



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**

Faculdade de Engenharia Mecânica

**ANA CLARA ALVES BERNABÉ**

**Potenciais ganhos de eficiência energética em  
sistemas de despoejamento de uma usina  
siderúrgica**

CAMPINAS

2019

ANA CLARA ALVES BERNABÉ

# **Potenciais ganhos de eficiência energética em sistemas de despoeiramento de uma usina siderúrgica**

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestra em Planejamento de Sistemas Energéticos.

Orientador: Prof. Dr. Sergio Valdir Bajay

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELA ALUNA ANA CLARA ALVES BERNABÉ, E ORIENTADA PELO PROF. DR SERGIO VALDIR BAJAY

CAMPINAS

2019

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

B456p Bernabé, Ana Clara Alves, 1991-  
Potenciais ganhos de eficiência energética em sistemas de despoejamento de uma usina siderúrgica / Ana Clara Alves Bernabé. – Campinas, SP : [s.n.], 2019.

Orientador: Sergio Valdir Bajay.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Eficiência energética. 2. Controle de poluição ambiental. 3. Aproveitamento energético. I. Bajay, Sergio Valdir, 1950-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

**Informações para Biblioteca Digital**

**Título em outro idioma:** Potential energy efficiency improvements in dedusting systems of a steelmaking plant

**Palavras-chave em inglês:**

Energy efficiency

Environmental pollution control

Energy use

**Área de concentração:** Planejamento de Sistemas Energéticos

**Titulação:** Mestra em Planejamento de Sistemas Energéticos

**Banca examinadora:**

Sergio Valdir Bajay [Orientador]

Carlos Eduardo Keutenedjian Mady

Rafael Sartim

**Data de defesa:** 05-12-2019

**Programa de Pós-Graduação:** Planejamento de Sistemas Energéticos

**Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)**

- ORCID do autor: 0000-0003-3410-8813

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/0607821708385786>

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA**  
**MECÂNICA**

**PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO**

**Potenciais ganhos de eficiência energética  
em sistemas de despoeiramento de uma  
usina siderúrgica**

Autora: Ana Clara Alves Bernabé

Orientador: Prof. Dr. Sergio Valdir Bajay

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

**Prof. Dr. Sergio Valdir Bajay**  
**Universidade Estadual de Campinas**

**Prof. Dr. Carlos Eduardo Keutenedjian Mady**  
**Universidade Estadual de Campinas**

**Prof. Dr. Rafael Sartim**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**

A Ata de Defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

## **Dedicatória**

*Dedico este trabalho àqueles que lutam para promover o desenvolvimento científico no  
Brasil.*

## **Agradecimentos**

Agradeço imensamente a Deus e à minha família. Minha mãe Taisi e meu pai Juvenal, que priorizaram nossa educação me dando, assim, a primeira de tantas outras oportunidades. À minha irmã, Ana Carolina, pelo exemplo e apoio, e Ana Cristina, pelas risadas que tornam a minha vida mais leve. Aos meus sobrinhos, Eduardo, Guilherme e Bernardo, por iluminarem minha vida.

Ao Leandro pelo companheirismo e suporte a essa e tantas outras empreitadas desta vida, pela compreensão, cuidado e amor. Agradeço também pela revisão dedicada deste texto.

Ao meu orientador, professor Sergio Bajay, pela oportunidade de ter sido sua orientada, pelos ensinamentos pacientes e contribuições importantes para minha trajetória acadêmica.

Ao professor Carlos Eduardo Keutenedjian Mady, por gentilmente aceitar fazer parte desta banca e pelas contribuições a este trabalho.

Ao professor Rafael Sartim, pelo exemplo e por aceitar fazer parte de mais uma etapa da minha jornada acadêmica.

Ao professor José Joaquim Conceição Soares Santos, da Universidade Federal do Espírito Santo, pelas profundas contribuições a este trabalho, motivando o capítulo 5.

Aos amigos Thayná e André, pelo apoio nessa caminhada, e aos colegas do curso de Planejamento de Sistemas Energéticos da Unicamp, principalmente à Nathalia, pelo apoio e abrigo nas idas a Campinas.

Aos professores do curso de Planejamento de Sistemas Energéticos da Unicamp, pelos ensinamentos. Agradeço em especial à professora Carla Cavaliero, pela primeira oportunidade dada e pelas contribuições a este trabalho.

## Resumo

Sistemas de despoejamento com filtros de mangas são amplamente utilizados para controle de material particulado em fluxos gasosos em atividades industriais, incluindo na siderurgia, responsável pelo segundo maior consumo de energia da indústria nacional. Tais sistemas são energia-intensivos e demandam eletricidade principalmente para alimentar o conjunto motor-ventilador e o sistema de limpeza de mangas. Trabalhos anteriores abordam oportunidades para eficiência energética em sistemas de ventilação em geral, mas a literatura sobre o consumo de energia em sistemas de despoejamento é limitada, apesar da relevância do tema. Neste trabalho realizou-se a caracterização do consumo de energia de sistemas de despoejamento e levantou-se o potencial técnico de conservação de energia nos mesmos. Foram avaliados quarenta sistemas de despoejamento instalados em uma indústria siderúrgica por meio de coleta de dados de projeto e visitas de campo. Os resultados indicam que os sistemas de despoejamento são responsáveis por uma parcela significativa do consumo de eletricidade das unidades produtivas avaliadas, variando de 17% a 45% dependendo da unidade, e chegando a 9,5% do consumo de eletricidade da planta industrial como um todo. O consumo específico de eletricidade médio encontrado para os sistemas com filtros de mangas foi 2,03 kWh/1.000 m<sup>3</sup> e 2,39 kWh/1.000 Nm<sup>3</sup> de ar tratado. Quanto às oportunidades de racionalização do consumo, os resultados indicam um potencial técnico de 18% de redução do patamar atual de consumo energético dos sistemas avaliados. O resultado é importante para o planejamento energético industrial, principalmente considerando a tendência de instalação de novos sistemas de despoejamento em indústrias.

Este trabalho aborda ainda oportunidades de recuperação de calor dos gases que passam por sistemas de despoejamento, uma vez que frequentemente apresentam temperaturas moderadas. Avalia-se o potencial de recuperação energética para geração de eletricidade através do Ciclo Rankine Orgânico (ORC – *Organic Rankine Cycle*) por meio de abordagem termoeconômica avaliando diferentes cenários de temperatura e vazão. Identificou-se um potencial de geração de energia elétrica entre 2,1 kWh/1.000 Nm<sup>3</sup> e 6,3 kWh/1.000 Nm<sup>3</sup>, dependendo do cenário adotado e o custo mínimo de US\$ 22/MWh, compatível com valores de eletricidade do mercado nacional.

**Palavras-Chave:** eficiência energética; sistemas de despoejamento; conservação de energia; ciclo Rankine orgânico.

## Abstract

Dedusting systems with fabric filters are widely used for particulate matter control in gaseous emissions in industrial activities, including steelmaking, sector responsible for the second highest energy consumption within Brazilian industry. Those systems are energy intensive in their operation and require electricity mainly for the motor and the fan and the bag cleaning system. Previous works discuss energy efficiency opportunities for ventilation systems in general, but literature regarding energy consumption in dedusting systems is limited, despite the importance of the subject. On this work a characterization of the energy consumption of dedusting system is performed along with the technical potential of energy conservation on those systems. Forty dedusting systems installed on a steelmaking company were evaluated with project data collection and site visits. The results indicate that the dedusting systems are responsible for an important share of the energy consumption of the operational units evaluated, varying from 17% and 45% depending on the area, and 9.5% of the electricity consumption of the entire company. The average specific electricity consumption found for the systems with fabric filters was 2.03 kWh/1,000 m<sup>3</sup> and 2.39 kWh/1,000 Nm<sup>3</sup> of treated air. As for the energy conservation opportunities, the results indicate the technical potential of 18% reduction of the current consumption level for the systems evaluated. The results are important for the industrial energy planning, especially considering the trend for the installation of new dedusting systems on industrial sites.

This work also evaluates the opportunity of Waste Heat Recovery (WHR) of the gases that go through dedusting systems, as frequently they present moderate temperatures. The potential of WHR for electricity generation through Organic Rankine Cycle (ORC) is evaluated using thermoeconomic evaluation with different scenarios of flow rate and temperature. The results show a potential of electricity generation between 2.1 kWh/1,000 Nm<sup>3</sup> and 6.3 kWh/1,000 Nm<sup>3</sup>, depending on the scenario adopted and the minimum cost of US\$ 22/MWh, which is compatible to electricity values of Brazilian market.

**Key-words:** energy efficiency; dedusting system; energy conservation; organic Rankine cycle.

## Lista de Figuras

Figura 1. Evolução da produção mundial de aço, de 1950 a 2017.....	20
Figura 2. Processo simplificado de produção do aço. ....	21
Figura 3. Evolução do consumo total e de eletricidade por produção física de aço bruto. ....	24
Figura 4. Componentes principais de um sistema de despoeiramento. ....	26
Figura 5. Principais componentes de um filtro de mangas com limpeza jato pulsante. ....	29
Figura 6. Fases de filtração e de limpeza das mangas em um filtro com limpeza por jato pulsante. ....	31
Figura 7. FEGs de ventiladores com diferentes níveis de eficiência e tamanhos.....	33
Figura 8. Curvas características de pressão total e de eficiência de um ventilador e duas curvas do sistema. ....	34
Figura 9. Curva de Perda de Carga em sistemas de ventilação com filtro regenerativo. ....	37
Figura 10. Consumo de Energia em um Filtro de mangas com limpeza Jato Pulsante.....	39
Figura 11. Potências consumidas por um ventilador usando métodos alternativos de controle da vazão. ....	48
Figura 12. Períodos de retorno de investimentos para a instalação de sistemas de ventilação com inversores de frequência em função da redução da velocidade de rotação. ....	49
Figura 13. Geração, consumo e venda de energia elétrica (GWh) pela indústria siderúrgica avaliada. ....	54
Figura 14. Participação percentual dos sistemas de despoeiramento na potência consumida nas unidades produtivas da usina. ....	60
Figura 15. Consumos energéticos específicos dos 39 sistemas de despoeiramento com filtros de mangas estudados. ....	62
Figura 16. Economias de energia estimadas nos sistemas de despoeiramento da usina, por unidade produtiva. ....	67
Figura 17. Artigos científicos e patentes referentes à tecnologia do Ciclo Rankine Orgânico de 2000 a 2016.....	72
Figura 18. Ilustração do Ciclo Rankine Orgânico. ....	72
Figura 19. Distribuição das vazões dos sistemas de despoeiramento por faixa de temperatura. ....	75

Figura 20. Quantidade de calor disponível nos sistemas de despoeiramento segundo faixas de temperatura. ....	76
Figura 21. Distribuição da energia térmica recuperável nos sistemas de despoeiramento para geração de potência por faixas de temperatura. ....	77
Figura 22. Configuração proposta para recuperação de calor residual de gases com Ciclo Rankine Orgânico. ....	78
Figura 23. Seleção ótima de fluidos de trabalho de acordo com faixas de temperatura da fonte quente. ....	79
Figura 24. Diagrama T-s do Ciclo Rankine Orgânico. ....	80
Figura 25. Custo específico de investimento em um sistema ORC de acordo com a capacidade instalada. ....	86
Figura 26. Evolução da função objetivo, dada pelo custo da energia, em \$/MWh, de acordo com as chamadas da função. ....	87
Figura 27. Evolução das variáveis de decisão abordadas no estudo ( $\Delta PinchEvaporador$ , $\eta_t$ , $\eta_b$ , $T_{evap}$ , $T_{cond}$ ), de acordo com as chamadas da função. ....	88
Figura 28. Potência Líquida produzida em diferentes condições de temperatura, vazão e fluidos de trabalho. ....	89
Figura 29. Produção específica de energia, em kWh/1000 Nm <sup>3</sup> , nas combinações de temperatura, vazão e fluido de trabalho selecionadas. ....	90
Figura 30. Custo unitário da energia produzida pela unidade operando segundo o Ciclo Rankine Orgânico, em US\$/MWh, nas combinações de temperatura, vazão e fluido de trabalho selecionadas. ....	91
Figura 31. Custo normalizado da turbina versus $\eta_t$ ....	94
Figura 32. Custo da bomba normalizado versus $\eta_b$ ....	94
Figura 33. Custo normalizado do trocador de calor versus $\Delta PinchPointEvap$ .....	95
Figura 34. Custo unitário da energia gerada versus $\Delta PinchPointEvap$ na combinação H de vazão, temperatura e fluido de trabalho.....	96
Figura 35. Custo unitário da energia gerada versus $\eta_t$ na combinação H de vazão, temperatura e fluido de trabalho. ....	96
Figura 36. Custo unitário da energia gerada versus $\eta_b$ na combinação H de vazão, temperatura e fluido de trabalho. ....	97

Figura 37. Custo unitário da energia gerada versus $T_{evap}$ na combinação H de vazão, temperatura e fluido de trabalho.....	97
Figura 38. Custo unitário da energia gerada versus $T_{cond}$ na combinação H de vazão, temperatura e fluido de trabalho.....	98

## Lista de Tabelas

Tabela 1. Relações oriundas das leis de similaridades para ventiladores.....	35
Tabela 2. Valores de Perda de Carga típicos ( $\Delta P$ Típico) em equipamentos de controle da poluição do ar. ....	36
Tabela 3. Combinações de projetos de coifas e vazões testadas e respectivas eficiências de captação. ....	41
Tabela 4. Economias de energia obtidas com a instalação de inversores de frequência em ventiladores, para diversos valores de redução da rotação média .....	48
Tabela 5. Principais medidas de eficiência energética para sistemas de despoejamento encontradas na literatura técnica consultada e respectivos potenciais de economia de energia. ....	52
Tabela 6. Critérios para classificação da atual eficiência dos sistemas avaliados e alocação dos potenciais de economia de energia das medidas de eficiência energética entre estes sistemas de acordo com sua atual eficiência. ....	65
Tabela 7. Exemplo de classificação de dois sistemas de despoejamento em baixa, média ou alta eficiência atual, por medida de eficiência energética .....	66
Tabela 8. Participação das medidas de eficiência energética no potencial total de economia de energia identificado. ....	69
Tabela 9. Recuperações de calor usando Ciclo Rankine Orgânico em aplicações industriais, incluindo faixa de temperatura e potência líquida.....	74
Tabela 10. Combinações de temperatura e vazão e fluido de trabalho simuladas na modelagem termoeconômica.....	77
Tabela 11. Propriedades dos fluidos R245fa e R134a.....	80
Tabela 12. Equações de custo dos componentes de uma usina que opera segundo o Ciclo Rankine Orgânico.....	84
Tabela 13. Constantes da Equação (18), referente ao custo da turbina. ....	84
Tabela 14. Constantes da Equação (25), referente ao custo da bomba .....	84
Tabela 15. Parâmetros utilizados na otimização com algoritmo genético. ....	87
Tabela 16. Resultados para variáveis de decisão ( $\Delta P_{\text{PinchEvaporador}}$ , $\eta_t$ , $\eta_b$ , $T_{\text{evap}}$ , $T_{\text{cond}}$ ) e eficiência do ciclo para cada cenário .....	92

## Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	Motivação.....	15
1.2	Objetivos da dissertação.....	17
1.3	Estrutura do trabalho .....	17
2	USINAS SIDERÚRGICAS E SEUS SISTEMAS DE DESPOEIRAMENTO	19
2.1	Usinas siderúrgicas.....	19
2.2	Sistemas de despoeiramento.....	26
2.3	Consumo de energia em sistemas de despoeiramento .....	32
3	MEDIDAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE DESPOEIRAMENTO .....	40
3.1	Projeto do sistema .....	40
3.2	Sistemas de limpeza do filtro de mangas .....	45
3.3	Controle e ajuste.....	46
3.4	Melhorias na operação e manutenção .....	50
3.5	Resumo de medidas de eficiência energética encontradas na literatura técnica para sistemas de despoeiramento .....	51
4	ESTUDO DE CASO .....	53
4.1	Descrição da unidade produtiva .....	53
4.2	Os sistemas de despoeiramento da usina.....	54
4.3	Caracterização do consumo de energia dos sistemas de despoeiramento da usina destinados a controle ambiental e segurança do trabalhador .....	55
4.4	Medidas de eficiência energética aplicáveis aos sistemas avaliados .....	63
5	RECUPERAÇÃO DE CALOR COM INSTALAÇÃO OPERANDO SEGUNDO O CICLO RANKINE ORGÂNICO .....	70

5.1	O Ciclo Rankine Orgânico .....	70
5.2	Caracterização do calor disponível nos sistemas de despoejamento de uma usina siderúrgica .....	75
5.3	Combinações de vazões, temperaturas e fluidos de trabalho para a modelagem termoeconômica .....	77
5.4	Modelo termodinâmico .....	79
5.5	Modelo econômico .....	83
5.6	Solução do problema de otimização.....	86
5.7	Resultados .....	88
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	99
6.1	Conclusões .....	99
6.2	Sugestões para trabalhos futuros .....	101
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	102

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Motivação

A poluição do ar é um tema em crescente evidência devido ao aumento da compreensão dos efeitos adversos dos poluentes atmosféricos à saúde, incluindo material particulado (NEL, 2005; WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2016). Dentre as fontes de material particulado, destacam-se as contribuições do tráfego veicular, atividades industriais, queima de combustível em residências, dentre outras (KARAGULIAN *et al.*, 2015).

A indústria é uma importante fonte de emissão de material particulado e, por isso, técnicas de controle da poluição do ar são frequentemente necessárias para limitar o lançamento de poluentes na atmosfera, reduzindo o impacto ambiental das operações industriais, além de cumprir limites legais de emissão cada vez mais restritivos. Dentre essas técnicas, sistemas de ventilação local exaustora são amplamente utilizados e, quando utilizados para a captura de material particulado, são chamados também de Sistemas de despoeiramento.

Essas tecnologias permitem uma redução significativa da emissão de particulados, mas aumentam o consumo de energia das plantas industriais (BREEDVELD *et al.*, 2007). De fato, os sistemas de ventilação industrial são energo-intensivos em sua operação, pois requerem eletricidade para alimentar o conjunto motor-ventilador utilizado para mover o ar por uma rede de dutos e equipamentos de controle de poluição do ar. Além disso, dependendo do princípio de operação, os equipamentos de controle de poluição do ar podem exigir energia adicional (ACGIH, 2019).

Estima-se que aproximadamente 60% do consumo total de eletricidade do setor industrial sejam usados em sistemas motrizes, que incluem ventiladores, bombas e equipamentos de ar comprimido (ALMEIDA; FONG; FALKNER, 2016). Atualmente, há uma extensa literatura sobre eficiência energética em sistemas motrizes, incluindo os de ventilação (MASI, 2010; OECD/IEA, 2011; UNIDO, 2010; US-DOE; AMCA

INTERNATIONAL, 2003; WAIDE; BRUNNER, 2011). No entanto, as publicações focadas em sistemas de despoejamento são ainda limitadas.

De fato, a literatura sobre eficiência energética em sistemas de despoejamento com filtros de mangas e sobre o consumo específico desses sistemas é escassa. Grande parte da informação disponível é antiga e não se aplica à maioria dos sistemas de despoejamento atuais. Logo, o levantamento de tais informações é importante e contribui para o planejamento energético industrial, que deve contemplar o aumento da demanda energética em decorrência da crescente necessidade de instalação desses sistemas.

Avaliar potenciais de otimização do consumo energético de sistemas de despoejamento permite, também, obter ganhos em termos de redução de emissão de CO<sub>2</sub> associadas ao consumo eletricidade, além de redução de custos relacionados à energia em unidades industriais.

Além do potencial de redução do consumo energético específico em sistemas de despoejamento, há ainda um potencial de recuperação de calor não explorado nos gases que passam por esses sistemas. Forman *et al.* (2016) estimam que 30% da energia total consumida pela indústria é perdida pelos gases de exaustão e pelos efluentes, mas constatam que a maioria desse potencial se encontra a temperaturas moderadas, abaixo de 300 °C. Para esses casos, existe a possibilidade de produção de eletricidade por meio de tecnologias como as que empregam o Ciclo Rankine Orgânico (*Organic Rankine Cycle - ORC*). A eletricidade gerada pode suprir parcial ou completamente a demanda energética do ventilador do despoejamento. Além disso, a troca térmica necessária para a recuperação de calor permite, ainda, uma redução expressiva da vazão enviada ao sistema de despoejamento, reduzindo o tamanho do sistema e, conseqüentemente, o custo do equipamento. Há uma extensa e crescente bibliografia sobre a recuperação de calor com ORC (IMRAN et al., 2018), mas poucos trabalhos abordando os benefícios adicionais de associar essa tecnologia a sistemas de despoejamento.

## **1.2 Objetivos da dissertação**

### **1.2.1 Objetivo geral**

Este trabalho tem como principal objetivo caracterizar o consumo energético de sistemas de despoejamento em uma usina siderúrgica, avaliar o potencial técnico de conservação de energia e de recuperação de calor.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Caracterização do consumo de eletricidade de sistemas de despoejamento de uma usina siderúrgica, avaliando seu impacto no consumo total de eletricidade da planta e de suas unidades operacionais;
- Proposição de medidas visando ganhos de eficiência energética aplicáveis a sistemas de despoejamento no estudo de caso em uma usina siderúrgica, e avaliação do potencial técnico de conservação de energia nesses sistemas;
- Avaliação do potencial de recuperação de calor, para geração de eletricidade, dos gases tratados em sistemas de despoejamento, utilizando uma unidade operando segundo o Ciclo Rankine Orgânico, considerando várias combinações de temperaturas e vazões.

## **1.3 Estrutura do trabalho**

No capítulo 2 desta dissertação é realizada uma breve descrição do processo siderúrgico, abordando também o consumo de energia dessa indústria. A seguir, são apresentados os principais tipos de sistemas de despoejamento, suas características, seus componentes e valores de consumos energéticos específicos encontrados na literatura técnica consultada.

O terceiro capítulo descreve medidas de eficiência energética aplicáveis a sistemas de despoejamento. São abordadas medidas associadas ao projeto do sistema e ao filtro de mangas, assim como melhorias na operação e manutenção do sistema. Quando disponíveis nas referências consultadas, também são apresentadas, neste capítulo, faixas possíveis de economia de energia propiciadas por estas medidas.

O capítulo 4 se inicia descrevendo a usina siderúrgica escolhida como estudo de caso, com destaque para os sistemas de despoeiramento existentes nas unidades operacionais. Em seguida, se apresenta a metodologia utilizada para levantar o consumo de energia e o consumo energético específico destes sistemas. Os resultados obtidos no levantamento são, então, comparados com o consumo total de eletricidade de cada unidade produtiva contendo sistema de despoeiramento e, no caso do consumo energético específico, com valores encontrados na literatura técnica consultada. Este capítulo também contempla propostas de medidas de eficiência energética aplicáveis aos sistemas de despoeiramento analisados, classificadas por unidade produtiva da usina.

No quinto capítulo se aborda a oportunidade de recuperar o calor dos gases em sistemas de despoeiramento para a geração de eletricidade por meio do Ciclo Rankine Orgânico. Descreve-se a abordagem termoeconômica e são realizados cálculos, usando esta metodologia, para diversas combinações de temperatura e vazão da fonte quente. Esta análise visou compreender a relação entre o potencial de geração de eletricidade e a eletricidade consumida nos sistemas de despoeiramento, além de avaliar os custos e benefícios associados. Diferente do capítulo anterior, que aborda a aplicabilidade de medidas visando ganhos de eficiência energética à usina siderúrgica objeto do estudo de caso, as considerações e cálculos apresentados neste capítulo se aplicam para quaisquer sistemas de despoeiramento cujas vazões e temperaturas dos gases se situem nos intervalos aqui simulados.

Por fim, o capítulo 6 aborda as conclusões do estudo, consolidando os principais resultados encontrados no trabalho, bem como apresenta sugestões para trabalhos futuros.

## **2 USINAS SIDERÚRGICAS E SEUS SISTEMAS DE DESPOEIRAMENTO**

### **2.1 Usinas siderúrgicas**

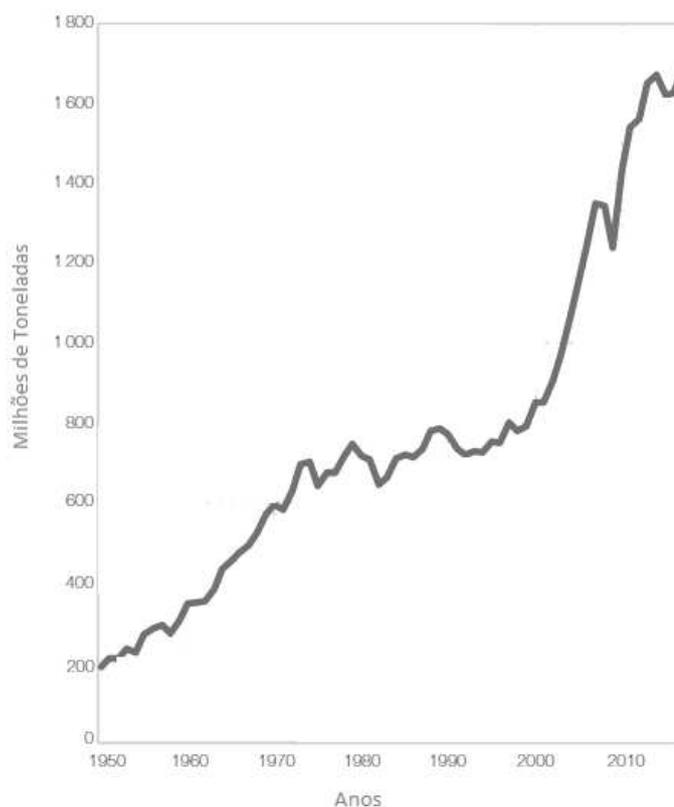
#### **2.1.1 O setor siderúrgico**

O ferro e o aço têm desempenhado um papel importante no desenvolvimento da civilização humana ao longo da história, sendo usados na agricultura, construção, geração e distribuição de energia, fabricação de máquinas e equipamentos, nas residências e na medicina (EIPPCB, 2013). O aço é um dos materiais mais utilizados na sociedade contemporânea, com características que o tornam único comparado a outros materiais, sendo de difícil substituição em muitas aplicações (ARCELORMITTAL TUBARÃO, 2018).

A produção do aço cresceu consideravelmente no mundo desde a década de 1950, conforme ilustrado na Figura 1, principalmente após os anos 2000, atingindo uma taxa de crescimento de 6,2% ao ano. Em 2017, a produção de aço bruto chegou ao patamar de 1,69 bilhões de toneladas (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2018).

O Brasil é o nono maior produtor de aço do mundo, com uma produção de 34,4 milhões de toneladas de aço bruto em 2017 (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2018). A produção de aço está distribuída em oito estados e a maior parcela do parque produtor está localizada na região Sudeste, que representa 89% da produção nacional. Os maiores consumidores de aço no Brasil são os setores de construção civil (38,1%), bens de capital (21,4%) e automotivo (19,6%) (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2018).

A produção de aço possui um papel de grande relevância na economia brasileira, representando 5,5% do Valor Adicionado pela indústria do país e gerando mais de 100.000 empregos (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2019; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2018)



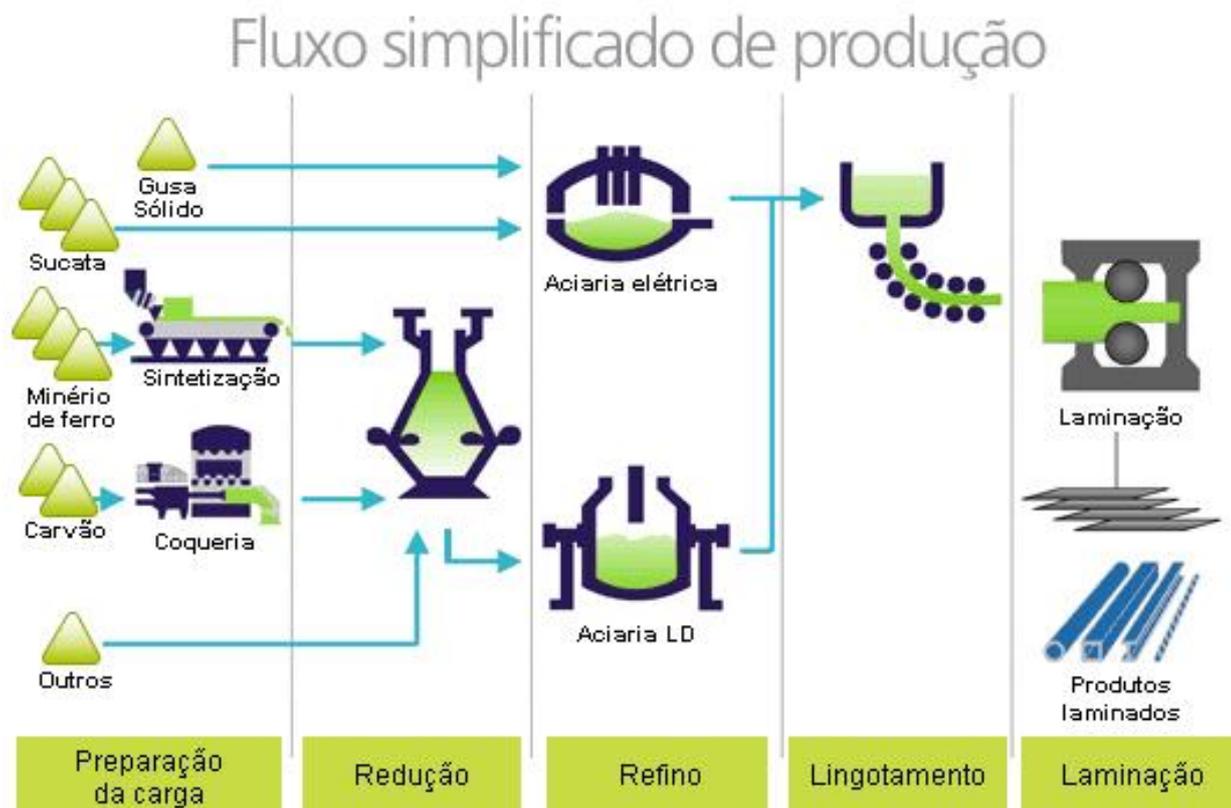
Fonte: Adaptado de (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2018)  
 Figura 1. Evolução da produção mundial de aço, de 1950 a 2017.

### 2.1.2 Processo produtivo

Há duas rotas tecnológicas principais para a produção de aço, com possíveis variações e combinações entre elas: integrada e semi-integrada. As usinas integradas produzem o aço a partir de minério de ferro usando o carvão (mineral ou vegetal) como agente redutor nos altos fornos para a obtenção do ferro metálico. Já as usinas semi-integradas não possuem a etapa de redução e usam sucata de ferro e ferro gusa para alimentar aciarias elétricas. A diferença básica entre estas duas rotas consiste na matéria-prima usada para produzir o aço, de modo que na rota integrada predomina o minério de ferro e na usina semi-integrada usa-se, predominantemente, a sucata (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2018; WORLD STEEL ASSOCIATION, 2013).

No Brasil, há ainda a figura dos produtores independentes de ferro gusa (denominados frequentemente como “guseiros”), que têm por finalidade produzir e comercializar ferro gusa para terceiros (ou ferro gusa de mercado), ao invés de fabricá-lo para consumo no seu próprio processo produtivo, como é o caso de usinas siderúrgicas integradas (PAULA, 2014).

A Figura 2 apresenta o processo simplificado de produção do aço por usinas integradas e semi-integradas.



Fonte: (INSTITUTO AÇO BRASIL, [s.d.]).  
 Figura 2. Processo simplificado de produção do aço.

O processo siderúrgico abrange cinco grandes etapas, descritas, de forma sucinta (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2018), a seguir.

### 2.1.2.1 Preparação da carga (minério e carvão)

Parte do minério de ferro, que se encontra sob a forma de pó, passa por um processo de aglomeração via sinterização ou pelletização, dando origem ao sinter e às pelotas, respectivamente. Esse material, juntamente com o minério de ferro de maior granulometria, é usado na carga dos altos-fornos. Além disso, coque é produzido a partir do carvão na coqueria pelo processo de destilação seca, para a remoção de voláteis. Como consequência deste

tratamento, o coque possui propriedades físicas e químicas superiores ao carvão na redução do minério de ferro.

