

UNIVERSIDADE FEEVALE

HENRIQUE WOLF

INVESTIGAÇÃO PARA APROVEITAMENTO TÉRMICO DOS GASES DE
COMBUSTÃO EM UMA INDÚSTRIA CERÂMICA

Novo Hamburgo
2012

HENRIQUE WOLF

INVESTIGAÇÃO PARA APROVEITAMENTO TÉRMICO DOS GASES DE
COMBUSTÃO EM UMA INDÚSTRIA CERÂMICA

Trabalho de conclusão de curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Industrial Mecânica pela
Universidade Feevale

Orientadora: Angela Beatrice Dewes Moura

Novo Hamburgo
2012

HENRIQUE WOLF

Trabalho de Conclusão do Curso Engenharia Industrial Mecânica, ênfase em Gerenciamento Industrial, com título Investigação para aproveitamento térmico dos gases de combustão em uma indústria cerâmica, submetido ao corpo docente da Universidade Feevale, como requisito necessário para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Industrial Mecânica.

Aprovado por:

Prof.^a. Dr.^a Angela Beatrice Dewes Moura (Orientadora)
Universidade Feevale

Prof.^a. Dr.^a Cristina Dias Cordella
Universidade Feevale

Prof. Paulo Boccasius
Universidade Feevale

Eng. Paulo César Schmökel

Novo Hamburgo, 17 de dezembro de 2012.

“O uso adequado do conhecimento básico sobre transferência de calor no projeto de equipamento de transferência é uma arte.” (PERRY, CHILTON, 1980)

AGRADECIMENTOS

Agradeço...

...aos meus pais, familiares e pessoas queridas por todos os ensinamentos e pelo incentivo durante esses anos de trabalho.

...aos professores da Feevale pelos conhecimentos recebidos ao longo desses anos.

...a professora Angela, minha orientadora, e a Angélica, minha namorada e “co-orientadora”, pelo incentivo, apoio e orientação durante a realização desse trabalho.

...a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para a conclusão desse trabalho.

RESUMO

A sustentabilidade nas indústrias é aplicada ao desenvolvimento econômico e material, sem prejudicar o ambiente. Isso é possível quando os recursos naturais são utilizados da forma mais inteligente possível, para que estes se mantenham no futuro. Com essa visão, identificou-se na empresa Deca uma situação em que é lançada para a atmosfera uma grande quantidade de gases ainda quentes, resultantes do forno de sinterização de cerâmica. A partir desta constatação foi feito o levantamento de dados, bem como a verificação do aproveitamento desta energia para outro processo. Com esses dados foi feita a avaliação termodinâmica de viabilidade de aproveitamento deste calor. Como resultado do estudo de caso, foi verificada a insuficiência de energia para aquecimento de fluido térmico, embora, essa quantidade de calor ainda poderá ser utilizada para outros processos.

Palavras-chave: Aproveitamento de calor. Forno. Trocador de calor. Fluido térmico. Gases de combustão.

ABSTRACT

Sustainability in industries is applied to economic development and material without harming the environment. This is possible when natural resources are used in the smartest way possible so that they are still in the future. With this vision, we identified in the company Deca, a situation that is thrown into the air a large amount of hpt gases, resulting off ceramic sintering furnace. From this observation was made data collection and verification of harnessing this energy for other processes. With these data was assessed thermodynamic feasibility of harnessing this heat. As a result of the case study, there was insufficient power to heat a heat transfer fluid, although this amount of heat may still be used for other processes.

Keywords: Heat recovery. Kiln. Heat exchanger. Thermal oil. Flue gas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Trocador duplo tubo.....	20
Figura 2. Trocadores com ligação em série e em paralelo	20
Figura 3. Trocador de calor tipo duplo tubo.....	21
Figura 4. Trocador de calor tipo casco e tubo	21
Figura 5. Trocador de placas	22
Figura 6. Trocador tipo serpentina	24
Figura 7. Os elementos básicos para um forno.....	26
Figura 8. Forno com chama direta.....	27
Figura 9. Forno túnel contínuo	29
Figura 10. Diagrama de Sankey	30
Figura 11. Vista interna do forno, muflas que separam a zona de combustão e zona de queima.	42
Figura 12. Vista interna do forno, zona de queima com as câmaras de queima nos lados.....	42
Figura 13. Desenho do forno em corte.	43
Figura 14. Fotografia do aquecedor de fluido térmico.	44
Figura 15. Desenho do escoamento interno do aquecedor de fluido térmico.....	45
Figura 16. Fluxograma de fluido térmico.....	45
Figura 17. Fluxograma do processo atual.....	54
Figura 18. Fluxograma proposto.	54
Figura 19. Croqui da vista superior do forno dutos de tiragem do ar quente.	57
Figura 20. Disposição da serpentina no duto de exaustão.	58
Figura 21. Representação da área de troca de calor.	59
Figura 22. Fluxograma para aproveitamento do calor do forno no duto de saída da câmara de combustão.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Especificação dos óleos no Brasil, pela portaria ANP 80/99, de 30/04/99.	34
Tabela 2. Especificação ANP para o gás natural.....	38
Tabela 3. Dados medidos e coletados.....	50
Tabela 4. Dados tabelados do fluido térmico e gases de combustão.....	62

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Quadro de seleção de bombas EHL.....	48
--	----

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. DIAGRAMA DE MOODY.....	71
---------------------------------	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP	<i>Agência Nacional do Petróleo</i>
AFT	<i>Aquecedor de fluido térmico</i>
BTE	<i>Baixo teor de enxofre</i>
f	<i>Fator de atrito</i>
FT	<i>Fluido térmico</i>
GPL	<i>Gás liquefeito de petróleo</i>
Nu	<i>Número de Nusselt</i>
Pr	<i>Número de Prantl</i>
Re	<i>Número de Reynolds</i>
SO ₃	<i>Trióxido de enxofre</i>

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	13
1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR	16
1.1 CONDUÇÃO	16
1.2 CONVECÇÃO	17
1.3 RADIAÇÃO	18
2 TROCADORES DE CALOR.....	19
2.1 TROCADORES DE CALOR COM TUBO DUPLO	19
2.2 TROCADOR TIPO CASCO E TUBO	21
2.3 TROCADOR DE PLACAS	22
2.4 SERPENTINAS	23
3. EQUIPAMENTOS TÉRMICOS	25
3.1 FORNOS.....	25
3.1.1 Aplicação de calor	26
3.1.2 Atmosfera do forno	28
3.1.3 Forma de alimentação.....	28
4 FLUIDOS UTILIZADOS NA EMPRESA.....	31
4.1 FLUIDO TÉRMICO	31
4.2 ÓLEO COMBUSTÍVEL BTE	33
4.3 GASES DE COMBUSTÃO.....	35
4.4 GÁS NATURAL	38
5 METODOLOGIA	39
6 COLETA DE DADOS	41
6.1 FORNO HEIMSOOTH	41
6.2 VENTILADOR RADIAL	43
6.3 AQUECEDOR ATA	44
6.3.1 Corpo bipartido.....	45
6.3.2 Tubo espiral	46
6.3.3 Sistema de bombeamento	47
6.3.4 Duto de saída dos gases quentes.....	48
6.3.5 Alimentação e queimador a gás	48
6.4 MATERIAIS E MÉTODOS	49
7 DESCRIÇÃO DOS PROCESSOS E PROPOSTAS	53
7.1 ANÁLISE E AVALIAÇÃO PRELIMINAR DO TROCADOR DE CALOR	55
CONCLUSÃO	66
REFERÊNCIAS	67
ANEXO	69

INTRODUÇÃO

Nunca se falou tanto em sustentabilidade, um conceito que relaciona a continuidade dos aspectos econômicos, sociais, culturais e ambientais da humanidade (TRIGUEIRO, 2005). Da mesma forma, o conceito de sustentabilidade abrange princípios básicos de uso eficiente e não desperdício de energia. Isso significa eficiência energética, que é um dos principais meios de se assegurar a sustentabilidade do mundo industrial (PAUL WURTH, 2012).

É importante discutir o que significa o tema eficiência energética, entende-se esse termo como uma atividade que procura otimizar o uso das fontes de energia. A eficiência resume-se na procura por menor quantidade de energia para o fornecimento da mesma quantidade de valor energético. Essa preocupação iniciou-se com a crise do petróleo na década de 1970. Nessa época a preocupação com a eficiência energética se torna importante para uma pequena porcentagem da população e de governantes, mas apenas ao final da década de 1980 tornou-se uma preocupação mundial devido ao impacto causado pelas emissões de poluentes, gerados principalmente pela queima de combustíveis. O reconhecimento desta realidade leva os governantes e responsáveis pelas políticas energéticas a tentar implementar projetos dispostos a utilizar com mais eficiência os recursos disponíveis e ecologicamente corretos.

As fontes de energia convencionais se caracterizam pelo baixo custo, grande impacto ambiental e tecnologia difundida e a alternativa surge para que se consiga diminuir o impacto-ambiental. Essas fontes podem ser distintas quando faladas em energia renovável e não-renovável.

Racionalmente seria melhor fazer uso apenas da energia renovável, mas não se consegue com que todas as atividades possam continuar em andamento fazendo a substituição das fontes energéticas geradoras da produção. Por isso o único meio de se preservar a continuidade dessas produções é economizando.

As vantagens e os benefícios da economia energética estão relacionados diretamente com a maior disponibilidade de energia, pois com a economia evita-se o

desperdício e obtêm-se mais recursos para uso em outras áreas, além de proteger o meio ambiente. No meio ambiente os benefícios estão relacionados diretamente com a redução dos impactos ambientais, redução da queima de combustíveis fósseis, da emissão de gás carbônico, de compostos nitrogenados e enxofre, chuvas ácidas, efeito estufa, alagamentos, desmatamentos, radiação nuclear, aumento do nível dos oceanos, entre outros. A preocupação humana com essa redução e a atitude para que essa preocupação se transforme em fato, torna uma atitude sustentável (BUSSE, 2010; PETROBRAS, 2012).

Dessa forma, este trabalho foi desenvolvido com base nesses princípios. Identificou-se uma situação em que a empresa Deca está lançando para a atmosfera uma grande quantidade de gases ainda quentes (resultado do principal processo desenvolvido internamente). A partir desta constatação foi feito o levantamento de dados, bem como a verificação do aproveitamento desta energia para outro processo.

A empresa Duratex, divisão Deca, unidade de São Leopoldo, Rio Grande do Sul, produz cerâmica sanitária. Para tanto dispõe de dois fornos túnel contínuos, cada um com mais de cem metros de comprimento. Por estes fornos passam as peças em barbotina¹, como é chamada a massa crua, que sinterizam em temperatura de 1245°C e adquirem resistência mecânica, impermeabilidade e acabamento.

Um dos fornos, da alemã Heimsoth, que utiliza como combustível o óleo de baixo teor de enxofre, BTE, tem câmaras de combustão próprias para a queima deste combustível e evitar o contato da chama com as peças. Destas câmaras são tirados gases quentes e lançados para a atmosfera. Um exaustor, projetado para resistir a temperatura de até 500°C, transporta esses gases com velocidade de 9m/s, por um duto com 750mm de diâmetro.

O óleo combustível BTE tem alta viscosidade, característica que dificulta o bombeamento em baixas temperaturas. Para facilitar o transporte, existe um sistema de aquecimento que mantém o óleo com temperatura de 60°C, para que possa ser armazenado e facilmente bombeado para abastecimento do forno.

O sistema de aquecimento consiste em um trocador de calor tipo serpentina, alimentado com gás natural. Esse trocador está conectado a uma rede específica para transportar fluido térmico, que sai do aquecedor com 200°C, acompanhando a tubulação

¹ A barbotina é composta por argilas misturadas com água ficando em estado cremoso, ela é produzida a partir de uma mistura de argilas, caulim, filito, feldspato e quartzo, sendo que a argila entra com apenas 25% do peso da massa cerâmica crua, e deve fornecer à massa cerâmica moldada toda plasticidade e resistência mecânica.

de abastecimento de óleo BTE até os tanques de estoque, onde o fluido troca calor com o óleo combustível mantendo a temperatura sempre próxima dos 60°C.

Entendendo esse sistema, será verificada a possibilidade de aproveitar os gases quentes resultantes da queima do combustível no forno, para aquecimento do fluido térmico. Dessa forma, o objetivo principal deste trabalho é avaliar a eliminação ou redução do consumo de gás em função do aproveitamento do calor dos gases de combustão do forno de sinterização de cerâmica.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Levantamento bibliográfico sobre o tema, estudando as variáveis envolvidas no sistema de aquecimento para entender a sua relação;
- b) Realizar a coleta de dados de projeto e operação dos sistemas envolvidos;
- c) Avaliar as possibilidades de aproveitamento através de cálculos termodinâmicos.

Para alcançar o objetivo principal proposto, o presente trabalho foi dividido em sete capítulos. O primeiro capítulo versa sobre transferência de calor e os modos que esses fenômenos acontecem. No segundo capítulo são abordados os equipamentos utilizados para fazer a transferência de calor, de modo eficiente e controlado. Já o terceiro capítulo versa sobre equipamentos térmicos, onde é gerado o calor. O quarto capítulo abrange os fluidos comumente utilizados na indústria cerâmica. A metodologia é apresentada no quinto capítulo. O capítulo seis traz o levantamento de dados sobre os equipamentos envolvidos no processo e o sétimo capítulo detalha os processos, a importância de cada um e apresenta as propostas de aproveitamento de calor.

1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Se houver uma diferença de temperatura entre duas partes de um sistema, em seguida, o calor será transferido até que haja equilíbrio entre as partes (MULLINGER, JENKINS, 2008). Transferência de calor, conforme definido por Incropera (2003), é a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperatura. Essa energia só pode ser transferida através de um sistema com interações com a vizinhança, e sempre que existir uma diferença de temperatura, necessariamente, haverá transferência de calor. Para Kern (1987), a transferência de calor é a ciência que trata das taxas de troca de calor entre um corpo quente, chamado de fonte, e um corpo frio chamado de receptor. Existem três modos de transferência de calor (INCROPERA, 2003):

a) Quando existe diferença de temperatura em um meio estacionário, entre sólidos ou líquidos, é utilizado o termo **condução** para o tipo de transferência que ocorrerá entre esses meios.

b) Quando ocorrer a transferência de calor entre a superfície de um sólido e um fluido, ocorre o processo de **convecção**.

c) **Radiação** é o único que ocorre inclusive sem a necessidade de um meio que se interponha entre as duas superfícies em temperaturas diferentes, pois todo corpo emite energia em forma de ondas eletromagnéticas, trocando calor até que estejam na mesma temperatura.

Kern (1987) afirma ainda que, na maioria das aplicações na engenharia, ocorre a combinação de dois ou dos três modos de transmissão de calor. Esses processos de transferência de calor são detalhados nas próximas seções.

1.1 CONDUÇÃO

Condução é a transferência de calor de uma parte do corpo para outra parte do mesmo corpo, ou para outro que esteja em contato físico. Isso acontece em função das moléculas da região quente que induzem, pelos impactos, uma atividade crescente nas regiões adjacentes (RUSSOMANO, 1987).

Na condução em sólidos, o fluxo de calor por condução é o resultado da transferência da energia de vibração de uma molécula para outra. Entre fluidos ocorre em adição, como resultado da transferência de energia cinética. Condução também pode ser criada a partir do movimento de elétrons livres (MULLINGER, JENKINS, 2008).

Na condução, a transmissão de calor ocorre através do material fixo, tal como em uma parede estática. Este modo de transferência de calor pode ser visto como a transferência de calor das partículas mais energéticas para as partículas de menos energia, em um meio, em função da interação entre elas (INCROPERA, 2003).

Para este tipo de transmissão, é importante salientar que as condutividades térmicas dos sólidos possuem grande amplitude numérica, dependendo se o sólido é um bom condutor de calor, como um metal, por exemplo, ou péssimo condutor, denominado isolante, como, por exemplo, lã de rocha ou espuma de poliuretano. (KERN, 1987).

