



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

SÉRGIO ROBERTO MENDONÇA W. FILHO

**ESTUDO TÉCNICO E ECONÔMICO DO REAPROVEITAMENTO DE GASES DE
EXAUSTÃO EM UMA INDÚSTRIA CERÂMICA**

Recife

2022

SÉRGIO ROBERTO MENDONÇA W. FILHO

**ESTUDO TÉCNICO E ECONÔMICO DO REAPROVEITAMENTO DE GASES DE
EXAUSTÃO EM UMA INDÚSTRIA CERÂMICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Projeto, Análise energética e econômica.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Janaina Moreira de Meneses

Coorientador: Prof. Luiz Adeildo da Silva Junior

Recife

2022

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz CRB4 / 2222

W245e Wanderley Filho, Sérgio Roberto Mendonça.
Estudo técnico e econômico do reaproveitamento de gases de exaustão em uma indústria cerâmica / Sérgio Roberto Mendonça Wanderley Filho. 2022.
63 f., figs., tabs. abrev. e siglas.

Orientadora: Profa. Dra. Janaina Moreira de Meneses.
Coorientador: Prof. Me. Luiz Adeildo da Silva Junior.
TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Departamento de Engenharia Mecânica, Recife, 2022.
Inclui referências e anexos.

1. Engenharia mecânica. 2. Recuperação de calor. 3. Calor residual. 4. Gases de exaustão. 5. Indústria cerâmica. I. Meneses, Janaina Moreira de (Orientadora). II. Silva Junior, Luiz Adeildo da (Coorientador). III. Título.

621 CDD (22. ed.)

UFPE
BCTG/2022-319

SÉRGIO ROBERTO MENDONÇA W. FILHO

**ESTUDO TÉCNICO E ECONÔMICO DO REAPROVEITAMENTO DE GASES DE
EXAUSTÃO EM UMA INDÚSTRIA CERÂMICA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Pernambuco, como requisito
parcial para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 19 / 05 / 2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Janaína Moreira de Meneses (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Me. Luiz Adeildo da Silva Júnior (Coorientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Marcus Costa de Araújo (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Justo Emílio Alvarez Jacobo (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me permitir chegar até aqui, à minha família pelo apoio moral, financeiro e emocional ao longo do curso e deste trabalho, à minha esposa Thalyta Mendonça por sempre estar ao meu lado, aos meus professores orientadores, Janaína Meneses e Luiz Adeildo, por se mostrarem sempre disponíveis em compartilhar seus conhecimentos, dando valiosas contribuições e a todos meus colegas de trabalho pelo acompanhamento e orientações.

RESUMO

Na indústria cerâmica alguns equipamentos trabalham de maneira constante consumindo grandes quantidades de combustível. Porém, devido a perdas de energia, principalmente em forma de calor, as empresas buscam por soluções mais eficientes para uma maior economia e um menor impacto ambiental. Este trabalho, desenvolvido em uma indústria cerâmica do interior do estado de Pernambuco, é sobre um estudo de reaproveitamento de gases de exaustão de um forno através do dimensionamento de uma tubulação industrial. Inicialmente foram identificadas as possíveis fontes de desperdício de calor e, a partir das informações coletadas, foram realizados os cálculos para o dimensionamento da tubulação, aproveitando os gases no processo de atomização. O estudo desenvolvido apresentou a importância da recuperação de calor como uma das ferramentas para a melhoria da eficiência energética no setor cerâmico, sugerindo que as empresas deste ramo possam obter uma vantagem competitiva. Além disto, este estudo mostrou ser adaptável a outras indústrias que procuram soluções para poupar energia através da recuperação de calor residual.

Palavras-chave: recuperação de calor; calor residual; gases de exaustão; indústria cerâmica.

ABSTRACT

In the ceramic industry, some equipment works constantly consuming large amounts of fuel. However, due to energy losses, mainly in the form of heat, companies are looking for more efficient solutions for greater savings and less environmental impact. This work, developed in a ceramic industry in the interior of the state of Pernambuco, is about a study of the reuse of exhaust gases from a kiln through the design of an industrial pipe. Initially, the possible sources of waste heat were identified and, based on the information collected, calculations were carried out for the sizing of the pipe, taking advantage of the gases in the atomization process. The study developed showed the importance of heat recovery as one of the tools for improving energy efficiency in the ceramic sector, suggesting that companies in this field can obtain a competitive advantage. Furthermore, this study proved to be adaptable to other industries looking for solutions to save energy through waste heat recovery.

Keywords: waste heat recovery; residual heat; exhaust gases; ceramic industry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Exemplos de produtos cerâmicos.....	15
Figura 2 –	Produção brasileira por segmentos cerâmicos.....	16
Figura 3 –	Moinho de bolas.....	17
Figura 4 –	Representação de um moinho de bolas com barbotina.....	18
Figura 5 –	Representação de um atomizador de barbotina.....	19
Figura 6 –	Esquema de funcionamento de um forno túnel.....	20
Figura 7 –	Fluxograma de roteiro de cálculo.....	23
Figura 8 –	Representação gráfica do forno WFG.....	28
Figura 9 –	Volume de controle para os gases no forno WFG.....	30
Figura 10 –	Diagrama de Sankey para fornos na indústria cerâmica.....	32
Figura 11 –	Representação gráfica do ATM 18.....	33
Figura 12 –	Volume de controle no ATM 18.....	35
Figura 13 –	Configuração inicial no atomizador.....	38
Figura 14 –	Configuração final no atomizador.....	39
Figura 15 –	Velocidades econômicas em m/s.....	42
Figura 16 –	Espessura para isolamento térmico.....	45
Figura 17 –	Configuração de revestimento térmico da tubulação.....	46
Figura 18 –	Vãos entre suportes para tubos de aço carbono.....	46
Figura 19 –	Curva de 90°.....	47
Figura 20 –	Exemplo de suporte semimóvel.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Dados dos gases de exaustão do WFG.....	29
Tabela 2 –	Dados do ATM 18.....	34
Tabela 3 –	Dados do combustível.....	36
Tabela 4 –	Comparativo entre tecnologias de recuperação de calor.....	39
Tabela 6 –	Informações gerais dos materiais de projeto.....	50
Tabela 7 –	Pesquisa de mercado para materiais.....	51
Tabela 8 –	Pesquisa de mercado para serviços.....	51
Tabela 9 –	Economia ao longo do tempo.....	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BEN	Balanço Energético Nacional
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ASTM	American Society for Testing and Materials
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ANSI	American National Standards Institute
NBR	Norma Brasileira

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	13
2	REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1	A INDÚSTRIA CERÂMICA	14
2.1.1	Surgimento e produção da cerâmica no Brasil	14
2.1.2	Matérias primas utilizadas para fabricação de cerâmicas	15
2.1.3	Processos e equipamentos na indústria cerâmica	16
3	METODOLOGIA	21
3.1	ÁREA DE ESTUDO	21
3.2	IDENTIFICAÇÃO DAS FONTES DE CALOR RESIDUAL E PERDAS ENERGÉTICAS	21
3.3	TECNOLOGIAS DE RECUPERAÇÃO DE CALOR	22
3.4	ROTEIRO DE CÁLCULO PARA DIMENSIONAMENTO DE TUBULAÇÃO	22
3.5	AVALIAÇÃO DOS CUSTOS DE IMPLEMENTAÇÃO DO PROJETO DA TUBULAÇÃO	25
3.6	ESTIMATIVA DA ECONOMIA E TEMPO DE RETORNO DO INVESTIMENTO	25
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS DADOS	27
4.1	FORNO WFG	27
4.1.1	Dados do forno WFG	28
4.1.2	Análise energética dos gases no forno WFG	29
4.1.3	Fontes de perda de calor no forno WFG	31
4.2	ATOMIZADOR ATM 18	32
4.2.1	Dados do atomizador ATM 18	33
4.2.2	Análise energética dos gases no ATM 18	34
4.2.3	Proposta de melhoria	37
4.3	TECNOLOGIA SELECIONADA PARA RECUPERAÇÃO DE CALOR...	38
4.3.1	Escolha do material	39
4.3.2	Dimensionamento	39
4.3.3	Acessórios	46

4.3	ESTIMATIVA DE CUSTOS PARA IMPLEMENTAÇÃO DO PROJETO	47
4.4	CÁLCULO DO TEMPO DE RETORNO DO INVESTIMENTO	51
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
	REFERÊNCIAS	53
	ANEXO A – PLANTA BAIXA	55
	ANEXO B – DIMENSÕES ATM 18	56
	ANEXO C – RELATÓRIO GASES WFG	57
	ANEXO D – DADOS TÉCNICOS ATM 18	58
	ANEXO E – DADOS TÉCNICOS WFG	59
	ANEXO F – TABELA DE TUBOS	60
	ANEXO G – TUBULAÇÃO 2D	61
	ANEXO H – TUBULAÇÃO 3D	62
	ANEXO I – CÁLCULOS	63

1 INTRODUÇÃO

A indústria de cerâmica no Brasil requer grandes quantidades de energia e, em um passado recente, esta demanda era atendida principalmente por lenha nativa ou também carvão, casca de coco, serragem e palha de arroz. A extração e o cultivo destes materiais para fabricação de combustíveis de origem vegetal causavam sérios problemas de desmatamento e erosão dos solos, além dificultar o controle de parâmetros como umidade, poder calorífico inferior (PCI) e tamanho de partícula durante sua queima. Apesar do custo relativamente baixo, tais combustíveis não permitem alcançar bom desempenho energético em equipamentos, devido ao baixo poder calorífico. Uma alternativa viável vem sendo a utilização do Gás Natural (GN) que, apesar do preço mais elevado, não causa desertificação ou erosão por desmatamento, além de não exigir espaço para estoque, já que chega às instalações fabris por meio de tubulações. O Gás Natural é o combustível fóssil com a menor emissão de CO₂, além de não conter enxofre ou exalar fuligem e outras partículas o que pode ser prejudicial à saúde dos trabalhadores e aumentar os custos de manutenção das máquinas devido à corrosão e desgaste acelerado (SCHWOB et al., 2009).

De acordo com o relatório do BEN, emitido pela EPE a oferta interna de Gás Natural no Brasil sofreu uma queda de aproximadamente 6% de 2019 para 2020 (EPE, 2021). Junto com a alta do dólar, isto pode ter contribuído significativamente para o aumento no preço deste combustível nos últimos tempos.

Em uma indústria cerâmica, processos como secagem de pratos, pires, xícaras, tigelas e outros objetos de porcelana já conformados, além de seu posterior aquecimento para decoração e queima, demandam uma grande quantidade de combustível, sendo ele o responsável por aproximadamente 30% dos gastos totais de produção. Em relação aos custos com energia, o gás natural é responsável por aproximadamente 70% do total, onde parte é utilizado em atomizadores e parte é consumido nos fornos. Devido às frequentes altas nos preços dos combustíveis fósseis e a grande competitividade dentro da indústria cerâmica, se faz necessário realizar análises de energia para detectar perdas e pensar em possíveis formas de melhorar a eficiência do processo, com o objetivo de reduzir os custos (CAGLAYAN et al., 2018).

A eficiência energética tem importância fundamental para o atendimento à demanda de energia. Ela gera ganhos de competitividade, redução do uso de recursos naturais, redução na emissão de poluentes e economia de dinheiro. A busca pela eficiência energética contribui para a transição do setor energético mundial, provocando mudança nos padrões de consumo, uso de fontes renováveis de energia e tecnologias de captura e uso de CO₂ (EPE, 2020).

1.1 OBJETIVO GERAL E ESPECIFICOS

Projetar uma tubulação voltada à recuperação de calor residual dentro de uma indústria cerâmica, estimar os custos para implementação deste projeto, bem como o tempo de retorno do investimento:

- a) Identificar as possíveis fontes de perda de calor no forno, descrevendo os tipos de perdas que ocorrem;
- b) Determinar quais tecnologias de recuperação de calor podem ser implementadas na indústria em estudo;
- c) Apresentar o dimensionamento de uma tubulação para recuperação dos gases de exaustão dos fornos;
- d) Estimar os custos para implementação do projeto;
- e) Calcular o tempo de retorno para o investimento.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste tópico do trabalho buscou-se identificar quais métodos, materiais e equipamentos são utilizados na indústria cerâmica.

2.1 A INDÚSTRIA CERÂMICA

A indústria cerâmica é de fundamental importância para os dias atuais. Os seus principais produtos auxiliam no desenvolvimento da sociedade desde tempos antigos.

2.1.1 Surgimento e produção da cerâmica no Brasil

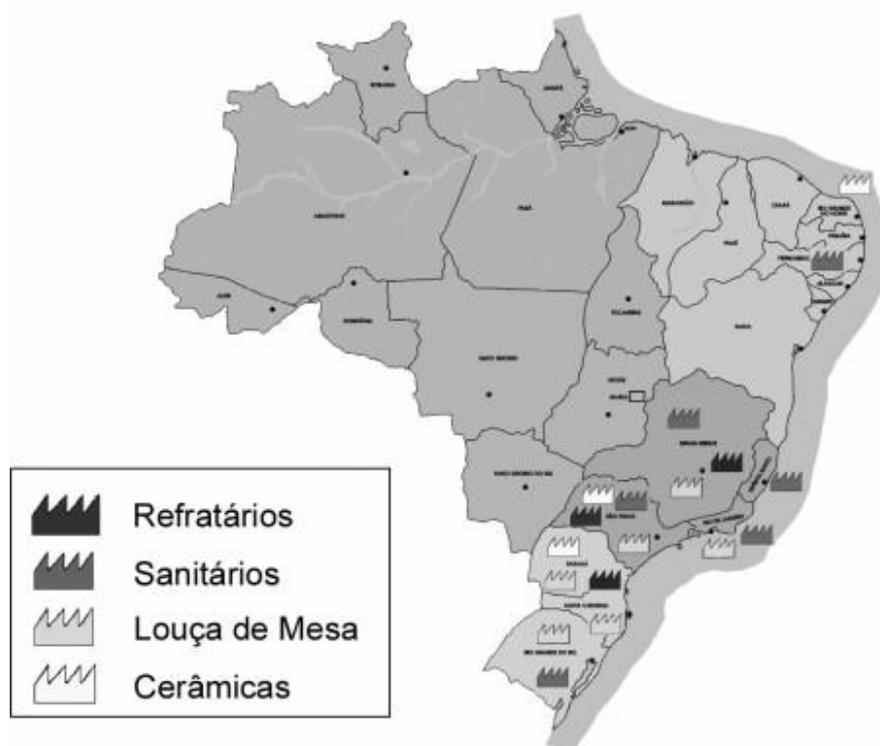
A palavra “cerâmica” deriva do grego kerameikos e os primeiros registros de uso desse tipo de material remontam a 14.000 a.C. em regiões que hoje estão Paquistão, China e Grécia. Pode-se dizer que elas são materiais inorgânicos, não metálicos, com ligações iônicas e/ou covalentes e que suportam altas temperaturas. Com o surgimento da roda de oleiro por volta de 2.000 a.C. e da porcelana na China em 600 d.C., a produção de cerâmica sofreu uma revolução (BASU; BALANI, 2011). Na Figura 1 abaixo podem ser vistos os principais exemplos de materiais cerâmicos:



Fonte: Adaptado de (PUKASIEWICZ, 2017)

No Brasil, a indústria cerâmica tem grande importância, sendo responsável por cerca de 1,0 % no PIB (Produto Interno Bruto). Sua produção é diretamente influenciada pelas regiões sul e sudeste, devido à maior população (BUSTAMENTE; BRESSIANI, 2000).