### **2.1.2.2 Redução do minério de ferro**

Corresponde à remoção do oxigênio contido nos óxidos do minério de ferro. Essa operação é realizada nos altos-fornos, e o produto é uma liga de ferro e carbono denominada ferro gusa, que contém impurezas como fósforo, enxofre e sílica. Os principais agentes redutores em um alto forno são o coque e carvão pulverizado, que formam monóxido de carbono e hidrogênio que, por sua vez, reduzem os óxidos de ferro. Além disso, o coque e o carvão atuam parcialmente como combustíveis.

### **2.1.2.3 Refino**

O teor das impurezas é reduzido no ferro gusa até os valores desejados para os diferentes tipos de aço. O ferro gusa é transportado até a aciaria, que pode usar forno a arco elétrico ou convertedores a oxigênio, onde o teor de carbono é reduzido resultando em aço.

### **2.1.2.4 Lingotamento**

O aço produzido nas aciarias vaza em máquinas de lingotamento contínuo, onde é cortado já na forma de produtos semiacabados, como placas, blocos ou tarugos, ou em lingoteiras, solidificando-se na forma de lingotes.

### **2.1.2.5 Laminação**

Os produtos resultantes do lingotamento são deformados mecanicamente para diminuir sua espessura e serem transformados em produtos siderúrgicos utilizados pela indústria de transformação. São produzidas chapas, barras, bobinas, vergalhões e tubos, entre outros, sendo preparados para venda.

### **2.1.3 Consumo de energia na indústria siderúrgica**

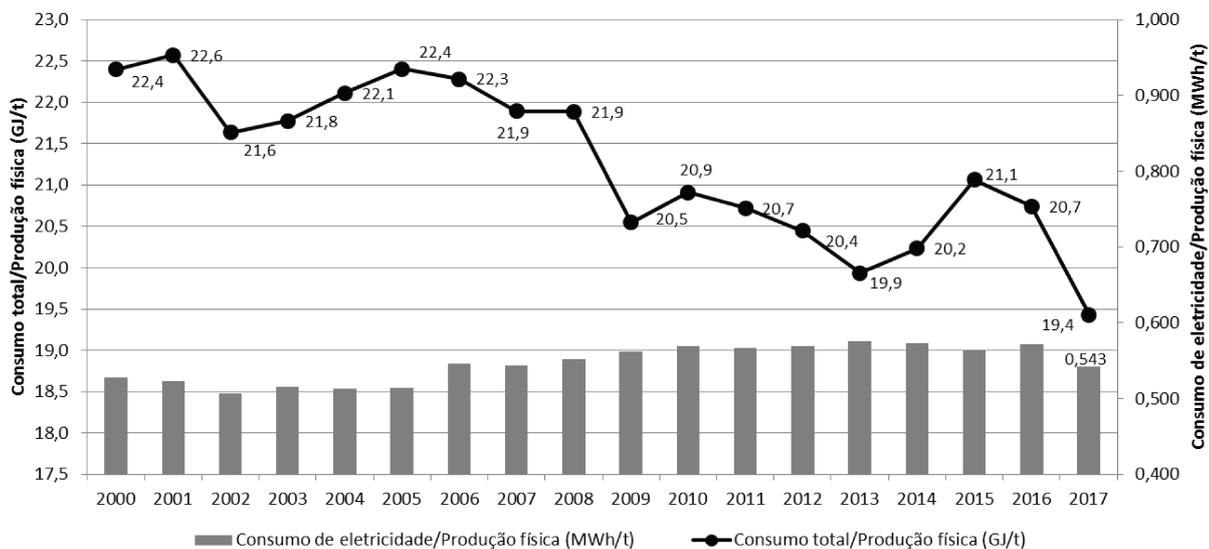
A indústria siderúrgica é um setor energointensivo, responsável, em 2017, por 18,8% do consumo energético do setor industrial brasileiro e 6,2% do consumo total de energia no país (EPE, 2018).

Considerando as novas metas ambiciosas das políticas energéticas sendo aplicadas globalmente, a avaliação da viabilidade de implementação de medidas associadas à eficiência energética se torna ainda mais necessária (XU; SATHAYE; GALITSKY, 2010).

De acordo com a World Steel Association (2018) nos últimos 50 anos, a indústria siderúrgica reduziu seu consumo de energia por tonelada de aço bruto produzida em 60%. Uma referência de consumo energético específico em usinas europeias que produzem aço com aciaria elétrica é de 1,8 GJ/t de aço bruto. Nas usinas que empregam alto forno e aciaria a oxigênio, esse valor chega a 18,0 GJ/t de aço bruto nas plantas integradas mais modernas (EIPPCB, 2013).

Em relação à indústria brasileira, informações do Balanço Energético Nacional, indicadas na Figura 3, mostram a variação do consumo energético específico médio das usinas nacionais desde o ano 2000, chegando ao valor de 19,4 GJ/t de aço bruto em 2017 (EPE, 2018).

A Figura 3 também mostra a evolução, durante este período, do consumo específico de eletricidade que, em 2017, foi de 0,563 MWh/t de aço bruto. É importante destacar que esses valores se referem à produção total de ferro gusa e aço bruto, incluindo produtores independentes de ferro gusa, usinas integradas e semi-integradas, com aciaria elétrica e convertedor a oxigênio. Conforme mencionado anteriormente, o consumo específico total de energia e de eletricidade variam significativamente de acordo com a rota tecnológica utilizada.



Fonte: Elaborado partir de EPE (2018).

Figura 3. Evolução do consumo total e de eletricidade por produção física de aço bruto.

### 2.1.4 Emissões atmosféricas

Um dos grandes desafios em relação aos impactos ambientais da produção de ferro gusa e aço é o controle de emissões atmosféricas. Unidades de sinterização, coqueria, alto forno e aciaria são importantes pontos de emissão de poluentes atmosféricos e, em especial, material particulado (EIPPCB, 2013).

Define-se por material particulado (MP) a mistura complexa de partículas extremamente pequenas e gotículas líquidas, de composição variável podendo conter diversos componentes como ácidos, compostos orgânicos, metais, entre outros. Assim, o mesmo não é uma entidade química específica, mas uma mistura de partículas de diferentes fontes, tamanhos, composições e propriedades (COOPER; ALLEY, 2011).

Medidas de prevenção ou minimização da poluição devem ser implementadas, diminuindo o impacto ambiental além de incorrer em efeitos econômicos positivos (YILMAZ; ANCTIL; KARANFIL, 2015). Controle operacional avançado, manutenção adequada de equipamentos, limpeza de áreas industriais, padrões de manuseio de materiais de modo a evitar a emissão de particulado, dentre outros, são citadas como boas práticas para minimização ou prevenção de poluição (EIPPCB, 2013).

Às vezes a substituição de um processo antigo e poluente por um novo e menos poluente pode ser mais viável economicamente do que instalar e manter estratégias de controle de emissões (VALLERO, 2008).

No entanto, com frequência, não é possível prevenir a emissão de poluentes e a minimização da emissão possível de ser alcançada com alterações de processo não é suficiente para atender aos padrões ambientais, de modo que tecnologias de controle são necessárias.

Uma importante abordagem no controle de emissões é a utilização de sistemas de ventilação industrial. Tais sistemas podem ser classificados essencialmente em sistemas por insuflamento, para fornecer ar para um ambiente de trabalho, e sistemas de exaustão, cujo principal objetivo é remover contaminantes gerados por uma operação (ACGIH, 2019). Em relação aos sistemas exaustores, estes podem ser classificados como:

- (i) ventilação geral exaustora, quando são usados para controle de temperatura e/ou remoção de contaminantes. No segundo caso, eles também são chamados de sistemas de diluição, já que ar externo necessita ser misturado com o ar contaminado de modo a reduzir a concentração para um nível seguro ao trabalhador (ACGIH, 2019).
- (ii) ventilação local exaustora, quando o objetivo é a remoção de contaminantes próximos ao local de geração. Este é o método preferível por ser mais efetivo, além de precisar de uma vazão menor de gás, quando comparada aos sistemas de ventilação geral (ACGIH, 2019).

Sistemas de ventilação local exaustora dedicados à remoção de MP de um ponto de emissão são frequentemente chamados de sistemas de despoejamento, que são o foco desse texto.

## 2.2 Sistemas de despoeiramento

### 2.2.1 Definição e componentes

Os sistemas de despoeiramento são sistemas de ventilação local exaustora para remoção de material particulado. Eles são compostos basicamente por quatro elementos: (i) coifas de captação; (ii) rede de dutos, que pode incluir chaminé ou duto para recirculação do ar; (iii) equipamento de controle de material particulado e (iv) ventilador (ACGIH, 2019). Um exemplo de tal sistema com os elementos citados está representado esquematicamente na Figura 4, cuja configuração pode variar de acordo com as particularidades do sistema.

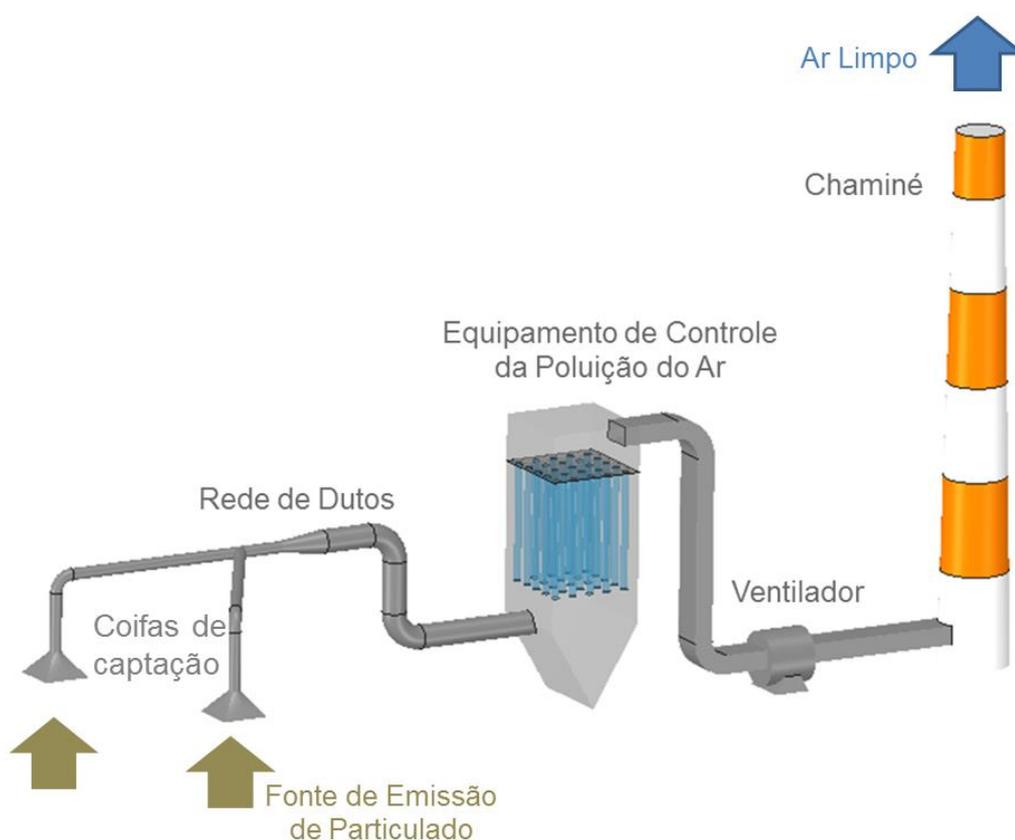


Figura 4. Componentes principais de um sistema de despoeiramento.

A coifa de captação tem por função coletar os contaminantes gerados próximos à fonte, direcionando-os para a rede de dutos, que deve transportar o gás contaminado até o equipamento de controle da poluição do ar, ou até o ventilador, que pode se localizar à montante ou à jusante de tal equipamento. As coifas são dispositivos críticos em um sistema

de despoeiramento, uma vez que uma captura inadequada na fonte impede que os poluentes sejam transportados e removidos de uma forma satisfatória (VATAVUK, 1995).

O ventilador fornece a energia para superar a queda de pressão do sistema causada por dutos, *dampers*<sup>1</sup>, equipamentos de controle da poluição do ar, dentre outros, promovendo a vazão necessária para a remoção do poluente.

Existem diversos tipos de equipamentos de controle de material particulado. Os principais tipos são: filtros de mangas, precipitadores eletrostáticos, coletores úmidos e coletores mecânicos. Entre estes últimos destacam-se as câmaras gravitacionais e os ciclones.

Filtros de mangas são amplamente utilizados para controle de material particulado em instalações industriais. Neles, o gás contaminado com partículas passa através de mangas filtrantes, de modo que o material particulado fica retido e o gás limpo é liberado. O meio filtrante retém algumas das partículas, mas sua função principal é atuar como suporte para a camada de particulado que se acumula sobre ela, denominada torta de filtração. A torta é responsável pela filtragem de alta eficiência de partículas pequenas. As mangas são periodicamente limpas por algum dos métodos disponíveis<sup>2</sup>, de modo a manter a perda de carga do filtro em um patamar aceitável.

Nos precipitadores eletrostáticos, o princípio de remoção das partículas do fluxo de gás é a atração eletrostática. Uma tensão elevada é aplicada entre eletrodos entre os quais passa o fluxo de gás, de modo que as partículas do fluxo são carregadas pelo campo elétrico formado pelos eletrodos. As partículas carregadas são atraídas e coletadas por uma placa com carga oposta, e o gás limpo é liberado pelo equipamento. Periodicamente, as placas são limpas e as partículas são coletadas na fração inferior do equipamento (COOPER; ALLEY, 2011).

Os lavadores de gases empregam os princípios de impactação e interceptação de partículas por gotículas de água. As partículas sólidas, que ficam maiores e mais pesadas com as gotículas de água, são facilmente separadas do gás pela gravidade. A água com partículas deve ser posteriormente tratada, podendo ser descartada ou reaproveitada no mesmo processo, ou em outros processos (COOPER; ALLEY, 2011).

Coletores gravitacionais são câmaras nas quais a velocidade do gás é reduzida pelo aumento da área, permitindo que as partículas se separem do fluxo de gás pela gravidade. Já

---

<sup>1</sup> Dispositivos que introduzem uma resistência variável para regular a vazão de gás ou ar em sistemas de ventilação (TOMSIC, 2000).

<sup>2</sup> Os métodos de limpeza de mangas são abordados na seção 2.2.1.1.

nos ciclones o fluxo de gás ocorre em um padrão espiral dentro de um elemento cilíndrico. As partículas maiores se movem para fora e colidem com a parede. As partículas deslizam pela parede e caem no fundo do ciclone, onde são removidas e o gás limpo é liberado.

A escolha do equipamento de controle depende de diversos fatores, associados ao resultado esperado, restrições operacionais e características do gás a ser limpo e do material particulado.

Um fator importante na escolha de um dispositivo de controle de material particulado é a eficiência de remoção das partículas. Sistemas como os ciclones, apesar do custo de investimento mais baixo do que algumas alternativas possuem baixa eficiência de remoção de partículas finas. Tipicamente, nos ciclones, a eficiência de remoção de material particulado é de 70% a 90%, sendo 30% a 90% para partículas PM-10<sup>3</sup>, e 0 a 40% de PM-2,5<sup>4</sup> (US-EPA, 2003). Em coletores com câmaras contendo *sprays* com água, a eficiência típica de remoção é de 90% para partículas maiores que 8 µm, e até 95% para partículas maiores que 5 µm em câmaras ciclônicas. Em lavadores do tipo *venturi*, são encontradas eficiências de até 92% para partículas maiores que 1 µm (COOPER; ALLEY, 2011).

Com eficiências de remoção expressivamente maiores, os precipitadores eletrostáticos atuais chegam a valores entre 99% e 99,9%. Equipamentos mais antigos operam geralmente entre 90% e 99,9% (US-EPA, 1999).

Os filtros de mangas, amplamente utilizados na indústria, atingem eficiências de remoção entre 99% e 99,9%. Equipamentos mais antigos operam tipicamente entre 95% e 99,9% (US-EPA, 1999).

Devido à sua alta eficiência e aplicabilidade, precipitadores eletrostáticos e filtros de mangas são considerados as melhores tecnologias disponíveis para a grande maioria das aplicações na indústria siderúrgica, quando o gás tratado é liberado para a atmosfera (EUROPEAN UNION, 2012). Em geral, a concentração de material particulado resultante de um sistema de despoeiramento com filtros de mangas é inferior à alcançada por precipitadores eletrostáticos, quando ambos podem ser utilizados para um determinado fluxo de gás contaminado (EUROPEAN UNION, 2012).

---

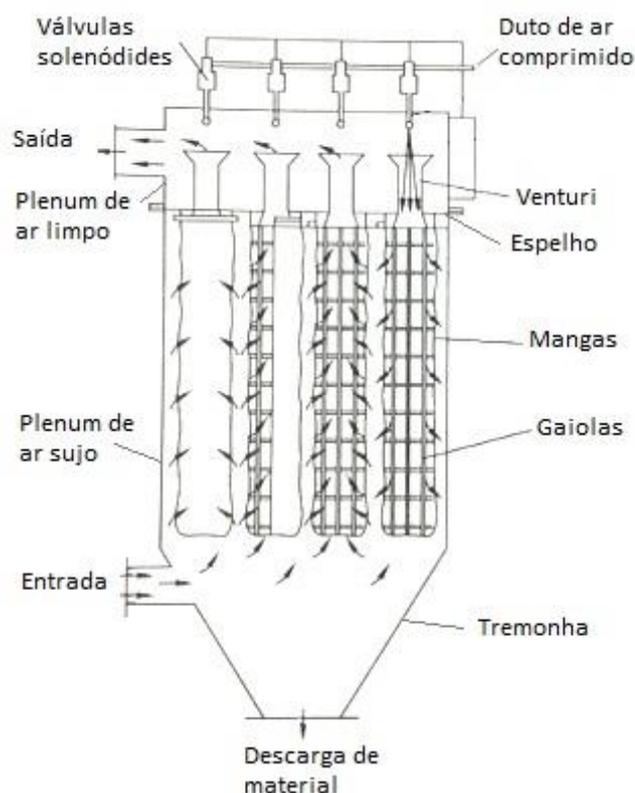
<sup>3</sup> Material particulado com diâmetro aerodinâmico inferior a 10 µm, denominadas partículas inaláveis (US-EPA, 2019).

<sup>4</sup> Material particulado com diâmetro aerodinâmico inferior a 2,5 µm, denominadas partículas respiráveis (US-EPA, 2019).

O foco do presente trabalho é o consumo de energia por sistemas de despoeiramento com filtro de mangas e esses equipamentos são abordados em mais detalhes na próxima seção.

### 2.2.1.1 Filtro de mangas

Conforme mencionado anteriormente, por sua vasta aplicabilidade e alta eficiência de remoção, os filtros de mangas são amplamente utilizados para o controle da emissão de material particulado em diversas aplicações industriais. Os principais componentes destes filtros estão representados na Figura 5.



Fonte: Baseado em Lora (2002).

Figura 5. Principais componentes de um filtro de mangas com limpeza jato pulsante.

O gás contaminado entra no *plenum* de ar sujo do equipamento. Nele estão posicionadas as mangas e seus suportes, denominados gaiolas. Ao fundo, nas tremonhas, o material filtrado é armazenado temporariamente antes de ser removido, manual ou automaticamente, e destinado para reaproveitamento ou disposição final. Dividindo o *plenum* de ar sujo do *plenum*

de ar limpo, encontra-se a chapa metálica denominada espelho, onde as gaiolas das mangas são fixadas.

Segundo Tanabe *et al.* (2011), o processo de separação do material particulado em um filtro de mangas pode ser dividido nas três etapas descritas a seguir:

- No início do processo, a filtração das partículas ocorre dentro do tecido, com a retenção do particulado nas fibras. Esta etapa é denominada “filtração de profundidade”.
- Em uma segunda etapa, de transição, as partículas capturadas começam a formar dendritos, ou seja, estruturas formadas pela aglomeração de partículas, que atuam como novos elementos filtrantes. A queda de pressão começa a aumentar progressivamente.
- A denominada “filtração superficial” ocorre após a formação de uma camada de partículas sobre as mangas, conhecida como “torta de filtração”. Esta camada tem o papel principal na captura do material particulado.

Em um determinado momento, a torta de filtração se torna muito espessa, e é necessário realizar a limpeza das mangas, por razões econômicas e operacionais (VALLERO, 2008). A limpeza pode ser *off-line* ou *online*. Na limpeza *off-line*, o filtro é separado em câmaras e, regularmente, um desses compartimentos é parado para a realização da limpeza. A limpeza *online* ocorre ao mesmo tempo em que se processa a filtração. As técnicas mais comuns de limpeza das mangas são: sacudimento mecânico, sônica, ar reverso e jato pulsante (COOPER; ALLEY, 2011).

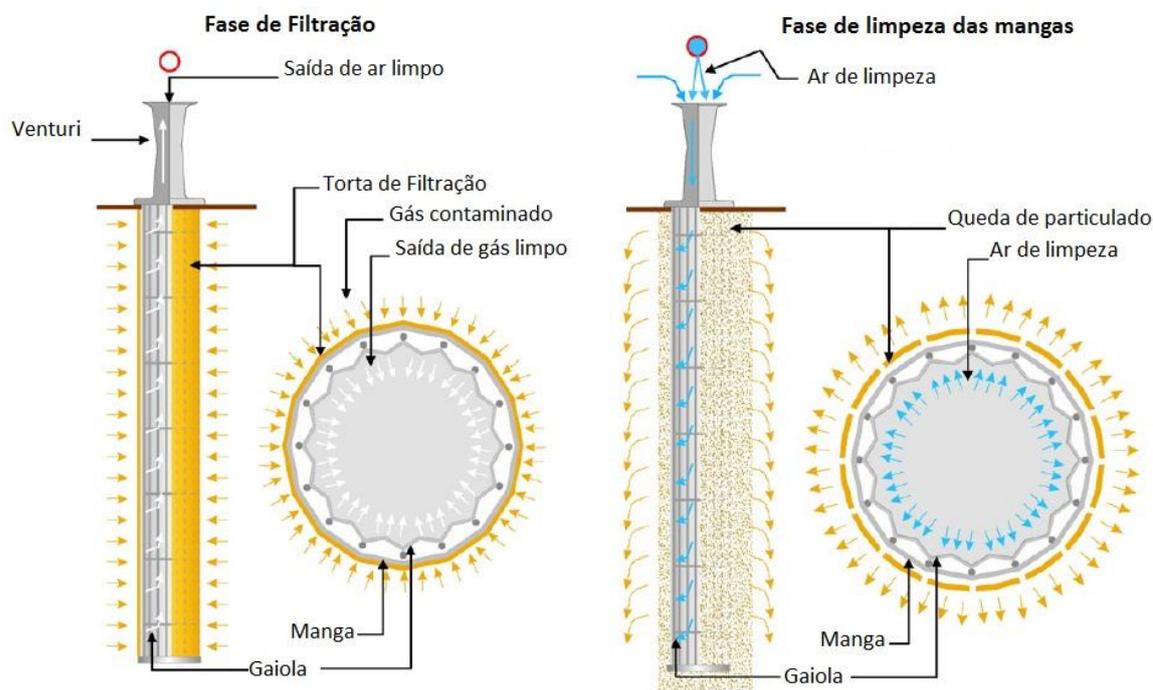
O sacudimento mecânico é uma forma antiga e pouco eficiente de limpeza na qual as mangas são ligadas a um eixo movido por um motor externo, e o material particulado se solta das mangas pela agitação. Na limpeza por vibração sônica, um gerador de som é usado para produzir uma onda de baixa frequência provocando a vibração das mangas; ela pode ser combinada com alguma outra técnica de limpeza (BEACHLER; JOSEPH; POMPELIA, 1995).

Filtros com limpeza por ar reverso são compartimentados para permitir que um dos compartimentos seja isolado para a limpeza (*off-line*). O equipamento deve ser dimensionado de modo que, durante a limpeza de uma câmara, a velocidade de filtração nas mangas das demais câmaras seja satisfatória. Um ventilador auxiliar é necessário para a realização da limpeza.

Por fim, a técnica mais comum de limpeza de mangas é o jato pulsante, que se destacou devido à capacidade de tratar altas cargas de material particulado, trabalhar a uma queda de pressão constante e ocupar menos espaço que filtros com outras formas de limpeza, já que é *online* (CHEREMISINOFF, 2002).

A Figura 6 mostra um filtro com limpeza por jato pulsante, nas fases de filtração e de limpeza. Durante a filtração, o fluxo se movimenta da face externa da manga para a face interna, com a formação da torta de filtração. Durante a limpeza, ar comprimido é injetado, passa pelo *Venturi* e atravessa a manga da região interna para a externa, provocando ondas de choque e a remoção do material particulado.

O sistema de ar comprimido para limpeza pode ser suprido por um compressor dedicado, mais comum para filtros de mangas de grande porte, ou diretamente por uma linha de ar comprimido (COOPER; ALLEY, 2011).



Fonte: Adaptado de Andersen, Nielsen e Walther (2016).

Figura 6. Fases de filtração e de limpeza das mangas em um filtro com limpeza por jato pulsante.

Um pulso de ar comprimido é liberado pela válvula e distribuído por uma tubulação em cada bocal. Cada bocal direciona o fluxo para a abertura da manga, que pode ter ou não um

*venturi*. O ar comprimido expande através do bocal promovendo a entrada do chamado “ar primário”. Na região próxima ao *venturi*, o ar secundário entra na manga.

## 2.3 Consumo de energia em sistemas de despoejamento

### 2.3.1 Ventiladores

A maior parte do consumo de energia em sistemas de despoejamento se deve ao motor do ventilador, necessário para a exaustão do gás e para superar a perda de carga dos dutos, equipamentos de controle do material particulado, válvulas, entre outros (LANZERSTORFER; NEDER; SCHMIED, 2016).

Os ventiladores são máquinas de fluxo motoras que transferem energia para gases através da movimentação de um rotor. Ventiladores industriais podem ser classificados quanto à forma do rotor em centrífugos, quando o ar entra no centro do eixo de rotação do ventilador e sai em um ângulo de 90°, e axiais, quando o movimento do ar é paralelo à rotação do ventilador. Tais equipamentos devem ser selecionados de acordo com os seguintes critérios (US-DOE e AMCA INTERNATIONAL, 2003):

- Requisitos de vazão e pressão, que definem a capacidade do ventilador;
- Características do fluxo de gás, considerando os materiais dispersos na corrente gasosa, tais como: toxicidade, explosividade e inflamabilidade dos gases, corrosividade e temperatura;
- Limitações de espaço para a instalação do ventilador;
- Orientação do ventilador em relação à rotação;
- Acionamento, que pode ser direto ou por correia;
- Dispositivos de controle da vazão, como *dampers* de entrada ou saída, inversores de frequência, entre outros;
- Nível de ruído<sup>5</sup>, e outros.

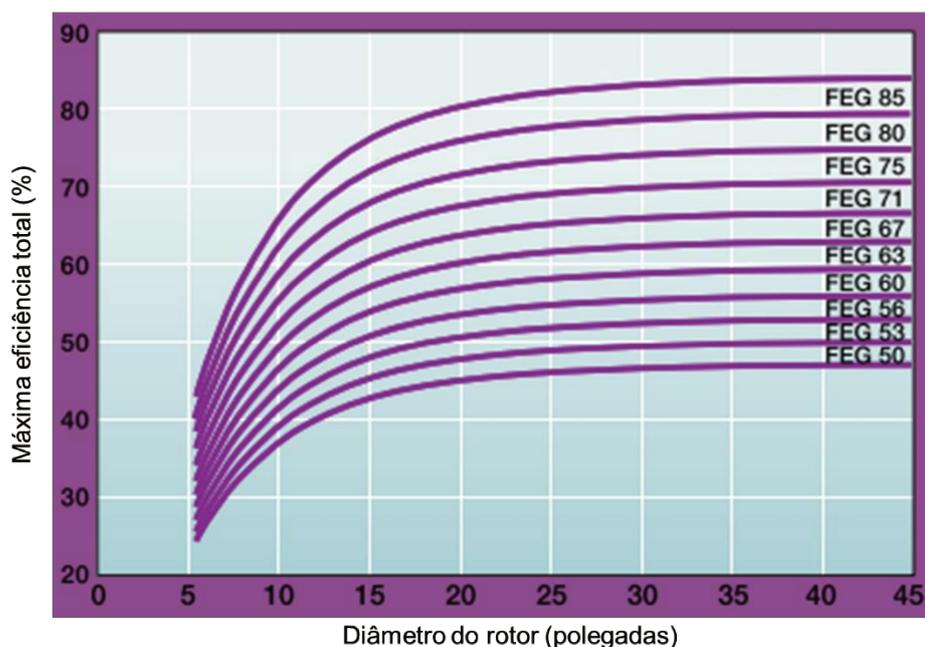
Para o dimensionamento e a operação do sistema de ventilação, é necessário conhecer as curvas características de ventiladores, que relacionam a pressão total, a potência mecânica e

---

<sup>5</sup> Normas ISO associadas à medição de ruído em ventiladores: ISO 133473:2004 e ISO 5136:2003 (ISO, 2003, 2004).

o rendimento do ventilador de acordo com a vazão (US-DOE; AMCA INTERNATIONAL, 2003).

Em termos de eficiência total de ventiladores, é amplamente documentado que ventiladores com rotores de menor diâmetro não conseguem alcançar os mesmos níveis de eficiência máxima quando comparado àqueles com rotores de maiores diâmetros (AMCA INTERNATIONAL, 2016). Assim, definiu-se na publicação AMCA 205-12 a métrica *Fan Efficiency Grade* (FEG) (AMCA INTERNATIONAL, 2012), que associa o tamanho do rotor e a máxima eficiência alcançada por um ventilador categorias de eficiência, ilustradas na Figura 7.



Fonte: Adaptado de (MATHSON; IVANOVICH, 2011).

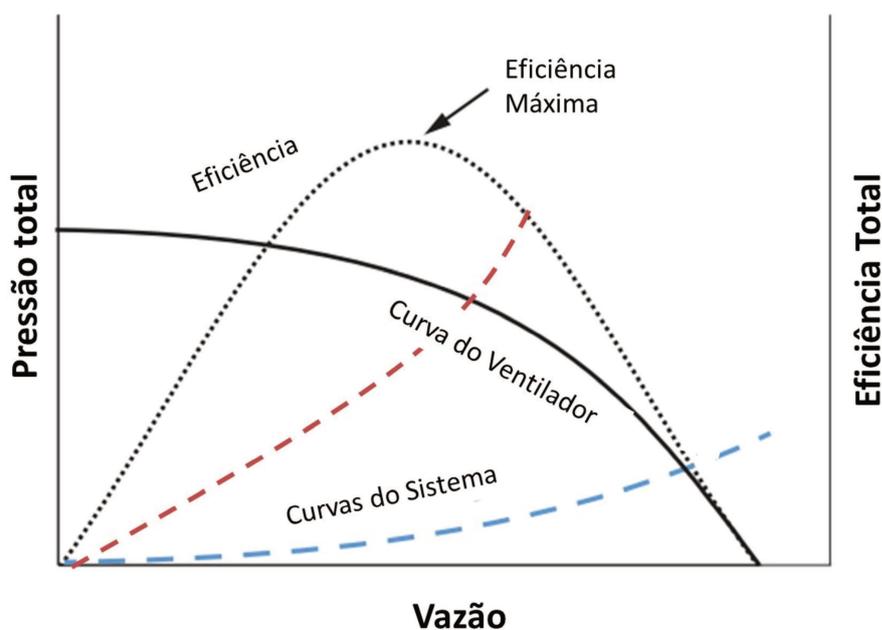
Figura 7. FEGs de ventiladores com diferentes níveis de eficiência e tamanhos.

No entanto, essa métrica trata apenas as qualidades aerodinâmicas do ventilador, sem considerar as influências de motores e acionamentos. Além disso, para que o FEG seja eficaz é necessário delimitar a aplicação do ventilador para que ele fique próximo ao ponto de operação e, portanto, próximo à eficiência máxima (IVANOVICH; WOLF; CATANIA, 2018).