1.2 CONVECÇÃO

Transferência de calor por convecção é atribuível ao movimento macroscópico de um fluido e, por isso é limitada a líquidos e gases. A convecção natural surge em função das diferenças de densidade causadas pelos gradientes de temperatura no sistema (MULLINGER; JENKINS, 2008). Segundo Incropera (2003), o termo convecção é utilizado para descrever a transferência de energia entre uma superfície e um fluido em movimento sobre a superfície. Kern (1987) afirma que a transmissão de calor por convecção acontece quando há movimento de um fluido.

Esse fenômeno pode acontecer naturalmente, por diferença de massas específicas ou de forma artificial, forçada, com o objetivo de aumentar sua capacidade de troca de calor ou massa. O escoamento do fluido sobre a superfície pode ser laminar ou turbulento. Ainda segundo Incropera (2003), a definição da condição do escoamento na camada limite também influi fortemente na taxa de transferência de calor por convecção.

1.3 RADIAÇÃO

A radiação é uma forma de transmissão de calor que difere significativamente da condução e da convecção. Como principal característica da mesma, está o fato de não necessitar de um meio intermediário para sua transmissão, sendo inclusive o único mecanismo capaz de transmissão no vácuo. Interpretando Incropera (2003), a radiação térmica nada mais é do que o transporte de calor por ondas eletromagnéticas ou fótons, explicada através da teoria eletromagnética de Maxwell e pelas hipóteses de Plank². Quando um corpo é aquecido, suas moléculas são levadas a altos níveis de atividade, mas, elas tendem a voltar ao estado menor de energia, emitindo as ondas eletromagnéticas (RUSSOMANO, 1987; KERN, 1987; INCROPERA, 2003; MULLINGER, JENKINS, 2008).

A radiação é, em grande parte, resultado dos produtos gerados na combustão, especialmente do carbono na forma de fuligem. Nesse caso, a emissividade da chama é largamente dependente do teor de carbono do combustível. Muitos gases, tais como o gás natural, GLP, entre outros, têm proporções relativamente baixas de carbono e, portanto, são emissores pobres de radiação e dependem das propriedades radiativas de dióxido de carbono e vapor de água para a sua contribuição para a transferência de calor por radiação. Isso tem um efeito prejudicial sobre a transferência de calor da chama e pode afetar seriamente a eficiência do equipamento térmico, especialmente em altas temperaturas (MULLINGER; JENKINS, 2008).

O próximo capítulo detalhará os tipos trocadores de calor.

² Pesquisadores que mostraram que qualquer objeto emite radiação eletromagnética.

2 TROCADORES DE CALOR

Um trocador de calor, ou permutador de calor, é um dispositivo para transferência de calor de um meio para outro. Tem a finalidade de transferir calor de um fluido para outro, que se encontram em temperaturas diferentes. Os meios podem ser separados por uma parede sólida, tanto que eles nunca se misturam, ou podem estar em contato direto. Existem diversos tipos construtivos. Um permutador de calor é normalmente inserido num processo com a finalidade de arrefecer (resfriar) ou aquecer um determinado fluido. São amplamente utilizados em aquecedores, refrigeração, condicionamento de ar, usinas de geração de energia, plantas químicas, plantas petroquímicas, refinarias de petróleo, processamento de gás e tratamento de águas residuais (RICHTER apud KERN, 1987; SONG, 1997; INCROPERA, 2003).

Os trocadores são geralmente classificados pela sua construção e arranjo do escoamento dos fluidos. As próximas seções detalham esses diferentes tipos de trocadores de calor.

2.1 TROCADORES DE CALOR COM TUBO DUPLO

Para deduzir esse tipo de trocador, empregamos um aparelho com tubos concêntricos, conforme Figura 1. Este tipo de trocador tem como principais componentes os conjuntos de tubos concêntricos, dois tês conectores, um cabeçote de retorno e uma curva de retorno. O tubo interno é mantido no centro do tubo externo por meio de buchas de apoio. O fluido entra no tubo interno através de uma conexão rosqueada na extremidade, fora da seção do trocador. Os tês possuem conexões com rosca ou bocais que são a eles ligados a fim de permitir a entrada e saída do fluido na parte anular, que cruza de um ramo até outro através dos cabeçotes de retorno. Os dois tubos internos estão conectados por uma curva de retorno, que usualmente está exposta e não fornece uma superfície de troca de calor. (KERN, 1987)

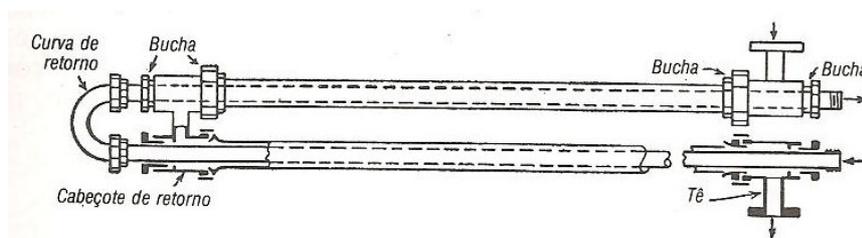


Figura 1. Trocador duplo tubo

Fonte: Kern (1987)

O trocador de duplo tubo tem grande aplicação quando pressões e/ou temperaturas operacionais são muito altas, onde nenhum outro tipo de trocador pode operar. Essa configuração de trocador geralmente é utilizada para transferência de calor entre líquido/líquido ou gás/gás, ou seja, a forma de transmissão acontece por convecção, geralmente forçada, e condução.

Para aumentar a área de troca, tubos duplos podem ser conectados em série, conforme Figura 2, ou, para aplicações que existem altas vazões, com correntes que não podem ser acomodadas em diversos trocadores em série, pode ser dividida em duas e cada metade atravessa somente um trocador através dos tubos internos.

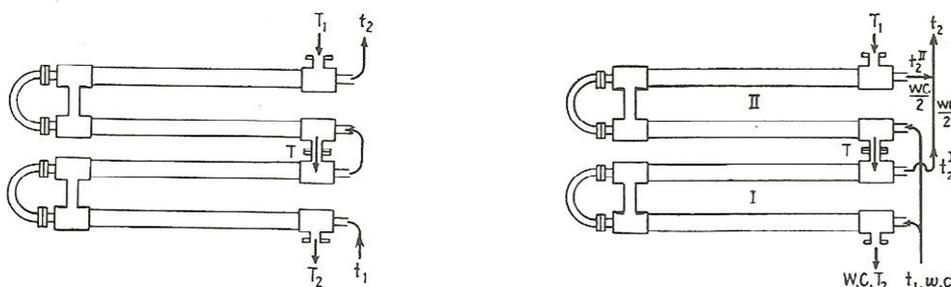


Figura 2. Trocadores com ligação em série e em paralelo

Fonte: Kern (1987)

Na Figura 3 temos um exemplo de aplicação de trocadores de duplo tubo em série. Este equipamento está instalado na empresa Deca e tem a função de aquecer a massa do processo. Neste trocador circula água quente, como fluido quente e barbotina como fluido frio ou fluido a ser aquecido (KERN, 1987).



Figura 3. Trocador de calor tipo duplo tubo
Fonte: Arquivo fotográfico Duratex S.A.

2.2 TROCADOR TIPO CASCO E TUBO

Muitas aplicações industriais requerem uma grande área de troca, o que faz com que a aplicação do trocador de tubos duplo ocupe uma área considerável. Dessa forma, podemos conseguir grandes áreas de transmissão de calor com equipamentos multitubulares fechados, que consistem em diversos tubos que passam por dentro de uma carcaça, chamados de trocador tipo casco e tubo (KERN, 1987).

A Figura 4 mostra um exemplo de configuração de um trocador tipo casco e tubo.

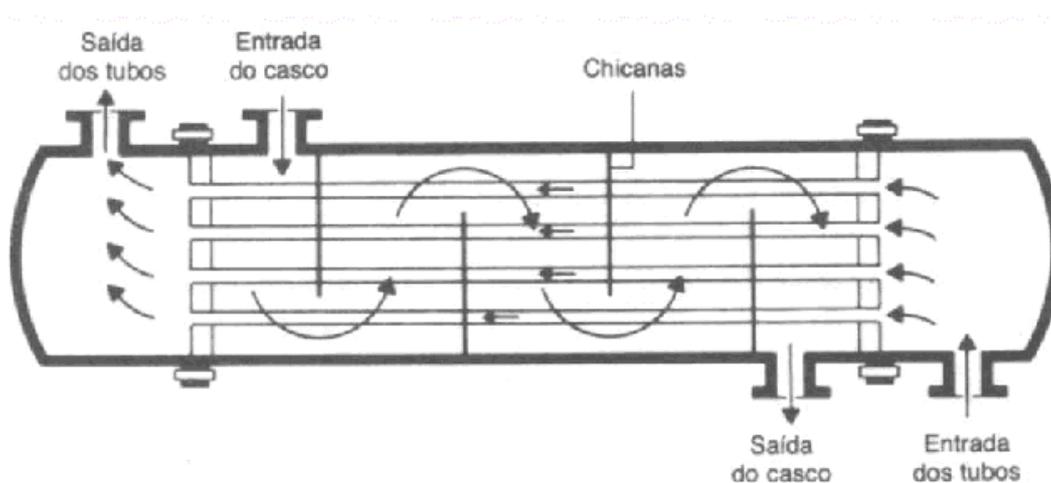


Figura 4. Trocador de calor tipo casco e tubo
Fonte: Kern (1987)

Conforme a Figura 4, os tubos atravessam o chamado espelho, onde acontece a vedação dos tubos na carcaça, para evitar vazamentos. Não menos importante que os espelhos, os tubos de troca de calor precisam ter diâmetros externos com tolerância muito restrita. Os tubos trocadores são construídos em diversos materiais e espessuras de parede, para garantir a estanqueidade do sistema e a possibilidade de desmontagem para manutenções preventivas e limpezas.

2.3 TROCADOR DE PLACAS

Outra classe de trocadores utilizados para obter uma grande área de superfície de transferência de calor são os denominados trocadores de placas, que consistem em densos arranjos de placas, conforme Figura 5.

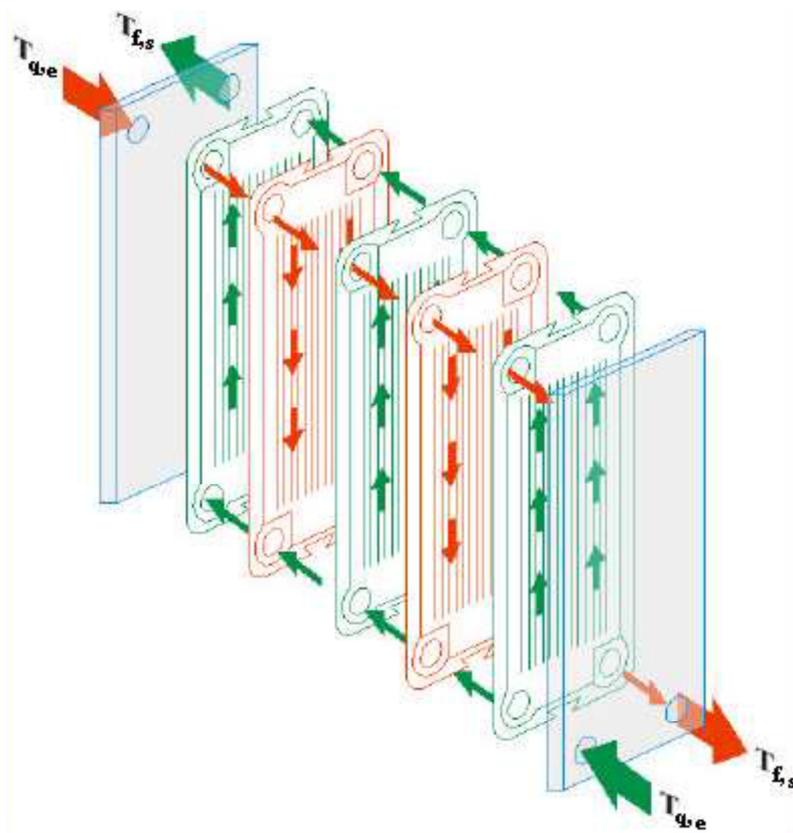


Figura 5. Trocador de placas
Fonte: Kern (1987)

Essas placas podem ser lisas, aletadas ou corrugadas. Quando aplicado em circuitos abertos, estes trocadores de calor, que utilizam passagens em "sanduíche", são normalmente do tipo vedado, permitindo desmontagem, limpeza, inspeção periódica. A maior vantagem desse tipo de trocador de calor é a possibilidade de aumentar a área de transferência simplesmente acrescentando mais placas.

Esses trocadores podem trabalhar com fluxo transversal e contrafluxo, com diversas configurações de aletas, tais como aletas retas, aletas deslocadas e as aletas onduladas.

Trocadores de calor de placas aletadas são normalmente feitos de ligas de alumínio, que proporcionam maior eficiência de transferência de calor. O material permite que o sistema funcione a baixa temperatura e reduz o peso do equipamento. Trocadores de calor de placas aletadas são usados principalmente para serviços de baixa temperatura.

As vantagens de trocadores de calor de placas e aletas são a alta eficiência de transferência de calor, a maior área de transferência de calor, além do peso, que é aproximadamente 5 vezes menor do que os de correspondentes em capacidade trocadores de calor de casco e tubos (KERN, 1987).

2.4 SERPENTINAS

Tubos em formato de serpentina são a configuração mais barata para se obter área para transmissão de calor. As serpentinas normalmente são construídas enrolando-se tubos de aço, cobre, ou ligas em forma de hélice ou espiral. As serpentinas helicoidais geralmente são instaladas em cascos cilíndricos (KERN, 1987). A Figura 6 mostra um trocador com serpentina.

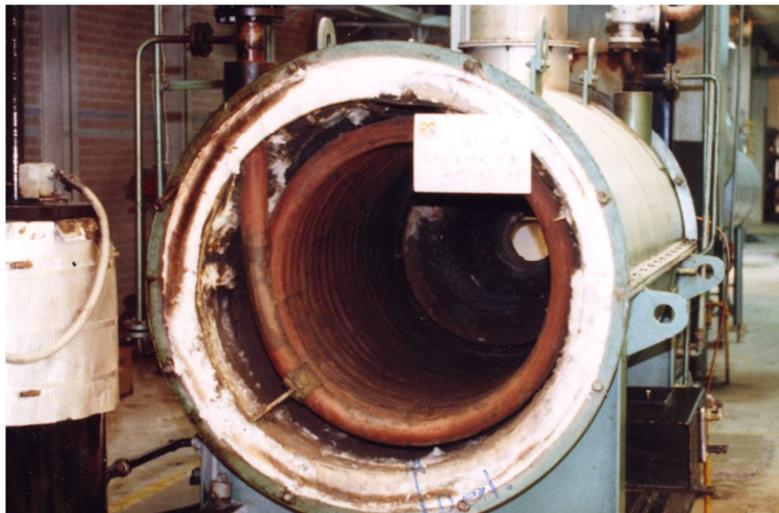


Figura 6. Trocador tipo serpentina
Fonte: Arquivo fotográfico Duratex SA (2000)

Uma vantagem das serpentinas é a turbulência causada pelo seu formato, ou seja, o coeficiente global de troca é em torno de 20% maior que em tubos retos, segundo Richter apud Kern (1987).

Os tubos em forma de serpentina têm grande aplicação para produtos em pastas ou com uma suspensão com o líquido que o transporta. Como existe a possibilidade de deposição do sólido, as pastas fluem com velocidades elevadas para que haja turbulência, e a possibilidade dos sólidos serem centrifugados numa conexão, como um joelho, por exemplo, possa ser evitada (KERN, 1987).