Figura 2 – Produção brasileira por segmentos cerâmicos



Fonte: (BUSTAMENTE; BRESSIANI, 2000)

Como pode ser visto na Figura 2 acima, apesar de o país contar com uma maior produção nestas regiões, no nordeste ela está em expansão (CABRAL *et al.*, 2010).

2.1.2 Matérias primas utilizadas para fabricação de cerâmicas

A depender do produto final, pode-se ter muitas opções de matérias-primas na indústria cerâmica. O setor de cerâmica vermelha, por exemplo, utiliza basicamente argila comum, em que a massa é tipo monocomponente e pode ser denominada de simples ou natural. A preparação da massa é feita através da mistura de uma argila com maior plasticidade e granulometria fina, com outra de menor plasticidade. Já para a produção de cerâmica branca, como porcelanas e louças, a massa é do tipo composta, constituídas de argilas plásticas de queima branca, caulins, quartzo e

fundentes como feldspato, filito, rochas feldspáticas e carbonatos (MOTTA et al., 2001).

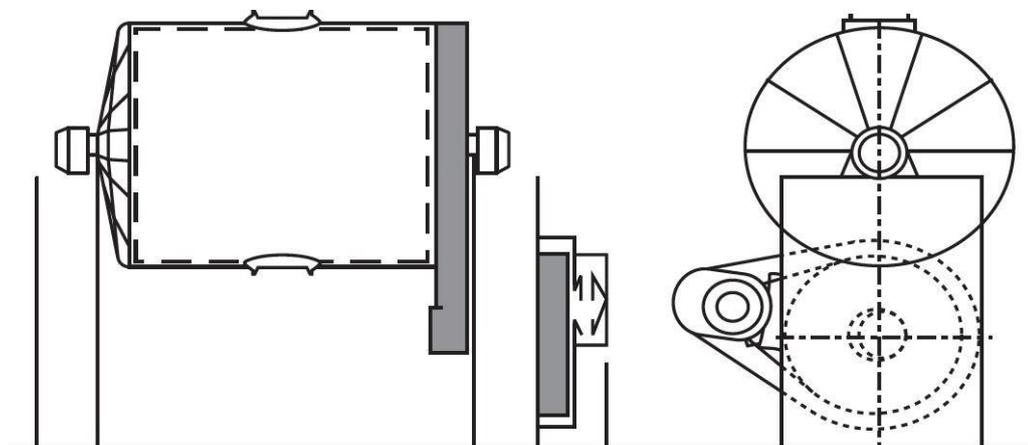
2.1.3 Processos e equipamentos na indústria cerâmica

A extração e o armazenamento das matérias-primas são etapas fundamentais para garantir a qualidade do produto fabricado ou para se evitar os problemas de operação. No entanto, não serão analisadas neste trabalho já que geralmente não ocorrem nas instalações da planta da fábrica. Na fabricação de produtos cerâmicos têm-se: dosagem, moagem, armazenamento da "massa líquida", atomização, armazenamento de pó, prensagem, secagem, esmaltação, decoração, queima e classificação (BARBOSA et al., 2008).

A dosagem é uma operação que determina as quantidades relativas das matérias-primas que farão parte da composição de uma massa formulada. Os sistemas de dosagem envolvem máquinas e instalações com níveis de automação diferentes (OLIVEIRA; HOTZA, 2015).

A operação de moagem é realizada em moinhos de bolas, intermitentes ou contínuos, podendo ser realizada em processos a seco ou a úmido, resultando na homogeneização e na redução granulométrica das partículas. A fim de evitar a contaminação da matéria-prima, costuma-se usar, como carga moedora, esferas de alumina. O produto da moagem por via úmida é uma suspensão de partículas finas em água, denominada barbotina (ADOLPHO et al., 2002). Na Figura 3 tem-se a representação de um moinho:

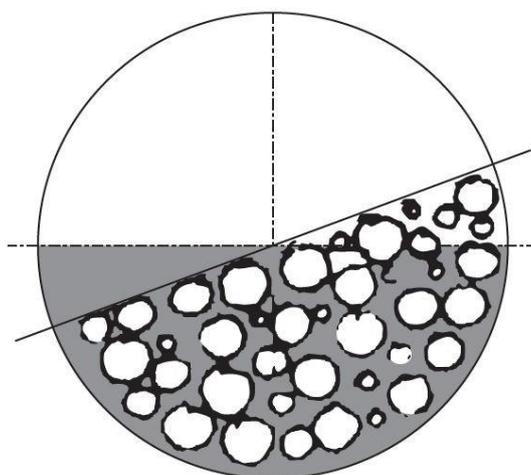
Figura 3 – Moinho de bolas



Fonte: (BOSA et al., 2007)

Os tamanhos das bolas do moinho, feitas de alumina (Al_2O_3), estão diretamente ligadas à granulometria desejada para as matérias-primas. A adição de água e defloculante no processo por via úmida visa ajudar no controle da densidade e da viscosidade (tempo de escoamento) da barbotina, respectivamente. A velocidade de rotação do moinho é controlada por meio de um controlador lógico programável (CLP), com velocidades definidas em tempos determinados previamente, segundo a composição da massa (BARBOSA et al., 2008). Na Figura 4 abaixo tem-se a vista lateral em corte de um moinho com barbotina:

Figura 4 – Representação de um moinho de bolas com barbotina

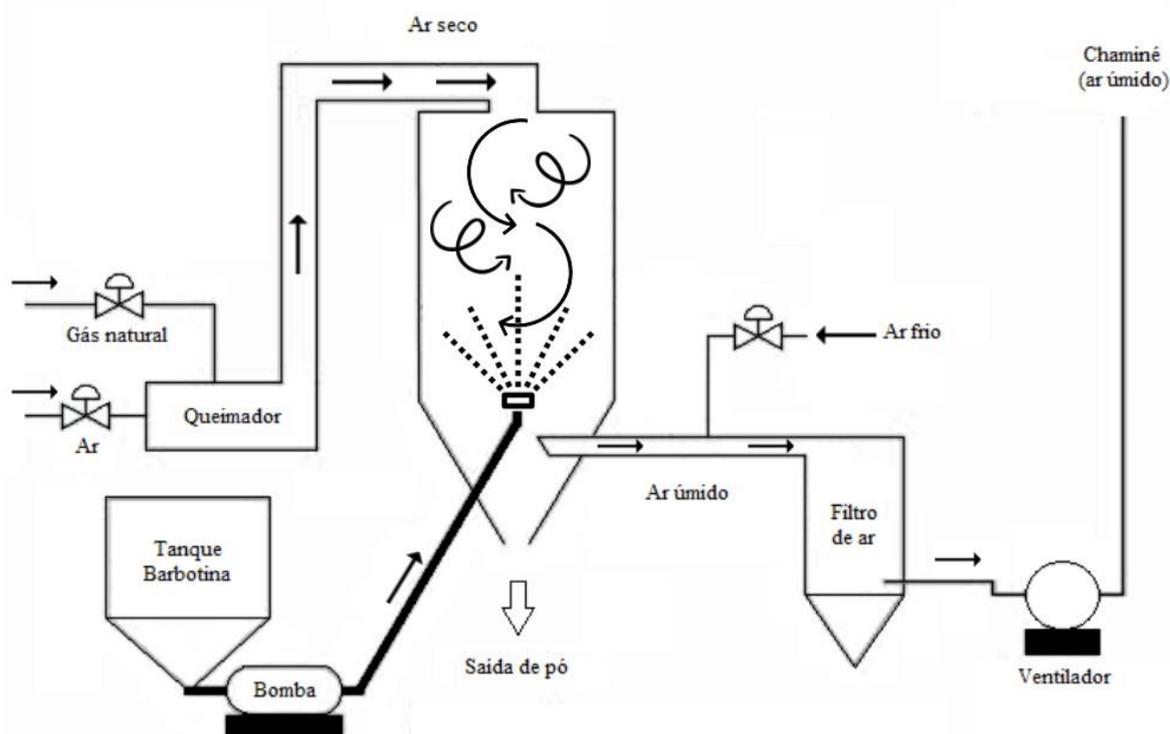


Fonte: (BOSA et al., 2007)

Ao sair dos moinhos e antes de chegar aos tanques de agitação, a barbotina é peneirada para separar as partículas de maiores dimensões. Nos tanques agitadores ela é armazenada e homogeneizada, em seguida, é transportada por bombas para ser impulsionada ao atomizador. Antes da atomização, a barbotina deve passar por um filtro simples e por uma separação magnética, isso ajuda a evitar entupimentos no bico do atomizador por partículas estranhas ou maiores do que o desejado, além de defeitos por contaminação no produto final (BARBOSA et al., 2008).

O processo de atomização consiste basicamente na transformação da barbotina em partículas secas a partir da pulverização sofrida no interior de uma câmara aquecida chamada atomizador (RIBEIRO et al., 2001).

Figura 5 – Representação de um atomizador de barbotina



Fonte: Adaptado de (RIBEIRO et al., 2001)

Como visto na Figura 5 acima, o atomizador consiste em uma câmara de secagem ventilada com ar previamente aquecido a partir da combustão de gás natural (RIBEIRO et al., 2001).

Praticamente todo o pó atomizado é retirado do atomizador por gravidade e segue através de esteiras transportadoras até a estocagem, podendo ser guardado em silos ou grandes bolsas ("big-bags"). O transporte para estocagem é realizado continuamente e deve-se atentar para os níveis dos reservatórios. Para melhorar a homogeneização da umidade e da granulometria, o pó atomizado deve permanecer nos silos ou bolsas por no mínimo 24 horas (BARBOSA et al., 2008).

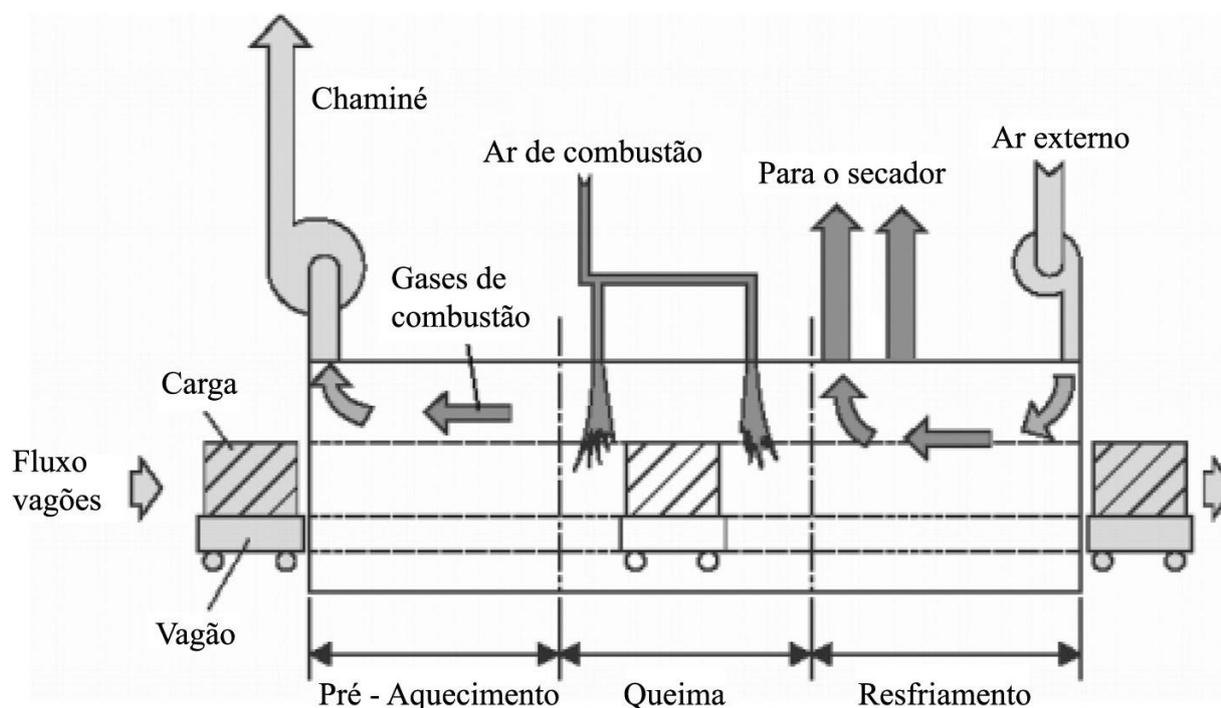
O objetivo da prensagem é obter elevada densidade nas peças antes da queima. Diferenças de densidade aparente na mesma peça cerâmica prensada, em consequência de problemas de preenchimento da matriz de compactação, podem levar à retenção de ar, causando problemas nas peças queimadas (OLIVEIRA; HOTZA, 2015).

A operação de secagem tem por objetivo a redução da umidade da peça cerâmica, de modo a diminuir o tempo da operação de queima. No processo de monoqueima, a secagem também tem a função de proporcionar um aumento da resistência no suporte cru, o que é necessário para que a peça possa resistir aos choques durante o seu manuseio até o forno (BARBA et al., 1997).

A esmaltação consiste basicamente na aplicação de uma camada de material vítreo no substrato cerâmico. Com a aplicação dos esmaltes busca-se impermeabilizar, aumentar a resistência ao desgaste e incrementar a resistência mecânica das peças, além de desenvolver propriedades estéticas. Essas etapas são críticas na determinação da qualidade do produto final. Uma inspeção é efetuada para a separação das peças com defeitos superficiais antes que sejam consumidos energia e materiais em seu processamento nas etapas seguintes (BARBOSA et al., 2008).

A queima é uma das principais etapas na indústria cerâmica, nela ocorrem modificações fundamentais nas propriedades das peças cerâmicas, dando lugar a um material duro e resistente.

Figura 6 – Esquema de funcionamento de um forno túnel



Fonte: (NANDI et al., 2015)

Na queima do material utiliza-se um forno túnel, como pode ser visto na Figura 6. Este forno é do tipo horizontal de rolos com 120 m de comprimento e utiliza gás natural como combustível para gerar calor. O forno se divide em faixas ao longo de seu comprimento, cada uma das quais tem um termopar e um servomotor como atuador para modificar automaticamente a relação ar/combustível no queimador correspondente (BARBOSA et al., 2008).

Na indústria de estudo em questão, algumas vezes, antes do material seguir para os fornos do tipo túnel, ele é queimado em outros tipos de fornos, como por exemplo o forno de soleira (shuttle kiln), sendo a primeira queima chamada de queima biscoito ou chacote.

Nesta etapa, os defeitos superficiais e a definição da tonalidade são inspecionados visual e manualmente também de forma contínua, a fim de evitar que os produtos cheguem ao cliente final com uma qualidade baixa.

3 METODOLOGIA

Este trabalho buscou identificar as possíveis fontes de desperdício de calor no forno, verificando o quanto poderia ser reaproveitado. Foi realizada uma revisão bibliográfica a fim de se ter bases para o estudo. Trata-se então de uma pesquisa descritiva, quanto a seu propósito, qualitativa, quanto à sua abordagem e bibliográfica quanto à técnica de coleta de dados utilizada.

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A fábrica, base do estudo deste trabalho, está localizada na cidade de Moreno no interior do estado de Pernambuco. Tendo como foco o desenvolvimento de artigos de porcelana de mesa (tableware) como pratos, tigelas e xícaras, a fábrica produz cerca de 40000 peças ao dia. Estes produtos visam atender os mercados interno e externo, com preços competitivos e elevada qualidade. Vários equipamentos como fornos (tunnel kiln, shuttle kiln), secadores, moinhos, prensas e atomizadores fazem parte da sua linha de produção.

