

PROJETO CONCEITUAL DE INCINERADOR DE PEQUENO PORTE PARA RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS

Ronaldo Boita Possamai¹
Maria Regina Thomaz²

RESUMO

A incineração é uma alternativa para destinação de resíduos sólidos e líquidos, baseado na combustão dos resíduos em altas temperaturas, com capacidade de redução de volume, massa e características tóxicas. O processo depende de equipamentos específicos para esse fim chamados de incineradores, e no Brasil há poucas plantas de incineração e sendo de grande porte, dificultando o acesso a esse processo de destinação de resíduos. O presente estudo tem como objetivo o projeto conceitual de um incinerador de pequeno porte, podendo apresentar menores custos de implantação e operação, buscando processar pequenas quantidades de resíduos de uma indústria metal mecânica da região Oeste de Santa Catarina. Foram definidas as características básicas do projeto, os materiais para construção do equipamento e definido o processo de incineração para os principais resíduos dessa indústria, sendo eles, poliuretano, madeira e papelão. Além de trazer dados relativos à combustão dos resíduos estudados, como a relação ar-combustível para o poliuretano de 7,76:1 e 5,09:1 para a madeira/papelão, e com isso determinando os fluxos mássicos de ar de 72,8 kg/h e 104,98 kg/h, respectivamente. Demonstrando a capacidade térmica do poliuretano de 50 kW/h e da madeira/papelão de 57 kW/h, de modo que, com os resultados obtidos é possível verificar a capacidade do incinerador de pequeno porte atender a demanda da indústria e além de ter a possibilidade de recuperação da energia térmica gerada pelos resíduos.

Palavras-chave: Incinerador. Resíduos. Poliuretano.

1 INTRODUÇÃO

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), em 2022 foram geradas mais de 81,8 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil. Do total de RSU coletados, 60% foram destinados para aterros sanitários tratando-o de forma adequada, enquanto 39% seguem para lixões e aterros controlados, sendo inadequada a disposição nestes locais (Abrelpe, 2022).

Embora países com melhores condições financeiras e com o desenvolvimento industrial mais avançado produzam mais resíduos, estes países possuem uma diversificação maior na disposição, tratamento e aproveitamento dos resíduos, onde os processos de reciclagem, compostagem e incineração cobrem boa parte da matriz de disposição dos resíduos, e somente o que não possui mais finalidade econômica e para reaproveitamento é destinado aos aterros sanitários (EPA, 2018; Eurostat, 2021).

¹ Graduando em Engenharia Mecânica (UCEFF, 2023). E-mail: ronaldo.boita@gmail.com.

² Mestre em Tecnologia e Gestão da Inovação – (UNOCHAPECÓ) - E-mail: maria@uceff.com.br.

Neste contexto, o tratamento de resíduos sólidos através da incineração vem ganhando espaço nos últimos anos, principalmente nos países mais desenvolvidos. A utilização desse processo se deve principalmente pela redução de massa e volume dos resíduos. E a incineração dos resíduos com alto poder calorífico permite a recuperação de energia tornando a incineração uma alternativa interessante para a disposição de resíduos sólidos (Psomopoulos; Bourka; Themelis, 2009).

Assim como Margallo et al. (2012) apontam que o principal objetivo da incineração de resíduos sólidos é a redução da massa e do volume dos resíduos, bem como a destruição de substâncias perigosas, e que ao longo do processo permite-se a recuperação de conteúdo químico, mineral e metálico como também de energia.

Neste sentido, este projeto parte da necessidades de pequenas e médias empresas industriais de destinar os resíduos sólidos gerados em seu processo produtivo, e dado o menor volume de resíduos, a alternativa da incineração através de um incinerador de pequeno porte pode tratar-se de uma opção viável a fim de eliminar os resíduos e melhorar a gestão desses resíduos, portanto questiona-se: **é possível através de um incinerador de pequeno porte eliminar os resíduos sólidos de uma indústria metal mecânica?**

Dessa forma, o objetivo geral do estudo é desenvolver um projeto conceitual de um equipamento de incineração de pequeno porte capaz de eliminar os resíduos sólidos gerados em uma indústria metal mecânica, demonstrando as características do projeto desenvolvidas neste artigo.

Assim também, com os objetivos específicos busca-se identificar características do projeto informacional de um incinerador de resíduos industriais; definir as dimensões e capacidades do incinerador para atender as necessidades da indústria metal mecânica; e avaliar os resíduos sólidos da indústria metal mecânica para estimar a câmara de combustão.

Considerando o crescimento industrial e a responsabilidade das empresas com seus resíduos, a incineração pode ser uma opção rápida e eficaz para a eliminação dos resíduos. Entretanto, no Brasil há poucos postos de incineração de forma a inviabilizar esse processo de destinação para pequenas e médias empresas. Portanto, um incinerador dimensionado para essas necessidades de menor porte pode ser uma solução de destinação para esses resíduos gerados na indústria, buscando um custo menor de implantação e operação capazes de suprir a necessidade da indústria e reduzindo os custos com essa destinação dos resíduos, além de colaborar ambientalmente de forma que esses resíduos não sejam dispensados de forma indevida no meio ambiente.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS

A gestão adequada dos resíduos sólidos é um desafio global, já que a quantidade de lixo produzido pela humanidade vem aumentando significativamente nas últimas décadas. Segundo dados da Organização das Nações Unidas (ONU), a produção mundial de resíduos sólidos urbanos foi estimada em 2,01 bilhões de toneladas em 2016, com previsão de aumento para 3,40 bilhões de toneladas em 2050 (ONU, 2018).

A gestão adequada dos resíduos sólidos envolve não apenas a coleta, mas também o tratamento e a disposição final dos materiais. Existem diversas tecnologias disponíveis para o tratamento dos resíduos sólidos, sendo que a escolha da tecnologia a ser adotada deve levar em consideração o tipo e a quantidade de resíduos gerados, bem como a disponibilidade de recursos e a legislação ambiental vigente (Brasil, 2010).