Para todos os tipos de trocadores apresentados, deve-se levar em consideração as propriedades dos fluidos envolvidos no processo, pois as propriedades físicas são fundamentais para o dimensionamento do sistema, como a troca térmica, a condutibilidade térmica, a densidade, a viscosidade e o calor específico. Estas influem, juntamente com as variáveis geométricas e de operação, decisivamente na eficiência de um trocador de calor (SONG, 1997).

No próximo capítulo serão vistos equipamentos que utilizam trocadores de calor.

3. EQUIPAMENTOS TÉRMICOS

Aquecedor é um termo genérico que se aplica a um equipamento que transfere calor para um fluido. Pode ser um simples trocador de calor alimentado por vapor ou um trocador aquecido por resistência elétrica, combustão ou aproveitamento de energia residual de algum processo. Este último é denominado aquecedor de recuperação. Aquecedores podem transferir calor a um líquido que pode ser um fluido que faz parte do processo de fabricação ou um fluido intermediário de transferência de calor.

Aquecedores de fluido térmico utilizam fluidos especiais como meio de transferência de calor, atendendo a uma faixa de temperatura maior que vapor a médias pressões de saturação, operando com pressões relativamente baixas (UNICAMP, 2012).

As próximas seções abordam especificamente sobre equipamentos que utilizam calor nos seus processos de trabalho.

3.1 FORNOS

A grande maioria dos produtos industrializados passa por algum processo de aquecimento. Genericamente o equipamento utilizado para esse aquecimento é denominado forno (RUSSOMANO, 1987).

Mullinger e Jenkins (2008) utilizam a definição do dicionário Oxford para forno. Eles o caracterizam como uma estrutura fechada para o aquecimento intenso de algum produto, pelo fogo. Descrevem ainda como um equipamento para a queima, ou secagem de produtos como cal ou cerâmica.

A estrutura básica de um forno é apresentada na Figura 7.

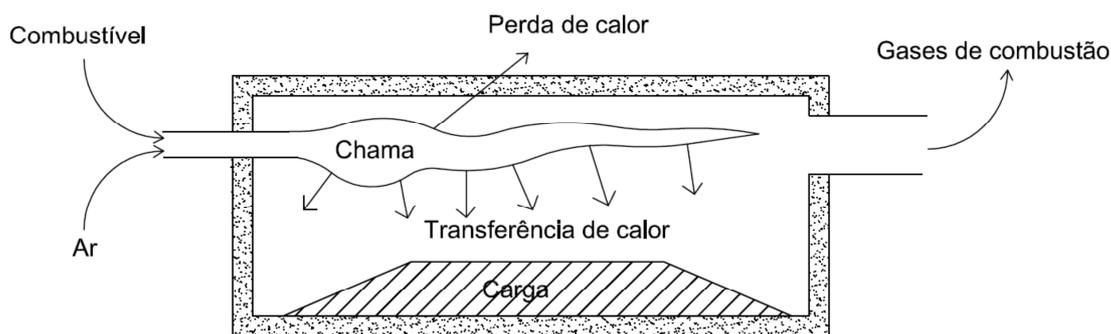


Figura 7. Os elementos básicos para um forno
Fonte: Adaptado de Mullinger, Jenkins (2008).

No forno, o calor é libertado pela combustão do combustível com o ar, ou a partir de energia elétrica, e esse calor é transferido para o produto. O calor remanescente sai com os gases de combustão, através de aberturas, como no momento do carregamento, pelas portas, ou se perde pela superfície externa (MULLINGER; JENKINS, 2008).

O calor incorporado ao produto muitas vezes é bastante pequeno quando comparado com o calor total fornecido, sendo que grande parte dele é perdido nos gases de combustão, subprodutos ou resíduos (MULLINGER; JENKINS, 2008).

Há um número quase infinito de configurações de fornos. Eles se dividem por forma, tipo de indústria e produto. Em uma classificação muito simples, com base nos conceitos de transferência de calor, eles podem ser divididos por tipo de fonte de calor ou tipo de dissipador de calor. Esta classificação é altamente simplificada, mas útil, pois a natureza do produto, o tipo de combustível e o mecanismo de transferência de calor têm uma grande influência sobre a disposição física do forno. Os fornos são classificados de acordo com quatro parâmetros: fonte de energia, forma de aplicação do calor, atmosfera do forno e forma de alimentação. Essas classificações são descritas nas próximas subseções (RUSSOMANO, 1987; MULLINGER; JENKINS, 2008).

3.1.1 Aplicação de calor

A carga a ser aquecida pode estar exposta aos gases da combustão ou protegida deste contato, para tais situações classificamos os fornos de aplicação direta ou indireta (RUSSOMANO, 1987).

Na aplicação direta, que é a forma mais comum de aplicação, a carga fica na própria câmara de combustão (fornalha), em contato direto com os gases da combustão. A Figura 8 ilustra um forno com chama direta.

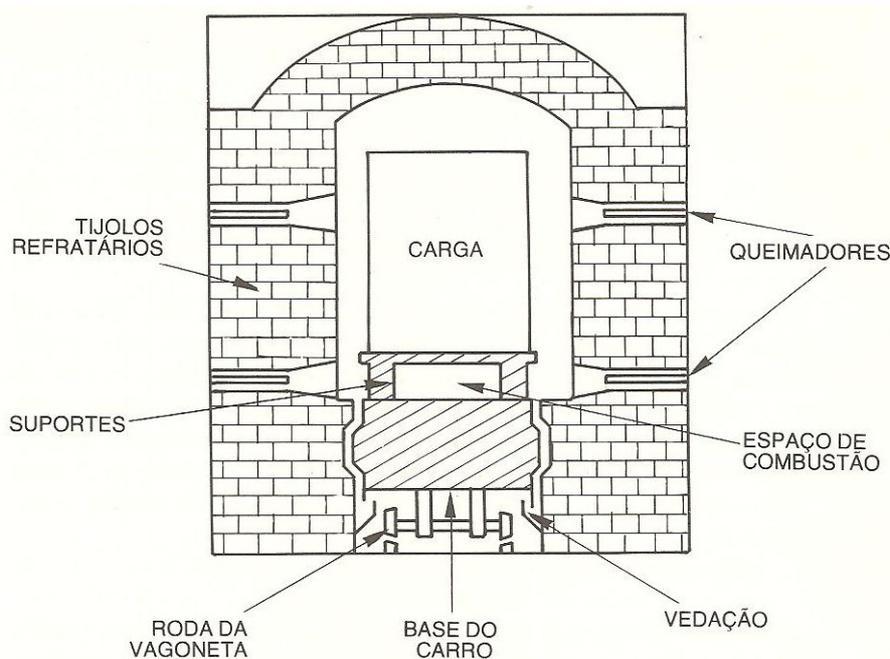


Figura 8. Forno com chama direta
Fonte: Russomano (1987)

No modelo de forno apresentado na figura anterior, a chama entra em contato com a carga. Mas, em certas aplicações industriais esse contato prejudica a qualidade das peças que serão aquecidas. Para proteger a carga, existem três esquemas básicos: canalização dos gases de combustão, carga imersa ou forno muflado.

No primeiro caso, os gases quentes da combustão, ou a chama, passam por um tubo chamado radiante, que aquecido transmite calor por radiação. No segundo caso, a carga fica imersa em um fluido, que é aquecido numa panela, onde nem ele nem a carga entram em contato com os produtos da combustão. Neste tipo de forno, a carga é aquecida por todos os lados em função do fluido, conseguindo-se assim uma distribuição do calor bastante uniforme em temperatura.

No terceiro esquema, a carga fica encerrada dentro de um recipiente refratário, denominado mufla, ou existe uma câmara própria para a combustão, onde a chama está

em contato direto ou indireto. Neste caso a transferência de calor acontece principalmente por convecção (RUSSOMANO, 1987).

3.1.2 Atmosfera do forno

As atmosferas típicas dos fornos podem conter diversos gases, que podem reagir com a carga, formando incrustações, oxidação, descarburação. Essas reações podem alterar as tolerâncias dimensionais dos produtos aquecidos. Por esse motivo, alguns processos exigem atmosferas redutoras, como é o caso do tratamento das ligas ferrosas, que precisam manter uma superfície brilhante, reduzir o óxido e aumentar o teor de carbono, por exemplo. Existem ainda situações onde a atmosfera precisa ser inerte, aplicando-se o gás argônio ou nitrogênio (RUSSOMANO, 1987).

3.1.3 Forma de alimentação

Russomano (1987) relaciona a forma de alimentação com a maneira que é carregado o material no forno, pode ser: intermitente ou contínuo.

Os fornos intermitentes, também chamados de operação por bateladas, são aqueles em que a carga é colocada dentro do forno e permanece na mesma posição até o final do ciclo e depois é novamente removida geralmente pela mesma porta que entrou (RUSSOMANO, 1987).

As cargas podem ser perfeitamente colocadas sobre bases corrediças, e depois deslocadas para dentro do forno. Com este procedimento pode-se conseguir boa economia de combustível. Dependendo do tipo de carga, ela pode ser retirada com o forno ainda quente, fazendo-se nova carga com outra base corrediça, aproveitando-se o calor do ciclo anterior.

Outro modelo são os fornos de campânula, que consistem em uma base fixa dotada de vedações e materiais refratários, além de uma campânula removível, onde está instalado o equipamento de combustão. A operação consiste em montar a carga sobre a base fixa, movimentar a campânula cobrindo o material a ser aquecido, e

aplicando-se o ciclo de aquecimento. Quando a operação estiver concluída, remove-se a campânula.

Existem ainda os fornos contínuos, onde o material é carregado e descarregado em intervalos regulares e frequentes. Uma característica deste modelo de forno é a necessidade de uma curva de temperatura, para que o material possa ser submetido a vários estágios de temperatura necessários no processo térmico. A carga se movimenta dentro do forno, em formato de túnel, e ao longo do seu comprimento existem diferentes faixas de temperatura (RUSSOMANO, 1987).

A Figura 9 mostra o funcionamento do forno túnel, contínuo, com vagonetas. Este exemplo de forno é amplamente utilizado para produção de artigos cerâmicos. As peças são carregadas sobre as chamadas vagonetas, construídas com material refratário ou isolante, que se deslocam dentro do forno, passando pelas zonas de pré-aquecimento, queima e resfriamento. A mesma figura apresenta uma curva de distribuição de temperaturas ao longo do equipamento (RUSSOMANO, 1987).

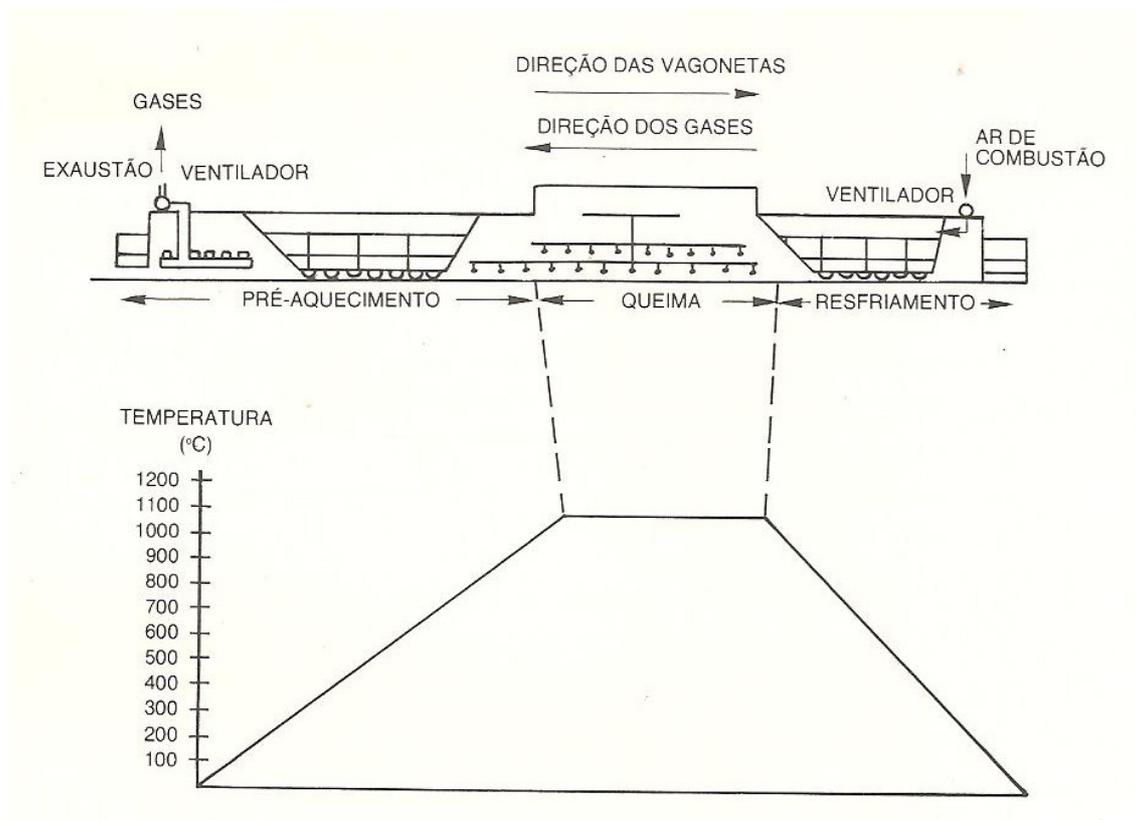


Figura 9. Forno túnel contínuo
Fonte: Russomano (1987)

Como a temperatura nos fornos é muito alta, os gases de exaustão saem muito quentes, carregando consigo uma quantidade de energia apreciável. Para aumentar a eficiência do forno, é imprescindível a recuperação deste calor para alguma finalidade útil. É sempre recomendado utilizar todas as possibilidades de aproveitar o calor no próprio sistema antes de direcionar o mesmo para outra aplicação. Pensando desta maneira, a grande maioria dos equipamentos térmicos utiliza essa energia residual para o pré-aquecimento da carga ou do ar de combustão (RUSSOMANO, 1987).

Russomano (1987) afirma que fornos podem perder de 30 a 90% do total da energia que é fornecida. Fora o calor absorvido pela carga, que é a energia que permitirá que o processo térmico aconteça, podemos pontuar as principais perdas:

- a) Calor absorvido pelas paredes, pelo teto e pela base do forno;
- b) Calor trocado com o ambiente por radiação ou convecção;
- c) Calor perdido pelas portas, durante o carregamento e descarregamento;
- d) Calor lançado para a atmosfera com os gases de exaustão. O Diagrama de Sankey, apresentado na Figura 10, quantifica as perdas de energia com relação à quantidade de energia fornecida pelo combustível.

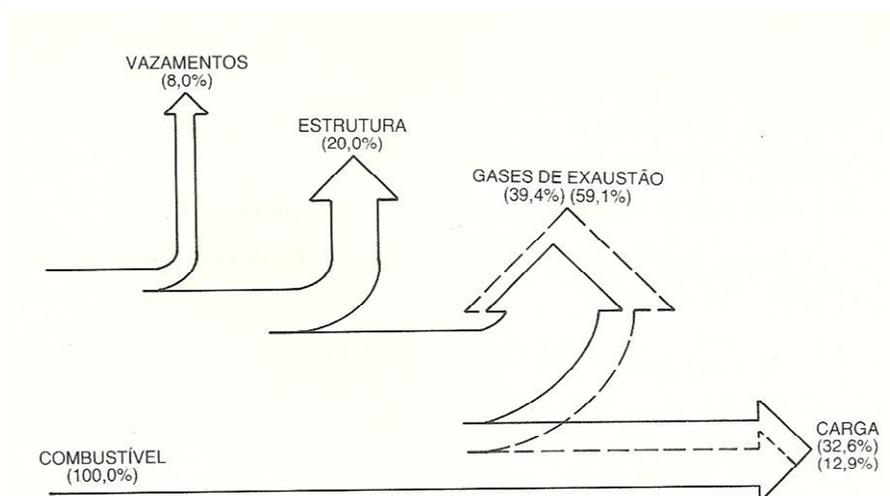


Figura 10. Diagrama de Sankey
Fonte: Russomano (1987)

O próximo capítulo apresenta os fluidos comumente utilizados em processos de fabricação de cerâmica.