Dentro do processo de fabricação foi selecionado, como foco do estudo o reaproveitamento dos gases de exaustão oriundos do forno do tipo soleira (shuttle kiln), identificado nesta planta e também pelo fabricante (Riedhammer) como forno WFG. Este forno é utilizado para vários processos, como calcinação do caulim, para esmaltação e até mesmo para a primeira queima de produtos já conformados.

3.2 IDENTIFICAÇÃO DAS FONTES DE CALOR RESIDUAL E PERDAS ENERGÉTICAS

A primeira etapa deste estudo começou na identificação das possíveis fontes de perda de calor no forno WFG. Foram feitas medições de temperatura dentro e fora do forno e acompanhamento do consumo de combustível.

Desta forma, foi observado que a maior perda de energia ocorre na chaminé, visto que os gases da combustão possuem uma carga de energia. Para medir essa perda foi utilizado um termopar tipo K localizado no interior da tubulação da chaminé do WFG, obtendo-se os valores médios de temperatura para os gases de exaustão. A leitura das temperaturas foi realizada no painel de controle do forno, em média duas

vezes ao dia. A partir daí, tomando como base a análise energética realizada no item 4.1.2, percebeu-se que este calor desperdiçado é considerável e poderia ser reaproveitado. Na planta em questão, o forno WFG e o atomizador ATM 18, estão localizados na região de preparação de pó atomizado da fábrica, a aproximadamente 20 metros um do outro, como pode ser visto na planta baixa no Anexo A. Desta forma, percebeu-se uma oportunidade de redução no consumo de gás natural do atomizador, a partir do redirecionamento desta energia térmica por uma tubulação.

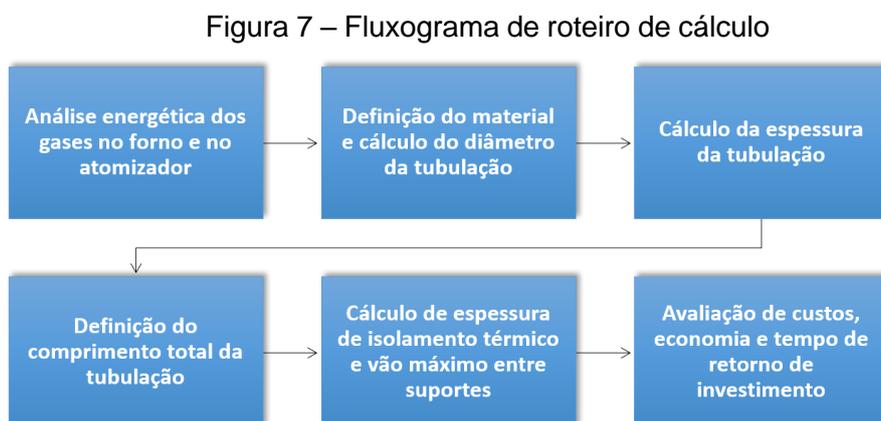
3.3 TECNOLOGIAS DE RECUPERAÇÃO DE CALOR

A partir de uma pesquisa bibliográfica, foram encontradas algumas opções de tecnologias para recuperação de calor residual. Elas podem ser aplicadas seguindo a classificação das temperaturas de rejeição (VALE, 2018), porém, conforme o objetivo deste estudo, foram analisados apenas os equipamentos que se enquadram na recuperação de gases residuais com temperaturas de até 315 °C.

Dentre os parâmetros analisados para tomada de decisão da tecnologia mais adequada estão eficiência, temperatura de trabalho, tamanho do equipamento ou espaço físico necessário para instalação, frequência de manutenção, custo e aplicação.

3.4 ROTEIRO DE CÁLCULO PARA DIMENSIONAMENTO DE TUBULAÇÃO

Com base na revisão da literatura, a presente seção tem como objetivo estabelecer e descrever uma metodologia para os cálculos necessários, como mostrado na Figura 7 abaixo:



Fonte: Autoria própria

Para o dimensionamento da tubulação, em primeiro lugar, foi necessária a análise termodinâmica dos equipamentos envolvidos (WFG e ATM 18). Para isso foi utilizada a equação de balanço de energia em um volume de controle (MORAN; SHAPIRO, 2014):

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{v_s^2}{2} + gz_s \right) \quad (3.1)$$

Onde:

dE_{vc}/dt : variação de energia no volume de controle;

\dot{Q}_{vc} : taxa de calor no volume de controle;

\dot{W}_{vc} : taxa de trabalho no volume de controle;

\dot{m}_i : vazão mássica do fluido na entrada ($i = e$) ou saída ($i = s$) do vc;

h_i : entalpia do fluido na entrada ($i = e$) ou saída ($i = s$) do vc;

$v_i^2/2$: energia cinética do fluido na entrada ($i = e$) ou saída ($i = s$) do vc;

gz_i : energia potencial do fluido na entrada ($i = e$) ou saída ($i = s$) do vc.

Após a verificação da existência de uma energia que poderia ser reaproveitada e da definição da tecnologia a ser utilizada, foi feita a escolha do material dos tubos, considerando custo e características de trabalho necessárias.

Para o cálculo do diâmetro da tubulação foi inicialmente arbitrado seu valor, através da equação da vazão abaixo, verificando se a velocidade do fluido em questão ficaria dentro dos limites das denominadas “velocidades econômicas” (TELLES, 1999):

$$\dot{V} = vA_s = v \left(\frac{\pi d^2}{4} \right) \quad (3.2)$$

Onde:

\dot{V} : vazão volumétrica do fluido;

v : velocidade do fluido;

A_s : área da seção transversal do tubo;

d : diâmetro do tubo.

Além da equação da vazão acima, foi considerado, a título de simplificação, que os gases de exaustão teriam um comportamento aproximado ao de um gás ideal. A partir daí, foi possível utilizar a Lei Geral dos Gases (ÇENGEL, 2008):

$$PV = mRT \quad \therefore \frac{P_i \dot{V}_i}{T_i} = const \quad (3.3)$$

Onde:

P : pressão;

V : volume;

m : massa;

R : constante universal dos gases ideais;

T : temperatura.

O American Standard Code for Pressure Piping (ASME B 31) estabelece, para o cálculo da espessura mínima ($t_{mín}$) de tubos, a seguinte fórmula (TELLES, 1999):

$$t_{mín} = \frac{PD}{2(S_h E + PY)} + C \quad (3.4)$$

Onde:

P = pressão interna de projeto;

D = diâmetro externo;

S_h = tensão admissível do material na temperatura de projeto;

E = coeficiente de eficiência de solda, válido para o caso dos tubos com costura; para os tubos sem costura, $E = 1,0$. São os seguintes os valores desse coeficiente de acordo com a norma ASME B 31:

Tubos com costura por solda de topo, totalmente radiografada: $E = 1,0$ Tubos com costura por solda de topo, radiografia parcial: $E = 0,90$ Idem, sem radiografia, solda pelos dois lados: $E = 0,85$

Idem, idem, solda por um só lado: $E = 0,80$

Y = coeficiente de redução de acordo com o material e a temperatura do tubo.

Para tubos de aço-carbono, em temperaturas até 485 °C, tem-se $Y = 0,4$.

C = soma das margens para corrosão, erosão, e abertura de roscas e de chanfros.

Além destes, outros passos serão necessários para o projeto, como:

- I. Cálculo do comprimento total da tubulação: através do somatório dos comprimentos dos trechos vistos nos Anexos G e H;
- II. Cálculo da espessura de isolamento térmico: a partir de tabela da norma N-550 da Petrobrás;
- III. Cálculo do vão máximo entre suportes: norma N-46 da Petrobrás;
- IV. Identificação da necessidade de acessórios.

3.5 AVALIAÇÃO DOS CUSTOS DE IMPLEMENTAÇÃO DO PROJETO DA TUBULAÇÃO

Para avaliação dos custos de implementação do projeto, foram feitas cotações de materiais, junto a empresas especializadas, além de levantamento de preços de mão de obra para o serviço de instalação. Também foi considerado o custo intelectual, ou seja, o custo envolvendo o tempo e o conhecimento empregados para o desenvolvimento do projeto. O somatório destes valores compõe o custo total para implementação do projeto.

3.6 ESTIMATIVA DA ECONOMIA E TEMPO DE RETORNO DO INVESTIMENTO

Para estimar a economia gerada pelo reaproveitamento dos gases de exaustão, foi necessário calcular a redução do consumo de combustível pelo atomizador, através da equação abaixo (HEYWOOD, 1988):

$$\dot{m}_{comb} = \rho_{comb} \dot{V}_{comb} = \frac{\dot{Q}_{útil}}{PCI} \quad (3.5)$$

Onde:

\dot{m}_{comb} : vazão mássica do combustível;

ρ_{comb} : massa específica do combustível;

\dot{V}_{comb} : vazão volumétrica do combustível;

$\dot{Q}_{útil}$: Potência útil gerada;

PCI : poder calorífico inferior do combustível.

Para o tempo de retorno foram comparados custo e economia, estimando assim em quanto tempo o valor gasto seria recuperado. Através de uma regra de três simples pode-se chegar na relação abaixo:

$$t_r = \frac{Custo_{total}}{Economia_{mês}} \quad (3.6)$$

Onde:

t_r : tempo de retorno do investimento;

$Custo_{total}$: custo total para implementação do projeto;

$Economia_{mês}$: economia gerada no mês;

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS DADOS

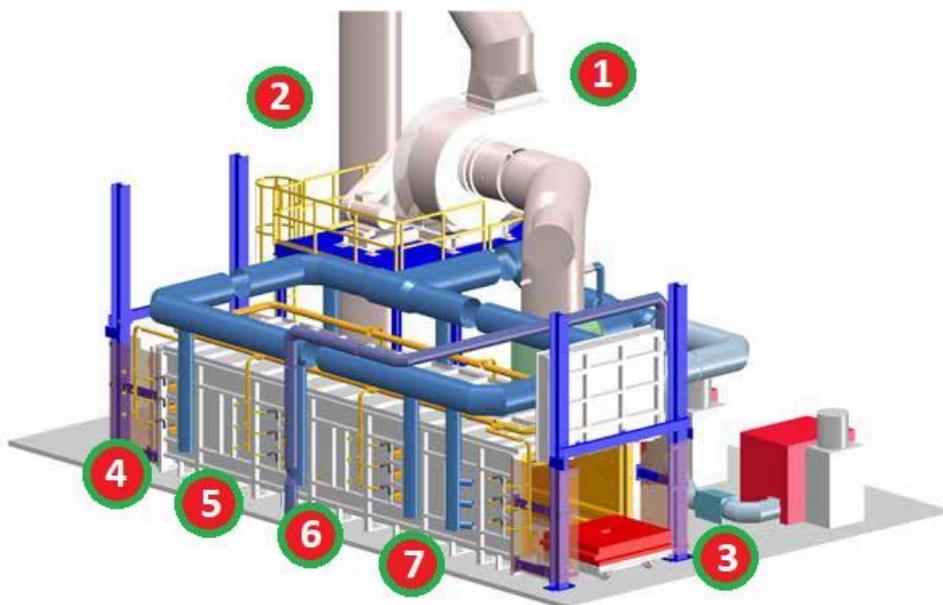
Neste tópico serão discutidos os resultados obtidos através de medições, cálculos e comparações. Além disto, será mostrado o funcionamento de cada um dos equipamentos, junto com suas respectivas análises energéticas. Logo em seguida, será feito o dimensionamento da tubulação, especificando o custo total dos materiais, serviços e também o tempo de retorno do investimento.

4.1 FORNO WFG

Na fábrica em questão, o forno WFG funciona de forma intermitente, ou seja, nem sempre ele está ligado e funcionando. Apesar disso, como objetivo deste estudo, visa-se aproveitar estes momentos de funcionamento para a recuperação dos seus gases de exaustão.

Além da proximidade entre o forno WFG e o ATM 18, notou-se que toda estrutura da fábrica ao redor deles, como vigas e pontos de apoio, poderiam viabilizar o projeto de uma tubulação para o reaproveitamento dos gases quentes. Na Figura 8 abaixo é possível observar uma representação gráfica do forno WFG, conforme se encontra na fábrica:

Figura 8 – Representação gráfica do forno WFG: (1) Entrada de ar de combustão; (2) Chaminé dos gases de exaustão; (3) Entrada do forno; (4-7) Queimadores



Fonte: Adaptado de (RIEDHAMMER, 2022)

Segundo o manual do fabricante, visto no Anexo E, com um ciclo de queima de aproximadamente 20h, atingindo temperaturas por volta de 1400 °C, este forno com seus queimadores produz energia suficiente para o processo, seja ele calcinação ou chacote, a partir do consumo de gás natural. A tubulação de gás natural pode ser vista em amarelo.

4.1.1 Dados do forno WFG

Os dados obtidos para os gases de exaustão do forno WFG foram, em sua maioria, retirados de um relatório de medição por amostragens, como pode ser visto no Anexo C. Para obter os valores de temperatura, foi utilizado um termopar tipo K localizado no interior da chaminé. A leitura das temperaturas era realizada no painel de controle do forno WFG duas vezes ao dia. A depender do processo, as temperaturas variavam bastante, entre 100 °C e 300 °C.

Tabela 1 – Dados dos gases de exaustão do WFG

WFG		
PARÂMETRO	VALOR	UNIDADE
Temperatura	100 - 300	°C
Pressão	1,0	bar
Vazão	6203	Nm ³ /h
Umidade	8,81	%
Velocidade	3,60	m/s
CO (monóxido de carbono)	0,0004	% mol/mol
CO ₂ (dióxido de carbono)	1,0	% mol/mol
O ₂ (oxigênio)	10,23	% mol/mol
NO _x (óxidos de nitrogênio)	282,71	mg/Nm ³

Fonte: o autor, 2022

Com isso, para efeito de cálculos, pretende-se fazer uso da temperatura máxima envolvendo estes gases, a fim de se evitar falhas na tubulação. Para a pressão, foi considerado o valor aproximado de 1 atm, já que a chaminé está aberta e em contato com a atmosfera.

Os dados de vazão, umidade, velocidade e composição dos gases foram colhidos de um relatório de medição feito por uma empresa de monitoramento ambiental contratada pela fábrica.

Além dos dados apresentados acima, fez-se uso da planta baixa da fábrica para análise das dimensões e distâncias. No Anexo A é possível ver que a tubulação da chaminé do forno WFG possui cerca de 993,7 mm de diâmetro. Ela é feita de aço carbono com revestimento externo em lã de rocha e chapas de alumínio, estrutura responsável por seu isolamento térmico.

4.1.2 Análise energética dos gases no forno WFG

A partir dos conceitos teóricos relacionados no livro “Fundamentals of Engineering Thermodynamics”, dos autores Moran e Shapiro (2014), realizou-se uma análise energética dos gases do forno WFG a partir do volume de controle mostrado na Figura 9. Utilizando a equação (3.1) foram feitas algumas considerações:

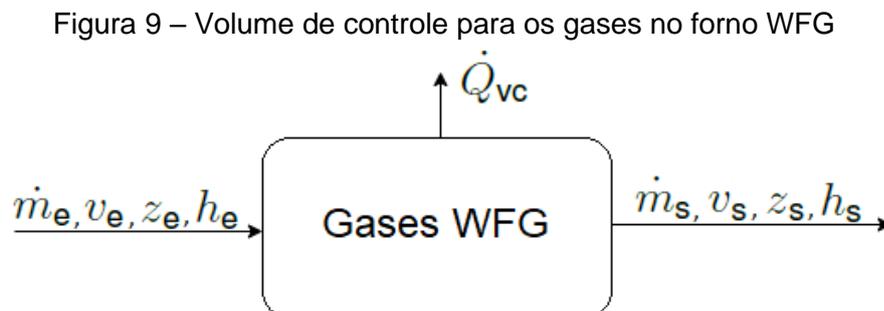
$$dE_{vc}/dt = 0 \text{ e } \dot{m}_e = \dot{m}_s = \dot{m} \text{ (forno em regime permanente);}$$

$$z_e - z_s \approx 0 \text{ (diferença de alturas desprezível);}$$

$$v_e = v_s \text{ (velocidade constante);}$$

$$\dot{W}_{vc} = 0 \text{ (escoamento livre);}$$

Ar como gás ideal.