Além dos aspectos relacionados à gestão e tratamento dos resíduos sólidos, é importante destacar os diferentes tipos de materiais que compõem esses resíduos. De acordo com o PNRS, os resíduos sólidos são classificados através de sua origem e periculosidade e além dos resíduos sólidos urbanos (RSU), são considerados também oriundos da construção civil, industriais, dos serviços públicos de saneamento básico, dos serviços de saúde, dos serviços de transportes, agrossilvopastoris e da mineração (Brasil, 2010).

Em síntese, conforme Tavares et al (2019) aponta, a gestão adequada dos resíduos sólidos é fundamental para minimizar os impactos ambientais e à saúde pública decorrentes de sua geração e disposição inadequada. A conscientização da população e a adoção de medidas preventivas são igualmente importantes para garantir uma gestão sustentável desses materiais.

2.2 INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Uma das tecnologias utilizadas no tratamento e disposição final de resíduos sólidos é a incineração, que consiste na queima dos resíduos em altas temperaturas, com o objetivo de reduzir o volume e o peso dos resíduos e minimizar os impactos ambientais (ABNT, 2014).

A incineração de resíduos sólidos é um processo que tem sido utilizado em muitos países, principalmente em regiões densamente povoadas, como forma de lidar com a crescente quantidade de resíduos gerados. A queima dos resíduos é realizada em equipamentos chamados incineradores, visto no Quadro 1, que podem ser classificados em diferentes tipos, dependendo

da tecnologia empregada, como fornos rotativos, câmaras de combustão fixa e leitos fluidizados (Dempsey E Oppelt, 1999).

Quadro 1 – Principais tipos de incineradores analisados no estudo.

Tipo de Incinerador	Descrição
Forno rotativo	Incineradores de fornos rotativos são os mais versáteis, devido ao fato de serem aplicáveis à destruição de resíduos sólidos secos ou líquidos. O forno rotativo é um cilindro horizontal revestido internamente com refratários, que é montado com uma pequena inclinação. A rotação do forno induz o transporte do resíduo através do forno e melhora a mistura (homogeneização) do resíduo a ser queimado.
Câmaras fixas	Incineradores de câmaras fixas, também chamados de ar controlados. Essas unidades empregam processos de combustão de dois estágios, muito parecidos com os fornos rotativos. O resíduo é empurrado ou bombeado para dentro da câmara primária, é queimado com menor excesso ar e posteriormente passa para câmara secundária onde um queimador completa a queima e há injeção de maior quantidade de excesso de ar.
Leito fluidizado	Incineradores de leito fluidizado podem ter projetos de leito do tipo circulante ou borbulhante. Os dois tipos consistem em um vaso de combustão simples revestido de refratários e parcialmente cheios de areia, alumina ou outro material semelhante. Os incineradores de leito fluidizado são primariamente utilizados para líquidos, lodos ou materiais sólidos fragmentados. O ar de combustão é suprido através de um distribuidor, localizado na base do leito (leito circulante).
Injeção líquida	São aplicáveis quase que exclusivamente para resíduos líquidos bombeáveis. Essas unidades são usualmente simples cilindros revestidos internamente de refratários (verticais ou horizontais) e equipados com um ou mais queimadores. Os resíduos líquidos são injetados através dos queimadores, atomizados em pequenas gotículas e queimados em suspensão.

Fonte: Adaptado de Dempsey e Oppelt (1999).

De acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), a incineração de resíduos sólidos urbanos é uma das tecnologias que tem aumentado sua utilização no Brasil para a disposição final de resíduos, onde o tratamento de embalagens de defensivos agrícolas tiveram uma evolução passando de cerca de 37,4 mil toneladas processadas em 2012 para mais de 53,5 mil toneladas em 2021, das quais 92,1% foram enviadas para reciclagem e 7,9% para incineração, um aumento de aproximadamente 7% em relação ao ano de 2020 (Abrelpe, 2022).

No entanto, é importante ressaltar que a incineração apresenta alguns desafios, como a emissão de poluentes atmosféricos e a geração de cinzas e escórias. E a mitigação dos impactos ambientais da incineração de resíduos sólidos é abordada por Andrade e Ferreira (2011), a incineração é uma tecnologia viável para a gestão de resíduos, desde que seja utilizada em conjunto com outras tecnologias e que haja um controle efetivo das emissões atmosféricas.

2.2.1 Poder Calorífico de Alguns Resíduos da Indústria

O poder calorífico é um dos principais parâmetros a serem considerados na incineração de resíduos sólidos, já que afeta tanto o desempenho dos equipamentos quanto a quantidade de energia gerada. O poder calorífico dos resíduos sólidos industriais pode variar significativamente de acordo com sua composição e origem. De acordo com Prasad, Ranjan, Srivastava (2018), o poder calorífico dos resíduos pode variar de 1.500 a 9.500 kcal/kg, dependendo de sua origem, resíduos de madeira, papel e papelão geralmente têm um poder calorífico mais alto do que resíduos de plástico e borracha, como visto no Quadro 2.

Quadro 2 – Materiais combustíveis e seu poder calorífico inferior que foram verificados no estudo.

MATERIAIS COMBUSTÍVEIS	PODER CALORÍFICO INFERIOR, PCI (kcal/kg)
Álcool Etílico Hidratado	6.750
Gasolina Automotiva	10.400
Óleo Diesel	10.100
Gás Liquefeito de Petróleo	11.100
Óleo Combustível	9.590
Lenha	3.100
Carvão Vegetal	6.460
Coque de Carvão Mineral	6.900
Papel / papelão	4.050
Polietileno	10.400
Poliestireno	9.400
Polipropileno	10.150
Poliuretano	5.500
Poliuretano (espuma)	6.100

Fonte: Adaptado de Buchanan, 2001; EPE, 2017.

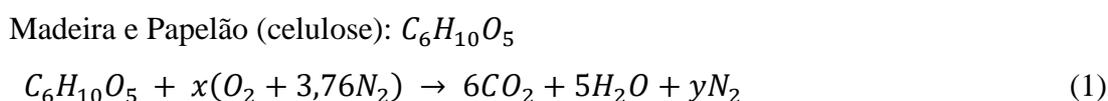
O poder calorífico dos resíduos é um dos principais fatores que determinam a eficiência energética da incineração. Como destacado por Wang et al. (2018), o poder calorífico pode ser usado para prever a quantidade de energia que pode ser gerada pela incineração. De acordo com Zhu et al. (2019), a incineração de resíduos com poder calorífico superior a 3.000 kcal/kg pode gerar eletricidade a um custo competitivo com outras fontes de energia.

