



**Universidade Federal de Santa Maria – UFSM  
Educação a Distância da UFSM – EAD  
Universidade Aberta do Brasil – UAB**

**Curso de Pós-Graduação em Eficiência Energética Aplicada aos  
Processos Produtivos**

**Polo: Novo Hamburgo - RS**

**REAPROVEITAMENTO ENERGÉTICO DOS GASES DE  
COMBUSTÃO NO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE CIMENTO**

**Orientador: LOSEKANN, Cláudio**

**Tutor: BELTRAME, Thiago**

**Aluno: CHALEGA, Vanderlei**

**Resumo**

Diante de um cenário cada que vez mais competitivo entre as indústrias no qual se procura a redução de custo interno para ser mais competitivo no mercado, o presente trabalho tem por finalidade identificar o potencial energético através dos gases de processo da fabricação de clínquer que estão a uma temperatura acima de 250 °C e com vazões acima de 130000 m<sup>3</sup>/h e até o presente momento não são reutilizados. Para mensurar o valor energético foi realizado um estudo de caso, em que se fez medições de temperatura, vazão e pressão em várias situações do processo. Os resultados adquiridos no presente trabalho demonstram que a energia térmica não reaproveitada do sistema poderia trazer benefícios para a própria indústria e ao mesmo tempo contribuir para eficiência energética global.

**Palavras Chave:** Potencial energético, gases do processo; energia térmica.

## **ABSTRACT**

Faced with a scenario that each increasingly competitive among the industries in which it seeks to reduce internal costs to be more competitive in the market, this study aims to identify the potential energy through the process gases of the clinker manufacturing that are a temperature above 250 °C and with flow rates up to 130000 m<sup>3</sup>/h and up to the present time are not reused .To measure energy value was carried out a case study, in which they made measurements of temperature, flow and pressure in various situations of the process .The results obtained in this study show that the thermal energy not reused the system could benefit the industry itself and at the same time contribute to overall energy efficiency.

**KEYWORDS:** Energy potential, process gases; thermal energy.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 IMPORTÂNCIA E CONTEXTUALIZAÇÃO

O mundo está evoluindo a uma alta velocidade e diante desse cenário a um aumento extraordinário no consumo de energia, seja ela oriunda de um sistema renovável ou não renovável.

Segundo os dados do Balanço Energético Nacional (2013) no ano de 2012 a indústria utilizou 35,1 % da energia ofertada e o setor de transportes de carga e mobilidade das pessoas 31,3% totalizando 66,4% de todo o consumo do país.

Sabe-se que a expectativa de vida dos seres humanos vem aumentando a cada década e como isso gera a necessidade de aumentarmos a geração de produtos de bem de consumo. Outra variável que está relacionada ao aumento do consumo energético são os perfis das gerações (*X*, *Y* e *Z*), ou seja, conjunto de indivíduos nascido na mesma época que são voltados a tecnologias e fazem muitas coisas ao mesmo tempo, como por exemplo, ouvir música e assistir televisão e estão sempre buscando novas versões e nesse sentido contribui para o aumento no consumo energético e o consumo por produtos eletrônicos. Por outro lado, verifica-se que a geração *Baby Boomer* também está se adaptando as tecnologias como exemplo podemos citar utilização de microondas, máquina de lavar roupas e maior frequência na substituição de carros, a qual não era uma prática dessa geração e conseqüentemente faz com que se tem um maior consumo de energia

Para que seja possível atender a evolução populacional e a mudança de perfil de gerações se faz necessário o aumento de produção, porém, com um menor consumo energético.

Nos dias atuais vivenciamos um alto consumo de energia sem que a indústria e o cidadão demonstrem alguma preocupação. Em relação à comunidade o governo vem fazendo alguns trabalhos para que os mesmos tenham conhecimento, como exemplo o sistema de etiquetagem nos eletrodomésticos.

Já em relação a indústria, normalmente se faz a busca pela redução do consumo energético para que se tenha menor custo interno e aos mesmo tempo maior margem de lucro ou até mesmo para que seja mais competitiva no mercado.

Diante desse cenário, uma das oportunidades de melhorias é o reaproveitamento da energia “calor” no processo de fabricação de cimento.

A principal matéria-prima na fabricação do cimento é o calcário o qual é extraído das jazidas e encaminhado a britadores para que ocorra a redução na granulometria. Após essa etapa é feita a dosagem do calcário, quartzito e minérios de ferro através de balanças de alta precisão e direcionados a um moinho de bolas que tem por finalidade moer as matérias-primas e originando-se a farinha crua e sendo encaminhada ao silo. A farinha crua depois de ser seca, homogeneizada e armazenada em silo a mesma é encaminhada para a torre de ciclones onde passara pelo processo de pré-aquecimento e pré-calcinação antes de entrar no forno rotativo. No forno rotativo a farinha crua recebera aumento gradativo de temperaturas durante o seu deslocamento e ao final desse processo teremos o clínquer o qual passara por um processo de resfriamento através de insuflação de ar a temperaturas ambiente e depois encaminhado aos reservatórios. A ultima etapa da fabricação do cimento, o clínquer e adições de gesso através de balanças de alta precisão são inseridos no moinho de bolas e triturados até atingir a granulometria desejada e ao final constituindo-se o produto cimento e mais uma vez direcionado aos silos.

O forno rotativo em estudo apresenta 70 metros de comprimentos e 5,6 de diâmetro e para que se obtenha o produto clínquer se faz necessário à queima de carvão mineral como combustível. A matéria prima antes de chegar ao forno rotativo passa pela moagem de cru o qual sofre um pré-aquecimento através do “calor” que é retirado dos gases combustão oriundo do forno rotativo, dessa forma temos um primeiro “reaproveitamento de energia”. A matéria prima ao entrar no forno rotativo é cozida a temperaturas elevadas, as quais oscilam entre 1050°C a 1400°C e se obtendo o clínquer. O clínquer ao sair do forno sofre um arrefecimento “resfriamento “devido a insuflação de ar á temperatura ambiente, conseguindo-se assim uma redução de temperatura. Parte desse calor “energia” retirada do clínquer é direcionado a moagem de combustível com a finalidade de reduzir a umidade e a outra parte passa por um sistema de filtragem e lançado a atmosfera através da

chaminé, caracterizando perda de energia o qual é objeto desse estudo.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo geral**

O objetivo desse trabalho é mensurar a quantidade de energia térmica que pode ser reaproveitada durante o processo de fabricação de cimento.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Analisar o cenário atual do processo de fabricação de clínquer mensurando o valor energético dos gases de processo que não esta sendo reaproveitado.
- Sugerir formas de reutilização da energia térmica que está sendo desperdiçada.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA**

### **2.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

Atualmente, a conservação de energia é uma necessidade primordial em indústrias de pequeno, médios e grande porte e visa que as mesmas se tornem competitivas diante do cenário atual e futuro. Há um grande potencial energético resultante dos processos industriais que ainda não estão sendo reaproveitados de maneira sistêmicos dentro de parques fabris, os quais podem contribuir de maneira positiva para a redução de custos nas empresas e ao mesmo tempo ajudar na redução do consumo de energia primária, a qual, no presente momento, apresenta uma oferta bem próxima da demanda. Ao mesmo tempo estará ajudando na sustentabilidade do eco sistema.