4 FLUIDOS UTILIZADOS NA EMPRESA

O calor desempenha um papel extremamente importante nos processos industriais. Pode ser usado, por exemplo, na metalurgia, para facilitar a aplicação de processos mecânicos ou para tratamento térmico. Também são dignas de menção aplicações do calor, tais como secagem, fusão do vidro, queima e vitrificação de produtos cerâmicos, produção de carvão vegetal, destilação do petróleo e muitas outras (RUSSOMANO, 1987, p155).

As fontes de energia são classificadas conforme o Balanço Energético Nacional³, por este motivo a classificação utilizada neste trabalho será a mesma adotada por ele: energia primária e secundária.

Entende-se por energia primária aqueles produtos que são providos diretamente da natureza, como o petróleo, o gás natural, o carvão mineral, o urânio, as biomassas (lenha, cana-de-açúcar), a energia hidráulica, a energia solar e outros. A principal característica deste tipo de energia é a possibilidade de consumo direto, principalmente para a geração das energias secundárias, nos chamados centros de transformação (refinarias de petróleo, destilarias, hidrelétricas, usinas) (RUSSOMANO, 1987).

Desta forma, fontes de energia secundárias são aquelas em que a energia é gerada nos centros de transformação, a partir de outras formas de energia. Para este tipo de energia, podemos citar os produtos energéticos como a gasolina, o diesel, o querosene, o carvão vegetal, a eletricidade, os óleos combustíveis, entre outros (RUSSOMANO, 1987).

As próximas seções detalham cada tipo de fluidos utilizado no processo em estudo.

4.1 FLUIDO TÉRMICO

Fluidos de transferência de calor incluem água, óleos e compostos orgânicos, silicones e metais, operando geralmente na fase líquida. Aquecedores de fluido térmico são usados para transferir calor de um local a outro, especialmente onde o espaço é

³ Disponível em <www.mme.gov.br>. Acesso em: 30.nov.2012

limitado, ou existe um número grande de pontos de uso, ou onde a temperatura precisa ser controlada rigorosamente (TORREIRA, 2002).

Existem muitos processos na indústria onde é necessária a aplicação de calor para fabricação de produtos, esse calor pode ser aplicado direta ou indiretamente. Um exemplo para essa situação é o aquecimento de um fluido inflamável, com o objetivo de diminuir a viscosidade, para facilitar o seu bombeamento. Numa situação como essa não é indicado o aquecimento direto.

Casos como o citado podem ser facilmente superados com o aquecimento indireto, ou seja, um fluido específico é aquecido num gerador de calor central e bombeado, por um circuito fechado, até o local que se deseja aquecer. Este fluido aquecido transmite o calor para o fluido ou equipamento desejado e retorna para a central de aquecimento.

A possibilidade de instalar o gerador de calor longe das instalações onde se utiliza o calor, aliado ao uso de recipientes encamisados e projetados adequadamente, excluem a possibilidade de incêndio.

Os fluidos utilizados para este fim são chamados de térmicos ou fluidos para transferência de calor. Os fluidos térmicos devem ter características especiais, que os diferenciam de outros óleos, conforme classificação de Torreira (2002):

a) **Estabilidade térmica:** devem ter boa estabilidade térmica, de modo que, mesmo trabalhando por longos períodos na temperatura de regime, suas propriedades permaneçam praticamente inalteradas. Essa condição é importante, pois a decomposição do fluido pode produzir depósitos, que são isolantes, reduzindo a eficiência do sistema.

b) **Não deve atacar os componentes do sistema:** não deve oxidar os metais do qual o sistema é construído.

c) **Baixa viscosidade:** o fluido deve ter a viscosidade mais baixa possível para permanecer líquido nas menores temperaturas ambientes, facilitando o bombeamento, principalmente nas partidas a frio.

d) **Baixa volatilidade:** caso contrário, em altas temperaturas, o sistema deverá ser pressurizado, o que acrescentará certas dificuldades.

e) **Elevado calor específico:** quanto maior o calor específico maior a quantidade de calor fornecida para o sistema por unidade de volume em circulação e por unidade diferencial de temperatura.

4.2 ÓLEO COMBUSTÍVEL BTE

Vlassov (2001) define combustível como qualquer substância capaz de reagir com o oxigênio e liberar energia térmica. Mas, para que possa ser utilizada, deve estar disponível na natureza em abundância, gerar quantidade suficiente de calor para atender um processo e apresentar custo relativamente baixo ou características que torne o seu uso viável.

Os combustíveis orgânicos são divididos em naturais, ou fósseis, e em artificiais, que são obtidos por processos tecnológicos. Estes ainda são classificados segundo seu estado físico: sólido, líquido e gasoso. Estes fatores tornam os processos de consumo muito diferentes, desde transporte, armazenagem, natureza da combustão até o tipo de equipamento consumidor, que é construído em função do combustível (VLASSOV, 2001).

O petróleo é uma substância líquida natural, resultante de uma mistura mecânica de dezenas de hidrocarbonetos e é formado no subsolo por ação do tempo, pressão e temperatura. Na forma como é extraído, é inadequado para utilização industrial como combustível, pois dele podem ser extraídos diversos outros tipos de substâncias, inclusive combustíveis especiais (VLASSOV, 2001).

Os combustíveis derivados do petróleo são obtidos através da destilação do mesmo em torre de destilação atmosférica. Essa torre é assim denominada assim por trabalhar com pressão positiva muito próxima da pressão atmosférica (VLASSOV, 2001).

O petróleo bruto é aquecido e enviado para a torre de destilação. Nela é fracionado em GLP, nafta leve, nafta pesada, querosene, óleo diesel leve e óleo diesel pesado. No fundo, resta um resíduo que é novamente aquecido e enviado para outra torre de destilação, mas esta sob vácuo. O resultado deste processo é a produção de gasóleo leve e pesado de vácuo e mais um resíduo pesado, não volátil (VLASSOV, 2001).

Esse resíduo de vácuo ainda é reprocessado em uma unidade de reprocessamento de desasfaltação a solvente, que consiste em misturar o resíduo com um solvente leve, líquido e aquecido para possibilitar a extração do chamado óleo

desasfaltado. Posteriormente o óleo desasfaltado é enviado para a unidade de craqueamento catalítico fluido como base para produção de óleos combustíveis leves (VLASSOV, 2001).

Segundo Garcia (2002), em 1987 foram criadas duas denominações para óleos combustíveis no Brasil, passando a serem classificados como do grupo “A” ou grupo “B”. O grupo “A” é a classificação dada para os óleos de altos teores de enxofre, maiores que 1%, e o grupo “B” compreende a classe dos óleos com baixo teor de enxofre, com igual ou menos de 1% de enxofre na sua composição.

A legislação, que vigorou entre 1987 até 1999, subdividia os dois grupos, “A” e “B”, em nove tipos de óleos combustíveis, que diferiam apenas na viscosidade. No ano de 1999, a Agência Nacional do Petróleo (ANP), através da portaria 80, regulamento técnico 003/99, estabeleceu os requisitos para a existência de apenas quatro tipos de óleos combustíveis. Entre eles, dois com baixo teor de enxofre e dois com alto teor. Desta forma temos a Tabela 1.

Tabela 1. Especificação dos óleos no Brasil, pela portaria ANP 80/99, de 30/04/99.

Característica	Unidade	Tipo A1	Tipo A2	Tipo B1	Tipo B2
Viscosidade cinemática a 60°C	mm ² /s	620	960	620	960
Viscosidade SSF a 50°C	SSF	600	900	600	900
Enxofre, máx.	% massa	2,5	2,5	1,0	1,0
Água e sedimentos, máx.	% volume	2,0	2,0	2,0	2,0
Ponto de Fulgor	°C	66	66	66	66

Fonte: Garcia (2002)

O teor de água e sedimentos nos óleos é limitado pela ANP, e essa quantidade deve ser abatida da quantidade fornecida para o consumidor.

Os óleos com alto teor de enxofre têm menor custo que os tipos com baixo teor de enxofre, o que leva as empresas a consumirem o tipo “B” apenas para atendimento de legislação ambiental ou por variáveis incontornáveis no processo. Além disso, outro fator que influencia no preço é a sua viscosidade. Quanto mais viscoso, mais barato ele será. Isso se deve à necessidade de adicionar um diluente para torna-lo mais fluido, que

geralmente é o óleo diesel, que tem um custo muito superior ao de qualquer óleo combustível (UFMG, 2012).

4.3 GASES DE COMBUSTÃO

Durante a combustão de qualquer combustível orgânico possivelmente serão formados poluentes como: materiais particulados, óxidos de enxofre, monóxidos de carbono e dióxido de carbono e óxidos de nitrogênio (GARCIA, 2002).

A quantidade destes poluentes dependerá do tipo de combustível utilizado, do equipamento e seu estado de conservação, da qualidade da queima e da condição de operação (GARCIA, 2002).

A seguir serão detalhados os mecanismos de formação dos poluentes apresentados.

4.4.1 Materiais particulados

São chamados de materiais particulados, a fumaça, a fuligem e as cinzas resultantes da queima de combustíveis orgânicos. A fuligem é composta por pequenas partículas de carbono e de material carbonoso, parcialmente oxidado, isoladas ou impregnadas de cinzas resultantes da completa queima do restante do combustível. O carbono particulado existente na fuligem é resultante do craqueamento térmico do combustível, que não teve oxigênio ou tempo suficientes para completar a queima. Essa fuligem é chamada de fumaça preta (GARCIA, 2002).

Já a chamada de “fumaça branca” é formada por gotículas de hidrocarbonetos, ou por outros produtos químicos voláteis, que não queimaram (GARCIA, 2002).

As composições do óleo, a geometria dos queimadores, das fornalhas e da distribuição de ar influenciam diretamente na composição final e na forma da fuligem. Pode-se dizer que 90% a 98% da composição é de carbono, oxigênio e principalmente de hidrogênio (GARCIA, 2002).

As cinzas são os resíduos inorgânicos que restaram da queima completa do combustível. Dessa forma, os componentes mais comuns das cinzas de óleos derivados do petróleo são: sódio, vanádio, sílica, magnésio, níquel, cálcio, ferro e cobre. O sódio pode ter origem tanto do sal contido no petróleo como da soda, que é injetada no processo de destilação para controlar a corrosão dos equipamentos. Tendo em vista o controle na poluição, é importante citar a presença do vanádio, que catalisa a formação de óxido de enxofre. Além deste metal, existe a preocupação com o níquel, pois o seu óxido é cancerígeno (GARCIA, 2002).

Ainda existe o particulado, chamado de “fuligem ácida”, que é resultado da mistura de cinzas e ácido sulfúrico que condensa nas paredes dos dutos de saída dos gases, corroendo os mesmos. Essa fuligem, ao cair nas proximidades do equipamento, tem efeito altamente corrosivo na superfície onde se deposita. A maneira mais prática de se evitar essa fuligem é evitar que a temperatura dos gases de chaminé seja menor que a temperatura de orvalho do ácido sulfúrico (GARCIA, 2002).

4.4.2 Monóxido de carbono

O monóxido de carbono é um gás incolor e sem cheiro, formado na combustão incompleta de qualquer material com carbono em sua composição. Este gás é altamente venenoso, reage com a hemoglobina das hemácias do sangue, tornando a hemoglobina incapaz de capturar o oxigênio e realizar a troca oxigênio *versus* gás carbônico nos pulmões (GARCIA, 2002).

As concentrações de monóxido de carbono nos gases de combustão dependem da temperatura desses gases e da falta de ar na combustão, que elevam os percentuais em certas temperaturas (GARCIA, 2002).

O dióxido de carbono é convertido a partir do monóxido, na zona de pós-chama, e a velocidade desta reação influencia na concentração final de ambos (GARCIA, 2002).

4.4.3 Óxidos de nitrogênio

Os óxidos de nitrogênio são formados durante a queima a partir do nitrogênio do ar e do nitrogênio contido em alguns combustíveis. Por esse motivo, mesmo combustíveis livres de compostos nitrogenados, como o gás natural, GLP e gasolina formam óxido de nitrogênio ao serem queimados. Nos óleos mais pesados e carvões minerais, geralmente, a conversão do nitrogênio orgânico para o óxido é menor do que 50%. Já para derivados do xisto, onde a concentração de nitrogênio é muito alta, a emissão do óxido também é muito alta (GARCIA, 2002).

A emissão deste poluente gera diversos inconvenientes na atmosfera, o maior deles é a formação de ácido nítrico, que, juntamente com o ácido sulfúrico, causa corrosão de metais, mármore e outras pedras, além da chuva ácida que degrada florestas e contamina lagos e rios, a ponto impedir a vida de peixes (GARCIA, 2002).

4.4.4 Óxido de enxofre

O enxofre é um dos piores poluentes existentes nos combustíveis, devido à corrosão que ele causa, à formação de chuva ácida e aos problemas respiratórios causados na população.

Durante a combustão, o enxofre é rapidamente convertido em dióxido de enxofre ou transformado em SO_3 pela ação catalítica do pentóxido de vanádio, presente das cinzas resultantes da combustão dos óleos minerais pesados e carvões minerais. O SO_3 , ao encontrar a água resultante da combustão do hidrogênio ou a água contida na atmosfera, reage formando o ácido sulfúrico. Assim como os demais poluentes, o óxido de enxofre é muito agressivo para a saúde humana, dos animais e das plantas (GARCIA, 2002).

4.4 GÁS NATURAL

O gás natural é composto por metano, com uma proporção entre 80% e 90%, etano, com 5% a 10%, e outros gases em menores proporções, como o propano, butanos, pentanos, hexanos, gás carbônico, nitrogênio e outros gases raros (GARCIA, 2002).

A ANP, especifica o gás natural para o uso combustível geral pela portaria 41/98, de 15/04/1998, conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2. Especificação ANP para o gás natural

Características	Unidade	Grupos		
		Baixo	Médio	Alto
Poder calorífico superior	Kcal/m ³	8000 a 9000	8000 a 10200	10000 a 12500
Densidade relativa ao ar	-	0,54 a 0,6	0,54 a 0,6	0,54 a 0,6
Gás sulfídrico (H ₂ S), máx.	mg/m ³	20	20	20
Enxofre, máx.	mg/m ³	80	80	80
Dióxido de carbono (CO ₂), máx.	% volume	2	2	2
Inertes, máx.	% volume	4	4	4
Oxigênio, máx.	% volume	0,5	0,5	0,5
Ponto de orvalho de água	°C	-45	-45	-45

Fonte: Garcia (2002)

O gás natural pode ou não ocorrer associado com o petróleo. Quando ocorre junto ao petróleo, ele é produzido como decorrência da produção do petróleo, pode ser enviado para o gasoduto de transporte e distribuído para o consumidor. Quando redirecionado para o campo petrolífero, serve para manter a pressão do reservatório e assim melhorar a recuperação do óleo do campo. Pode ainda ser usado no próprio processo de extração para geração de vapor e eletricidade, necessários, por exemplo, nas plataformas marítimas e, pode até mesmo, ser queimado nos campos de extração por não haver gasoduto para transporte.

Entendendo as vantagens dos combustíveis gasosos, podemos pontuar a ausência de cinzas, a facilidade de transporte, a fácil mistura com o oxigênio, a facilidade de controle e a manutenção dos equipamentos (geralmente mais compactos), entre outras (GARCIA, 2002).

No próximo capítulo será abordado o aproveitamento de calor na indústria, um assunto que está cada vez mais recebendo a devida atenção, visto que isso gera economia para a empresa e benefícios para o ambiente.