Um exemplo pode ser observado na Figura 8, que ilustra a curva pressão total vs. vazão do ventilador, a curva de eficiência vs. vazão do ventilador e dois casos de curvas de perdas de pressão, denominadas perdas de carga, do sistema. É possível verificar nesta figura que,

ainda que a eficiência máxima de um determinado ventilador seja alta, a eficiência real de operação pode ser significativamente menor (ponto de operação correspondente à intersecção da curva do ventilador com a curva azul do sistema). Considerando uma curva do sistema diferente, em vermelho, o ponto de operação se aproxima mais da eficiência máxima. Assim, avaliar apenas a eficiência nominal, máxima, do ventilador, ignorando a forma como o mesmo é aplicado, pode levar a resultados equivocados. Ventiladores são, portanto, diferentes de outras aplicações uma vez que sua eficiência de operação varia significativamente de acordo com a forma com a qual eles são aplicados e como são selecionados em relação a curvas de eficiência (IVANOVICH; WOLF; CATANIA, 2018).

Esta preocupação motivou a AMCA International (2016) a introduzir o conceito de *Fan Energy Index* (FEI), definido como a razão entre a eficiência real do sistema e a eficiência de referência do projeto. O índice leva em conta fatores como a capacidade do ventilador, pressão do ventilador, aplicação adequada, acionamento e controle de vazão. Ele foi publicado na norma AMCA 208-18, e seu objetivo não é eliminar modelos ineficientes, e sim aplicações ineficientes (AMCA INTERNATIONAL, 2018; IVANOVICH; WOLF; CATANIA, 2018).



Fonte: Adaptado de (MAUER, 2018).

Figura 8. Curvas características de pressão total e de eficiência de um ventilador e duas curvas do sistema.

### 2.3.1.1 Leis de similaridade

As leis de similaridade dos ventiladores relacionam as principais variáveis de desempenho e dimensionamento para ventiladores que possuam similaridade geométrica, cinemática e dinâmica (VERARDI, 2008). A Tabela 1 reproduz as principais relações oriundas das leis de similaridade para ventiladores. Nestas relações,  $\dot{Q}$  é a vazão volumétrica,  $P$  é a pressão total produzida,  $\dot{W}$  é a potência consumida pelo ventilador,  $D_c$  é a dimensão característica do ventilador,  $N$  é a rotação do rotor do ventilador e  $\rho$  é a densidade do fluido. O subscrito 1 refere-se ao ventilador em investigação e o subscrito 2 refere-se ao ventilador de referência.

Este conceito é importante para a compreensão de medidas de eficiência energética relacionadas ao controle de vazões, que são discutidas na seção 3.3.1.

Tabela 1. Relações oriundas das leis de similaridades para ventiladores.

Variáveis dependentes	Variáveis independentes
$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 \times (D_{c1}/D_{c2})^3 \times (N_1/N_2)$	
$P_1 = P_2 \times (D_{c1}/D_{c2})^2 \times (N_1/N_2)^2 \times (\rho_1/\rho_2)$	
$\dot{W}_1 = \dot{W}_2 \times (D_{c1}/D_{c2})^5 \times (N_1/N_2)^3 \times (\rho_1/\rho_2)$	
$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 \times (D_{c1}/D_{c2})^2 \times (P_1/P_2)^{1/2} \times (\rho_1/\rho_2)^{1/2}$	
$N_1 = N_2 \times (D_{c1}/D_{c2}) \times (P_{t1}/P_{t2})^{1/2} \times (\rho_1/\rho_2)^{1/2}$	
$\dot{W}_1 = \dot{W}_2 \times (D_{c1}/D_{c2})^2 \times (P_{t1}/P_{t2})^{3/2} \times (\rho_1/\rho_2)^{1/2}$	
$N_1 = N_2 \times (D_{c1}/D_{c2})^3 \times (Q_1/Q_2)$	
$P_{t1} = P_{t2} \times (D_{c1}/D_{c2})^4 \times (Q_1/Q_2)^2 \times (\rho_1/\rho_2)$	
$\dot{W}_1 = \dot{W}_2 \times (D_{c1}/D_{c2})^4 \times (Q_1/Q_2)^3 \times (\rho_1/\rho_2)$	

Fonte: Adaptado de ASHRAE (2000) *apud* (VERARDI, 2008).

### 2.3.1.2 Perda de carga do sistema

A perda de carga do sistema ( $\Delta P$ ) depende da perda de carga nas coifas, na rede de dutos e no equipamento de controle de material particulado. Cada uma destas perdas é discutida nos parágrafos a seguir.

O projeto de coifas e, por consequência, sua perda de carga, depende das características do processo, do mecanismo de geração de contaminantes, da operação e das características do equipamento (ACGIH, 2019). Cada configuração está relacionada a um fator de entrada, que é frequentemente usado para calcular as vazões e perdas de cargas nas coifas. Usando esses fatores, cálculos empíricos têm sido amplamente utilizados para fins de dimensionamento de sistemas de ventilação (ACGIH, 2019; FIGUEROA, 2011).

Após a captação, a rede de dutos transporta o gás contaminado para o equipamento de controle de poluição do ar. O atrito viscoso entre o fluido e as paredes dos dutos, conexões e válvulas, e a turbulência do escoamento geram perdas de carga, ou seja, quedas de pressão ao longo de toda a extensão da rede de dutos.

O transporte do fluido deve ser realizado mantendo velocidades adequadas em todos os componentes da rede, de forma a equilibrar as perdas de pressão e evitar o acúmulo de partículas nos dutos por sedimentação (ACGIH, 2019; COOPER; ALLEY, 2011).

As partículas que se depositam nas paredes das tubulações podem entupir ou restringir a rede de dutos, resultando na captura insuficiente de contaminantes nas coifas, riscos de incêndio ou colapso das tubulações (PETERS; LEITH, 2004). Portanto, o projeto adequado de dutos é um fator importante para o desempenho dos sistemas de despoejamento.

Em relação à perda de carga em equipamentos de controle da poluição do ar, a Tabela 2 exibe faixas típicas para cada tipo de equipamento.

Tabela 2. Valores de Perda de Carga típicos ( $\Delta P$  Típico) em equipamentos de controle da poluição do ar.

<b>Equipamento de Controle da Poluição do Ar</b>	<b><math>\Delta P</math> Típico</b>	<b>Referências</b>
<b>Filtro de Mangas</b>	250-750 Pa	(US-EPA, 2002)
	1000-2500 Pa	(AWMA, 1992)
	995 – 2240 Pa	(STARK, 2012)
	1600 – 1900 Pa	(SLOAT; GAIKWAD; CHANG, 1993)
	Até 1500 Pa	(INFOMIL, 2009)
<b>Precipitadores Eletrostáticos</b>	125 – 2500 Pa	(ACGIH, 2019; AWMA, 1992; THEODORE, 2008)
<b>Ciclones</b>	250 - 4000 Pa	(COOPER; ALLEY, 2011)
<b>Coletores a úmido</b>	750 - 12500 Pa	(COOPER; ALLEY, 2011)

A perda de carga do filtro de mangas, equipamento foco deste trabalho, é composta pelas parcelas descritas na Equação 1 (COOPER; ALLEY, 2011).

$$\Delta P = \Delta P_f + \Delta P_t + \Delta P_s \quad (1)$$

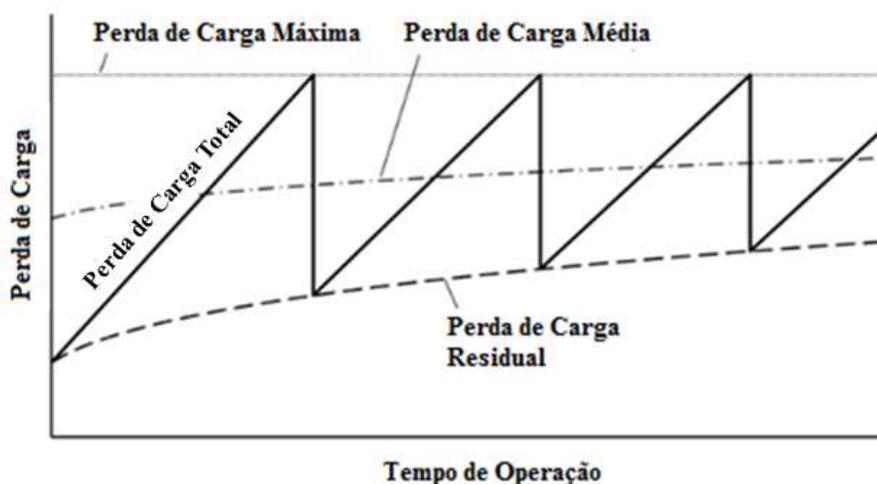
Em que:

$\Delta P_f$ : perda de pressão associada ao tecido filtrante;

$\Delta P_t$ : perda de pressão associada à torta; e

$\Delta P_s$ : perda de pressão devido à estrutura do filtro.

Com a evolução do processo de filtração, a perda de carga do filtro de mangas alcança um valor máximo, que indica a necessidade de limpeza pelo método escolhido. No início do próximo ciclo de filtração, a perda de carga é ligeiramente superior à observada no início do ciclo anterior, devido à perda de carga residual nas mangas filtrantes, conforme ilustrado na Figura 9. Quando a perda de carga residual aumenta significativamente, a recomendação é trocar as mangas filtrantes.



Fonte: (LANZERSTORFER; NEDER; SCHMIED, 2016).

Figura 9. Curva de Perda de Carga em sistemas de ventilação com filtro regenerativo.

### 2.3.1 Filtros de mangas e seus processos de limpeza

O consumo de energia dos filtros de mangas está relacionado principalmente à perda de carga no equipamento, abordada anteriormente e à energia necessária no sistema de limpeza das mangas.

A energia requerida pelo sistema de limpeza varia de acordo com o método de limpeza utilizado. No método de limpeza por ar reverso, realiza-se a interrupção do fluxo de ar sujo no compartimento, e um fluxo no sentido contrário ao da filtração é induzido por um ventilador auxiliar, realizando a limpeza nas mangas. Assim, um ventilador adicional é utilizado, com ar limpo insuflado no sentido contrário ao da filtração.

A limpeza por jato pulsante, método de limpeza mais utilizado, consiste em um jato de ar comprimido que provoca ondas de choque que removem a torta de filtração. Beachler, Joseph e Pompelia (1995) indicam um consumo médio de ar comprimido de 1,9 Nm<sup>3</sup>/h por 1.000 m<sup>3</sup>/h filtrado, enquanto que Cooper e Alley (2011) mencionam uma faixa de 2,0 a 8,0 Nm<sup>3</sup>/h de ar comprimido por 1.000 Nm<sup>3</sup>/h filtrado.

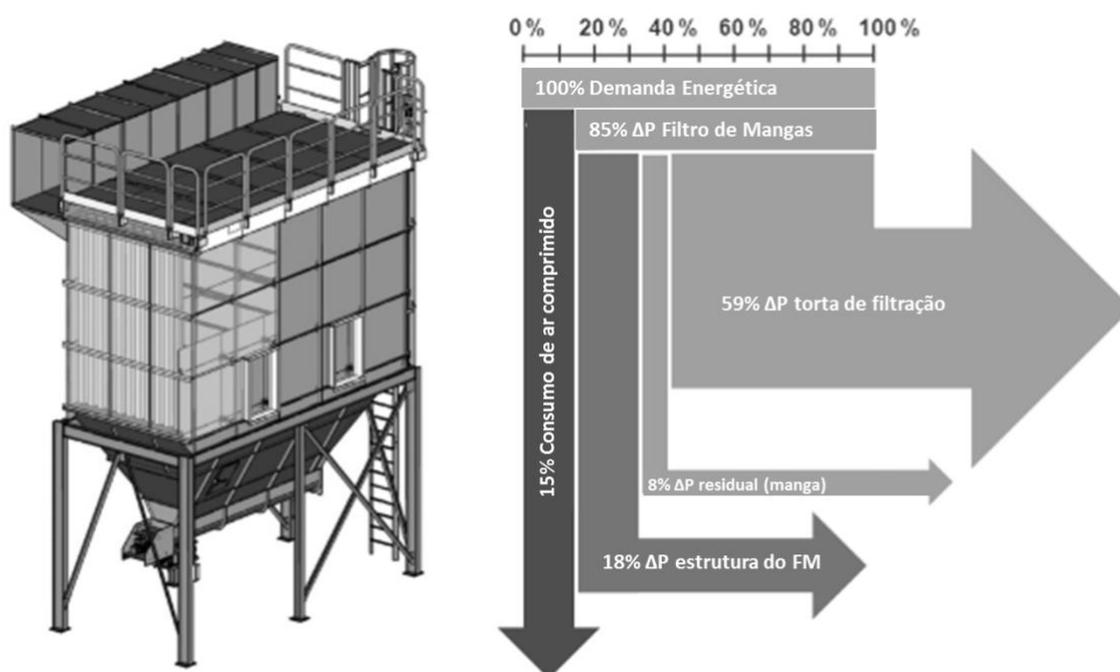
A potência requerida pelo compressor de limpeza do filtro pode ser calculada pela equação 2:

$$\dot{W} = \frac{1}{\eta_{comp}} \frac{\gamma}{\gamma - 1} P_1 \dot{Q}_1 \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1 \right] \quad (2)$$

onde  $\dot{W}$  é a potência requerida pelo compressor, em kW,  $\eta_{comp}$  é a eficiência do compressor,  $\gamma$  é a razão entre as capacidades térmicas do gás sendo comprimido (para o ar,  $\gamma = 1,4$ ),  $P_1$  e  $P_2$  são a pressão inicial e final, respectivamente, em kPa, e  $\dot{Q}_1$  é a vazão volumétrica que entra no compressor em m<sup>3</sup>/s (COOPER; ALLEY, 2011).

Em um filtro de mangas com limpeza por jato pulsante, Klein *et al.* (2009) estimam que 15% do consumo de energia se deva ao ar comprimido usado para limpeza, enquanto que 85% da demanda energética se refere ao consumo do ventilador para vencer a perda de carga do equipamento (vide Diagrama de Sankey na Figura 10). Essa estimativa considerou a limpeza com ar comprimido a 6 bar (aproximadamente 600 kPa), sendo essa uma pressão de limpeza típica em filtros de manga industriais.

Em geral, filtros com sistemas de limpeza por jato pulsante consomem mais eletricidade quando comparados ao consumo de filtros com sistema de ar reverso. No entanto, é necessário considerar que o jato pulsante propicia a limpeza *online*, ou seja, a limpeza das mangas ocorre simultaneamente à operação do equipamento, permitindo um equipamento menor e, portanto, um sistema de ventilação menor. Além disso, fatores adicionais, como eficiência na limpeza e facilidades na manutenção, devem ser levados em consideração ao escolher um sistema, o que também afeta o consumo de energia no longo prazo.



Nota: FM: Filtro de Mangas. Porcentagem da energia associada a  $\Delta P$  se refere à transferência e energia associada à perda de carga do Filtro de Mangas, torta de filtração e à manga.

Fonte: Adaptado de Klein *et al.* (2010).

Figura 10. Consumo de Energia em um Filtro de mangas com limpeza Jato Pulsante.

### **3 MEDIDAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE DESPOEIRAMENTO**

Este capítulo tem como objetivo abordar as oportunidades de ganhos de eficiência energética em sistemas de despoeiramento discutidas na literatura e os correspondentes potenciais técnicos de economia de energia, ou seja, pretende-se responder às seguintes questões:

- Quais são as principais medidas de eficiência energética aplicáveis a sistemas de despoeiramento?
- Quais são as faixas de melhoria de consumo de energia reportadas na literatura para cada uma dessas medidas?

#### **3.1 Projeto do sistema**

##### **3.1.1 Vazão de captação e projeto da coifa de captura**

Um ponto crucial no projeto de um sistema de despoeiramento é a definição da vazão de despoeiramento. Tal determinação é essencial para que as emissões de material particulado da região de interesse sejam integralmente capturadas e está intrinsecamente interligada ao dimensionamento da coifa de captura.

Em geral, a definição da vazão de captação possui um alto grau de incerteza, o que pode levar a um projeto superdimensionado no intuito de garantir o desempenho ambiental.

Muitos projetos industriais usam referências empíricas para o dimensionamento de sistemas de despoeiramento. Com frequência, tais referências indicam fatores de segurança elevados, chegando a coeficientes 1,5 a 2 vezes maiores do que a vazão calculada, dependendo da aplicação (ACGIH, 2019). Frequentemente as vazões de despoeiramento são definidas baseando-se na experiência do projetista, que tende a ter uma postura mais conservadora dado o alto risco associado a um sistema de despoeiramento com vazão insuficiente.

Outra possibilidade para o dimensionamento é a realização de estudos comparativos com outras unidades que tenham processos semelhantes (*benchmarking*). No entanto, as unidades operacionais podem apresentar particularidades que dificultam tal comparação.

Adicionalmente, para processos e equipamentos com poucas unidades instaladas, tal prática pode ser inviável.

Além de aspectos operacionais, a geometria e o posicionamento da coifa são fatores muito importantes no dimensionamento da vazão necessária em um sistema de despoeiramento. O projeto da coifa deve garantir desempenho fluidodinâmico para a captura do poluente emitido, ocupar o menor espaço possível e resultar no mínimo de consumo energético (PINELLI; SUMAN, 2014).

Estudos anteriores mostraram que o projeto da coifa de captura afeta diretamente os requisitos de vazão de um sistema de ventilação (CAO; YOU, 2017; PINELLI; SUMAN, 2014). O foco da maioria dos estudos associados ao projeto de coifas é melhorar a captura das emissões de material particulado e gases (CAO; YOU, 2017; KARAIEMAIL; CELIK; GUFFEY, 2013; WITT et al., 2006), porém, a busca de melhorias na eficiência energética, reduzindo a perda de carga ou os requisitos de vazão também tem sido relatada.

Os trabalhos desenvolvidos por Marx (2011) e Marx e Wollenberg (2013) empregam técnicas avançadas para a caracterização da pluma das emissões usando uma técnica similar à PIV<sup>6</sup>, simulação fluidodinâmica computacional (CFD) e um modelo físico para a determinação do projeto da coifa e a vazão requerida para o despoeiramento. A Tabela 3 apresenta as eficiências de captação obtidas por Marx e Wollenberg (2013) para algumas combinações de vazão de projeto e modelo de coifa. Observa-se, por exemplo, que com a vazão de 750.000 Nm<sup>3</sup>/h a pluma só é captada integralmente com o uso da coifa 3. Assim, a escolha do modelo de coifa propiciou uma economia de 25% na vazão de projeto, considerando como base a vazão de 1.000.000 Nm<sup>3</sup>/h, que foi efetiva para todos os modelos de coifa.

Tabela 3. Combinações de projetos de coifas e vazões testadas e respectivas eficiências de captação.

Vazão de captação	Eficiência de captação da pluma de emissões			
	Coifa 1	Coifa 2	Coifa 3	Coifa 4
200.000 Nm <sup>3</sup> /h	29%	35%	39%	40%
750.000 Nm <sup>3</sup> /h	42%	82%	100%	88%
1.000.000 Nm <sup>3</sup> /h	100%	100%	100%	100%

Fonte: (MARX; WOLLENBERG, 2013).

<sup>6</sup> A PIV (Particle image velocimetry) é um método óptico que permite a visualização e a análise do movimento de partículas em fluidos.

Os autores concluem que os ensaios realizados e a CFD são ferramentas importantes para a otimização de sistemas de despoeiramento, com alto potencial de diminuição da vazão requerida e melhora do desempenho ambiental, pela maior captura do material particulado.

Pietrowicz, Kolasiński e Pomorski (2018) realizaram análise experimental e numérica em uma coifa de exaustão para laboratório e propuseram uma geometria alternativa com redução de zonas de recirculação, alcançando 30,5% de redução da perda de carga na coifa de captação.

Em um estudo anterior, desenvolvido por Mills e Sartor (2005), também com foco em uma coifa de exaustão para laboratório, os autores propõem um novo conceito de coifa capaz de manter ou aumentar a segurança, reduzindo em até 75% o consumo de energia das mesmas. A pesquisa, desenvolvida pelo *Lawrence Berkeley National Laboratory* entre 1995 e 2003 destaca os grandes potenciais de economia associados ao projeto de coifas no contexto de laboratórios, o que pode também ser extrapolado para aplicações industriais (BELL *et al.*, 2003).

O uso de ferramentas como as mencionadas aqui para a caracterização e dimensionamento adequado de sistemas de despoeiramento é uma grande oportunidade para redução de incertezas em relação à vazão de captação de poluentes. O emprego dessas ferramentas permite evitar o superdimensionamento de tais sistemas.

### **3.1.1 Projeto da rede de dutos**

A perda de carga na rede de dutos também deve ser considerada no cálculo da pressão total do ventilador. Embora não seja um fator determinante do projeto, a mesma precisa ser mantida em um valor aceitavelmente baixo (ACGIH, 2019). Deve-se garantir que a velocidade mínima de transporte no duto seja atendida, de modo a evitar a deposição de partículas e alcançar os melhores resultados econômicos (PETERS; LEITH, 2004).

Outras considerações com dutos são sua geometria e potencial de vazamento<sup>7</sup>, pois, dependendo do comprimento do sistema de dutos, o vazamento pode representar uma parcela

---

<sup>7</sup> Sistemas de despoeiramento são sistemas de ventilação local exaustora de modo que aberturas incorrem na entrada de “ar falso” no sistema, isto é, ar não contaminado que é conduzido pela rede de dutos e equipamento de controle da poluição do ar.

significativa da capacidade de um ventilador, comprometendo a eficiência energética do sistema. Isso é especialmente aplicável a redes com dutos retangulares que possuem juntas não vedadas. Em muitos casos, o projetista pode mitigar o problema especificando dutos menos suscetíveis a vazamentos (US-DOE; AMCA INTERNATIONAL, 2003).

Além disso, o posicionamento adequado da rede de dutos pode propiciar economias significativas no consumo de energia dos ventiladores dos sistemas de despoeiramento. Para propor um projeto de duto otimizado, cada caso deve ser avaliado individualmente, porque a rota dos dutos é específica do local de instalação. Knoth e Pfundstein (2011), analisando redes de dutos de sistemas de despoeiramento com muitas ramificações, mudanças abruptas de diâmetro e conexões inadequadas em indústrias existentes identificaram melhorias nos projetos destas redes que possibilitariam reduções de 13% a 52% no consumo de energia destes sistemas.

No caso de instalações existentes que passaram por alterações significativas ao longo dos anos, um ponto de atenção é a avaliação da existência de ramificações do sistema que atendam a pontos de emissão inoperantes, isto é, processos que foram alterados ou eliminados, mas que continuam sendo atendidos pelo sistema de despoeiramento (US-DOE; AMCA INTERNATIONAL, 2003). A UNIDO<sup>8</sup> (2010) estima que o isolamento do escoamento para equipamentos inoperantes pode melhorar a eficiência energética entre 2% e 12%.

### **3.1.2 Ventilador e motor**

#### **3.1.2.1 Ventilador**

Uma seleção adequada do ventilador é crucial para se ter sistemas de despoeiramento mais eficientes no consumo de energia (KALAISELVAN et al., 2016).

A seleção dos ventiladores é feita com base nos requisitos de vazão volumétrica e pressão total do sistema de despoeiramento. Devido ao alto nível de incerteza associada à previsão da demanda de vazão volumétrica, há uma tendência de superdimensionamento do sistema motor-ventilador (US-DOE; AMCA INTERNATIONAL, 2003). A substituição de ventiladores superdimensionados por modelos mais eficientes e adequados aos sistemas de

---

<sup>8</sup> United Nations Industrial Development Organization (UNIDO).

despoeiramento é uma oportunidade para se aumentar a eficiência energética destes sistemas. A UNIDO (2010) estima que essa medida pode propiciar reduções de 2% a 18% no consumo de energia destas instalações.

Outro ponto de atenção no projeto de sistemas de despoeiramento é o chamado efeito do sistema no ventilador. Este efeito provoca um decréscimo no desempenho do ventilador sempre que a instalação deste no sistema não permite o desenvolvimento pleno do escoamento nos trechos de duto na entrada, ou na saída do ventilador (BOHME, 2013). Em instalações industriais, a limitação de espaço pode culminar em arranjos que causam tais efeitos (BAYOMI; ABDEL HAFIZ; OSMAN, 2006). Dentre esses arranjos, Bohme (2013) destaca os seguintes: curvas próximas à entrada ou saída do ventilador, difusores próximos à saída do ventilador, *dampers* próximos à saída do ventilador, ramificações nos dutos próximos à saída do ventilador, *plenum* na entrada do ventilador e paredes próximas à entrada do ventilador. Para dimensionamento dos efeitos do sistema do ventilador é possível utilizar metodologia disponível em ACGIH (2019).

Para a melhoria dessas condições, defletores e retificadores de fluxo podem ser empregados em sistemas existentes e novos projetos (BAYOMI; ABDEL HAFIZ; OSMAN, 2006; US-DOE; AMCA INTERNATIONAL, 2003). A UNIDO (2010) estima que a correção de condições de escoamento inadequadas na entrada e saída de ventiladores, reduzindo a turbulência na região, pode aumentar a eficiência energética de sistemas de ventilação de 1% até 10%, dependendo da criticidade da condição atual.

Quando se avaliam sistemas de ventilação antigos, é comum se encontrar ventiladores com eficiência nominal baixa, em comparação com modelos recentes disponíveis no mercado. Uma alternativa para aumentar a eficiência dessas unidades com um investimento reduzido é substituir o rotor do ventilador por um que promova maior eficiência.

### **3.1.2.2 Motores de Alta Eficiência**

Além do próprio ventilador, a seleção do motor elétrico que aciona o ventilador afeta a eficiência energética dos sistemas de ventilação. Já há algumas décadas, diversos países têm buscado melhorias nos padrões de eficiência de motores elétricos em suas políticas industriais e energéticas (LU, 2016). No Brasil, um marco importante ocorreu com a sanção da Lei

10.295/2001, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia (VIANA et al., 2012). A lei prevê o estabelecimento de níveis máximos de consumo específico de energia ou níveis mínimos de eficiência energética de máquinas e equipamentos consumidores de energia, fabricados ou comercializados no Brasil (BRASIL, 2001).

A Lei 10.295/2001, conhecida como a Lei de Eficiência Energética, foi aprovada em 2001 e o programa de metas de rendimentos nominais mínimos para motores foi iniciado em 2002 com uma regulamentação para o motor elétrico, que definiu níveis de eficiência obrigatórios para motores de indução trifásicos fabricados e comercializados no país. Em 2005, este regulamento foi alterado com a determinação de que os níveis de eficiência da norma internacional IR2 se tornassem obrigatórios até o final de 2009; estes níveis, no entanto, entraram em vigor somente em 2012 (ANDRADE; PONTES, 2017). O passo seguinte foi a adoção, em 2017, dos níveis de eficiência dos motores Premium (norma IR3), para implantação dois anos após esta decisão (MME, 2017).

Especificamente para sistemas de ventilação industrial, a UNIDO (2010) estima que a substituição de motores por modelos mais eficientes pode aumentar de 1% a 5% a eficiência energética destes sistemas.

### **3.2 Sistemas de limpeza do filtro de mangas**

Conforme apresentado anteriormente, existem diversas tecnologias disponíveis para a limpeza das mangas filtrantes e as mais usadas são o jato pulsante e ar reverso.

Nos últimos anos, o interesse por sistemas de limpeza a jato pulsante de baixa pressão aumentou devido à busca pela redução do consumo de energia. Os filtros de baixa pressão operam a uma pressão do tanque de 2 a 3 bar (200 a 300 kPa), enquanto que os filtros tradicionais de alta pressão operam, geralmente, com pressões de 4 a 7 bar (400 a 700 kPa) (ANDERSEN; NIELSEN; WALTHER, 2016).

É preciso destacar que cada equipamento precisa ser avaliado individualmente para a proposição do sistema de limpeza. Este potencial de economia de energia pode ser explorado em novos sistemas de despoeiramento.

Andersen, Nielsen e Walther (2016), assim como Lu e Tsai (1998) destacam a influência do *venturi* na eficiência da limpeza e no consumo de energia. Lu e Tsai (1998) encontraram grandes variações no consumo de energia do sistema de limpeza, dependendo da instalação do *venturi* e do tamanho do bico.

O início da operação de um sistema de limpeza em um filtro de mangas pode ocorrer de duas formas: (i) com acionamento pelo tempo decorrido desde a última limpeza; ou (ii) quando o sistema atinge uma perda de carga máxima pré-determinada. O segundo modo, denominado “limpeza sob demanda”, garante que o ar comprimido para limpeza das mangas seja usado somente quando necessário.

A limpeza adequada dos filtros de mangas otimiza a eficiência de coleta do material particulado e maximiza sua vida operacional, reduzindo também a demanda de energia do filtro e os requisitos de ar comprimido para a limpeza (STARK, 2011). Isto é, se o filtro é limpo de acordo com tempo de filtração e o tempo estabelecido é inadequado, um efeito potencial é o aumento da espessura da torta e, por consequência, a perda de carga a níveis inadequados, aumentando a perda de carga do sistema. Esse fenômeno aumenta o consumo de energia além de impactar negativamente na vida útil da manga e na eficiência de filtração.

Uma estimativa de redução no consumo de energia devido ao uso de sistema de limpeza sob demanda é de 5%, uma vez que evita o uso de ar comprimido quando este não é necessário (E3T, 2012).

### 3.3 Controle e ajuste

#### 3.3.1 Inversores de frequência

Para o controle de vazões em sistemas de ventilação normalmente são empregados os seguintes métodos: (i) ângulos de pás variáveis<sup>9</sup>, (ii) *dampers* e (iii) inversores de frequência<sup>10</sup> (*Variable Frequency Drive - VFD*).

---

<sup>9</sup> Em alguns tipos de ventiladores é possível alterar, manual ou automaticamente, o ângulo das pás (ACGIH, 2019).

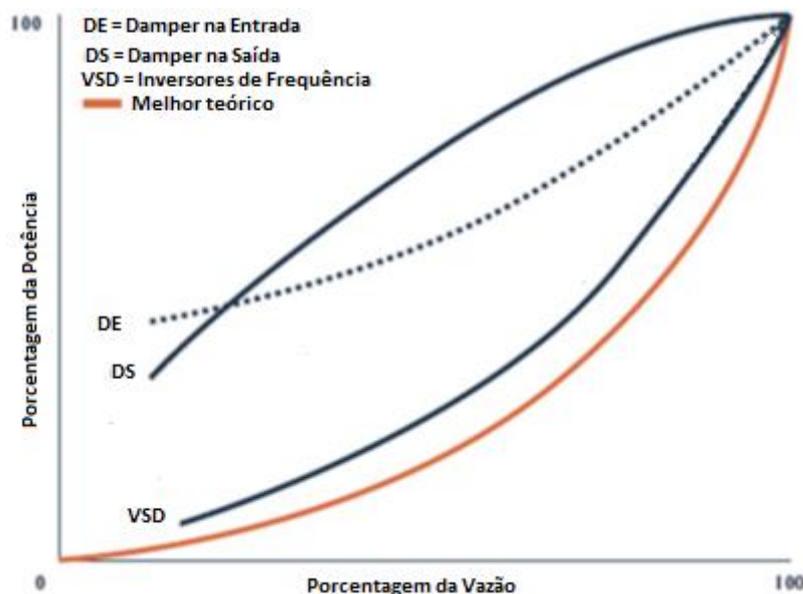
<sup>10</sup> Dispositivo que permite o controle da velocidade de rotação do ventilador e, dessa forma, controlar a vazão e a pressão estática do escoamento (ACGIH, 2019).

Desses, o VFD é o método mais eficiente, sendo amplamente empregado na indústria. A sua adoção é uma medida frequentemente mencionada para se melhorar a eficiência energética de sistemas motores (ABDELAZIZ; SAIDUR; MEKHILEF, 2011; DU PLESSIS; LIEBENBERG; MATHEWS, 2013; KERMELI; WORRELL; MASANET, 2011; OZDEMIR, 2004; SAIDUR et al., 2012). Como a potência consumida pelo ventilador é proporcional ao cubo de sua rotação, conforme descrito pelas Leis de Similaridade dos Ventiladores, reduzir a rotação para se obter vazões menores pode propiciar economias significativas no consumo de energia do sistema de ventilação (SAIDUR et al., 2012).

Quando comparado aos outros métodos, encontra-se uma diferença expressiva no consumo de energia resultante do uso de inversores de frequência, conforme ilustrado na Figura 11. Estima-se que para uma vazão 50% inferior, um inversor de frequência pode economizar 80% e 68% da energia consumida com o uso de *dampers* e defletores na entrada do ventilador, respectivamente (ALMEIDA; FONG; FALKNER, 2016).