Em conformidade com Brasil (2011), a indústria é responsável por, aproximadamente, 46% do consumo de energia elétrica, a qual deverá aumentar o seu consumo diante do crescimento do Produto Interno Bruto(PIB) estimado para os países emergentes nos próximos anos. Isso significa que será demandado um maior consumo das fontes energéticas dentro do parque fabril, sendo assim, deve-se buscar a pro atividade no que diz respeito à produtividade. Ou seja, as empresas necessitam ter uma maior eficiência na utilização das reservas primárias, para que em um futuro próximo não se passe por consequências que levariam a redução do PIB em função de não se ter energia para produzir.

De acordo com Gonçalves (2009), os países desenvolvidos apresentam um cenário diferente dos emergentes,os quais possuem um crescimento econômico acompanhado de decréscimo no consumo de energia. Esse diferencial está relacionado com a racionalização no uso e adoção de tecnologias mais eficientes. Segundo Brasil (2011a)

A preocupação mais acentuada com Eficiência Energética surgiu com os choques do petróleo de 1973-74 e 1979-81 que trouxeram a percepção de escassez deste recurso energético e forçaram a alta dos preços dos energéticos, abrindo espaço para uma série de ações voltadas à conservação e maior eficiência no uso dos seus derivados. Nesta mesma época, começou uma corrida para a diversificação da matriz energética

visando uma maior segurança no atendimento à demanda de energia, por exemplo, o Brasil com o Proálcool (BRASIL, 2011a, p. 2).

Gorla (2009) descreve o cenário da crise do petróleo, momento em que o governo brasileiro começou a desenvolver ferramentas para mitigar a eficiência energética no país. De acordo com este autor, em 1981 foi criado o Programa CONSERVE, o qual tinha por objetivo estimular a conservação e a substituição do óleo combustível consumido na indústria, em especial nos segmentos siderúrgicos, papel e celulose e cimento.

Brasil (2011) cita que em 1982 foi instituído o programa de Mobilização Energética (PME) que tinha a função de racionalizar a utilização da energia através da redução do consumo de energéticos por combustíveis alternativos.

De acordo com Gorla (2009)

No Brasil, em 1984 começaram as ações do Programa Brasileiro de Etiquetagem – PBE, coordenadas pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – Inmetro, voltado para a avaliação do desempenho de equipamentos energéticos e informação aos consumidores, com uma ampla cobertura de tipos de equipamentos e modelos etiquetados que inclui eletrodomésticos, motores elétricos, fogões e aquecedores de água a gás e coletores solares (GORLA, 2009, p. 7).

Segundo Brasil (2011):

Em 1984, o Inmetro – Instituto Brasileiro de Metrologia, Normalização e Qualidade, órgão vinculado ao Ministério da Indústria e do Comércio Exterior, implementou o Programa de Conservação de Energia Elétrica em Eletrodomésticos, tendo por objetivo promover a redução do consumo de energia em equipamentos como refrigeradores, congeladores, e condicionadores de ar domésticos. Em 1992, este programa foi renomeado, sendo a partir de então denominado Programa Brasileiro de Etiquetagem, tendo sido preservadas suas atribuições iniciais, aos quais foram agregados os requisitos de segurança e o estabelecimento de ações para a definição de índices mínimos de eficiência energética (BRASIL, 2001, p. 16).

Em conformidade com Brasil (2014), em 1985 foi instituído o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica - PROCEL, em 1990, a Comissão Interna de Conservação de Energia - CICE, tendo como premissa a fiscalização em órgão ou entidade de administração Federal a reduzir o desperdício de energia no Setor Público, em 1991, o Programa Nacional da Racionalização do Uso dos

Derivados do Petróleo e do Gás Natural – CONPET. Esse programa tem por finalidade desenvolver e integrar as ações para racionalização ao uso da energia e, ainda de acordo com Brasil (2014), em 2001, foi instituído a Lei da Eficiência Energética, nº 10.295, que é o maior marco regulatório em vigência no Brasil. Essa lei descreve a política nacional de conservação o uso racional da energia e a preservação do meio ambiente.

Mesmo com esses programas, observa-se que o resultado prático relacionado à eficiência energética não é satisfatório para crescimento sustentável do país.

### **2.1.1 Racionamento da Energia elétrica no Brasil**

De acordo com Bardelin (2004), vivenciou-se, durante o período de junho de 2001 até fevereiro de 2002, a maior crise de energia elétrica no Brasil. Isso aconteceu em decorrência de ter-se, naquele momento, uma oferta de energia inferior à demanda. Dentre as causas que levaram ao colapso na geração de energia elétrica pode-se destacar a diminuição do volume de chuva, fato que proporciona a redução dos níveis de água nos reservatórios e atraso nas obras de geração e transmissão de energia.

Segundo Ribeiro e Bassani (2011), naquele momento a nação brasileira tinha em sua matriz energética a hidráulica para a geração de energia elétrica. Porém, já se passaram mais de uma década e, no entanto, a mesma ainda é responsável por 76,9% de toda geração de energia elétrica.

Para Bardelin (2004), quando há crescimento no consumo de energia elétrica fazem-se necessários investimentos adequados para a geração dessa energia, pois com o crescimento do consumo, se não houver uma contrapartida de investimento na geração, o mercado de energia elétrica pode entrar em *déficit* de abastecimento.

De acordo com Bermann (2008), a maior parte da matriz energética do Brasil é de origem renováveis, sendo na seguinte ordem de oferta: biomassa de cana, hidráulica e eletricidade, lenha e carvão vegetal e lixívia.



### 2.1.2 Método de Reutilização de Gases

A reutilização dos gases aquecidos é muito importante dentro do processo de fabricação de cimento, as quais a cada dia esta se procurando novas fórmulas energéticas de se ganhar calor “energia” com o menor consumo de fontes energéticas, seja de fontes renováveis ou não renováveis para que ao final do processo se tenha menor consumo de combustíveis por toneladas produzidas de cimento.

De acordo com Sellitto e *et al.* (2013):

O subprocesso do forno consiste no aquecimento e tratamento térmico controlado de uma mistura de rocha calcária do tipo calcítico, com o teor de magnésio inferior a 4% e argila rica em sílica, alumínio e ferro a uma temperatura dos gases próxima a 145<sup>a</sup> ° C e da chama próxima a 2.000 ° C. O forno de clínquerização é um tubo cilíndrico, de diâmetro próximo a cinco metros e comprimento próximo a quarenta metros. No forno, o material cru se desloca em sentido oposto aos gases e se transforma em Clínquer Portland, uma material nodular, de cor escura. Antes do forno, na torre de pré-aquecimento, a umidade restante nas matérias cruas é removida e inicia a descarbonatação do calcário. (SELLITTO *et al.*, 2012, p. 2).

Segundo Silva (2013), em muitos processos, como por exemplo, os próprios gases de combustão servem para separar e arrastar o material já moído, a farinha, conduzindo-o para o sistema de separação e despoeiramento, sendo os gases expelidos para o exterior, pela chaminé, e a matéria prima conduzida ao forno para o tratamento térmico. Para que se ganhe temperatura, calor no interior do forno e na torre de pré-aquecimento é instalado um queimador na saída do forno e inserido parte de seu comprimento no interior do forno rotativo, no qual se utiliza combustíveis fósseis e resíduos.

Após as longas paradas dos fornos, de acordo com Sellitto e *et al.* (2013), usa-se óleo combustível para reaquecer o forno, pois seu alto poder calorífico permite atingir rapidamente as condições iniciais de operação. Ainda, para esse autor, as altas temperaturas, a turbulência no interior, a pressão negativa e o tempo de permanência dos gases no forno de clínquer o tornam eficiente alternativa para destruição de resíduos de difícil emprego.

