UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

COGERAÇÃO EM UMA FÁBRICA DE CIMENTO

Daniel Vigarinho de Campos

São Paulo
2007

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

COGERAÇÃO EM UMA FÁBRICA DE CIMENTO

Trabalho de Formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em Engenharia

Daniel Vigarinho de Campos

Orientador: Prof. Dr. Silvio de Oliveira Júnior

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

São Paulo
2007

FICHA CATALOGRÁFICA

Campos, Daniel Vigarinho de
Cogeração em uma Fábrica de Cimento / D.V. de Campos. -- São Paulo, 2007.
50 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Termodinâmica 2.Cogeração de energia I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo o apoio durante toda minha vida.

À empresa Dynamis Mecânica Aplicada, pelas valiosas contribuições.

À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e a todos os politécnicos, professores e alunos, pelos últimos cinco anos de luta e pelos próximos cinqüenta anos de sucesso.

Como Queimar Óleo Combustível

Deixe o queimador aberto.
Das válvulas não chegue perto.
Para a bomba dê pressão.
E para cima os gases vão.

Se a fumaça é preta e grossa,
ventile, um pouco mais que possa.
Se a fumaça é grossa e alva,
reduzir o ar é o que te salva.

Se o seu ar é o do papel,
não há fumaça rumo ao céu.
Se a sair se nega o jato,
a causa é a sujeira, de fato.

Se sua chama é curta e clara,
tem combustão completa, cara.
Se é laranja e alongada,
sua combustão é toda errada.

Um sábio o aquecedor mira,
e dos graus certos não o tira.
Não é sábio mais esquentar,
pois pode o óleo carbonizar.

Se limpos filtros mantiver,
perda de carga você não quer.
Se a bomba reclamar,
na sucção você tem ar.

Mais do que as aqui lidas
são as regras a serem seguidas.
Ou o novo engenheiro as lê,
ou numa explosão o fim vê.

Tradução livre de *How to Burn Bunker Oil*, divulgado por Trinks [15]

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.

ABSTRACT

This report shows a thermodynamic analysis of a cogeneration system in a cement factory. 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 factory is done.

LISTA DE SÍMBOLOS

F: fator do forno [kgfarinha/kgclínquer]

$\dot{Q}$: taxa de transferência de calor [W]

$\dot{m}$: vazão em massa [kg/s]

h: entalpia específica [kJ/kg]

$\dot{W}$: trabalho realizado pelo volume de controle [W]

$\dot{n}$: vazão molar [mol/s]

$\overline{h}_f^0$: entalpia específica de formação [kJ/kg]

$\overline{h}$: entalpia específica média [kJ/kg]

c_p: calor específico a pressão constante [kJ/kgK]

w: trabalho específico [kJ/kg]

v: volume específico [m^3/kg]

P: pressão [Pa]

T: temperatura [ºC], [K]

b: exergia específica [kJ/kg]

$\dot{B}_{destruída}$: taxa exergia destruída [kJ/s]

s: entropia específica [kJ/kgK]

R: constante do gás [kJ/kgK]

η: rendimento energético

η_{ex}: rendimento exergético

PCI: poder calorífico inferior do combustível [kJ/kg]

FUE: fator de utilização de energia

RE: razão de energia

u: umidade do mineral, relação em massa [kgágua/kgmineral]

ρ: massa específica [kg/m^3]

e: enchimento

λ: coeficiente de excesso de ar

Subscritos:

VC: volume de controle

e:entrada

s: saída

R: reagentes

P: produtos de reação química

0: condições de referência

iso: isoentrópico

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Compostos Básicos do Clínquer 7
Tabela 2: Ciclos Termodinâmicos para Cogeração 15
Tabela 3: Os Maiores Produtores de Cimento e a Cogeração 16
Tabela 4: Constantes para a Equação (6) 20
Tabela 5: Razões de Energia para Setores Industriais 23
Tabela 6: Pré-aquecedores com Diferentes Números de Estágios 25
Tabela 7: Parâmetros de Fabricação 28
Tabela 8: Coque de Petróleo Seco 30
Tabela 9: Coeficientes da Equação de Combustão 31
Tabela 10: Resultados para o Forno 32
Tabela 11: Resultados para o Moinho de Cru 34
Tabela 12: Gases Destinados à Geração Elétrica 35
Tabela 13: Resultados para a Caldeira de Recuperação 38
Tabela 14: Resultados para o Desaerador 40
Tabela 15: Resultados para a Turbina 41
Tabela 16: Resultados para o Condensador 41
Tabela 17: Resultados para a Bomba 42
Tabela 18: Resultados do Ciclo 45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Forno de cimento 1
Figura 2: Exemplo de seqüência de fabricação do cimento portland 4
Figura 3: Proposta de seqüência de fabricação do cimento portland com cogeração com ciclo Rankine a vapor 10
Figura 4: Simplificação do ciclo Kalina para recuperação de gases 13
Figura 5: Cogeração em ciclo de topo 14
Figura 6: Distribuição percentual da energia usada na fabricação de cimento 28
Figura 7: Forno de cimento com torre de ciclones de 4 estágios 30
Figura 8: Sistema do moinho de cru 33
Figura 9: Caldeira de recuperação com três tubulões (adaptado de [12]).....36
Figura 10: Perfil de temperaturas da caldeira de recuperação.....38
Figura 11: Desaerador.....39
Figura 12: Circuito de vapor 43
Figura 13: Diagrama T-s 43
Figura 14: Diagrama P-v (escala logarítmica para a pressão).....44

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS
LISTA DE TABELAS
LISTA DE FIGURAS

1. OBJETIVOS 1
2. INTRODUÇÃO 2
3. CONCEITOS PRÁTICOS 3
4. O CIMENTO PORTLAND 4
5. A COGERAÇÃO 9
   5.1 COGERAÇÃO EM CICLO DE FUNDO – CICLO RANKINE A VAPOR 9
   5.2 COGERAÇÃO EM CICLO DE FUNDO – CICLO RANKINE A VAPOR COM REATOR DE LEITO FLUIDIZADO 11
   5.3 COGERAÇÃO EM CICLO DE FUNDO – CICLO RANKINE ORGÂNICO 11
   5.4 COGERAÇÃO EM CICLO DE FUNDO – CICLO KALINA 12
   5.5 COGERAÇÃO EM CICLO DE TOPO 13
   5.6 COMPARAÇÃO ENTRE AS CONFIGURAÇÕES 14
7. HIPÓTESES ADOTADAS 17
8. CONSIDERAÇÕES TERMODINÂMICAS 18
9. A FÁBRICA 24
   9.1 CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DA FÁBRICA 24
   9.2 PARÂMETROS DE FABRICAÇÃO 26
   9.3 FORNO 29
   9.4 MOINHO DE CRU 32
10. O SISTEMA DE GERAÇÃO ELÉTRICA 35
   10.1 CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO 35
   10.2 DESAERADOR 39
   10.3 TURBINA 40
   10.4 CONDENSADOR 41

10.5 BOMBA....42
10.6 RESULTADOS DA COGERAÇÃO....42
11. DISCUSSÃO....46
12. CONCLUSÕES....48
13. BIBLIOGRAFIA....49

1. OBJETIVOS

Determinar o potencial de cogeração de energia elétrica a partir dos gases de combustão produzidos por uma fábrica de cimento. Examinar a viabilidade termodinâmica e as alternativas técnicas para a implantação de um sistema de recuperação da energia residual dos gases de escape de um forno de cimento, como o da figura 1.

Figura 1: Forno de cimento

2. 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 ºC), 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 conseqüência 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.

3. CONCEITOS PRÁTICOS

As indústrias de energia e processos, em particular a de cimento, lidam com alguns conceitos particulares. Alguns conceitos para a 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 [6] sugere que esse valor seja da ordem de 10% a 12%.

4. O CIMENTO PORTLAND

A seqüência de operações para fabricação do cimento portland aparece na figura 2, e circunscreve:

- extração da matéria-prima;
- britagem;
- moagem e mistura do cru;
- queima;
- arrefecimento do clínquer
- moagem do clínquer;
- ensacamento e expedição do cimento portland.

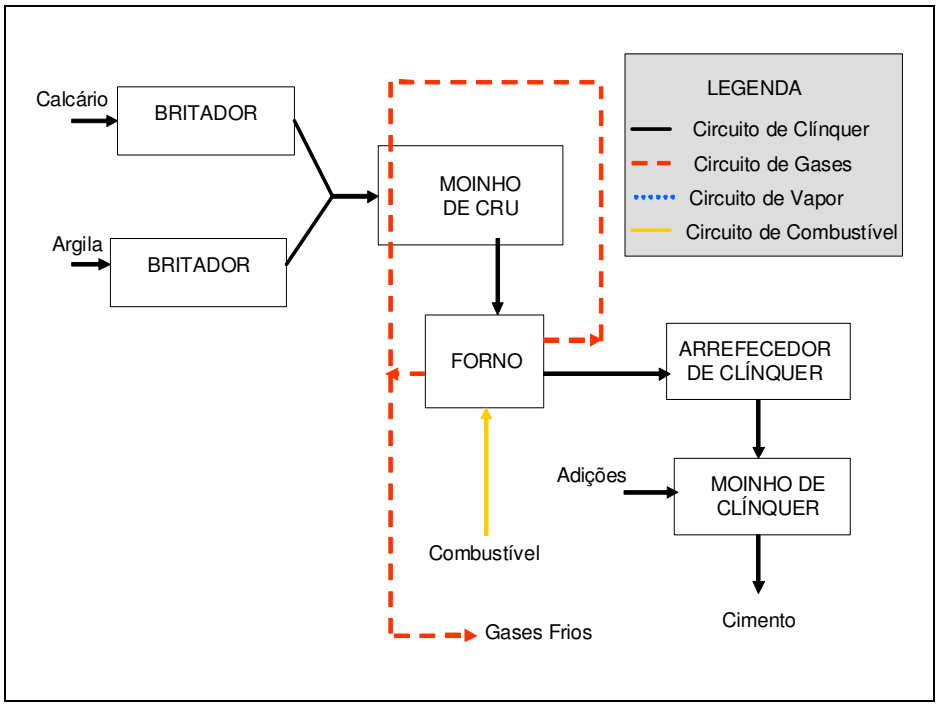

Figura 2: Exemplo de seqüência de fabricação do cimento portland

A extração da matéria-prima, se rocha ou xistos, se faz pela técnica usual de exploração de pedreiras. A extração da argila é feita pela técnica comum de movimentação de terra, ou por dragagem.

A matéria é então britada, para que seja reduzida a grãos. A preparação das matérias-primas pode ser em circuito fechado ou aberto, sendo a primeira a mais usada. No circuito fechado, os finos são separados, e os grossos retornam ao circuito; no aberto, o material é continuamente moído até que sua granulometria média atinja certo valor pré-estabelecido.

Os materiais britados são, então, processados por via seca ou via úmida.

No processo a úmido, o material sólido é britado a seco, é misturado com água, e reduzido a pó em moinhos tubulares ou de bolas, a úmido. Forma-se uma pasta espessa, a lama. A lama é bombeada para tanques corretores, onde misturadores a mantêm homogênea. A lama é encaminhada ao forno, onde ocorrem, nesse caso, a secagem e as reações de clinquerização.