A Tabela 4 mostra as economias de energia propiciadas pela adoção de inversores de frequência em ventiladores, para alguns valores de redução da rotação média do equipamento.

Um estudo desenvolvido pela UNIDO (2010) estima que a instalação de inversores de frequência em ventiladores pode economizar entre 8% e 35% da energia consumida em sistemas de ventilação que possuem alta eficiência e baixa eficiência, respectivamente. Outros estudos relatam reduções no consumo de energia em sistemas de ventilação usando inversores de frequência em 41% (SAIDUR et al., 2012) e até 60% (WEG, 2012).



Fonte: Adaptado de (ALMEIDA; FONG; FALKNER, 2016).

Figura 11. Potências consumidas por um ventilador usando métodos alternativos de controle da vazão.

Tabela 4. Economias de energia obtidas com a instalação de inversores de frequência em ventiladores, para diversos valores de redução da rotação média

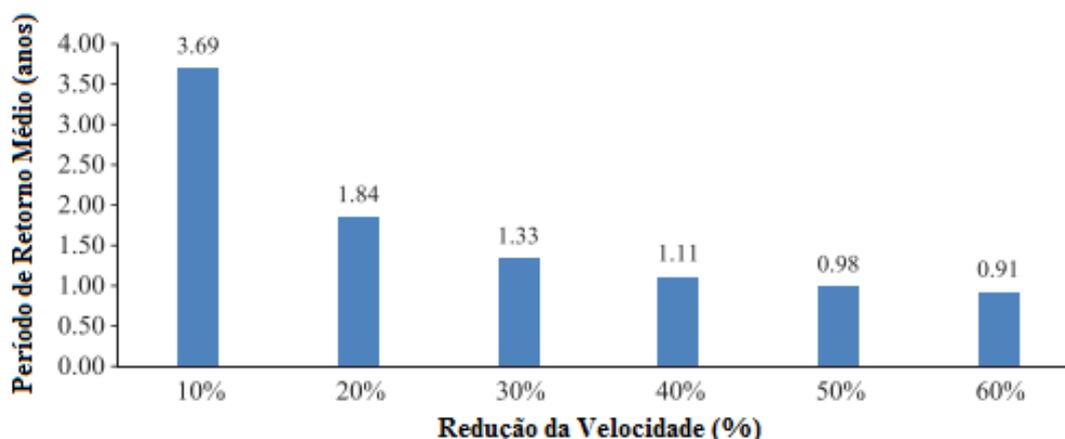
<b>Redução da rotação média (%)</b>	<b>Economia de energia (%)</b>
<b>10</b>	22
<b>20</b>	44
<b>30</b>	62
<b>40</b>	73
<b>50</b>	83

Fonte: (SAIDUR *et al.*, 2009).

Em geral, quando a vazão mínima do sistema se mantém em 80% ou mais da vazão máxima, as perdas do inversor de frequência e o custo inicial mais alto podem fazer com que o uso do *damper* de entrada seja uma melhor escolha para controle de vazão (ACGIH, 2019). No entanto, cada situação deve ser avaliada individualmente.

A Figura 12 indica os períodos de retorno de investimentos em sistemas de inversão de frequência em função da redução da velocidade de rotação envolvida.

A UNIDO (2010), avaliando o custo da energia economizada usando inversores de frequência em sistemas de ventilação no Brasil, encontrou o valor de 37,2 US\$/MWh economizado.



Fonte: (ABDELAZIZ; SAIDUR; MEKHILEF, 2011).

Figura 12. Períodos de retorno de investimentos para a instalação de sistemas de ventilação com inversores de frequência em função da redução da velocidade de rotação.

A maioria dos exemplos de aplicações de inversores de frequência está relacionada a demandas de vazão variável. No entanto, em muitas outras aplicações, a vazão requerida é constante, mas as condições operacionais não.

Lanzerstorfer, Neder e Schmied (2016) avaliaram o uso de dispositivos para variação de velocidade em um sistema de ventilação incluindo um filtro regenerativo para separação de material particulado do fluxo de ar, mantida a vazão constante. Conforme apresentado anteriormente, a perda de carga em um filtro de mangas é dada pela soma de: (i) perda de carga devido ao meio filtrante, (ii) perda de carga devido à torta de filtração e (iii) perda de carga devido à estrutura do filtro. À medida que a operação de filtração acontece, a perda de carga devido à torta de filtração aumenta, atingindo uma queda de pressão máxima que aciona o sistema de limpeza (caso o sistema de limpeza seja acionado sob demanda), removendo a torta de filtração e iniciando um novo ciclo, conforme ilustrado na Figura 9.

Portanto, em sistemas pequenos e médios há variações de perda de carga durante os ciclos de filtração. Em sistemas de grande porte, onde parte do filtro é limpo simultaneamente com a formação da torta de filtração em outras regiões, estas variações de perda de carga podem ser compensadas.

Lanzerstorfer, Neder e Schmied (2016) encontraram vantagens econômicas no uso de inversores de frequência e na limpeza sob demanda devido à economia de energia no acionamento do ventilador e no sistema de ar comprimido, com períodos de retorno do investimento entre 0,7 e 1,7 anos.

O US-DOE (2002) descreve um caso de substituição de *dampers* de entrada por inversores de frequência para a manutenção de uma pressão diferencial constante em um filtro de mangas. Tal substituição propiciou uma redução de 20% no consumo de energia do filtro.

### 3.4 Melhorias na operação e manutenção

Entre as várias oportunidades de ganhos de eficiência energética em sistemas de ventilação, uma parcela importante está relacionada a reparos de manutenção e melhores práticas operacionais. Esta seção tem como objetivo abordar essas oportunidades.

A UNIDO (2010) lista uma série de medidas que aumentam a eficiência energética em sistemas de ventilação. A instituição avaliou as potenciais melhorias de eficiência energética que poderiam ser alcançadas com a aplicação de tais medidas em sistemas que já possuem eficiências alta, média ou baixa, apresentando uma faixa de percentuais de melhoria para cada condição.

Uma das medidas avaliadas no estudo é o reparo de vazamentos e vedações danificadas, que pode propiciar um incremento da eficiência energética entre 2% e 5% em sistemas de ventilação (UNIDO, 2010). Um dos principais efeitos de vazamentos em uma rede de dutos é a redução da vazão no ponto de captação, comprometendo o desempenho do sistema em relação à remoção do material particulado no ponto de emissão. Ademais, a entrada de ar por aberturas na tubulação altera a perda de carga da rede de dutos e, portanto, a curva do sistema, o que pode representar até mesmo a redução da potência consumida pelo sistema. A avaliação do efeito de vazamentos na potência consumida requer o conhecimento das curvas do sistema e do ventilador, e de como a alteração da perda de carga do sistema afeta o ponto de operação do ventilador (US-DOE; AMCA INTERNATIONAL, 2003). Kermeli, Worrell e Masanet (2011) também destacam a importância de uma manutenção adequada e do reparo de vazamentos em equipamentos de controle da poluição do ar, além da rede de dutos.

A UNIDO (2010) apontam a oportunidade de aumento da eficiência energética de sistemas de ventilação com a remoção de sedimentos e incrustações de ventiladores e superfícies da rede de dutos. A deposição de material particulado na rede de dutos implica no aumento da perda de carga do sistema e mudança do ponto de operação do ventilador, podendo

provocar uma elevação no consumo de energia. A presença de material particulado com umidade aderido ao rotor do ventilador pode, ainda, alterar sua geometria, comprometendo a eficiência do sistema. Estima-se um aumento da eficiência energética entre 0,5% e 3,5%, dependendo da condição atual do sistema, com a remoção de sedimentos e incrustações.

Em instalações industriais é frequente encontrar problemas com *dampers*, principalmente em relação ao seu acionamento e estanqueidade, o que pode comprometer a eficiência energética do sistema e o seu desempenho ambiental. O trabalho realizado pela UNIDO (2010) estima que a correção de problemas em *dampers* pode provocar um aumento de eficiência energética entre 1% e 5%.

Dada a grande importância de ações de manutenção para a garantia da eficiência energética dos sistemas de ventilação, a adoção de programas de manutenção preventiva pode contribuir entre 1% e 3% para o aumento da eficiência energética destes sistemas, segundo estimativas de UNIDO (2010).

### **3.5 Resumo de medidas de eficiência energética encontradas na literatura técnica para sistemas de despoeiramento**

Na Tabela 5 estão listadas algumas das principais medidas de eficiência energética para sistemas de despoeiramento, incluindo filtros de mangas, descritas na literatura técnica consultada, com os respectivos potenciais de redução de consumo de energia.

Tabela 5. Principais medidas de eficiência energética para sistemas de despoejamento encontradas na literatura técnica consultada e respectivos potenciais de economia de energia.

<b>Medida</b>	<b>Melhoria de eficiência energética</b>	<b>Referência</b>
<b>Substituição de ventilador superdimensionado</b>	2% - 18%	(UNIDO, 2010)
<b>Correção de condições inadequadas do escoamento na entrada e saída de ventiladores</b>	1% - 10% 0% - 21%	(UNIDO, 2010) (BAYOMI; ABDEL HAFIZ; OSMAN, 2006)
<b>Isolamento do fluxo para equipamentos fora de operação</b>	2% - 12%	(UNIDO, 2010)
<b>Substituição do motor elétrico por modelo mais eficiente</b>	3% -5% 1% -5%	(LU, 2016) (UNIDO, 2010)
<b>Otimização das coifas de captação com simulação CFD visando redução de vazão de projeto</b>	30,5% 57% - 62% <sup>a</sup> 25% <sup>a</sup>	(PIETROWICZ; KOLASIŃSKI; POMORSKI, 2018) (KULMALA et al., 2007) (MARX; WOLLENBERG, 2013)
<b>Otimização da rede de dutos visando redução de perda de carga do sistema</b>	13% - 52%	(KNOTH; PFUNDSTEIN, 2011)
<b>Instalação de inversores de frequência em sistemas de ventilação com demanda de vazão variável ou operação intermitente</b>	8% -35% 41% Até 60%	(UNIDO, 2010) (SAIDUR <i>et al.</i> , 2012) (WEG, 2012)
<b>Mudança de lógica para limpeza de mangas de tempo para valor de perda de carga</b>	5%	(E3T, 2012)
<b>Correção de vazamentos e vedações danificadas</b>	2% - 5%	(UNIDO, 2010)
<b>Remoção de sedimentos de ventiladores e componentes do sistema</b>	0,5% - 3,5%	(UNIDO, 2010)
<b>Substituição de <i>dampers</i> ineficientes</b>	1% - 5%	(UNIDO, 2010)
<b>Implementação de programa de manutenção preventiva</b>	1% - 3%	(UNIDO, 2010)

<sup>a</sup> Considerou-se, para fins de simplificação, que a redução de vazão é proporcional à redução da demanda de energia elétrica dos sistemas, desconsiderando possíveis diferenças nas perdas de carga das soluções de despoejamento avaliadas.

## 4 ESTUDO DE CASO

Este capítulo apresenta um estudo de caso desenvolvido em uma usina siderúrgica integrada no Brasil. Nele, é detalhada a coleta de dados referente ao consumo de energia dos sistemas de despoejamento instalados na usina para controle ambiental e segurança do trabalhador. As análises realizadas no capítulo visam responder às seguintes questões:

- Qual é o impacto do consumo destes sistemas de despoejamento na demanda energética de cada unidade operacional deste tipo de usina?
- Qual é o consumo específico típico destes sistemas de despoejamento neste tipo de usina?
- Qual é o potencial de economia de energia nos sistemas de despoejamento analisados?

### 4.1 Descrição da unidade produtiva

Este estudo de caso foi realizado em uma indústria siderúrgica integrada que conta com as seguintes unidades operacionais:

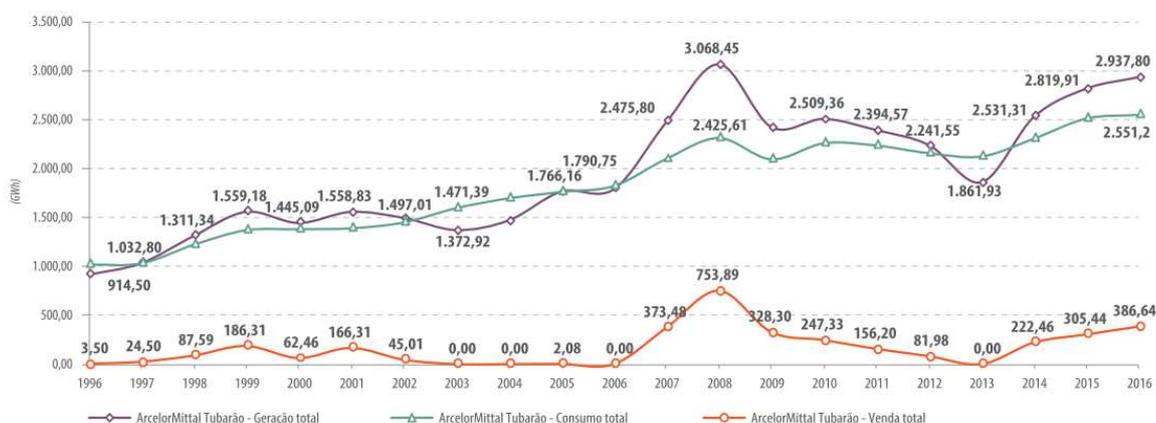
- (i) Coqueria;
- (ii) Sinterização;
- (iii) Altos fornos;
- (iv) Aciaria (Convertedor a Oxigênio), incluindo refino secundário e dessulfuração;
- (v) Lingotamento contínuo; e
- (vi) Laminação de tiras a quente.

A usina é a maior produtora de aço bruto do país, responsável por 22,5 % da produção nacional. No período de 1996 a 2016, a produção da unidade aumentou 96,9%, enquanto a média da produção de aço nacional evoluiu 23,9% (ARCELORMITTAL TUBARÃO, 2018).

Em estudo recente realizado por pesquisadores da Universidade Federal do Espírito Santo verificou-se que esta unidade produtiva é responsável direta e indiretamente por 12,7%

do Produto Interno Bruto (PIB) do estado do Espírito Santo, destacando a relevância desta unidade industrial para a economia capixaba (ARCELORMITTAL TUBARÃO, 2018).

Em relação ao consumo de energia, a usina gera mais energia elétrica do que consome, conforme ilustrado na Figura 13, de modo que o excedente é vendido. A usina registrou aumento no excedente energético de 34,9 MW em 2015 para 44,2 MW em 2016, e tem alcançado as metas progressivas de redução de consumo previstas no seu Plano Diretor de Energia (ARCELORMITTAL TUBARÃO, 2018).



Fonte: (ARCELORMITTAL TUBARÃO, 2018).

Figura 13. Geração, consumo e venda de energia elétrica (GWh) pela indústria siderúrgica avaliada.

## 4.2 Os sistemas de despoeiramento da usina

Na unidade da coqueria há sistemas de despoeiramento com pontos de captação em regiões de transferência de correias transportadoras, desenformamento dos fornos de coque, carga e descarga da unidade de apagamento a seco de coque (CDQ – *Coke Dry Quenching*), entre outros (IEMA, 2010).

No processo de sinterização, as emissões de material particulado devem ser controladas em pontos do processo e em regiões de manuseio e beneficiamento de material. Para tal, a unidade possui um conjunto de precipitadores eletrostáticos que atuam no tratamento das emissões provenientes da máquina de sinterização, denominada sistema primário. A jusante dos precipitadores do sistema primário, a unidade instalou também um filtro de mangas. A unidade conta também com um precipitador eletrostático para a captação de emissões provenientes da movimentação de materiais, peneiramento e outras fontes na área denominada

despoeiramento secundário. Além disso, há mais cinco sistemas de despoeiramento com filtro de mangas, de menor dimensão, na unidade operacional (IEMA, 2010).

Nos Altos Fornos 1, 2 e 3 há sistemas de despoeiramento com filtros de mangas nas regiões da Casa de Corrida, estocagem de material, moagem e silos (IEMA, 2010).

A Aciaria a oxigênio possui um conjunto de filtros de mangas que atuam na captação e no tratamento dos gases gerados durante o processo de transformação do ferro gusa em aço, nas etapas de pesagem de gusa, na transformação nos convertedores e no refino secundário (IEMA, 2010).

### **4.3 Caracterização do consumo de energia dos sistemas de despoeiramento da usina destinados a controle ambiental e segurança do trabalhador**

#### **4.3.1 Coleta de dados**

Na primeira etapa da caracterização foram coletadas as informações de consumo energético dos sistemas de despoeiramento instalados na usina para controle ambiental e segurança do trabalhador. A coleta de dados foi realizada em 40 sistemas de despoeiramento, dos quais 39 operam com filtro de mangas e 1 opera com precipitador eletrostático.

Foram considerados apenas sistemas de despoeiramento instalados para fins de controle ambiental e segurança do trabalhador, conectados a chaminés, isto é, foram excluídos da análise equipamentos de limpeza de gases para fins de processo. Assim, os sistemas de limpeza do gás da coqueria (*Coke Oven Gas* – COG), gás dos altos fornos (*Blast Furnace Gas* – BFG) e gás da aciaria LD (*Linz-Donawitz Converter Gas* – LDG), não foram considerados, já que tais sistemas removem o material particulado dos gases para uso industrial e os parâmetros do sistema de despoeiramento estão associados às demandas do processo. Além disso, desconsiderou-se o sistema de despoeiramento principal da sinterização, uma vez que os exaustores estão associados ao processo e independem das necessidades ambientais.

Outro critério de seleção foi a consideração de sistemas de despoeiramento com exaustão forçada, de modo que filtros de alívio de silos, por exemplo, não foram incluídos no levantamento.

Resumindo, foram coletados dados de 40 sistemas, que representam 98% da vazão total dos sistemas de despoeiramento em operação na usina e que atendem aos critérios supracitados.

As principais fontes de dados foram: dados de projeto; desenhos técnicos; medições de vazão nas chaminés dos sistemas de despoeiramento; visitas em campo; informações disponíveis no sistema de aquisição de dados *online* da usina (PIMS - *Plant Information Management Systems*) e entrevistas com especialistas das áreas de engenharia e manutenção responsáveis pelos sistemas de despoeiramento.

Foram coletadas as seguintes informações:

- Fontes de emissões: Pontos de captação do sistema de despoeiramento e características das emissões;
- Vazões de projeto ( $\text{m}^3/\text{h}$ ): Vazões volumétricas especificadas nos projetos dos sistemas de despoeiramento;
- Temperaturas de projeto ( $^{\circ}\text{C}$ ): Temperaturas de projeto nas entradas dos equipamentos de controle da poluição do ar;
- Vazões de projeto ( $\text{Nm}^3/\text{h}$ ): Vazões volumétricas especificadas nos projetos dos sistemas de despoeiramento, nas condições normais de temperatura e pressão (1 atm,  $0^{\circ}\text{C}$ );
- Vazões medidas ( $\text{m}^3/\text{h}$  e  $\text{Nm}^3/\text{h}$ ): Periodicamente são realizadas medições isocinéticas<sup>11</sup> de material particulado na chaminé dos sistemas de despoeiramento, nas quais também são medidas as vazões volumétricas nas condições encontradas nas chaminés e ajustadas para as condições normais de temperatura e pressão;
- Desenhos técnicos: Projetos mecânicos dos filtros de mangas e das redes de dutos;
- Potência instalada dos ventiladores (kW): Informações sobre a potência instalada dos ventiladores dos sistemas de despoeiramento;
- Potências consumidas, segundo os projetos (kW): Potências consumidas estimadas pelos projetos, quando disponíveis;
- Eficiências dos ventiladores (%): Eficiências dos ventiladores especificadas nos projetos, quando disponíveis;

---

<sup>11</sup> Metodologia de medição: CETESB L9.225, Março/1995 - Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias - Determinação de material particulado.

- Informações sobre os sistemas de limpeza dos filtros de mangas: tecnologias, vazões ( $\text{Nm}^3/\text{h}$ ) e pressões de limpeza (bar), disponíveis nos projetos dos sistemas de limpeza dos filtros de mangas;
- Correntes elétricas (A) medidas: Medições de correntes de alimentação dos motores dos sistemas, quando disponíveis; e
- Fatores de potência: Medições dos fatores de potência dos sistemas, quando disponíveis.

### 4.3.2 Parâmetros Avaliados

Com base na coleta de dados, foram realizados os cálculos da potência consumida pelo motor, potência consumida pelo sistema de limpeza e o consumo específico de energia elétrica da unidade. O procedimento de cálculo de cada um dos parâmetros é descrito nas seções a seguir.

#### 4.3.2.1 Potência consumida pelo motor

A potência elétrica na entrada do motor ( $P_e$ ) é calculada através da Equação 3, válida para motores trifásicos (PROCEL/ELETROBRÁS, [s.d.]):

$$P_e = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos\phi \quad (3)$$

onde V = tensão de alimentação do motor, I = corrente e  $\cos\phi$  = fator de potência.

Para os dados de corrente elétrica, três fontes de informação foram consultadas: o sistema de aquisição de dados *online* (PIMS), o painel elétrico do sistema de despoeiramento e dados de projeto. A prioridade foi dada aos dados do PIMS, uma vez que refletem os valores reais medidos ao longo de um período, registrando todas as suas variações, sendo possível obter um valor médio representativo da corrente de alimentação do motor do sistema. Desta forma, calculou-se a corrente média em 30 dias e utilizou-se esse valor para cálculo da potência elétrica, através da Equação 3.

Para alguns sistemas, o dado de corrente elétrica não se encontrava disponível no PIMS. Buscou-se, nestes casos, um valor instantâneo da corrente elétrica no painel elétrico do sistema. Como esta fonte só possibilita a coleta de um dado há mais incerteza no cálculo de uma potência representativa do funcionamento do sistema ao longo do tempo do que quando se utiliza os dados do PIMS.

Por fim, para sistemas sem dados de corrente disponíveis no PIMS e impossibilidade de coleta de dados no painel elétrico, utilizou-se a informação de consumo de eletricidade prevista em projeto. Evidentemente, esta fonte de dados também produz incertezas no cálculo da potência média do sistema.

A maioria, 46%, dos valores da corrente de alimentação dos motores foi obtida por meio do sistema de aquisição de dados *online* da usina. Na sequência, 37% dos dados foram obtidos por levantamentos de campo, com registro das correntes instantâneas e, por fim, 17% dos dados foram compilados a partir dos projetos dos sistemas.

Em relação à tensão de alimentação, utilizou-se a informação referente a cada motor, podendo ser 440 V ou 3,3 kV. No que diz respeito ao fator de potência, considerou-se o valor consultado no painel elétrico do sistema, ou o valor médio de 0,85, dependendo da disponibilidade da informação. Esta média é um valor razoável para os sistemas existentes na usina, considerando os dados disponíveis e consulta a especialistas da área.

#### **4.3.2.2 Potência consumida pelo sistema de limpeza do filtro de mangas**

Dentre os sistemas de despoeiramento avaliados, 87% possuem limpeza por jato pulsante, usando ar comprimido, e 13% são limpos pelo sistema ar reverso, usando ventilador auxiliar.

Em sistemas com limpeza por jato pulsante, os dados de vazão e pressão do ar comprimido, quando disponíveis no projeto, foram utilizados para calcular o consumo de energia desses sistemas, empregando a Equação 2. Nos casos de indisponibilidade destes dados, estimou-se este consumo em 2,0 Nm<sup>3</sup>/h de ar comprimido por 1.000 Nm<sup>3</sup>/h filtrado, uma média representativa de sistemas instalados com pressão de 6 bar, segundo Cooper e Alley (2011). Os dados de projeto do ventilador auxiliar foram utilizados para estimar o consumo de energia dos sistemas de limpeza por ar reverso.

### 4.3.2.3 Consumos energéticos específicos

O cálculo do consumo energético específico por volume de gás tratado em um sistema de despoejamento  $i$ ,  $C_{esp_i}$ , é efetuado pela equação (4), onde  $\dot{W}_{consumida_i}$  é a soma das potências consumidas pelo ventilador e pelo sistema de limpeza do filtro de mangas neste sistema, e  $\dot{Q}_i$  é a vazão volumétrica do sistema nas condições da chaminé. A equação (5) considera a vazão,  $\dot{Q}_{n_i}$ , nas condições normais de temperatura e pressão.

$$C_{esp} = \frac{\dot{W}_{consumida_i}}{\dot{Q}_i} \left[ \frac{kWh}{1000 m^3} \right] \quad (4)$$

$$C_{esp_n} = \frac{\dot{W}_{consumida_i}}{\dot{Q}_{n_i}} \left[ \frac{kWh}{1000 Nm^3} \right] \quad (5)$$

Nas situações em que a potência consumida foi obtida por medições reais, utilizou-se a vazão medida na última medição isocinética realizada na chaminé, enquanto que nos casos nos quais a potência foi estimada com base em dados de projeto, utilizou-se a vazão de projeto no cálculo do consumo energético específico.

### 4.3.3 Resultados

#### 4.3.3.1 Participação do consumo dos sistemas de despoejamento na potência total consumida nas unidades operacionais da usina

A equação (6) foi utilizada para calcular a participação,  $C_{Despoejamento_j}$ , dos  $n$  sistemas de despoejamento que operam na unidade operacional  $j$  da usina, na potência total consumida na unidade,  $\dot{W}_{Unidadej}$ :

$$C_{Despoejamento_j} = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{W}_{consumida_i}}{\dot{W}_{Unidadej}} [\%] \quad (6)$$

$W_{Unidadej}$  foi a potência média consumida pela unidade operacional no ano de apuração de dados, 2018. Os resultados destes cálculos para os sistemas de despoeiramento da aciaria, altos fornos, coqueria e sinterização estão indicados na Figura 14.

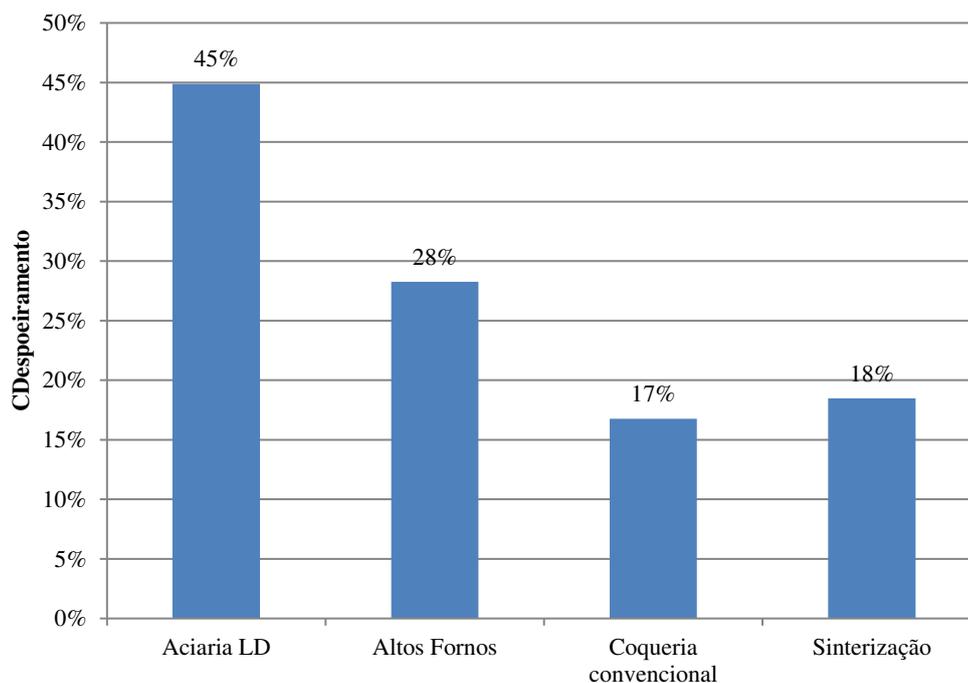


Figura 14. Participação percentual dos sistemas de despoeiramento na potência consumida nas unidades produtivas da usina.

Segundo a Figura 14, 45% do consumo de eletricidade da aciaria<sup>12</sup> se deve aos sistemas de despoeiramento com filtros de mangas. Os sistemas de maior importância nesta unidade operacional são os de despoeiramento secundário na área dos convertedores. Segundo Marx (2017), os sistemas de despoeiramento secundário de convertedores a oxigênio são, em geral, instalados para a exaustão das emissões de material particulado nas etapas de carregamento da sucata, carregamento do ferro gusa, emissões secundárias do sopro de oxigênio e remoção da escória.

Nos altos fornos, 28% do consumo de eletricidade se deve aos sistemas de despoeiramento, com destaque para aqueles instalados nas casas de corrida, para captação das emissões do canal basculante de gusa.

<sup>12</sup> No consumo da aciaria está incluído o consumo de eletricidade dos convertedores LD e do refino secundário, e não contempla o lingotamento contínuo.

Avaliando a unidade da coqueria convencional, estimou-se que 17% do consumo de eletricidade está associado aos sistemas de despoejamento com filtros de mangas. As principais captações estão situadas na área de desenformamento de coque e no apagamento a seco. Diversas captações de menor porte ocorrem em transferências de correias transportadoras.

Em todo o processo de sinterização, que inclui todo o pátio de matérias primas, máquina de sínter e resfriador, a participação dos sistemas de despoejamento é de 18% do consumo total de energia elétrica da unidade. É importante destacar que não foi incluído nesta análise o consumo dos exaustores de despoejamento primário da sinterização, já que se trata de um equipamento associado ao processo produtivo. Foram incluídos na análise o consumo do ventilador do filtro de mangas ligado em série ao precipitador eletrostático principal, e os consumos dos exaustores do precipitador eletrostático secundário, além de outros sistemas de menor porte na unidade. Considerando apenas o consumo de energia elétrica dos filtros de mangas, ou seja, excluindo o consumo do exaustor do precipitador eletrostático secundário, a participação é de 16% do consumo total da unidade.

O consumo de energia elétrica dos sistemas de despoejamento analisados corresponde a 9,5 % do consumo total de eletricidade da usina. Como nas usinas siderúrgicas existem outros ventiladores de impacto relevante no consumo de energia elétrica que não foram abordados neste trabalho, considerou-se o valor encontrado de 9,5 % coerente com o Plano Nacional de Energia 2030, no qual se estima que 15,3 % do consumo de energia em força motriz na indústria de ferro gusa e aço provêm de ventiladores (BRASIL, 2007).

É importante ressaltar que o consumo de eletricidade em usinas siderúrgicas nacionais tem crescido na última década. Em estudo realizado por Silva, Mathias e Bajay (2018), foram avaliados dados de consumo energético das principais usinas siderúrgicas no Brasil. Os autores identificaram um aumento de 18 % no consumo de eletricidade no setor siderúrgico nacional entre 2004 e 2014.

Considerando os resultados deste trabalho e a projeção da ampliação expressiva de controles ambientais, incluindo sistemas de despoejamento, no Brasil e no mundo, o incremento do consumo de eletricidade das usinas siderúrgicas pode ser ainda mais pronunciado. Assim, os resultados encontrados no presente trabalho reforçam a importância de estudos no sentido de se aumentar a eficiência energética de sistemas de despoejamento,

para um cenário futuro com melhoria do desempenho ambiental e redução dos impactos energéticos.

#### 4.3.3.1 Consumos energéticos específicos dos sistemas de despoeiramento analisados

Os valores de consumo energético específico, em kWh/1.000 m<sup>3</sup> e kWh/1.000 Nm<sup>3</sup>, calculados pelas equações (4) e (5), respectivamente, dos sistemas de despoeiramento analisados nesta dissertação estão indicados na Figura 16. Estes valores refletem fatores como perdas de carga dos sistemas, eficiências dos motores e ventiladores, consumos de energia elétrica dos sistemas de limpeza, entre outros.