5 METODOLOGIA

O estudo aqui proposto consiste em uma pesquisa exploratória descritiva realizada por meio de pesquisa bibliográfica, documental e de estudo de caso. O objetivo é verificar a viabilidade de utilização dos gases quentes da exaustão do forno Heimsoth para aquecimento do fluido térmico.

Pesquisas exploratórias, conforme Gil (2006), têm como finalidade principal desenvolver, esclarecer e modificar conceitos e ideias, permitindo a formulação de problemas mais precisos. Gil (2006) e Prodanov e Freitas (2009) destacam ainda que este tipo de pesquisa envolve levantamento bibliográfico, entrevistas com pessoas que tiveram experiências práticas com o problema pesquisado e a análise de exemplos que estimulem a compreensão.

A revisão bibliográfica, ou pesquisa bibliográfica, será “elaborada a partir de material já publicado, constituído principalmente de: livros, revistas, publicações em periódicos e artigos científicos” (PRODANOV; FREITAS, 2009, p. 68). “A principal vantagem desse tipo de pesquisa é o fato dela permitir ao investigador a cobertura de uma gama muito mais ampla do que aquela que se poderia pesquisar diretamente” (GIL, 2006, p. 46).

As pesquisas documentais se diferenciam de pesquisas bibliográficas pela natureza das fontes, pois se baseiam em materiais que não receberam um tratamento analítico ou que não podem ser reelaborados de acordo com os objetivos da pesquisa (GIL, 2006). No caso do presente estudo, os manuais do forno Heimsoth e aquecedor de fluido térmico serão tidos como documentos, pois eles existem de forma independente a pesquisa.

Finalmente, o estudo de caso envolve o estudo profundo e exaustivo de um ou de poucos objetos, que permite o seu amplo e detalhado conhecimento (PRODANOV; FREITAS, 2009). É considerado uma investigação empírica e um método qualitativo que “investiga um fenômeno contemporâneo em profundidade e em seu contexto de vida real, especialmente quando os limites entre o fenômeno e o contexto não são claramente evidentes” (YIN, 2010, p. 39).

De acordo com Gil (2006), o estudo de caso, em termos de coleta de dados, é o mais completo de todos os delineamentos, pois se vale tanto de dados originados por pessoas quanto de dados vindos do papel.

Yin (2010) complementa, afirmando que a investigação do estudo de caso é tecnicamente diferenciada, pois existem muito mais variáveis de interesse do que pontos de dados. Os resultados, por um lado, contam com múltiplas fontes de evidências, com dados que precisam convergir de maneira triangular e, por outro lado, beneficiam-se do desenvolvimento das proposições teóricas para orientar a coleta e a análise de dados (YIN, 2010). Gil (2006) afirma ainda que os resultados obtidos em estudos de caso devem ser provenientes da convergência ou da divergência dos dados obtidos com os diferentes procedimentos da pesquisa, conferindo validade ao estudo.

O que chamamos de calor residual, ou calor remanescente do processo, pode garantir grande retorno de investimento e redução no custo de operação de processos industriais. A recuperação de calor residual nos fornos é muito interessante, pois geralmente os gases saem muito quentes, ou seja, com uma quantidade apreciável de energia. Assim, o aumento da eficiência térmica torna indispensável a recuperação deste calor, utilizando-o para alguma finalidade útil (RUSSOMANO, 1987).

A recuperação de calor pode ser feita com dois objetivos: para utilização no próprio sistema, para pré-aquecimento do ar de combustão ou da carga do forno, ou para outros sistemas, seja para gerar vapor, reutilizar em um secador, numa turbina de eletricidade ou aquecer algum fluido térmico. Deve-se tomar o cuidado ao reaproveitar os gases de exaustão quando o combustível tem enxofre em sua composição, pois pode acarretar em entupimento pela poeira ou óxido em enxofre, além de aumentar a corrosão do equipamento (RUSSOMANO, 1987).

O próximo capítulo apresenta a coleta de dados feita na empresa, envolvendo todos os equipamentos que fazem parte do estudo apresentado neste trabalho.

6 COLETA DE DADOS

Nos próximos itens serão relacionados os equipamentos envolvidos no processo, suas características, dados técnicos e dados de operação.

6.1 FORNO HEIMSOOTH

Forno túnel contínuo, muflado, com chama indireta, construído em 1975, na antiga unidade de Louças Sul, adquirida posteriormente pela Duratex S.A. para se tornar mais uma unidade produtora de louças Deca.

O equipamento é da marca alemã Karl August Heimsoth, possui 108 metros de comprimento, com ciclos de trabalho (tempo que as peças passam dentro do forno) de aproximadamente 14 horas. Possui 20 motores elétricos, entre titulares e reservas, 6 ventiladores e 7 exaustores. Sua capacidade representa 40% da produção da unidade, ou seja, produz 50.000 produtos de cerâmica por mês, em média.

Este forno é alimentado com óleo combustível BTE, baixo teor de enxofre (máximo 1% em massa), consumindo 5.000 litros de combustível por dia, por seus 32 queimadores. A chama dos mesmos não pode entrar em contato com as peças em cerâmica, pois ocorreria contaminação em função do resíduo que é gerado na queima do óleo.

Para evitar a contaminação, o forno possui duas câmaras de combustão, onde acontece a queima do óleo combustível. Para que a queima aconteça, o queimador injeta o óleo e ar aquecido. A chama é direcionada contra a mufla, que é uma placa em mulita, material cerâmico de alta condutividade térmica e resistência a altas temperaturas, em torno de 1800°C. Estas placas conduzem o calor das chamas para o interior do forno para aquecer as peças.

Na Figura 11 e na Figura 12, podem ser vistas as muflas, fechando a câmara de combustão. Estas fotografias foram tiradas depois de uma reforma, que aconteceu pela última vez no ano de 1998, desde lá o forno não foi mais parado para reformas, trabalhando ininterruptamente. Fornos contínuos têm essa característica, por isso deve

haver uma forte manutenção preventiva, pois os períodos entre paradas geralmente são longos.



Figura 11. Vista interna do forno, muflas que separam a zona de combustão e zona de queima.
Fonte: Arquivo fotográfico Duratex S.A. (1998)



Figura 12. Vista interna do forno, zona de queima com as câmaras de queima nos lados.
Fonte: Arquivo fotográfico Duratex S.A. (1998)

A Figura 13 mostra o forno em corte, como construído, sendo possível identificar a câmara de combustão, de onde são tirados os gases quentes, a zona de queima, que é a parte interna do forno onde as peças atingem o *set point* de 1.245°C e a sinterização das peças fica completa.

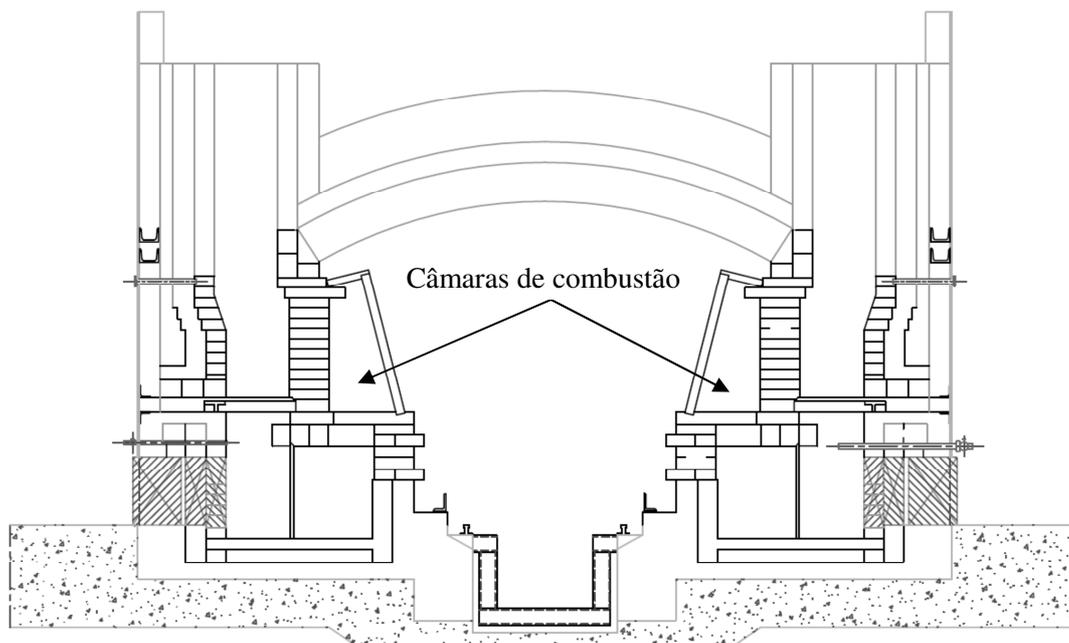


Figura 13. Desenho do forno em corte.
Fonte: Arquivo interno Duratex S.A.

Ao sair da zona de queima, os gases passam pelos tubos de aço com temperaturas superiores a 610°C , depois são lançados para a atmosfera com o auxílio de um exaustor, preparado para suportar as altas temperaturas resultantes da queima.

6.2 VENTILADOR RADIAL

Este equipamento foi projetado para suportar altas temperaturas de trabalho, fabricado em 2002 pela Bernauer, empresa fabricante de equipamentos para ventilação industrial e purificação de ar, tem a capacidade de deslocar $29.059\text{m}^3/\text{h}$ pela sua sucção de 569mm e recalque de 750mm, com pressão de 100mmCA, com rotor 794mm. Está equipado com motor trifásico, 380V, com 30cv de potência, que por relação de polias lhe oferece a rotação de 2058rpm.

Este exaustor está conectado à câmara de combustão. Por ele passam todos os gases resultantes da queima e saem com a temperatura de 442°C , velocidade de 9m/s e depois são lançados, por um duto na vertical, para a atmosfera.

6.3 AQUECEDOR ATA

O aquecedor Eclipse ATA, tipo HCLT-100A, é um aquecedor especial para fluidos térmicos em circulação com ciclo fechado, com objetivo de transportar energia térmica para equipamentos ou processos. Foi fabricado em 1979, pela extinta ATA Combustão Técnica S.A. A Figura 14 mostra o aquecedor instalado na empresa.



**Figura 14. Fotografia do aquecedor de fluido térmico.
Fonte: Arquivo fotográfico Duratex S.A. (2012)**

A fonte de calor original era o óleo combustível APF, equivalente ao BTE. Por problemas de operação e constante manutenção no seu queimador de 252.000kcal/h, no ano de 2000, ele foi substituído por outro a gás natural. Este combustível é queimado dentro da fornalha, que é composta por um tubo em formato de espiral horizontal, onde o calor é liberado pela combustão e transferido para o fluido térmico.

A transferência do calor acontece por radiação pela chama e por convecção pelos gases quentes em dois passes.

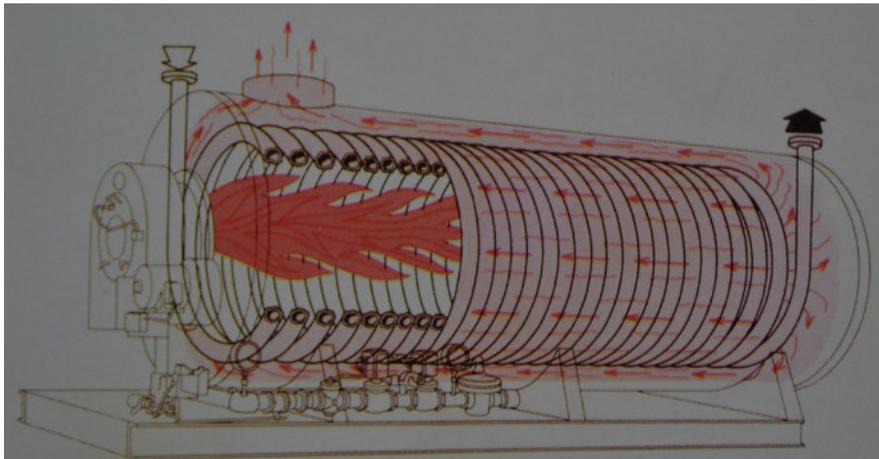


Figura 15. Desenho do escoamento interno do aquecedor de fluido térmico.
Fonte: Arquivo Duratex S.A., manual do equipamento. (1979)

O fluido térmico escoá por dentro do tubo espiral e, conforme a Figura 15, os gases quentes entram em contato com a parte externa do mesmo. O tubo espiral, em aço carbono, após a deformação, na confecção, recebeu tratamento térmico de alívio de tensões em forno próprio e teste hidrostático.

O aquecedor funciona dentro de um sistema, composto pelas bombas de circulação de fluido térmico, tubulações de transporte, circulação e retorno, equipamentos consumidores do calor gerado, equipamentos de regulagem e controle do sistema, tanques e reservatórios, como mostra Figura 15.

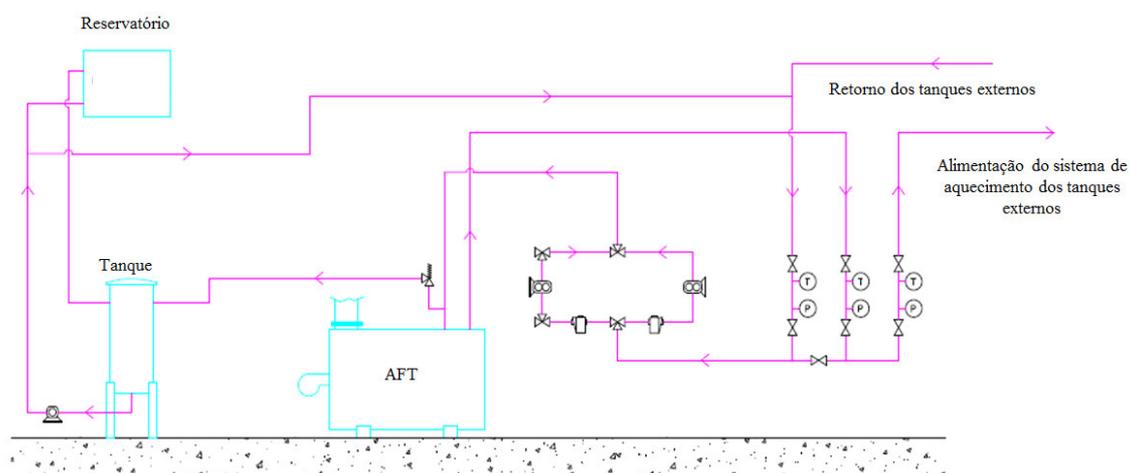


Figura 16. Fluxograma de fluido térmico
Fonte: Elaborado pelo autor

6.3.1 Corpo bipartido

O corpo do aquecedor é constituído por dois semicírculos de aço, flangeados com barra chata ao longo de todo o seu comprimento e nas extremidades possui aros externos para manter a cilindridade. O corpo bipartido inferior possui diversos suportes para sustentar a serpentina. Ambos os semicírculos são revestidos com isolante refratário P-450 de Magnebras⁴.

6.3.2 Tubo espiral

A superfície de troca de calor do aquecedor é constituído de uma serpentina helicoidal montada horizontalmente e localizada dentro do corpo cilíndrico. A mesma é construída em tubo de aço carbono schedule 40, ancorada e apoiada no corpo do aquecedor. As extremidades do tubo, na entrada e saída, por intermédio de uma chapa, são soldadas ao corpo bipartido superior.

Na zona média da serpentina o enrolamento das espiras tem passo igual, e nas extremidades o passo é aumentado para absorver a dilatação térmica do tubo. O diâmetro da curva e o comprimento total do tubo foram calculados para que a velocidade do fluido térmico seja suficiente a ponto de evitar fenômenos inconvenientes e garantir a transferência de calor com moderada temperatura de filme, dentro dos limites de temperatura especificados.