No processo a seco, os materiais são moídos e secados. A secagem usualmente é feita com calor fornecido por gases de combustão vindos do forno, como indica a figura 2. A farinha entra seca no forno, que fica apenas responsável pelas reações de clinquerização.

A experiência prática indica que o forno não é um bom secador, fato que tem norteado as fábricas a optarem pelo processo em via seca, escolha essa também devida ao controle preciso e à boa mistura que o método a seco proporciona. O processo em via seca é mais moderno, consome menos combustível e pode usar forno de maior capacidade que o de via úmida, que se mantém em uso atualmente apenas em fábricas antigas, que ainda não modernizaram seu sistema de produção. Por isso, o processo em via úmida não será abordado neste trabalho.

A mistura vinda da moagem de cru é conduzida à torre de ciclones, na boca do forno, onde é pré-aquecida e pré-calcinada. Essas torres podem ter alturas superiores a 100m. Em geral, há alguns estágios (composto cada um por um ciclone e um tubo) posicionados verticalmente, de tal sorte que os gases que saem do forno entrem em cada ciclone a partir do estágio anterior. Segundo [9], o tubo vertical provê o espaço onde ocorre a troca de calor; o pó, suspenso, oferece uma grande área superficial para que isso ocorra. Ao mesmo tempo, o diminuto tamanho das partículas, pulverizadas, reduz a condutividade térmica e garante uniformidade de temperatura ao longo da partícula. Com os ciclones, a temperatura do gás e a do

sólido se igualam quase instantaneamente, num processo parecido com o que ocorre em misturas líquidas.

Ainda de acordo com [9], o gás deixa o ciclone através do tubo vertical e passa ao estágio imediatamente superior, e o sólido cai para o estágio inferior. Cada estágio, portanto, opera como um trocador de calor de correntes paralelas ideal. Na prática, a temperatura da farinha aumenta cerca de 200º C por estágio, com a correspondente queda de temperatura dos gases. A transferência de calor em cada estágio ciclônico é completada em menos de um segundo. É comum ocorrer 30% da calcinação antes da entrada dos sólidos no forno. Embora a calcinação possa até ser total na farinha em suspensão, isso é evitado porque a dissociação endotérmica do $CaCO_3$, que limita a temperatura em 800 ou 850ºC, é seguida pela formação exotérmica de componentes do cimento, o que poderia elevar em demasia a temperatura nos ciclones, prejudicando-os.

No forno, ocorre a queima, devido ao contato direto com os gases da combustão ocorrida no queimador. A temperatura dentro do forno chega aos 1500ºC. Os combustíveis mais comumente utilizados num forno de cimento são o coque de petróleo, o óleo combustível, o gás natural e o carvão pulverizado. O ar de combustão pode ser pré-aquecido no arrefecedor de clínquer. Os fornos podem ter comprimentos variando entre 50m e 180m, sendo os mais curtos usados no processo a seco. O diâmetro interno varia entre 2m e 6m, e a velocidade de rotação, entre 0,5rpm e 4rpm. Os fornos são ligeiramente inclinados (algo como 4%), de tal sorte que o sólido que entra pela extremidade superior avança lentamente para a extremidade de queima, inferior, levando de 1h a 3h no percurso. Antes de serem eliminados, os gases de combustão pré-aquecem a farinha e passam por filtros de mangas e por precipitadores eletrostáticos, para controle da poluição. O forno é revestido internamente por material refratário, para que conserve o calor e resista à abrasão e ao ataque químico a altas temperaturas.

O produto que sai do forno é o clínquer, material granulado com dois ou três centímetros de diâmetro. Os grãos são conduzidos a arrefecedores pneumáticos, e têm sua temperatura bruscamente abaixada para 100ºC ou 200ºC. É nesses arrefecedores que é pré-aquecido o ar de combustão.

A fabricação se completa com a moagem do clínquer, o ensacamento e a expedição.

A evolução dos conhecimentos técnicos sobre os aglomerantes permitiu que se desenvolvessem vários tipos de cimento portland, cada um adequado a determinada exigência. Um tipo de cimento se diferencia do outro por certas adições feitas durante o processo de fabricação. Essas adições fazem com que se obtenha um concreto com resistência e durabilidade desejadas, e de forma econômica.

As adições são substâncias acrescidas ao clínquer na fase de moagem. O cimento portland tem, então composição pouco distinta da do clínquer. A composição básica do clínquer é mostrada na tabela 1.

Tabela 1: Compostos Básicos do Clínquer

Fórmula	Nome	Símbolo
$2CaO•SiO_2$	Silicato de dicálcio	C_2S
$3CaO•SiO_2$	Silicato de tricálcio	C_3S
$3CaO•Al_2O_3$	Aluminato de tricálcio	C_3A
$4CaO•Al_2O_3•Fe_2O_3$	Aluminoferrito detetracálcio	C_4AF
MgO	Óxido de magnésio livre	MgO

Extraído de Brink [5]

São adições o gesso, a escória de alto forno, os materiais pozolânicos e os materiais carbonáticos.

O gesso tem a função de alongar o tempo da pega, isto é, impedir que o cimento endureça instantaneamente ao contato com a água. O gesso é uma substância presente em todos os tipos de cimento portland comerciais, em geral, na proporção mássica de 3% para 97% de clínquer. A escória de alto forno é adicionada para aumentar a durabilidade e a resistência final do cimento. Os materiais pozolânicos são rochas vulcânicas ou matéria orgânica fossilizada, e podem conferir maior impermeabilidade ao cimento. Os materiais carbonáticos, por sua vez, são rochas moídas que se alojam entre os grãos do cimento e o tornam mais trabalhável, funcionando como um verdadeiro lubrificante.

No Brasil, são nove os tipos de cimento portland empregados na construção civil. Cada um deles é regido por normas da ABNT.

São os seguintes os tipos de cimento portland no Brasil:

- cimento portland comum (CP-I);
- cimento portland composto (CP-II);
- cimento portland de alto-forno (CP-III);
- cimento portland pozolânico (CP-IV);
- cimento portland de alta resistência inicial (CP V-ARI);
- cimento portland resistente aos sulfatos;
- cimento portland de baixo calor de hidratação;
- cimento portland branco (CPB);
- cimento para poços petrolíferos (CPP).

A ABNT determina que o cimento portland deve ser designado pelo prefixo CP acrescido pelos algarismos romanos de I a V, de acordo com o tipo do cimento, sendo as classes de resistência indicadas pelos números 25, 32 ou 40. As classes informam o valor mínimo de resistência à compressão (em MPa) garantidos pelo fabricante após 28 dias da aplicação.

Dada a sua aplicação, é evidente que o atributo fundamental do cimento é a resistência mecânica da pasta fabricada com ele. Essa medida é feita ao fim de determinado prazo a partir aplicação do cimento (28 dias, segundo norma da ABNT), já que a resistência cresce com o tempo até certo limite. Em geral, não é conveniente um começo de endurecimento muito rápido, pois isso dificulta o trabalho dos operários ao exigir que toda a mistura feita seja rapidamente empregada. Para a maioria dos usos, o ideal é que o endurecimento seja lento inicialmente, e rápido, em seguida.

Quanto às capacidades de produção atuais, embora as maiores linhas do mundo sejam capazes de alcançar 10.000 toneladas de clínquer por dia, um forno com capacidade de produção de 5.000 toneladas por dia é considerado grande. Um forno é dito de capacidade media se produz 2.500 ou 3.000 toneladas por dia.

5. A COGERAÇÃO

A cogeração é a produção simultânea de mais de uma forma de energia, isto é, o aproveitamento de uma fração da energia que a Segunda Lei da Termodinâmica obrigaria a rejeitar. Com isso, a cogeração resulta em um aumento do rendimento global do ciclo térmico.

A realidade confirma a cogeração como uma possibilidade prática, sendo que as máquinas térmicas necessariamente rejeitam energia, seguindo a Segunda Lei. Cabe aos envolvidos no projeto e na operação dessas máquinas a decisão sobre aproveitar parte dessa energia descartada, com base em estudos de viabilidade técnica e econômica.

A cogeração não esbarra na necessidade de desenvolvimento de novas tecnologias ou máquinas, mas simplesmente oferece uma forma de geração energética diferente daquela mais usual, constituída por geração centralizada e distribuição de energia. Porém, não há impedimentos para que novas formas de geração sejam incorporadas nesse processo.

Algumas diferentes disposições para a cogeração em uma fábrica de cimento são possíveis. Essas configurações são apresentadas nesta seção.

A cogeração no chamado ciclo de fundo (ou *bottoming*), é aquela 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 clinquerização. 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.

5.1 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 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 onde 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 recomeçaria o ciclo.

A proposta de cogeração é ilustrada na figura 3. 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.

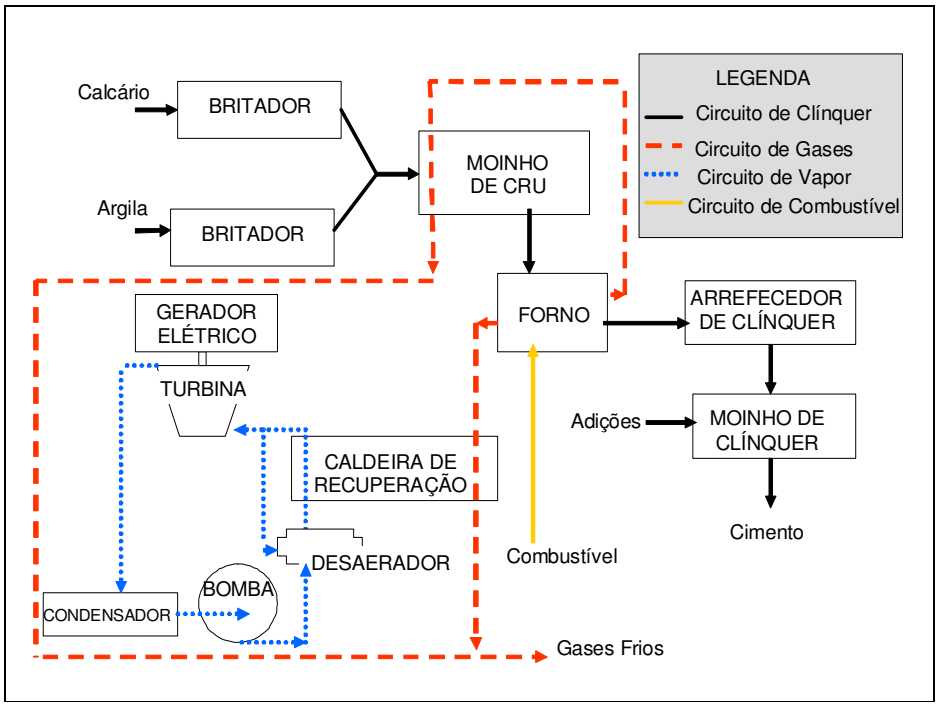

Figura 3: Proposta de seqüência de fabricação do cimento portland com cogeração com ciclo Rankine a vapor

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

5.2 COGERAÇÃO EM CICLO DE FUNDO – CICLO RANKINE A VAPOR COM REATOR DE LEITO FLUIDIZADO

Li & Kong [10] 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.