Fonte: o autor, 2022

Para os dados:

$$\rho_{ar} = 1,27 \text{ kg/m}^3; \dot{V} = 3,62 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$T_e = 1400 \text{ }^\circ\text{C} \quad \therefore \quad h_e = 1515,42 \text{ kJ/kg}$$

$$T_s = 300 \text{ }^\circ\text{C} \quad \therefore \quad h_s = 300,19 \text{ kJ/kg}$$

Substituindo estes dados na equação (3.1) simplificada, tem-se:

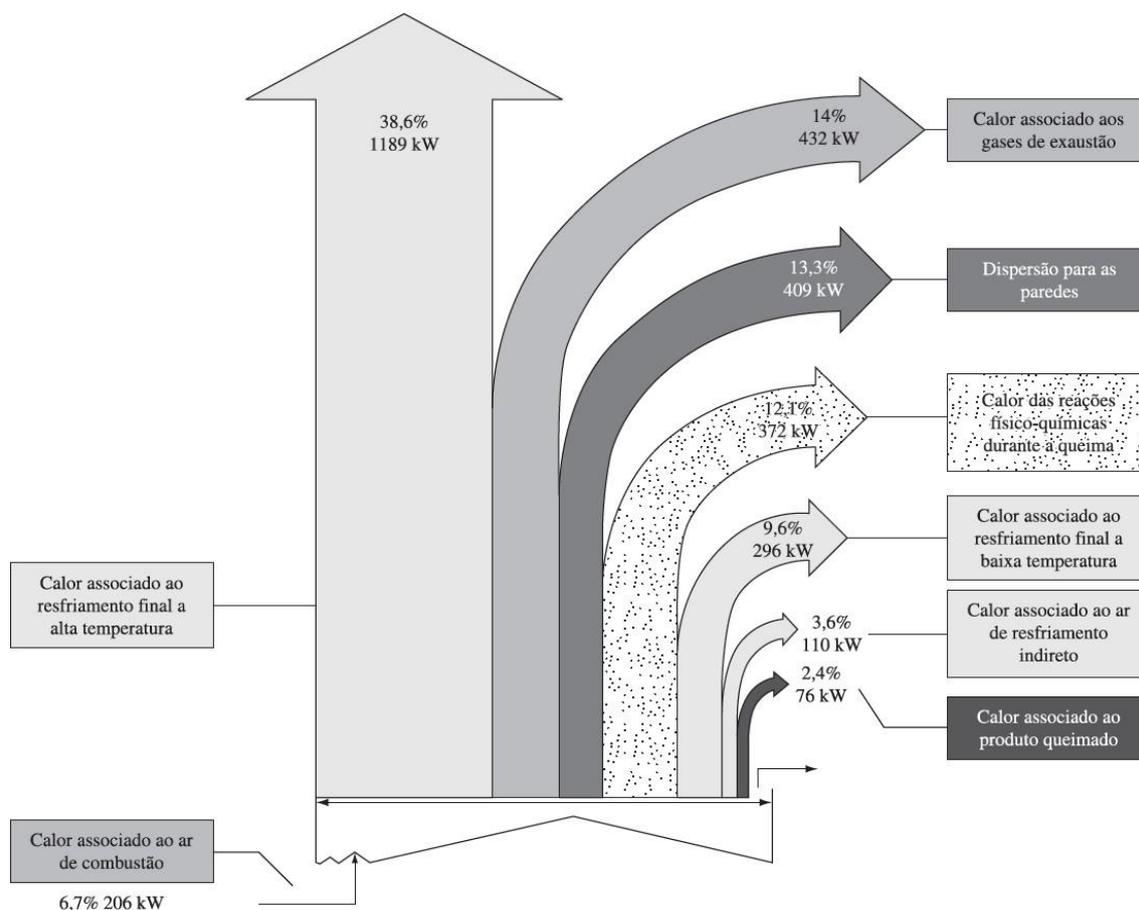
$$\dot{Q}_{vc} = 5586,9 \text{ kW}$$

O valor para a taxa de calor obtido anteriormente indica a energia total produzida pelo forno, sendo uma parte utilizada para o processo de queima e outra desperdiçada. Os valores de entalpias utilizados foram obtidos de uma tabela termodinâmica (MORAN; SHAPIRO, 2014) e a vazão volumétrica é calculada conforme Anexo I.

4.1.3 Fontes de perda de calor no forno WFG

Apesar de todas as aproximações, comparando com o diagrama de Sankey da Figura 10, pode-se ver que uma quantidade considerável de energia está sendo desperdiçada através dos gases de exaustão do forno WFG.

Figura 10 – Diagrama de Sankey para fornos na indústria cerâmica



Fonte: (NASSETTI, 2010)

Fazendo uma aproximação e utilizando o diagrama acima, pode-se considerar que cerca de 14% da energia produzida pelo forno é desperdiçada em forma de gases de exaustão, daí:

$$\dot{Q}_{ex} = 0,14(5586,9) \therefore \dot{Q}_{ex} = 782,2 \text{ kW}$$

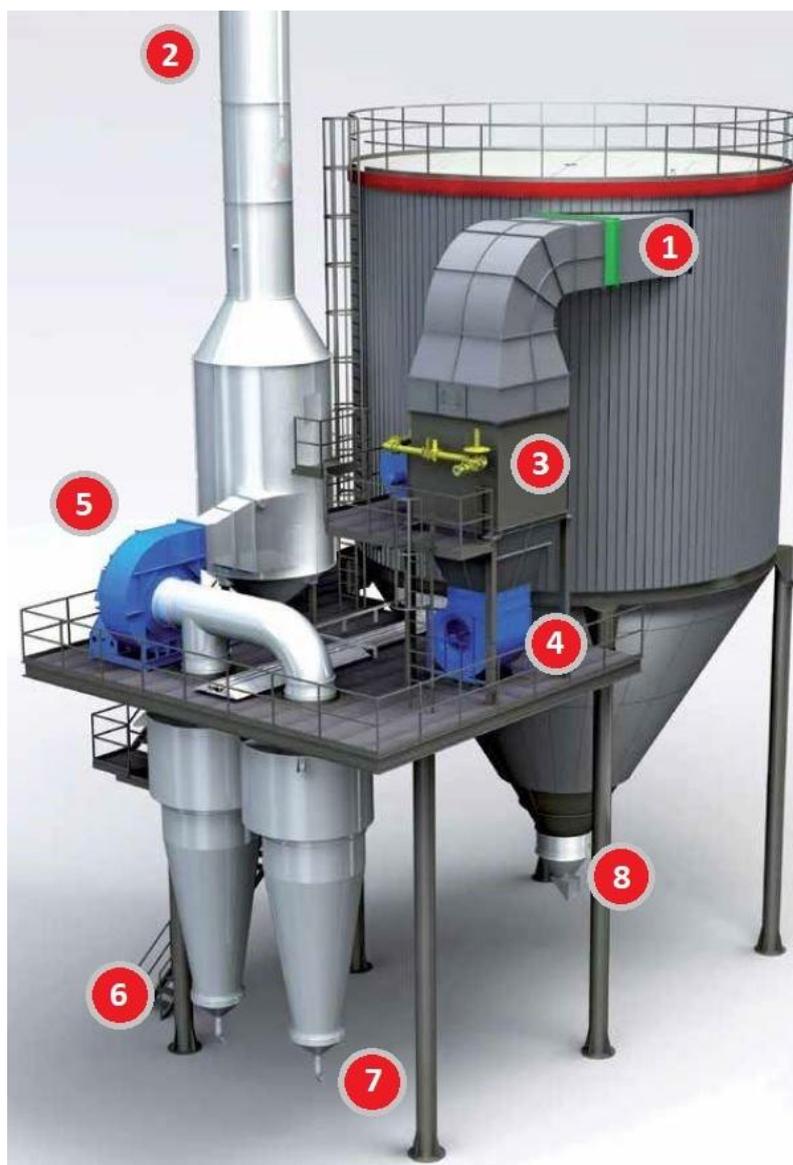
Além do valor de energia encontrado acima, também é possível notar que há perdas pelas paredes do forno, através de irradiação, e também perdas devidas às reações físico-químicas durante a queima. Porém, neste trabalho o foco será a energia desperdiçada através dos gases de exaustão.

4.2 ATOMIZADOR ATM 18

O atomizador (spray dryer) da planta é o ATM 18 da empresa italiana SACMI. Após a mistura dos materiais, a barbotina líquida é enviada através de bombas até os bicos do atomizador para que a massa possa ter sua umidade reduzida até o valor

desejado. Na Figura 11 abaixo tem-se uma representação gráfica do atomizador utilizado:

Figura 11 – Representação gráfica do ATM 18: (1) Entrada de ar quente; (2) Chaminé dos gases de exaustão; (3) Queimador; (4) Ventilador para ar de combustão; ventilador para ar de exaustão; (6,7) Filtros para ar de exaustão; (8) Saída de pó atomizado



Fonte: Adaptado de (SACMI, 2022)

4.2.1 Dados do atomizador ATM 18

Através dos valores fornecidos por um medidor de vazão, mostrados no painel de controle do atomizador, foram anotados dois valores ao longo do dia. Estes valores eram colhidos após um período de tempo de funcionamento do atomizador, de modo

a evitar grandes oscilações. Com isso, obteve-se um consumo médio de gás natural de 105 m³/h para o atomizador, como mostrado na Tabela 2. Os outros dados do atomizador foram retirados do manual do fabricante (SACMI), presente no Anexo D.

Tabela 2 – Dados do ATM 18

ATM 18		
PARÂMETRO	VALOR	UNIDADE
Temperatura na região superior	400	°C
Temperatura na região inferior	100	°C
Pressão de entrada (queimador)	20	mbar
Potência do queimador	1500000	Kcal/h
Pressão bomba barbotina	30	bar
Potência bomba barbotina	15	kW
Vazão gases de exaustão	18000	m ³ /h

Fonte: o autor, 2022.

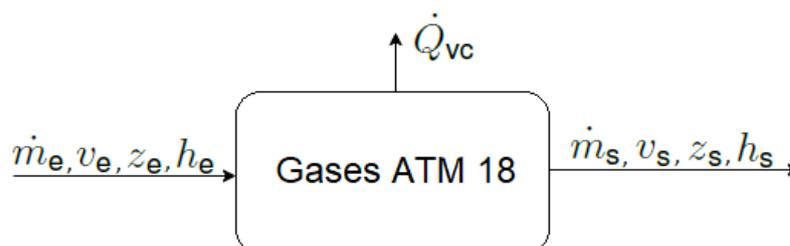
Com isso, para efeito de cálculos, pretende-se fazer uso da temperatura máxima envolvendo estes gases, a fim de se evitar falhas na tubulação. Para a pressão, foi considerado o valor aproximado de 1 atm, já que a chaminé está aberta e em contato com a atmosfera. Os dados de vazão, umidade, velocidade e composição dos gases foram colhidos de um relatório de medição feito por uma empresa de monitoramento ambiental contratada pela fábrica.

Além dos dados apresentados acima, fez-se uso da planta baixa da fábrica para análise das dimensões e distâncias. No Anexo A é possível ver que a tubulação da chaminé do forno WFG possui cerca de 993,7 mm de diâmetro. Ela é feita de aço carbono com revestimento externo em lã de rocha e chapas de alumínio, estrutura responsável por seu isolamento térmico.

4.2.2 Análise energética dos gases no ATM 18

Na análise energética dos gases do atomizador são feitas as mesmas considerações do item 4.1.2, sendo o volume de controle representado pela Figura 12 abaixo. No volume de controle tem-se como variáveis de entrada e saída as vazões mássicas, velocidades, cotas e entalpias dos gases:

Figura 12 – Volume de controle no ATM 18



Fonte: o autor, 2022.

Para determinar qual deverá ser a quantidade de calor fornecida pelo queimador após a implementação da tubulação de recuperação, serão analisados três cenários, como a seguir:

Cenário 1: apenas o queimador

O primeiro caso é um cenário em que apenas o queimador está funcionando, sem a tubulação de recuperação.

Para os dados:

$$\rho_{ar} = 1,27 \text{ kg/m}^3; \dot{V} = 3,62 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$T_e = 400 \text{ }^\circ\text{C} \quad \therefore \quad h_e = 400,98 \text{ kJ/kg}$$

$$T_s \approx 200 \text{ }^\circ\text{C} \quad \therefore \quad h_s = 199,97 \text{ kJ/kg}$$

Substituindo estes dados na equação (3.1) simplificada, tem-se:

$$\dot{Q}_1 = 924,12 \text{ kW}$$

Este valor representa a potência normalmente demandada pelo atomizador para o processo de secagem da barbotina no dia a dia da fábrica.

Para verificar se este valor é coerente, em seguida, calculou-se com a equação (3.5) a vazão volumétrica de combustível que seria necessária. Considerando os dados retirados do site da Copergás, mostrados na Tabela 3, e convertendo o PCI de kcal/m³ para kJ/kg, tem-se:

Tabela 3 – Dados do combustível

GÁS NATURAL		
PARÂMETRO	VALOR	UNIDADE
Poder calorífico inferior (PCI)	8500	kcal/m ³
Massa específica	0,78	kg/m ³

Fonte: (COPERGAS, 2022).

$$\dot{V}_{comb} = 93,5 \text{ m}^3/h$$

Este valor está bem próximo do que foi obtido nas medições diárias pelo painel do equipamento (105 m³/h), indicando que as considerações feitas são aceitáveis. Com isso, o consumo do atomizador, antes da implementação do projeto, será considerado de 105 m³/h para efeito de cálculos.

Cenário 2: apenas a tubulação de recuperação

O segundo caso é uma situação hipotética em que o queimador está desligado e o funcionamento do atomizador se dá apenas pelo calor vindo dos gases recuperados do forno WFG.

Considerando os dados:

$$T_e = 300 \text{ }^\circ\text{C} \quad \therefore \quad h_e = 300,19 \text{ kJ/kg}$$

$$T_s \approx 200 \text{ }^\circ\text{C} \quad \therefore \quad h_s = 199,97 \text{ kJ/kg}$$

E substituindo estes dados na equação (3.1) simplificada, tem-se:

$$\dot{Q}_2 = 460,75 \text{ kW}$$

Este valor representa o quanto de potência a tubulação de recuperação, trabalhando sozinha, conseguiria fornecer ao atomizador.

Cenário 3: queimador e tubulação juntos

O terceiro caso é quando os dois sistemas funcionam juntos, queimador e tubulação de recuperação:

$$\dot{Q}_3 = \dot{Q}_1 - \dot{Q}_2 = 463,37 \text{ kW}$$

O valor obtido acima indica quanta energia o queimador irá precisar produzir para suprir a potência total solicitada pelo atomizador, considerando a utilização dos gases recuperados.