O clínquer após sair do forno rotativo é direcionado ao resfriador onde recebe um arrefecimento devido à insuflação de ar à temperatura ambiente e dessa forma conseguindo uma redução significativa da sua temperatura. Parte desse calor extraído é reaproveitada para retirada de umidade do combustível sólido “carvão mineral” e uma segunda parte são direcionados ao filtro e seqüencialmente sai pela chaminé para a atmosfera (Figura 1).

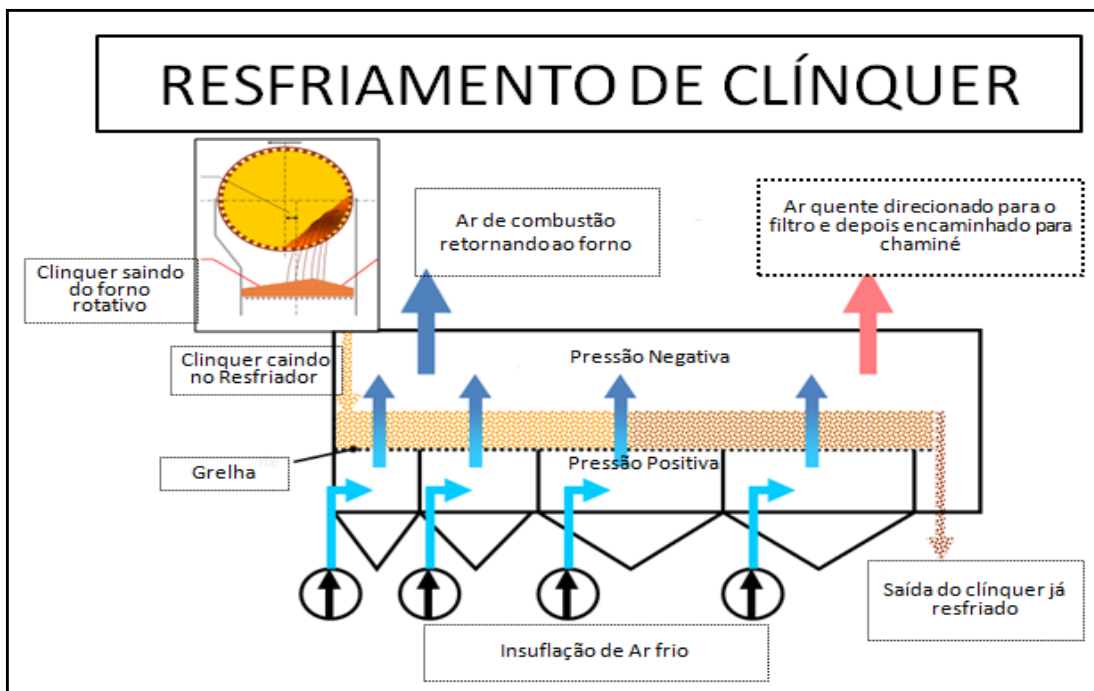


Figura 1 - Desenho representativo do forno rotativo e resfriamento do clínquer.

Em conformidade com Silva (2013), no forno rotativo do processo de fabricação de cimento existem pelo menos duas zonas, uma inicial de calcinação e outra final de sinterização. Os gases resultantes da combustão têm nestes fornos tempos de residência de 4 a 6 segundos, com temperaturas acima dos 1200 ° C e saindo pela chaminé com valores da ordem dos 150- 250 ° C.

### 2.1.3 Energia térmica, calor, potência

De acordo com Máximo e Alvarenga (1997), a energia térmica é uma forma de energia que está diretamente associada à temperatura absoluta de um sistema, e corresponde à soma das energias cinéticas microscópicas que suas partículas

constituintes possuem em virtude de seus movimentos de translação, vibração ou rotação. Assume-se um referencial inercial sob o centro de massa do sistema. Em sistemas onde há radiação térmica confinada, a energia de tal radiação também integra a energia térmica. À transferência de energia, impelida por uma diferença de temperaturas, de um sistema termodinâmico a outro, dá-se o nome de calor. Energia térmica também designa, segundo alguns autores, não a energia cinética total atrelada às partículas de um sistema, mas sim, a energia cinética média de cada uma das partículas do sistema.

Segundo Bonjorno & Cliton (2000), em nível termodinâmico e em escala atômico-molecular - sobretudo em sistemas mistos integrados por partículas de naturezas diversas - e mesmo para a definição estatística de temperatura, o que é relevante é a energia cinética média por cada grau de liberdade das partículas, e não a energia cinética média de cada uma das partículas em si. Embora a interconexão em sistemas puros seja evidente, em sistemas mistos a assim definida energia térmica certamente será diferente para partículas com naturezas e números de graus de liberdade distintos - mesmo o sistema que as encerra encontrando-se como um todo em equilíbrio térmico e à mesma temperatura.

De acordo com Máximo e Alvarenga (1997), na maioria das reações químicas espontâneas, exoenergéticas, a energia inicialmente armazenada na forma de energia potencial elétrica na distribuição eletrônica dos elétrons na estrutura dos reagentes é convertida em energia térmica armazenada nas partículas dos produtos, o que mantém a energia interna do sistema formado pelos reagentes e/ou produtos constante em obediência à lei da conservação da energia, mas leva a um considerável aumento na temperatura absoluta do sistema como um todo. Este sistema aquecido é então utilizado como a fonte quente (fonte térmica) em uma máquina térmica que tenha por função transformar energia térmica oriunda da fonte quente (calor) em trabalho. No processo uma parcela da energia térmica acaba renegada à fonte fria.

Segundo Bonjorno & Cliton (2000), o calor é a transferência de energia térmica que se dá entre dois sistemas devidos exclusivamente à diferença de temperatura entre esses sistemas ou corpos. A energia térmica e o calor medem-se

em unidades de energia: o Joule no sistema SI, ou de forma alternativa a caloria, esta última certamente mais adequada à medida de calor e não da energia térmica propriamente dita. Embora a temperatura absoluta também possa ser medida em subunidades de energia, essa é, contudo medida em kelvin.

Por definição, uma caloria é a quantidade de calor (energia) necessária para elevar-se 1 grama de água de 14,5 °C para 15,5°C. Desta forma, em termos de unidades, 1 cal = 4,19 J ou 1 cal = 0,00419 kJ

Correlacionando, calor e energia, a quantidade de calor de um sistema pode ser calculada com a equação abaixo:

$$Q_c = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad \text{Eq. 1}$$

Onde: “m” é a massa do corpo (kg), “c<sub>p</sub>” é o calor específico a pressão constante ( $\frac{kJ}{kg \cdot K}$ ) e o “ΔT” é a variação de temperatura no sistema (K). As unidades estão no Sistema Internacional de medidas.

#### **2.1.4 Calor específico**

De acordo com Máximo e Alvarenga (1997), calor específico é uma grandeza física intensiva que define a variação térmica de determinada substância ao receber determinada quantidade de calor. Também é chamado de capacidade térmica mássica. A unidade no SI é J/(kg.K) (joule por quilograma e por kelvin). Uma unidade usual bastante utilizada para calores específicos é cal/(g°C) (caloria por grama e por grau Celsius).