O aquecedor tem duas passagens dos gases de combustão. A primeira se dá pelo centro da serpentina, funcionando como câmara de combustão (fornalha), a segunda passagem acontece entre a serpentina e o revestimento refratário do corpo, passando antes pela câmara de reversão situada na parte traseira do corpo.

A tampa traseira dispõe de dois visores, por onde se pode verificar a condição da chama e estado da superfície da serpentina.

⁴ Isolante térmico plástico, fabricado pela Johns-Manville do Brasil Isolantes Térmicos Ltda, empresa da época.

6.3.3 Sistema de bombeamento

Para que o deslocamento do fluido aconteça, antes do aquecedor existem duas bombas de engrenagens, marca EHL, modelo EHL9515R, número 32537, uma titular e outra reserva. Estas bombas são acionadas por motores elétricos com 5cv de potência, 1150rpm, com pressão de recalque variando entre 2 – 2,5kgf/cm². Assim, foi possível consultar o Quadro 1 e verificar que é capaz de deslocar 168l/min.

O cavalete de bombas tem *by-pass* com válvulas de alívio, regulada para dar passagem quando a pressão da rede for de 10 a 20psi maior que a pressão normal de operação.

São necessários alguns cuidados na operação. A bomba de circulação deve ser ligada antes do início da combustão e, em caso de parada, a bomba deve continuar funcionando por no mínimo 30 minutos, para que a alta temperatura dos refratários seja reduzida.

As tubulações de transporte do fluido ligam o aquecedor aos pontos de uso. As juntas das mesmas devem ser soldadas, procurando evitar ao máximo as conexões roscadas e flangeadas para evitar vazamentos. Os apoios das tubulações devem ser feitos de forma que os tubos possam deslizar, com juntas de dilatação, para que tenham elasticidade e absorvam a dilatação térmica. A eficiência nestes tubos é muito importante, para reduzir perdas. O fluido térmico sai do aquecedor com a temperatura variando entre 190°C e 200°C, é deslocado por tubos termicamente isolados com lã de rocha de 75mm de espessura, revestidos com alumínio corrugado com a finalidade de protegê-los contra danos, intempéries, ação da umidade, óleos e outros agentes externos. Esses dutos se estendem até os tanques de estoque de óleo que ficam fora do prédio, somando 196m de tubo. Nestes tanques temos novamente troca de calor, mas agora com o óleo combustível para mantê-lo em temperatura alta o suficiente para manter no estado líquido, reduzindo sua viscosidade e facilitando o seu bombeamento.



MODELO		POTÊNCIA		Ø SUC. Ø REC.	TABELA DE SELEÇÃO																			
		CV	KW		1100 RPM																			
					ALTURA MANOMÉTRICA TOTAL EM METROS																			
					0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	120	140	150	170	190	200	220	240	
					VAZÃO EM litros/min.																			
EHL/2538	0,5	0,37	3/8"	9,9	9,7	9,5	9,2	8,8	8,1	7,2	6,0													
	0,75	0,55		10,0	9,9	9,8	9,6	9,4	9,1	8,6	8,0	7,4	6,7	5,9	5,0									
	1,0	0,74		10,0	10,0	9,9	9,7	9,5	9,2	8,8	8,4	8,0	7,6	7,2	6,3	5,2	4,4	3,2	2,0					
EHL/4212	0,75	0,55	1/2"	30	29	28																		
	1,0	0,74		32	31	29	26	23	20	18														
	1,5	1,10		34	34	32	31	29	27	25	24	23	21	20										
	2,0	1,47		35	35	35	34	34	33	32	31	30	28	27	25	21	20	16						
	3,0	2,21		36	36	35	35	34	33	32	31	30	29	28	27	25	23	21	18	16	14	10		
EHL/1034	1,0	0,74	3/4"	51	51	51	50	48	48															
	1,5	1,10		51	51	51	51	51	50	50	49													
	2,0	1,47		52	52	52	52	52	52	51	51	50	49	48	46									
	3,0	2,21		53	53	53	53	53	52	52	52	51	50	50	48	46	45	42						
	5,0	3,68		54	54	54	54	53	53	53	53	52	51	51	49	48	47	45	43	42	40	36		
EHL/5034	1,0	0,74	3/4"	60	60	59																		
	1,5	1,10		61	61	61	60	59	57															
	2,0	1,47		63	63	63	63	62	60	59	58	57	58											
	3,0	2,21		65	65	65	65	64	62	62	61	60	59	58	55	52								
	5,0	3,68		66	66	66	66	65	64	64	63	62	61	60	58	56	55	53	50	48	43	39		
EHL/6010	1,5	1,10	1"	72	72	71	71																	
	2,0	1,47		74	74	73	73	72	70	68	67													
	3,0	2,21		75	75	75	75	74	73	73	70	68	67	65	62									
	5,0	3,68		75	75	75	75	75	74	74	73	71	69	67	64	62	61	58	55	54	51			
/6015	2,0	1,47	1 1/2"	120	120	117	112	107																
	3,0	2,21		123	121	118	113	109	105	100	96	91	87											
	5,0	3,68		125	122	119	114	110	106	101	96	92	89	85	80	76	74							
	7,5	5,52		125	124	121	117	114	111	108	106	103	101	98	94	90	84	78	73	68	63	55		
EHL/9515	2,0	1,47	1 1/2"	170	170	167																		
	3,0	2,21		171	171	168	165	162	159															
	5,0	3,68		172	172	169	167	163	160	156	151	145	139	132	125									
	7,5	5,52		172	170	170	167	164	161	157	153	146	140	135	125	115	109	98	88	80	69	58		

Quadro 1. Quadro de seleção de bombas EHL

Fonte: <www.ehlbombas.com.br/Bombas.htm>. Acesso em 30.mai.2012

O fluido térmico retorna por dutos igualmente isolados e com o mesmo diâmetro, porém chega ao aquecedor com 116°C de temperatura.

6.3.4 Duto de saída dos gases quentes

O duto de exaustão tem a função de fazer a tiragem dos gases de combustão e deve ter altura necessária para conduzi-los à atmosfera, para que os mesmos não agredam o entorno. A temperatura normal de saída dos gases na entrada da chaminé varia entre 30°C e 50°C a mais que a temperatura de saída do fluido térmico.

6.3.5 Alimentação e queimador a gás

O equipamento está equipado com um queimador modulante⁵, queima direta, alimentado com gás natural, capaz de fornecer 400.000Kcal/h. O mesmo é fabricado pela T.B.R Combustão Industrial, tipo THG/40M, nº0530.

Para manter essas temperaturas, o consumo mensal de gás natural representa uma média de 253,51m³, segundo medição feita com o medidor de consumo de gás DELTA G40, tipo 2040/65, número de série 2218204007, instalado na rede de alimentação do equipamento por uma semana.

A unidade de Louças Sul é abastecida pela Sulgás⁶. A pressão na entrada da empresa é de 18kgf/cm², onde está instalado um cavalete com redutores de pressão e medição do consumo. Este cavalete é de responsabilidade da própria Sulgás, que faz as manutenções preventivas, corretivas, atualizações e leituras de consumo remoto.

Neste cavalete, a pressão é reduzida para 2,0kgf/cm², que é a pressão de distribuição, por dutos de aço carbono schedule 40, sem costura.

Este equipamento é bem visto para utilização com o aproveitamento dos gases do forno, pois, como comentado anteriormente, ele já operou com o mesmo combustível do forno, isso garante que os gases não oferecerão nenhum tipo de problema.

Na seção seguinte são relacionados os equipamentos utilizados para realização das medições e coleta de dados.

6.4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para realização das medições de temperaturas e variáveis do processo foram utilizados equipamentos disponíveis na própria empresa, como o Monitor de temperatura e Pressão Zetec MTP-500, que possui duas funções no mesmo instrumento, medição de temperatura de -40°C a 1.000°C e pressão diferencial de -199 a 1.999mmCA. Este equipamento foi utilizado para medir a temperaturas dos gases de combustão na saída do forno.

⁵ Sistema de controle capaz de alterar a quantidade de combustível injetado para variar a intensidade da chama para ajustar a temperatura de saída do fluido térmico ao *set point*.

⁶ Empresa responsável pela comercialização e distribuição de gás natural canalizado no Estado. Criada em 1993, atua como uma sociedade de economia mista, tendo como acionistas o Estado do Rio Grande do Sul e a Petrobras Gás S/A – Gaspetro. Iniciou a comercialização do gás natural em 2000, com a conclusão do gasoduto Bolívia-Brasil. Fonte <www.sulgas.com.br.

Utilizou-se também o termômetro bimetálico, haste 100mm, escala 0 - 300°C, para medição da temperatura na camisa instalada no tubo de exaustão do forno. O mesmo modelo de medidor está instalado nas linhas de fluido térmico, indicando a temperatura de retorno e temperatura de saída do aquecedor.

Para medição das temperaturas superficiais foi utilizado o termômetro infravermelho MTH Raytek MT4, com campo de medição de -18°C a 400°C. O consumo de gás do aquecedor de fluido foi registrado a partir do medidor Actaris DELTA G40, tipo 2040/65, número de série 2218204007. Os detalhes de operação e construção do aquecedor ATA foram resgatados de manuais de técnicos e de operação do equipamento.

Esses dados e demais valores foram buscados em livros e tabelas, que, conforme Tabela 3, estão relacionados para facilitar a consulta.

Tabela 3. Dados medidos e coletados

Aquecedor de fluido térmico	Valor	Fonte
Diâmetro do tubo da serpentina (<i>m</i>)	0,07303	Manual do equipamento
Número de espiras	24,5	Manual do equipamento
Diâmetro da serpentina (<i>m</i>)	0,762	Manual do equipamento
Temperatura de saída dos gases (°C)	50 > Tfs	Manual do equipamento
Temperatura de <i>set point</i> (°C)	200	Medido com termômetro bimetálico, haste 100mm, escala 0 - 300°C
Diâmetro interno do casco (<i>m</i>)	1,04	Medido com trena de bolso, série T, Starrett
Consumo de gás (<i>m³/h</i>)	2,03	Medido com DELTA G40, tipo 2040/65
Fluido térmico (fluido frio)		
Vazão (<i>kg/min</i>)	144,48	Calculado a partir da dimensão da bomba e rotação do motor

Temperatura de retorno (Tfe)	116	Medido com termômetro bimetálico, haste 100mm, escala 0 - 300°C
Temperatura de <i>set point</i> (Tfs)	200	Medido com termômetro bimetálico, haste 100mm, escala 0 - 300°C
Calor específico, a 150°C (C_p , J/kgK)	2470	Incropera (2003)
Viscosidade, a 150°C (ν , m ² /s)	$2,44 \cdot 10^{-6}$	Boletim técnico do produto
Densidade, a 150°C (ρ , kg/m ³)	810	Incropera (2003)
Número de Prandtl, a 150°C	103	Incropera (2003)
Condutividade térmica, a 150°C (k , W/mK)	$132 \cdot 10^{-3}$	Incropera (2003)
Pressão da rede (kgf/cm ²)	2,5	Medido com manômetro tipo Bourdon, escala 0-10kgf/cm ²
Gases de combustão (fluido quente)		
Calor específico (C_p , J/kgK)	1014	Incropera (2003)
Viscosidade, a 900K (ν , m ² /s)	$102,9 \cdot 10^{-6}$	Incropera (2003)
Densidade, a 310°C (ρ , kg/m ³)	0,61	Incropera (2003)
Número de Prandtl, a 900K	0,72	Incropera (2003)
Condutividade térmica, a 900K (k , W/mK)	$64,3 \cdot 10^{-3}$	Incropera (2003)
Condutividade térmica, a 583K (k , W/mK)	$45,9 \cdot 10^{-3}$	Incropera (2003)
Forno Heimsoth		
Velocidade de saída dos gases após o exaustor (m/s)	9	Progetti (2008)
Diâmetro da chaminé do forno (m)	0,75	Progetti (2008)
Temperatura dos gases após o exaustor (°C)	440	Progetti (2008)
Diâmetro do duto de ar quente antes do exaustor (m)	0,76	Medido com trena de bolso, série T, Starrett
Diâmetro da camisa (m)	0,88	Medido com trena de bolso, série T, Starrett
Comprimento da camisa (m)	2,86	Medido com trena de bolso, série T, Starrett

Temperatura dos gases após a camisa (°C)	610	Medido com o Monitor de temperatura e Pressão Zetec MTP-500
Temperatura dentro da camisa (°C)	280	Medido com termômetro bimetalico, haste 100mm, escala 0 - 300°C
Temperatura na superfície da camisa (entrada) (°C)	280	Medido com termômetro infravermelho MTH Raytek MT4
Temperatura na superfície da camisa (saída) (°C)	200	Medido com termômetro infravermelho MTH Raytek MT4

Fonte: Elaborado pelo autor

Para completar a Tabela 3 foram consultadas tabelas do Incropera (2003) e boletins técnicos dos produtos envolvidos no processo.

No próximo capítulo serão feitas as análises dos processos e a investigação da viabilidade termodinâmica deste aproveitamento.

7 DESCRIÇÃO DOS PROCESSOS E PROPOSTAS

Como já exposto, o objetivo deste trabalho é verificar a possibilidade de aproveitar o calor lançado para a atmosfera pela exaustão do forno Heimsoth, como energia para aquecer o fluido térmico, pois este é necessário para operação do próprio forno. Esta oportunidade de aproveitamento térmico foi identificada como possibilidade de tornar o processo mais eficiente e sustentável.

O forno Heimsoth, como comentado nos capítulos anteriores, é abastecido com óleo BTE, que tem viscosidade muito alta em temperatura ambiente, dificultando o seu bombeamento. Para reduzir a viscosidade é feito o aquecimento do óleo. Esse aquecimento é indireto, a partir do fluido térmico. Este fluido, por sua vez, tem sua temperatura aumentada no aquecedor de fluido térmico. O fato mais relevante é que ambos têm queimadores, ou seja, consomem combustível.

A Figura 17 representa o fluxograma básico de funcionamento dos equipamentos, cada um, com seus queimadores, operando individualmente. O forno consome em média 5.000 litros de óleo por dia para atender a produção, lançando para atmosfera os gases quentes a 442°C ⁷. O aquecedor, operando com gás natural, recebe o fluido térmico com temperatura de 116°C e devolve para a rede com 200°C , temperatura suficiente para atender o sistema nas 4 estações do ano.

A Figura 18 apresenta uma ideia de aproveitamento, ilustrando a passagem dos gases quentes pelo aquecedor de fluido térmico, para trocar calor com o fluido térmico. Com esta configuração, o objetivo é eliminar o consumo de gás natural. Esta proposta será avaliada na próxima seção.

⁷ Temperatura medida logo após o exaustor. Se a medição for feita em um ponto mais próximo da câmara de combustão a temperatura será mais elevada.