2.2.2 Estequiometria da Combustão

Na maioria dos processos industriais de combustão, a utilização do ar ambiente como fonte de oxigênio é uma prática predominante. Para efetivamente projetar e controlar equipamentos de combustão, é essencial compreender as exigências de ar para o processo, assim como a composição e o volume dos produtos resultantes da combustão. Dessa forma, a estequiometria química é um método importante capaz de fornecer os dados fundamentais para os cálculos relacionados à combustão. Conforme enfatizado por Bizzo e Sánchez (2003), essa

abordagem permite uma abordagem sistemática e informada na concepção e operação de sistemas de combustão industriais.

De acordo com Bizzo e Sánchez (2003), a determinação da relação estequiométrica de ar/combustível, a quantidade "x" representa o número de moléculas de O₂ necessárias para a combustão completa. No contexto da combustão com ar atmosférico, cada molécula de oxigênio do ar implica obrigatoriamente 3,76 moléculas de nitrogênio (N₂), considerando a relação de volumes entre esses dois gases na composição do ar atmosférico. O cálculo da necessidade de oxigênio "x" é realizado por meio do balanceamento dos átomos de oxigênio, conforme exemplificado no caso da celulose, visto na equação (1):



No processo de modelagem e análise da combustão de diferentes combustíveis, um parâmetro usado para indicar de forma padronizada a quantidade de ar e combustível presente na combustão é a razão ar-combustível.

A razão ar-combustível, conforme o nome diz, é a razão entre a quantidade de ar e a quantidade de combustível presentes em uma reação. Tal razão pode considerar tanto a base mássica (AC) quanto a base molar (AC); seus cálculos são realizados seguindo as equações (2) e (3), respectivamente:

$$AC = \frac{m_{ar}}{m_{combustível}} \quad (2)$$

$$\overline{AC} = \frac{n_{ar}}{n_{combustível}} \quad (3)$$

Onde m representa a massa e n a quantidade de mols.

Desenvolvendo as equações (2) e (3), é possível encontrar a relação entre ambas as variáveis como sendo:

$$AC = \frac{m_{ar}}{m_{combustível}} \rightarrow \overline{AC} = \frac{n_{ar}M_{ar}}{n_{combustível}} \quad (4)$$

Onde M_{ar} representa a massa molar do ar (28,97 kg/kmol) e $M_{combustível}$ representa a massa molar do combustível.

É comum encontrar também em alguns manuais e handbooks a recíproca da razão ar-combustível, que é a razão combustível-ar. Esse parâmetro é obtido apenas invertendo-se as equações (2), (3) e (4).

No estudo da relação ar-combustível em uma reação, outro conceito importante surge: o ar teórico. A quantidade de ar teórico representa a quantidade mínima necessária para que a combustão completa apresentada na equação (1) aconteça para determinado hidrocarboneto.

2.3 PROJETO DE PRODUTO

O projeto de produtos é um processo essencial na criação de novos produtos que atendam às necessidades dos consumidores. Segundo Ulrich e Eppinger (2015), esse processo envolve uma série de etapas que vão desde a identificação das necessidades do consumidor até a fabricação do produto final.

A matriz morfológica é uma ferramenta utilizada no processo de desenvolvimento de produtos para a geração de ideias e seleção de conceitos. Criada por Fritz Zwicky no final da década de 1940, a matriz morfológica consiste em um quadro dividido em colunas e linhas, onde cada coluna representa uma opção de escolha e cada linha representa uma variável ou característica do produto a ser desenvolvido (Zavadil et al., 2014).

O projeto informacional é uma etapa fundamental no desenvolvimento de produtos, uma vez que se trata da organização das informações necessárias para a produção do produto. Segundo Manzini e Vezzoli (2002), o projeto informacional envolve a seleção, organização e comunicação das informações necessárias para o desenvolvimento do produto, desde a concepção até a produção e uso pelo consumidor.

O projeto conceitual é uma etapa fundamental no desenvolvimento de produtos, sendo responsável por definir as características essenciais do produto, tais como funcionalidade, forma, ergonomia, estética, entre outras. De acordo com Ulrich e Eppinger (2015), o projeto conceitual é a fase em que ocorre a definição da proposta básica do produto, que deve atender às necessidades e expectativas do cliente.

O projeto detalhado é uma etapa fundamental no processo de desenvolvimento de produtos, onde ocorre a definição de todos os detalhes técnicos e construtivos do produto. Segundo Ulrich e Eppinger (2015), o projeto detalhado é responsável por transformar o conceito em um produto físico, definindo as características técnicas, materiais, processos de fabricação, componentes e sistemas que compõem o produto.

2.4 MATERIAIS DE FABRICAÇÃO

2.4.1 Aços Carbono

O aço carbono é um dos materiais mais utilizados em diversos setores da indústria, devido a sua alta resistência mecânica e facilidade de fabricação. Segundo Callister Jr. (2006), o aço carbono é composto principalmente por ferro e carbono, com teores que variam de 0,008% a 2,11% de carbono.

Os aços carbono de baixo carbono apresentam alta tenacidade e soldabilidade, mas baixa resistência mecânica e dureza. Já os aços carbono de médio carbono possuem resistência mecânica e dureza intermediárias, com boa tenacidade e soldabilidade. Por fim, os aços carbono de alto carbono possuem alta resistência mecânica e dureza, mas baixa tenacidade e soldabilidade (Callister Jr., 2006).

2.4.2 Aços Inoxidáveis

Segundo Costa e Silva e Mei (2021), os aços inoxidáveis são aqueles que, além de carbono, também contém cromo (ao menos 12%) e níquel em sua composição, de modo a conferir resistência à oxidação no aço até mesmo em elevadas temperaturas.