Segundo Bonjorno & Cliton (2000), em rigor há dois calores específicos distintos: o calor específico sob volume constante “c<sub>v</sub>” e o calor específico sob pressão constante “c<sub>p</sub>” O calor específico a pressão constante é geralmente um pouco maior do que o calor específico a volume constante, sendo a afirmação verdadeira para materiais com coeficientes de dilatação volumétricos positivos. Em virtude do aumento de volume associado à dilatação térmica, parte da energia

fornecida na forma de calor é usada para realizar trabalho contra o ambiente a pressão constante e não para aumentar a temperatura em si; o aumento de temperatura experimentado para um sistema à pressão constante é pois menor do que aquele que seria experimentado pelo mesmo sistema imposto o volume constante uma vez mantida a mesma transferência de energia na forma de calor. No caso do calor específico a volume constante, toda a energia recebida na forma de calor é utilizada para elevar a temperatura do sistema, o que faz com que “ $c_v$ ” - em virtude de sua definição - seja um pouco menor. A diferença entre os dois é particularmente importante em gases; em sólidos e líquidos sujeitos a pequenas variações de volume frente às variações de temperatura, os valores dos dois na maioria das vezes se confundem por aproximação. Em análise teórica e de precisão, contudo, é importante a diferenciação dos dois.

Materiais com dilatação anômala, como a água entre 0°C e 4°C, não obedecem à regra anterior; nestes casos o calor específico a volume constante é então um pouco maior do que o calor específico a pressão constante. Toma-se como exemplo:

O  $c_p$  do ar é 0,24 cal/g °C. No Sistema Internacional de Medidas o  $c_p$  do ar é 1,0056 kJ/kg °C. A tabela 1 abaixo mostra o calor específico de alguns gases.

Para os cálculos de energia/potência realizada por gases (ar) é necessário determinar a densidade do ar a temperatura e a pressão nos pontos de coleta de dados.

A densidade do ar seco varia com a temperatura e pressão e pode ser calculada usando a lei dos gases ideais, expressa como função da temperatura e da pressão (Wikipédia, 2014)

$$\rho = \frac{p}{R_{\text{especifico}} \cdot T} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde: “ $\rho$ ” é a densidade do ar, “ $p$ ” é a pressão absoluta e “ $T$ ” a temperatura absoluta e “ $R_{\text{especifico}}$ ” é a constante específica do ar seco.

A constante específica dos gases para o ar seco é 287,058 J/(kg·K) em unidades SI. Este valor pode variar um pouco dependendo da composição molecular do ar em um determinado local. Nas condições padrão de temperatura e pressão, conforme IUPAC -União Internacional de Química Pura e Aplicada(0 °C e 100 kPa), o ar seco tem uma densidade de 1,2754 kg/m<sup>3</sup>.

Tabela 1 - Calor específico a pressão constante de vários gases perfeitos em função da temperatura.  $c_p = c_o + c_1\theta + c_2\theta^2 + c_3\theta^3$  ( $\frac{kJ}{kgK}$ )  $\theta = \frac{T(K)}{1000}$

Gás	Fórmula	C <sub>0</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	Intervalo temperatura (K)
Acetileno	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	1,03	2,91	-1,92	0,54	250 - 1200
Água (vapor)	H <sub>2</sub> O	1,79	0,107	0,586	-0,20	250 - 1200
Amônia	NH <sub>3</sub>	1,60	1,40	1,00	-0,7	250 - 1200
Ar (atmosférico)	---	1,05	-0,365	0,85	-0,39	250 - 1200
Argônio	Ar	0,52	0	0	0	250 - 1200
Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,163	5,70	-1,906	-9,049	250 - 1200
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	0,45	1,67	-1,27	0,39	250 - 1200
Dióxido de enxofre	SO <sub>2</sub>	0,37	1,05	-0,77	0,21	250 - 1200
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,18	5,92	-2,31	0,29	250 - 1200
Etanol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	0,20	-4,65	-1,82	0,03	250 - 1200
Etileno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1,36	5,58	-3,00	0,63	250 - 1200
Hélio	He	5,193	0	0	0	250 - 1200
Hidrogênio	H <sub>2</sub>	13,46	4,6	-6,85	3,79	250 - 1200
Metano	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1,2	3,25	0,75	-0,71	250 - 1200
Metanol	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> OH	0,66	2,21	0,81	-0,89	250 - 1200
Monóxido de carbono	CO	1,10	-0,46	1,00	-0,454	250 - 1200
Neônio	Ne	1,03	0	0	0	250 - 1200
Nitrogênio	N <sub>2</sub>	1,11	-0,48	0,96	-0,42	250 - 1200
n - octano	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	-0,053	6,75	-3,67	0,775	250 - 1200
Oxido nítrico	NO	0,98	-0,031	0,325	-0,14	250 - 1200
Oxido nitroso	N <sub>2</sub> O	0,49	1,65	-1,31	0,42	250 - 1200
Oxigênio	O <sub>2</sub>	0,88	-0,0001	0,54	-0,33	250 - 1200
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	-0,096	6,95	-3,60	0,73	250 - 1200
R - 12	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	0,260	1,47	-1,25	0,36	250 - 500
R - 22	CHClF <sub>2</sub>	0,200	1,87	-1,35	0,35	250 - 500
R - 32	CF <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0,227	2,27	-0,93	0,041	250 - 500

Fonte: Adaptado de: Rodriguez (2011)

### 2.1.5 Potência

Quantidade de calor ( $Q_c$ ) é a variação da energia térmica ( $\Delta E_T$ ) e a Potência ( $P$ ) é a variação da energia dividida pelo tempo, podem-se escrever duas equações que se inter-relacionam:

$$P = \frac{\Delta E}{t} \quad \text{Eq. 3}$$

e

$$\Delta E = P \cdot t \quad \text{Eq. 4}$$

Resultando em:

$$Q_c = P \cdot t \quad \text{Eq. 5}$$

Onde: " $Q_c$ " é a Quantidade de calor, " $P$ " é a potência, " $t$ " é o tempo e  $\Delta E$  é a variação de energia que pode ser térmica, mecânica, elétrica, etc.

No SI, a unidade de potência é o W (watt), dimensionalmente igual a joule por segundo ( $J \cdot s^{-1}$ ). Ainda se usa, por motivos práticos e históricos, unidades não-oficiais como cavalo-vapor, CV (735,5W), horse-power, hp (746,6W) e outras unidades híbridas.

A quantidade de calor por unidade de tempo expressa a potência e sob esta relação serão efetuado os cálculos de energia dos gases liberados na chaminé.

### **3 METODOLOGIA**

Para determinar o valor de energia térmica não reaproveitada oriunda do processo de resfriamento de clínquer, faz-se necessário à medição em campo de temperatura, velocidade e pressão dos gases em um ponto pré-determinado na chaminé.

As medições foram feitas durante o período de (04/11/2014 á 08/11/2014) sendo que para cada dia foram feitas quatro amostragens para maior confiabilidade aos dados coletados e obedecendo a seguinte ordem de coleta.

- Medição de velocidade dos gases;
- Medição da pressão diferencial;
- Medição da temperatura dos gases.

Com o objetivo de mensurar o potencial energético dos gases de processo é importante que se faça um breve comentário dos pontos relacionados ao estudo.

- Local de estudo;
- Determinação da região de coleta;
- Determinação do ponto de coleta de dados;
- Definição dos Instrumentos utilizados para a medição de velocidade, pressão diferencial, temperatura;
- Coleta de dados;
- Demonstração do cálculo da quantidade de calor, potência e energia.