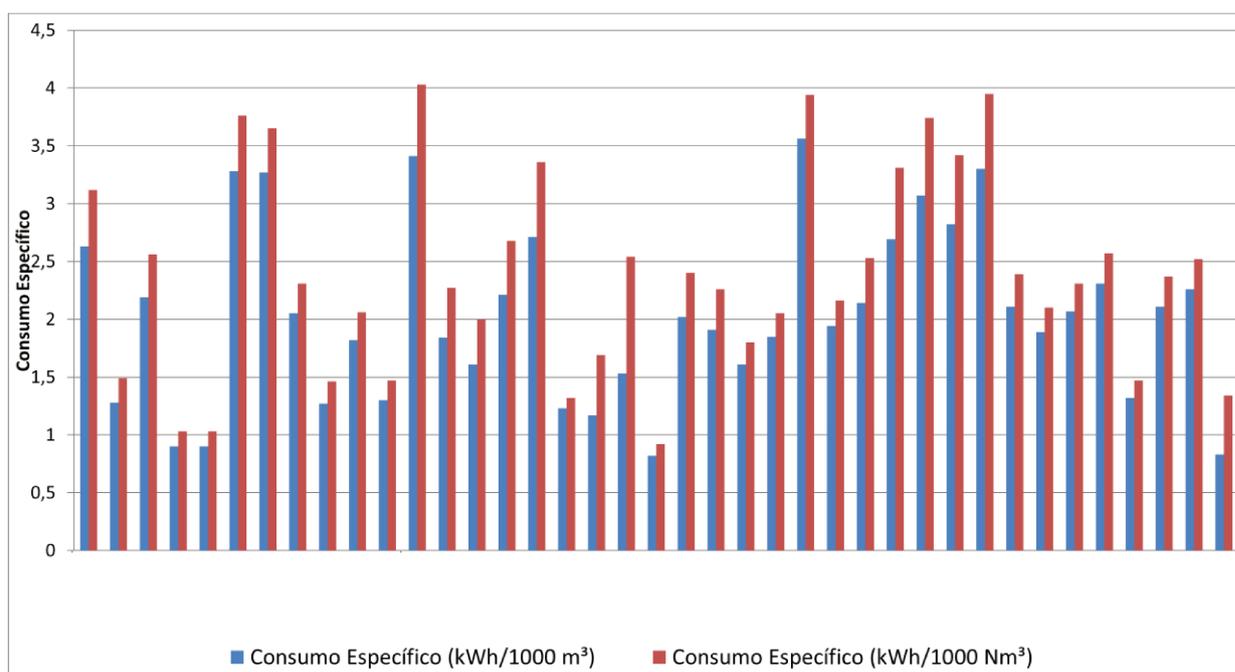


Figura 15. Consumos energéticos específicos dos 39 sistemas de despoeiramento com filtros de mangas estudados.

Observa-se, na Figura 15, uma grande variação entre os valores encontrados. O valor médio da amostra é de 2,03 kWh/m<sup>3</sup>. Em relação aos resultados em vazão normalizada, o valor médio obtido é de 2,39 kWh/Nm<sup>3</sup>.

É importante destacar que os consumos energéticos específicos calculados são a soma dos consumos específicos dos filtros de mangas propriamente ditos mais os consumos específicos associados à energia requerida para vencer as perdas de carga das redes de dutos.

Logo, os sistemas com maiores perdas de carga em suas redes de dutos têm consumos energéticos específicos maiores.

A literatura técnica consultada indica os seguintes valores de consumo energético específico só para os filtros de manga: Brauer e Varma (1981) - 0,8 a 1,0 kWh/1.000 m<sup>3</sup> e Infomil (2009) - 0,2 a 2,0 kWh/1.000 Nm<sup>3</sup>. Esses valores não englobam o consumo específico referente à rede de dutos, que é altamente dependente das condições locais.

Os consumos energéticos específicos calculados neste trabalho, além de poderem ser utilizados para a comparação entre sistemas similares, permitem projetar a potência requerida de novos sistemas de despoeiramento que venham a ser implementados.

#### **4.4 Medidas de eficiência energética aplicáveis aos sistemas avaliados**

Na avaliação das medidas de eficiência energética aplicáveis aos sistemas de despoeiramento analisados nesta dissertação, utilizou-se a abordagem “*bottom-up*”, na qual são identificados os efeitos destas medidas em cada sistema, individualmente (WORRELL *et al.*, 2003).

No estudo de potenciais de conservação de energia é comum se avaliar três tipos de potenciais: (i) técnicos, (ii) econômicos e (iii) de mercado. No potencial técnico avalia-se o limite técnico de penetração de determinadas medidas de eficiência energética considerando a substituição por tecnologias mais eficientes, sem considerar custos ou outros impedimentos. A viabilidade econômica, por sua vez, leva em conta custos e a comparação com alternativas para a expansão da disponibilidade energética ou outras medidas de eficiência energética. Quanto ao potencial de mercado, este considera outras barreiras que impeçam a penetração das medidas de eficiência energética (BRASIL, 2007). Este trabalho limitou-se ao mapeamento do potencial técnico de conservação de energia dos sistemas de despoeiramento analisados, desconsiderando custos e outras barreiras associadas à implantação de medidas de eficiência energética.

Coletados os dados de consumo de energia e levantadas as condições de cada sistema de despoeiramento, avaliou-se a aplicabilidade de cada medida. Para tal, utilizou-se a listagem de medidas de eficiência energética compiladas no capítulo anterior e suas faixas de

economias de energia (Tabela 5), sendo que algumas delas foram ajustadas, com o auxílio de especialistas, à realidade local, buscando estimativas mais conservadoras. No caso da medida referente à otimização das coifas de captação com simulação CFD visando a redução da vazão de projeto, por exemplo, o valor máximo de ganho de eficiência energética encontrado na literatura técnica consultada é de 62%, o que foi considerado excessivo para as aplicações na usina analisada neste estudo de caso, de modo que este percentual foi reduzido para 20%, no caso dos sistemas atuais com baixa eficiência; este novo valor é mais conservador e compatível com os resultados obtidos em estudos realizados anteriormente na própria empresa.

Em um trabalho realizado por Knoth e Pfundstein (2011), foi identificado que a otimização da geometria dos dutos e câmaras de mistura visando a redução da perda de carga do sistema pode até propiciar uma economia de energia de até 52 %, mas tal valor se refere a casos críticos de encaminhamento inadequado de dutos, fora da realidade desta usina. Quanto à instalação de inversores de frequência, a redução no consumo energético específico possível de ser alcançada é fortemente dependente da fonte de emissões de material particulado e do período de operação requerido; baseando-se no padrão de algumas fontes de emissão intermitentes, estimou-se que a economia de energia resultante desta medida se limita a 30%.

Na sequência do trabalho, foram estabelecidos critérios para a aplicação dos percentuais de redução de consumo em cada um dos sistemas de despoeiramento avaliados. Estes critérios estão descritos na Tabela 6.

Considerando os critérios estabelecidos, os sistemas de despoeiramento da usina foram classificados como tendo, atualmente, eficiência baixa, média ou alta. Um exemplo de classificação de dois sistemas de despoeiramento da usina está indicado na Tabela 7. A classificação foi realizada com o auxílio de visitas técnicas, informações de projetos e consultas a especialistas nas áreas de projeto, operação e manutenção de sistemas de despoeiramento. É importante destacar que a consulta a especialistas é um método comumente utilizado em trabalhos deste tipo, principalmente quando se deseja avaliar o impacto de potenciais de economia de energia (UNIDO, 2010). Neste caso, os especialistas auxiliaram no ajuste de alguns valores de ganhos potenciais de eficiência energética encontrados na literatura técnica para sistemas tendo atualmente eficiências alta, média, ou baixa, bem como na identificação de quais potenciais estariam associados a cada sistema de despoeiramento existente.

Tabela 6. Critérios para classificação da atual eficiência dos sistemas avaliados e alocação dos potenciais de economia de energia das medidas de eficiência energética entre estes sistemas de acordo com sua atual eficiência.

Medidas de eficiência energética	Potenciais de economia de energia relatados na literatura técnica	Alocação dos potenciais de economia de energia de acordo com a atual eficiência dos sistemas			Critérios para classificação da atual eficiência dos sistemas avaliados
		Alta eficiência	Média eficiência	Baixa eficiência	
Substituição de ventilador superdimensionado	2% - 18%	2%	10%	18%	Sistemas com (potência média)/(potência nominal): <ul style="list-style-type: none"> <li>• Superior a 75%: alta eficiência</li> <li>• Entre 50% e 75%: média eficiência</li> <li>• Abaixo de 50%: baixa eficiência</li> </ul>
Correção de condições inadequadas do escoamento na entrada e saída de ventiladores	1% - 10%	-	-	10%	Sistemas com condições de geometria na entrada ou saída de ventiladores favorecendo a turbulência foram classificados como de baixa eficiência
Isolamento do fluxo para equipamentos fora de operação	2% - 12%	2%	7%	12%	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistemas com rede de dutos nova e balanceada: alta eficiência</li> <li>• Sistemas com rede de dutos com poucas mudanças realizadas ao longo dos anos: média eficiência</li> <li>• sistemas de despoeiramento antigos, rede de dutos extensa, com muitas modificações realizadas ao longo dos anos: baixa eficiência</li> </ul>
Substituição do motor elétrico por modelo mais eficiente	1% - 5%	1%	3%	5%	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Motores instalados após 2012: alta eficiência</li> <li>• Motores instalados entre 2002 e 2012: média eficiência</li> <li>• Motores instalados antes de 2002: baixa eficiência</li> </ul>
Substituição de rotor de ventilador por um mais eficiente		-	-	5%	Ventilador antigo com baixa eficiência, de acordo com avaliação de especialistas
Otimização das coifas de captação com simulação CFD visando redução de vazão de projeto	30% - 61%	-	15%	20%	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O projeto do sistema de despoeiramento foi realizado de forma empírica: média eficiência</li> <li>• O projeto do sistema de despoeiramento foi realizado de forma empírica e processo com poucas referências de outros sistemas de despoeiramento: baixa eficiência</li> </ul>
Otimização da rede de dutos visando redução da perda de carga do sistema	13% - 52%	-	10%	20%	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rede de dutos balanceada, com possibilidades de melhorias: média eficiência</li> <li>• Rede de dutos com muitas ramificações, mudanças de diâmetro, conexões e novas ramificações: baixa eficiência</li> </ul>
Instalação de inversores de frequência em sistemas de ventilação com demanda de vazão variável ou operação intermitente	8%-60%	-	15%	30%	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistemas operando a cargas parciais por mais que 80% do tempo: média eficiência</li> <li>• Sistemas operando a cargas parciais por mais que 80% do tempo e controle da vazão por <i>dampers</i>: baixa eficiência</li> </ul>
Mudança de lógica para limpeza de mangas de tempo para valor de perda de carga	5%	-	-	5%	Sistemas em que a limpeza ocorre por tempo de filtragem: baixa eficiência
Correção de vazamentos e vedações danificadas	2% - 5%	-	-	5%	Sistemas cuja rede de dutos é extensa e antiga. Problemas com selagens e vazamentos reportados frequentemente: baixa eficiência
Remoção de sedimentos de ventiladores e componentes do sistema	0,5% - 3,5%	-	2%	3,5%	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistemas cujo ventilador esteja posicionado em área sujeita à contaminação: média eficiência</li> <li>• Ventilador localizado a montante do equipamento de controle da poluição do ar, material particulado com umidade alta ou baixa velocidade na tubulação. Registros de acúmulo de material em rede de dutos: baixa eficiência</li> </ul>
Substituição de <i>dampers</i> ineficientes	1% - 5%	-	-	5%	Sistemas nos quais os <i>dampers</i> possuem alta frequência de falhas: baixa eficiência
Implementação de programa de manutenção preventiva para o sistema	1% - 3%	-	-	3%	Sistemas com manutenção corretiva frequente, com alto número de falhas: baixa eficiência

Tabela 7. Exemplo de classificação de dois sistemas de despoeiramento em baixa, média ou alta eficiência atual, por medida de eficiência energética

<b>Medidas de eficiência energética</b>	<b>Sistema A</b>	<b>Sistema B</b>
<b>Substituição de ventilador superdimensionado</b>	n.a.	n.a.
<b>Correção de condições inadequadas do escoamento na entrada e saída de ventiladores</b>	n.a.	n.a.
<b>Isolamento do fluxo para equipamentos fora de operação</b>	n.a.	n.a.
<b>Substituição do motor por modelo mais eficiente</b>	Baixa eficiência	Média eficiência
<b>Substituição de rotor de ventilador por um mais eficiente</b>	n.a.	n.a.
<b>Otimização das coifas de captação com simulação CFD visando redução de vazão de projeto</b>	n.a.	Média Eficiência
<b>Otimização da rede de dutos visando redução da perda de carga do sistema</b>	n.a.	n.a.
<b>Instalação de inversores de frequência em sistemas de ventilação com demanda de vazão variável ou operação intermitente</b>	n.a.	n.a.
<b>Mudança de lógica para limpeza de mangas de tempo para valor de perda de carga</b>	n.a.	Baixa eficiência
<b>Correção de vazamentos e vedações danificadas</b>	Baixa eficiência	n.a.
<b>Remoção de sedimentos de ventiladores e componentes do sistema</b>	Média eficiência	Baixa eficiência
<b>Substituição de <i>dampers</i> ineficientes</b>	n.a.	n.a.
<b>Implementação de programa de manutenção preventiva para o sistema</b>	n.a.	n.a.

n.a.: não se aplica

Algumas das medidas de eficiência energética avaliadas são mutuamente excludentes, como, por exemplo, a substituição de ventiladores superdimensionados e a substituição de seus rotores. Durante a avaliação dos potenciais técnicos de conservação de energia se tomou o cuidado de evitar o acúmulo desses potenciais.

O procedimento descrito nesta seção foi aplicado a cada sistema de despoeiramento e a cada medida de eficiência energética. Os potenciais técnicos de conservação de energia foram, então, agregados por unidade produtiva da usina e por medida de eficiência energética.

#### 4.4.1.1 Resultados

Os potenciais de economia de energia elétrica dos sistemas de despoejamento encontrados em cada unidade produtiva da usina estão indicados na Figura 16. É importante frisar que o potencial de economia foi calculado em relação ao consumo de energia dos sistemas de despoejamento de cada unidade, e não em relação ao consumo total de eletricidade da unidade produtiva.

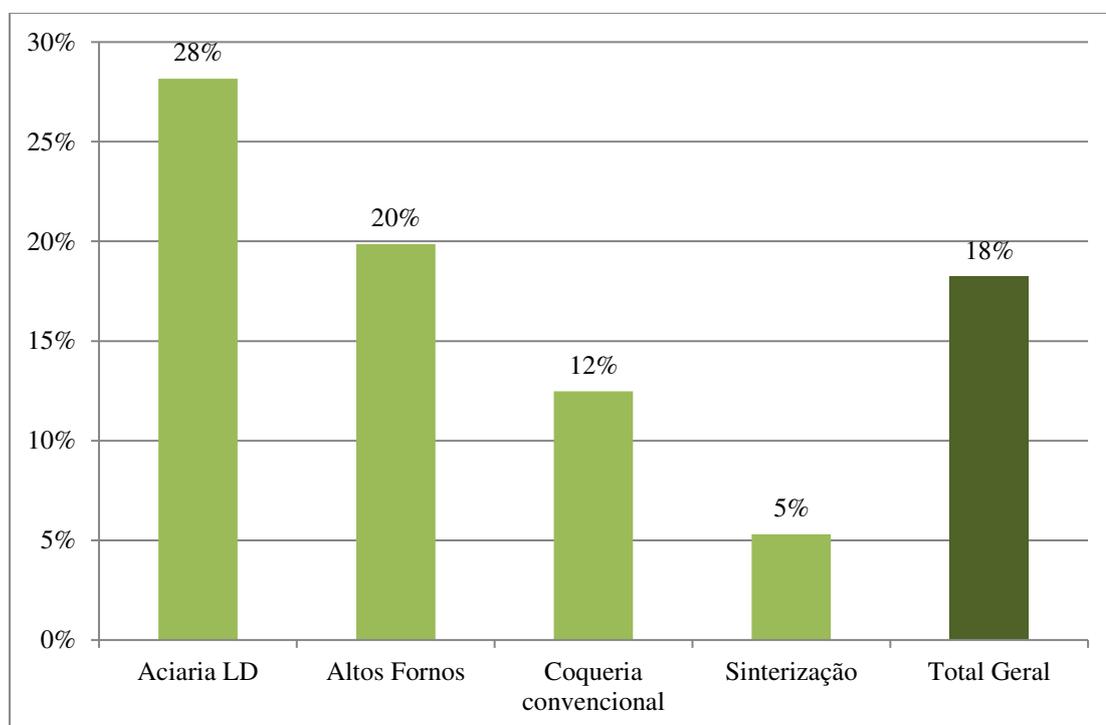


Figura 16. Economias de energia estimadas nos sistemas de despoejamento da usina, por unidade produtiva.

O maior potencial identificado foi na aciaria, de 28% da energia consumida pelos seus sistemas de despoejamento nessa área. A principal medida foi a instalação de inversores de frequência, que oferece alto potencial de economia de energia e é aplicável a sistemas importantes da unidade, que captam fontes de emissão intermitentes. A instalação de inversores de frequência em sistemas de ventilação na aciaria é, inclusive, uma das principais medidas de eficiência energética propostas para usinas siderúrgicas em trabalhos anteriores sobre este setor, como os publicados por Silva, Mathias e Bajay (2018) e He e Wang, (2017).

Outra medida de eficiência energética de destaque nesta unidade é a otimização das coifas de captação com simulação fluidodinâmica computacional (CFD). Trabalhos como os de Marx (2017) e Marx e Wollenberg, (2013), realizados em aciarias a oxigênio, destacam a grande aplicabilidade desses estudos para a otimização da captação nestas unidades.

Destaque-se, ainda, que na aciaria se encontram sistemas de despoejamento de grande porte, de modo que as medidas de eficiência energética aplicáveis à unidade possuem grande impacto no consumo total de eletricidade dos sistemas de despoejamento da usina.

Nos altos fornos, o potencial de economia identificado é de 20% do consumo de eletricidade de seus sistemas de despoejamento, com destaque também para a instalação de inversores de frequência. O potencial técnico de conservação de energia encontrado na coqueria é de 12% do consumo de eletricidade de seus sistemas de despoejamento. O menor potencial foi identificado na sinterização, 5%, onde o consumo mais relevante é devido a um novo filtro de mangas instalado em 2018, cujo projeto, operação e manutenção são compatíveis com as melhores práticas disponíveis.

No total, considerando as quatro unidades produtivas avaliadas, estima-se que há oportunidades técnicas de redução do consumo de eletricidade por sistemas de despoejamento em 18%.

No conjunto das quatro unidades produtivas, a participação de cada medida de eficiência energética no potencial total de economia estimado está listada na Tabela 8. Conforme salientado anteriormente, a medida associada à instalação de inversores de frequência se destaca, sendo responsável por 45% do potencial levantado. Esse grande potencial é apontado em outros trabalhos para diversas aplicações industriais e, frequentemente, esta ação é mencionada na literatura técnica como uma das principais medidas de eficiência energética em sistemas com motores elétricos (ABDELAZIZ; SAIDUR; MEKHILEF, 2011; DU PLESSIS; LIEBENBERG; MATHEWS, 2013; KERMELI; WORRELL; MASANET, 2011; OZDEMIR, 2004; SAIDUR *et al.*, 2012).

A otimização das coifas de captação com métodos computacionais para a redução da vazão de projeto pode economizar 12% do consumo total de eletricidade dos sistemas de despoejamento analisados. Esta estimativa é conservadora, visto que o levantamento deste potencial depende de uma análise detalhada de cada aplicação.

É importante frisar que a redução do consumo de energia dos sistemas de despoejamento não pode, em nenhuma hipótese, comprometer o desempenho ambiental do

sistema na captura eficiente de material particulado. Portanto, a realização de uma caracterização detalhada da fonte de emissão para o projeto das coifas é crucial. O potencial de economia de energia estimado com esta medida reforça a importância da etapa de projeto no consumo de energia dos sistemas de despoeiramento.

Tabela 8. Participação das medidas de eficiência energética no potencial total de economia de energia identificado.

<b>Medida de Eficiência Energética</b>	<b>Participação no potencial de economia de energia estimado</b>
<b>Instalação de inversores de frequência em sistemas de ventilação com demanda de vazão variável ou operação intermitente</b>	45%
<b>Otimização das coifas de captação com simulação CFD visando redução de vazão de projeto</b>	12%
<b>Otimização da geometria dos dutos e câmaras de mistura visando redução de perda de carga do sistema</b>	11%
<b>Substituição de <i>dampers</i> ineficientes</b>	7%
<b>Mudança de lógica para limpeza de mangas de tempo para valor de perda de carga</b>	7%
<b>Remoção de sedimentos de ventiladores e componentes do sistema</b>	5%
<b>Substituição de rotor de ventilador por um mais eficiente</b>	4%
<b>Substituição de motor por modelo mais eficiente</b>	4%
<b>Correção de condições inadequadas do escoamento na entrada e saída de ventiladores</b>	3%
<b>Correção de vazamentos e selagens danificadas</b>	1%
<b>Substituição de ventilador superdimensionado</b>	1%
<b>Implementação de programa de manutenção preventiva para o sistema</b>	0%
<b>Isolamento do fluxo para equipamentos fora de operação</b>	0%

## **5 RECUPERAÇÃO DE CALOR COM INSTALAÇÃO OPERANDO SEGUNDO O CICLO RANKINE ORGÂNICO**

O capítulo anterior aborda iniciativas para reduzir o consumo de energia de sistemas de despoejamento. Este capítulo, por sua vez, descreve o Ciclo Rankine Orgânico e o potencial desta tecnologia para recuperação energética de gases a temperaturas moderadas em sistemas de despoejamento, listando suas vantagens e desafios.

Uma modelagem termoeconômica é desenvolvida no capítulo para estimar o potencial de recuperação de energia para algumas combinações de vazão e temperatura dos gases e os custos associados a essa recuperação.

A estrutura do capítulo foi montada para responder às seguintes questões:

- Qual é a quantidade de calor disponível por faixa de temperatura em sistemas de despoejamento de uma usina siderúrgica?
- Qual é o potencial técnico de recuperação de calor de gases de sistemas de despoejamento, em diferentes condições de temperatura e vazão, para produção de eletricidade através do Ciclo Rankine Orgânico?
- Qual parcela do consumo de eletricidade de sistemas de despoejamento poderia ser suprida pela produção de eletricidade através do Ciclo Rankine Orgânico?
- Quais são os custos associados à geração de eletricidade através do Ciclo Rankine Orgânico para as combinações de vazão e temperatura avaliadas?

### **5.1 O Ciclo Rankine Orgânico**

Forman *et al.* (2016) estimam que 30% da energia consumida pela indústria, incluindo combustíveis e eletricidade, são perdidas em gases de exaustão e em efluentes. Além disso, eles estimam que 42% deste calor residual estão abaixo de 100 °C, 20% entre 100 °C e 299 °C e 38% acima de 300 °C.

Os gases contaminados com material particulado que são enviados a sistemas de despoejamento frequentemente possuem altas temperaturas, exigindo resfriamento antes de

passar pelo equipamento de controle de poluição do ar. Esse resfriamento pode ser realizado principalmente de três formas: utilização de trocadores de calor, diluição com ar mais frio, ou injeção de água (COOPER; ALLEY, 2011).

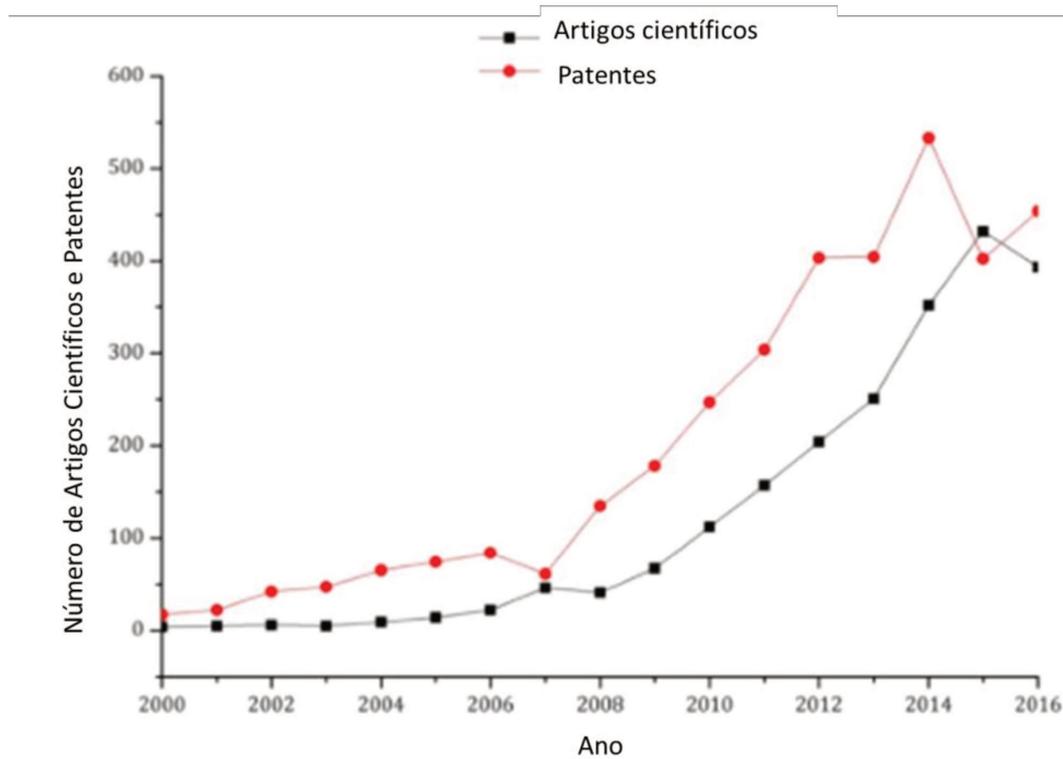
O uso de trocadores de calor apresenta vantagens em relação aos outros métodos, como a redução significativa da vazão volumétrica em relação àquela obtida com os outros métodos. Este método também não implica no aumento da umidade do gás e permite a recuperação do calor residual (*Waste Heat Recovery - WHR*). Entre as desvantagens estão os custos de instalação, operação e manutenção associados (COOPER; ALLEY, 2011).

Frequentemente, as temperaturas desses gases não são altas o suficiente para serem convertidas de forma eficiente em energia elétrica pelos métodos convencionais de geração de energia, com turbinas a vapor (Ciclo Rankine), de modo que essa energia é frequentemente desperdiçada (CHEN; GOSWAMI; STEFANAKOS, 2010).

No entanto, nos últimos anos observou-se um interesse crescente na recuperação de energia de fontes de calor de temperatura moderada, com pesquisas conduzidas sobre tecnologias alternativas para esse fim (QUOILIN *et al.*, 2013). Neste contexto, o Ciclo Rankine Orgânico (*Organic Rankine Cycle - ORC*) tem sido apontado como uma das principais alternativas para a recuperação de calor e conversão em energia elétrica (KAŠKA, 2014). Evidências dessa tendência são o crescimento expressivo de publicações e patentes sobre o tema a partir de 2000, conforme levantamento realizado por Imran *et al.* (2018), resumido na Figura 17, e o aumento das aplicações industriais desta tecnologia para recuperação de calor residual, com plantas já instaladas e em construção de poucos kW até 10 MW (TURBODEN, [s.d.]

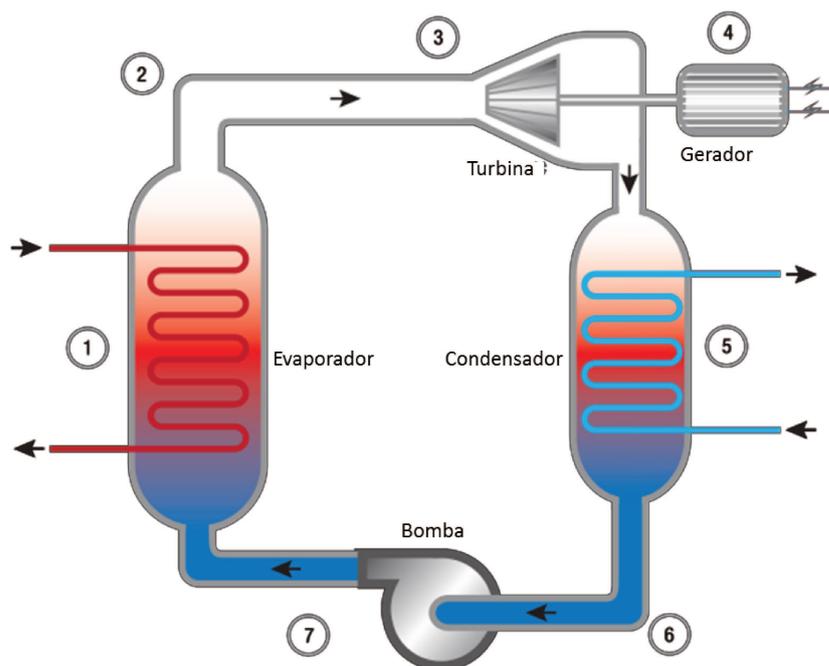
Conceitualmente o ORC é muito similar ao Ciclo Rankine Tradicional a vapor, no sentido de ser baseado na vaporização de líquidos pressurizados que expandem até uma pressão reduzida gerando trabalho mecânico.

Na ilustração da Figura 18, o fluido de trabalho troca calor com a fonte quente no evaporador (1), e um único trocador de calor pode ser usado para o pré-aquecimento, vaporização e superaquecimento. O vapor expande na turbina para a geração de potência (3 e 4). Em seguida o vapor superaquecido ou saturado é condensado em líquido saturado no condensador (5) e bombeado (7) fechando o ciclo (WANG *et al.*, 2015).



Fonte: (IMRAN *et al.*, 2018)

Figura 17. Artigos científicos e patentes referentes à tecnologia do Ciclo Rankine Orgânico de 2000 a 2016.



Fonte: Adaptado de Access Energy (2017).

Figura 18. Ilustração do Ciclo Rankine Orgânico.

Assim, os componentes são similares aos do ciclo Rankine tradicional, mas o fluido de trabalho é um composto orgânico caracterizado por uma temperatura de ebulição menor do que a da água, permitindo uma geração de potência usando uma fonte de calor com temperatura inferior.

Diversos trabalhos exploraram a potencial recuperação de calor residual de baixa temperatura em sistemas de exaustão, alguns deles incluindo equipamentos de despoeiramento.

Legmann (2002) descreve o primeiro sistema de recuperação de calor com ORC na indústria cimenteira, aplicado ao gás proveniente do resfriador do clínquer. A vazão de 150.000 Nm<sup>3</sup>/h a uma temperatura de 275 °C troca calor com um óleo térmico intermediário, que posteriormente troca calor com o pentano, fluido de trabalho do ORC. A planta descrita possui capacidade instalada de 1,5 MW e uma produção média de 1,3 MW, capaz de fornecer 12% da demanda energética da planta e reduzir a emissão de CO<sub>2</sub> em 7.600 toneladas/ano.

Roy, Mishra e Misra (2010) empregaram otimização paramétrica na análise de desempenho de um sistema de recuperação de calor residual baseado no ORC utilizando os fluidos de trabalho R-12, R-123 e R-134a. A fonte de calor envolvida foi gás de combustão a 140 °C em uma usina termelétrica e a otimização foi realizada para obter o valor ótimo de superaquecimento na entrada da turbina em diferentes condições de pressão. Os resultados com o fluido R-123 alcançaram os maiores valores de eficiência.

No trabalho publicado por Walsh e Thornley (2012), os autores avaliaram a recuperação de calor dos gases da chaminé de uma unidade de coqueria convencional, em uma usina siderúrgica integrada na Inglaterra. Os autores realizaram uma análise técnico-econômica e ambiental de um sistema ORC para um fluxo de gás de 66 kg/s a 221 °C usando benzeno como fluido de trabalho. Eles consideraram um custo unitário de instalação do sistema ORC de 2023 €/kW.

Bause *et al.* (2014) descrevem um projeto para o aproveitamento energético do gás de um forno elétrico a arco, amplamente utilizado em usinas siderúrgicas que utilizam sucata metálica como principal matéria prima. A unidade, instalada em uma usina na Alemanha, tem capacidade instalada de 2.560 kW de potência elétrica líquida e foi o primeiro sistema ORC acoplado a uma usina siderúrgica que emprega sucata metálica.

Wang *et al.* (2015) avaliam a aplicação de ORC integrado à linha de produção de cimento na China, aproveitando o calor na saída do resfriador de clínquer, a uma temperatura de 220 °C. Os autores avaliaram os seguintes fluidos de trabalho no ciclo: hexano, isohexano, R601, R123 e R245fa. Foram realizadas análises termodinâmicas e econômicas, além de uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Os autores concluíram que, para uma produção de 4000 t/dia de cimento, seria possível obter entre 911,30 kW e 1090,74 kW de potência líquida. Com essa capacidade instalada, a eletricidade gerada a partir do ORC permitiria a redução de emissões de CO<sub>2</sub> da planta entre 0,62 e 0,74%, com valores de *payback* entre 2,74 e 3,42 anos.