A grande vantagem desse sistema frente ao com ciclo Rankine a vapor e torre de ciclones é que os gases enviados à caldeira teriam temperatura muito mais elevada. Isso facilitaria o aproveitamento da energia residual dos gases.

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.

5.3 COGERAÇÃO EM CICLO DE FUNDO – 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. Ambos utilizam os equipamentos básicos gerador de vapor, turbina, condensador e bomba.

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.

5.4 COGERAÇÃO EM CICLO DE FUNDO – 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 [12] estudou o ciclo Kalina para a recuperação tanto dos gases de escape do forno quanto do ar de excesso do resfriador de clínquer. Um esquema simplificado do sistema aparece na figura 4.

De acordo com Mirolli [12], na caldeira de recuperação os gases quentes vaporizam uma mistura concentrada de amônia em água. Essa mistura é ainda superaquecida e, então, expandida numa turbina. A mistura que deixa a turbina é muito concentrada para condensar, então ela é resfriada num trocador de calor, e diluída com vapor que vem de um separador. A mistura diluída é conduzida ao condensador de baixa pressão, e totalmente condensada. Dali, uma parte do fluido vai para o separador passando antes pelo trocador de calor, e a outra parte é misturada ao fluxo de vapor concentrado que sai do separador. Esse processo retorna a concentração do fluido de trabalho ao mesmo valor da substância da caldeira. O fluido é então condensado e volta ao início do ciclo.

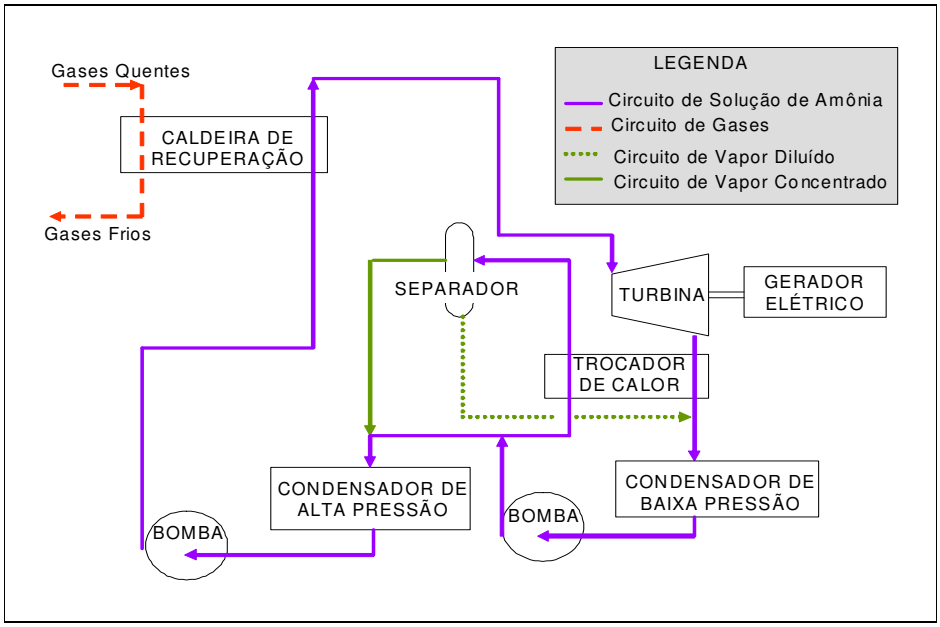

Figura 4: Simplificação do ciclo Kalina para recuperação de gases

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.

5.5 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. Esses processos podem incluir a secagem de cru.

Plantas de cimento também usam a cogeração em ciclo de topo em casos em que suprem necessidades de calor de fábricas vizinhas, como plantas têxteis ou de alimentos, ou enviam energia para 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. Esse sistema aparece na figura 5.

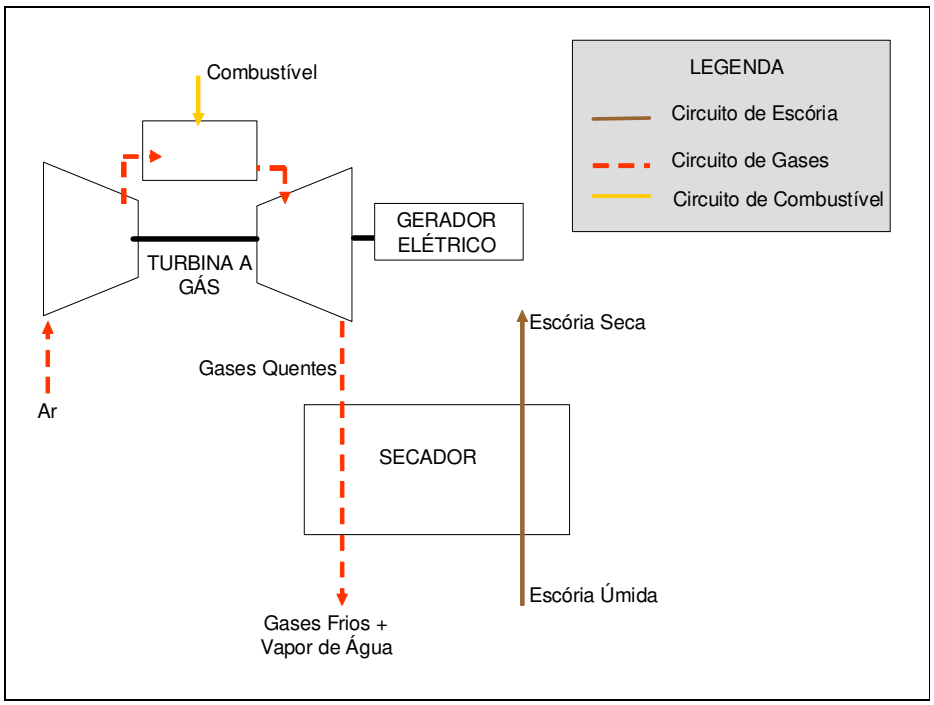

Figura 5: Cogeração em ciclo de topo

Também é possível usar o forno como fonte de calor para produzir frio em *chillers* de absorção. O fator limitante nesses casos é a distância entre a fonte quente e o ambiente a ser refrigerado, pois é muito caro e ineficiente transportar gases quentes a grandes distâncias. Por esse motivo, é recomendada a instalação de unidades uma ao lado da outra, de forma que a energia rejeitada pela primeira seja aproveitada nas suas vizinhanças.

5.6 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 [10] 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 tabela 2 compara-os com o ciclo Rankine a Vapor.

Tabela 2: Ciclos Termodinâmicos para Cogeração

Parâmetro	**Ciclo Termodinâmico**		
	Rankine a Vapor	**Rankine Orgânico**	**Kalina**
Temperatura Mínima dos Gases (ºC)	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 [17]

A tabela 2 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.

Mas é claro que os resultados obtidos para o ciclo a vapor podem ser extrapolados para os outros ciclos a partir da geração elétrica sugerida pela tabela 2.

6. DISTRIBUIÇÃO DA COGERAÇÃO NO MUNDO

Como se sabe, a cogeração de energia elétrica já é realidade em algumas fábricas pelo mundo. A implantação desse tipo de sistema está mais ligada à cultura local e ao custo dos combustíveis em relação ao da energia elétrica do que à quantidade de fábricas de cimento existentes em determinado país. Esse fato talvez possa explicar a inexistência dessas instalações no Brasil, um dos grandes fabricantes mundiais de cimento. A tabela 3 relaciona os países produtores e a energia cogerada.

Tabela 3: Os Maiores Produtores de Cimento e a Cogeração

	Produção (10^6t/ano)			**Fábricas**	**Fábricas com Cogeração**	**Capacidade Instalada (MW)**
País / Ano	**2002**	**2003**	**2004**	**2007**	**2007**	**2007**
1. China	704,1	813,6	933,7	570	63	569
2. Índia	110,1	124,5	136,9	365	65	1.609
3. EUA	89,7	92,8	97,4	109	4	150
4. Japão	76,4	73,8	72,4	n.d.	33	281
5. Cor.do Sul	56,4	59,7	55,8	n.d.	2	19
6. Espanha	42,4	44,8	46,6	37	n.d.	n.d.
7. Itália	41,5	43,5	46,1	93	n.d.	n.d.
8. Rússia	40,1	42,6	45,9	n.d.	n.d.	n.d.
9. Turquia	37,2	38,1	41,3	n.d.	2	49
10. Indonésia	35,1	34,9	37,9	11	1	12
11. Tailândia	38,8	35,6	36,7	n.d.	0	0
12. Brasil	**38,0**	**34,0**	**34,4**	**n.d.**	**0**	**0**
13. México	32,0	32,6	33,9	30	1	250
14. Alemanha	31,5	33,4	32,8	50	2	n.d.
15. Irã	28,8	30,5	31,5	29	n.d.	n.d.
Total Mundial	**1.815,0**	**1.964,4**	**2.139,4**	**1.294**	**173**	**2.939**

Compilado de SNIC (Sindicato Nacional das Indústrias de Cimento) e de WADE [17]
Nota 1: classificação segundo os resultados de 2004
Nota 2: inclui cogeração por ciclo de topo e por ciclo de fundo

7. 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%

8. 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

Portanto, num ciclo Rankine, faz-se uso de pelo menos quatro equipamentos mecânicos, cada um responsável pela ocorrência de um dos processos termodinâmicos básicos. Este trabalho considera que o fluido de trabalho será bombeado por uma bomba centrífuga, e enviado ao gerador de vapor tipo caldeira de recuperação (ou HRSG – *Heat Recovery Steam Generator*). A partir daí, o vapor, superaquecido, será conduzido à turbina, para expansão e produção de trabalho mecânico, convertido em energia elétrica em um gerador. A saída da turbina leva ao condensador, que precede a bomba.

A primeira lei da Termodinâmica 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. Para volumes de controle sem reações químicas, a primeira lei da Termodinâmica é dada pela eq. 1.

$$\dot{Q}_{VC} + \sum\left(\dot{m}_e \cdot h_e\right) = \dot{W}_{VC} + \sum\left(\dot{m}_s \cdot h_s\right) \tag{1}$$

mas para sistemas reagentes, consideram-se as entalpias de formação, $\overline{h}_f^0$, e a primeira lei fica como a eq. 2.

$$\dot{Q}_{VC} + \sum_R [\dot{n}_e \cdot \left(\overline{h}_f^0 + \Delta\overline{h}\right)_e] = \dot{W}_{VC} + \sum_P [\dot{n}_s \cdot \left(\overline{h}_f^0 + \Delta\overline{h}\right)_s] \tag{2}$$

A aplicação das equações 1 e 2 requer o conhecimento da variação de entalpia, Δh. O calor específico a pressão constante para gases perfeitos é definido como a derivada da entalpia em relação à temperatura, eq. 3,

$$c_p = \frac{dh}{dT} \tag{3}$$

Para a determinação do valor de c_p, podem ser usadas expressões empíricas em função da temperatura. Van Wylen [16], sugere as eqs. 4 e 5,

$$c_p = C_0 + C_1 \cdot \theta + C_2\theta^2 + C_3 \cdot \theta^3 \tag{4}$$

$$\theta = \frac{T}{1000} \tag{5}$$

Com isso, vem a eq. 6.

$$\Delta h = h_2 - h_1 = \int_1^2 c_p dT = \int_{\theta_1}^{\theta_2} 1000 \cdot c_p d\theta$$

$$= 1000 \cdot \left(C_0 \cdot \left(\theta_1 - \theta_2\right) + C_1 \cdot \frac{\left(\theta_1^2 - \theta_2^2\right)}{2} + C_2 \cdot \frac{\left(\theta_1^3 - \theta_2^3\right)}{3} + C_3 \cdot \frac{\left(\theta_1^4 - \theta_2^4\right)}{4} \right) \tag{6}$$

As constantes que devem ser usadas na equação 6 aparecem na tabela 4 para diferentes gases.