#### **3.1 LEVANTAMENTOS DE DADOS**

##### **3.1.1 Local de estudo**

O local de estudo é uma indústria de fabricação de cimento localizada no estado de São Paulo. Dentro do parque fabril da empresa estão instalados 2 fornos rotativos que tem como combustível principal o carvão mineral e 2 moagens de cimento (Figura 2).



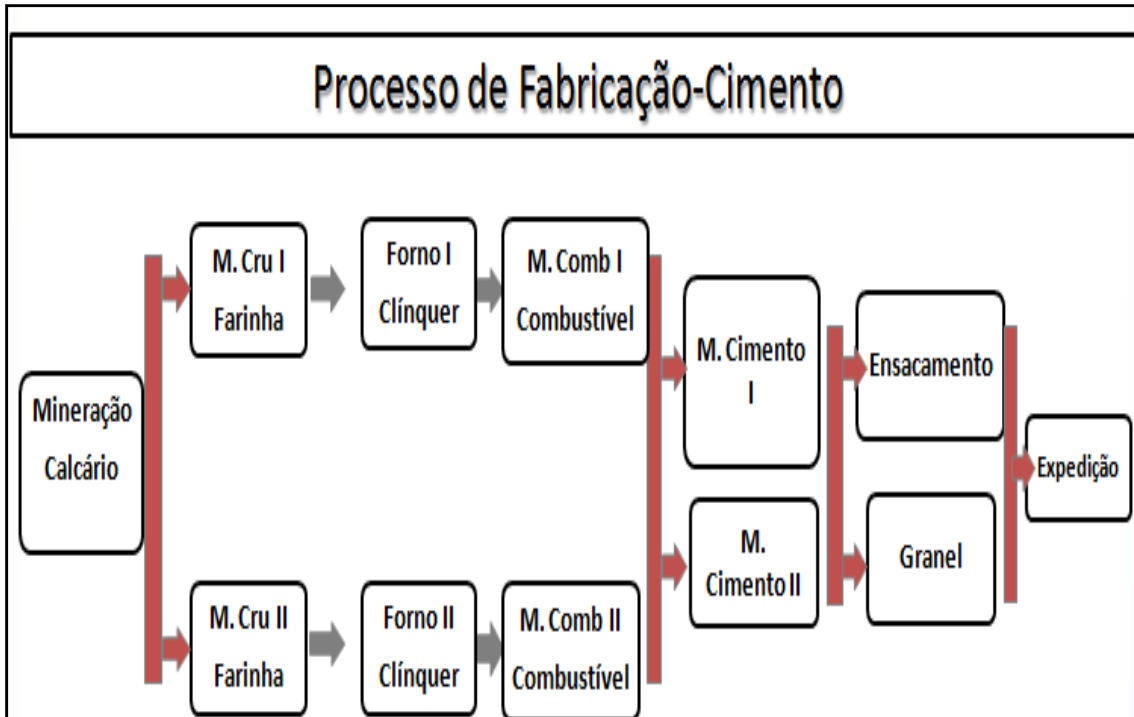


Figura 2 – Fluxo de processo na fabricação de Cimento.

O local específico de estudo é a energia térmica “gases com temperaturas acima de 250 °C oriundas do processo de fabricação do forno rotativo I, que são direcionados para atmosfera após sair do resfriador de clínquer e passar pelo filtro (Figura 3).

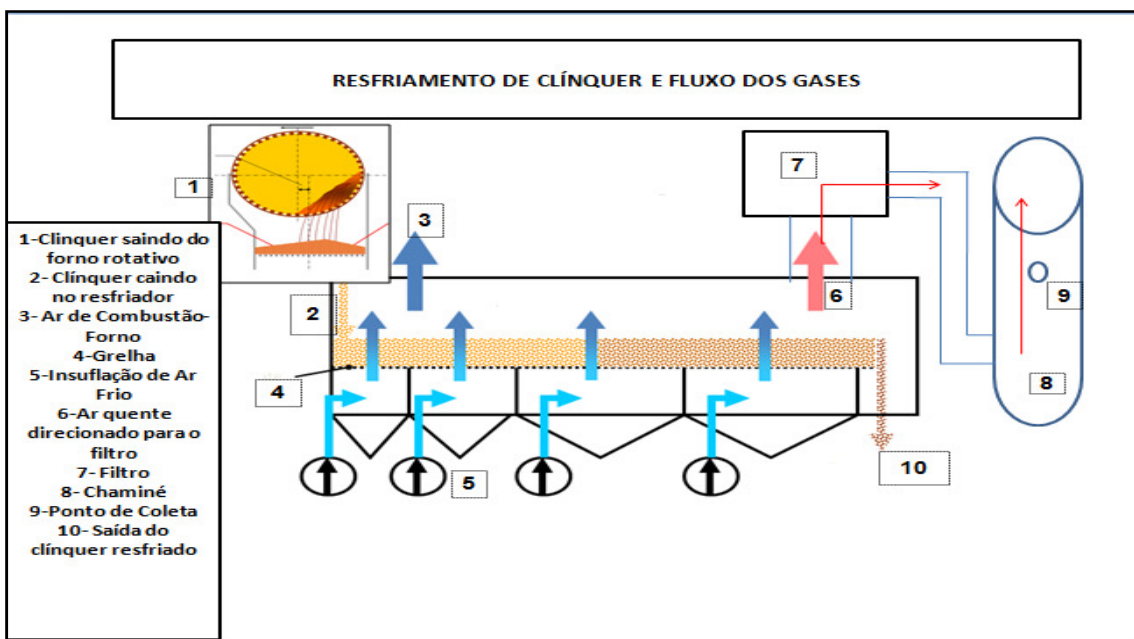


Figura 3 - Desenho representativo do forno rotativo, resfriamento do clínquer e fluxo de gases após a saída do resfriador.

O regime de produção é de 24 horas diárias durante os sete dias da semana e ocorrem duas grandes paradas “GP” para manutenção preventiva de no máximo 12 dias ao ano em meses esporádicos.

### 3.1.2 Determinação da região de coleta

Para que se possa mensurar o calor não aproveitado no sistema é necessário à medição de temperatura e velocidade dos gases. O ponto determinado para a coleta desses valores foi a chaminé localizada após o filtro. A escolha desse ponto esta associado a cuidados com os instrumentos de medições, trajeto que o gás quente faz antes de sair para a atmosfera e também por ser de fácil acesso. Conforme figura 3.

### 3.1.3 Determinação do ponto de coleta de dados.

Para que não se tenha distúrbios de fluxo causado por curvas, expansões e contrações se fazem necessário que o ponto de coleta de dados esteja situado da seguinte forma: O ponto de coleta deve ficar no mínimo 4 diâmetros internos a jusante e no mínimo 1 diâmetro a montante (Figura 4).