Utilizando a equação (3.5):

$$\dot{V}'_{comb} = 46,9 \text{ m}^3/\text{h}$$

O valor encontrado representa quanto combustível o atomizador (queimador) demandaria caso o sistema de recuperação já estivesse implementado e funcionando. Fazendo a diferença entre o consumo de gás natural sem o sistema de recuperação e com o sistema de recuperação, percebe-se que poderá ocorrer uma redução de aproximadamente 55% na demanda de combustível pelo atomizador:

$$Economia = \frac{\dot{V}_{comb} - \dot{V}'_{comb}}{\dot{V}_{comb}} = \frac{105 - 46,9}{105} = 55,33\%$$

O valor encontrado acima significa que, após a implementação do projeto, o atomizador deixaria de consumir 105 m³/h e passaria a consumir 46,9 m³/h, ou seja, a economia seria de 58,1 m³/h, sendo esta a maior economia possível.

4.2.3 Proposta de melhoria

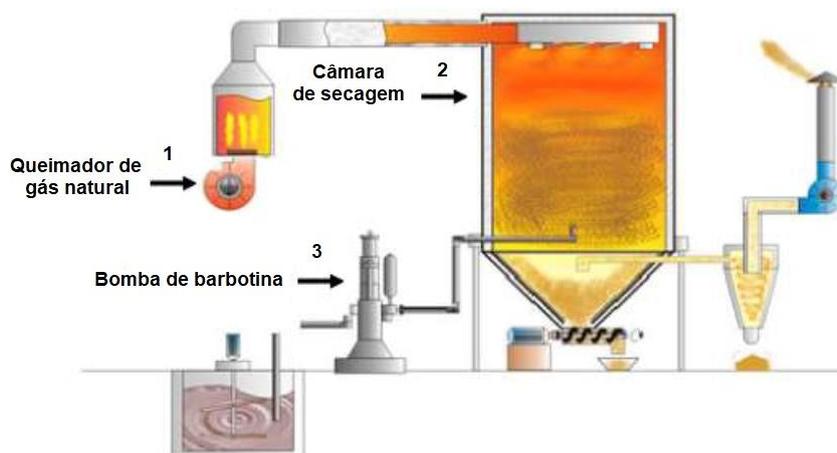
Tem-se como proposta o dimensionamento de uma tubulação de reaproveitamento dos gases de exaustão do forno até a entrada do atomizador. Devido à grande diferença de pressão entre os gases de saída da chaminé do forno WFG (1 bar) e da entrada do atomizador (20 mbar), a princípio, não será utilizado um dispositivo extra, como uma bomba, para impulsionar estes gases. O fluxo deverá seguir naturalmente da chaminé do forno WFG até à entrada do atomizador.

A ideia é que, através da inserção dos gases reaproveitados na tubulação do queimador, com ajuda do controle PID e dos termopares, o sistema entenda que o

queimador não precisa ter sua potência aumentada e queimar mais combustível, já que a temperatura estará próxima do valor desejado.

Na Figura 13 pode ser vista a configuração do atomizador antes da mudança proposta.

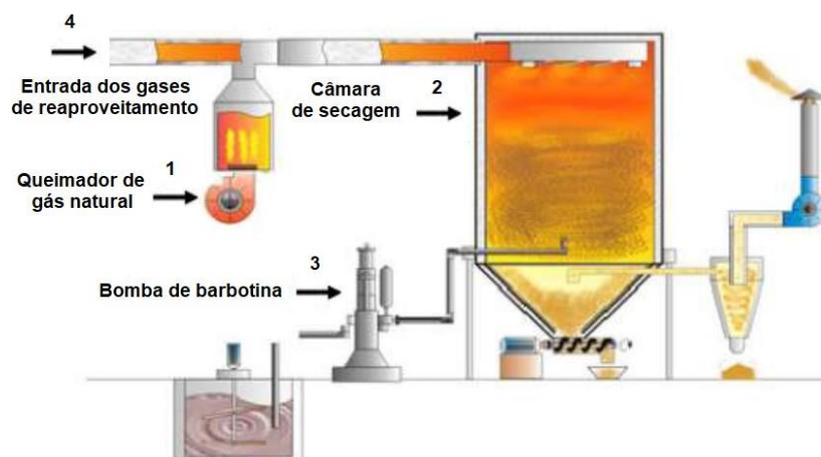
Figura 13 – Configuração inicial no atomizador



Fonte: Adaptado de (SAPA, 2013)

A ideia é conectar a tubulação de reaproveitamento diretamente na tubulação do queimador. Abaixo, na Figura 14 pode ser vista a configuração do atomizador após a mudança proposta:

Figura 14 – Configuração final no atomizador



Fonte: Adaptado de (SAPA, 2013)

4.3 TECNOLOGIA SELECIONADA PARA RECUPERAÇÃO DE CALOR

Para este estudo, levando em consideração os parâmetros mostrados na Tabela 4 abaixo, além das observações anteriores, a tecnologia escolhida para recuperação de calor foi a recirculação direta através de uma tubulação:

Tabela 4 – Comparativo entre tecnologias de recuperação de calor

TECNOLOGIA	APLICAÇÃO	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Trocador de calor tubular	Recuperação de calor em fornos e secadores e aplicações com geradores termoeletrônicos.	- Alta condutibilidade térmica; - Manutenção reduzida; - Contaminação inexistente.	- Cuidado necessário na compatibilidade dos materiais dos tubos e fluidos de trabalho.
Bomba de calor	Processos de secagem, lavagem, destilação e evaporação, climatização de espaços.	- Alta eficiência (acima de 100%); - Recuperação da “qualidade” do calor.	- Manutenção periódica; - Fluidos de trabalho nocivos ao meio ambiente.
Ciclo Rankine Orgânico	Recuperação de calor de processos industriais para geração de energia elétrica.	- Possibilidade de operação a temperaturas mais baixas que o ciclo de Rankine clássico.	- Os fluidos de trabalho devem ser escolhidos e manuseados com cuidado.
Recirculação direta de calor	Recuperação de calor de gases de exaustão para reutilização em outros processos.	- Alta eficiência (próxima de 100%); - Baixa manutenção; - Não há necessidade de fluido de trabalho.	- Necessidade de estrutura para suporte da tubulação.

Fonte: o autor, 2022.

Como pretende-se reaproveitar os gases de exaustão do forno WFG e injetá-los na entrada do atomizador, nem a bomba de calor e nem o Ciclo Rankine Orgânico seriam as melhores opções. O Ciclo Rankine Orgânico (CRO) possui eficiência entre 10 e 20%, com temperatura de trabalho até 300 °C, porém, sua utilização se dá principalmente para geração de eletricidade (VALE, 2018). Já a bomba de calor, apesar de poder ter um coeficiente de performance acima de 100%, não atende às necessidades deste estudo.

O trocador de calor tubular possui eficiência entre 60 e 80%, com temperatura de trabalho podendo variar entre -70 e 540 °C (VALE, 2018). A princípio, esta seria uma opção viável para recuperação dos gases de exaustão do forno WFG, porém, como estes gases já saem sem contaminantes da chaminé, não há necessidade de mais uma etapa de filtragem antes da tubulação.

4.3.1 Escolha do material

Levando em consideração os dados obtidos para os gases de exaustão do WFG, onde foi notada uma temperatura máxima de 300 °C, optou-se por utilizar o aço-carbono como material da tubulação.

O aço-carbono é um material de custo relativamente baixo e facilmente encontrado no mercado. Segundo (TELLES, 2001), o aço carbono apenas começa a sofrer interferência em sua resistência mecânica a partir de temperaturas próximas a 400 °C.

Levando em consideração a norma ASME B.31.8, a qual fornece diretrizes para projetos e instalações de tubulações para transporte e distribuição de gases, optou-se por usar tubos com especificação ASTM A53 (NBR 5590) os quais possuem diâmetros nominais de até 26", podendo ser de grau A ou B, com costura ou sem costura, galvanizados ou pretos (TELLES, 2001).

4.3.2 Dimensionamento

Neste tópico, procura-se dimensionar a tubulação de reaproveitamento dos gases, ou seja, calcular seu comprimento total, seu diâmetro e sua espessura, a partir de duas premissas: cálculo da vazão de gás e cálculo mecânico.

Diâmetro

O cálculo do diâmetro das tubulações é um problema hidráulico que pode ser resolvido em função das velocidades ou das perdas de carga. Quanto maior for o diâmetro, maior será o custo inicial da tubulação, mas, em compensação, menores serão a perda de carga e a velocidade do fluido, para um determinado valor da vazão. O diâmetro recomendável será um valor de compromisso, para se obter um custo inicial razoável, e valores também razoáveis da perda de carga e da velocidade. A perda de carga deve ser sempre baixa, porque representa uma energia perdida, e assim, quanto menor essa perda, menor será o custo de operação da tubulação (TELLES, 1999).

O dimensionamento do diâmetro é sempre feito por aproximações sucessivas, tanto em função da velocidade como das perdas de carga. Em ambos os casos,

arbitra-se primeiro um valor para o diâmetro e verifica-se se a velocidade está dentro dos limites das denominadas “velocidades econômicas” para o fluido em questão, ou se a perda de carga total tem um valor compatível com a energia disponível. Como a perda de carga total depende principalmente do comprimento, pode-se admitir que para tubulações curtas a perda de carga não seja o fator preponderante. O cálculo em função da velocidade é mais simples e deve ser preferido no caso de tubulações de pequeno comprimento (TELLES, 1999), com isso, este método será adotado neste trabalho.

Já que a vazão fornecida na Tabela 1 está em Nm³/h, são consideradas condições normais de temperatura e pressão, ou seja, 0 °C e 1 atm. Com isso, é necessário o uso da equação (3.3) para convertê-la em m³/h. Considerando a máxima temperatura possível (300 °C) e pressão de 1 bar, tem-se:

$$\dot{V}_2 = 13019,5 \text{ m}^3/\text{h} = 3,62 \text{ m}^3/\text{s}$$

Com base na vazão obtida acima e também a velocidade, pode-se calcular o diâmetro da tubulação a partir da equação (3.2):

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 3,62}{\pi \cdot 3,6}} = 1,13 \text{ m}$$

O diâmetro encontrado acima é aproximadamente igual ao diâmetro da própria tubulação de exaustão dos gases do WFG, que é de 993,7 mm. Isso era esperado, já que os dados iniciais foram resultantes de medições feitas na tubulação de exaustão do WFG. Levando em consideração os diâmetros das tubulações de saída e chegada, sendo 993,7 mm o da saída no WFG e 1300 mm na entrada do ATM 18, como visto no Anexo A, optou-se por um tubo comercial de 20” de diâmetro. Para validar este diâmetro, faz-se uso da equação (3.2), desta vez evidenciando a velocidade:

$$v = \left(\frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi d^2} \right) = \frac{4 \cdot 3,62}{\pi (0,508)^2} = 17,86 \text{ m/s}$$

Comparando a velocidade calculada com a velocidade econômica para o fluido, aproximado para ar comprimido, notou-se através da Figura 15 que o diâmetro de 20" é aceitável para o projeto:

Figura 15 – Velocidades econômicas em m/s

Água doce: redes em cidades	1 a 2	Ar comprimido:	15 a 20
redes em instalações industriais	2 a 3	Hidrocarbonetos (instalações industriais):	
alimentação de caldeiras	4 a 8	líquidos (linhas de sucção)	1 a 2
sucção de bombas	1 a 1,5	idem, outras linhas gasosas	1,5 a 2,5 25 a 30
Vapor: até 2 kg/cm ² (saturado)	20 a 40	Água salgada (tubos de aço com revestimentos)	1,5 a 2,5
2 a 10 kg/cm ²	40 a 60	idem, tubos de latão	1,5 (máx.)
mais de 10 kg/cm ²	60 a 100	idem, tubos de metal	
		Monel	3 (máx.)
		Acetileno	20 a 25

Fonte: (TELLES, 1999)

Espessura de parede dos tubos

Segundo tabela da norma, a tensão admissível para o aço carbono ASTM A53 Grau A é de 12350 psi, à uma temperatura de 300 °C. Para esta temperatura, os gases de exaustão saem pela chaminé do forno WFG à uma pressão de 1 bar (14,5 psi), porém, com o redirecionamento do fluxo, é esperado um aumento desta pressão.

Por motivos de segurança, assume-se que a pressão será aumentada em dez vezes. Feita esta consideração e aproximando o diâmetro médio para o diâmetro externo, tem-se para a equação (3.4):

$$t_{\min} = \frac{145 \cdot 20}{2(12350 \cdot 0,8 + 20 \cdot 0,4)} + C$$

O resultado acima indica que, mesmo considerando uma pressão de trabalho maior que a inicial e uma eficiência de solda baixa (0,8), a espessura do tubo ainda não atinge o valor mínimo para tubulações comerciais mostradas no Anexo F.

Segundo conceitos encontrados no item 4.2 do livro "Tubulações Industriais - Cálculo" de Silva Telles, em falta de outros dados, é usual adotar-se para tubulações de aço-carbono um valor mínimo de 1,2 mm para a margem de corrosão. Sabendo

que as linhas estarão isoladas e não haverá condensação ácida, o grau de corrosão não será elevado, com isso, será adotada uma espessura extra de 1,5 mm:

$$t_{\text{mín}} = 3,8 + 1,5 = 5,3 \text{ mm}$$

Mesmo com a adição da espessura de corrosão, o valor encontrado ainda não é comercialmente produzido. Segundo (TELLES, 1999), sempre que a espessura calculada resultar em um valor inferior ao comercial, pode-se adotar espessuras mínimas:

- Diâmetros nominais até 1 ½", inclusive: série 80.
- Diâmetros nominais de 2" a 12", inclusive: série 40.
- Diâmetros nominais de 14" ou maiores: 9 mm (3/8").

Com isso, como a tubulação escolhida possui diâmetro de 20", sua espessura deve ser de no mínimo 9 mm. A partir da tabela comercial para tubos do Anexo F, foi adotada a espessura de 9,52 mm (3/8"), série 20 (STD).

Comprimento total da tubulação

Utilizando a planta baixa da fábrica (Anexo A) e o desenho tridimensional (Anexo H), foi possível calcular o comprimento total da tubulação. No Anexo G tem-se a vista superior da tubulação, mostrando cada um dos quatro trechos:

- Trecho 1: comprimento de 1149,56 mm;
- Trecho 2: comprimento de 18664,99 mm;
- Trecho 3: comprimento de 15993,11 mm;
- Trecho 4: comprimento de 9730 mm;

O desenho tridimensional da tubulação, indica que a maior parte dela está contida apenas no plano horizontal (XY), porém, há um trecho vertical (na direção Z) com 3800 mm de comprimento.

Trecho 5: comprimento de 3800 mm.

A partir da soma dos valores acima, é obtido um comprimento total para a tubulação igual a 50 m. Esta tubulação sai da chaminé do forno WFG de um ponto há 10 m do solo, acima da tubulação de gás natural. Chegando próximo ao atomizador, ela sofre uma elevação de aproximadamente 4 m. Esta elevação no final do trecho visa a retirada de qualquer umidade extra no ar, fazendo com que apenas o ar seco e quente entre no atomizador.

A elevação da tubulação foi calculada levando em consideração a altura do ponto de entrada desejado no atomizador, a 14 m do chão de fábrica, conforme dimensões mostradas no Anexo B. Tanto os desenhos em 2D quanto os desenhos em 3D foram feitos com o auxílio do software AutoCAD 2023 (AUTOCAD, 2022).

Espessura de isolamento térmico

Todos os isolamentos térmicos têm por finalidade geral reduzir as trocas de calor da tubulação com o meio ambiente. Eles podem ser usados por diversas razões, como por exemplo (TELLES, 2001):

- Motivo econômico: as perdas para o exterior representam um desperdício da energia, com isso o emprego do isolamento térmico resulta em uma economia;
- Motivo de serviço: manter o fluido em uma determinada temperatura ou para conseguir que ele chegue ao destino com a temperatura desejada;
- Proteção pessoal: evitar queimaduras em alguém que se encoste na tubulação ou para evitar o desconforto da excessiva irradiação de calor.