A Tabela 9 lista as fontes de calor dos sistemas de exaustão, temperaturas e potências líquidas produzidas nas instalações utilizando Ciclo Rankine Orgânico relatadas na literatura técnica consultada.

Tabela 9. Recuperações de calor usando Ciclo Rankine Orgânico em aplicações industriais, incluindo faixa de temperatura e potência líquida.

<b>Fonte de calor</b>	<b>Faixa de Temperaturas</b>	<b>Potência Líquida (MW)</b>	<b>Referência</b>
<b>Gás proveniente do resfriador de clínquer</b>	275 °C	1,3	LEGMANN, 2002
<b>Gás de combustão de usina termelétrica</b>	140 °C	9,127 a 19,09	ROY; MISHRA; MISRA, 2010
<b>Chaminé de Coqueria</b>	221 °C	2,31	WALSH; THORNLEY, 2012
<b>Gás de Forno Elétrico a Arco (Indústria Siderúrgica)</b>	228 °C a 245 °C	2,56	BAUSE <i>et al.</i> , 2014
<b>Gás proveniente do resfriador de clínquer</b>	220 °C	0,911 a 1,090	WANG <i>et al.</i> , 2015
<b>Gás de exaustão de combustão de carvão</b>	130 °C	1,45	GUO <i>et al.</i> , 2015
<b>Gás de combustão de biomassa</b>	345 °C	0,1564	MUDASAR; AZIZ; KIM, 2017

## 5.2 Caracterização do calor disponível nos sistemas de despoejamento de uma usina siderúrgica

No intuito de avaliar a potencial aplicabilidade da tecnologia na usina objeto do estudo de caso, foram mapeadas as vazões e temperaturas dos sistemas de despoejamento existentes na usina. Quarenta sistemas foram avaliados e considerou-se, para esta avaliação, a temperatura de projeto no filtro de mangas. As avaliações foram realizadas nas seguintes faixas de temperatura: (i) menor que 100 °C, (ii) entre 100 °C e 149 °C e (iii) maior que 150 °C.

Calculou-se a vazão total dos sistemas de despoejamento avaliados somando as vazões corrigidas para Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP). A partir daí, calculou-se a porcentagem da vazão total em cada faixa de temperatura, conforme ilustrado na Figura 19. Sistemas que captam ar ambiente possuem temperaturas mais baixas, de modo que 64% da vazão total está a uma temperatura inferior a 100 °C. 21% da vazão total de despoejamento dos sistemas se encontra entre 100 °C e 149 °C, e 15% acima de 150 °C, sendo 180 °C o valor máximo encontrado.

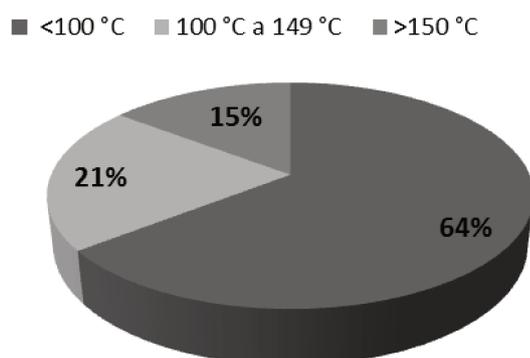


Figura 19. Distribuição das vazões dos sistemas de despoejamento por faixa de temperatura.

Em seguida, calculou-se o potencial máximo de recuperação das fontes considerando 100 °C como a temperatura mínima para a recuperação dos gases do sistema de exaustão, conforme ilustrado na Figura 20. Como os sistemas com temperatura abaixo de 100 °C foram excluídos da análise, apenas as faixas entre 100 °C e 149 °C e superior a 150 °C foram levadas em conta.

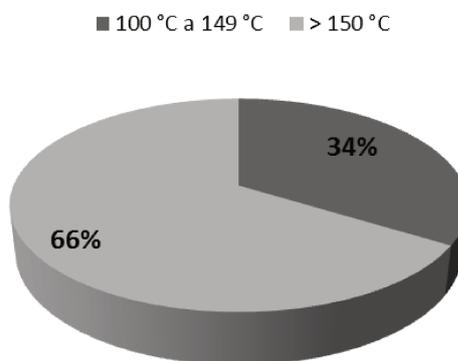


Figura 20. Quantidade de calor disponível nos sistemas de despoejamento segundo faixas de temperatura.

O potencial teórico máximo, para geração de potência, do calor disponível nos sistemas de despoejamento pode ser calculado assumindo que entre estas fontes opere uma máquina de Carnot, segundo um ciclo termodinâmico reversível. O rendimento deste ciclo, denominado Rendimento de Carnot,  $\eta_{Carnot}$ , é calculado através da Equação (7), onde  $T_{ff}$  é a temperatura da fonte fria e  $T_{fq}$  é a temperatura da fonte quente.

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_{ff}}{T_{fq}} \quad (7)$$

Adotando uma temperatura ambiente de 25 °C para a fonte fria e, para a fonte quente, uma média entre a temperatura do gás na entrada do sistema de despoejamento e a temperatura de referência de 100 °C, foi possível calcular a distribuição deste potencial máximo entre as duas faixas de temperaturas consideradas neste estudo. Esta distribuição está indicada na Figura 21.

Esta figura revela que, apesar das vazões com temperaturas acima de 150 °C representarem apenas 15% do total das vazões avaliadas, nesta faixa de temperaturas reside 70% do potencial teórico de energia térmica recuperável nos sistemas de despoejamento para geração de potência.

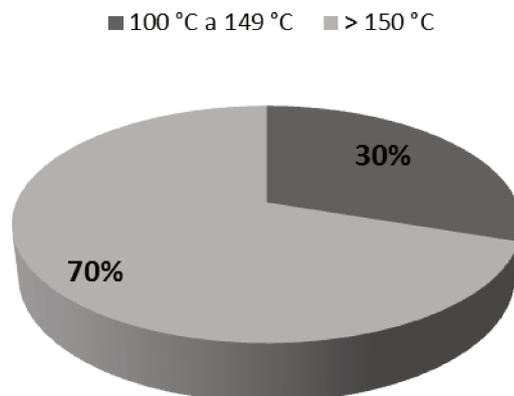


Figura 21. Distribuição da energia térmica recuperável nos sistemas de despoeiramento para geração de potência por faixas de temperatura.

### 5.3 Combinações de vazões, temperaturas e fluidos de trabalho para a modelagem termoeconômica

Tendo em vista a disponibilidade de fontes de calor de temperatura moderada em sistemas de despoeiramento, conforme discutido na seção anterior, esta seção apresenta uma modelagem termoeconômica de algumas combinações de vazão e temperatura possíveis de serem encontrados em sistemas de despoeiramento de usinas siderúrgicas. Assim, não se trata de um estudo de caso aplicado, mas de uma análise geral indicando em que faixas de temperatura e vazão a recuperação de calor com Ciclo Rankine Orgânico, para geração de potência, pode ser viável técnica e economicamente.

Para tal foram definidos quatro valores de vazões, dois valores de temperaturas do gás de exaustão, que é a fonte quente, e dois fluidos orgânicos a serem avaliados, conforme indicado na Tabela 10, com as combinações entre estes valores nomeados de A até P. As temperaturas e vazões foram escolhidas em um intervalo compatível com aplicações de ORC e com valores encontrados nos sistemas de despoeiramento existentes na usina objeto do estudo de caso do capítulo anterior.

Tabela 10. Combinações de temperatura e vazão e fluido de trabalho simuladas na modelagem termoeconômica.

	50.000 Nm <sup>3</sup> /h	100.000 Nm <sup>3</sup> /h	200.000 Nm <sup>3</sup> /h	400.000 Nm <sup>3</sup> /h
R245fa - 150 °C	A	B	C	D
R245fa - 200 °C	E	F	G	H
R134a - 150 °C	I	J	K	L
R134a - 200 °C	M	N	O	P

É importante destacar que a composição do gás varia de acordo com o processo que o gerou, de modo que cada caso deve ser avaliado individualmente. No entanto, pretende-se avaliar aqui o potencial de recuperação de energia desses sistemas de modo genérico. Logo, considerou-se, para todos os casos da Tabela 10, o gás como sendo aproximado pelo ar padrão.

Para cada uma dessas combinações de temperatura, vazão e fluido de trabalho foram realizados cálculos de simulação termoeconômica, conforme metodologia descrita nas seções a seguir, de modo a identificar os parâmetros que propiciam o menor custo unitário de geração de eletricidade. Todos os cálculos foram desenvolvidos no *software* EES (*Engineering Equation Solver*).

A configuração avaliada neste trabalho está ilustrada na Figura 22.

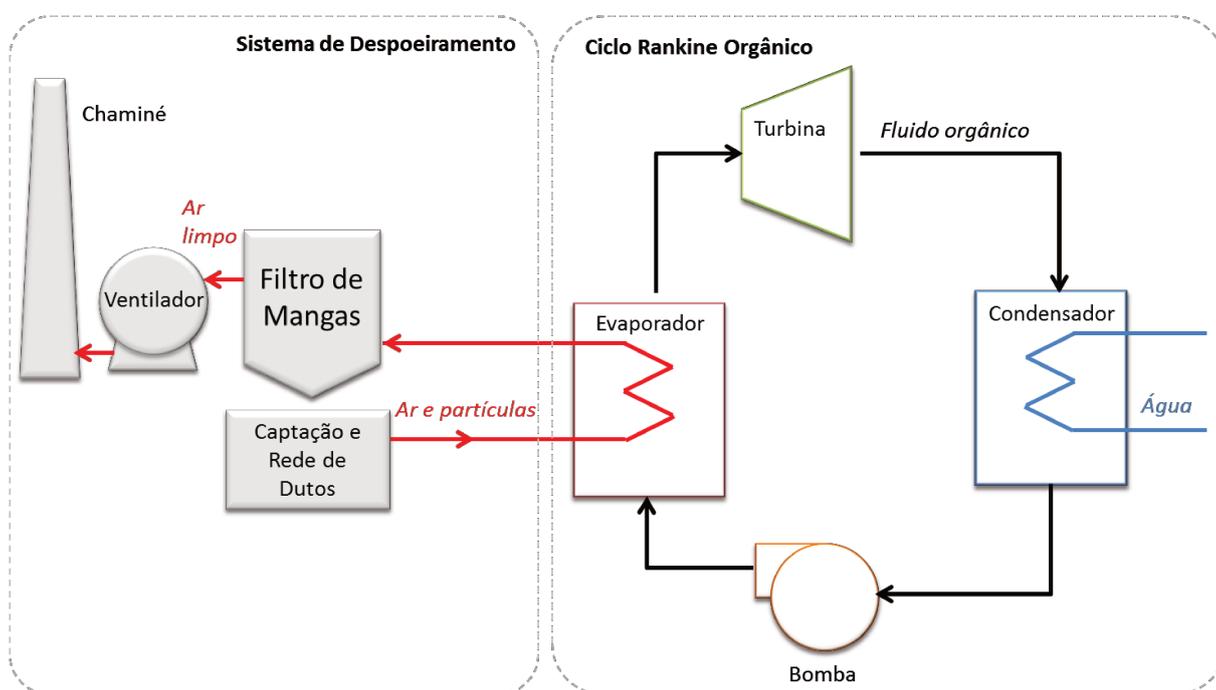


Figura 22. Configuração proposta para recuperação de calor residual de gases com Ciclo Rankine Orgânico.

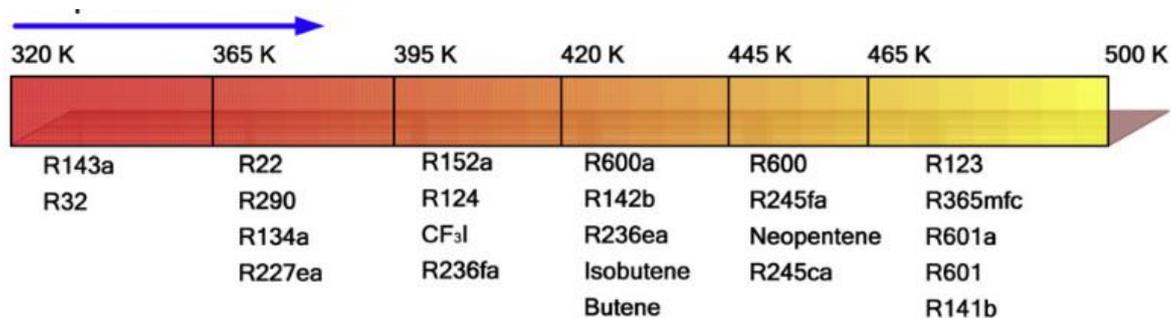
O ar contaminado com partículas é coletado e conduzido pela rede de dutos até o evaporador, onde troca calor diretamente com o fluido orgânico. O ar, a uma temperatura mais baixa, passa então pelo filtro de mangas com a exaustão pelo ventilador e o ar limpo é liberado

pela chaminé. Considerou-se, portanto, o envio do ar com material particulado diretamente para o evaporador. Em algumas aplicações, um equipamento intermediário para a remoção de material particulado grosseiro pode ser necessário, de modo a evitar desgaste do trocador de calor. No entanto, para simplificação do problema, o presente trabalho considerou que tal medida não é necessária.

Considerou-se, também, a condensação do fluido orgânico por meio de troca térmica com água. Condensadores a ar também são disponíveis para essa tecnologia, e devem ser avaliados de acordo com as especificidades do local, no que concerne à disponibilidade de água, disponibilidade de espaço físico, entre outros fatores.

#### 5.4 Modelo termodinâmico

Para a modelagem termodinâmica, a primeira etapa foi a escolha de fluidos de trabalho, um ponto crucial em sistemas ORC. Critérios gerais para essa seleção são: pressão moderada de vapor no evaporador, estabilidade, temperatura crítica adequada, segurança, entre outros (WANG et al., 2012). A Figura 23 ilustra alguns fluidos de trabalho utilizados para diversas faixas de temperaturas.



Fonte: (WANG; LING; PENG, 2013)

Figura 23. Seleção ótima de fluidos de trabalho de acordo com faixas de temperatura da fonte quente.

Para este estudo, foram escolhidos dois fluidos de trabalho, o R134a e o R245fa, amplamente utilizados na recuperação de calor residual (BAO; ZHAO, 2013). Algumas propriedades importantes destes fluidos estão indicadas na Tabela 11.

Tabela 11. Propriedades dos fluidos R245fa e R134a.

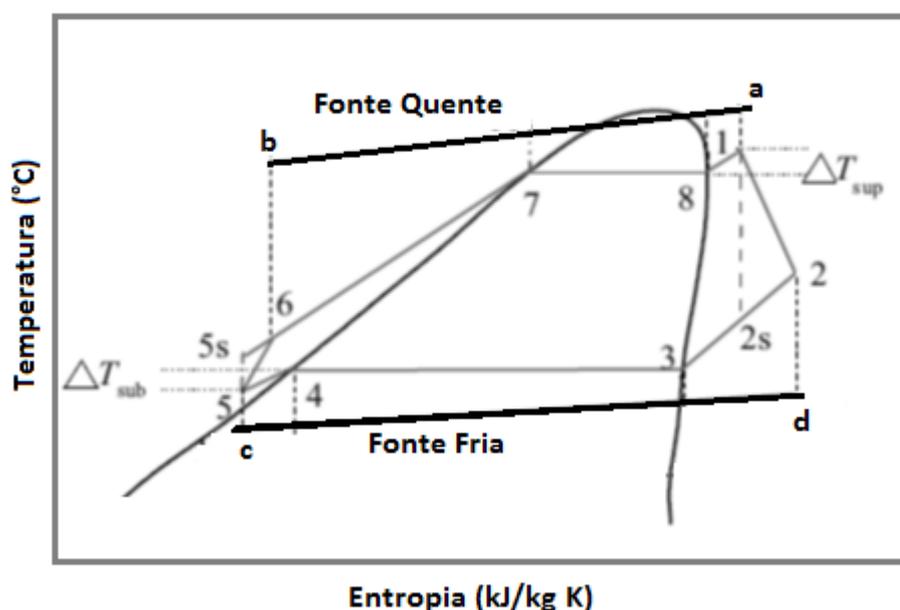
Propriedade	R245fa	R134a
Temperatura crítica (°C)	154	101
Pressão crítica (bar)	36,5	40,6
Potencial de Aquecimento Global (GWP – Global Warming Potential)	950-1030	1430
Risco à saúde <sup>a</sup>	2	1
Inflamabilidade <sup>a</sup>	1	0
Instabilidade/Reatividade <sup>a</sup>	0	1

(a) Classificação de acordo com a norma NFPA 704, da Associação Nacional para Proteção contra Incêndios dos Estados Unidos.

Fonte: (FENG et al., 2017; MACCHI; ASTOLFI, 2017).

Foram assumidas as seguintes hipóteses simplificadoras no modelo termodinâmico utilizado: (i) regime permanente; (ii) não há variação de energia cinética e potencial; (iii) as perdas de calor são desprezíveis; e (iv) a perda de carga por atrito é desprezível.

A Figura 24 ilustra o Diagrama T-s do Ciclo Rankine Orgânico. O trecho 6-1 refere-se à troca térmica do fluido de trabalho (aquecimento, mudança de fase e superaquecimento) com a fonte quente. O trecho 1-2 representa a expansão na turbina. No trecho 2-5 há a troca térmica com a fonte fria (resfriamento, condensação e sub-resfriamento), neste caso com água. O trecho 5-6 completa o ciclo com o trabalho de bombeamento.



Fonte: Adaptado de FENG *et al.*, 2017.

Figura 24. Diagrama T-s do Ciclo Rankine Orgânico

A taxa de transferência de calor dos gases da fonte quente, considerados como ar padrão, para o fluido de trabalho,  $\dot{Q}_{FQ}$ , é calculada através da Equação (8):

$$\dot{Q}_{FQ} = \dot{m}_{FQ}(h_a - h_b) = \dot{m}_{FQ}c_{p,FQ}(T_a - T_b) \quad (8)$$

onde  $h$  e  $T$  são, respectivamente, a entalpia específica e a temperatura dos gases, na entrada (a) e saída (b) do evaporador, e  $\dot{m}_{FQ}$  e  $c_{p,FQ}$  representam a vazão mássica e o calor específico dos gases, respectivamente.

O calor recebido pelo fluido de trabalho no evaporador,  $\dot{Q}_{evap}$ , a partir da fonte quente, é descrito pela Equação (9), onde  $\dot{m}_{ORC}$  é a vazão mássica do fluido orgânico e  $h$  é a entalpia específica do fluido de trabalho na entrada (6) e saída (1) do evaporador:

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}_{ORC}(h_1 - h_6) \quad (9)$$

Como se assumiu que as perdas de calor no ciclo são desprezíveis:  $\dot{Q}_{FQ} = \dot{Q}_{evap}$ .

A potência da turbina,  $\dot{W}_t$ , é calculada através da Equação (10), na qual  $h$  é a entalpia específica do fluido de trabalho na entrada (1) e saída (2) da turbina e  $\eta_t$  é a eficiência isentrópica da turbina. A saída ideal (isentrópica) da turbina é (2s).

$$\dot{W}_t = \dot{m}_{ORC}(h_1 - h_2) = \dot{m}_{ORC}(h_1 - h_{2s})\eta_t \quad (10)$$

No condensador, a taxa de transferência de calor do fluido de trabalho para a fonte fria (água de resfriamento),  $\dot{Q}_{FF}$ , é dada pela Equação (11), na qual  $\dot{m}_{FF}$  é a vazão mássica da fonte fria,  $h$  é a entalpia específica do fluido de trabalho na entrada (2) e saída (5) do condensador,  $T$  é a temperatura da água de resfriamento na entrada (c) e saída (d) do condensador e  $c_{p,FF}$  representa o calor específico da água.

$$\dot{Q}_{FF} = \dot{m}_{ORC}(h_2 - h_5) = \dot{m}_{FF}c_{p,FF}(T_d - T_c) \quad (11)$$

A potência da bomba,  $\dot{W}_b$ , é calculada através da Equação (12), na qual  $h$  é a entalpia específica do fluido de trabalho na entrada (5) e saída (6) da bomba e  $\eta_b$  é a eficiência isentrópica da bomba. A saída ideal (isentrópica) da bomba é (6s).

$$\dot{W}_b = \dot{m}_{ORC}(h_6 - h_5) = \frac{\dot{m}_{ORC}(h_{6s} - h_5)}{\eta_b} \quad (12)$$

O trabalho líquido do ciclo,  $\dot{W}_{liq}$ , é obtido com a Equação (13) e a eficiência do ciclo,  $\eta_{ciclo}$ , pela Equação (14).

$$\dot{W}_{liq} = \dot{W}_t - \dot{W}_b \quad (13)$$

$$\eta_{ciclo} = \frac{\dot{W}_{liq}}{\dot{Q}_{FQ}} \quad (14)$$

São cinco as variáveis de decisão:

- *Pinch point* do evaporador ( $\Delta PinchPoint_{Evap}$ )<sup>13</sup> - K
- Eficiência isentrópica da turbina ( $\eta_t$ )
- Eficiência isentrópica da bomba ( $\eta_b$ )
- Temperatura de evaporação ( $T_{evap}$ ) - K
- Temperatura de condensação ( $T_{cond}$ ) - K

Para estas variáveis, foram definidos limite superior, inferior e uma estimativa inicial para os cálculos, de acordo com a combinação de temperatura, vazão e fluido de trabalho avaliada.

Além das restrições de igualdade definidas no modelo termodinâmico e das variáveis de decisão, que são incógnitas independentes do problema, existem também alguns parâmetros fixos: a temperatura da fonte quente na entrada ( $T_a$ ), que é fixada de acordo com a combinação de temperatura, vazão e fluido de trabalho analisada, a temperatura da fonte fria na entrada ( $T_c = 27 \text{ }^\circ\text{C}$ ), a temperatura de fonte fria na saída ( $T_d = 32 \text{ }^\circ\text{C}$ ), o fluxo de massa da fonte quente ( $\dot{m}_{FQ}$ ), o superaquecimento ( $\Delta T_{sup} = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) e o sub-resfriamento ( $\Delta T_{sub} = 3 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Todas as outras variáveis são dependentes de combinações destes.

---

<sup>13</sup> Define-se por *pinch point* de um trocador de calor a menor diferença de temperatura entre os dois fluxos neste equipamento. Ele está relacionado diretamente ao tamanho e ao custo do trocador de calor (ERDEWEGHE *et al.*, 2017).

## 5.5 Modelo econômico

A modelagem econômica do problema foi realizada utilizando a metodologia descrita por Valero *et al.* (1994). O problema de otimização consistiu na minimização da função objetivo,  $F_{OBJ}$ , dada pelo custo unitário da eletricidade gerada (\$/kWh). Este é o quociente entre o custo total anualizado de aquisição dos diversos componentes,  $\dot{Z}_i$ , em \$/ano, da usina geradora de potência e a potência líquida produzida,  $\dot{W}_{liq}$  (Equação (15)), enquanto que os valores de  $\dot{Z}_i$  são calculados com o auxílio das Equações (16) e (17):

$$F_{OBJ} = \frac{\sum \dot{Z}_i}{\dot{W}_{liq}} \quad (15)$$

$$\dot{Z}_i = \frac{Z_i CRF \varphi}{N} \quad (16)$$

$$CRF = \frac{j(1+j)^n}{(1+j)^n - 1} \quad (17)$$

onde  $Z_i$  é o custo de compra do  $i$ -ésimo componente, em \$,  $\varphi$  é o fator de manutenção, assumido como sendo 6% do investimento ( $\varphi=1,06$ ), e  $N$  são as horas de operação (7446 h) durante o ano, considerando uma disponibilidade de 85%. CRF é o fator anual de recuperação de capital, calculado considerando uma taxa de juros ( $j$ ) de 10% em 20 anos ( $n$ ).

### 5.5.1 Equações de custo dos componentes

Para o cálculo dos custos dos componentes, foram utilizadas as equações de custo do trabalho de Ribeiro (2017). Em seu trabalho, a autora utilizou as equações propostas por Zare (2015) para o custo dos trocadores de calor e para as equações de custo da turbina e da bomba a autora utilizou as equações de custo propostas por Frangopoulos (1991) *apud* UCHE (2000), com ajustes dos coeficientes de custo realizados por ela. Estas equações estão listadas na Tabela 12.

Tabela 12. Equações de custo dos componentes de uma usina que opera segundo o Ciclo Rankine Orgânico.

Equipamento	Equações de Custo
Turbina	$Z = A \cdot \exp(B \ln(C \cdot FB1(D \cdot F2T + E \cdot F2P))). FBN \cdot FBT$ (18)
	$F2T = T_1 - T_2 - T_2 \cdot \ln\left(\frac{T_1}{T_2}\right)$ (19)
	$FB1 = \eta_T \dot{m}_{orc}$ (20)
	$F2P = T_2 \cdot \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$ (21)
	$FBN = 1 + \left(\frac{1 - 0,9}{1 - \eta_t}\right)^3$ (22)
	$FBT = 1 + 5 \cdot \exp\left(\frac{T_1 - 1100}{18,75}\right)$ (23)
Trocadores de Calor	$Z = 10000 + 324(Area^{0,91})$ (24)
Bomba	$Z = A \cdot \exp(B \cdot \ln(C \cdot \dot{m}_{ORC} \cdot D \cdot (P_6 - P_5))). FDN$ (25)
	$FDN = 1 + \left(\frac{1 - 0,8}{1 - \eta_b}\right)^3$ (26)

Fonte: RIBEIRO, 2017.

As equações são funções de fatores como: temperatura do fluido orgânico ( $T$ ) e pressão ( $P$ ) na entrada (1) e saída (2) da turbina e entrada (5) e saída (6) da bomba, bem como da área do trocador de calor ( $Area$ ), e das eficiências isentrópicas da bomba ( $\eta_b$ ) e da turbina ( $\eta_t$ ). As constantes das equações de custo da bomba e da turbina estão listadas nas Tabela 13 e Tabela 14.

Tabela 13. Constantes da Equação (18), referente ao custo da turbina.

Fluido	A	B	C	D	E
<b>R134a</b>	15061	0,9019	0,007783	0,001012	0,4118
<b>R245fa</b>	16416	0,8018	0,001419	0,9879	2,009

Fonte: RIBEIRO, 2017.

Tabela 14. Constantes da Equação (25), referente ao custo da bomba

Fluido	A	B	C	D
<b>R134a</b>	2387	0,000111	0,002186	0,003234
<b>R245fa</b>	4618	0,06235	0,00004571	0,01541

Fonte: RIBEIRO, 2017.

### 5.5.2 Ajuste do custo de investimento

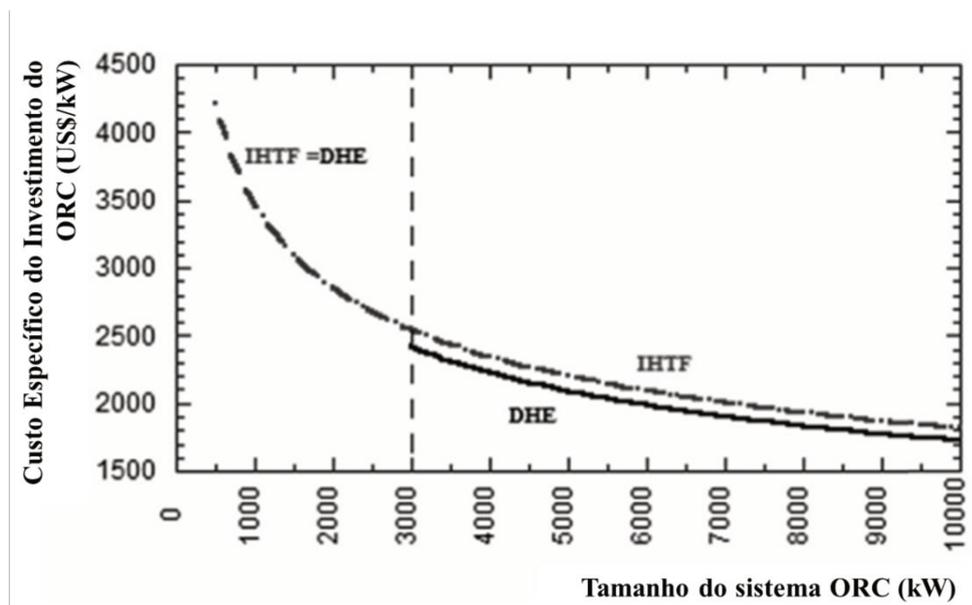
As equações descritas na seção anterior permitem obter os custos à nível de componente, mas não levam em conta as diferenças do custo de instalação específico (US\$/kW) de acordo com a escala da planta. Bianchi *et al.* (2019) e Walsh e Thornley (2012) destacam a relevância desta diferença e o comportamento exponencial da curva de custo em relação à capacidade instalada do equipamento.

Na Figura 25 observa-se o comportamento da curva proposta por Bianchi *et al.*, (2019) para o custo unitário, ou específico, do investimento em sistemas típicos de ORC em função da potência líquida gerada, para sistemas com troca de calor direta, sem fluido intermediário (DHE - *Direct heat Exchange*) e com fluido intermediário (IHTF - *Intermediate Heat Transfer Fluid*).

A partir dos dados da linha pontilhada da Figura 25, que representa sistemas com e sem fluido intermediário até 3.000 kW e com fluido intermediário a partir de 3.000 kW, obtém-se a Equação (27).

$$CEsp = 23828 \dot{W}_{líq}^{-0,279} \quad (27)$$

em que  $CEsp$  é o custo específico em US\$/kW instalado e  $\dot{W}_{líq}$  é a potência líquida instalada do sistema em questão, em kW.



DHE: Troca de calor direta, sem fluido intermediário (*Direct Heat Exchange*); IHTF: Fluido intermediário para troca térmica (*Intermediate Heat Transfer Fluid*)

Fonte: (BIANCHI *et al.*, 2019).

Figura 25. Custo específico de investimento em um sistema ORC de acordo com a capacidade instalada.

Propõe-se neste trabalho, então, uma correção para o custo específico através da Equação (28):

$$CEsp_{corrigido} = CEsp_{ref} \left( \frac{\dot{W}_{liq}}{\dot{W}_{ref}} \right)^{-0,279} \quad (28)$$

onde  $W_{ref}$  é igual a 5 MW, uma vez que os coeficientes utilizados para as equações de custo de equipamentos foram validados a partir de Zare (2015), utilizando como referência uma instalação de 5 MW elétrico líquido.

## 5.6 Solução do problema de otimização

Escolheu-se, para a solução do problema de otimização, o algoritmo genético (*Genetic Algorithm – GA*). Esta ferramenta de otimização é baseada na evolução Darwiniana, e tem sido utilizado desde a década de 1990 em estudos de otimização associados à troca térmica (GOSSELIN; TYE-GINGRAS; MATHIEU-POTVIN, 2009). Neste trabalho, aplicou-se uma versão multi-objetivo do algoritmo genético, buscando um conjunto de variáveis que

representam compensações entre elas (GOSSELIN; TYE-GINGRAS; MATHIEU-POTVIN, 2009).

Na escolha dos parâmetros utilizados pelo algoritmo genético, adotou-se o número de gerações e a taxa de mutação empregados por Ribeiro (2017). Com estes parâmetros, exibidos na Tabela 15, a evolução da função objetivo para uma das combinações de vazão, temperatura e fluido de trabalho pode ser observada na Figura 26. Na Figura 27 observa-se a evolução das variáveis de decisão. Em ambas as figuras se observa a estabilização dos resultados, que ocorre logo nas iterações iniciais, de modo que o número de gerações poderia ser menor do que o estabelecido. Optou-se por manter os parâmetros listados na Tabela 15 de modo a garantir a estabilidade e convergência dos resultados para todas as combinações de vazão, temperatura e fluido de trabalho analisadas.

Tabela 15. Parâmetros utilizados na otimização com algoritmo genético.