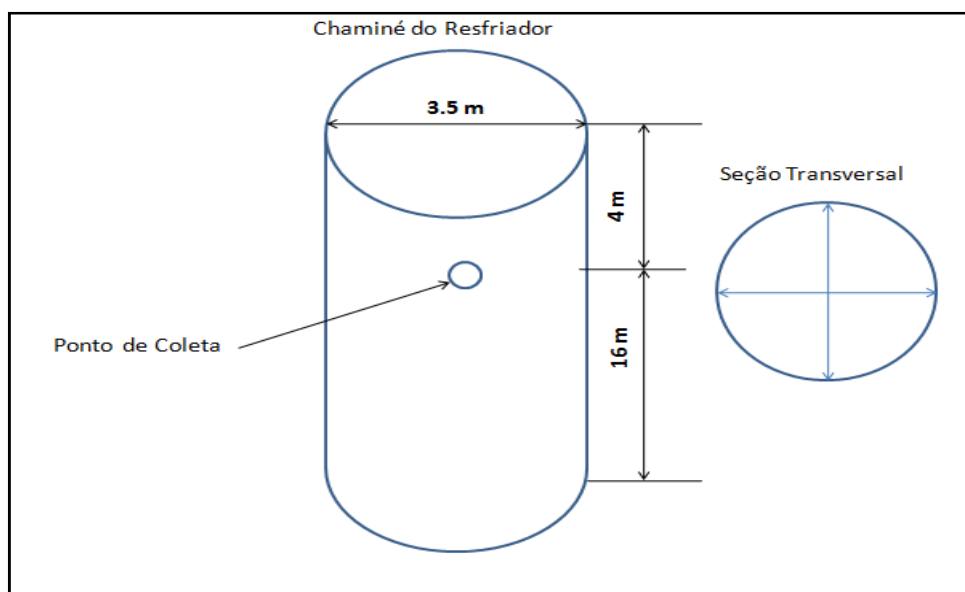


Figura 4- Desenho representativo da chaminé e ponto de monitoramento

### 3.1.4 Definição dos Instrumentos utilizados para a medição de velocidade, pressão diferencial, temperatura.

Para a coleta de dados foram utilizados os seguintes instrumentos:

a) **Tubo de pitot tipo “S”**: Utilizou-se o instrumento tubo de pitot tipo “S” para determinar a velocidade real de escoamento dos gases o qual será utilizado para encontrar-se a vazão dos gases. A instalação foi feita de acordo com (Figura 5) e o modelo utilizado (Figura 6).

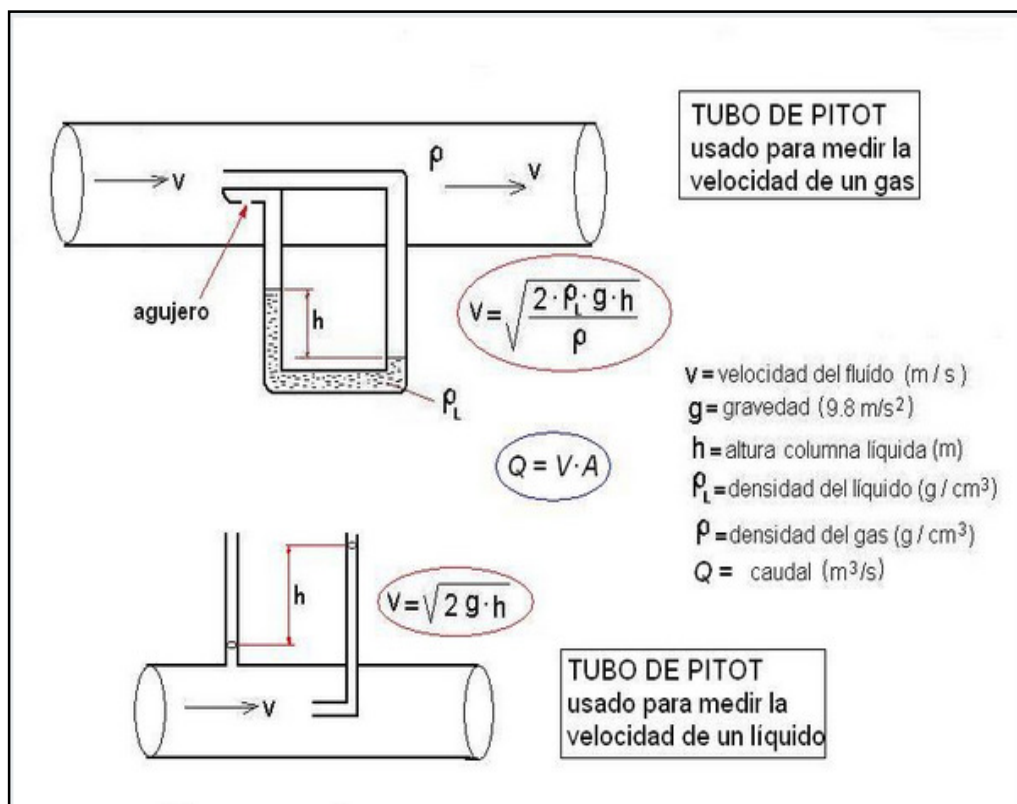


Figura 5- Desenho representativo de instalação do tubo de pitot.

Fonte: [fullmecanica.com/definiciones/t/1408-tubo-de-pitot-15915890](http://fullmecanica.com/definiciones/t/1408-tubo-de-pitot-15915890)

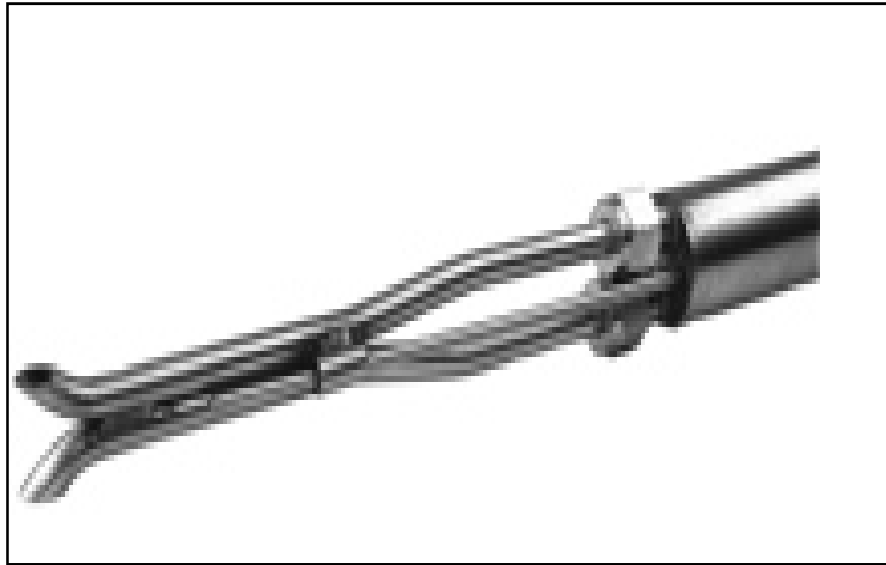


Figura 6- Tubo de pitot tipo S.

Fonte: [cleanairengineering.com/page.php?u=produit&idprod=242&lang=es](http://cleanairengineering.com/page.php?u=produit&idprod=242&lang=es).

**b) Medidor de pressão diferencial:** Instrumento utilizado para coleta de pressão do sistema no ponto pré-determinado, pois a pressão dos gases será utilizada no cálculo da densidade do Ar (Figura 7).



Figura 7 - Medidor de pressão diferencial

Fonte: [romiotto.com.br/loja.php/p-200/manometro-digital-de-pressao-diferencial-mp120-kimo](http://romiotto.com.br/loja.php/p-200/manometro-digital-de-pressao-diferencial-mp120-kimo)

**c) Termômetro de contato eletrônico:** Instrumento utilizado na coleta de temperatura dos gases e também inserido no cálculo da descoberta da densidade do AR (Figura 8).



Figura 8 - Termômetro digital

**Fonte:** [alfamare.com.br/termometro-de-contato-ika-ets-d5.html](http://alfamare.com.br/termometro-de-contato-ika-ets-d5.html)

### 3.1.5 Coleta de dados

O quadro 1 mostra os dados coletados quanto à pressão, temperatura e vazão média calculada através da velocidade dos gases medidas indiretamente pelo tubo de pitot, com suas respectivas datas de coleta.