Tabela 4: Constantes para a Equação (6)

Gás	Fórmula	C_0	C_1	C_2	C_3
Água (vapor)	H_2O	1,03	2,91	-1,92	0,54
Dióxido de Carbono	CO_2	0,45	1,67	-1,27	0,39
Dióxido de Enxofre	SO_2	0,37	1,05	-0,77	0,21
Nitrogênio	N_2	1,11	-0,48	0,96	-0,42
Oxigênio	O_2	0,88	-0,0001	0,54	-0,33

Adaptado de Van Wylen [16]
Nota: valores válidos para temperaturas de 250K a 1200K

Para os sólidos, são usados valores tabelados para o calor específico, e para a água, tabelas termodinâmicas. Van Wylen [16] fornece tais valores.

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 isoentrópica, define-se o rendimento isoentrópico, que relaciona a operação real com a ideal. O rendimento isoentrópico para uma bomba é dado pela eq. 7, e o para uma turbina, pela eq. 8.

$$\eta_{iso_bomba} = \frac{h_e - h_{s,iso}}{h_e - h_{s,real}} \tag{7}$$

$$\eta_{iso_turbina} = \frac{h_e - h_{s,real}}{h_e - h_{s,iso}} \tag{8}$$

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

$$w_{iso_bomba} = -\int_e^s v dP = -v \cdot (P_s - P_e) \tag{9}$$

Outra expressão importante em todos os volumes de controle é a equação da continuidade, ou da conservação de massa, eq. 10.

$$\sum \dot{m}_e = \sum \dot{m}_s \tag{10}$$

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. 11, em que as grandezas referidas às condições ambiente têm subscritos 0.

$$\sum \dot{m}_e \cdot b_e = \sum \dot{m}_s \cdot b_s + \dot{W}_{VC} - \dot{Q}_{vc} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) + \dot{B}_{destruída} \tag{11}$$

A exergia específica é dada pela eq. 12, que relaciona a entalpia, h, e a entropia, s.

$$b = (h - h_0) - T_0 \cdot (s - s_0) \tag{12}$$

Na aplicação das equações 11 e 12, pode ser usada a equação 13, definida para gases perfeitos e que leva em conta a pressão de trabalho, P, e a constante do gás, R.

$$\Delta s = s_1 - s_2 = \int_1^2 c_{p0} \frac{dT}{T} + R \cdot \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \tag{13}$$

Usando as equações 4 e 5 na 13, vem a eq.14.

$$s_2 - s_1 = \left(C_0 \cdot \ln\left(\frac{\theta_1}{\theta_2}\right) + C_1 \cdot (\theta_1 - \theta_2) + C_2 \cdot \frac{\left(\theta_2^2 - \theta_1^2\right)}{2} + C_3 \cdot \frac{\left(\theta_2^3 - \theta_1^3\right)}{3} \right) - R \cdot \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \tag{14}$$

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. 15, e exegético, eq. 16.

$$\eta = \frac{\sum \dot{W}_{útil} + \sum \dot{Q}_{processo}}{\dot{m}_{combustível} \cdot PCI} \tag{15}$$

$$\eta_{ex} = \frac{\sum \dot{W}_{útil} + \sum \dot{Q}_{processo} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{processo}}\right)}{\dot{B}_{combustível}} \tag{16}$$

Neste texto, a temperatura do processo é calculada como a média logarítmica entre as temperaturas de saída do clínquer do forno e de entrada da farinha nele. Assim, fica estabelecida a eq. 17

$$T_{processo} = \frac{T_{s_forno} - T_{e_forno}}{\ln\left(\frac{T_{s_forno}}{T_{e_forno}}\right)} \tag{17}$$

O trabalho total disponível no combustível pode ser considerado igual ao seu poder calorífico, o que mostra eq. 18.

$$\dot{B}_{combustível} = \dot{m}_{combustível} \cdot b_{combustível} = \dot{m}_{combustível} \cdot PCI \tag{18}$$

Valores importantes para instalações de cogeração são o fator de utilização de energia, FUE, definido na eq. 19, e a razão de energia, RE, eq. 20. O FUE relaciona a

energia aproveitada com a requerida (térmica e elétrica). A RE relaciona as demandas térmica e elétrica num volume de controle.

$$FUE = \frac{\sum \dot{W}_{útil} + \sum \dot{Q}_{processo}}{\dot{m}_{combustível} \cdot PCI + \sum \dot{W}_{elétrico}} \tag{19}$$

$$RE = \frac{\dot{W}_{elétrico_requerido}}{\dot{Q}_{térmico_requerido}} \tag{20}$$

Balestieri [3] sugere valores de razões de energia para diferentes setores industriais, entre eles o da fabricação de cimento. Esses dados são mostrados na tabela 5.

Tabela 5: Razões de Energia para Setores Industriais

Setor Industrial	Potência Elétrica / Potência Térmica
Ferro-gusa	0,008
Ferro Liga	1,030
Mineração e Pelotização	0,320
Papel e Celulose	0,360
Cimento	**0,110**
Cerâmica	0,110
Têxtil	0,700
Alimentos e Bebidas	0,070
Química e Petroquímica	0,330

Adaptado de Balestieri [3]
Nota: valores para o período de 1970 a 1986

9. 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.

Para que os resultados obtidos possam ser estendidos a diferentes fábricas, e para que se tenha idéia imediata e precisa da relação entre a fabricação e o potencial de geração de energia elétrica por cogeração, todos os valores considerados foram parametrizados em função da produção de clínquer. Isto significa que os números aparecem sempre em relação a um quilograma de clínquer produzido.

9.1 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: 25ºC

2. Temperatura de referência para as entalpias de formação: 0ºC

3. Fator do forno admitido: 1,7kgfarinha/kgclínquer

4. Umidade do mineral admitida:0,07kgágua/kgmineral

5. Temperatura de entrada da farinha no forno: 70ºC

6. Temperatura de saída do clínquer do forno: 1.100ºC

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: $\frac{79\%}{21\%} = 3{,}76\ \text{mol}N_2/\text{mol}O_2$

10. Coeficiente de ar (valor usual para fornos de cimento): $\lambda = 1{,}25$

11. Massa molar do ar atmosférico (de Van Wylen [16]): 28,97kg/kmol

12. Massa específica do clínquer (de Incropera [8], concreto com brita): 2.300kg/m^3

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 [8], a 300K): 0,81kJ/kgK

16. Calor específico da argila (Incropera [8], a 300K): 0,88kJ/kgK

17. Razão de energia, tabela 5: 0,11

18. Temperatura de exaustão dos gases da torre: 400ºC

Valor pouco superior ao mostrado na tabela 6, sugerido por Alsop [1]; esse aumento pretende aproximar o estudo a valores reais verificados.

Tabela 6: Pré-aquecedores com Diferentes Números de Estágios

Número de Estágios do Pré-aquecedor	Temperatura dos Gases na Exaustão do Pré-aquecedor (ºC)	Consumo Específico de Combustível* (kJ/kgclínquer)
6	260	3.138,0
5	300	3.242,6
4	350	3.347,2

* Com base no PCI do combustível
Adaptado de Alsop [1]

19. Consumo específico térmico no forno (base PCI do combustível) sugerido por Alsop [1] e mostrado na tabela 6: 3.347,2kJ/kgclínquer

20. Enchimento do forno (de Duda [6]): 10%

9.2 PARÂMETROS DE FABRICAÇÃO

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

1. Produção da mineração

Usando a relação mássica dada pela eq. 21,

$$\dot{m}_{\min eração} = \dot{m}_{farinha} + \dot{m}_{água} \tag{21}$$

com o fator do forno dado pela equação 22

$$F = \frac{\dot{m}_{farinha}}{\dot{m}_{clínquer}} \tag{22}$$

e a umidade, eq. 23

$$u = \frac{\dot{m}_{água}}{\dot{m}_{\min eração}} \tag{23}$$

Vem a eq. 24

$$\frac{\dot{m}_{\min eração}}{\dot{m}_{clínquer}} = \frac{F}{1-u} \tag{24}$$

2. Água no mineral

De forma semelhante ao tópico anterior, vem a eq. 25

$$\frac{\dot{m}_{água}}{\dot{m}_{clínquer}} = \frac{F}{\frac{1}{u} - 1} \tag{25}$$

3. Consumo de Energia Elétrica na Moagem de Cru

Duda [6] sugere consumo de 128,52kJ/kgclínquer

4. Consumo de Energia Elétrica no Forno

Duda [6] sugere consumo, em relação ao volume interno do forno, de $\frac{1}{4,5}$ kW/m^3.

Assim, com o enchimento e definido pela relação volumétrica da eq. 26

$$e = \frac{V_{clínquer_forno}}{V_{\text{int}erno_forno}} \tag{26}$$

vem a eq. 27, o consumo elétrico em função da densidade do clínquer, $\rho_{clínquer}$.

$$\dot{W}_{elétrico_forno} = \frac{1}{e \cdot 4,5 \cdot \rho_{clínquer}} \tag{27}$$

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, tabela 5

A tabela 7 mostra os resultados obtidos para os parâmetros de fabricação. A figura 6 ilustra o uso da energia nas etapas de fabricação, com os percentuais referidos ao consumo total de energia da fábrica.