Por ser resistente à corrosão e a oxidação, como também suas propriedades mecânicas a elevadas temperaturas em combinação com ductilidade e tenacidade, fazem do aço inoxidável um material de grande importância na engenharia. Como sendo um aço de alta liga, contendo geralmente cromo, níquel, molibdênio em sua composição química, o cromo presente na liga ao entrar em contato com o oxigênio do ar, se oxida e forma uma película fina e estável, de óxido de cromo, conhecida como camada passiva e tem função de proteger a superfície do aço contra processos corrosivos (Costa e Silva e Mei, 2021; Groover, 2016).

2.4.3 Isolamentos Térmicos

O uso de isolantes térmicos é essencial para minimizar o fluxo de calor dos sistemas, reduzindo a condução, a convecção e a radiação. Eles geram uma forte resistência no caminho do fluxo de calor, o que torna esses materiais importantes para o controle da temperatura em diversas aplicações (Kapuno; Rathore, 2011). Segundo Çengel e Ghajar (2015), os materiais para isolantes térmicos devem ter baixa condutividade térmica, serem quimicamente inertes, estáveis dimensionalmente e de fácil aplicação na superfície. Para isso, a maioria dos isolantes é produzida misturando fibras, pós ou pedaços de materiais isolantes com o ar.

A lã de rocha é um dos materiais isolantes térmicos mais utilizados em todo o mundo. É produzida a partir de rochas basálticas ou calcárias e submetida a altas temperaturas, em um processo conhecido como fusão. A partir dessa fusão, as rochas são transformadas em fibras finas, que são posteriormente aglutinadas com resinas especiais, formando um produto de alta resistência mecânica e térmica (Larocho, 2023).

A lã de vidro é um dos isolantes térmicos mais utilizados no mercado, devido às suas excelentes propriedades termoacústicas e resistência a altas temperaturas. Segundo Papadopoulos (2005), a lã de vidro é um material produzido a partir da fusão de vidro e sílica em alta temperatura, formando fibras flexíveis e resistentes. Essas fibras são então aglomeradas e dispostas em camadas, formando mantas ou painéis.

Materiais refratários são definidos pela Associação Brasileira de Cerâmica (ABCERAM) como materiais cerâmicos que possuem resistência a altas temperaturas sem se decompor ou entrar em fusão, além de serem capazes de permanecer não reativos em ambientes severos. Materiais refratários são utilizados em processos de alta temperatura, nos quais é exigido resistência à abrasão, à corrosão, à oxidação e ao choque térmico, esses materiais apresentam alta resistência térmica e mantêm suas propriedades mecânicas operando em temperaturas superiores a 1200 °C, sendo utilizados em aplicações em que outros materiais falham, como em fornos, caldeiras, reatores, entre outros (Sako e Pandolfelli, 2014).

2.5 MODELAGEM CAD 3D NA ENGENHARIA

CAD (Computer-Aided Design), ou projeto auxiliado por computador, é uma tecnologia que possibilita a criação e modelagem de produtos em 2D e 3D. Com o uso de softwares específicos, é possível criar e simular modelos tridimensionais com alta precisão e rapidez, permitindo o desenvolvimento de projetos mais complexos em um curto espaço de tempo. A modelagem 3D tem sido amplamente utilizada na engenharia nos últimos anos devido às suas diversas vantagens em relação aos métodos tradicionais de desenho técnico. Através da modelagem 3D, é possível criar modelos virtuais complexos de peças, máquinas e estruturas com grande precisão e detalhamento. Esses modelos podem ser manipulados e visualizados em diferentes ângulos, permitindo uma melhor compreensão do projeto (Miyamoto, Filho, Sartori, 2008).

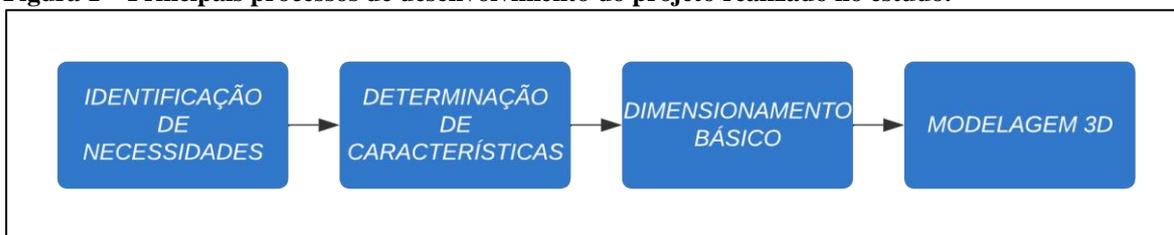
O SolidWorks é um software de CAD amplamente utilizado na área da Engenharia. Segundo a SolidWorks Corporation, empresa desenvolvedora do software, ele permite a criação de desenhos 3D e 2D, montagens e simulações de forma precisa e eficiente. Fundada em 1993

por Jon Hirschtick, graduado no Instituto de Tecnologia de Massachusetts, o programa foi lançado em 1995 e adquirido pela Dassault Systèmes S.A., empresa líder no desenvolvimento de softwares 3D, em 1997 (Solidworks, 2023).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada para a execução do trabalho trata dos principais elementos desenvolvidos no referencial teórico a fim de atender os objetivos apresentados. Onde o trabalho seguirá através de etapas conforme pode ser observado conforme a Figura 1.

Figura 1 – Principais processos de desenvolvimento do projeto realizado no estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Partindo da etapa de projeto informacional, onde os requisitos de projeto e informações são coletados para o desenvolvimento inicial das características do equipamento. O trabalho foi desenvolvido sobre o aspecto de cliente, uma indústria metalmeccânica do oeste catarinense, que utiliza em sua produção a espuma de poliuretano como também recebe seus materiais com embalagens como os paletes e caixas de papelão.

A empresa fez o apontamento da massa de resíduos sólidos observados através de um controle interno da empresa, e foi verificado através de uma balança digital a massa destes resíduos sólidos, portanto o dimensionamento parte desse volume e resíduos que essa indústria tem como descarte mensal.

Com a caracterização dos resíduos estabelecida, foi realizado uma matriz morfológica como ponto de princípio para o dimensionamento básico de características do equipamento visando o reaproveitamento de materiais presentes na própria empresa.

Com a definição e dimensionamento das características básicas do equipamento realizada através da matriz morfológica, passou para a etapa de desenvolvimento do modelo 3D de forma a transcrever as características do equipamento para as peças 3D.