Parâmetro	Valor
Tamanho da população	32
Número de gerações	256
Taxa de mutação	0,05

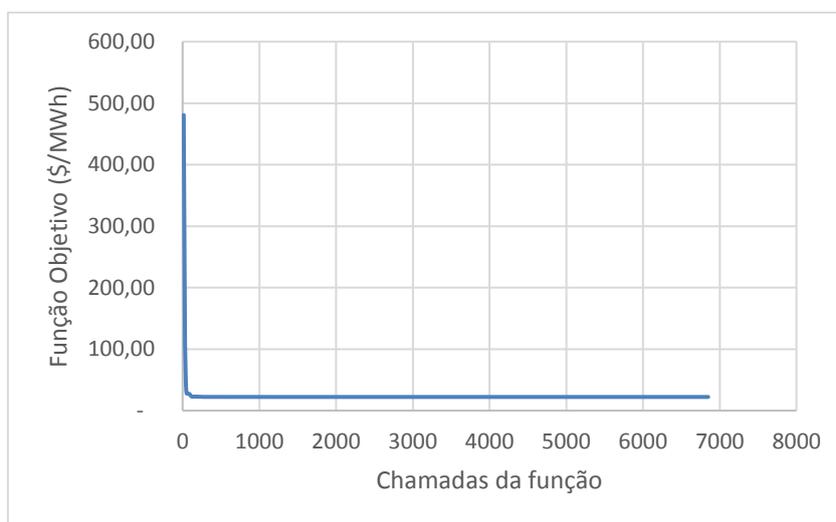


Figura 26. Evolução da função objetivo, dada pelo custo da energia, em \$/MWh, de acordo com as chamadas da função.

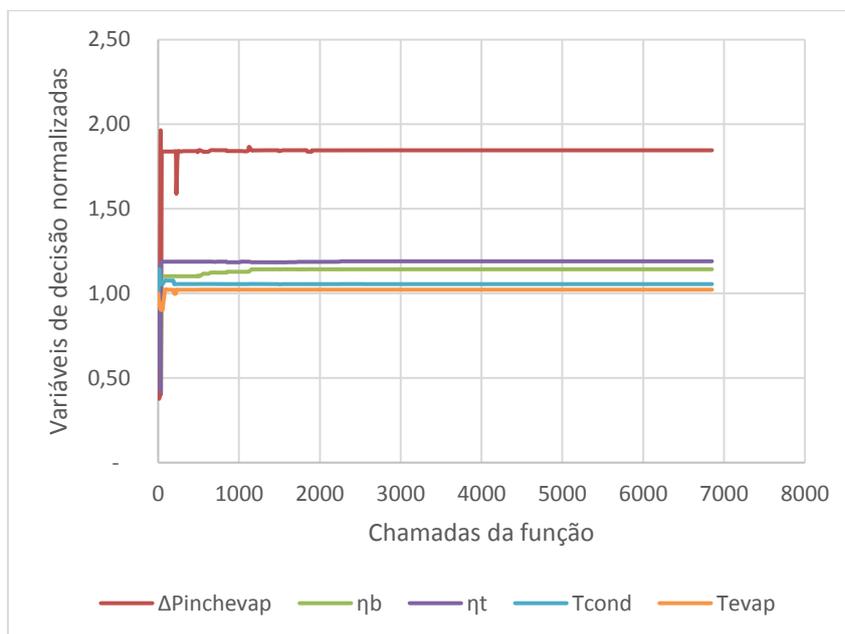


Figura 27. Evolução das variáveis de decisão abordadas no estudo ( $\Delta$ PinchEvaporador,  $\eta_t$ ,  $\eta_b$ , T<sub>evap</sub>, T<sub>cond</sub>), de acordo com as chamadas da função.

## 5.7 Resultados

A Figura 28 mostra a potência líquida produzida nas combinações de temperatura, vazão e fluido de trabalho simuladas. Conforme esperado, os maiores valores são encontrados na maior temperatura avaliada (200 °C) e maior vazão (400.000 Nm<sup>3</sup>/h). O fluido R245fa está associado a maiores valores de potência para a temperatura de 200 °C, sendo que a produção é 47% superior quando comparado ao resultado do R134a para a combinação da temperatura de 200 °C e vazão de 400.000 Nm<sup>3</sup>/h. A temperatura crítica do fluido R134a é 101 °C, inferior ao valor de temperatura crítica do R245fa, 154 °C, o que explica a diferença do resultado para o aproveitamento do calor dos gases a uma temperatura de 200 °C. Para a mínima vazão considerada, 50.000 Nm<sup>3</sup>/h, os valores de potência líquida são significativamente mais baixos do que para as vazões mais elevadas, variando entre 133 kW até 313 kW.

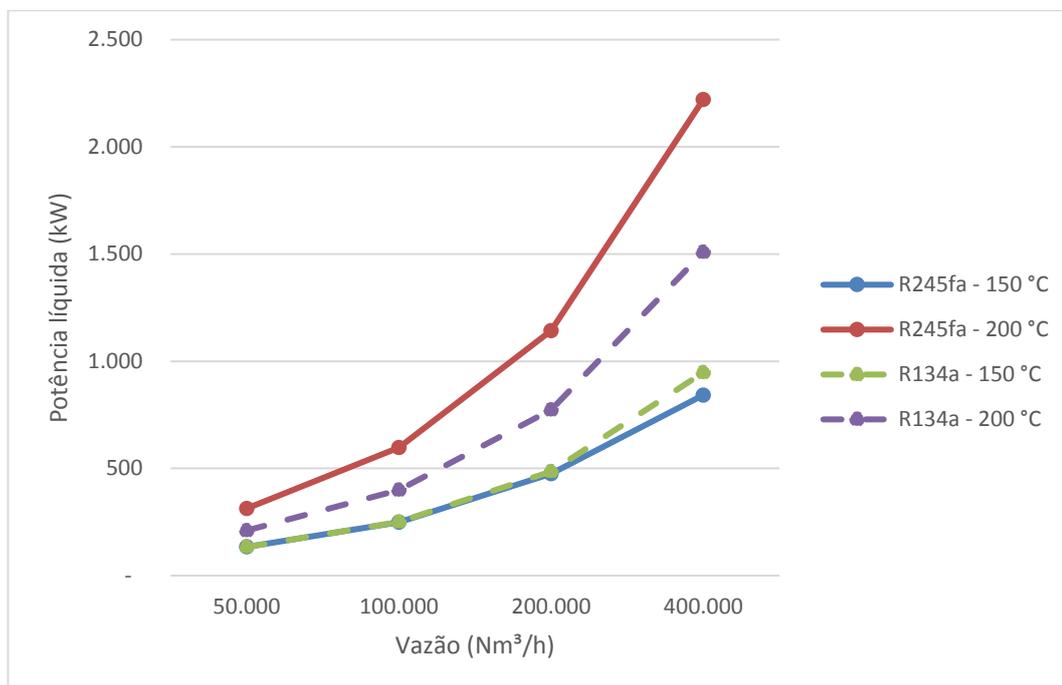


Figura 28. Potência Líquida produzida em diferentes condições de temperatura, vazão e fluidos de trabalho.

Os valores de produção específica, resultantes da potência líquida dividida pela vazão volumétrica em Nm³/h, ilustrados na Figura 29, podem ser comparados com os valores dos consumos específicos típicos dos filtros de mangas, descritos no capítulo anterior. Como o valor médio do consumo específico dos sistemas de despoejamento da usina siderúrgica estudada é de 2,46 kWh/1.000 Nm³, pode-se concluir que há potencial técnico para se suprir a demanda total de energia elétrica dos filtros de mangas a partir da geração de potência com Ciclo Rankine Orgânico na maior parte das combinações de temperatura, vazão e fluido de trabalho simuladas.

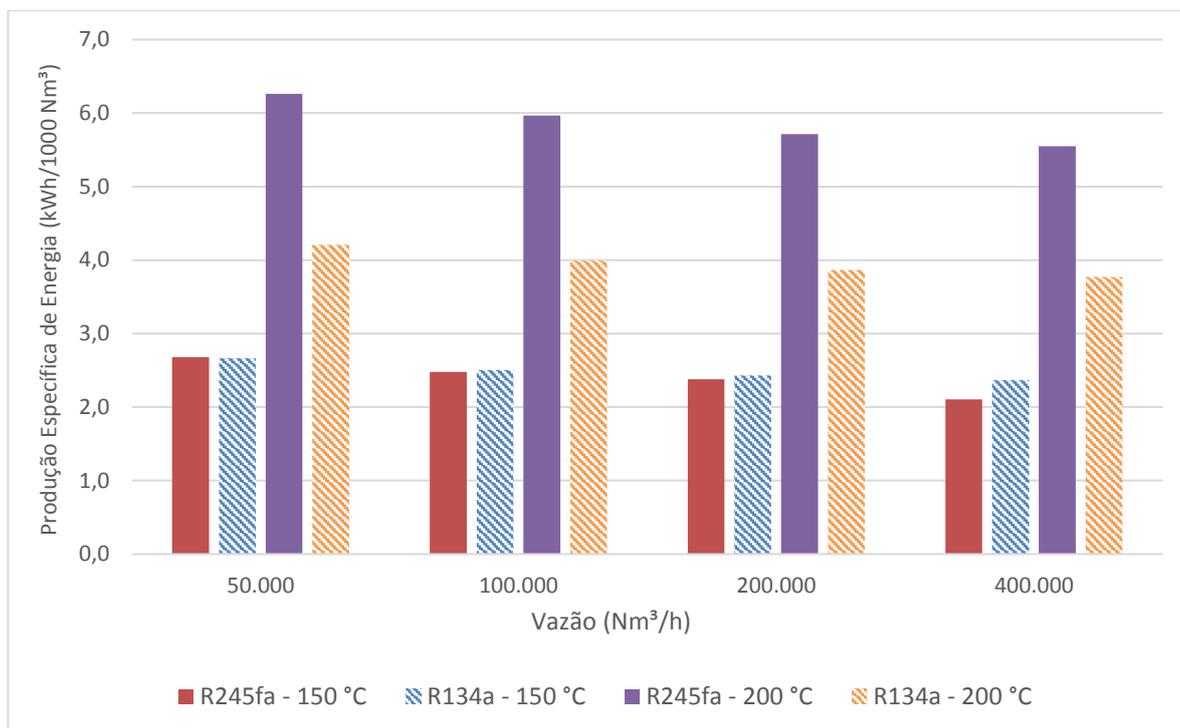


Figura 29. Produção específica de energia, em kWh/1000 Nm<sup>3</sup>, nas combinações de temperatura, vazão e fluido de trabalho selecionadas.

Quanto ao custo unitário da energia produzida pela unidade operando segundo o Ciclo Rankine Orgânico, exibido na Figura 30, verifica-se que este diminui conforme aumenta a temperatura e vazão da fonte quente, conforme esperado. O custo alcança seu valor mínimo, de US\$ 22/MWh, para a vazão de 400.000 m<sup>3</sup>/h a 200 °C usando o fluido de trabalho R245fa. O custo máximo encontrado nos casos simulados foi de US\$ 137/MWh, para a temperatura de 150 °C e vazão de 50.000 Nm<sup>3</sup>/h usando o R134a como fluido de trabalho.

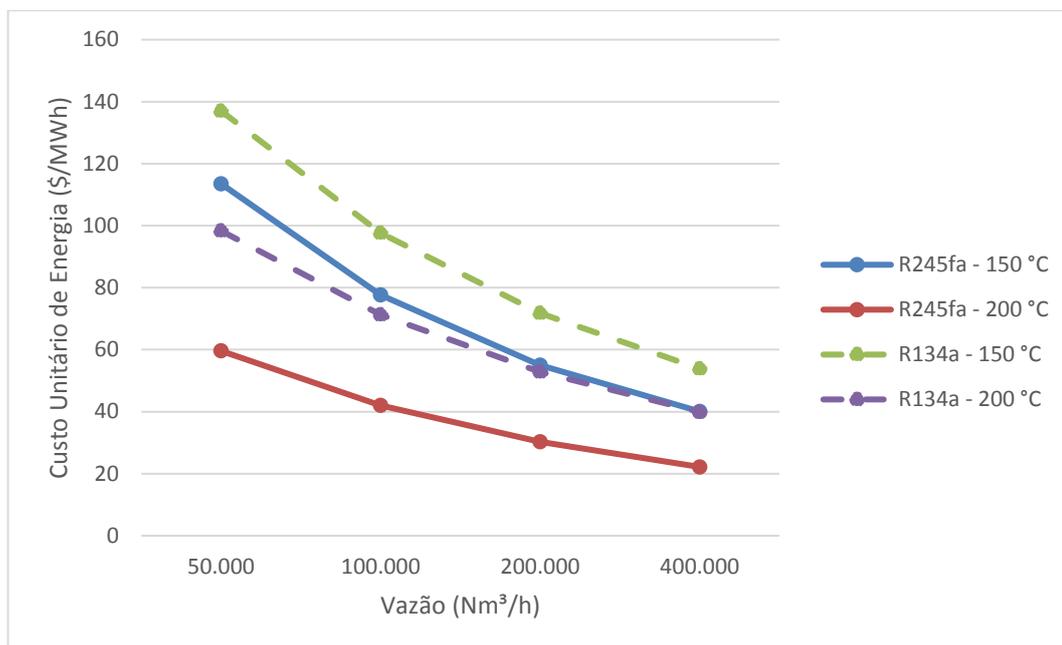


Figura 30. Custo unitário da energia produzida pela unidade operando segundo o Ciclo Rankine Orgânico, em US\$/MWh, nas combinações de temperatura, vazão e fluido de trabalho selecionadas.

Para fins de comparação com preços da energia elétrica no mercado atacadista regulado, adotou-se neste trabalho o preço médio no 28º Leilão de Energia Nova A-6, que foi de R\$ 140,87/MWh (CCEE, 2018), ou US\$ 35,31/MWh, utilizando o câmbio de R\$ 3,99 por dólar (novembro de 2019). Assim, os custos unitários da energia produzida pela unidade operando segundo o Ciclo Rankine Unitário com vazões de 200.000 Nm<sup>3</sup>/h, ou 400.000 Nm<sup>3</sup>/h, temperatura de 200 °C e fluido de trabalho R245fa se mostram competitivos em relação a este preço médio praticado em um leilão recente no mercado regulado.

Os resultados da otimização para as variáveis de decisão, bem como a eficiência do ciclo para cada combinação de vazão, temperatura e fluido de trabalho podem ser observados na Tabela 16. Em relação à  $T_{evap}$ , nota-se que os valores encontrados para o fluido R245fa são maiores do que os valores encontrados para o fluido R134a. Isso se deve à diferença da temperatura crítica, igual à 154 °C para o R245fa e 101 °C para o R134a.

Tabela 16. Resultados para variáveis de decisão ( $\Delta Pinch_{Evaporador}$ ,  $\eta_t$ ,  $\eta_b$ ,  $T_{evap}$ ,  $T_{cond}$ ) e eficiência do ciclo para cada cenário

Combinação de vazão, temperatura e fluido de trabalho	Fluido de trabalho	Vazão (Nm <sup>3</sup> /h)	Temperatura Fonte quente (°C)	T <sub>evap</sub> (°C)	T <sub>cond</sub> (°C)	$\Delta Pinch_{Point_{Evap}}$ (°C)	$\eta_b$	$\eta_t$	$\eta_{ciclo}$
A	R245fa	50.000	150	106,5	41,3	5,8	78%	85%	11,4%
B	R245fa	100.000	150	106,8	42,5	7,5	80%	84%	11,2%
C	R245fa	200.000	150	108,1	43,3	8,0	80%	84%	11,2%
D	R245fa	400.000	150	107,7	46,2	10,0	80%	84%	10,6%
E	R245fa	50.000	200	149,2	44,1	15,7	80%	84%	14,1%
F	R245fa	100.000	200	149,2	45,1	16,7	80%	83%	14,0%
G	R245fa	200.000	200	149,2	46,1	17,7	80%	83%	13,8%
H	R245fa	400.000	200	149,1	46,4	18,5	80%	83%	13,8%
I	R134a	50.000	150	90	40,9	14,9	80%	84%	8,6%
J	R134a	100.000	150	90,1	41,6	16,8	80%	84%	8,5%
K	R134a	200.000	150	90,2	42	17,7	80%	84%	8,4%
L	R134a	400.000	150	90,2	42,4	18,4	80%	84%	8,3%
M	R134a	50.000	200	90,1	42,1	37,2	80%	84%	8,4%
N	R134a	100.000	200	90,3	43,2	38,8	80%	84%	8,2%
O	R134a	200.000	200	90,9	43,5	40,4	80%	83%	8,1%
P	R134a	400.000	200	90,9	44	41,1	80%	83%	8,0%

As eficiências obtidas variam de 8,0% a 14,1%, relativamente baixas considerando os valores passíveis de se obter com sistemas comerciais atuais. É preciso destacar que o problema da otimização foi desenvolvido para obter a combinação de variáveis que resultasse no custo unitário mínimo de energia, de modo que a eficiência do ciclo foi penalizada em função disso e a potência líquida calculada é inferior ao que seria possível em modelos comerciais de ORC.

Em um exercício para compreender essa influência, calculou-se para a combinação H (fluido R245fa, vazão de 400.000 Nm<sup>3</sup>/h e temperatura de 200 °C) quais seriam os resultados da otimização se a função objetivo fosse maximizar a potência líquida do ciclo. Nestas condições, a potência líquida gerada é de 4.224 kW, muito superior ao resultado anterior, com as eficiências isentrópicas da turbina e da bomba iguais aos limites máximos estabelecidos de 90% e 80%, respectivamente. O valor encontrado para o  $\Delta Pinch_{Point_{Evap}}$  é igual a 5,03 °C e a eficiência do ciclo é 17,11%. Por outro lado, o custo unitário calculado subiu para 183,5 US\$/MWh, muito superior ao resultado da otimização realizada para minimização do custo (22 US\$/MWh).

Em resumo, os valores de custo unitário obtidos nessa análise representam o valor mínimo da energia gerada a partir de um sistema operando segundo o ORC. Os valores

associados com instalações comerciais tendem a ser superiores aos resultados deste trabalho. Portanto, as combinações de vazão, temperatura e fluido de trabalho cujos valores de custo unitário de energia se revelaram competitivos aqui são casos interessantes para a realização de análises mais detalhadas para verificar se, de fato, estas combinações são competitivas.

### **5.7.1 Análise de Sensibilidade**

Nesta seção é realizada uma breve análise de sensibilidade, variando os parâmetros de decisão individualmente e observando o efeito no custo unitário da energia gerada, objetivo do exercício de otimização apresentado neste trabalho. Todas as avaliações indicadas a seguir consideraram como base a combinação de vazão, temperatura e fluido de trabalho com menor custo unitário de energia (\$/MWh), a combinação H, com o fluido R245fa, vazão e temperatura da fonte quente iguais a 400.000 Nm<sup>3</sup>/h e 200 °C, respectivamente.

As equações de custo das bombas e turbinas de uma unidade operando segundo o Ciclo Rankine Orgânico utilizadas neste trabalho, compiladas por Ribeiro (2017), resultam de uma atualização das equações propostas originalmente por Frangopoulos (1991), com coeficientes ajustados por Ribeiro (2017) utilizando dados de custo de Zare (2015).

Ribeiro (2017) verificou que as equações atualizadas estavam adequadas em termos de comportamento das curvas correspondentes. Esse comportamento também pode ser verificado nos resultados deste trabalho. Na Figura 31 é possível observar o custo normalizado da turbina em relação à sua eficiência isentrópica, que cresce significativamente a partir da eficiência de 90%, estabelecido como limite tecnológico deste equipamento nas equações utilizadas.

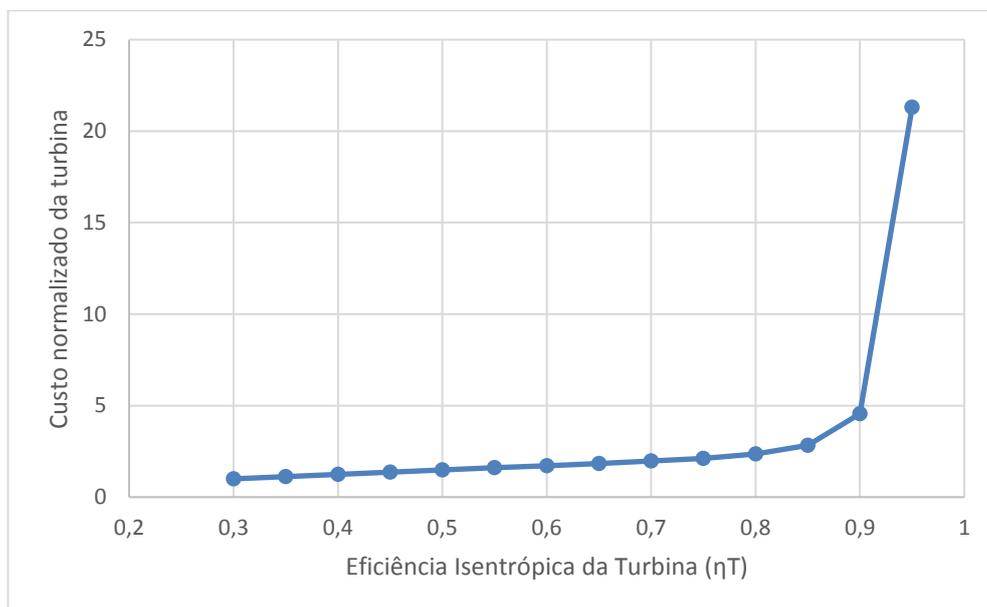


Figura 31. Custo normalizado da turbina versus  $\eta_t$

Analogamente, na Figura 32 o aumento mais expressivo do custo normalizado da bomba é observado a partir da eficiência de 80%, estabelecido como limite tecnológico deste componente.

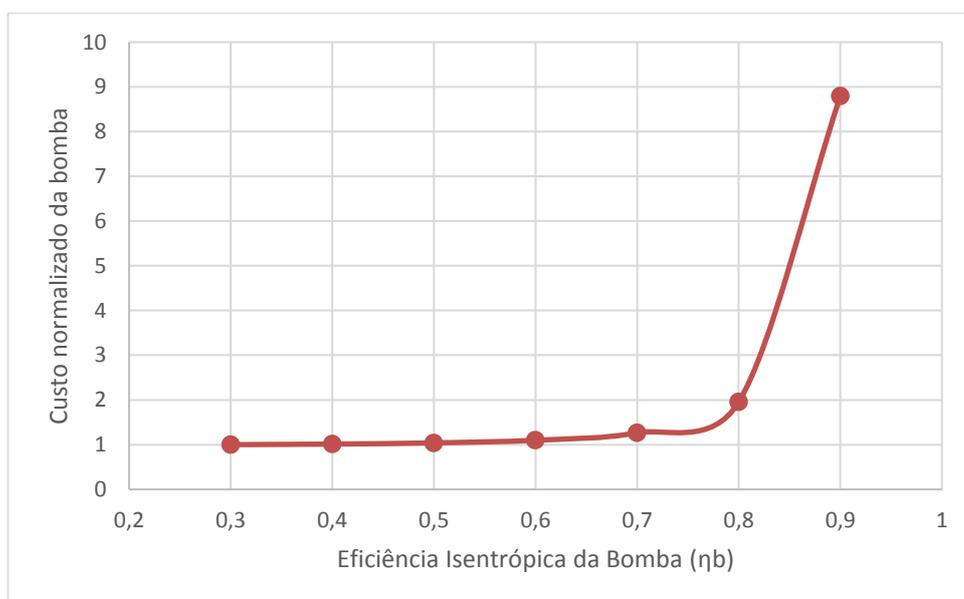


Figura 32. Custo da bomba normalizado versus  $\eta_b$

Ambas as equações de custo, da turbina e da bomba, se comportam conforme esperado, com o aumento do custo do componente na medida em que este fica mais eficiente.

A Figura 33 ilustra a variação do custo normalizado do trocador de calor com o  $\Delta PinchPoint_{Evap}$ . Quanto menor for a diferença do *pinch point* do fluido de trabalho em relação ao fluido da fonte quente, mais alto será o custo do trocador de calor devido ao aumento expressivo da área requerida para a troca térmica.

Dentre os três componentes discutidos, o custo do trocador de calor é expressivamente mais alto, seguido pelo custo da turbina e pelo custo da bomba. Assim, espera-se que as variáveis de decisão associadas a esse componente, sejam elas  $\Delta PinchPoint_{Evap}$ ,  $T_{evap}$  e  $T_{cond}$ , tenham o maior impacto no custo final da instalação do sistema operando conforme o Ciclo Rankine Orgânico e, por consequência, no custo da energia gerada (US\$/MWh) que se pretende minimizar.

Na sequência desta análise de sensibilidade são fixadas as variáveis de decisão obtidas na otimização da combinação H de vazão, temperatura e fluido de trabalho, exceto o parâmetro a ser avaliado.

No primeiro exercício, são fixados os parâmetros  $\eta t$ ,  $\eta b$ ,  $T_{evap}$ ,  $T_{cond}$ , e varia-se apenas o parâmetro  $\Delta PinchPoint_{Evap}$ , de 6 °C até 18,5 °C, valor ótimo encontrado. Na Figura 34, observa-se que, com o aumento da variável, o custo unitário da energia gerada é fortemente influenciado, tendendo, no intervalo final, à estabilização.

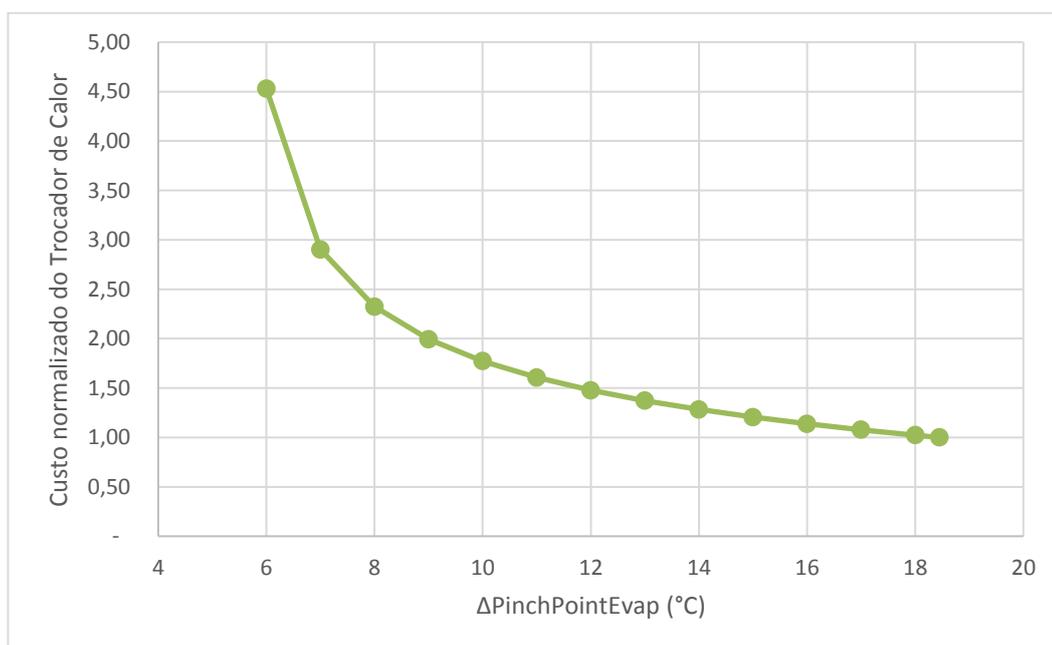


Figura 33. Custo normalizado do trocador de calor versus  $\Delta PinchPoint_{Evap}$

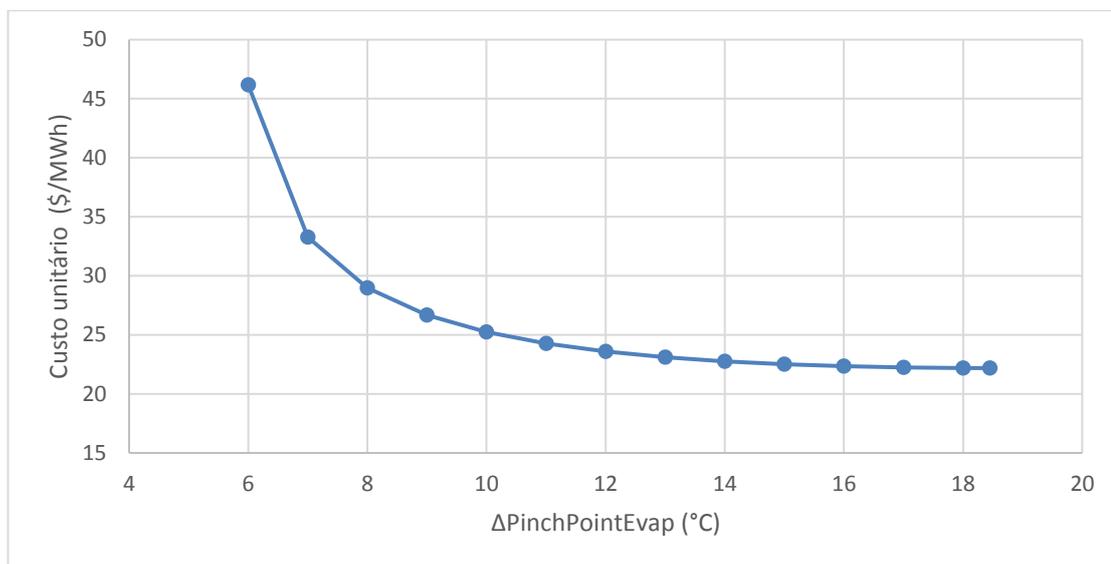


Figura 34. Custo unitário da energia gerada versus  $\Delta PinchPoint_{Evap}$  na combinação H de vazão, temperatura e fluido de trabalho.

Quanto ao custo da turbina, apesar de turbinas com menor eficiência resultarem em um custo do componente inferior, o ônus de se obter uma potência líquida menor é mais significativo no custo unitário da energia, de modo que até a eficiência de 80% observa-se um decréscimo no custo da energia. A partir desta marca, o aumento do custo do componente se torna mais significativo, sendo observado um aumento da função objetivo (Figura 35).

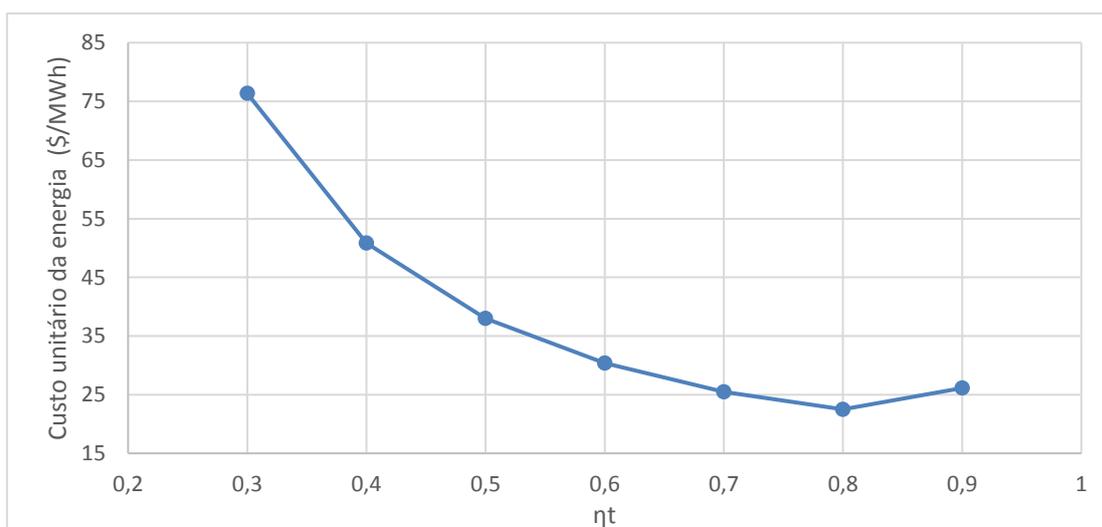


Figura 35. Custo unitário da energia gerada versus  $\eta_t$  na combinação H de vazão, temperatura e fluido de trabalho.

Conforme se pode observar na Figura 36, o aumento do custo da bomba com o aumento de sua eficiência não é suficiente para influenciar negativamente o custo unitário da energia

gerada, já que este componente apresenta o menor custo daqueles avaliados. Este fator explica o porquê dos resultados da otimização em relação à eficiência da bomba, todos iguais ou muito próximos ao limite estabelecido de 80%.