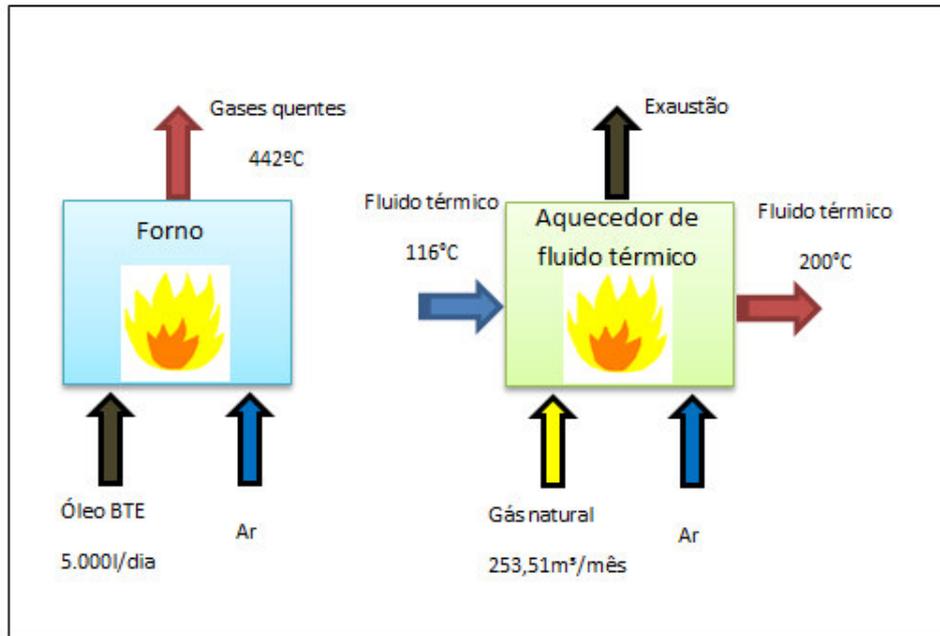


Figura 17. Fluxograma do processo atual
Fonte: Elaborado pelo autor

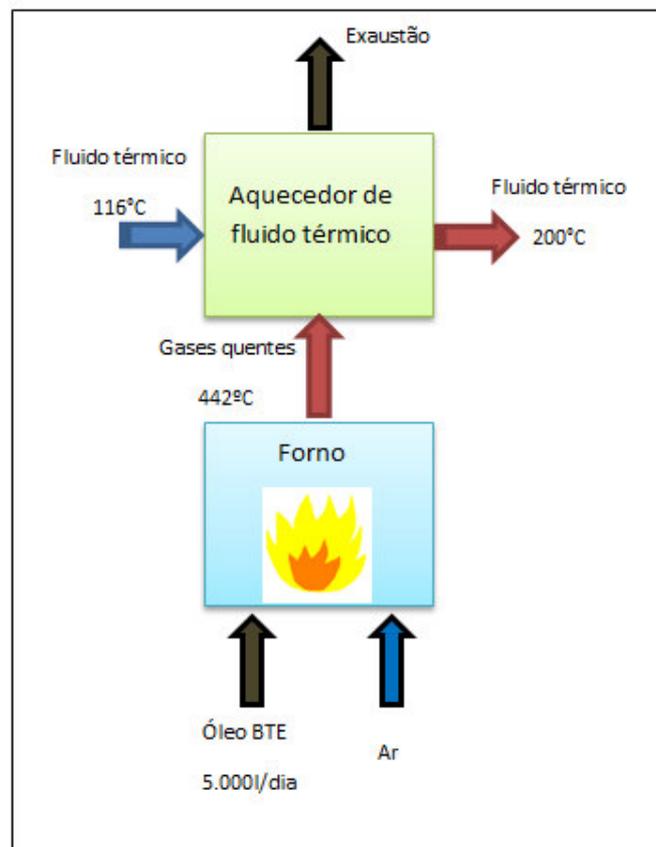


Figura 18. Fluxograma proposto.
Fonte: Elaborado pelo autor

7.1 ANÁLISE E AVALIAÇÃO PRELIMINAR DO TROCADOR DE CALOR

O trocador do fluido térmico funciona normalmente durante longos períodos de tempo sem nenhuma alteração em suas condições de operação. Por isso, ele será considerado como dispositivo de escoamento permanente. Em função dessa característica sabe-se que a vazão mássica do fluido permanece constante e as propriedades do fluido como temperatura e a velocidade de qualquer entrada ou saída permanecem as mesmas. Conforme Çengel (2009), o calor específico de um fluido geralmente muda com a temperatura, mas, em uma determinada faixa de temperatura, ele pode ser tratado como uma constante para um valor médio com pouca perda de precisão, e isto será considerado neste trabalho.

Além dessas idealizações, que são boas aproximações na prática para facilitar a análise de um trocador, pode-se ainda considerar que a superfície externa do trocador é perfeitamente isolada, de modo que não haja perda de calor para o meio envolvente e qualquer transferência de calor ocorre apenas entre dois fluidos (ÇENGEL, 2009).

Partindo dessas suposições, a primeira lei da termodinâmica⁸ exige que a taxa de transferência de calor do fluido quente seja igual à taxa de transferência do fluido frio, não considerando as perdas (ÇENGEL, 2009).

Com essas definições podemos escrever a equação da taxa de transferência de calor:

$$q = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_s - T_e) \quad (01)$$

Onde:

q – taxa de transferência de calor

\dot{m} – vazão mássica

c_p – calor específico

T_s – temperatura de saída

T_e – temperatura de entrada

⁸ Princípio da conservação de energia, que estabelece que a quantidade total de energia em um sistema isolado permanece constante.

Com base nestas informações foi verificada a taxa de transferência de calor do fluido frio (sub índice f), o fluido térmico, do qual temos os dados necessários para aplicação direta da equação.

- Temperatura de entrada do fluido frio, $T_{ef} = 116^{\circ}\text{C}$
- Temperatura de saída do fluido frio, $T_{sf} = 200^{\circ}\text{C}$
- Calor específico, $C_{pf} = 2.470 \text{ J/kg.K}$
- Vazão mássica, $\dot{m}_f = 8668,8 \text{ kg/h}$

Aplicando os dados na equação, encontra-se a taxa de transferência ou potência de aquecimento necessária para aquecer o óleo até a temperatura de *set point*, ou seja, elevar a temperatura de 116°C até 200°C . O valor encontrado foi de $1,79 \times 10^9 \text{ J/h}$, ou $499,61 \text{ kW}$.

Considerando este resultado, é necessário calcular a disponibilidade dos gases quentes oriundos da combustão do forno. Da mesma forma que no cálculo anterior, desconsiderando-se as perdas, foi utilizada a equação 01, para o cálculo da potência disponível na região do duto de saída considerado. Neste caso, os gases de exaustão são denominados fluidos quentes (sub índice q). Na região considerada, os dados levantados são:

- Temperatura de entrada do fluido quente, $T_{eq} = 400^{\circ}\text{C}^9$
- Temperatura de saída do fluido quente, $T_{sq} = 250^{\circ}\text{C}$
- Calor específico do fluido quente, $C_{pq} = 1.014 \text{ J/kg.K}$
- Vazão do fluido quente = $14.313 \text{ m}^3/\text{h}$
- Densidade = $52,43 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^3$

Desta forma chegou-se a taxa de transferência de calor dos gases quentes da exaustão do forno, em um ponto localizado logo após o exaustor, $q_q = 1,14 \times 10^9 \text{ J/h}$, ou $316,66 \text{ kW}$. Este valor representa a máxima taxa disponível que pode ser retirada dos gases no ponto considerado.

⁹ Estimando perda de 40°C da chaminé até o aquecedor de fluido térmico.

Avaliando os resultados, percebe-se que a taxa de calor disponível para aproveitamento não é suficiente para atender a proposta da substituição do aquecedor de óleo a gás natural.

Além dessa insuficiência, existem outros fatores que fazem com que a realização desta proposta necessitasse de altos investimentos, como a velocidade dos gases dentro do aquecedor em função das áreas das seções por onde o ar quente teria de passar.

Como alternativa foi investigada a possibilidade de aproveitamento desta energia térmica para o suprimento de parte da energia térmica necessária para o aquecimento do óleo. A nova alternativa funcionaria como um pré-aquecedor do aquecedor a gás. Isto se justifica pelo fato de que o aquecedor possui um sistema de controle que ajusta a queima do gás em função da temperatura de *set point*, e teria condições de adaptação a esta mudança.

A Figura 19 mostra um duto metálico que antecede os exaustores. Este faz a tiragem dos gases quentes a 610°C. Externo ao forno, este é o ponto mais próximo das câmaras de combustão.

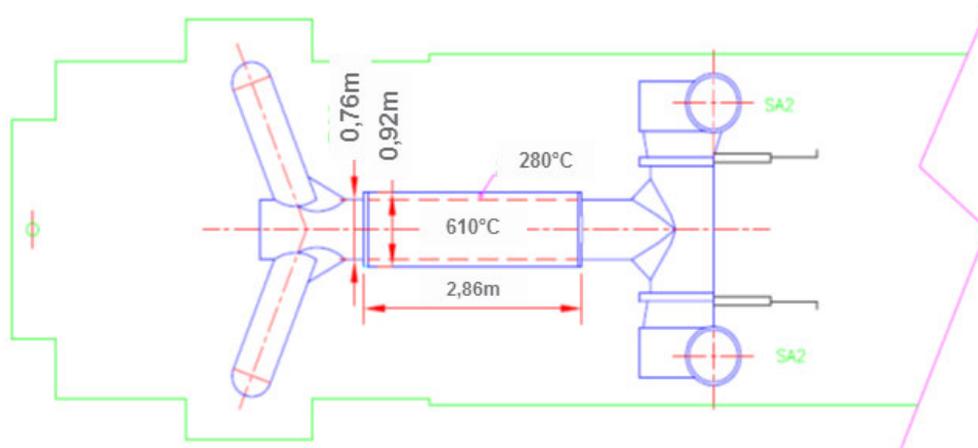


Figura 19. Croqui da vista superior do forno dutos de tiragem do ar quente.
Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme a Figura 19, no duto existe uma camisa, que deveria servir de trocador de calor duplo tubo, mas está desativado por questões técnicas de aplicação. Dessa forma, haveria espaço para colocação de uma serpentina ao redor do duto de saída, onde a troca de calor poderia ser efetuada.

Para posteriores cálculos, verificou-se que a área disponível é de $6,82\text{m}^2$.

A Figura 20 mostra um croqui da proposta. No duto central passam os gases quentes e em volta deste duto seria colocada a serpentina, por onde passaria o fluido térmico. Na serpentina o óleo sofreria um pré-aquecimento e depois seria direcionado para o aquecedor a gás, onde terminaria o seu aquecimento.

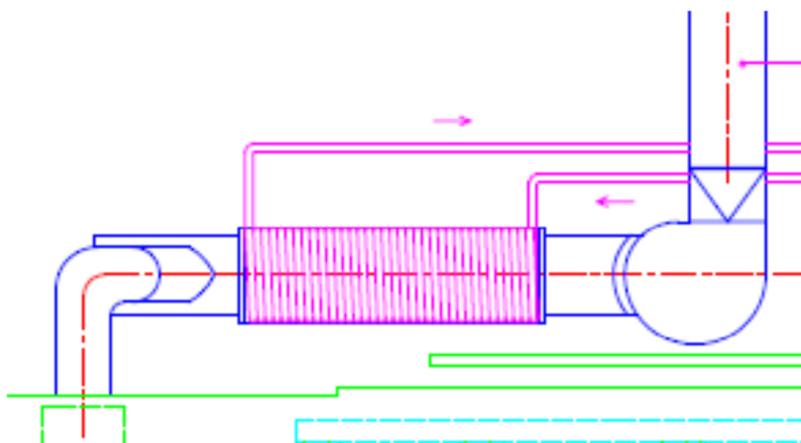


Figura 20. Disposição da serpentina no duto de exaustão.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Como na literatura pesquisada não foi encontrada a metodologia de projeto de serpentinas, foram feitas as considerações seguintes para o projeto térmico deste aproveitamento. Cabe ressaltar que as opções sempre foram pela pior condição de troca de calor.

As serpentinas consideradas são de aço carbono 1020, SCH40 sem costura ($73,03\text{mm} / 2.1/2$ pol de diâmetro externo). Estas dimensões são as mesmas do duto da serpentina do aquecedor de fluido térmico, de forma a facilitar uma possível instalação.

Considerando que a serpentina será enrolada, com diâmetro interno igual ao externo do duto de saída dos gases quentes, e suas espiras estão completamente encostadas, foi considerado que apenas 50% da área da serpentina trocará calor.

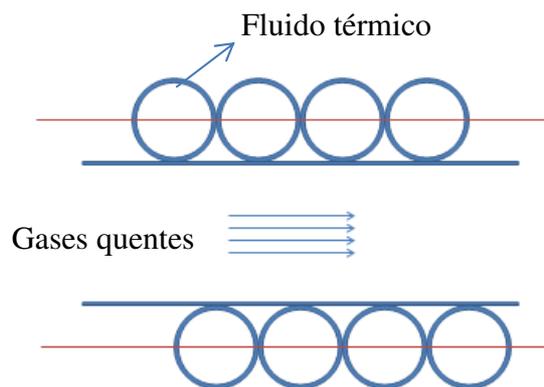


Figura 21. Representação da área de troca de calor.
Fonte: Elaborado pelo autor.

A temperatura do ar estagnado na camisa pode ser considerada constante, uma vez que a operação do forno é contínua.

Se as espiras estiverem encostadas e utilizando-se todo o comprimento de camisa disponível, sabe-se que a quantidade máxima de espiras é:

$$\frac{2,86m}{73 \times 10^{-3} 03m} \cong 39 \text{ espiras}$$

O comprimento de cada espira é de $C = \pi \cdot D = 2,38m$.

Logo, o comprimento total da serpentina é de 93m.

Considerando apenas 50% da área, conforme estabelecido anteriormente, a área de troca será de $10,68m^2$, conforme é mostrado a seguir:

$$A = (\pi \cdot D \cdot L)/2 \tag{02}$$

Onde:

D – diâmetro do tubo

L – comprimento do tubo

$$A = \frac{\pi \cdot 73,03 \times 10^{-3} m \cdot 93m}{2} = 10,68m^2$$

A proposta se encaixará no seguinte fluxograma:

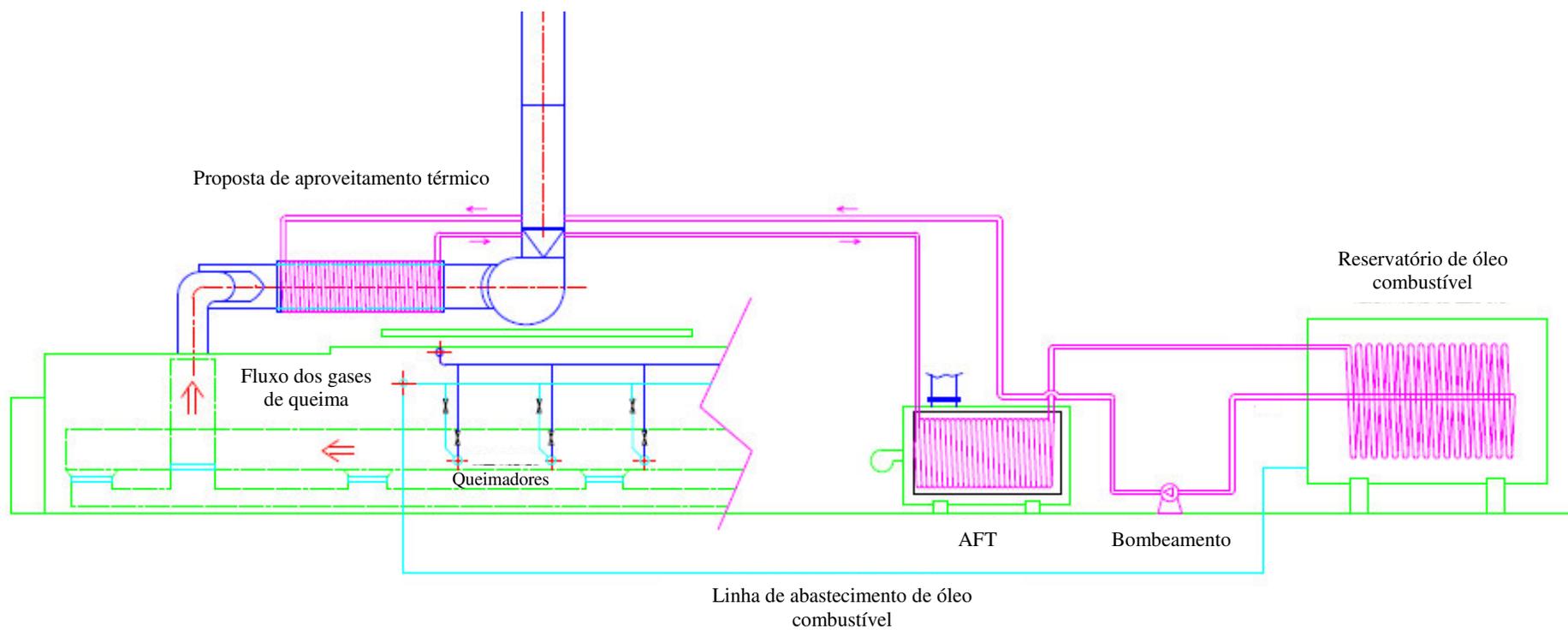


Figura 22. Fluxograma para aproveitamento do calor do forno no duto de saída da câmara de combustão.
Fonte: Elaborado pelo autor

Como o aquecedor dispõe de queimador com controle de temperatura modulante, a entrada do fluido mais aquecido resultará em uma redução no consumo de combustível.