O desenvolvimento do modelo 3D foi realizado com o programa Solidworks visto o conhecimento prévio e funções já conhecidas do software. Esse desenvolvimento se deu através

de técnicas de desenho e modelagem 3D de forma a tratar a árvore de projeto do software mais próximo da capacidade de fabricação do incinerador.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme as referências observadas no estudo, os incineradores são equipamentos que trabalham com a energia térmica dos resíduos, mas com poucos desenvolvimentos de conceitos trabalhando resíduos e seus resultados térmicos para pequenos volumes desses resíduos, dessa forma para o desenvolvimento deste estudo é verificadas características específicas para o projeto de pequeno porte, de forma a definir características buscando a otimização do projeto considerando os principais resíduos gerados pela indústria metal mecânica em estudo.

Para este estudo, o projeto informacional é uma etapa que foi desenvolvida buscando o entendimento das necessidades e detalhes para compreender no projeto. Como também, através das referências, foi realizado a classificação dos resíduos e sua distinção energética para que os dados apresentados fossem concisos ao cenário do estudo, mas de toda forma também aplicáveis as posteriores etapas do projeto.

Para o projeto informacional, através da identificação das necessidades, foi elencado princípios para iniciar no desenvolvimento das características do projeto:

- A dimensão do projeto é limitada a 25m², devido aos limites físicos do espaço disponível para a disposição do equipamento e operação.
- Tempo de funcionamento de 4h, partindo que o equipamento é utilizado em meio período de trabalho e relacionado à quantidade de resíduo disponível.
- Utilização de 4 vezes por mês, tomando por base a necessidade de uso do equipamento pela empresa.
- Principais resíduos combustíveis são descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Principais resíduos, massas e volumes dos resíduos gerados na empresa em estudo.

Resíduos	Densidade (kg/m ³)	Massa de resíduos / mês (kg)	Volume de resíduos / mês (m ³)
Poliuretano (espuma)	33	100	3,0
Madeira de paletes	650	200	0,31
Papelão	340	20	0,06

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Com as necessidades verificadas, a matriz morfológica foi preenchida (Quadro 3), notando a disponibilidade do material aço inox ser abundante já que a indústria processa esse

material e há a sobra de retalhos da produção. Também devido as características do aço inox, mesmo em altas temperaturas o material ainda possui sua resistência a oxidação.

O tipo de incinerador foi definido do tipo câmara fixa, devido este tipo traduzir em maior simplicidade do projeto e também em menores custos de implantação, visto que se trata de um equipamento de pequeno porte, portanto é uma característica fundamental.

A estrutura do equipamento é idealizada em formato de meio cilindro pois a câmara de combustão interna é em formato cilíndrico, portanto fazendo com que a estrutura seja concisa a câmara de combustão.

Quadro 3 – Matriz morfológica aplicada no desenvolvimento das características do incinerador estudado.

Tipo de incinerador	Forno rotativo	Câmaras fixas	Leito fluidizado	Injeção líquida	
Formato da estrutura externa	Meio cilindro	Cilíndrico	Retangular	Quadrado	
Material da estrutura externa	Blocos de concreto	Blocos Cerâmicos	Aço		
Volume da câmara de combustão	Aprox. 1m ³	Aprox. 2m ³	Aprox. 3m ³	Aprox. 5m ³	Aprox. 10m ³
Revestimento interno - 1ª camada	Lã de rocha	Lã de vidro	Tijolos refratários	Aço inox	Aço carbono
Revestimento interno - 2ª camada	Lã de rocha	Lã de vidro	Tijolos refratários	Aço inox	Aço carbono
Câmara de combustão	Interna superior	Interna central	Interna inferior		
Material da câmara de combustão	Aço inox	Aço carbono			
Serpentinas de transferência de calor	Aço inox	Aço carbono			
Fluido que circula na serpentina	Ar	Fumaça			

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O revestimento da câmara da estrutura é feito com tijolos refratários buscando a maior capacidade de reter o calor interno. E a manta de lã de rocha tem sua aplicação baseada em sua facilidade de moldagem e sua alta resistência térmica.

A câmara de combustão feita com aço inoxidável devido ainda manter sua resistência a oxidação e tem sua posição central visando a retenção de cinzas e resíduos da queima na parte inferior da estrutura.

Para a determinação do volume da câmara de incineração, foi necessário avaliar o volume dos resíduos combustíveis dispostos na Tabela 1 e fazer a divisão conforme as características de operação definidas através do projeto informacional, conforme realizado na Tabela 2.

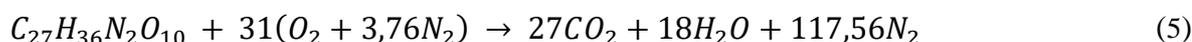
Tabela 2 – Características e capacidade de operação do incinerador de resíduos deste estudo.

Resíduos	Dias de operação / mês	Tempo de operação / carga	Massa de resíduos / mês (kg)	Massa de resíduos / carga	Volume de resíduos (m ³ /carga)	Taxa de alimentação (kg/h)
Poliuretano (espuma)			100	25	0,758	6,25
Madeira de paletes	4	4	200	50	0,077	12,5
Papelão			20	5	0,015	1,25

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

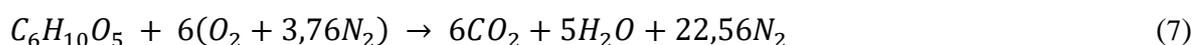
Através da estequiometria da combustão, Equação (5) e (7) foi obtido as relações de ar/combustível para a combustão ideal dos resíduos, Equação (6) e (8). Com isto é possível verificar o fluxo mássico de ar necessário para realizar a queima das quantidades de resíduos estipuladas da Tabela 2.

