidade dos cálculos do presente trabalho.

Para o ciclo calculado, os resultados indicam que a energia elétrica gerada corresponde a quase um quinto de toda a energia elétrica consumida na fábrica (71,27 kJ/kgclínquer contra 318,19 kJ/kgclínquer), e a mais da metade da energia gasta na moagem de cru (71,27 kJ/kgclínquer contra 128,52 kJ/kgclínquer). Só essa informação já é suficiente para levar adiante a idéia de implantar a cogeração elétrica em fábricas de cimento.

A exemplo do que está feito em WADE, é interessante fazer algumas análises. Segundo WADE, o total de energia consumido no mundo no ano de 2003 foi de 16.661TWh, isto é, quase  $6 \cdot 10^{19}$  J. De acordo com a tabela 3, nesse mesmo ano de 2003 foram fabricadas  $1.964,4 \cdot 10^6$  toneladas de cimento. Considerando-se que o cimento seja composto 97% de clínquer, chega-se a um valor de  $1,36 \cdot 10^{17}$  J que poderiam ser gerados pela recuperação dos gases do forno em um ciclo Rankine a vapor. Isso representa 0,23% de toda a energia consumida no mundo no ano referido. O mesmo raciocínio aplicado aos valores brasileiros para 2004 fornece potencial de geração de  $2,38 \cdot 10^{15}$  J, ou 0,20% dos  $1,2 \cdot 10^{18}$  J elétricos consumidos no Brasil naquele ano (dados da EPE - Empresa de Pesquisa Energética).

Esse valor percentual parece pequeno, mas é uma quantidade monstruosa de energia que poderia ser gerada em apenas um setor industrial, e sem nenhum aumento de poluição. E esse número será ainda maior se forem consideradas outras fábricas (cerâmica, cimento refratário) e outras formas de cogeração (outros ciclos termodinâmicos, ciclos de topo).

Cálculo semelhante poderia ser aplicado para estimar a quantidade de toneladas de carbono equivalente que podem deixar de ser emitidas se sistemas de cogeração foram mais e mais empregados em fábricas de cimento. O resultado seria amplamente favorável à instalação de sistemas de recuperação dos gases.

De fato, desde que o Protocolo de Kyoto instituiu o mercado de créditos de carbono, projetos de cogeração ganharam importância econômica, além da ambiental. Se forem enquadrados naquilo que o Protocolo chama de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), tais projetos podem ser financiados por países e empresas interessados. O que se observa é que já há uma série de projetos de cogeração em fábricas de cimento na lista para receberem certificação como MDL.

Todos os cálculos feitos aqui consideraram que não acontece queima complementar na caldeira, isto é, o aquecimento do fluxo de água e a geração de vapor ocorrem com energia vinda exclusivamente dos gases a serem recuperados. Outra possibilidade é a de que a energia dos gases seja somada a proveniente de uma queima secundária, na própria caldeira ou em uma câmara de combustão auxiliar. Isso permitiria a geração de vapor a temperatura e pressão superiores às obtidas no caso aqui desenvolvido. O resultado seria uma maior geração elétrica. É claro que, nesse caso, a geração deve ser ponderada com o consumo adicional de combustível.

## 10. Conclusões

Foi feito um estudo sobre o consumo energético na fabricação de cimento, e listadas as principais atividades que usam potência térmica ou elétrica. Também foram mostrados diversos ciclos termodinâmicos, além do Rankine a vapor, possíveis de serem empregados na cogeração elétrica em uma fábrica de cimento.

O ciclo Rankine a vapor apresenta, em relação aos outros, a vantagem de ser o mais usado para a recuperação de gases, e contar com comprovada viabilidade prática, sem que altere os processos de fabricação. Todavia, outros ciclos surgem como opção, oferecendo maior geração elétrica a preços de instalação comparáveis aos do Rankine a vapor.

Dada a viabilidade termodinâmica, e o atual desenvolvimento da tecnologia, a decisão implantação ou não desse tipo de sistema em uma fábrica é estritamente econômica e política.