Quadro 1 - Dados coletados.

Temperatura ambiente – 25°C			Pressão	
Medida	Temperatura (°C)	Vazão (m³/h)	(mH <sub>2</sub> O)	(Pa)
1 04/11/2014	273	136000	8	78448
	271	136110		
	270	136098		
	268	136075		
2 05/11/2014	300	145000	9	88254
	295	144980		
	303	144985		
	297	145010		
3 06/11/2014	280	138000	11	107866
	283	138553		
	285	138367		
	281	138745		
4 07/11/2014	265	131000	12	117672
	263	131085		
	265	131065		
	259	131107		
5 08/11/2014	285	132000	8	78448
	288	132010		
	286	131988		
	285	131995		

### 3.1.6 Demonstração do cálculo da quantidade de calor, potência e energia

Após a coleta dos dados em campo, com a utilização dos instrumentos citados acima, calculou-se em primeiro lugar a vazão mássica em virtude da rarefação do ar pela baixa pressão e temperatura elevada na chaminé. Toma-se para exemplificação, o primeiro dado da medição 1, do dia 4/11/2014.

Da equação 2 tem-se:  $\rho = \frac{p}{R_{\text{especifico}} \cdot T}$

$$\rho = \frac{p}{R_{\text{especifico}} \cdot T} = \frac{78448 Pa}{287,048 \frac{J}{kgK} \cdot (273,15 + 273) K} = 0,50 \frac{kg}{m^3}$$

$$\rho = 0,5 \frac{kg}{m^3} = 5 \cdot 10^{-1} \frac{kg}{m^3}$$

Pela densidade do ar a pressão de 78448Pa (8mmH<sub>2</sub>O) e temperatura de 546,15K (273 °C, que resultou em  $\rho_{ar} = 0,5 \frac{kg}{m^3} = 5 \cdot 10^{-1} \frac{kg}{m^3}$ , pode-se calcular a vazão mássica, multiplicando-se a densidade do ar à pressão e temperatura considerada pela vazão dos gases, de acordo com a equação 6.

$$\dot{m} = \rho_{ar} \cdot Vazao \quad \text{Eq. 6}$$

Assim tem-se:

$$\dot{m} = \rho_{ar} \cdot Vazao = 5 \cdot 10^{-1} \frac{kg}{m^3} \cdot 13,6 \cdot 10^4 \frac{m^3}{h} = 68000 \frac{kg}{h}$$

A potência térmica do sistema é dado por:

$$P = \dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad \text{Eq. 7}$$

Como a variação da temperatura em graus celsius é a mesma em kelvin,

Tem-se:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T = 68000 \frac{kg}{h} \cdot 1,0056 \frac{kJ}{kg^\circ C} \cdot 248^\circ C = 16958438,4 \frac{kJ}{h} = 16958438,4 \frac{kJ}{3600s} = 4.710,7kW$$

Considerando que 1J/s é igual a 1W

Logo, para estes dados, a potência térmica dos gases da combustão que passam pela chaminé é de 4710,7kW (6404,8 CV) e a energia térmica perdida na chaminé é de 4710,7kWh (4,71MWh). O mesmo procedimento foi feito para os demais dados coletados.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.

Antes e durante o processo de coleta de dados foi necessário um acompanhamento das variações que estavam ocorrendo no processo para que pudéssemos melhor usufruir dos dados coletados e conseqüentemente entendero comportamento dos gases que estavam sendo direcionados para a chaminé do resfriador.

O quadro 2 mostra a compilação dos cálculos seguindo os critérios adotados na metodologia no subcapítulo3.1.6 “Demonstração do cálculo da quantidade de calor, potência e energia”.

A média da potência e energia perdida nos 5 dias medidos foram extraídos do quadro 2 , ( Tabela 2).

	Potência (kJ/h)	Potência (CV)	Energia (kWh)
Média	20.697.256	7.816,8	5.749,2
Desvio padrão não populacional	3.326.863,1	1.256,4	924,1



Quadro 2 – Resultado da potência e energia

Temperatura ambiente = 25 (°C)		$c_p = 1,0056$	$R_{\text{específico}} = 287,048$	Densidade ar	Vazão mássica		Potência	Energia
	Temperatura	Temperatura	Vazão	$\rho$	$\dot{m}$	$\Delta T$	$\dot{Q}$	$\Delta E$
Medida	(°C)	(K)	(m³/h)	(kg/m³)	(kg/h)	(°C)	$\left(\frac{kJ}{h}\right)$	(kWh)
1  p = 78,448 kPa	273	546,15	136000	0,5004	68054,1041	248	16971931	4714,425
	271	544,15	136110	0,5022	68359,4801	246	16910604	4697,39
	270	543,15	136098	0,5032	68479,2996	245	16871382	4686,495
	268	541,15	136075	0,5050	68720,7722	243	16792663	4664,629
2  p = 88,254 kPa	300	573,15	145000	0,5364	77782,0846	275	21509858	5974,96
	295	568,15	144980	0,5411	78455,7823	270	21301686	5917,135
	303	576,15	144985	0,5336	77369,0706	278	21629050	6008,069
	297	570,15	145010	0,5393	78196,7488	272	21388625	5941,285
3  p = 107,866 kPa	280	553,15	138000	0,6793	93748,9082	255	24039845	6677,735
	283	556,15	138553	0,6757	93616,8537	258	24288406	6746,779
	285	558,15	138367	0,6733	93156,1743	260	24356241	6765,622
	281	554,15	138745	0,6781	94084,9270	256	24220621	6727,95
4  p = 117,672 kPa	265	538,15	131000	0,7618	99789,8939	240	24083692	6689,914
	263	536,15	131085	0,7646	100227,1307	238	23987640	6663,233
	265	538,15	131065	0,7618	99839,4079	240	24095642	6693,234
	259	532,15	131107	0,7703	100997,4533	234	23765751	6601,598
5  p = 78,448 kPa	285	558,15	132000	0,4896	64632,4104	260	16898531	4694,037
	288	561,15	132010	0,4870	64291,7451	263	17003418	4723,172
	286	559,15	131988	0,4888	64510,9548	261	16931648	4703,236
	285	558,15	131995	0,4896	64629,9622	260	16897891	4693,859

Durante o período de coleta de dados observou-se alterações no processo, as quais influenciam nas variáveis que se correlacionam com energia térmica final.

- Dia 04/11/2014- Forno rotativo operando com a produção nominal e apresentando estabilidade operacional no resfriador e parte do calor extraído sendo direcionado para a moagem de carvão moído conforme o projeto (produção: 188 t/h).
- Dia 05/11/2014- Forno rotativo trabalhando abaixo da produção nominal em função de queda de colagem no forno, porém, moagem de carvão moído em operação. Diante da queda de colagem do forno se faz necessário uma maior insuflação de ar frio para o resfriador e com isso, se observa uma maior energia térmica sendo direcionado para a chaminé (produção: 180 t/h).
- Dia 06/11/2014 - Forno rotativo operando de forma estabilizada, porém, devido ao silo de carvão moído estar completamente cheio o mesmo não está em operação por 3 horas e devido a esse fato observa-se que a energia térmica direcionada a chaminé é maior. Sendo que para o processo isso não é benéfico (produção: 188 t/h).
- Dia 07/11/2014- Forno rotativo estabilizado e moagem de carvão moído em operação, porém, se observa que a energia térmica direcionada para a chaminé apresenta valores inferiores a data de (05/11/2014). Esse fato pode ter relação com maior umidade no combustível coque que esta sendo queimado no forno rotativo ou até mesmo mudança no material que esta entrando no forno rotativo (produção:188 t/h).
- Dia 08/11/2014- Forno rotativo estabilizado e moagem de carvão moído em operação (produção:187 t/h).