Poliuretano: $C_{27}H_{36}N_2O_{10}$



$$R_{AC} = \frac{mAr}{mComb} = \frac{4255,68}{548} = 7,76:1 \quad (6)$$

Madeira e Papelão (celulose): $C_6H_{10}O_5$



$$R_{AC} = \frac{mAr}{mComb} = \frac{631,68}{162} = 5,09:1 \quad (8)$$

R_{AC} – Relação ar/combustível

mAr – Massa de ar

$mComb$ – Massa de combustível

Através da estequiometria da combustão, obteve-se as relações de ar/combustível para o poliuretano de **7,76 kg** de ar para 1 kg de poliuretano. E da mesma forma foi considerado a madeira e o papelão em sua molécula base, a celulose, de forma que é necessário **5,09 kg** de ar para 1 kg de madeira ou papelão. Portanto, tornando-se um dado essencial para se dimensionar o fluxo de ar injetado na câmara de queima.

Devido os incineradores trabalharem com excesso de ar, segundo Dempsey e Oppelt (1999) entre 50% e 200%, foi estipulado 50% de excesso de ar como base para este estudo. Em sùmula dos resultados obtidos, verifica-se que a fluxo mássico de ar para a queima do poliuretano é de **72,8 kg/h**, e para a madeira e papelão somados, é de **104,98 kg/h**. Através destes resultados possibilita a melhor identificação da característica de vazão necessária para o ventilador a fim de suprir a injeção de ar no equipamento. Como o incinerador é um

equipamento ar controlado, essa queima acontece sob o controle do fluxo de ar para a câmara de combustão.

Através da taxa de alimentação dos resíduos sólidos e do seu respectivo poder calorífico, é obtido a capacidade térmica máxima do material queimado, esse resultado é desconsiderando as perdas térmicas. Também é adicionado para esse resultado uma chama piloto, realizada através da queima do GLP, com finalidade de iniciar e aumentar a temperatura da câmara de combustão.

Tabela 3 – Características e capacidades térmicas do incinerador considerando os resíduos da espuma de poliuretano.

Resíduos	Taxa de alimentação (kg/h)	Poder calorífico inferior (kcal/kg)	Carga térmica (kcal/h)	Carga térmica (W/h)
Poliuretano (espuma)	6,25	6100	38125	44339
Ar processo	72,8			
Gás GLP	0,5	11100	5550	6455
Total			43675	50794

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Para esse processo com o poliuretano, é obtido uma capacidade térmica aproximada de **50 kW/h**. E para a madeira e papelão é verificado uma capacidade térmica aproximada de **57 kW/h**, como pode ser verificado no Tabela 4.

Tabela 4 – Características e capacidades térmicas do incinerador considerando os resíduos da madeira e papelão.

Resíduos	Taxa de alimentação (kg/h)	Poder calorífico inferior (kcal/kg)	Carga térmica (kcal/h)	Carga térmica (W/h)
Madeira de pallets (lenha seca)	12,5	3100	38750	45066
Papelão	1,25	4050	5062	5887
Ar processo	104,98			
Gás GLP	0,5	11100	5550	6455
Total			49362	57408

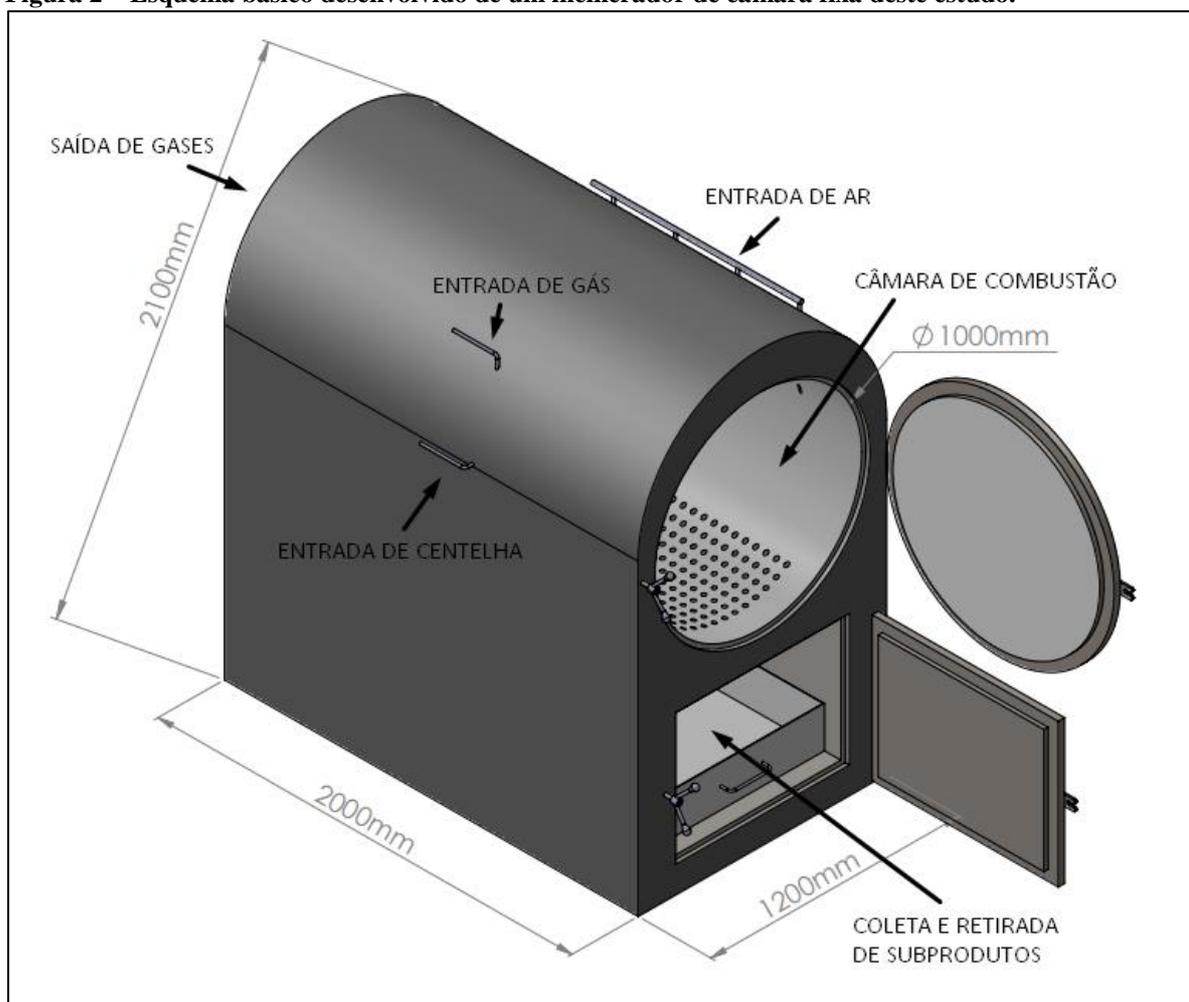
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Através dos resultados obtidos, é possível compreender que o objetivo de um incinerador de pequeno porte é atender as pequenas demandas de tratamento para alguns resíduos da indústria, principalmente verificando a possibilidade de recuperação de energia térmica, podendo ser aplicados em processos da própria indústria. Conforme a literatura sugere, existem formas de se otimizar o processo e aprimorar o equipamento para obter uma operação eficiente, principalmente relacionadas ao estudo das principais características que influenciam