Como a tubulação ficará suspensa à uma altura acima de 10 m, pode-se desconsiderar o motivo de proteção pessoal, já que não haverá funcionários nos arredores. Porém, é desejado que o fluido perca o mínimo de calor possível para o ambiente e chegue ao destino com a maior temperatura possível, com isso, o isolamento térmico será empregado por dois motivos: de serviço e econômico.

A espessura adotada para um isolamento térmico deveria, teoricamente, resultar de cálculos feitos. Entretanto, na prática, raramente este valor é determinado assim. Para a grande maioria dos casos adotam-se simplesmente as espessuras já consagradas pelo uso e fornecidas em tabelas de diversos autores, como a

exemplificado na Figura 16, retirada da norma N-550 da Petrobrás (TELLES, 2001). A partir dela, é encontrado o valor de 89 mm para a espessura de isolamento térmico:

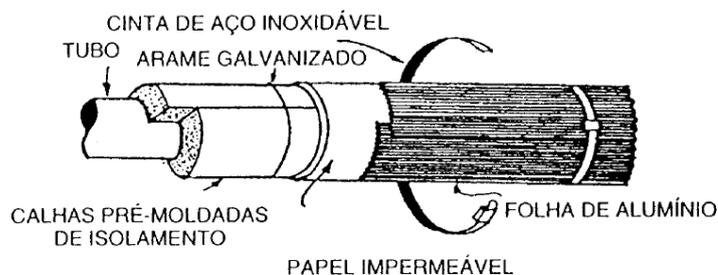
Figura 16 – Espessura para isolamento térmico

Espessura do isolamento térmico da tubulação (mm) Hidrossilicato de cálcio									
Diâmetro nominal (pol.)	Temperatura de operação da tubulação (°C)								
	75	100	125	150	175	200	250	300	350
20	25	38	51	51	63	63	76	89	102

Fonte: N-550 Petrobrás (TELLES, 2001)

O hidrossilicato de cálcio será adotado como material isolante. Além de suportar temperaturas até 1000 °C, ele possui uma boa resistência à água e ao fogo (TELLES, 2001). Para proteger o isolamento da chuva, umidade e de sobrecargas externas, serão colocadas chapas de alumínio corrugado revestido internamente com papelão kraft impermeável, como visto na Figura 17 abaixo:

Figura 17 – Configuração de revestimento térmico da tubulação



Fonte: (TELLES, 2001)

Vão entre suportes

O cálculo do vão máximo admissível entre os suportes de uma tubulação é feito aproximando-a para uma viga horizontal sujeita aos vários pesos e sobrecargas que estejam atuando. Entretanto, na rotina usual dos projetos, o vão entre suportes costuma ser calculado previamente para as combinações mais usuais de diâmetros, espessuras, materiais e temperaturas de tubos. Estes valores podem ser encontrados em tabelas e são válidos para qualquer projeto. Assim, o cálculo direto do vão entre

suportes limita-se, na prática, aos casos de tubulações que não se enquadrem nas tabelas existentes (TELLES, 1999).

A partir da tabela de vão entre suportes retirada da norma N-46 da Petrobrás pode-se notar que o vão máximo permitido neste caso é de 11,1 m. A Figura 18 abaixo mostra o trecho retirado da tabela, considerando uma tubulação com diâmetro de 20", com revestimento térmico e operando a 300 °C:

Figura 18 – Vãos entre suportes para tubos de aço carbono

DIÂMETRO NOMINAL	ESPESSURA (SÉRIE OU POL.)	TUBOS SEM ISOLAMENTO TÉRMICO	TUBOS COM ISOLAMENTO TÉRMICO		
			LIMITES DE TEMPERATURA		
			ATÉ 200°C	ATÉ 300°C	ATÉ 500°C
VÃO MÁXIMO (METROS)					
20	3/8"	13,1	12,7	11,1	9,8
	1/2"	14,6	14,1	12,5	11,0

Fonte: N-46 Petrobrás (TELLES, 2001)

4.3.3 Acessórios

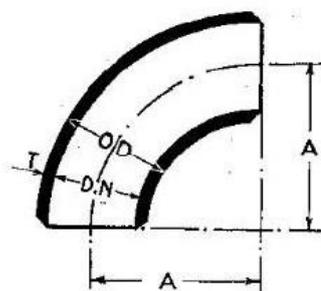
Os acessórios usuais de tubulação raramente necessitam ser calculados. Na maioria das vezes essas peças são elementos padronizados, comprados prontos, e cujas pressões admissíveis de trabalho são especificadas pelas normas e, portanto, previamente conhecidas (TELLES, 1999).

Para este projeto serão adotados alguns acessórios como curvas, purgadores, válvulas e suportes. Porém, dentre eles, não serão necessários dispositivos de proteção contra elevação de pressão no sistema de tubulações, já que os equipamentos envolvidos (WFG e ATM 18) já possuem proteção e podem assegurar a tubulação conectada a eles.

Conexões

Para a tubulação em questão, são adotadas cinco conexões de 90° ("joelhos") que serão soldadas à tubulação. Segundo a norma ANSI B36.10, para um diâmetro nominal de 20", estas curvas devem ter o valor de raio de 762 mm, como indicado pela letra A na Figura 19 abaixo:

Figura 19 – Curva de 90°



Curva 90° N.º 109

Fonte: ANSI B36.10

Válvulas

É desejado manter a vazão de exaustão dos gases na tubulação de reaproveitamento, a fim de que toda a massa de ar quente seja transferida ao atomizador. Para isto, será instalada na chaminé do forno WFG uma válvula borboleta do tipo wafer, com 40" de diâmetro, fazendo com que todo o fluxo dos gases de exaustão seja redirecionado à tubulação de reaproveitamento em direção ao atomizador.

Além desta, também haverá outra válvula wafer, a ser instalada no início da tubulação de reaproveitamento, com diâmetro de 20", caso haja necessidade de controle de vazão e para evitar o fluxo no sentido contrário (ATM 18 para WFG). Estas duas válvulas devem atender a temperatura e a pressão de trabalho, além de serem acionadas de forma automática, devido à altura da tubulação.

Purgador

Além da elevação no final do trecho da tubulação, por precaução, também será instalado um purgador neste ponto. Ele terá o papel de eliminar qualquer quantidade de umidade excessiva que venha a se formar ao longo da tubulação.

Suportes

Como o diâmetro da tubulação de reaproveitamento é menor que o da chaminé do forno, é esperado um aumento na velocidade dos gases, o que pode acarretar em vibrações na tubulação. Além disto, o próprio peso dos tubos, cargas devidas a dilatações térmicas e atrito entre tubulação e suportes devem ser considerados.

Para o estudo da quantidade e do tipo dos suportes, serão considerados os seguintes trechos:

Trecho 1: comprimento de 1149,56 mm;

Trecho 2: comprimento de 18664,99 mm;

Trecho 3: comprimento de 15993,11 mm;

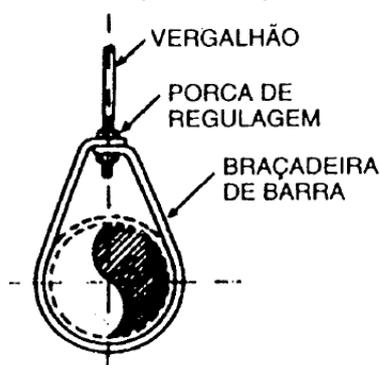
Trecho 4: comprimento de 9730 mm;

Trecho 5: comprimento de 3800 mm.

Para o trecho 1, devido ao seu pequeno comprimento, não serão considerados suportes, bem como o trecho 5. Para o trecho 2, que está rente à parede do galpão e acima da tubulação de gás, seriam necessários ao menos dois suportes, considerando o vão máximo de 11,1 m, porém, como segurança, serão considerados 6 unidades.

Para o trecho 3 serão adotados 5 suportes semimóveis, como os da Figura 20, já que este trecho é aéreo. Para o trecho 4, será adotado o mesmo critério do trecho anterior, empregando 3 suportes semimóveis.

Figura 20 – Exemplo de suporte semimóvel



Fonte: Adaptado de (TELLES, 2001)

Com isso, o balanço final de suportes será: 6 suportes de simples apoio, construídos em um pipe rack na parede do galpão e mais 8 suportes semimóveis para os trechos aéreos.

4.4 Estimativa de custos para implementação do projeto

O processo de fabricação de revestimentos cerâmicos tem um alto consumo de energia elétrica e principalmente térmica, juntos somam cerca de 30% do custo de produção. A segunda está relacionada ao processo de atomização (via úmida), secagem e na maior parte à queima (SOUZA et al., 2013).

Para a indústria de estudo deste trabalho, o maior interesse é nos ganhos econômicos com o projeto. Para isto, foram necessárias leituras diárias no painel de controle do atomizador, verificando uma média de consumo, além do estudo dos gases de exaustão que poderiam ser reaproveitados do forno WFG.

Após a decisão pela tecnologia de recuperação a ser adotada, foi necessário estimar os custos de implementação do projeto. Para isso, partindo do quadro resumo mostrado na Tabela 6 abaixo, foi feita uma pesquisa de mercado:

Tabela 6 – Informações gerais dos materiais de projeto

TUBULAÇÃO	
Material	Aço carbono ASTM A53 Grau A, preto, com costura
Diâmetro e série (schedule)	Ø 20", SCH 20
Comprimento total	50 m
ISOLAMENTO TÉRMICO	
Chapas de alumínio	50 unidades (2000 x 1000 x 0,8 mm)
Hidrossilicato de cálcio	50 m (Tubos de 20" x 100 mm x 914 mm)
ACESSÓRIOS	
Conexões 90 °	5 unidades de 20" (soldadas)
Válvulas Borboleta Wafer	2 unidades (uma de 40" e outra de 20")
Purgador	1 unidade (na mudança de elevação)
Suportes	6 fixos (piperack) e 8 semimóveis (trechos aéreos)

Fonte: o autor, 2022.

Custos dos materiais

Para estimar os custos dos materiais foi realizada uma pesquisa com várias em- presas, os valores mostrados na Tabela 7 abaixo são resultado da média encontrada no mercado:

Tabela 7 – Pesquisa de mercado para materiais

CUSTOS DE MATERIAIS			
MATERIAL	QTDE	VALOR UNITÁRIO	VALOR TOTAL
Tubo de Aço ASTM A53 20" x 3/8" x 6 m	9 un	R\$ 12.500,00	R\$ 112.500,00
Tubo de silicato de cálcio 20" x 100 mm x 914 mm	50 m	R\$ 750,00	R\$ 37.500,00
Chapa de alumínio 2000 x 1000 x 0,8 mm	50 un	R\$ 280,00	R\$ 14.000,00
Válvula borboleta wafer 20"	1 un	R\$ 60.000,00	R\$ 60.000,00
Válvula borboleta wafer 40"	1 un	R\$ 180.000,00	R\$ 180.000,00
Purgador	1 un	R\$ 5.000,00	R\$ 5.000,00
Joelho 90°	5 un	R\$ 10.000,00	R\$ 50.000,00
TOTAL			R\$ 459.000,00

Fonte: o autor, 2022.

O custo total de materiais pode variar de região para região, pois os valores de frete para compras fora do estado não foram considerados nesta pesquisa. Além disto, os preços mostrados são de maio de 2022.

Custos de serviço

Para levantamento dos custos envolvendo os serviços também foi feito um orçamento com uma empresa especializada. Considerando um mês com 21 dias úteis, foram obtidos os valores mostrados na Tabela 8 abaixo:

Tabela 8 – Pesquisa de mercado para serviços

CUSTOS DE MATERIAIS			
MATERIAL	TEMPO	VALOR DIÁRIA	VALOR TOTAL
Mão de obra (4 operários)	2 meses	R\$ 1.600,00	R\$ 67.200,00
Aluguel de Munck para trabalhos em altura	2 meses	R\$ 1.200,00	R\$ 50.400,00
MATERIAL	QTDE	VALOR UNITÁRIO	VALOR TOTAL
Fabricação e instalação de <i>piprack</i>	1 un	R\$ 16.800,00	R\$ 16.800,00
Fabricação e instalação de suportes	8 un	R\$ 1.200,00	R\$ 9.600,00
TOTAL			R\$ 144.000,00

Fonte: o autor, 2022.

Custos de projeto

Os custos para elaboração de projeto envolvem o conhecimento técnico do engenheiro que, orientando-se pelas normas e utilizando suas habilidades, estuda todo o cenário e determina o que será necessário para implementação da tubulação. Estes custos se mostraram bastante relativos e foram estimados como sendo 10% do valor total (serviços e materiais). Assim, o valor de projeto sairia por volta de R\$ 60.000,00.

Custos totais

Fazendo a soma de todos os valores anteriores, tem-se que o custo estimado para implementação do projeto seria de R\$ 663.000,00.

4.5 Cálculo do tempo de retorno do investimento

Como calculado no item 4.2.2, com a implementação do sistema de recuperação, poderá ocorrer uma redução de 55% na demanda de combustível pelo atomizador. Isso significa que ele deixaria de consumir 105 m³/h e passaria a consumir 46,9 m³/h, ou seja, a economia seria de 58,1 m³/h.

A partir do site da Copergás (COPERGAS, 2022) tem-se que o preço médio do m³ de gás natural é de R\$ 3,50 atualmente. A partir disto, é possível fazer uma estimativa de quantos reais serão economizados ao longo do tempo, como mostrado na Tabela 9 abaixo:

Tabela 9 – Economia ao longo do tempo

CUSTOS DE MATERIAIS			
MATERIAL	TEMPO	VALOR DIÁRIA	VALOR TOTAL
Mão de obra (4 operários)	2 meses	R\$ 1.600,00	R\$ 67.200,00
Aluguel de Munck para trabalhos em altura	2 meses	R\$ 1.200,00	R\$ 50.400,00
MATERIAL	QTDE	VALOR UNITÁRIO	VALOR TOTAL
Fabricação e instalação de <i>piperack</i>	1 un	R\$ 16.800,00	R\$ 16.800,00
Fabricação e instalação de suportes	8 un	R\$ 1.200,00	R\$ 9.600,00
TOTAL			R\$ 144.000,00

Fonte: o autor, 2022.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, é possível concluir que a implementação do sistema de recuperação dos gases de exaustão proporcionará uma economia energética e financeira à empresa. A eficiência energética na indústria é uma tendência mundial e este trabalho procurou seguir o mesmo caminho, mostrando uma alternativa viável para redução do consumo de combustível fóssil (gás natural).

Após as análises termodinâmicas, procurou-se verificar qual seria a tecnologia mais adequada para utilização no reaproveitamento dos gases. Escolhendo a circulação direta de calor através de uma tubulação, foram estimados os custos totais, bem como o tempo de retorno do investimento. O custo total foi de R\$ 663.000,00 e o tempo de retorno de investimento de 4,5 meses, desta forma, o projeto apresentado se mostrou uma alternativa bastante atrativa para a indústria.

Este projeto, uma vez implementado, deverá proporcionar uma redução na demanda de gás natural pelo atomizador, porém, é aconselhável realizar um acompanhamento deste consumo após a instalação a fim de verificar, na prática, qual será a economia obtida. Além disso, sugere-se a ampliação da rede de recuperação de energia para toda fábrica, levando em consideração as perdas de calor em cada máquina térmica envolvida no processo. Esta ampliação poderá não só contribuir na redução do consumo de gás natural dos equipamentos, mas também poderá gerar energia elétrica, por exemplo, através do uso de um Ciclo Rankine Orgânico.