## 5 CONCLUSÃO

Diante dos valores de energia térmica apresentado durante o período de análise é possível identificar um grande potencial térmico não sendo reaproveitados os quais podem vir a contribuir diretamente com a redução do consumo elétrico ou até mesmo térmico das seguintes formas.

Com o valor médio de energia térmico encontrado(5.749,24 kWh)poderíamos reutilizar essa energia para o aquecimento de água os quais seriam utilizados nos seguintes pontos: Refeitórios, banheiros e sistema de limpeza industrial.

Outra sugestão de reaproveitamento para essa energia térmica seria aumentar a capacidade de secagem do carvão mineral antes da entrada do mesmo no moinho, pois, o mesmo apresenta um alto valor de umidade antes e depois da moagem o qual tem influência direta no rendimento na temperatura final e de acordo com os padrões operacionais os valores de umidade estão acima do recomendado.

Também poderia reutilizar a energia térmica no processo de secagem das matérias primas ( Calcário, filito , quartzito e minério de ferro ) antes da entrada na moagem de cru.

Apenas a título de informação o consumo de energia elétrica da moagem de cru instalada nessa unidade é de 4700 kW.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

BARDELIN, Cesar Endrigo Alves. **Os efeitos do Racionamento de Energia Elétrica ocorrido no Brasil em 2001 e 2002 com ênfase no Consumo de Energia Elétrica**. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia, 2004. Disponível em: [http://www.pea.usp.br/grupos/gepea/dissertacao\\_cesarendrigo\\_gestaodeenergia.pdf](http://www.pea.usp.br/grupos/gepea/dissertacao_cesarendrigo_gestaodeenergia.pdf). Acesso em :24 de setembro de 2014.

BERMANN, Célio. **Crise Ambiental E As Energias Renováveis**. Cienc. Cult. vol.60, nº. 3. São Paulo. 2008. Disponível em: [http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0009-67252008000300010](http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252008000300010). [http://www.pea.usp.br/grupos/gepea/dissertacao\\_cesarendrigo\\_gestaodeenergia.pdf](http://www.pea.usp.br/grupos/gepea/dissertacao_cesarendrigo_gestaodeenergia.pdf) Acesso em: 24 de setembro de 2014.

BONJORNO, J. R., BONJORNO, R. A., BONJORNO, V., & CLITON, M. R.. **Física: História e Cotidiano**. Volume: Único. Editora: FTD, 2000.

BRASIL. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2020**. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2011. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/noticias/2011/SUMARIO-PDE2020.pdf>. Acesso em: 24 de setembro de 2014.

\_\_\_\_\_. **Plano Nacional de Eficiência Energética: Premissas e Diretrizes Básicas na Elaboração do Plano**. Ministério de Minas Energia. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético. Departamento de Desenvolvimento Energético. 2011a. Disponível em: [http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/noticias/2010/PNEf\\_-\\_Premissas\\_e\\_Dir.\\_Basicas.pdf](http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/noticias/2010/PNEf_-_Premissas_e_Dir._Basicas.pdf). Acesso em: 24 de setembro de 2014.

\_\_\_\_\_. **Eficiência Energética e Conservação de Energia**. Ministério do Meio Ambiente. 2014. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/clima/energia/eficiencia-energetica>. Acesso em: 24 de setembro de 2014.

\_\_\_\_\_. Empresa de Pesquisa Energética. **Balço Energético Nacional 2013 – Ano base 2012: Relatório Síntese**. Rio de Janeiro: EPE, 2013. 55 p. Disponível em: [https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final\\_2013\\_Web.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2013_Web.pdf). Acesso em: 20 de janeiro 2015.

GONÇALVES, Ricardo Franci. (coord.). **Conservação de água e energia em sistemas prediais e públicos de abastecimento de água**. Rio de Janeiro: ABES, 2009. Disponível em: [http://www.finep.gov.br/prosab/livros/prosab5\\_tema%205.pdf](http://www.finep.gov.br/prosab/livros/prosab5_tema%205.pdf). Acesso em: 24 de setembro de 2014.

GORLA, Filipe Debonzi. **Potencial técnico de conservação de energia na indústria brasileira.** Campinas, SP: [s.n.], 2009. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=000465818&fd=y>. Acesso em 24 de setembro de 2014.

MÁXIMO, Antônio; ALVARENGA, Beatriz. **Física: Curso Completo.** Editora: Scipione, 1997.

RIBEIRO, Viviane Wallen Silva de Moura e BASSANI, Christina. **A Questão da Hidrelétrica como Fonte de Energia Essencial no Modelo Atual de Sustentabilidade: O Caso De Belo Monte.** VII Congresso Nacional de Excelência em Gestão, 2011. Disponível em: [http://www.excelenciaemgestao.org/portals/2/documents/cneg7/anais/t11\\_0355\\_150\\_8.pdf](http://www.excelenciaemgestao.org/portals/2/documents/cneg7/anais/t11_0355_150_8.pdf).  
[http://www.pea.usp.br/grupos/gepea/dissertacao\\_cesarendrigo\\_gestaodeenergia.pdf](http://www.pea.usp.br/grupos/gepea/dissertacao_cesarendrigo_gestaodeenergia.pdf)  
Acesso em: 24 de setembro de 2014.

RODRIGUEZ, Oscar M. H. **Tabelas.** 2011. Disponível em: <http://www2.eesc.usp.br/netef/Oscar/Tabela1.pdf>. Acesso em: 26 de novembro de 2014.

SELLITTO, Miguel Afonso; KADEL JR, Nelson; BORCHARDT, Miriam; PEREIRA, Giancarlo Medeiros; DOMINGUES, Jeferson. **Coprocessamento de cascas de arroz e pneus inservíveis e logística reversa na fabricação de cimento.** Ambient. Soc. vol.16 nº 1. São Paulo Jan./Mar. 2013. Ambient. soc. vol.16 no.1 São Paulo Jan./Mar. 2013. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1414-753X2013000100009&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1414-753X2013000100009&script=sci_arttext).  
[http://www.pea.usp.br/grupos/gepea/dissertacao\\_cesarendrigo\\_gestaodeenergia.pdf](http://www.pea.usp.br/grupos/gepea/dissertacao_cesarendrigo_gestaodeenergia.pdf)  
Acesso em: 24 de setembro de 2014.

SILVA, Thais Aparecida Castro da. **Aproveitamento Energético.** Revista Meio Ambiente. 2013. Disponível em: <http://www.grupouninter.com.br/revistameioambiente/index.php/cadernomeioambiente/article/download/191/116>.  
[http://www.pea.usp.br/grupos/gepea/dissertacao\\_cesarendrigo\\_gestaodeenergia.pdf](http://www.pea.usp.br/grupos/gepea/dissertacao_cesarendrigo_gestaodeenergia.pdf)  
Acesso em: 24 de setembro de 2014.

WIKIPÉDIA. **Densidade do ar.** 2014. Disponível em: [http://pt.wikipedia.org/wiki/Densidade\\_do\\_ar](http://pt.wikipedia.org/wiki/Densidade_do_ar). Acesso em 12 de novembro de 2014.