De fato, sendo a escassez energética como um problema mundial, cada vez mais os sistemas de cogeração devem aparecer como alternativas a serem aproveitadas. Esse fenômeno vai se intensificar à medida que o mercado de créditos de carbono tomar corpo e representar nova fonte de divisas às fábricas.

Os valores usados neste trabalho são típicos para as fábricas de cimento. Para uma planta específica, apenas uma avaliação detalhada, com a medição de valores reais e a consideração das condições legais, financeiras e ambientais locais, pode servir de base para a decisão sobre a viabilidade da implantação da cogeração naquela instalação particular.

## 11. Agradecimentos

O autor agradece à empresa Dynamis Mecânica Aplicada, pelas valiosas contribuições.

## 12. Referências

- Alsop, P. A., Chen, H., Chin-Fatt, A. L., Jackura, A. J., McCabe, M. I., Tseng, H. H.. The Cement Plant Handbook. 3ª edição. Tradeship Publications. Portsmouth (RUN). 2001.
- Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). Guia Básico de Utilização do Cimento Portland. 7ª edição. São Paulo. 2002.
- Balestieri, José A. P. Cogeração – Geração Combinada de Eletricidade e Calor. Editora da UFSC. Florianópolis. 2002.
- Bauer, L. A. Falcão. Materiais de Construção. Volume 1. 4ª edição. LTC, Rio de Janeiro. 1987.
- Brink Jr., Joseph A. e Shreve, A. Norris. Indústrias de Processos Químicos. 4ª edição. Guanabara.
- Duda, Walter H. Cement Data Book 1. Bauverlag. Berlim. 1985.
- Ganapathy, V. Waste Heat Boilers Desakbook. The Fairmont Press, distributed by Prentice-Hall. 1991.
- Incropera, Frank P. e Dewitt, David P. Fundamentos de Transferência de Calor e Massa. LTC. Rio de Janeiro, 2002.
- Innovations in Portland Cement Manufacturing. Portland Cement Association. 2004.
- Li, J., Kong, J. A Co-Generation Process for Clinker and Electricity in Portland Cement Plants, Institute of Cement – China Building Materials Academy, Beijing.
- Lizarraga, José M. S. Cogeneracion – Aspectos Termodinámicos, Tecnológicos y Econômicos. 3ª edição. Universidad del Pais Vasco. Bilbao. 1999.
- Mirolli, Mark D. The Kalina Cycle for Cement Kiln Waste Heat Recovery Power Plants
- Petrucil, Eládio G. R. Materiais de Construção. 2ª edição. Globo. Porto Alegre. 1976.
- The Babcock & Wilson Company. Steam – It's Generation and Use. 40ª edição. Ohio. 1992.
- Trinks, W. Industrial Furnaces. 6ª edição.
- Van Wylen, Gordon J., SONNTAG, Richard E., BORGNACKE, Claus. Fundamentos da Termodinâmica. Tradução da 6ª edição americana. Edgard Blücher. São Paulo. 2003.
- WADE – The World Alliance for Decentralized Energy. Concrete Energy Savings – Onsite Power in the Cement Sector. Março de 2007.
- WALL, Göran, CHUANG, Chia-Chin e ISHIDA, Masaru. Exergy Study of the Kalina Cycle. Analysis and Design of Energy Systems: Analysis of Industrial Processes, AES-Vol. 10-3, pp.73-77, ASME

## 13. Direitos autorais

O autor é o único responsável pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

## COGENERATION IN A CEMENT PLANT

**Daniel Vigarinho de Campos**

danielvcampos@yahoo.com.br

**Abstract.** This report shows a thermodynamic analysis of a cogeneration system in a cement plant. The exhaust gases of a cement kiln carry large quantities of energy, not used in manufacturing. This work studies the possibility of steam and electric power generation, in a Rankine cycle, from this residual energy recovery. The analysis is based on typical conditions of cement manufacturing, and the results are showed in function of the production of clinker, an intermediary product of manufacturing processes. Also, a survey of uses of thermal energy and electrical energy in a cement plant is done.

**Keywords.** cogeneration, cement, energy, clinker