REFERÊNCIAS

ADOLPHO, C. M. B.; SAMPAIO, J. A.; MENEZES, C. T. B.; GEREMIAS, M. L.; ROSA, F. G. **Cerâmica - Eliane Revestimentos Cerâmicos SA**. Comunicação Técnica elaborada para o Livro Usina de Beneficiamento de Minérios do Brasil. Rio de Janeiro - RJ. 2002.

BARBA, A.; BELTÁN, V.; FELIU, C.; GARCIA, J.; GINÉS, F.; SÁNCHEZ, E.; SANZ, V. **Materias primas para la fabricación de soporte de baldosas cerámicas**. Instituto de Tecnologia Cerámica, p. 291, 1997.

BARBOSA, D. S.; SILVA, J. E. D.; MACHADO, R. A. F.; HOTZA, D. **Controle e automação na indústria cerâmica: Estudo de caso na fabricação de porcelanato no brasil**. *Cerâmica Industrial*, v. 13, n. 4, p. 0, 2008.

BASU, B.; BALANI, K. **Advanced Structural Ceramics**. [S.l.]: John Wiley Sons, Inc., 2011.

BOSA, A.; FERRO, A. S.; WANDERLIND, A.; PASINI, D.; PATRÍCIO, M. C.; TASSI, R.; MODESTO, C. D. O.; JR., A. D. N.; CARGNIN, M. **Influência do resíduo in natura das matérias-primas, carga de bolas e resíduo final no tempo de moagem via úmida em moinho de bolas**. *Cerâmica Industrial*, v. 12, n. 6, p. 0, 2007.

BUSTAMENTE, G. M.; BRESSIANI, J. C. **A indústria cerâmica brasileira**. *Cerâmica Industrial*, v. 5, n. 3, 2000.

CABRAL, M.; BOSCHIB, A. O.; MOTTA, J. F. M.; TANNO, L. C.; SINTONI, A.; COELHO, J. M.; CARIDADE, M. **Panorama e perspectivas da indústria de revestimentos cerâmicos no brasil**. *Cerâmica Industrial*, v. 15, n. 3, 2010.

CAGLAYAN, H.; SOHRET, Y.; CALISKAN, H. **Thermo-ecologic evaluation of a spray dryer for ceramic industry**. *Energy Procedia*, v. 144, p. 164–169, 2018.

COPERGAS. Dados do gás natural. 2022. Disponível em: <<https://www.copergas.com.br/produtos/>>.

EPE. Plano Nacional de Energia. 2020. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>>. Acesso em 15/08/2021.

EPE. Balanço Energético Nacional. 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>>. Acesso em 15/08/2021.

HEYWOOD, J. B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. 1st. ed. New York, USA: McGraw-Hill, 1988.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. 8. ed. New York, NY: Wiley, 2014.

MOTTA, J. F. M.; ZANARDO, A.; JUNIOR, M. C. **As matérias-primas cerâmicas. parte i: O perfil das principais indústrias cerâmicas e seus produtos.** Cerâmica Industrial, v. 6, n. 2, p. 0, 2001.

NANDI, V. D. S.; INOCENTE, J. M.; ZACCARON, A.; BERNARDIN, A. M. **Estudo do comportamento energético em forno túnel de cerâmica vermelha.** Cerâmica Industrial, v. 20, n. 5-6, p. 0, 2015.

NASSETTI, G. **Como melhorar a eficiência energética na indústria de revestimentos cerâmicos.** Cerâmica Industrial, v. 15, n. 1, p. 0, 2010.

OLIVEIRA, A. P. N. de; HOTZA, D. **Tecnologia de fabricação de revestimentos cerâmicos. 2. ed.** Florianópolis - SC: Editora UFSC, 2015.

PUKASIEWICZ, A. CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DO PARANÁ UNIDADE DE PONTA GROSSA **Tecnologia dos Processos de Fabricação IV Materiais Cerâmicos.** 2017.

RIBEIRO, M. J.; VENTURA, J. M.; LABRINCHA, J. A. **A atomização como processo de obtenção de pós para a indústria cerâmica.** Cerâmica Industrial, v. 6, n. 5, p. 0, 2001.

RIEDHAMMER. **Kilns for advanced materials.** 2022. Disponível em: <<https://riedhammer.sacmi.com/Riedhammer/media/RiedhammerBrochures/Technical-Ceramics-ING-TED-CIN-72-dpi.pdf>>. Acesso em 06/02/2022.

SACMI. **ATM SACMI.** 2022. Disponível em: <[https://sacmi.com/SacmiCorporate/media/ceramics/Catalogues/ATM-Sacmi-\(EN-IT-ES\).pdf](https://sacmi.com/SacmiCorporate/media/ceramics/Catalogues/ATM-Sacmi-(EN-IT-ES).pdf)>. Acesso em 06/02/2022.

SAPA, I. **Recuperação de calor residual na indústria cerâmica.** 108 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2013.

SCHWOB, M. R. V.; HENRIQUES, M.; SZKLO, A. **Technical potential for developing natural gas use in the brazilian red ceramic industry.** Applied Energy, v. 86, n. 9, p. 1524–11531, 2009.

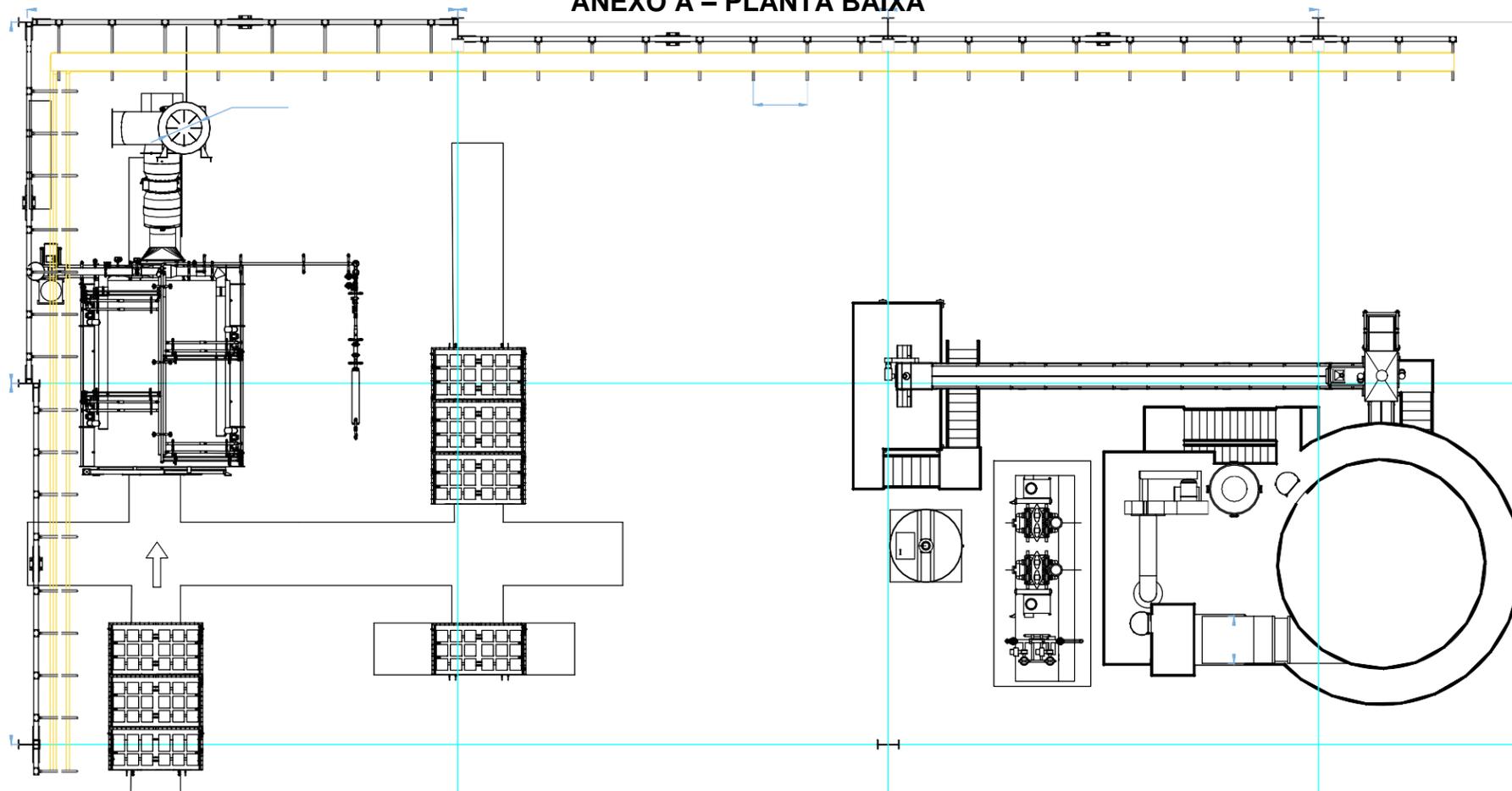
SOUZA, M. T.; PIVA, R. H.; PIVA, D. H.; MONTEDO, O. R. K. **Reaproveitamento de calor na indústria cerâmica.** Cerâmica Industrial, v. 18, n. 3, p. 0, 2013. TELLES, P. C. S. Tubulações Industriais: Cálculo. 9. ed. [S.l.]: LTC, 1999.

TELLES, P. C. S. **Tubulações Industriais: Materiais, projeto, montagem. 10. ed.** [S.l.]: LTC, 2001.

VALE, A. A. A. C. **Estudo da Recuperação de Calor Residual e sua Aplicação à Indústria Cerâmica.** 101 p. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2018.

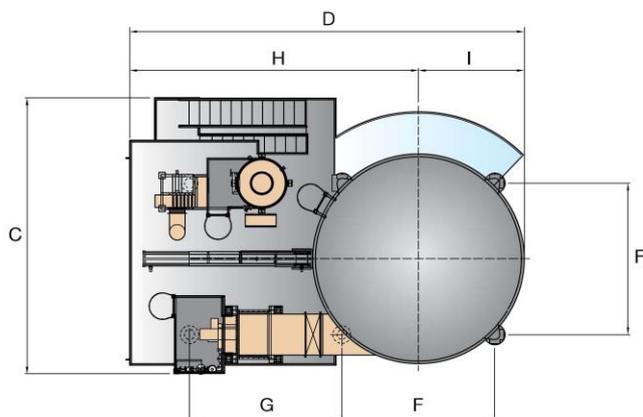
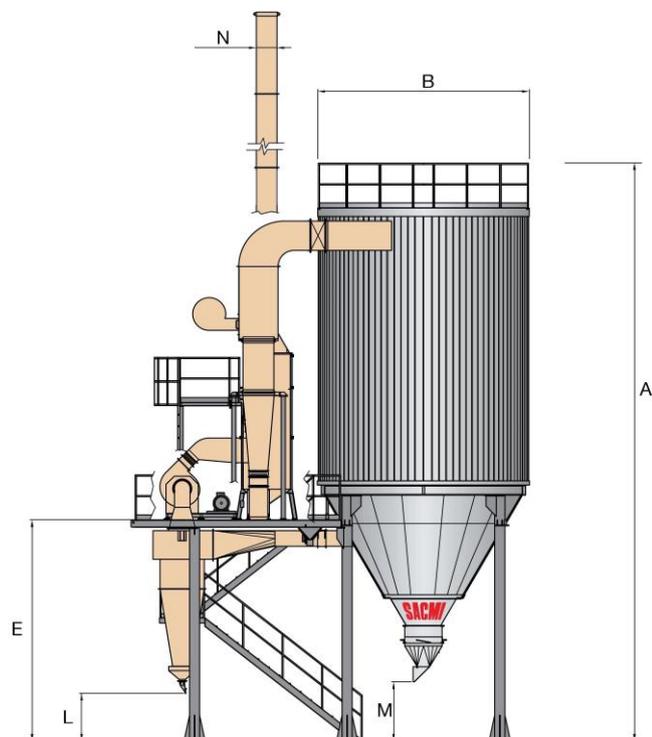
ÇENGEL, Y. A. **Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer: Fundamentals applications. 2. ed.** New York, NY: McGraw-Hill Companies, 2008.

ANEXO A – PLANTA BAIXA



- 1 - Chaminé de saída dos gases de exaustão do forno WFG;
- 2 - Pipe rack para suporte da tubulação de gás natural;
- 3, 4, 5 - Vagonetas com peças a serem queimadas;
- 6 - Viga em I para suporte do teto;
- 7 - Ponto de entrada dos gases quentes no atomizador.

ANEXO B – DIMENSÕES ATM 18



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	L	M	N
ATM 18	15000 16000 with lances	5800	7300	10650	6050	4140	3700	7750	2900	1200	1450	600

ANEXO C – RELATÓRIO GASES WFG



Tabela 10 - Resultados das amostragens.

CONCENTRAÇÕES DAS AMOSTRAGENS						
FONTE:	CHAMINÉ WFG					
Parâmetro	Média dos Resultados			VMP	Unidade	
Umidade	8,81			N.A	(%)	
Velocidade	3,6			N.A	m/s	
Vazão	6203			N.A	Nm ³ /h	
CO - Monóxido de Carbono	0,0004			N.A	% mol/mol ⁽¹⁾	
CO ₂ - Dióxido de Carbono	1,00			N.A	% mol/mol	
O ₂ - Oxigênio	10,23			N.A	% mol/mol	
NOx – Óxidos de nitrogênio	Resultados corrigidos a 3% de Oxigênio:					
	1ª Coleta	2ª Coleta	3ª Coleta	Média	VMP	Unidade
	702,27 ⁽³⁾	272,03	< 40 µg	282,71	320 ⁽²⁾	mg/Nm ³
	4ª Coleta	5ª Coleta	6ª Coleta			
	< 40 µg	< 40 µg	< 40 µg			
	7ª Coleta	8ª Coleta	9ª Coleta			
298,22	< 40 µg	277,87				

(1) 1 % mol/mol = 1 % vol = 10000 ppm.

(2) Padrões de emissão avaliados conforme **RESOLUÇÃO CONAMA Nº 382, de 26 de dezembro de 2006, ANEXO II**, para Potência térmica nominal (MW) menor que 70.

(3) Amostra descartada devido à não conformidade com o Critério de Chauvenet (Tabela Rc) com probabilidade de 95%.