Tabela 7: 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

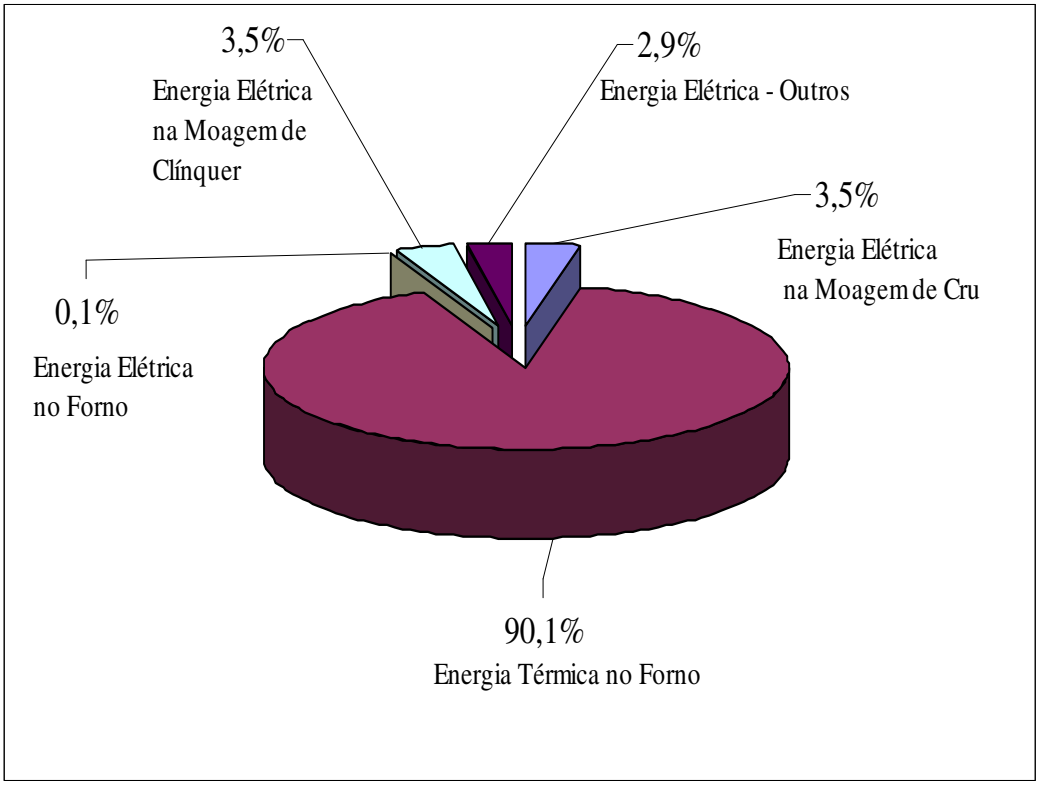

Figura 6: Distribuição percentual da energia usada na fabricação de cimento

9.3 FORNO

O sistema do forno de cimento é o núcleo da planta, a parte fundamental de todo o processo de fabricação do cimento. Em linhas gerais, compreende um pré-aquecedor no qual a farinha é alimentada para trocar calor com os gases de exaustão do forno, um forno rotativo em que ocorrem as reações de clinquerização, e um resfriador, em que o clínquer quente troca calor com o ar de combustão do queimador.

Os primeiros fornos empregados na fabricação de cimento eram fixos, tinham eixo vertical e possibilitavam a combustão de uma mistura da farinha e combustível sólido. A introdução da tecnologia do forno rotativo e (quase) horizontal permitiu mais uniformidade na transferência de calor e no controle da queima. Hoje, o forno rotativo é o mais usado reator industrial de alta temperatura para sólidos, principalmente em processos em que é necessário expressivo tempo de reação e grande homogeneização da mistura. Por possibilitar grande tempo de residência para grandes cargas de material, e por ter uma mecânica simples, é ideal para o processo de formação do clínquer.

O fato de o forno ser rotativo permite uma mistura homogênea dos sólidos, e aumenta a área superficial, de cada partícula, exposta aos gases. Ambas as ações são estimuladas pela circulação imprimida à partícula, agitação essa tanto em relação às outras partículas quanto em relação às paredes do forno. Contudo, o forno rotativo não é muito eficiente no pré-aquecimento e na calcinação da farinha, devido ao limite máximo da área de troca de calor entre a mistura e os gases de combustão, além da baixa condutividade térmica da farinha. Por isso, são usados os pré-aquecedores ciclônicos.

Um forno de cimento com torre de 4 estágios é mostrado na figura 7.

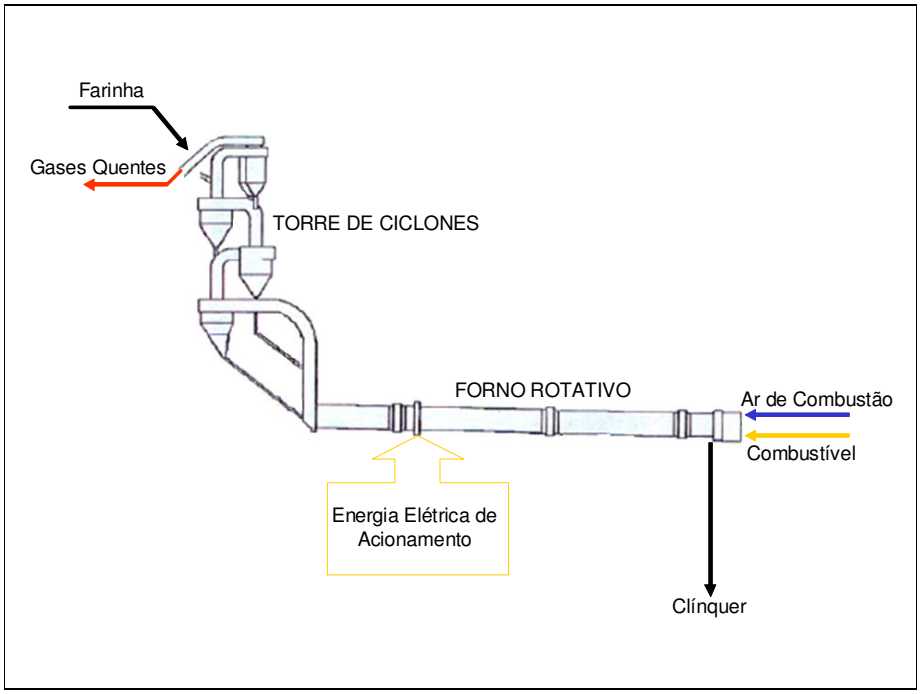

Figura 7: Forno de cimento com torre de ciclones de 4 estágios

Neste trabalho, foi considerada a queima, no forno, de coque de petróleo pulverizado. Esse é um combustível comum nas fábricas, e foi usado para a caracterização da combustão ocorrida no forno, sem perda de generalidade no caso do uso de outro combustível.

A tabela 8 apresenta a composição e o poder calorífico inferior considerados para o coque de petróleo seco.

Tabela 8: Coque de Petróleo Seco

PCI = 35.000kJ/kg			
Componente	**Fórmula**	**Massa Molecular (kg/kmol)**	**% em Massa**
Carbono	C	12,011	86,30
Hidrogênio	H_2	2,016	3,77
Enxofre	S	32,06	5,38
Oxigênio	O_2	32,00	1,72
Nitrogênio	N_2	28,01	1,51
Cinzas	-	-	0,32

A equação química abaixo e a tabela 9 representam a combustão completa do coque de petróleo, com ar seco e 25% de excesso de ar:

$$aC + bH_2 + cO_2 + dN_2 + eS + \lambda f\left(O_2 + 3{,}76N_2\right) \rightarrow gCO_2 + hH_2O + iSO_2 + \lambda jN_2 + lO_2$$

Tabela 9: Coeficientes da Equação de Combustão

Coeficiente	Valor	Unidade
a	0,0718508	kmol/kgclínquer
b	0,0188500	kmol/kgclínquer
c	0,0005375	kmol/kgclínquer
d	0,0005393	kmol/kgclínquer
e	0,0016781	kmol/kgclínquer
f	0,0824164	kmol/kgclínquer
g	0,0718508	kmol/kgclínquer
h	0,0188500	kmol/kgclínquer
i	0,0016781	kmol/kgclínquer
j	0,3103171	kmol/kgclínquer
l	0,0257551	kmol/kgclínquer
λ	1,25	-

Neste trabalho, foi desprezada a formação de óxidos de nitrogênio, como produtos de combustão. Outra consideração feita é a de que todo o combustível injetado no forno é queimado, transfere energia às reações de clinquerização, e sai como gás de combustão.

A equação da combustão, com a lei da continuidade, equação 10, e a primeira lei da termodinâmica, equação 2, permitem analisar quantitativamente os fenômenos ocorridos dentro do forno. Os resultados dessas análises aparecem indicados na tabela 10.

Tabela 10: Resultados para o Forno

Grandeza	Valor	Unidade
Vazão de Farinha Alimentada	1,7	kg/kgclínquer
Temperatura da Farinha Alimentada	70	ºC
Vazão de Ar de Combustão	1,36	kg/kgclínquer
Vazão de Combustível	0,10	kg/kgclínquer
Vazão de Gases de Escape	2,15	kg/kgclínquer
Temperatura dos Gases de Escape	400	ºC
Vazão de Clínquer Produzido	1,00	kg/kgclínquer
Temperatura do Clínquer Produzido	1.100	ºC
Energia Elétrica de Acionamento	3,84	kJ/kgclínquer
Razão Ar/Combustível	14,21	kgar/kgcombustível
Energia Residual nos Gases de Escape	910,25	kJ/kgclínquer
Energia Rejeitada nos Gases de Escape*	27,19	%

* Em relação à vazão e ao PCI do combustível

9.4 MOINHO DE CRU

Nas fábricas, é comum utilizar o moinho de cru para secar o mineral que é extraído da mina. Isso é feito através do contato direto do material com gases de combustão no interior desses equipamentos. A moagem de cru normalmente utiliza moinhos dotados de aberturas, que permitem que gases quentes provenientes do forno sejam .usados na secagem, eliminando a necessidade de outra combustão.

Na saída do moinho, um filtro de mangas separa a farinha carregada pelos gases frios, e a encaminha para o circuito de farinha.

Duda [6] afirma que a moagem de cru geralmente emprega moinhos em que os fluxos de farinha e gases ocorrem em correntes paralelas. Nesses equipamentos, o fluido frio recebe calor do fluido quente, de tal sorte que o primeiro é aquecido e o segundo, resfriado.

A temperatura de saída da farinha seca do moinho foi tida como a mesma da entrada do material no forno.

A figura 8 mostra o sistema do moinho de cru.

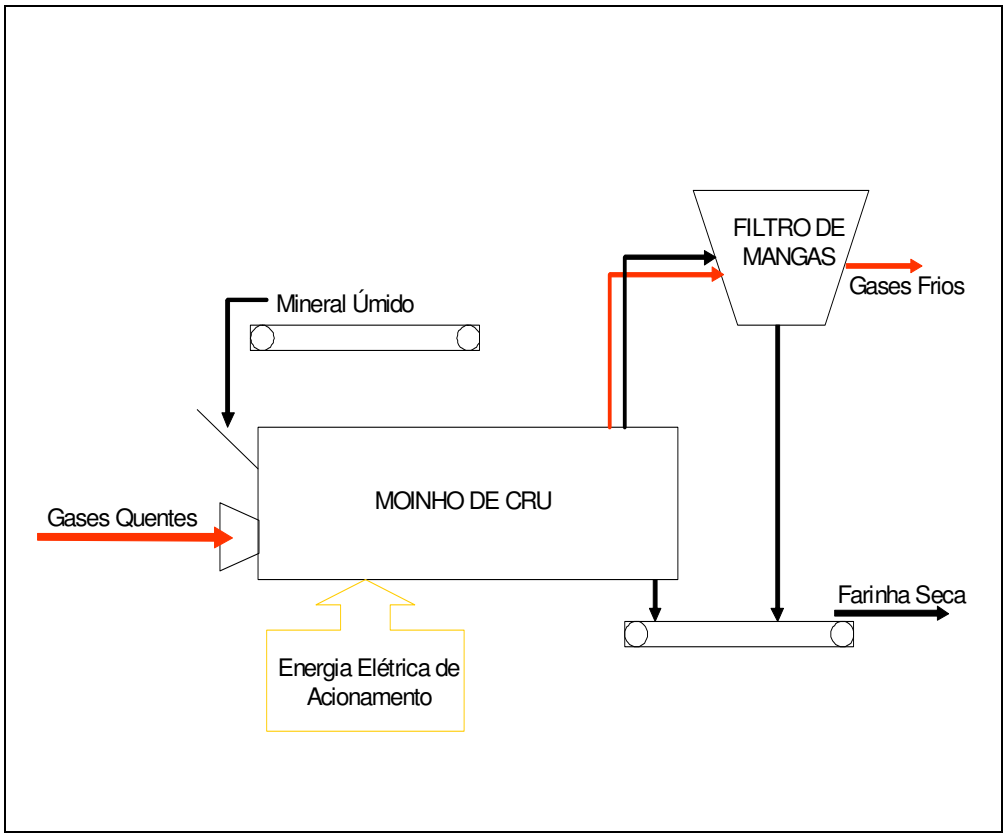

Figura 8: Sistema do moinho de cru

Caso os gases provenientes do forno não sejam encaminhados para o moinho de cru a fim de secar o mineral úmido, é possível que essa secagem seja feita com o uso de energia oriunda de gases de uma combustão auxiliar, especialmente realizada para tal finalidade.