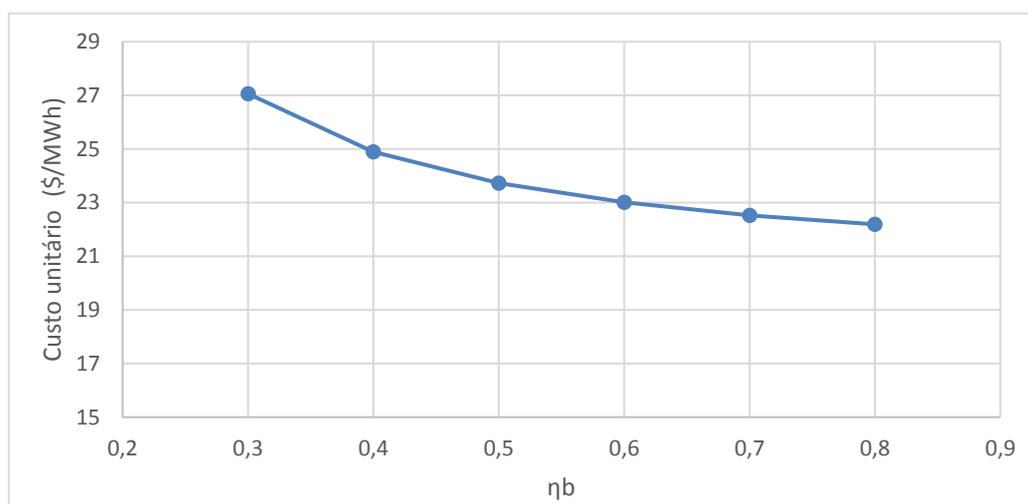


Figura 36. Custo unitário da energia gerada versus  $\eta_b$  na combinação H de vazão, temperatura e fluido de trabalho.

Na Figura 37 o custo da energia versus a  $T_{evap}$  cai com seu aumento e, para o intervalo de 127 °C a 147 °C, houve uma redução de 4% no custo unitário da energia gerada com o aumento desta variável.

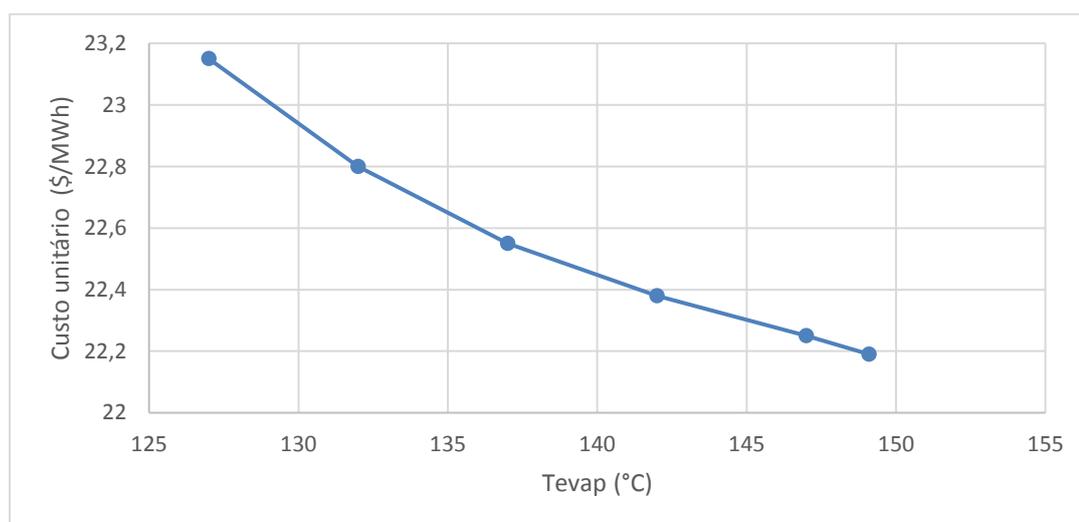


Figura 37. Custo unitário da energia gerada versus  $T_{evap}$  na combinação H de vazão, temperatura e fluido de trabalho.

Quanto ao custo unitário da energia gerada (Figura 38), variando de acordo com a temperatura de condensação ( $T_{cond}$ ), nota-se uma variação acentuada, principalmente próximo aos 32 °C. Como as temperaturas de entrada e saída do fluido frio no condensador foram determinadas, a diferença de temperatura do *pinch point* do condensador ( $\Delta PinchPoint_{cond}$ ) é definida unicamente pela temperatura de condensação, de modo que, na região inicial do gráfico, os valores de  $\Delta PinchPoint_{cond}$  são próximos de 1 °C, aumentando consideravelmente o custo do componente e, por consequência, o custo unitário da energia gerada.

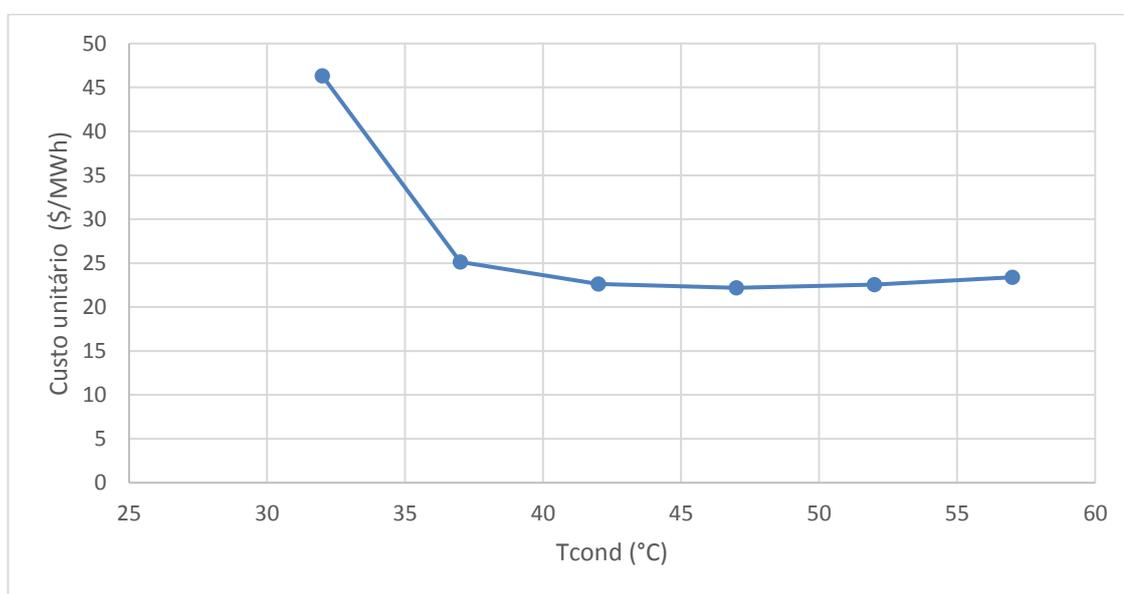


Figura 38. Custo unitário da energia gerada versus  $T_{cond}$  na combinação H de vazão, temperatura e fluido de trabalho.

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 6.1 Conclusões

Os sistemas de despoeiramento com filtros de mangas são de extrema relevância para a redução dos impactos ambientais associados à produção industrial e são responsáveis por um consumo energético importante, foco do trabalho desenvolvido. Tais sistemas são amplamente utilizados na indústria siderúrgica, um setor energo-intensivo cujo consumo específico de eletricidade tem crescido nos últimos anos. Tendo em vista a tendência de aumento de sistemas de despoeiramento para atender a metas de melhoria de controle ambiental, o tema se torna ainda mais relevante. Neste trabalho, o tema é abordado sob duas diferentes óticas: a demanda de energia e a oferta de energia. Em relação à demanda, é feita a caracterização do consumo de eletricidade em sistemas de despoeiramento em uma usina siderúrgica e avaliando medidas de eficiência energética aplicáveis. Em seguida, sob a ótica da oferta, avalia-se como o calor dos gases que passam por esse sistema poderia ser convertido em eletricidade, considerando aspectos técnicos e econômicos.

A caracterização do consumo de eletricidade em sistemas de despoeiramento realizada neste trabalho contou com uma extensa etapa de coleta de dados, contemplando projetos dos sistemas, numerosas visitas a campo e coleta de informações no sistema de aquisição de dados *online* disponível na usina siderúrgica objeto de um estudo de caso. Os resultados mostram que os sistemas de despoeiramento são responsáveis por uma parcela significativa do consumo de eletricidade das unidades produtivas, variando de 17%, na coqueria convencional, até 45%, na aciaria LD. Essa participação corresponde a 9,5% do consumo de eletricidade de toda planta industrial avaliada. Os resultados reforçam a importância de trabalhos focados na eficiência energética de sistemas de despoeiramento, considerando seu importante impacto no consumo de energia industrial. A avaliação de consumo energético específico resultou em valores médios de 2,03 kWh/1.000 m<sup>3</sup> e 2,39 kWh/1.000 Nm<sup>3</sup> de gás tratado. Essa caracterização permite a comparação entre sistemas e auxilia no planejamento energético industrial, sendo possível utilizar o dado para estimar a médio e longo prazo o consumo adicional devido a sistemas de despoeiramento que venham a ser instalados.

Outra contribuição do trabalho é o levantamento de medidas de eficiência energética citadas na literatura técnica e suas faixas de potenciais economias de energia. Com base neste levantamento, foram estimados potenciais de economia de energia em sistemas de despoejamento das unidades operacionais da usina adotada como estudo de caso, que variaram de 5%, na sinterização, até 28%, na aciaria LD. A medida de eficiência energética responsável pela maior parcela deste potencial, 45% da economia estimada, é a instalação de inversores de frequência em sistemas de ventilação com demanda de vazão variável, ou operação intermitente, medida esta que se mostrou em consonância com resultados de trabalhos anteriores. Destacam-se, também, as medidas de otimização das coifas de captação com simulação CFD visando a redução da vazão de projeto, uma vez que tal técnica possui um grande potencial de auxiliar no projeto de sistemas de despoejamento comparando alternativas de concepção e posicionamento das coifas de captação de modo a obter uma vazão inferior à estimada inicialmente. Outro potencial importante encontrado se refere à otimização da geometria dos dutos e câmaras de mistura visando a redução da perda de carga do sistema, aplicável principalmente a sistemas que passaram por adaptações ao longo dos anos.

Sob a ótica do potencial de oferta de energia, este trabalho abordou a oportunidade de recuperar o calor dos gases que passam por sistemas de despoejamento. Isto é, como tais sistemas frequentemente captam emissões provenientes de fontes quentes, estudou-se a recuperação do calor desses gases para a geração de eletricidade por meio do Ciclo Rankine Orgânico. Esta tecnologia, de crescente utilização, permite a recuperação de calor de gases a temperaturas moderadas e para os cálculos deste trabalho foram assumidas combinações de condições de temperatura (150 °C e 200 °C) e vazão (50.000 Nm<sup>3</sup>/h, 100.000 Nm<sup>3</sup>/h, 200.000 Nm<sup>3</sup>/h e 400.000 Nm<sup>3</sup>/h) com dois fluidos orgânicos (R245fa e R134a). Adotou-se uma abordagem termoeconômica para otimização dos sistemas em relação ao  $\Delta PinchPoint$  do evaporador, Eficiência isentrópica da turbina e da bomba e temperaturas de evaporação e condensação. Os resultados mostram que a potência produzida variou de 133 kW, para o fluido de trabalho R134a a 150 °C e 50.000 Nm<sup>3</sup>/h até 2.221 kW, para um sistema operando com R245fa a 200 °C e 400.000 Nm<sup>3</sup>/h. Quando à produção específica de energia, os valores alcançados variam entre 2,1 e 6,3 kWh/1.000 Nm<sup>3</sup>, indicando que, tecnicamente, há potencial para que a recuperação de calor residual de gases em sistemas de despoejamento a partir de 150 °C possa suprir grande parte, ou a demanda energética integral do sistema de despoejamento. Em termos de custos, os sistemas de maior vazão e, portanto, maior potência

líquida, são os mais atrativos. Apenas as combinações considerando o fluido R245fa alcançaram valores de custo unitário próximos aos praticados no mercado atacadista regulado, para temperatura de 200 °C e vazões acima de 200.000 Nm<sup>3</sup>/h. Realizou-se, também, uma breve análise de sensibilidade, destacando a influência importante dos parâmetros associados ao custo dos trocadores de calor ( $\Delta PinchPoint$  do evaporador, temperatura de evaporação e condensação). Os resultados destacam o impacto dos ganhos de escala em relação à instalação ORC sobre o custo unitário da energia.

## 6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Sugere-se para trabalhos futuros associados ao tema a realização de estudo detalhado em um sistema de despoeiramento de identificação e quantificação do potencial técnico e econômico da aplicabilidade das medidas de eficiência energética aqui levantadas. A análise detalhada de um sistema, contemplando a avaliação da perda de carga dos captores e da rede de dutos e a perda de carga do equipamento de controle da poluição do ar auxiliaria na confirmação de premissas consideradas neste trabalho.

Sugere-se um levantamento posterior que inclua sistemas de despoeiramento ligados ao processo produtivo, não considerados no escopo deste trabalho. Tais sistemas em geral são de grande porte e provavelmente apresentam potenciais de redução de consumo energético.

Para trabalhos futuros, sugere-se também o emprego de técnicas avançadas, no contexto da indústria 4.0, para avaliação dos potenciais de redução do consumo de eletricidade em sistemas de despoeiramento. Como exemplos, pode-se utilizar métodos como o *Ventilation on demand (VOD)* e *Digital Twin* para essa finalidade (CHATTERJEE; ZHANG; XIA, 2015; ESSS, 2017; ESSS; ANSYS, 2016; HOWDEN, 2016, 2018; QI *et al.*, 2018; TAO *et al.*, 2018).

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELAZIZ, E. A.; SAIDUR, R.; MEKHILEF, S. **A review on energy saving strategies in industrial sector** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011.

ACCESS ENERGY. **Organic Rankine Cycle Process**. Disponível em: <<http://www.access-energy.com/>>. Acesso em: 28 ago. 2018.

ACGIH. **Industrial Ventilation: A Manual of Recommended Practice for Design**. 30th. ed. Cincinnati: ACGIH, 2019.

ALMEIDA, A. DE; FONG, J.; FALKNER, H. **Energy Efficient Electric Motors Systems**. [s.l.] UNIDO, 2016.

AMCA INTERNATIONAL. **ANSI/AMCA Standard 205-12: Energy Efficiency Classification for Fans**, 2012.

AMCA INTERNATIONAL. **Introducing the Fan Energy Index**, 2016.

AMCA INTERNATIONAL. **AMCA 208-18: Calculation of the Fan Energy Index**. [s.l: s.n.].

ANDERSEN, B. O.; NIELSEN, N. F.; WALTHER, J. H. Numerical and experimental study of pulse-jet cleaning in fabric filters. **Powder Technology**, v. 291, p. 284–298, 2016.

ANDRADE, C. T. DE C.; PONTES, R. S. T. Economic analysis of Brazilian policies for energy efficient electric motors. **Energy Policy**, 2017.

ARCELORMITTAL TUBARÃO. **ArcelorMittal Tubarão no Espírito Santo**. Serra, 2018.

AWMA. **Air Pollution Engineering Manual**. [s.l.] Van Nostrand Reinhold, 1992.

BAO, J.; ZHAO, L. A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 24, p. 325–342, 2013.

BAUSE, T. et al. **Cogeneration with ORC at Elbe-Stahlwerke Feralpi EAF Shop**. Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference and Exposition. **Anais...Indianapolis**: 2014

BAYOMI, N. N.; ABDEL HAFIZ, A.; OSMAN, A. M. Effect of inlet straighteners on centrifugal fan performance. **Energy Conversion and Management**, 2006.

BEACHLER, D.; JOSEPH, J.; POMPELIA, M. **Fabric Filter Operation Review**, 1995.

BELL, G. et al. **The Berkeley Hood Development and Commercialization of an Innovative High-Performance Laboratory Fume Hood**, 2003.

BIANCHI, M. et al. Feasibility of ORC application in natural gas compressor stations. **Energy**, v. 173, p. 1–15, 2019.

BOHME, G. S. **Estudo do efeito do sistema sobre a operação de ventiladores**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2013.

BRASIL. Lei 10.295. . 2001.

BRASIL. **Plano Nacional de Energia 2030**. [s.l.] EPE, 2007. v. 11

BRAUER, H.; VARMA, Y. B. G. **Air Pollution Control Equipment**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1981.

BREEDVELD, L. et al. Eco-efficiency of fabric filters in the Italian ceramic tile industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 15, n. 1, p. 86–93, 2007.

CAO, W. XUE; YOU, X. YI. The inverse optimization of exhaust hood by using intelligent algorithms and CFD simulation. **Powder Technology**, 2017.

CCEE. **Leilão de Energia Nova A-6**. Disponível em: <[https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/o-que-fazemos?\\_adf.ctrl-state=11ki27tekj\\_18&\\_afLoop=169090427581293#!](https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-fazemos?_adf.ctrl-state=11ki27tekj_18&_afLoop=169090427581293#!)>. Acesso em: 1 maio. 2019.

CHATTERJEE, A.; ZHANG, L.; XIA, X. Optimization of mine ventilation fan speeds according to ventilation on demand and time of use tariff. **Applied Energy**, v. 146, p. 65–73, 2015.

CHEN, H.; GOSWAMI, D. Y.; STEFANAKOS, E. K. A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 9, p. 3059–3067, 2010.

CHEREMISINOFF, N. P. Industrial Air Pollution Sources and Prevention. In: **Handbook of Air Pollution Prevention and Control**. [s.l: s.n.]. p. 53–147.

COOPER, C. D.; ALLEY, F. C. **Air Pollution Control: A Design Approach**. 4th. ed. Illinois: Waveland Press, 2011.

DU PLESSIS, G. E.; LIEBENBERG, L.; MATHEWS, E. H. The use of variable speed drives for cost-effective energy savings in South African mine cooling systems. **Applied Energy**, v. 111, p. 16–27, 2013.

E3T. **Clean-On-Demand Compressed Air Controls for Baghouses**. Disponível em: <<http://e3tnw.org>>. Acesso em: 28 jun. 2018.

EIPPCB. **Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU**, 2013.

EPE. **Balanco energético Nacional 2018: Ano base 2017**. Rio de Janeiro: [s.n.].

ERDEWEGHE, S. VAN et al. Influence of the pinch-point-temperature difference on the performance of the Preheat-parallel configuration for a low-temperature geothermally-fed CHP. **Energy Procedia**, v. 00, n. September, 2017.

ESSS. **Creating a Digital Twin**. Disponível em: <<https://www.esss.co/blog/criando-um-digital-twin/>>. Acesso em: 7 jul. 2018.

ESSS; ANSYS. **A first approach to implementing digital twins**, 2016.

EUROPEAN UNION. L 70 Directive 2010/75/EU. . 2012.

FENG, Y. QIANG et al. Operation characteristic and performance comparison of organic Rankine cycle (ORC) for low-grade waste heat using R245fa, R123 and their mixtures. **Energy Conversion and Management**, 2017.

FIGUEROA, C. E. Hood entry coefficients of compound exhaust hoods. **Journal of Occupational and Environmental Hygiene**, v. 8, n. 12, p. 740–745, 2011.

FORMAN, C. et al. Estimating the global waste heat potential. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 57, p. 1568–1579, 2016.

GOSSELIN, L.; TYE-GINGRAS, M.; MATHIEU-POTVIN, F. Review of utilization of genetic algorithms in heat transfer problems. **International Journal of Heat and Mass**

**Transfer**, v. 52, n. 9–10, p. 2169–2188, 2009.

GUO, C. et al. Organic Rankine cycle for power recovery of exhaust flue gas. **Applied Thermal Engineering**, 2015.

HE, K.; WANG, L. A review of energy use and energy-efficient technologies for the iron and steel industry. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 70, n. September 2016, p. 1022–1039, 2017.

HOWDEN. **Case study for three typical mining projects**, 2016.

HOWDEN. **Digital Solutions**. Disponível em: <<https://www.howden.com/en-gb/digital-solutions>>. Acesso em: 9 jul. 2018.

IEMA. **Inventário de Fontes**. Disponível em: <<https://iema.es.gov.br/qualidadedoar/inventariodefuentes>>. Acesso em: 28 jun. 2018.

IMRAN, M. et al. Recent research trends in organic Rankine cycle technology: A bibliometric approach. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, n. December 2016, p. 552–562, 2018.

INFOMIL. **Fact sheets on air emission abatement techniques**, 2009.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Etapas de produção de aço**. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site2015/processo.html>>. Acesso em: 4 jul. 2019.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade**, 2018.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Dados do Setor**. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site2015/dados.asp>>. Acesso em: 28 jun. 2018.

ISO. **ISO 5136:2003 Acoustics -- Determination of Sound Power Radiated Into A Duct By Fans And Other Air-Moving Devices -- In-Duct Method**, 2003.

ISO. **ISO 13347-3:2004 - Industrial Fans - Determination of Fan Sound Power Levels Under Standardized Laboratory Conditions**, 2004.

IVANOVICH, M.; WOLF, M.; CATANIA, T. New Efficiency Metric for Fans Enables New Approaches for Efficiency Regulations and Incentives. **Proceedings of the 9th international conference on Energy Efficiency in Domestic Appliances and Lighting (EEDAL 2017)**, p. 1082–1093, 2018.

KALAISELVAN, A. S. V. et al. A comprehensive review on energy efficiency enhancement initiatives in centrifugal pumping system. **Applied Energy**, v. 181, p. 495–513, 2016.

KARAGULIAN, F. et al. Contributions to cities' ambient particulate matter (PM): A systematic review of local source contributions at global level. **Atmospheric Environment**, v. 120, p. 475–483, nov. 2015.

KARAISMAIL, E.; CELIK, I.; GUFFEY, S. E. Flow dynamics and contaminant transport in industrial-type enclosing exhaust hoods. **Journal of Occupational and Environmental Hygiene**, v. 10, n. 7, p. 384–396, 2013.

KAŞKA, Ö. Energy and exergy analysis of an organic Rankine for power generation from waste heat recovery in steel industry. **Energy Conversion and Management**, v. 77, p. 108–117, 2014.

KERMELI, K.; WORRELL, E.; MASANET, E. **Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Concrete Industry**. [s.l: s.n.].

KLEIN, G. et al. Enhanced Energy Efficiency Solutions for Industrial Baghouse Filters.

**Filtration Solutions**, v. 10, n. 4, p. 253–258, 2010.

KNOTH, V.; PFUNDSTEIN, C. **Secret Losses in Dedusting Systems**. ESCO Seminar. **Anais...**Kuala Lumpur: 2011

KULMALA, I. et al. Local ventilation solution for large, warm emission sources. **Annals of Occupational Hygiene**, 2007.

LANZERSTORFER, C.; NEDER, F.; SCHMIED, R. Constant design air flow industrial ventilation systems with regenerative dust filters: Economic comparison of fan speed-controlled, air damper controlled and uncontrolled operation. **Energy and Buildings**, 2016.

LEGMANN, H. Recovery of industrial heat in the cement industry by means of the ORC process. **IEEE Cement Industry Technical Conference (Paper)**, p. 29–35, 2002.

LORA, E. E. S. **Prevenção e Controle da Poluição nos Setores Energéticos**. 2nd. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2002.

LU, H. C.; TSAI, C. J. A Pilot-Scale Study of the Design and Operation Parameters of a Pulse-Jet Baghouse. **Aerosol Science and Technology**, 1998.

LU, S. M. A review of high-efficiency motors: Specification, policy, and technology. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 59, p. 1–12, 2016.

MACCHI, E.; ASTOLFI, M. (EDS.). **Organic Rankine Cycle (ORC) Power Systems: Technologies and Applications**. [s.l.] Woodhead Publishing, 2017.

MARX, K. **Efficient optimization of steel plant dedusting**. The 6th European Oxygen Steelmaking Conference. **Anais...**Estocolmo: 2011

MARX, K. **Innovative measures to prevent dust emissions**. The 2nd ISIJ-VDEh-

Jernkontoret Joint Symposium. **Anais...2017**

MARX, K.; WOLLENBERG, M. **Development of effective dedusting of converters by innovative**. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2013.

MASI, C. G. Energy-efficient electric motors. **Control Engineering**, v. 57, n. 9, p. 24–26, 2010.

MATHSON, T.; IVANOVICH, M. AMCA's Fan Efficiency Grades: Answers to Frequently asked Questions. **AMCA inmotion**, p. 8–12, 2011.

MAUER, J. Fan Energy Index: A new metric for fan efficiency. **appliance DESIGN**, p. 3, jun. 2018.

MILLS, E.; SARTOR, D. Energy use and savings potential for laboratory fume hoods. **Energy**, 2005.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Anuário estatístico do setor metalúrgico 2017**. [s.l: s.n.].

MME. Portaria Interministerial N°1, de 29 de junho de 2017. . 2017.

MUDASAR, R.; AZIZ, F.; KIM, M. H. Thermodynamic analysis of organic Rankine cycle used for flue gases from biogas combustion. **Energy Conversion and Management**, v. 153, n. June, p. 627–640, 2017.

NEL, A. Air Pollution-Related Illness: Effects of Particles. **Science**, v. 308, n. 5723, p. 804–806, 6 maio 2005.

OECD/IEA. **Energy efficiency policy opportunities for electric motor driven systems executive summary The global assessment**, 2011.

OZDEMIR, E. Energy conservation opportunities with a variable speed controller in a boiler house. **Applied Thermal Engineering**, 2004.

PAULA, G. M. DE. **Produção independente de ferro-gusa (“guseiros”) Economia de baixo carbono: Avaliação de impactos de restrições e perspectivas tecnológicas** Ribeirão Preto, 2014.

PETERS, T. M.; LEITH, D. Measurement of particle deposition in industrial ducts. **Journal of Aerosol Science**, 2004.

PIETROWICZ, S.; KOLASIŃSKI, P.; POMORSKI, M. Experimental and numerical flow analysis and design optimization of a fume hood using the CFD method. **Chemical Engineering Research and Design**, 2018.

PINELLI, M.; SUMAN, A. A numerical method for the efficient design of free opening hoods in industrial and domestic applications. **Energy**, 2014.

PROCEL/ELETROBRÁS. **Manuais Elektro de Eficiência Energética: Segmento Industrial**, [s.d.].

QI, Q. et al. Digital Twin Service towards Smart Manufacturing. **Procedia CIRP**, v. 72, p. 237–242, 2018.

QUOILIN, S. et al. Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 22, p. 168–186, 2013.

RIBEIRO, L. C. **Determinação da Configuração Ótima de Ciclo Rankine Orgânico para Aproveitamento do Calor Rejeitado em Usinas Termelétricas com Motores de Combustão Interna**. [s.l.] Universidade Federal do Espírito Santo, 2017.

ROY, J. P.; MISHRA, M. K.; MISRA, A. Parametric optimization and performance

analysis of a waste heat recovery system using Organic Rankine Cycle. **Energy**, 2010.

SAIDUR, R. et al. Energy and emission analysis for industrial motors in Malaysia. **Energy Policy**, 2009.

SAIDUR, R. et al. Applications of variable speed drive (VSD) in electrical motors energy savings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2012.

SILVA, R. R. DA; MATHIAS, F. R. D. C.; BAJAY, S. V. Potential energy efficiency improvements for the Brazilian iron and steel industry: Fuel and electricity conservation supply curves for integrated steel mills. **Energy**, v. 153, p. 816–824, 2018.

SLOAT, D. G.; GAIKWAD, R. P.; CHANG, R. L. The potential of pulse-jet baghouses for utility boilers part 3: Comparative economics of pulse-jet baghouse, precipitators and reverse-gas baghouses. **Air and Waste**, 1993.

STARK, T. Five ways to improve your pulse-jet baghouse performance. **Powder and Bulk Engineering**, dez. 2011.

STARK, T. Standard Fabrics Used in Utility Coal-Fired Boiler Applications. **Real World Performance Results of Fabric Filters on Utility Coal-Fired Boilers**, p. 9, 2012.

TANABE, E. H. et al. Experimental investigation of deposition and removal of particles during gas filtration with various fabric filters. **Separation and Purification Technology**, v. 80, n. 2, p. 187–195, 2011.

TAO, F. et al. Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment. **CIRP Annals**, 2018.

THEODORE, L. **Air pollution equipment control calculations**. [s.l.] Wiley, 2008.

TOMSIC, J. L. **Dictionary of Materials and Testing**. [s.l.] SAE International, 2000.

TURBODEN. **Waste Heat Recovery**. Disponível em: <<https://www.turboden.com/applications/1053/waste-heat-recovery>>. Acesso em: 3 mar. 2019.

UNIDO. **Motor Systems Efficiency Supply Curves** United Nations Industrial Development Organisation (UNIDO), 2010.

US-DOE. **Fan System Optimization Improves Production and Saves Energy at Ash Grove Cement Plant**, 2002.

US-DOE; AMCA INTERNATIONAL. **Improving Fan System Performance: A sourcebook for industry**, 2003.

US-EPA. **Air Pollution Control Technology Fact Sheet: Dry Electrostatic Precipitator**, 1999.

US-EPA. **EPA Air Pollution Control Cost Manual**. 6. ed. North Carolina: [s.n.].

US-EPA. **Air Pollution Control Technology Fact Sheet: Cyclones**, 2003. Disponível em: <<http://infohouse.p2ric.org/ref/50/49195.pdf>>

US-EPA. **Particulate Matter (PM) Pollution**. Disponível em: <<https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>>. Acesso em: 1 mar. 2019.

VALERO, A. et al. CGAM problem: Definition and conventional solution. **Energy**, v. 19, n. 3, p. 279–286, mar. 1994.

VALLERO, D. A. **Fundamentals of Air Pollution**. 4. ed. [s.l.] Elsevier, 2008.

VATAVUK, W. M. **Section 2 - Generic Equipment and Devices: Hoods, Ductwork and Stacks.** [s.l: s.n.].

VERARDI, M. **Análise Do Escoamento E Da Geração De Ruído No Sistema De Ventilação Externo De Um Motor De Indução Trifásico.** [s.l.] UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, 2008.

VIANA, A. N. C. et al. **Eficiência Energética: Fundamentos E Aplicações.** 1. ed. Campinas: Elektro, 2012.

WAIDE, P.; BRUNNER, C. U. **Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems** *Energy Efficiency Series.* [s.l: s.n.].

WALSH, C.; THORNLEY, P. The environmental impact and economic feasibility of introducing an organic Rankine cycle to recover low grade heat during the production of metallurgical coke. **Journal of Cleaner Production**, 2012.

WANG, D.; LING, X.; PENG, H. Cost-effectiveness performance analysis of organic Rankine cycle for low grade heat utilization coupling with operation condition. **Applied Thermal Engineering**, v. 58, n. 1–2, p. 571–584, 2013.

WANG, H. et al. Organic Rankine cycle saves energy and reduces gas emissions for cement production. **Energy**, 2015.

WANG, Z. Q. et al. Fluid selection and parametric optimization of organic Rankine cycle using low temperature waste heat. **Energy**, v. 40, n. 1, p. 107–115, 2012.

WEG. **Eficiência energética em sistemas de despoeiramento com filtros de mangas,** 2012.

WITT, P. J. et al. Optimising the design of fume extraction hoods using a combination

of engineering and CFD modelling. **Applied Mathematical Modelling**, 2006.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Ambient Air Pollution: A global assessment of exposure and burden of disease** World Health Organization, 2016.

WORLD STEEL ASSOCIATION. **Overview of the steelmaking process**, 2013.

WORLD STEEL ASSOCIATION. **World Steel in Figures 2018**, 2018.

WORRELL, E. et al. Productivity benefits of industrial energy efficiency measures. **Energy**, v. 28, n. 11, p. 1081–1098, 2003.

XU, T.; SATHAYE, J.; GALITSKY, C. Development of Bottom-up Representation of Industrial Energy Efficiency Technologies in Integrated Assessment Models for the Iron and Steel Sector. **Lbnl**, n. August 2010, p. 209–213, 2010.

YILMAZ, O.; ANCTIL, A.; KARANFIL, T. LCA as a decision support tool for evaluation of best available techniques (BATs) for cleaner production of iron casting. **Journal of Cleaner Production**, v. 105, p. 337–347, 2015.

ZARE, V. A comparative exergoeconomic analysis of different ORC configurations for binary geothermal power plants. **Energy Conversion and Management**, v. 105, p. 127–138, 2015.