N.A: Não aplicável

Elton José da Silva
Ambientalista
CREA 17.3.40350

Idvando Celso de Moura
Eng. Ambiental Sanitarista
Diretor de Processos
CREA: 0217927012

Página 13 de 40



Ambimet Monitoramentos Ambientais
Av. Mendonça Júnior, N.1040
Gruta de Lourdes, Maceió/AL
CEP: 57052-480 :: 82 3034.3449
ambimet@ambimet.com.br
ambimet.com.br

ANEXO D – DATOS TÉCNICOS ATM 18

	ATM 12	ATM 18	
Evaporated water maximum (for tableware production) Capacità evaporativa massima (per stoviglie) Capacidad evaporativa maxima (para vajillas)	1200 (670)	1800 (1000)	l/h
Total installed power* - Potenza totale installata* - Potencia total instalada*	42	59	kW
Total unit weight - Peso totale dell'impianto - Peso total de la instalación	25000	29000	kg
HEAT GENERATOR - GENERATORE DI CALORE - GENERADOR DE CALOR			
Thermal power - Potenza termica installata - Potencia térmica instalada	1050000	1500000	kcal/h
Burner electric fan power - Potenza elettroventilatore bruciatore - Potencia electroventilador quemador	1,5	3,0	kW
Pressing electric fan power - Potenza elettroventilatore premente - Potencia ventilador presurización	1,5	2,2	kW
Tower inlet air temperature (for tableware production °C 400+600) Temperatura aria entrata torre (per stoviglie °C 400+600) Temperatura aire entrada torre (para vajillas °C 400+600)	500+600	500+600	°C
SLIP PUMP - POMPA BARBOTTINA - BOMBA BARBOTINA			
Maximum delivery rate - Portata massima - Caudal máximo	3500	8000	l/h
Maximum pressure - Pressione massima - Presion maxima	30	30	bar
Power - Potenza - Potencia	7,5	15	kW
DRYING TOWER - TORRE ATOMIZZAZIONE - TORRE ATOMIZACIÓN			
Max. number of nozzles with crown- Nr. massimo ugelli con corona - Numero máx boquillas con corona	12	15	nr.
Max. number of nozzles with lances- Nr. massimo ugelli con lance - Numero máx boquillas con lanzas	12	14	nr.
Specific thermal consumption (for tableware production 950+1.100) Consumo termico specifico (per stoviglie 950+1.100) Consumo térmico específico (para vajillas 950+1.100)	700+850	700+850	kcal/l H ₂ O
Spray-dried powder temperature (for tableware production °C 40+70) Temperatura polvere atomizzata (per stoviglie °C 40+70) Temperatura polvo atomizado (para vajillas °C 40+70)	40+60	40+60	°C
Spray-dried powder moisture content (for tableware production % 2+3) Umidità polvere atomizzata (per stoviglie % 2+3) Humedad polvo atomizado (para vajillas % 2+3)	4+7	4+7	%
EXHAUST AIR - ARIA ESAUSTA - AIRE CONSUMIDO			
Main electric fan - Elettroventilatore principale - Electroventilador principal			
Flow rate - Portata - Caudal	12000	18000	m ³ /h (100 °C; 1 bar)
Power - Potenza - Potencia	30	37	kW
Pressure - Pressione - Presión	400	400	mm H ₂ O
Separating cyclones - Cicloni separatori - Ciclones separadores	1	1	nr.
Exhaust air temperature (for tableware production °C70+140) Temperatura aria in uscita (per stoviglie °C70+140) Temperatura aire a la salida (para vajillas °C70+140)	60+130	60+130	°C
DUST SEPARATOR - ABBATTITORE - ABATIDOR 100 et 30 mg/Nm³			
Minimum water consumption with re-circulation** Consumo minimo acqua con ricircolo** Consumo mínimo de agua con recirculación**	450	660	l/h
Water consumption without re-circulation Consumo acqua senza ricircolo Consumo de agua sin recirculación	10000	14000	l/h

* With 1 slip pump - Con 1 pompa barbotina - Con 1 bomba de barbotina

** Optional - Opzionale - Opcional

ANEXO E – DATOS TÉCNICOS WFG

KFG/WFG

Chamber Kiln / Shuttle Kiln
 Kammerofen/Herdwagenofen
 Horno de Cámara / Horno Intermitente



Application Brennprozess Aplicación	Biscuit, Glost and Once firing of Tableware Glüh-, Glasur- und Einmalbrand von Geschirr Cocción bizcocho, esmalte y Monococción de Vajillas
Atmospheres Brennatmosphäre Atmósferas	Oxidizing, reducing and neutral Oxidierend, reduzierend, neutral Oxidante, reductora y neutra
Possible kiln size - Mögliche Ofengröße Posible tamaño del horno	5 - 20 m ³
Average loading density* - Mittlere Beladedichte* Densidad media de carga*	55 - 160 kg/m ³
Heating medium Beheizungsart Medio de calentamiento	Natural gas or LPG Erd- oder Flüssiggas Gas natural o LPG
Maximum temperature - Maximaltemperatur Temperatura máxima	1420 °C
Firing temperature - Brenntemperatur Temperatura de cocción	950 - 1420 °C
Approximate firing cycle - Brennzyklus (ca.) Ciclo de cocción aproximado	11 - 24 h

* Depending on product mix and loading conditions

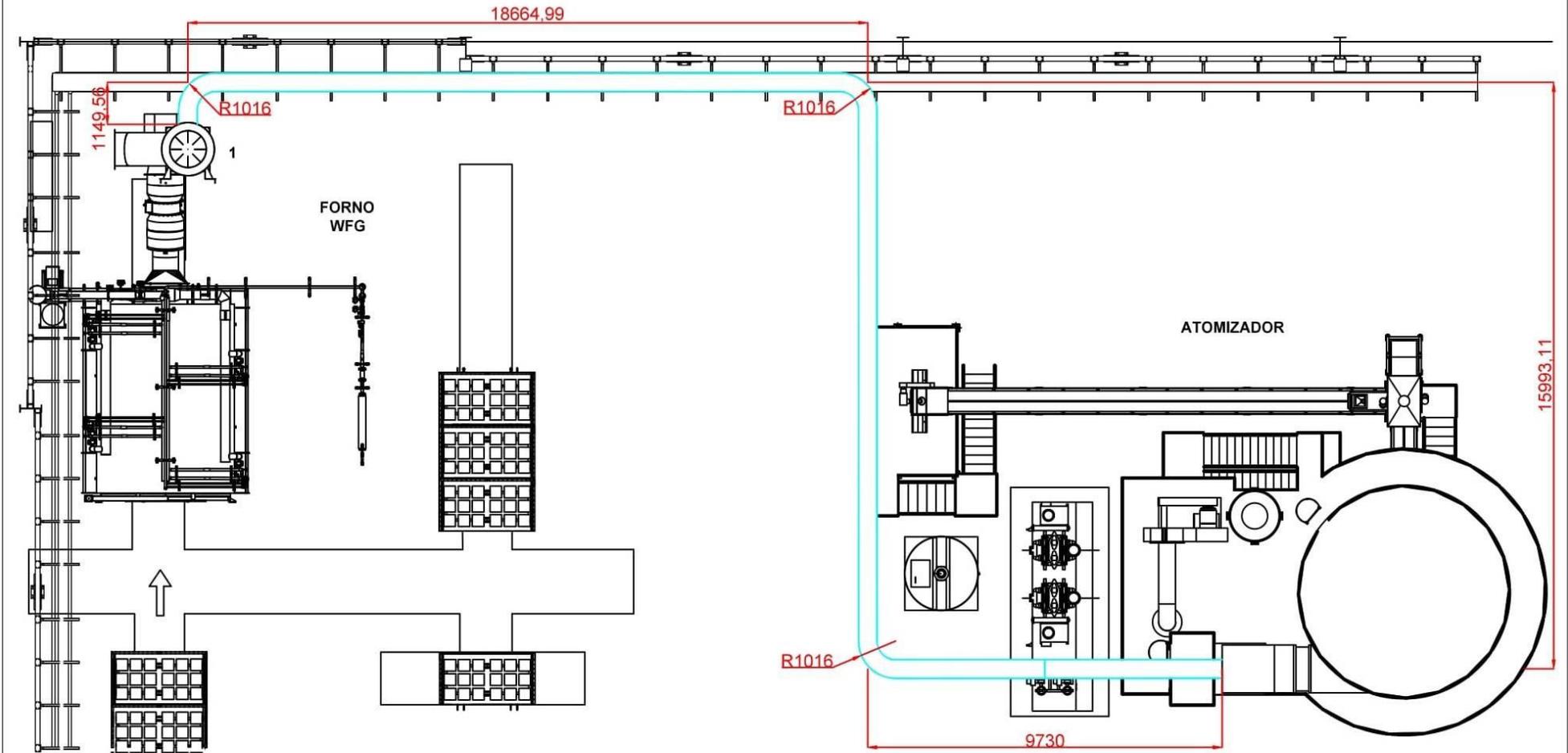
* Abhängig von Produktmix und Beladebedingungen

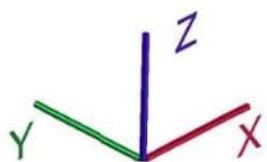
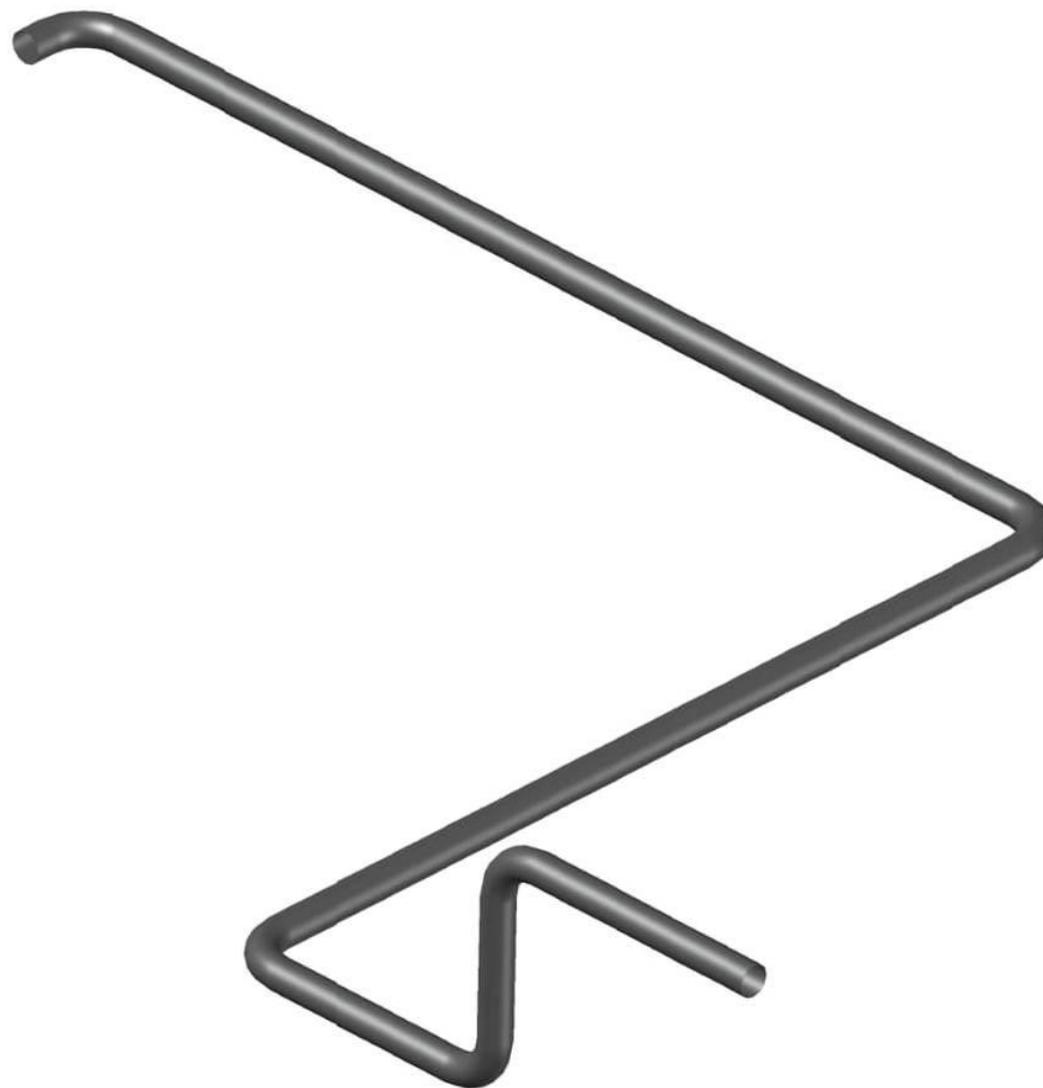
* Depende de la mezcla de productos y de las condiciones de carga

ANEXO F – TABELA DE TUBOS

Norm. (pol)	Diâmetro		Espessura Parede (mm)	Peso (kg/m)	Denom. API 5L	Schedule Nº
	Externo (mm)	Interno (mm)				
18"	457,0	444,30	6,35	70,57	-	10
		441,16	7,92	87,71	-	20
		437,96	9,53	105,16	STD	-
		434,74	11,13	122,38	-	30
		431,60	12,70	139,15	XS	-
		428,46	14,27	155,80	-	40
		418,90	19,05	205,74	-	60
		409,34	23,83	254,55	-	80
		398,28	29,36	309,62	-	100
		387,16	34,93	363,56	-	120
		377,66	39,67	408,26	-	140
		366,50	45,24	459,37	-	160
		20"	508,0	495,30	6,35	78,55
488,96	9,52			117,02	STD	20
482,60	12,70			155,12	XS	30
477,82	15,09			183,42	-	40
466,76	20,62			247,83	-	60
455,62	26,19			311,17	-	80
407,98	50,01			564,81	-	160
22"	559,0	546,30	6,35	86,54	-	10
		539,96	9,52	129,00	STD	20
		533,60	12,70	171,09	XS	30
		527,24	15,88	212,69	-	-
		514,56	22,22	294,13	-	60
		501,86	28,57	373,71	-	80
		489,16	34,92	451,30	-	100
		476,46	41,27	526,90	-	120
		463,76	47,62	600,52	-	140
		451,06	53,97	672,14	-	160
24"	610,0	597,30	6,35	94,53	-	10
		590,96	9,52	140,97	STD	20
		584,60	12,70	187,06	XS	-
		581,46	14,27	209,64	-	30
		575,04	17,48	255,41	-	40
		560,78	24,61	355,26	-	60
		548,08	30,96	442,08	-	80
		532,22	38,89	547,71	-	100
		517,96	46,02	640,03	-	120
		505,26	52,37	720,15	-	140

ANEXO G – TUBULAÇÃO 2D



ANEXO H – TUBULAÇÃO 3D

ANEXO I – CÁLCULOS

Conversão de unidade da vazão de saída dos gases de exaustão do WFG

$$\frac{6203}{273} = \frac{\dot{V}_2}{273 + 300} \quad \therefore \dot{V}_2 = \frac{573 \times 6203}{273} \quad \therefore \dot{V}_2 = 13019,5 \text{ m}^3/\text{h} = 3,62 \text{ m}^3/\text{s}$$

Análise energética dos gases no forno WFG

$$\dot{Q}_{vc} = 1,27 \times 3,62 \times (1515,42 - 300,19) = 5586,9 \text{ kW}$$

Análise energética dos gases no ATM 18 - Cenário 1

$$\dot{Q}_1 = 1,27 \times 3,62 \times (400,98 - 199,97) = 924,12 \text{ kW}$$

Análise energética dos gases no ATM 18 - Cenário 2

$$\dot{Q}_2 = 1,27 \times 3,62 \times (300,19 - 199,97) = 460,75 \text{ kW}$$

Cálculo da vazão volumétrica de combustível antes do projeto

$$\dot{V}_{comb} = \frac{\dot{Q}_{\text{útil}}}{\rho_{comb} PCI} = \frac{924,12}{0,78 \times 45594,9} = 0,0259 \text{ m}^3/\text{s} = 93,5 \text{ m}^3/\text{h}$$

Análise energética dos gases no ATM 18 - Cenário 3

$$\dot{Q}_3 = \dot{Q}_1 - \dot{Q}_2 = 924,12 - 460,75 = 463,37 \text{ kW}$$

Cálculo da vazão volumétrica de combustível após o projeto

$$\dot{V}_{comb} = \frac{\dot{Q}_{\text{útil}}}{\rho_{comb} PCI} = \frac{463,37}{0,78 \times 45594,9} = 0,013 \text{ m}^3/\text{s} = 46,9 \text{ m}^3/\text{h}$$