Se isso ocorrer, haverá maior vazão de gases possível de ser destinada à cogeração elétrica (justamente a fração desviada do forno para o moinho). Contudo, combustível deve ser empregado para a ocorrência da combustão auxiliar.

As fábricas no Brasil costumam quase sempre empregar parte dos gases do forno para a secagem. Em algumas plantas, uma combustão secundária também está presente.

A lei da continuidade (eq. 10), aplicada com a primeira lei da termodinâmica (eq.1), permite calcular a vazão de gases do forno necessária para a secagem do mineral. Os resultados são indicados na tabela 11.

Tabela 11: Resultados para o Moinho de Cru

Grandeza	Valor	Unidade
Vazão de Mineral Úmido	1,83	kg/kgclínquer
Temperatura do Mineral Úmido	25	ºC
Vazão de Gases Quentes	1,02	kg/kgclínquer
Temperatura dos Gases Quentes	400	ºC
Fração dos Gases destinada ao Moinho*	47,5	%
Energia de Acionamento	128,52	kJ/kgclínquer
Temperatura dos Gases Frios	150	ºC
Variação de Entalpia dos Gases	269,20	kJ/kg
Vazão de Água Evaporada	0,13	kg/kgclínquer
Variação de Entalpia da Água	2671,53	kJ/kg
Vazão de Farinha Seca	1,7	kg/kgclínquer
Temperatura da Farinha Seca	70	ºC

*em relação ao total de gases de exaustão do forno

A temperatura de entrada da farinha é considerada como igual à do ambiente. A temperatura de saída dos gases de combustão foi fixada em 150ºC para que não ocorra condensação de vapor. Caso isso ocorresse, água líquida poderia se combinar com o óxido de enxofre presente nos gases, e formar ácido sulfúrico, que poderia causar corrosão em equipamentos.

10. O SISTEMA DE GERAÇÃO ELÉTRICA

A vazão de gases que pode ser destinada para a geração de energia elétrica por cogeração pode ser agora facilmente calculada. Basta subtrair, do total de gases de escape do forno, a vazão de gases destinada à secagem da farinha no moinho. A composição e as condições dos gases são tomadas como idênticas às da exaustão do forno.

Com isso, é possível montar a tabela 12.

Tabela 12: Gases Destinados à Geração Elétrica

Grandeza	Valor	Unidade
Vazão dos Gases	1,13	kg/kgclínquer
Temperatura dos Gases	400	ºC
Energia Rejeitada nos Gases*	14,26	%

* Em relação ao PCI e à vazão total do combustível no forno

O sistema de cogeração é agora projetado.

10.1 CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO

Os gases de exaustão do forno carregam muito pó, e precisam ser filtrados antes de serem lançados a atmosfera. Filtros, em geral, não trabalham com gases com temperaturas muito elevadas. Isso quer dizer que antes da filtragem é preciso reduzir a temperatura dos gases de exaustão do forno, o que pode ser feito pela diluição com ar atmosférico. Quer dizer também que filtros não podem ser posicionados entre o forno e a caldeira de recuperação, pois a diluição tornaria a temperatura dos gases muito baixa para eles serem recuperados na caldeira. O resultado de tudo isso é que é preciso recuperar gases "sujos", e que a caldeira de recuperação deve ser especialmente projetada para operar com grande quantidade de particulado.

Essas caldeiras podem 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 figura 9.

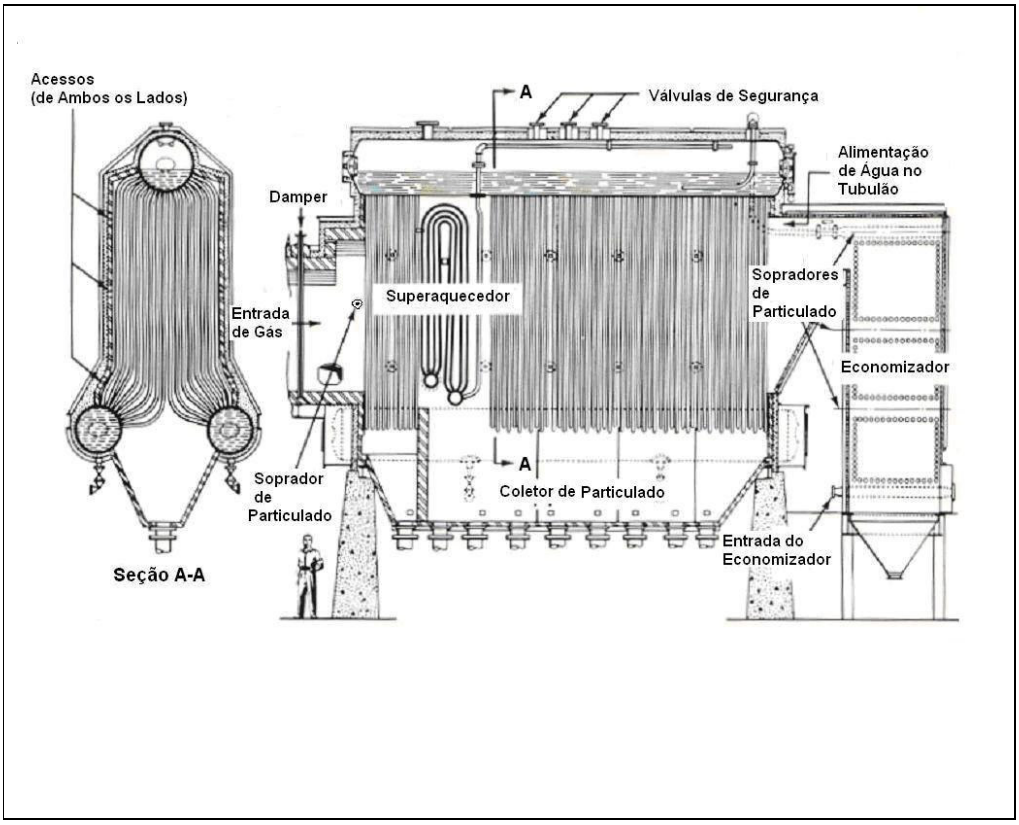

Figura 9: Caldeira de recuperação com três tubulões (adaptado de [14])

Segundo [14], nessas caldeiras a precipitação dos sólidos é assegurada pelo escoamento horizontal dos gases através do feixe vertical de tubos. Esse arranjo de tubos permite que se alcancem todas as superfícies internas com ferramentas manuais de limpeza de particulado. Também podem existir sopradores de pó, lanças retráteis com bocais em suas extremidades, através dos quais parte do vapor é injetada sobre as superfícies a serem limpas. Outro mecanismo de limpeza são os tubos de água que podem ser vibratórios e, assim, promover o não acúmulo de pó sobre as superfícies do aparelho. Um terceiro sistema de despoeiramento da caldeira são os desincrustadores, correntes fixadas a hastes que giram e promovem o choque das correntes contra as superfícies sujas, para que o pó caia num coletor.

O particulado pode ser removido do coletor com a caldeira em funcionamento Segundo [14], até 40 toneladas de pó podem ser recolhidos desses coletores por dia.

A caldeira de recuperação é um trocador de calor em contra-corrente que opera com os gases de exaustão do forno como fluido quente e água como fluido frio. Não há queima complementar. A temperatura de entrada dos gases é tida como

a mesma da saída do forno, 400ºC; a temperatura de saída é estabelecida em 150ºC para que não haja condensação de água e formação de ácido sulfúrico. A temperatura de entrada da água é sugerida por [14]: 120ºC. São tomados outros valores recomendados por [14], cujos significados serão agora discutidos:

- *Pinch Point*: numa caldeira de recuperação, é a diferença entre a temperatura de saturação do vapor gerado e a temperatura dos gases quentes na seção de saída da água do economizador em direção ao evaporador; [14] sugere que o *pinch point* assuma valores entre 11ºC e 28ºC.
- *Superheater Approach*: numa caldeira de recuperação, é a diferença entre a temperatura de entrada dos gases quentes e a temperatura de saída do vapor superaquecido; [14] sugere que o *superheater approach* assuma valores entre 22ºC e 33ºC.
- *Economizer Approach*: numa caldeira de recuperação, é a diferença entre a temperatura de saída da água do economizador e a temperatura de saturação do vapor; [14] sugere que o *economizer approach* assuma valores entre 6ºC e 17ºC.

Com isso, a temperatura de saída do vapor fica estabelecida (temperatura de entrada dos gases menos o valor do *superheater approach*. De forma semelhante, fica situada a temperatura de saturação do vapor: é igual à temperatura dos gases na fronteira entre economizador e evaporador, subtraída do valor do *pinch point*. Conhecida a temperatura de saturação do vapor, a pressão do vapor gerado é a pressão de saturação a tal temperatura. Esses conceitos são bem ilustrados pelo perfil de temperaturas da caldeira de recuperação, figura 10.

A partir desse valores, é possível fazer o balanço de massa, de energia e de exergia, com a aplicação as equações (1), (10) e (11) à caldeira de recuperação. Os resultados são mostrados na tabela 13.