a eficiência de um incinerador, como os próprios resíduos, a relação de ar/combustível, a temperatura de queima, entre outras diversas características, também como o tipo de incinerador.

Portanto a verificação dos dados, dá a capacidade de percepção para as pequenas demandas e suas possibilidades de emprego na indústria, compreendendo as basicidades do processo de incineração é possível operar estes equipamentos buscando o aprimoramento e evolução dessa solução de tratamento de resíduos.

Figura 2 – Esquema básico desenvolvido de um incinerador de câmara fixa deste estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A incineração é um processo físico-químico de decomposição térmica através da oxidação do resíduo a fim de torná-lo menos tóxico ou não tóxico, também podendo ser utilizado de técnicas para a recuperação da energia gerada. O processo envolve diversas

variáveis, como as características dos resíduos, a alimentação de ar, o tipo de incinerador, a temperatura de queima, o tempo de permanência, entre outras, e que devem ser tomadas em consideração no desenvolvimento de um equipamento para este fim.

Através do estudo verificou-se que o desenvolvimento de um equipamento incinerador de resíduos é complexo e demanda elevada compreensão de diversas áreas do conhecimento científico para o pleno desenvolvimento de um equipamento com a finalidade de incineração. Portanto o presente trabalho se dá por trazer de forma conceitual o projeto de um incinerador de pequeno porte para o uso interno de indústrias no qual possuem demanda de um tratamento de resíduos sólidos e que podem ter também alguma forma de aproveitamento da energia térmica gerada pela incineração desses resíduos.

O conceito de um equipamento para incineração de resíduos de pequeno porte traz benefícios como menores custos de implantação e operação, utilizando-se de tipos de incineradores que favoreçam o processo em questão e onde seja trabalhado o melhor tratamento dos resíduos e ainda possibilitando o aproveitamento da energia térmica desses resíduos. Onde operações de incineração de menor porte sejam cabíveis e um equipamento de incineração contribua para o aprimoramento da indústria e a melhor disposição dos resíduos sólidos gerados pela própria indústria.

Com base nos resultados obtidos, o projeto conceitual do incinerador de resíduos sólidos demonstra a possibilidade de dimensionamento de pequeno porte desse equipamento é viável para atender as demandas da indústria do estudo, considerando que os resíduos gerados pela indústria possuem a capacidade de aproveitamento da energia, mesmo sendo de pequeno porte, tem a capacidade de operar e tornar algum processo industrial mais viável, como também a eliminação dos resíduos sólidos.

Em contrapartida, o desenvolvimento de um ciclo de combustão adequado em um equipamento de incineração é ideal buscando a otimização e a melhor eficiência do processo e demanda de posteriores estudos de forma a aprofundar nos detalhes do funcionamento do equipamento como também a realização de um protótipo e com isso a avaliação dos produtos gerados pela queima dos resíduos. Também, podendo ser aprimorado o processo e incluindo formas para o posterior tratamento dos gases e subprodutos da combustão para tornar o processo inteiro plenamente viável e executável.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10004**: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2014.

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil - 2022**. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, São Paulo, 2022.

ANDRADE, Rafael Medeiros de; FERREIRA, João Alberto. A gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil frente às questões da globalização. **REDE - Revista Eletrônica do PRODEMA**, Fortaleza, v. 6, n. 1, mar. 2011.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2010.

BIZZO, Waldir A.; SÁNCHEZ, Caio G. **Estequiometria das Reações de Combustão**. São Paulo: UNICAMP, 2003.

BUCHANAN, A.H. **Fire engineering design guide**. Christchurch, N.Z.: University Of Canterbury, Centre For Advanced Engineering, 2001.

CALLISTER JR., W. D. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais**. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2006.

ÇENGELY, A.; GHAJAR, A. J. **Heat and mass transfer: fundamentals & applications**. New York, Ny: Mcgraw Hill Education, 2015.

COSTA E SILVA, André Luiz V.; MEI, Paulo Roberto. **Aços e Ligas Especiais**. 4. ed. rev. São Paulo: Blucher, 2021. 576 p.

DEMPSEY, C.R.; OPPELT, E.T. (1999). **Incineração de resíduos perigosos – uma revisão crítica**. Tradução de Milton Norio Sogabe. São Paulo: A&WMA – Seção Brasil.

EPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **National Overview: Facts and Figures on Materials, Wastes and Recycling**. 2018. Disponível em: <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/national-overview-facts-and-figures-materials>

EPE - Empresa de Pesquisa Energética . **Balanco Energético Nacional 2017**: Ano base 2016. Rio de Janeiro, EPE, 2017.

EUROSTAT. **Municipal waste generation and treatment, by treatment method**. 2021. Disponível em: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ENV_WASSD__custom_5535038/default/table?lang=en

GROOVER, Mikell P., **Introdução aos Processos de Fabricação**. Tradução: Anna Carla Araujo, Tradução e revisão técnica André Ribeiro de Oliveira... [et al.]. 1. Ed. [Reimpr.]. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

KAPUNO, R. R.; RATHORE, M. M. **Engineering heat transfer**. Sudbury, Mass.: Jones & Bartlett Learning, 2011.

LA ROCHA. **Apresentação Lã de Rocha**. 2017. Disponível em: www.larocha.com. Acesso em: 21 abr. 2023.