Para investigar a possível temperatura de entrada do fluido térmico no atual aquecedor, foram feitos os cálculos da taxa de transferência de calor.

Levando em consideração uma situação ideal, ou seja, a primeira lei da termodinâmica, para encontrar a temperatura possível, as taxas de transferência de calor dos fluidos quente e frio foram igualadas:

$$q_q = q_f$$

$$q_q = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T$$

$$q_q = \frac{2,44kg}{s} \cdot \frac{1014J}{kgK} \cdot (80)K$$

$$q_q = 197,93kW$$

$$q_f = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T$$

$$197,93kW = \frac{2,4kg}{s} \cdot \frac{2470J}{kgK} \cdot (T_s - 116)$$

$$T_s = 33,39 + 116^\circ C \approx 150^\circ C$$

Teoricamente, essa é a temperatura máxima do fluido térmico estimada na saída da serpentina. Para que esta temperatura seja atingida, pode-se verificar a área de troca necessária para aquecer o óleo de 116°C a 150°C.

Esta estimativa foi realizada seguindo-se a metodologia de projeto térmico básico para um trocador de calor tipo duplo tubo, conforme Incropera (2003) e Çengel (2009).

Para encontrar a área real para elevar a temperatura do óleo, foi utilizado o método da média logarítmica das diferenças de temperatura e calculado o coeficiente global de transferência de temperatura do trocador.

$$\Delta T_1 = T_{q \text{ ent}} \cdot T_{f \text{ saida}}$$

$$\Delta T_1 = 360 - 150 = 210^\circ C$$

$$\Delta T_2 = T_{q \text{ saida}} \cdot T_{f \text{ ent}}$$

$$\Delta T_2 = 280 - 116 = 164^\circ C$$

$$\Delta T_{mt} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} = \frac{210 - 164}{\ln\left(\frac{210}{164}\right)} = 185,879^\circ C \quad (03)$$

Tabela 4. Dados tabelados do fluido térmico e gases de combustão

Dados do fluido térmico	Dados dos gases de combustão
$\rho = 810 kg/m^3$	$\rho = 0,6 kg/m^3$
$k = 132 \times 10^{-3} \frac{W}{mK}$	$k = 64,3 \times 10^{-3} \frac{W}{mK}$
$Pr = 103$	$Pr = 0,720$
$\nu = 2,44 \times 10^{-6} m^2/s$	$\nu = 102,9 \times 10^{-6} m^2/s$

Fonte: Boletim técnico do fluido térmico e Incropera (2003).

Pode-se estabelecer o coeficiente global de temperatura U, começando com os gases quentes. A primeira questão a ser estabelecida é a identificação do regime de escoamento no trocador, isto é feito através do número de Reynolds:

$$Re = V \cdot D / \nu \quad (04)$$

Onde:

V – velocidade do fluido

ν – viscosidade cinemática

D – diâmetro do duto

Para completar a equação, calcula-se a velocidade:

$$Q = 14.313 m^3/h$$

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,76^2}{4} = 0,4536 m^2$$

$$Q = V \cdot A$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{14.313 m^3}{45,36 \times 10^{-2} m^2} = \left(\frac{31.554,23 m}{3600 s} \right) = 8,76 m/s$$

$$Re = \frac{\frac{8,76 m}{s} \cdot 0,76 m}{\frac{102,9 m^2}{s} \times 10^{-6}} = 64.699,70$$

Verifica-se que o regime é turbulento, pois atende as condições $0,7 \leq Pr \leq 160$ e $Re \geq 10.000$, com isto, podem ser usadas as correlações conhecidas na literatura para escoamentos internos (INCROPERA, 2003) que são:

$$Nu = h \cdot D / k \quad (05)$$

Onde:

k – condutividade térmica

D – diâmetro do duto

h – coeficiente individual de transferência de calor

$$Nu = \left(\frac{f}{8}\right) \cdot Re \cdot Pr / \left[1,07 + 12,7 \cdot \left(\frac{f}{8}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot (Pr^{\frac{2}{3}} - 1) \right] \quad (06)$$

Onde:

Re – número de Reynolds

Pr – número de Prandtl

f – fator de atrito

Com os valores conhecidos de Re , Pr , e f (considerando tubo liso), fornecido pelo diagrama de Moody (INCROPERA, 2003).

$$Nu = \frac{(0,019/8) \cdot 64699,7 \cdot 0,720}{1,07 + 12,7 \cdot \left(\frac{0,019}{8}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot (0,720^{\frac{2}{3}} - 1)} = \frac{110,63}{0,9482} = 116,65$$

$$Nu = \frac{h \cdot 0,76m}{64,3x \frac{10^{-3}W}{mK}}$$

$$h_1 = \frac{116,65}{11,819} = \frac{9,86W}{m^2K}$$

h_1 é definido com o valor do coeficiente individual de transferência de calor para os gases quentes.

Da mesma forma pode-se proceder para a estimativa do coeficiente h_2 , relativo ao fluido térmico.

$$D_i = 62,7 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$A = \pi \cdot \frac{(62,7 \times 10^{-3} \text{ m})^2}{4} = 12,35 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$Q = 2,40 \text{ kg/s}$$

$$Q = \frac{2,40 \text{ kg}}{\text{s}} \cdot \frac{\text{m}^3}{812,1 \text{ kg}} = 2,9 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{2,90 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{12,35 \times 10^{-3} \text{ m}^2} = 0,2348 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} = \frac{\frac{23,48 \times 10^{-2} \text{ m}}{\text{s}} \cdot 62,7 \times 10^{-3}}{\frac{2,44 \times 10^{-6} \text{ m}^2}{\text{s}}} = 6033,59$$

Para regime laminar, em tubo circular, admitindo condições plenamente desenvolvidas, pode-se adotar o valor do número de Nusselt como (INCROPERA, 2003/ pg. 338):

$$Nu = 4,36$$

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k}$$

$$h_2 = \frac{Nu \cdot k}{D} = \frac{4,36 \cdot \frac{132 \times 10^{-3} \text{ W}}{\text{mK}}}{62,7 \times 10^{-3} \text{ m}}$$

$$h_2 = 9,24 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Sendo assim:

$$U = 1 / \left(\frac{1}{h_1} \right) \cdot \left(\frac{1}{h_2} \right) \quad (07)$$

Onde:

h_1 = coeficiente de transferência de calor para os gases quentes

h_2 = coeficiente de transferência de calor para o óleo térmico

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{9,86} \right) \cdot \left(\frac{1}{9,24} \right)} = 91,10 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Colocando todos os dados na equação da taxa da forma (INCROPERA, 2003), encontra-se a área:

$$q = U \cdot A_s \cdot \Delta T_{ml} \quad (08)$$

$$A_s = \frac{q}{U \cdot \Delta T_{ml}} = \frac{203,78kW}{\frac{91,10W}{m^2K} \cdot 185,87} = 12,03m^2$$

A_s é a área da superfície de duto necessária para aquecer o fluido térmico até 150°C, ou seja, são necessários, 5,03m de duto para enrolamento da serpentina, mas a disponibilidade é de apenas 2,86m.

$$A = \pi \cdot D \cdot L = 12,03 = \pi \cdot 0,76 \cdot L$$

$$L = \frac{12,03}{\pi \cdot 0,76} = 5,03m$$

Comparando-se o comprimento de duto encontrado com o disponível, percebe-se que seria necessária uma área muito maior para recuperar apenas uma pequena parte do calor.

O valor encontrado foi baseado nas hipóteses de validade das correlações da camada limite térmica apresentadas na literatura, bem como na aproximação que foi feita para o cálculo, relacionando uma serpentina com um trocador duplo tubo.

As formas de recuperação e aproveitamento do calor são limitadas quando se fala no forno Heimsoth. Qualquer tipo de intervenção precisa garantir que não haja necessidade de parada do forno, pois a condição de trabalho contínuo, sujeito a altas temperaturas, aumenta o cuidado em relação ao aproveitamento destes gases. Por exemplo, sabe-se que haveria uma troca de calor muito maior se os tubos do fluido térmico fossem instalados de forma que tivessem contato direto com os gases quentes, a 610°C, como em um trocador flama tubular, por exemplo, mas, em caso de defeito nesses tubos, o fluido térmico entraria em contato com essa temperatura alta e um acidente gravíssimo poderia acontecer, visto que este fluido entra em combustão a uma temperatura de 258°C.

CONCLUSÃO

Após profunda revisão bibliográfica, consulta a catálogos, tabelas, medições nos equipamentos envolvidos, foram feitas avaliações das possibilidades de aproveitamento do calor do forno Heimsoth para aquecimento do fluido térmico e observou-se que a recuperação é insuficiente para aquecer o fluido até o seu *set point*, para eliminar completamente o consumo de gás natural. Até mesmo para um aquecimento parcial, com o objetivo de reduzir o consumo, a proposta de construir uma nova serpentina se apresentou inviável, pois a área disponível é muito pequena se comparada à área necessária.

Ao final deste trabalho, percebe-se que o problema não é a fonte, afinal, a energia existe e é lançada para a atmosfera, mas sim o processo que se pretendia melhorar, pois a energia necessária é maior que a disponível, em função do alto *set point*.

Desta forma, está claro que essa energia poderá ser utilizada em algum processo que as temperaturas envolvidas ou a quantidade de energia requerida sejam menores.

Por isso, ficam como proposições para futuros trabalhos, o objetivo de estudo de um aproveitamento com trocadores com superfícies estendidas, levando em consideração a baixa condutividade dos gases quentes. Aliado a este novo tipo de trocador, será estudada outra possibilidade de aplicação, de preferência com temperaturas inferiores, como aplicação nas estufas de secagem de peças, onde o *set point* é de 90°C, por exemplo.

Além desta possibilidade de aproveitamento, será possível um estudo sobre recuperação de calor para geração de frio, através do sistema refrigeração por compressão (FELAMINGO, 2007) e avaliação de outros aproveitamentos através de análise exergética.

REFERÊNCIAS

- AALBORG. Disponível em: <www.aalborg-industries.com.br/general.php?ix=18>. Acesso em: 01.ago.2012.
- BUSSE, Bruna Nascimento. Textos acadêmicos sobre eficiência energética: uma amostra quantitativa dos últimos 40 anos de pesquisa. In: **Especialize On-line**, v. 1, nov, 2010. Disponível em: <www.ipog.edu.br/uploads/arquivos/643a591f20914f6664adfe660f87903e5.pdf>. Acesso em: 21.dez.2012.
- CARVALHO, M. B.; SIQUEIRA, R. B. P.; SOBRINHO, P. M.; SILVEIRA J. L.; **Cogeração de energia a partir da recuperação de calor de um incinerador industrial**; Universidade Estadual Paulista - Campus de Guaratinguetá. Disponível em <www.seeds.usp.br>. Acesso em 18.jun.2012.
- COSTA, Everaldo Cesar da. **Trocadores de calor**. São Carlos, SP: EDUFSCar, 2002.
- ÇENGEL, Yunus A. **Transferência de calor e massa, uma abordagem prática**. São Paulo, SP: McGraw-Hill, 2009.
- EHL. Disponível em: <www.ehlbombas.com.br/Bombas.htm>. Acesso em 30.mai.2012.
- FELAMINGO, José Carlos. Produzindo frio através de calor de compressão e de gases de descarga de caldeira. In: **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, v.3, n.4, p.36-39, São Paulo, 2007. Disponível em: <www.abmbrasil.com.br/materias/download/812212.pdf>. Acesso em 07.dez.2012.
- GARCIA, Roberto. **Combustíveis e combustão industrial**. Rio de Janeiro, RJ: Interciência, 2002.
- GASNET. Disponível em: <www.gasnet.com.br/novo_gasnatural/gas_completo.asp>. Acesso em 20.set.2012.
- GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo, SP: Atlas, 2006.
- INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 5. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2003.
- KERN, Donald Q. **Processos de transmissão de calor**. Rio de Janeiro, RJ: Guanabara Koogan, 1987.
- LUBRAX. **Boletim técnico**. Disponível em: <www.br.com.br/wps/wcm/connect/2e58ae80463e0628a1a6e13d7f6d3c29/ft-lub-ind-diversas-lubrux-utile-ot.pdf?MOD=AJPERES>. Acesso em 07.dez.2012.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Disponível em: <www.mme.gov.br>. Acesso em: 30.nov.2012.

MOBIL. **Boletim técnico**. Disponível em:

<www.mobilub.pt/v1/Doc/FT/MOBILTHERM%20S%C9RIE%20600.pdf>. Acesso em 21.jun.2012.

MULLINGER, Peter; JENKINS, Barrie. **Industrial and process furnaces: principles, design and operation**. 1. ed. Oxford, UK: Elsevier, 2008.

PERRY, Robert H.; CHILTON, Cecil Hamilton; ABADIE, V.H.; ABBOTT, Michael M. **Manual de Engenharia Química**. 5. ed. Rio de Janeiro, RJ: Guanabara Dois, 1986. ca. 2000.

PAUL WURTH. Disponível em: <www.paulwirth.com/pt/NOSSAS-ATIVIDADES/Energia-e-Meio-Ambiente/Recupera%C3%A7%C3%A3o-de-calor-de-gases-de-regeneradores-de-ar>. Acesso em 02.dez.2012.

PETROBRAS. Disponível em:

<www.hotsitespetrobras.com.br/petrobrasmagazine/edicoes/edicao55/pt/eficienciaenergetica/eficienciaenergetica.html>. Acesso em 19.dez.2012.

PRODANOV, Cleber Cristiano; FREITAS, Ernani Cesar de. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. Novo Hamburgo, RS: Feevale, 2009.

PROGETTI. **Energy Macroanalysis for Deca**. São Leopoldo, RS: Projetti, 2008.

RUSSOMANO, Victor Henrique. **Introdução à administração de energia na indústria**. São Paulo, SP: Pioneira, 1987.

SONG, Tah. Wun. **Condições de processo em trocador de calor**. Revista de Graduação Em Engenharia Química, São Paulo, v. 1, n. 1, p. 29-42, 1997.

TORREIRA, Raul Peragallo. **Fluidos Térmicos: Água, Vapor, Óleos Térmicos**. São Paulo: Hermus, 2002.

TRIGUEIRO, André. **Mundo Sustentável - Abrindo Espaço na Mídia para um Planeta em Transformação**. São Paulo, SP: Globo Editora, 2005.

UFMG. Disponível em:

<www.demec.ufmg.br/disciplinas/ema003/liquidos/oleocomb/oleos.htm>. Acesso em 06.nov.2012.

UNICAMP. Disponível em: <<ftp://fem.unicamp.br/pub/EM722.../GERVAP8.pdf>>. Acesso em 20.set.2012.

UNICAMP. Disponível em: <<ftp://fem.unicamp.br/pub/IM351/Comb-Cap6.pd>>. Acesso em 06.nov.2012.

VLASSOV, Dmitri. **Combustíveis, Combustão e Câmaras de Combustão**. Curitiba, PR: UFPR, 2001.

YIN, Robert. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 4. ed. Porto Alegre, RS: Bookman, 2010.

ANEXO

ANEXO A

ANEXO A. DIAGRAMA DE MOODY.