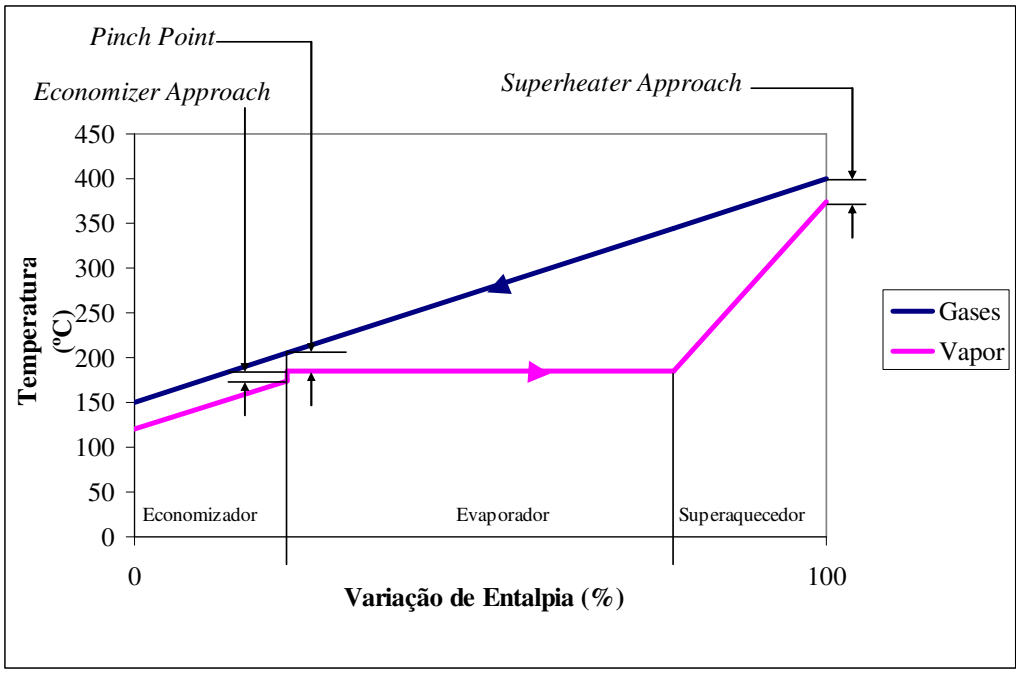

Figura 10: Perfil de temperaturas da caldeira de recuperação

Tabela 13: Resultados para a Caldeira de Recuperação

Grandeza	Valor	Unidade
Pinch Point	20	ºC
Superheater Approahc	25	ºC
Economizer Approach	10	ºC
Vazão dos Gases	1,13	kg/kgclínquer
Temperatura de Entrada dos Gases	400	ºC
Temperatura de Saída dos Gases	150	ºC
Variação de Entalpia dos Gases	269,20	kJ/kg
Vazão de Vapor Gerado	0,11	kg/kgclínquer
Pressão do Vapor Gerado	1.122,7	kPa
Temperatura de Entrada da Água	120	ºC
Temperatura de Saída do Vapor	375	ºC
Variação de Entalpia da Água	2704,9	kJ/kg
Exergia Destruída na Caldeira	218,57	kJ/kgclínquer

10.2 DESAERADOR

Parte do vapor gerado na caldeira de recuperação é conduzida, através de uma ramificação da linha principal, a um desaerador. Nesse equipamento, essa fração do vapor encontra o fluxo de água de alimentação da caldeira, e condensa. Como resultado da combinação da água com o vapor, há liberação de gases dissolvidos na água e aquecimento da mistura. O desaerador é parte importante do sistema do controle de qualidade da água que abastece a caldeira, e é esquematizado na figura 11.

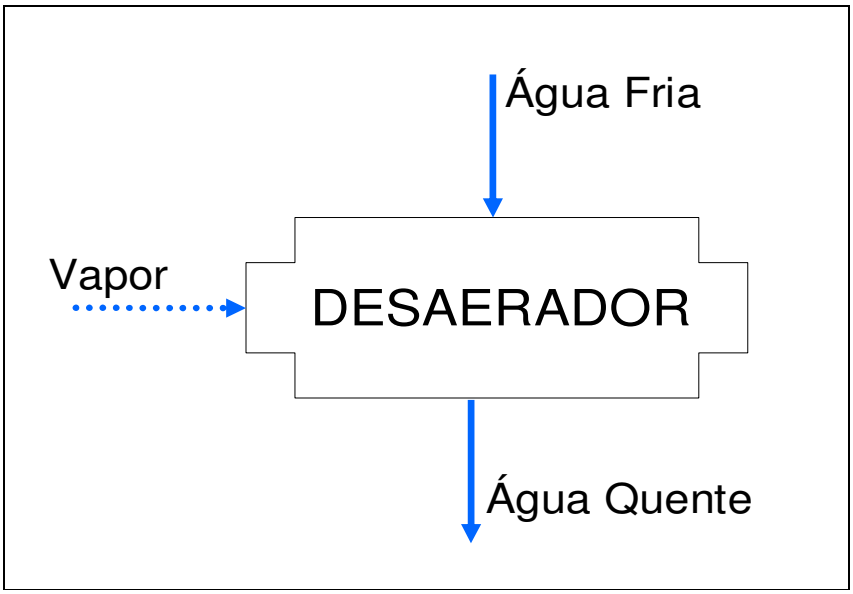

Figura 11: Desaerador

A água de alimentação poderia ser aquecida por outra fonte de calor, como o ar que resfria o clínquer no arrefecedor. Contudo, optou-se pelo desaerador porque o ar do arrefecedor já é usado como ar secundário na combustão no forno, e muitas fábricas não dispõem de ar de excesso.

Considera-se que a água entra no desaerador à temperatura de saída da bomba, e que é aquecida até a temperatura de entrada na caldeira, e que o vapor entra no desaerador às mesmas condições que deixa a caldeira. Assim, é possível determinar a vazão de vapor que deve ser desviada. A aplicação das equações (1), (10) e (11) fornece os resultados mostrados na tabela 14.

Tabela 14: Resultados para o Desaerador

Grandeza	Valor	Unidade
Vazão da Água Fria	0,10	kg/kgclínquer
Temperatura da Água Fria	50,11	ºC
Vazão de Vapor	0,01	kg/kgclínquer
Temperatura do Vapor	375	ºC
Vazão de Água Quente	0,11	kg/kgclínquer
Temperatura da Água Quente	120	ºC
Exergia Destruída no Desaerador	5,91	kJ/kgclínquer

10.3 TURBINA

A turbina recebe o fluxo de vapor, e converte parte da entalpia desse escoamento em energia mecânica. Um gerador elétrico acoplado ao eixo da turbina transforma essa energia mecânica em energia elétrica. Considerou-se que o gerador elétrico seja capaz de converter em eletricidade toda a energia mecânica obtida na turbina.

A vazão de vapor dirigida à máquina é igual ao total de vapor gerado menos a quantidade desviada para o desaerador. As condições de entrada do vapor na turbina são as mesmas da saída da caldeira. A pressão de saída é fixada em um valor no qual a temperatura de saturação da água seja pouco superior à temperatura ambiente, para garantir que ele transfira calor ao ambiente no condensador, após deixar a turbina.

Admite-se um valor para o rendimento isoentrópico da turbina, a partir do qual é possível determinar o estado de saída do vapor. A aplicação das equações (1), (8), (10) e (11) fornece os resultados mostrados na tabela 15.

Tabela 15: Resultados para a Turbina

Grandeza	Valor	Unidade
Rendimento Isoentrópico	0,8	-
Vazão do Vapor Expandido	0,10	kg/kgclínquer
Temperatura de Entrada do Vapor	375	ºC
Pressão de Entrada do Vapor	1.122,7	kPa
Temperatura de Saída do Vapor	45,8	ºC
Pressão de Saída do Vapor	10,0	kPa
Título de Saída do Vapor	0,96	%
Energia Elétrica Gerada	71,41	kJ/kgclínquer
Exergia Destruída na Turbina	16,68	kJ/kgclínquer

10.4 CONDENSADOR

O condensador é um trocador de calor responsável por transformar em líquido saturado o vapor que sai da turbina. Sua função é importante porque a geração de trabalho num ciclo Rankine está baseada exatamente no fato de que a compressão de um líquido, na bomba, consome muito menos energia do que é gerada pela expansão de vapor na turbina.

As condições de entrada do vapor no condensador são as mesmas da saída da turbina, sendo a temperatura de condensação pouco superior à ambiente para que calor seja cedido do vapor. A tabela 16 apresenta os resultados da aplicação das equações (1), (10) e (11) ao condensador.

Tabela 16: Resultados para o Condensador

Grandeza	Valor	Unidade
Vazão de Vapor	0,10	kg/kgclínquer
Temperatura de Entrada do Vapor	45,8	ºC
Pressão de Trabalho	10	kPa
Título de Entrada do Vapor	0,96	%
Exergia Destruída no Condensador	15,34	kJ/kgclínquer

10.5 BOMBA

Na bomba, o líquido saturado vindo do condensador é comprimido até a pressão de trabalho da caldeira, para onde retorna e recomeça o ciclo. Por isso, as condições de entrada da água na bomba são iguais às de saída do condensador, e as de saída da bomba são as mesmas da entrada da caldeira.

Admite-se um valor para o rendimento isoentrópico da bomba. A tabela 17 fornece os resultados calculados para a bomba com as equações (1), (7), (9), (10) e (11).

Tabela 17: Resultados para a Bomba

Grandeza	Valor	Unidade
Rendimento Isoentrópico	0,8	-
Vazão da Água Bombeada	0,10	kg/kgclínquer
Volume Específico da Água	0,001	m^3/kg
Temperatura de Entrada da Água	45,8	ºC
Pressão de Entrada da Água	10,0	kPa
Temperatura de Saída da Água	45,8	ºC
Pressão de Saída da Água	1.122,7	kPa
Energia Elétrica Consumida	0,14	kJ/kgclínquer
Exergia Destruída na Bomba	0,13	kJ/kgclínquer

10.6 RESULTADOS DA COGERAÇÃO

A figura 12 apresenta o sistema de cogeração estudado. Ela deve ser confrontada com a figura 13, que mostra o diagrama temperatura - entropia (T-s) do ciclo Rankine a vapor analisado. Cada ponto numerado no sistema corresponde ao ponto assinalado no diagrama, em que ficam evidentes as propriedades termodinâmicas para cada etapa do circuito. No diagrama, em cor cinza clara, estão representadas as linhas de título constante.