MANZINI, E., VEZZOLI, C. **Product-service systems and sustainability**. Opportunities for sustainable solutions. Paris: UNEP Publisher, 2002.

MARGALLO, M.; ALDACO, R.; BALA, A.; FULLANA, P.; IRABIEN, Á. Best available techniques in municipal solid waste incineration: State of the art in Spain and Portugal. **Chemical Engineering Transactions**, v. 29, p. 1345–1350, 2012.

MIYAMOTO, Rodolfo Tsutomu; FILHO, Dante Alves Medeiros; SARTORI, Antonio Ricardo. **Modelagem Tridimensional com Geometria Construtiva de Sólidos (CSG) para projetos de Engenharia e Arquitetura em Sistemas CAD visando a Portabilidade e Estabilidade de Objetivos 3D**, In: XVII Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura - CONGRESO SIGRADI, 2008, UEM, Cuba, 2008.

ONU. **Waste: the world's biggest crisis that nobody talks about**. Disponível em: <https://www.unenvironment.org/news-and-stories/story/waste-worlds-biggest-crisis-nobody-talks-about>. Acesso em: 28 abr. 2023.

PAPADOPOULOS, Agis M. State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments. **Energy and buildings**, v. 37, n. 1, p. 77-86, 2005.

PRASAD, M. N., RANJAN, R. K., & SRIVASTAVA, S. K. Municipal solid waste characterization and its impact on leachate quality. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 15(1), p. 179-188, 2018.

PSOMOPOULOS, C. S.; BOURKA, A.; THEMELIS, N. J. Waste-to-energy: A review of the status and benefits in USA. **Waste Management**, v. 29, n. 5, p. 1718-1724, 2009.

SAKO, E. Y.; PANDOLFELLI, V. C. Artigo revisão - A relação entre a corrosão e a microestrutura: a chave para o desenvolvimento de concretos refratários espinelizados de alto desempenho. **Cerâmica**, v. 60, n. 353, p. 127–143, 2014.

ZAVADIL, Priscila; SCHERER, Fabiano de Vargas; TEIXEIRA, Fábio Gonçalves; KOLTERMANN, Tânia; SILVA, Régio Pierre da; CATTANI, Airton. **Possibilidades de uso da matriz morfológica no processo de geração de alternativas em design**. 11º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design, Gramado, RS, v. 1, n. 4, 2014.

SOLIDWORKS. **About SOLIDWORKS**. Disponível em: www.solidworks.com. Acesso em: 27 abr. 2023.

TAVARES, André Neiva; CARVALHO, Ruy de Quadros; SANTOS, Glicia Vieira dos; BAJAY, Sérgio Valdir. **Oportunidades enterradas: Geração elétrica a partir do biogás de Resíduos Sólidos Urbanos**. Vitória: EDUFES, 2019.

ULRICH, K. T.; EPPINGER, S. D. **Product design and development**. 6º ed. Nova Iorque: McGraw-Hill Education, 2015.

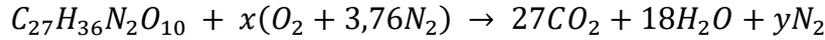
WANG, Y., WANG, Y., WANG, Q., ZHAO, C., & TANG, Y. Power generation potential and environment impact assessment of waste-to-energy incineration in China. **Energy**, v. 151, p. 348-356, 2018.

ZHU, X., LIU, G., ZHANG, J., & LI, X. Study on energy recovery of high-calorific solid waste incineration. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 41(8), p. 1031-1042, 2019.

APÊNDICES

APÊNDICE A - MEMORIAL DE CÁLCULO

Poliuretano: $C_{27}H_{36}N_2O_{10}$



$$10 + 2x = 54 + 18$$

$$2x = 72 - 10$$

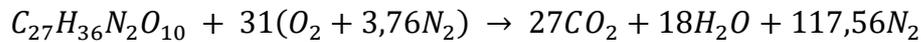
$$x = \frac{62}{2}$$

$$x = 31$$

$$2 + (31 \times 3,76 \times 2) = 2y$$

$$235,12 = 2y$$

$$y = 117,56$$



$$C_{27} \rightarrow 12 \times 27 = 324$$

$$H_{36} \rightarrow 1 \times 36 = 36$$

$$N_2 \rightarrow 14 \times 2 = 28$$

$$O_{10} \rightarrow 16 \times 10 = 160$$

$$mComb = 324 + 36 + 28 + 160 = 548$$

$$mAr \rightarrow O_2 = (31 \times 2) \times 16 = 992$$

$$mAr \rightarrow N_2 = (3,76 \times 31 \times 2) \times 14 = 3263,68$$

$$mAr = 992 + 3263,68 = 4255,68$$

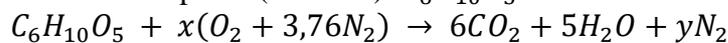
$$R_{AC} = \frac{mAr}{mComb} = \frac{4255,68}{548} = 7,76:1$$

R_{AC} = Relação ar/combustível

mAr = Massa de ar

$mComb$ = Massa de combustível

Madeira e Papelão (celulose): $C_6H_{10}O_5$



$$5 + 2x = 12 + 5$$

$$2x = 17 - 5$$

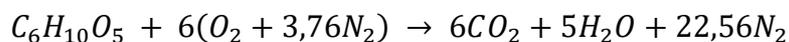
$$x = \frac{12}{2}$$

$$x = 6$$

$$6 \times 3,76 \times 2 = 2y$$

$$45,12 = 2y$$

$$y = 22,56$$



$$C_6 \rightarrow 12 \times 6 = 72$$

$$H_{10} \rightarrow 1 \times 10 = 10$$

$$O_5 \rightarrow 16 \times 5 = 80$$

$$mComb = 72 + 10 + 80 = 162$$

$$mAr \rightarrow O_2 = (6 \times 2) \times 16 = 192$$

$$mAr \rightarrow N_2 = (3,76 \times 6 \times 2) \times 14 = 631,68$$

$$mAr = 192 + 631,68 = 823,68$$

$$R_{AC} = \frac{mAr}{mComb} = \frac{823,68}{162} = 5,09:1$$

R_{AC} = Relação ar/combustível

mAr = Massa de ar

$mComb$ = Massa de combustível