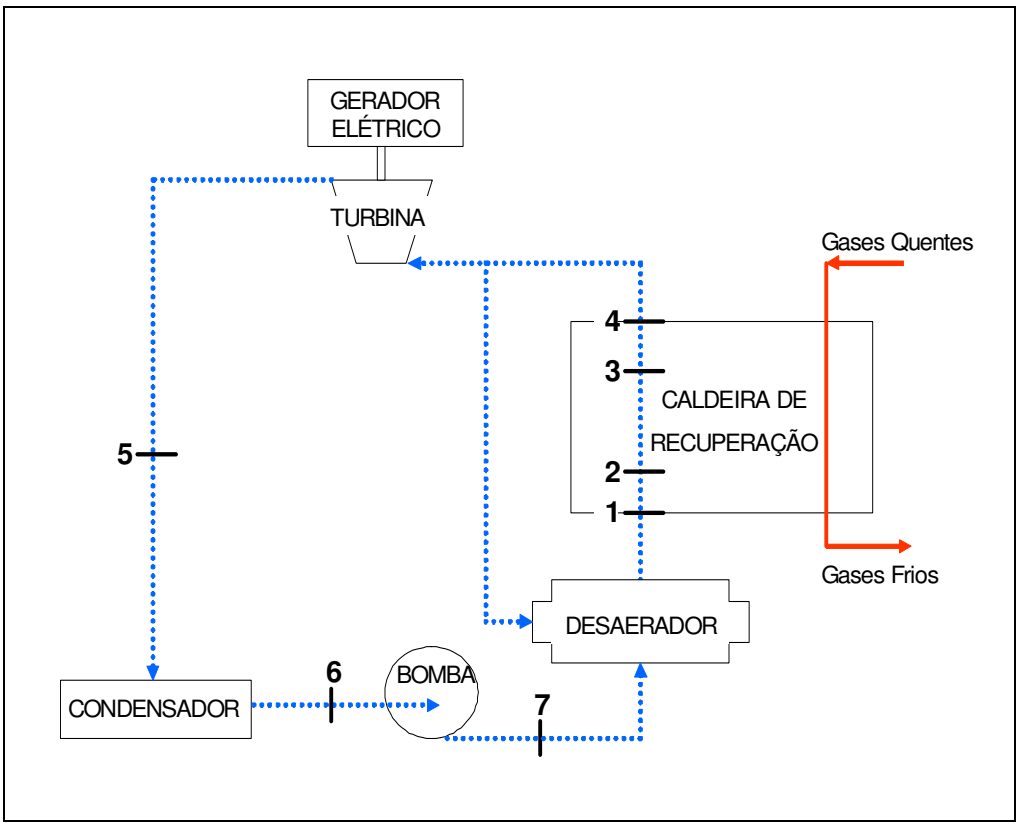

Figura 12: Circuito de vapor

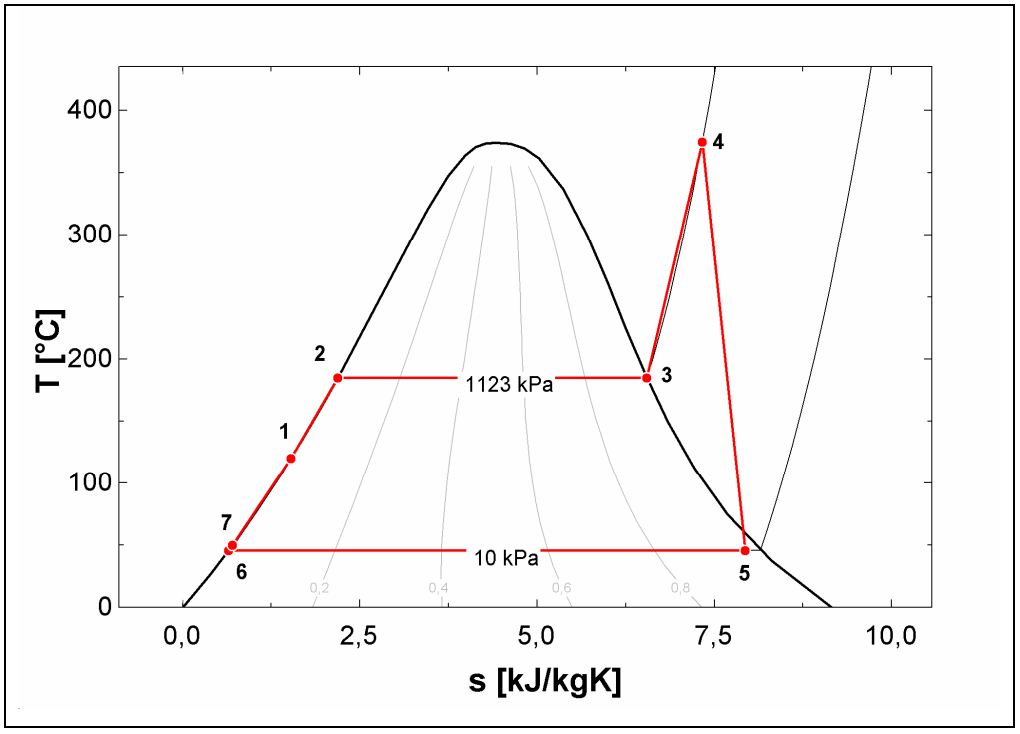

Figura 13: Diagrama T-s

Assim, o ponto **1** representa a entrada da água na caldeira de recuperação. A caldeira é responsável pela ocorrência dos processos entre o ponto **1** e o ponto **4:** no economizador, do ponto **1** ao **2**, os gases quentes aquecem a água (comparar com, a figura 10); do ponto **2** ao **3** está a região do evaporador; do ponto **3** ao **4**, está o superaquecedor.

O vapor superaquecido é expandido na turbina (pontos **4** a **5**), condensado no condensador (ponto **5** ao **6**) e bombeado pela bomba do ponto **6** ao **7**. Os pontos **6** e **7** são muito próximos, pois é pequeno o aumento de temperatura da água devido ao bombeamento.

O desaerador pré-aquece a água de alimentação da caldeira com o desvio de parte do vapor superaquecido. No desaerador, a água líquida passa do ponto **7** ao **1**, e o vapor, do **4** ao **1**.

Os pontos **7**, **1**, **2**, **3**, **4** estão na isobárica de 1227kPa. Os pontos **5** e **6** pertencem à linha de 10kPa.

A figura 14 mostra o diagrama pressão - volume específico (P-v) para o mesmo ciclo. Os pontos **1**, **7**, **2** praticamente coincidem no diagrama P-v porque a variação do volume específico da água líquida com aumento de temperatura é irrisória.

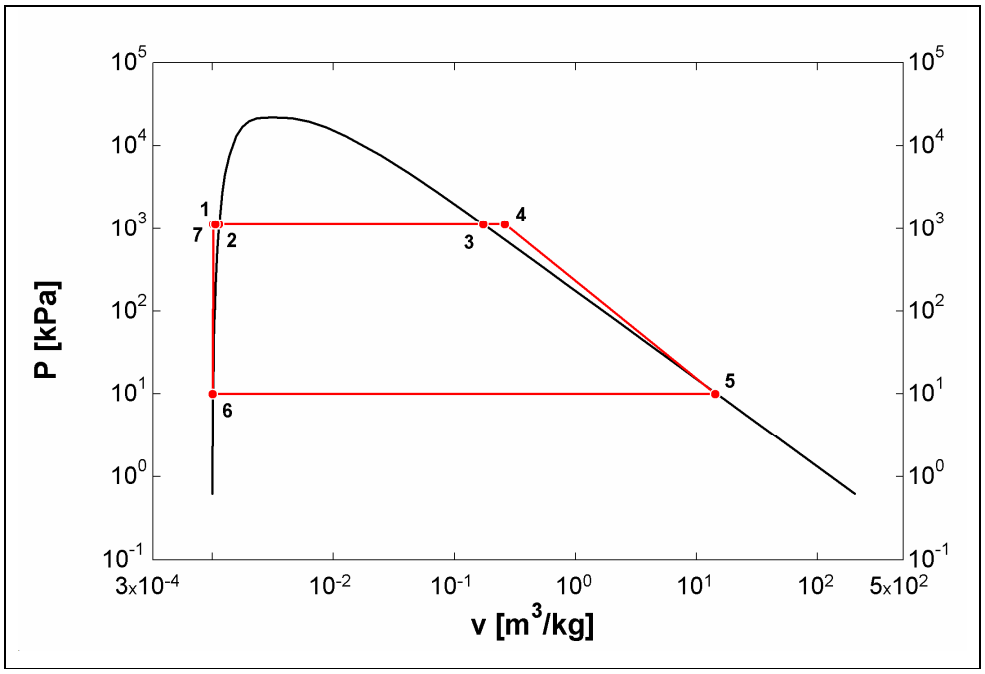

Figura 14: Diagrama P-v (escala logarítmica para a pressão)

No diagrama P-v, a energia gerada na turbina é numericamente igual à área sob a curva que une os pontos **6**, **1**, **4**, **5**. A energia consumida pela bomba corresponde à área abaixo da linha entre os pontos **5** e **6**. A energia líquida gerada é, pois, a área circunscrita entre as linhas vermelhas do diagrama P-v.

A tabela 18 resume os resultados do ciclo Rankine a vapor proposto, e apresenta ainda alguns valores importantes para a cogeração, obtidos pela aplicação das equações (15), (16) e (19).

Tabela 18: Resultados do Ciclo

Grandeza	Valor*	Valor**	Unidade
Energia Elétrica 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	%

* para equipamentos adiabáticos
** para 15% de perda de energia, relativos ao PCI, por troca de calor com o ambiente

Para a tabela 18, a energia líquida gerada é a diferença entre a energia obtida na turbina e a gasta na bomba. Os rendimentos energéticos e exergéticos são calculados considerando o calor útil como a diferença entre a demanda térmica total da fábrica e a energia residual dos gases na saída do forno (caso sem cogeração) ou da caldeira (caso com cogeração).

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 tabela 18.

11. DISCUSSÃO

Com base nos valores da tabela 18, 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%.

Tendo em mente os números calculados e os equipamentos apresentados, há possibilidade termodinâmica e viabilidade técnica para a implantação de um sistema de cogeração de energia elétrica em uma fábrica de cimento.

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 [10], 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 (tabela 11) 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), de acordo com os valores da tabela 7. 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 [17], é interessante fazer algumas análises. Segundo WADE [17], 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 à 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.

12. CONCLUSÕES

Este trabalho mostrou o projeto termodinâmico de um sistema de cogeração em uma fábrica de cimento. Foi calculado um ciclo Rankine a vapor de água. Esse ciclo permite recuperar parte da energia carregada pelos gases de escape do forno de clínquer. Os equipamentos envolvidos no ciclo foram examinados: caldeira de recuperação, desaerador, turbina, condensador e bomba.

Chegou-se a um valor potencial de energia elétrica gerada por cogeração capaz de prover cerca de metade da energia consumida na moagem de cru. Esse é um valor expressivo, que pode atrair a atenção de quem estiver interessado em reduzir o consumo de energia e diminuir os custos com combustíveis.

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, alem 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.

13. BIBLIOGRAFIA

[1] 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.

[2] Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). Guia Básico de Utilização do Cimento Portland. 7ª edição. São Paulo. 2002.

[3] BALESTIERI, José A. P. Cogeração – Geração Combinada de Eletricidade e Calor. Editora da UFSC. Florianópolis. 2002.

[4] BAUER, L. A. Falcão. Materiais de Construção. Volume 1. 4ª edição. LTC, Rio de Janeiro. 1987.

[5] BRINK JR., Joseph A. e SHREVE, A. Norris. Indústrias de Processos Químicos. 4ª edição. Guanabara.

[6] DUDA, Walter H. Cement Data Book 1. Bauverlag. Berlim. 1985.

[7] GANAPATHY, V. Waste Heat Boilers Desakbook. The Fairmont Press, distributed by Prentice-Hall. 1991.

[8] INCROPERA, Frank P. e DEWITT, David P. Fundamentos de Transferência de Calor e Massa. LTC. Rio de Janeiro, 2002.

[9] Innovations in Portland Cement Manufacturing. Portland Cement Association. 2004.

[10] LI, J., KONG, J. A Co-Generation Process for Clinker and Electricity in Portland Cement Plants, Institute of Cement – China Building Materials Academy, Beijing.

[11] LIZARRAGA, José M. S. Cogeneracion – Aspectos Termodinámicos, Tecnológicos y Econômicos. 3ª edição. Universidad del Pais Vasco. Bilbao. 1999.

[12] MIROLLI, Mark D. The Kalina Cycle for Cement Kiln Waste Heat Recovery Power Plants

[13]PETRUCCI, Eládio G. R. Materiais de Construção. 2ª edição. Globo. Porto Alegre. 1976.

[14] The Babcock & Wilson Company. Steam – It's Generation and Use. 40ª edição. Ohio. 1992.

[15] TRINKS, W.Industrial Furnaces. 6ª edição.

[16] VAN WYLEN, Gordon J., SONNTAG, Richard E., BORGNAKKE, Claus. Fundamentos da Termodinâmica. Tradução da 6ª edição americana. Edgard Blücher. São Paulo. 2003.

[17] WADE – The World Aliance for Decentralized Energy. Concrete Energy Savings – Onsite Power in the Cement Sector. Março de 2007.

[18] 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